THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Économie

École doctorale EDEG – Économie et Gestion
Portée par

Unité de recherche INNOVATION – UMR 0951

Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France

Présentée par Eléonore SCHNEBELIN
Le 12 Juillet 2022

Sous la direction de Jean-Marc TOUZARD
Et Pierre LABARTHE

Devant le jury composé de

Mme Véronique BELLON-MAUREL, Directrice de recherche, INRAE	Examinatrice
M. Vincent FRIGANT, Professeur des universités, Université de Bordeaux	Examinateur
M. Philippe JEANNEAUX, Professeur, VetAgroSup	Rapporteur
M. Pierre LABARTHE, Directeur de recherche, INRAE	Co-directeur de thèse
Mme. Blandine LAPERCHE, Professeure des universités, Université Littoral Côte d'Opale	Rapporteure
M. Jean-Michel SALLES, Directeur de recherche, CEE-M	Président du jury
M. Jean-Marc TOUZARD, Directeur de recherche, INRAE	Directeur de thèse
M. Steven WOLF, Professeur associé, Cornell University	Examinateur

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Montpellier SupAgro

LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE DANS LES TRAJECTOIRES D'ÉCOLOGISATION DE L'AGRICULTURE EN FRANCE

ÉLÉONORE SCHNEBELIN

Thèse de doctorat

2022

Éléonore Schnebelin : *Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France,* Thèse de doctorat, © 2022

ENCADREMENT :
Jean-Marc Touzard
Pierre Labarthe

ÉCOLE DOCTORALE : École Doctorale Économie Gestion de Montpellier

LABORATOIRE DE RATTACHEMENT :
UMR INNOVATION 0951, INRAE Montpellier

LABORATOIRE D'ACCUEIL :
UMR AGIR 1248, INRAE Toulouse

FINANCEMENTS :
Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004. Il a également bénéficié d'un cofinancement par le département INRAE ACT « Sciences pour l'action, les transitions, les territoires ».

PUBLICATIONS

Revues à comité de lecture

Martin, Théo et Éléonore Schnebelin (soumis). « Agriculture numérique : une promesse au service d'un nouvel esprit du productivisme ? » In : *Natures Sciences Sociétés*.

Schnebelin, Éléonore (2022). « Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles ». In : *Ecological Economics* 196, p. 1-11. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2022.107422.

Schnebelin, Éléonore, Pierre Labarthe et Jean-Marc Touzard (2021). « How digitalisation interacts with ecologisation ? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System ». In : *Journal of Rural Studies* 86, p. 599-610. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.07.023.

Schnebelin, Éléonore, Jean-Marc Touzard, Pierre Labarthe et Isabelle Macaine (soumis). « Les coopératives face aux enjeux d'écologisation et de numérisation dans l'agriculture : l'exemple des caves coopératives en Occitanie ». In : *RECMA*.

Communications à comité de lecture

Schnebelin, Éléonore (2021a). « Quels profils d'usages du numérique pour quelle écologisation de l'agriculture ? L'exemple des exploitations céréalières d'Occitanie ». In : *15èmes Journées de Recherche en Sciences Sociales (JRSS)*. Société Française d'Économie Rurale.

– (2021b). « Usages du numérique et transition agro-écologique : l'exemple des exploitation céréalières d'Occitanie ». In : *10ème congrès annuel de l'Association Française d'Economie Politique (AFEP)*. Toulouse, France.

– (2021c). « Which digital uses for which ecologisation of agriculture ? The example of cereal farms in South-West France ». In : *European Association for Evolutionary Political Economy (EAEPE), 33rd conference*.

Schnebelin, Éléonore, Pierre Labarthe et Jean-Marc Touzard (2022). « Digital : A source of convergence or divergence between organic and conventional farming ? » In : *IFSA 2022 Conference*.

Rapports techniques

Schnebelin, Éléonore et Jean-Marc Touzard (A paraître). *Les caves-coopératives dans le processus de numérisation de l'agriculture*. Research Report. Cahiers du Développement Coopératif.

Schnebelin, Éléonore, Clara Valiente, Jean-Marc Touzard et Pierre Labarthe (2022a). *Usages du numérique en agriculture : enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie*. Research Report. Inrae, 25 p. DOI : 10.17180/PAET-HP37.

– (2022b). *Usages du numérique en agriculture : enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie - Synthèse*. Research Report. Inrae, 7 p. DOI : 10.17180/a9ar-nm04.

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes ont permis la réalisation de cette thèse, dans un contexte enrichissant et stimulant, tant d'un point de vue scientifique que personnel. Je souhaite ici adresser mes plus sincères remerciements à toutes ces personnes.

J'adresse en premier lieu mes remerciements à mes directeurs de thèse Jean-Marc Touzard et Pierre Labarthe, pour leur confiance, leurs conseils avisés et relectures attentives, et pour m'avoir communiqué leur enthousiasme envers la recherche. Je remercie Jean-Marc pour ses idées et remarques toujours pertinentes et pour son accompagnement amical. Je remercie Pierre d'avoir accepté ma présence non prévue et un peu envahissante, pour son implication, les moments de discussions et les trajets en automobile de Turin.

Je remercie Blandine Laperche, Philippe Jeanneaux, Vincent Frigant, Jean-Michel Salles, Steven Wolf et Véronique Bellon-Maurel d'avoir accepté d'être membres du jury de la thèse et d'apporter leur regard sur mon travail.

Mes plus sincères remerciements vont également à Laurens Klerkx, Aude Ridier, Olivier Naud et Leïla Temri, pour leur accompagnement en tant que membres de mon comité de suivi individuel de thèse. Les différents moments d'échanges et de discussion pluridisciplinaire avec eux ainsi que leurs conseils et remarques bienveillantes ont constitué une aide précieuse dans cette thèse.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance amicale à Clara Valiente pour son travail de grande qualité et sa compagnie toujours agréable. Merci également à Isabelle Macaine pour son travail de stage. Un grand merci à Delphine Jacquot (Atelier Khroma) pour son aide graphique.

Je remercie les diverses personnes que j'ai rencontrées tout au long de la thèse, et notamment les agriculteurs et agricultrices qui m'ont accordé de leur temps, m'ont accueillie avec bienveillance, et qui se sont ouverts sur leur quotidien, m'ont questionnée et parfois bousculée.

La thèse, au-delà d'une expérience scientifique, est aussi une expérience professionnelle et personnelle. Pour avoir rendu celle-ci si plaisante, je tiens à remercier les différentes équipes et communautés professionnelles dans lesquelles j'ai été intégrée.

La première est l'UMR Innovation. Merci à Virginie et Wendy, pour leur convivialité, leur aide et leur gentillesse, alors même que je ne leur facilitais pas la tâche. Merci à Sophie Burgel et Nicolas Castanier pour leur travail indispensable. Je remercie également toutes celles et ceux qui ont participé à l'animation de l'unité, et notamment pendant les périodes de confinement, durant lesquelles il a été si important d'avoir une vie scientifique riche et conviviale. Je remercie toute l'équipe SIRA et notamment l'équipe d'animation, ainsi que Nicolas Paget et Chloé Alexandre pour les échanges sur nos thématiques de recherche. Un grand merci également à l'équipe des doctorant(e)s, très dynamique et accueillante, qui a rendu mes séjours à

Montpellier toujours agréables. Merci notamment à Théo, Simon, Anaïs, Orlane, Véronique, Marc (x2), Pierre, Servane, Clara, Chloé, Teatske, Quentin, Marylin, Marie et tou(te)s les autres. Un grand merci à Théo Martin pour notre travail en collaboration, pour ses relectures et ses conseils, et pour nos moments de « réflexivité ». Mes pensées se tournent vers Servane, que je remercie pour les échanges et à qui j'adresse mon soutien sincère.

La seconde est l'UMR AGIR. Merci à mes collègues pour les échanges scientifiques, que ce soit lors des Odycée Paper, des séminaires du lundi en interdisciplinarité, et des réunions d'équipes qui étaient autant d'occasion de découvrir des travaux de recherche intéressants et stimulants, qui ont bien souvent nourris mon travail. Pour ces échanges, ainsi que pour avoir créé une atmosphère de travail bienveillante, je tiens à remercier Pascale, Gaël, Nathalie, Camille, Amélie, Marie-Benoît, Antoine, Pierre, Danielle, Thomas, Héloïse, Tristan, Sophie, Olivier, Aïcha, Mathieu, Madelleine, Julien et tout le reste de l'équipe. Merci à Guillaume Martin pour le regard agronomique. Merci à Olivier Pauly pour ses conseils sur R et les statistiques. Je remercie également le pôle administratif. Merci également à Daphe goodfellow pour la formation d'écriture en anglais et ses relectures. Un énorme merci aux doctorant(e)s, post-doc et CDD pour les nombreux échanges, scientifiques ou non, qui ont rendu le travail de thèse plus collectif et qui ont grandement participé à ma culture scientifique : merci à Cathy, Sophie, Hugo, Marine, Cécile, Gaëtan, Augustine, Julien, Solène, Rémi, Eulalie, Camille. Merci à Léo Magnin pour ses relectures. Ma reconnaissance va à Noémie Bechtet pour ses relectures, son soutien et pour nos nombreuses discussions, c'était un grand plaisir de travailler ensemble !

J'ai également une pensée pour les membres du collectif ADO avec lesquels j'ai partagé les pauses café et discussions de couloir, et notamment Manoel, Gabriel, Justine et Nirina. Merci à Justine et Nirina pour leur aide à l'utilisation de LateX. Justine, c'était un grand plaisir de gravir presque en parallèle nos différentes étapes de thèse.

Le travail présenté ici n'aurait pas pu voir le jour sans le département ACT de l'INRAE, cofinanceur de ce travail de recherche mais aussi lieu de formations et d'échanges professionnels qui ont structuré ma recherche. Un grand merci au collectif des journées des doctorant(e)s du département ACT : équipe d'organisation, animateurs et animatrices et doctorant(e)s. Ces journées ont constitué des moments de prise de recul et de réflexivité essentiels, mais aussi des bouffées d'air dans des moments parfois intenses. Merci également pour l'organisation des ateliers de rédaction d'article et notamment merci à Nathalie Girard, pour nous accompagner dans la construction de cet exercice scientifique si important et si complexe. Je remercie également le département pour l'organisation des Assemblées générales, durant lesquelles a commencé cette thèse et durant lesquelles elle se termine.

L'Institut de Convergence DigitAg a constitué également une communauté de recherche structurante. D'une part, pour le cofinancement de la thèse. D'autre part pour les différents événements, séminaires, conférences qui m'ont permis de me familiariser avec le côté technique du numérique et d'appréhender ce que recouvre l' « agriculture numérique ». Et enfin, pour les rencontres avec des doctorant(e)s, avec lesquels j'ai pu échanger et notamment Louis, Ysé, Boris, Chloé, Corentin et Etienne.

Pendant cette thèse, j'ai eu la chance de donner des cours et de commencer à découvrir l'enseignement. Pour cela, merci à Aurélie Javelle et Hugo Fernandez Mena à SupAgro, et à Gabriel Colletis à l'Université de Toulouse.

J'ai également eu la chance de participer à l'organisation d'un colloque scientifique (avec quelques rebondissements...) et d'en découvrir les rouages. Je remercie toute l'équipe d'organisation de l'AFEP, notamment Gaël Plumecock et Arnaud Buchs et l'équipe des doctoriales : Noémie, Hugo et Gaëtan.

Merci également à toute l'équipe du projet de recherche POLMA, qui m'a donné la possibilité de découvrir d'autres approches, d'autres travaux et qui m'a offert des espaces d'échanges stimulants. Merci notamment à Thomas Borrell, à Jeanne Oui, ainsi qu'à Joël et Sandra.

Merci à toutes celles et ceux qui m'ont accueillie lors de mes séjours Montpelliérains. Merci à Chloé, qui m'a beaucoup aidée quand je commençais la thèse. Merci à Simon et Pauline, à Théo et Emilie, à Anaïs, à Amélie, à César, à Claire, à Clara, à Marie, à Marc et à Quentin.

Je dois aussi beaucoup à tout mon entourage amical et familial. Je remercie mes ami(e)s de Fougères, pour leur amitié si importante et qui m'accompagne depuis toujours. Élise, après le lycée, la prépa et l'agro, je t'attends pour qu'on fasse un projet de recherche ensemble ! Merci Juliette et Alice, pour votre aide à prendre la décision de me lancer dans la thèse et pour votre amitié unique. Merci à tou(te)s mes ami(e)s de l'Agro pour tous ces beaux moments, ces randos et via ferrata, ces dégustations de vin... et pour vos connaissances incroyables sur les arbres, les plantes, l'agronomie etc. Merci à Oriane pour les pauses déjeuner et café en télétravail. Merci à tous les copains et copines de la grimpe, de Toulouse, de Rennes et d'ailleurs, pour les nombreuses escapades qui aident à prendre de la hauteur. Merci au club Aranha pour les cours de Jiu Jitsu Brésilien qui m'ont permis de bien me défouler pendant les derniers mois de thèse. Mes remerciements émus vont vers la grande famille Chevreul pour tous ces moments incroyables. Merci notamment à celles et ceux qui étaient là pendant ces derniers mois intenses : Kim, Delphine, Céline, Steeve, Axel, Paul : merci pour votre soutien, vos gâteaux, vos écoutes de mes présentations, merci aussi pour tous ces beaux moments de partage.

Avec toute mon affection, je remercie l'ensemble de ma famille. Merci à mes parents pour leur soutien infaillible et la liberté qu'ils m'ont offert dans mes choix et décisions. Merci à mon frère de m'avoir ouvert des voies, dans tous les sens du terme. Merci à ma petite sœur de rendre ma vie plus lumineuse, dans tous les sens du terme. Même si je souhaite que tu n'aies plus besoin de rester ici encore longtemps, c'était un vrai plaisir de t'avoir à mes côtés pendant ces dernières semaines de rédaction. Je suis contente de pouvoir être un peu ton bras droit. Et merci pour tous ces moments de rire et d'émotion à travers les spectacles que tu me fais voir.

Merci à Paul d'être mon compagnon de cordée, mon cobaye de JJB, mon humoriste préféré, mon cuistot et livreur... d'être tout simplement mon coéquipier indispensable.

Toutes les erreurs ou omissions sont de ma seule responsabilité.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

1 Modernisation et écologisation de l'agriculture 4
1.1 La modernisation de l'agriculture 4
1.2 L'intégration de l'enjeu environnemental 6
2 Le développement du numérique en agriculture 9
2.1 Le numérique en agriculture : un bref historique 9
2.2 Le numérique en agriculture aujourd'hui 10
3 Numérique et écologisation de l'agriculture 11
3.1 La numérisation de l'agriculture pour répondre aux grands enjeux ? 12
3.2 Une solution controversée 12
4 Problématique et déroulé de la recherche 13
4.1 Front de recherche et problématique 13
4.2 Positionnement épistémologique et ancrage théorique . 15
4.3 Plan 17

Chapitre 1

1 VERS UNE AGRICULTURE NUMÉRIQUE ? 23
Introduction du chapitre 23
1 Le numérique en agriculture 23
1.1 Qu'est-ce que le numérique ? 23
1.2 Qu'est-ce que le numérique en agriculture ? 31
2 La digitalisation du secteur agricole 37
2.1 Des modifications à l'échelle des acteurs du secteur agricole 37
2.2 Politiques publiques et développement du numérique . 42
2.3 Usages du numérique 44
3 Les controverses sur le numérique et l'écologie dans l'agriculture 46
3.1 Le numérique et l'écologie 47
3.2 Controverses dans le domaine agricole 49
3.3 Controverses sur le numérique et les voies d'écologisation 54
Conclusion du chapitre 55

Chapitre 2

2 UNE ÉCONOMIE POLITIQUE DE L'INNOVATION POUR ANALYSER LA DIGITALISATION ET L'ÉCOLOGISATION DE L'AGRICULTURE 59
1 Croiser économie de l'innovation et économie politique 60
1.1 La digitalisation et l'écologisation de l'agriculture comme processus d'innovation 61
1.2 Une approche systémique de l'innovation : analyse de ces processus dans le cadre d'un système d'innovation . 65
1.3 Choix d'une approche en économie politique du système d'innovation agricole 74
2 Spécification du cadre d'analyse 81
2.1 Un système d'innovation agricole hétérogène : une diversité de paradigmes 81

2.2 Une analyse de l'innovation par les modèles, les pratiques et les usages . . . 87
2.3 Interactions entre échelles . . . 91
3 Question de recherche et stratégie empirique . . . 95
3.1 Synthèse du cadre d'analyse et question de recherche . 96
3.2 Implications méthodologiques . . . 99
Conclusion du chapitre . . . 104

Chapitre 3

3 LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE DANS LE SYSTÈME D'INNOVATION AGRICOLE 107
Introduction du chapitre . . . 107
Contexte et historique de l'article . . . 107
Opérationnalisation du cadre d'analyse . . . 109
Enjeux pour la thèse . . . 111
Article . . . 113
1 Introduction . . . 114
2 Revisiting the digitalisation process through an institutional analysis of the agricultural innovation system . . . 116
2.1 Analytical framework: relations between digitalisation and the four dimensions of innovation systems . . . 116
2.2 Organic and conventional paradigms . . . 119
2.3 Material and Methods . . . 120
3 Results . . . 123
3.1 A diversity of expectations partly linked to organic vs conventional paradigms . . . 123
3.2 Knowledge and technologies at the heart of digitalisation for conventional and organic organisations . . . 125
3.3 Different strategies regarding partnerships with digital actors . . . 127
3.4 Digital actors do not perceive heterogeneity within AIS 128
3.5 The crucial issue of perceived risks by actors from the two paradigms . . . 129
4 Discussion . . . 130
4.1 Digitalisation beyond paradigms . . . 130
4.2 A diversity of desired trajectories of digitalisation . . . 132
4.3 Enriching the analysis of digitalisation of AIS by taking heterogeneity and power relations into account . . . 133
Conclusion du chapitre . . . 135
Synthèse . . . 135
Perspectives . . . 137

Chapitre 4

4 LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE DANS LES EXPLOITATIONS AGRICOLES 141
Introduction du chapitre . . . 141
Contexte et historique de l'article . . . 142
L'exploitation agricole : composante d'un système d'innovation 143
Les technologies numériques dans les exploitations agricoles . 145
L'agroécologie dans les exploitations agricoles . . . 152

Construction des hypothèses . . . 152
Enjeux pour la thèse . . . 154
Article . . . 155
1 Introduction . . . 155
2 Background on digitalisation and ecologisation . . . 157
2.1 Linking Use Profiles to Agricultural Models . . . 157
2.2 Ecologisation and Digitalisation Trajectories . . . 158
2.3 How Digitalisation can link to Ecologisation Trajectories 160
3 Research Method . . . 161
3.1 A Mixed Method for a Better Understanding of interrelations between Digitalisation and Ecologisation . . . 161
3.2 The Occitanie Region as a Field of Study . . . 162
4 Results of Cluster Analysis . . . 162
4.1 Survey Description . . . 162
4.2 Use Profiles for Digital Technologies for Production (DTP) 164
4.3 Use Profiles of Digital Technology for Information and Communication (DTC) . . . 165
5 Qualitative Insights and Discussion of Results . . . 166
5.1 Digital Technologies for Production, Industrialisation and Ecologisation . . . 166
5.2 Digital Technologies for Information and Communication, Knowledge and Ecologisation . . . 171
5.3 Understanding Use Profiles Highlights Trajectory Mechanisms . . . 172
6 Conclusion . . . 174
Conclusion du chapitre . . . 176
Usages du numérique et écologisation . . . 176
La digitalisation : une trajectoire imposée, désirée ou contestée ? 179
Apports et perspectives . . . 183

Chapitre 5

5 LE RÔLE DES COOPÉRATIVES DANS LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE 187
Introduction du chapitre . . . 187
Contexte et historique de l'article . . . 188
Les intermédiaires dans les systèmes et processus d'innovation 189
Opérationnalisation . . . 191
Enjeux pour la thèse . . . 193
Article . . . 195
1 Introduction . . . 195
2 Une représentation duale des caves coopératives : systèmes d'acteurs et institutions . . . 196
3 Une enquête sur les caves-coopératives d'Occitanie . . . 197
4 Les coopératives au cœur de plusieurs formes d'écologisations de la viticulture . . . 199
5 De nouveaux rôles liés au développement du numérique en viticulture . . . 201
6 Une fonction d'intermédiaire pour combiner la digitalisation et l'écologisation . . . 202

7 Digitalisation et écologisation modifient les relations entre et avec les adhérents . . . 205
8 Conclusion . . . 206
Conclusion du chapitre . . . 207
Synthèse sur le rôle des caves coopératives . . . 207
Diversité des trajectoires des caves coopératives . . . 210
Complément d'analyse à partir des grandes cultures . . . 214
Apports et perspectives . . . 218

Discussion générale

6 DISCUSSION GÉNÉRALE 221
Introduction du chapitre . . . 221
1 Ce que la thèse nous apprend sur les interactions entre digitalisation et écologisation . . . 222
1.1 Des trajectoires de digitalisation liées aux modèles de production agricole . . . 222
1.2 La digitalisation comme poursuite des transformations historiques du secteur agricole . . . 226
1.3 Oppositions, coexistence ou combinaisons entre digitalisation et écologisation . . . 235
2 Les enseignements de la thèse au niveau théorique et méthodologique . . . 242
2.1 Apports théoriques : prise en compte des usages et de l'hétérogénéité au sein d'un système d'innovation . . . 242
2.2 Apports et limites méthodologiques de la thèse . . . 249
Conclusion du chapitre . . . 252

Conclusion

1 Les trajectoires de digitalisation de l'agriculture . . . 257
2 Perspectives . . . 260
2.1 Confronter et comparer les résultats pour une analyse globale des transformations de l'agriculture . . . 260
2.2 Analyser les processus et les mécanismes de la digitalisation . . . 262
2.3 Analyser les dynamiques et les trajectoires . . . 263
2.4 Intégrer l'hétérogénéité et les rapports du pouvoir dans les politiques d'innovation . . . 264

BIBLIOGRAPHIE 267

Annexes

1 Questionnaires agriculteurs . . . 303
2 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour la Production (TNP) . . . 320
3 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour l'Information et la Communication (TNC) . . . 321
4 Annexe de l'article Ecological Economics . . . 322
5 Précisions sur les usages de certaines technologies numériques 346
6 Compte-rendu agriculteurs . . . 348
7 Compte-rendu agriculteurs - Synthèse . . . 376
8 Grille d'entretien pour les caves coopératives . . . 383

9 Synthèse des entretiens sur le rôle des caves coopératives 386
10 Article de la revue Cahiers du développement coopératif 388
11 Article complémentaire 395

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Typologie des technologies d'agriculture de précision . 35
Figure 2.1 Approche du système d'innovation agricole développée dans la thèse 98
Figure 2.2 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 3 100
Figure 2.3 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 4 102
Figure 2.4 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 5 104
Figure 3.1 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 3 112
Figure 4.1 Localisation géographique des exploitations agricoles enquêtées 144
Figure 4.2 Interface d'un logiciel de gestion parcellaire (plan de fumure) 149
Figure 4.3 Interface d'un logiciel de gestion parcellaire (cartographie de l'exploitation) 149
Figure 4.4 Interface d'une station météo connectée (météo du jour) 150
Figure 4.5 Interface d'une station météo connectée (bilan pour une culture) 150
Figure 4.6 Interface d'une station météo connectée (accès aux stations en réseau) 150
Figure 4.7 Cartographie à partir des données d'un contrôleur de rendement 151
Figure 4.8 Cartographie de modulation d'engrais azoté 151
Figure 4.9 Bilan d'un OAD traitement pour un blé tendre d'hiver 152
Figure 4.10 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 4 154
Figure 4.11 R classification results 163
Figure 5.1 Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 5 194
Figure 5.2 Localisation géographique des caves-coopératives et des exploitations viticoles enquêtées 198
Figure 5.3 Cave de la coopérative C 199
Figure 5.4 Une bouteille de la coopérative J 200
Figure 6.1 Stockage de matériel agricole dans une exploitation et entreprise de travaux agricoles 230

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1 Technologies numériques le long de la chaîne de valeur agri-alimentaire 32
Table 1.2 Typologies des technologies numériques en agriculture 36
Table 3.1 Événements sur le numérique en agriculture 108
Table 3.2 Analytical framework 118
Table 3.3 List of interviewees 121
Table 3.4 Summary of actors' key perceptions and enactment of digitalisation 124
Table 4.1 Outil d'aide à l'identification de profils agroécologiques et numériques contrastés 143
Table 4.2 Descriptive statistics – Quantitative variables 163
Table 4.3 Descriptive statistics – Qualitative variables 163
Table 4.4 Cross-referencing digital use profiles 164
Table 4.5 Synthesis of the ties between digital technology for production use profiles and variables 167
Table 4.6 Synthesis of the connections between DTC use profiles and variables 168
Table 5.1 Caractéristiques des caves coopératives enquêtées (2020) 198
Table 5.2 Engagement des caves coopératives dans des démarches environnementales 201
Table 5.3 Outils numériques dans les caves coopératives 203
Table .1 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour la Production (TNP) 320
Table .2 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour l'Information et la Communication (TNC) 321

ACRONYMES

AB = Agriculture Biologique
ACTA = Association de Coordination Technique Agricole
ACI = Alliance Coopérative Internationale
ADEME = Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AG = Assemblée Générale
AGIR = AGroécologie, Innovations et TeRritoires
AIS = Agricultural Innovation System
AKIS = Agricultural Knowledge and Innovation System
ANR = Agence Nationale de la Recherche
ANRT= Association nationale de la recherche et de la technologie
AOP = Appellation d'Origine Protégée
CAP = Common Agricultural Policy
CETA = Centre d'Études Techniques Agricoles
CGAAER = Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux
CRC®= Culture Raisonnée Contrôlée
CUMA = Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
DAIS = Digitalisation of Agricultural Innovation Systems
DGPS = Differential Global Positioning System
DSS = Decision Support System
DST = Decision Support Tool
DTC = Digital Technology for information and Communication
DTP = Digital Technology for Production
EAEPE = European Association for Evolutionary Political Economy
EHESS = École des Hautes Études en Sciences Sociales
EIP = European Innovation Partnership
ESA = École Supérieure d'Agricultures d'Angers
ESR = Efficience-Substitution-Reconception
ESS = Économie Sociale et Solidaire
ETA = Entreprise de Travaux Agricoles
EU = European Union
FAO = Food and Agriculture Organization
FIRA = Forum International de la Robotique Agricole
FNCUMA = Fédération Nationale des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole
FNSEA = Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles
GAFAM = Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft
GHG = Greenhouse Gas emissions
GIEE = Groupements d'Intérêt Économique et Environnemental
GNSS = Global Navigation Satellite Systems
GPS = Global Positioning System
HCA = Hierarchical Cluster Analysis
HCPC = Hierarchical Clustering on Principle Components
HVE = Haute Valeur Environnementale
ICT = Information and Communication Technology

IFOAM = International Federation of Organic Agriculture Movements
IFSA = International Farming Systems Association
IFV = Institut Français de la Vigne et du Vin
IGP = Indication Géographique Protégée
INRA = Institut National de la Recherche Agronomique
INRAE = Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
INRIA = Institut National de Recherche en sciences et technologies du numérique
IRSTEA = Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IoT = Internet of Things
IPM = Integrated Pest Management
IT = Information Technology
JRSS = Journées de Recherche en Sciences Sociales
LFD = La Ferme Digitale
MAEC = Mesures Agro-Environnementales et Climatiques
MCFA = Multilevel Confirmatory Factor Analysis
MOOC = Massive Open Online Course
NJAS = Wageningen Journal of Life Sciences
OAD = Outil d'Aide à la Décision
OECD = Organisation for Economic Co-operation and Development
ONVAR = Organisations Nationales à Vocation Agricole et Rurale
OTEX = Orientation Technico Économique des Exploitations
PAC = Politique Agricole Commune
PADAC = Plateformes numériques dans le secteur agricole et dynamiques de l'action collective
PBS = Production Brute Standard
PIA = Programme d'Investissements d'Avenir
RECMA = Revue internationale de l'économie sociale
RGA = Recensement Général Agricole
RSE = Responsabilité Sociétale des Entreprises
RTK = Real Time Kinematic (Cinématique temps réel en français)
SAU = Surface Agricole Utilisée
SAFER = Sociétés d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural
SFER = Société Française d'Économie Rurale
SGP = Standard Gross Production
SHS = Sciences Humaines et Sociales
SI = Système d'Innovation
SIA = Salon International de l'Agriculture
SIC = Société d'Intérêt Coopératif
SIMA = Salon International du Machinisme agricole ou Salon international des solutions et technologies pour une agriculture performante et durable
SITEVI = Salon international des équipements et savoir-faire pour les productions vigne-vin, olive, fruits-legumes
SSI = Système Sectoriel d'Innovation
SSIP = Système Sectoriel d'Innovation et de Production
STI = Système Technologique d'Innovation
SYAL = Système Agroalimentaire Localisé
TIC = Technologies de l'Information et de la Communication

TNC = Technologies Numériques d'information et de Communication
TNP = Technologies Numérique de Production
UAA = Utilised Agricultural Area
UML = Unified Modeling Language
UMR = Unité Mixte de Recherche
UIT = Union Internationale des Télécommunications
VDD = Vignerons Développement Durable
VRT = Variable Rate Technology

La thèse qui va suivre ne cherche pas à étudier les spécificités autour de la question du genre et de l'agriculture (bien que ce sujet amènerait des pistes de travail intéressantes). C'est pourquoi dans le présent document, les termes employés pour désigner des personnes (notamment le terme agriculteurs) sont pris au sens générique ; ils ont à la fois valeur d'un féminin et d'un masculin. Cet usage a pour but de faciliter la lecture et n'a aucune intention discriminatoire.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Dans de nombreux discours commerciaux ou politiques, et plus largement dans les médias, le développement des technologies numériques est présenté comme solution aux enjeux actuels de l'agriculture, promettant un avenir meilleur pour les agriculteurs et agricultrices, ainsi que des bénéfices pour la société dans son ensemble (Bournigal et al., 2015 ; CoFarming, 2017 ; Lajoie-O'Malley et al., 2020). Le numérique permettrait d'améliorer les conditions du travail agricole et la rentabilité des exploitations, de dégager plus de temps libre et de simplifier certaines tâches, de mieux gérer les risques ou encore de favoriser les échanges avec les consommateurs... À l'échelle de la société, les promoteurs du numérique annoncent que ces innovations peuvent répondre au double enjeu de nourrir la planète et de respecter l'environnement. Au-delà des discours, l'agriculture numérique mobilise aussi des ressources. Le Plan France 2030 propose une « *révolution de la connaissance du vivant* » en agriculture à partir de la robotique, du numérique, de la génétique et du biocontrôle, financé à hauteur de 2,3Md d'euros. Ainsi, la « French AgriTech » lancée en Août 2021 par le ministère de l'agriculture et le secrétariat général de la transition numérique, consacre 200M€ pour financer la « *révolution numérique* » (Ministère de l'agriculture, 2022). Le 4ème plan d'investissements d'avenir dédie 428 millions d'euros pour « *développer des solutions innovantes au service de la résilience et de la compétitivité du monde agricole et de l'industrie agro-alimentaire dans la transition agroécologique* » (PIA4, 2021). Les financements privés dans le domaine augmentent de manière exponentielle (Damave, 2017) et la recherche se structure autour de projets de plus en plus nombreux dans le domaine, à l'instar de l'institut de convergence DigitAg et des nombreuses thèses qu'il finance.

Pour autant, les connaissances disponibles actuellement sur les usages du numérique et la capacité de ces technologies à tenir les promesses annoncées sont peu nombreuses, et la question des apports réels du numérique à l'agriculture reste ouverte. Des discours critiques émergent peu à peu et viennent remettre en question ce « solutionnisme techno-scientifique » (Fairbairn et Guthman, 2020 ; Ingram, Maye et al., 2022). Ils restent eux aussi peu documentés scientifiquement, ou sont souvent focalisés sur des enjeux politiques comme le contrôle des données ou la dénonciation de nouvelles dépendances technologiques pour l'agriculture.

Ma thèse interroge ce que l'agriculture et le numérique se font l'un à l'autre, en déclinant à l'échelle sectorielle « *l'une des principales questions d'économie politique de notre temps : qu'est-ce que le capitalisme et le numérique se font l'un à l'autre ?* » (Durand, 2020, p.12). Je propose de contribuer à ce débat en m'éloignant des discours et des promesses pour étudier les représentations, les usages et les transformations de pratiques qu'amène le développement du numérique dans le secteur agricole. Je m'intéresserai plus particulièrement à préciser comment ces innovations interagissent avec l'intégration des enjeux environnementaux dans l'agriculture. En effet, bien que la transition écologique de l'agriculture soit reconnue comme nécessaire et que le développement des technologies numériques soit proposé comme une réponse

à cet enjeu, les liens entre ces deux processus sont peu étudiés. Ma thèse vise à étudier ces liens, au cœur des transformations contemporaines de l'agriculture, en mobilisant le cadre d'analyse de l'économie institutionnelle et des travaux sur les systèmes d'innovation. Cette perspective apparaît pertinente pour étudier les interrelations entre les trajectoires technologiques et les transformations plus globales d'un secteur (Amable, 2000 ; Malerba, 2004).

1 Modernisation et écologisation de l'agriculture

Afin de situer le propos de ma thèse dans son contexte historique et économique, cette section décrit brièvement les grandes transformations de l'agriculture française de la seconde moitié du XXème siècle à aujourd'hui.

1.1 La modernisation de l'agriculture

Dans la seconde moitié du XXème siècle, la modernisation de l'agriculture française répondait à un projet politique visant à augmenter la production agricole tout en libérant de la main-d'œuvre, dans un contexte de menace de pénurie alimentaire et de besoins importants en force de travail dans le secteur secondaire, au sortir de la seconde guerre mondiale (Flamant, 2010 ; Servolin, 1989). S'y sont ajoutés des objectifs de stimuler la croissance, de libérer du pouvoir d'achat en réduisant les coûts d'alimentation ou encore de renforcer la balance commerciale de la France grâce aux exportations agroalimentaires (Allaire et R. Boyer, 1995 ; Bartoli et Boulet, 1989).

Afin d'atteindre ces objectifs, une diversité de dispositifs et de ressources ont été mis en œuvre, mobilisant les différentes dimensions de ce que l'on peut conceptualiser comme le système d'innovation agricole (recherche, expérimentation, diffusion de connaissances, mais aussi régulations, institutions, technologies etc.). Des moyens sont mobilisés afin d'assurer le développement et la diffusion de connaissances nécessaires à la modernisation agricole. L'Institut national de recherche agronomique (INRA) est créé à cet effet en 1946. Les instituts techniques, les écoles d'agronomie, les lycées agricoles, les chambres d'agriculture, les Centre d'Études Techniques Agricoles (CETA) et groupements de vulgarisation agricole accompagnent la diffusion et la mise en œuvre de ces connaissances (Gerbaux et P. Muller, 1984). Des évolutions politiques, juridiques et financières permettent de concilier l'objectif de compétitivité avec le maintien des structures familiales de production, par de nouvelles règles d'accès au crédit, de régime de succession, de droit foncier (statut du fermage en 1946) et de contrôle du marché du foncier par les sociétés d'aménagement foncier et d'établissement rural (SAFER) [1] (Boinon, 2011 ; Gueslin, 1988). La modernisation est également façonnée par des politiques de soutien des prix, jusque dans les années 60, qui permettent de limiter la volatilité des prix et de sécuriser les investissements. Ces politiques s'appuient sur la construction et la définition d'une agriculture dite « professionnelle », délimitée par des seuils en termes de taille, de travail ou de revenu, afin de cibler une population agricole bénéficiaire des politiques agricoles (Laurent

1. Les SAFER sont des organisations créées en 1960 par la loi d'orientation agricole, qui interviennent sur le marché foncier par la préemption et l'aquisition de terres. Les terres sont ensuite rétrocédées pour répondre aux objectifs fixés par la loi (installation d'agriculteurs, agrandissement de petites exploitations etc.) (Boinon, 2011)

et Rémy, 2000 ; Rémy, 1987). Elles ont ainsi promu un modèle d'exploitation familiale de taille moyenne (Boinon, 2011). Ces évolutions participent au mouvement d'intensification et d'accumulation qui caractérise cette période agraire, elle-même inscrite dans des évolutions structurelles plus larges, liées au développement du modèle fordiste de production et consommation de masse, favorisé par un rôle important de l'Etat et de nouvelles institutions, mais aussi l'évolution des systèmes de pensées et de représentations (Allaire, 1988).

Cette modernisation est permise et soutenue par l'innovation technologique dans l'agriculture et dans toute la chaîne de valeur, notamment la motorisation, la mécanisation, la chimisation et la sélection génétique (Mazoyer et Roudart, 2017). La génétique permet le développement de variétés intégrant les objectifs d'intensification de la production. Ces nouvelles variétés se combinent avec les engrais de synthèse et les pesticides, technologies issues de dynamiques intersectorielles avec le secteur de la chimie (Jas, 2001). Dans les exploitations agricoles, on assiste à une mécanisation des pratiques agricoles avec l'arrivée de la batteuse mécanique puis du tracteur, et d'un ensemble d'innovations machiniques diverses (matériel de fenaison, salles de traite, etc.). La recherche a notamment joué un rôle sur la mise en compatibilité de ces diverses innovations en génétique, mécanisation et chimisation (Kirat, 1991). En aval, les technologies de transport et de refroidissement permettent l'éloignement des zones de production et de consommation et donc la spécialisation territoriale. Ces diverses évolutions technologiques sont impactées et impactent en retour les marchés, les politiques agricoles et les organisations.

Ces évolutions politiques, économiques, juridiques et techniques ont encadré le développement d'un « modèle technico-économique de développement des exploitations » qui intègre toutes ces dimensions (Coulomb et Nallet, 1980). Ainsi les évolutions économiques et sectorielles se traduisent dans les pratiques agricoles, dans les structures des exploitations et dans l'organisation du secteur. La modernisation a amené une augmentation de la taille moyenne des exploitations (19Ha en 1970 à 69Ha en 2020), une diminution du nombre d'exploitations (1 588 000 en 1970 contre 389 000 en 2020) et de la population agricole (2,8% de la population française aujourd'hui)[2]. Le déploiement d'itinéraires techniques basés sur la chimie entraîne une simplification des rotations et la diminution des associations culturales (Mazoyer et Roudart, 2017). Les investissements amènent une augmentation de l'intensité en capital des exploitations (Gueslin, 1988). Dans les exploitations, les évolutions de pratiques amènent une augmentation des rendements (par exemple de 4T/Ha à 7T/Ha pour le blé) et de la consommation d'intrant (+ 60% en volume). De plus, cette dynamique d'intensification s'associe à une dynamique d'intégration des exploitations aux structures agro-industrielles ou commerciales d'amont et d'aval (Bartoli et Boulet, 1989). Les industries d'amont et d'aval, alors en pleine restructuration, impactent fortement le secteur agricole dans son organisation technique et spatiale, contribuant notamment à la spécialisation des exploitations et des territoires. Ces évolutions ont construit ce qu'on appelle aujourd'hui l'« agriculture conventionnelle » ou « l'agriculture productiviste », c'est-à-dire une agriculture intensive en capital, spécialisée, mécanisée, aux itinéraires techniques simplifiés et ayant

2. Les différentes données de ce paragraphe sont issues des recensements généraux agricoles du Ministère de l'Agriculture (Agreste)

un recours important aux intrants externes (pesticides, engrais, alimentation animale) (Beus et Dunlap, 1990).

La modernisation de l'agriculture a donc impliqué des évolutions dans les technologies, les connaissances, les politiques publiques, les acteurs, les normes et institutions, et les exploitations agricoles elles-mêmes. Ces dimensions interagissent et évoluent conjointement, pouvant être analysées comme un système sectoriel d'innovation (Malerba, 2002) participant à la régulation et aux transformations de l'agriculture. Les travaux en économie se sont intéressés à l'étude de ces différentes dimensions pour analyser les évolutions historiques du secteur agricole (Allaire et R. Boyer, 1995 ; Mazoyer et Roudart, 2017) et ses transformations plus récentes (Berriet-Solliec, 1997 ; Labarthe, 2006 ; Trouvé, 2007).

Cependant, ce modèle dit « productiviste » rentre en crise structurelle dans les années 80-90 avec des surproductions fréquentes mais aussi des critiques qui prennent de l'ampleur à la fois sur des dimensions de santé, de sécurité sanitaire ou encore d'environnement (Ansaloni et A. Smith, 2021). Cette crise se traduit par des réorientations des politiques agricoles, des changements dans la réglementation, mais aussi dans l'organisation des filières et les modèles de production (Touzard et Labarthe, 2016). Ce changement est parfois défini comme la mise en œuvre d'une « économie de la qualité » dans le secteur agricole (Allaire, 2002). La qualité recouvre plusieurs dimensions dont la qualité environnementale. Des critiques environnementalistes sont formulées à l'encontre de ce modèle agricole productiviste, notamment par l'agronome René Dumont en France (Séjeau, 2004). La dimension environnementale va petit à petit prendre de l'ampleur dans les débats, les attentes sociétales, les recherches, les politiques et les pratiques, dans un processus que je qualifie d'écologisation de l'agriculture.

1.2 L'intégration de l'enjeu environnemental

L'environnement, et plus précisément l'agroécosystème, est vu comme un support pour les activités productives par les théoriciens de la modernisation agricole. Le paradigme épistémologique dominant sur lequel se développe l'agronomie au XXème siècle réduit les agroécosystèmes à des « *systèmes chimiques dont on peut contrôler les entrées et les sorties* » (Cohen, 2017, p.54). Le vivant est vu comme une dimension à contrôler et maîtriser, à standardiser, afin d'appliquer une agriculture homogène et en restant maître des circonstances (Bonneuil et Hochereau, 2008). L'agriculture est vue comme un secteur parmi d'autres, qui nécessite d'être modernisé afin de s'insérer dans l'économie et les marchés globaux (Bartoli et Boulet, 1989). La modernisation est associée à une industrialisation, qui amène des formes de standardisation et conduit à adapter les milieux aux cultures plutôt que l'inverse (Caplat, 2014).

Mais l'absence de considération pour l'environnement ne signifie pas sa disparition. La sortie du livre *Silent Spring* de Rachel Carson (1962), qui met en évidence les effets des pesticides sur la biodiversité, met sur le devant de la scène la dimension environnementale de l'agriculture. L'environnement devient un objet de préoccupation sociétale puis un objet de responsabilité nationale dans les années 1970 avec la création du ministère de l'environne-

ment, avant de devenir un enjeu de négociation internationale à partir de la conférence de Rio de 1992 (Larrère et Vermersch, 2000). L'agriculture est alors souvent mise en avant comme contribuant non seulement à la perte de biodiversité mais également à la pollution des eaux, des sols et de l'air, au changement climatique et à la dégradation des sols. Pour répondre à ces enjeux, on assiste à une montée en puissance des débats sur l'écologisation de l'agriculture. Celle-ci peut se définir comme l'intégration croissante des enjeux environnementaux dans les pratiques, les savoirs et les politiques agricoles (Lamine, 2011 ; Lucas, 2021). Dans les politiques agricoles, ce tournant environnemental est initié avec l'Agenda 2000 et prend forme sous deux dimensions dans la Politique Agricole Commune (PAC). D'un côté, le principe d'éco-conditionnalité des aides, renforcé lors des réformes de 2006 et 2014, soumet l'obtention des aides du premier pilier de la PAC (aides au revenu) au respect de standards environnementaux minimaux (diversification des cultures, maintien de surfaces d'intérêt écologique etc.) (Avril, Ridier et Samson, 2021). D'un autre côté, le second pilier vise à « répondre aux besoins et problèmes spécifiques des zones rurales », dont la gestion des ressources, la protection des écosystèmes et la lutte contre le changement climatique. Malgré ce tournant, les aides seraient plus favorables aux exploitations ayant des pratiques moins durables d'un point de vue environnemental, notamment du fait du premier pilier, insuffisamment contrecarré par le deuxième (Kirsch, Kroll et Trouvé, 2017). La PAC structure ainsi des tensions entre enjeux productifs et enjeux environnementaux de l'agriculture. Les politiques publiques d'écologisation se basent essentiellement sur un référentiel de modernisation écologique, qui articule vision néolibérale et critique environnementale (Mesnel, 2018 ; Mormont, 2013).

À l'échelle des pratiques agricoles, ce tournant environnemental est multiforme. En effet, plusieurs modèles agricoles sont proposés et mis en œuvre afin de répondre aux enjeux environnementaux. Schématiquement, deux formes d'écologisation de l'agriculture se distinguent (Duru, Therond et Fares, 2015). D'un côté, un modèle d'optimisation propose d'améliorer l'efficience du système de production conventionnel afin de réduire ses externalités négatives sur l'environnement. D'un autre côté, un modèle de reconception propose d'appliquer les principes de l'écologie aux agrosystèmes, afin de stimuler les processus naturels (S. R. Gliessman, Engles et Krieger, 1998). Cela implique une transformation plus globale des systèmes agricoles et agri-alimentaires afin d'intégrer l'environnement non plus comme contexte et support à la production agricole mais comme une composante à part entière. Ce deuxième type d'écologisation peut être dénommé « agriculture basée sur la biodiversité » ou encore « agroécologie » (Wezel et al., 2009). La première voie est la solution qui semble plébiscitée par les acteurs du paradigme dominant de l'agriculture conventionnelle. La deuxième voie s'incarne en France notamment dans l'agriculture biologique. Cette dernière est considérée comme un des prototypes de l'agroécologie, qui s'est institutionnalisée (Bellon, Lamine et al., 2011). Ces différentes voies d'écologisation se retrouvent à l'échelle des pratiques individuelles, dans les exploitations agricoles ; mais également à l'échelle du secteur. En effet, des organisations et institutions orientent et cadrent ces types d'écologisation, que ce soit dans la production de connaissances, le conseil agricole, la représentation politique ou l'organisation des filières et des marchés.

Cette dualité cache une réalité bien plus complexe. Au sein de l'agriculture conventionnelle, on constate d'autres trajectoires : l'agriculture de conservation des sols en grandes cultures, le développement du pâturage et de l'autonomie alimentaire en exploitation laitière ou encore la mise en valeur du terroir avec les appellations d'origine en viticulture (que l'on peut voir comme une forme d'agroécologie, de par sa patrimonialisation de la nature et sa logique de production qui n'est pas seulement basée sur la quantité). Par ailleurs, l'agriculture biologique recouvre une diversité de courants, que l'on peut retrouver entre autres dans différentes mentions (Demeter, Nature & Progrès etc.) (Brechet et Schieb-Bienfait, 2006). En outre, face au succès de l'agriculture biologique, de plus en plus d'agriculteurs et agricultrices se sont embarqués dans ce modèle de production, suivant différents objectifs et différentes logiques, recouvrant une diversité de pratiques. On constate ainsi des formes de différenciation au sein de l'agriculture biologique. Cela est source de tensions au sein du secteur et de la société, et fait écho au débat scientifique autour de la conventionnalisation de l'agriculture biologique (Darnhofer et al., 2010 ; Stassart, Baret et al., 2012). Cependant la dichotomie agriculture biologique versus agriculture conventionnelle reste pertinente institutionnellement. D'une part l'agriculture biologique est facilement identifiable au travers du label qui la caractérise et des contraintes associées. D'autre part elle a une « base de connaissance » propre, des acteurs spécifiques, des réseaux, des politiques publiques, des organisations, des modes d'interaction, des processus d'apprentissage et des modes de régulations spécifiques (Ingram, 2018 ; Morgan et Murdoch, 2000). De plus, l'agriculture biologique porte un projet qui fait écho aux attentes sociétales actuelles et aux tendances politiques de réduction voire de suppression des pesticides de synthèse.

L'écologisation de l'agriculture est l'un des enjeux auxquels fait face l'agriculture, mais est loin d'être le seul. Ainsi, l'agriculture fait face également à d'autres enjeux économiques et sociaux tels que la rémunération et la qualité du travail, la transmission des exploitations, l'intégration aux zones péri-urbaines, l'entretien du paysage, sans oublier les enjeux majeurs de production d'une alimentation de qualité pour toute la population et celui de contribution à l'atténuation du changement climatique (Touzard, 2018). Or aujourd'hui le numérique vient bouleverser le secteur agricole, aussi bien au niveau des pratiques individuelles que des organisations collectives. Dans une période où l'agriculture fait face à des enjeux économiques, sociaux et environnementaux, où de nombreux travaux scientifiques affirment la nécessité de changer de modèle de production agricole, où la pression sociétale incite également à ce changement, il semble important de questionner ce développement du numérique au regard des évolutions souhaitées et en cours pour l'agriculture. Quel peut être le rôle des technologies numériques dans les transformations contemporaines du secteur agricole et comment analyser leur impact sur les différents modèles de production agricole ?

2 Le développement du numérique en agriculture

2.1 Le numérique en agriculture : un bref historique

En France, l'arrivée du numérique dans les exploitations peut être située dans les années 1980-1990, avec le développement du minitel puis de l'ordinateur (Pillaud, 2015). Le minitel a été le premier support numérique pour un ensemble d'applications permettant l'accès à des informations sur la météo, les prix agricoles ou encore l'accès à des conseils techniques et juridiques. Mais c'est avant tout pour la comptabilité-gestion, puis pour les déclarations administratives que les premières technologies numériques prennent leur essor (Mazaud, 2017). L'accès et l'usage de l'informatique par les agriculteurs ne se fait alors pas que dans une logique d'adoption individuelle mais aussi et surtout dans une logique d'évolution d'une communauté professionnelle. Ainsi, la majorité des agriculteurs dans les années 1990 utilisent un ordinateur via des intermédiaires tels que les centres de gestion, ou via un investissement collectif au sein de groupes d'agriculteurs (Bages, 1992). Le développement de ces usages est alors associé au développement de connaissances et de compétences, favorisé par les formes de sociabilité associées à ces usages. Ces technologies participent ainsi à la « professionnalisation » de l'agriculture, et renforcent le clivage au sein de la population agricole, s'adressant aux exploitations répondant à une logique d'entreprise (Bages, 1992).

En parallèle, aux États-Unis, des opportunités technologiques nouvelles se développent. C'est notamment l'autorisation pour un usage civil de certaines technologies militaires telles que les systèmes globaux de navigation par satellite (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) plus connus sous leur nom américain : GPS (Global Positioning System), qui créent de nouvelles potentialités technologiques (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). La technologie GNSS permet ainsi la conception de contrôleurs de rendements dont les premiers modèles sont commercialisés dès 1992. Le guidage des machines apparaît quelques années après, en Australie puis aux États-Unis, suivi par les technologies de coupure de tronçon [3] et les technologies de modulation d'intrants qui associent guidage et capteurs (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). Ces différentes technologies sont souvent regroupées sous le terme d'« agriculture de précision ». L'agriculture de précision, qui consiste à l'origine en la prise en compte de l'hétérogénéité intra-parcellaire, existe depuis les années 1920. Mais l'agriculture de précision telle que définie aujourd'hui, intègre l'utilisation des technologies numériques pour prendre en compte cette hétérogénéité spatiale et temporelle (Sulecki, 2018). Celle-ci se développe en France à partir de la fin des années 1990 (Oui, 2021b). Ce développement est notamment le fruit d'investissements de la part d'entreprises du domaine spatial (Airbus, Geosys...) qui se sont associées à des organisations du secteur agricole pour développer de nouveaux marchés (Labarthe, 2010).

Un autre domaine qui se développe en parallèle est celui de l'analyse des données, de la modélisation, et des outils d'aide à la décision associés. Les infrastructures d'observation et d'expérimentation évoluent vers une production massive de données, dont les analyses se centrent à partir des années

3. La technologie de coupure de tronçon est un dispositif qui ferme automatiquement certaines sections du pulvérisateur, semoir ou épandeur à engrais, afin d'éviter les recouvrements dans l'apport d'intrants.

1990 autour de spécialistes en mathématique et informatique appliquées (Oui, 2021b). Au départ destinée à la sphère académique, l'analyse de données massives s'intègre ensuite dans des outils et services de conseil établis en partenariat avec des entreprises et destinés aux professionnels du secteur agricole.

2.2 Le numérique en agriculture aujourd'hui

Aujourd'hui, le numérique en agriculture regroupe un ensemble de technologies variées.

D'une part, on a assisté à une généralisation de l'informatisation de la gestion administrative et financière des exploitations. La régulation des activités agricoles se complexifie et est de plus en plus associée avec un usage des technologies de l'information et de la communication (TIC) (Oui, 2021b ; Weller, 2006). Par exemple, les déclarations sanitaires sur les troupeaux ou les déclarations à la douane pour les productions de vin sont des processus informatisés. L'écologisation des régulations agricoles participe à cette dynamique, avec par exemple l'obligation d'enregistrement des traitements phytosanitaires. La politique agricole commune (PAC) joue aussi un rôle central dans l'informatisation des données agricoles, avec le développement de la télédéclaration PAC et la numérisation du paysage agricole (Magnin, 2019 ; Mesnel, 2017). Par ailleurs, l'usage d'Internet et des réseaux sociaux tend à se généraliser en agriculture comme dans le reste de la société. L'étude Agrinautes estime qu'en 2020, 86% des agriculteurs utilisaient quotidiennement internet et 68% consultaient les réseaux sociaux dans un but professionnel (Terre-net Média, 2021).

D'autre part, les technologies numériques, et notamment les technologies d'« agriculture de précision » se diffusent dans les exploitations françaises et européennes. On retrouve ainsi, dans les exploitations, une grande diversité de nouvelles technologies (Observatoire de l'agriculture numérique, 2022 ; Van Es et Woodard, 2017). Le guidage par technologie GNSS permet la conduite facilitée, semi-automatisée ou automatisée des machines agricoles et serait utilisé dans la moitié des exploitations françaises [4]. Les contrôleurs de rendement établissent des cartes de rendement et indiquent les hétérogénéités de résultat selon les zones. Environ 30% des agriculteurs en seraient équipés en France et 6% les utiliseraient. Les technologies de coupure de tronçon bloquent l'apport d'intrant là où un apport a déjà été fait lors d'un passage précédent afin d'éviter les zones de recouvrement. La modulation d'intrant est basée sur l'établissement de cartes reflétant l'hétérogénéité des parcelles. Celles-ci peuvent être construites à partir de photos satellites, de passages de drones ou encore via les cartes de rendement. Ces cartes ont pour objectif d'ajuster l'apport d'intrant en fonction des spécificités spatiales des zones intra-parcellaires, elles concerneraient environ 9% des surfaces en grandes cultures en France. La modulation d'intrant est principalement utilisée pour la fertilisation azotée, mais peut l'être également pour l'apport de semences ou de pesticides. Par ailleurs, un certain nombre de capteurs (humidité, vente, azote etc.) se sont développés. Ceux-ci peuvent alimenter

4. Les données sur les estimations d'usage en France indiquées dans ce paragraphe viennent de l'observatoire des usages de l'agriculture numérique (Observatoire de l'agriculture numérique, 2022)

des Outils d'Aide à la Décision (OAD) qui visent à apporter des informations ou recommandations sur les pratiques agricoles à partir de modélisations ou de prédictions basées sur des données. Les stations météo connectées et technologies d'irrigation connectées sont également largement répandues dans les exploitations agricoles. En revanche, les robots, bien que largement utilisés en élevage laitier, restent très rares en production végétale.

Le numérique en agriculture aujourd'hui recouvre ainsi une multiplicité de technologies.

Depuis quelques années, le nombre de technologies numériques et leurs usages augmentent, en parallèle d'investissements publics et privés importants (Damave, 2017). Les organisations agricoles internationales proposent des stratégies de développement du numérique (FAO et ITU, 2016). En France, le Rapport Agriculture Innovation 2025, publié en 2015, fait du numérique un axe central des politiques agricoles (Bournigal et al., 2015). Ce rapport définit trois grandes priorités pour l'innovation agricole : l'agroenvironnement, l'organisation des acteurs du système d'innovation, et enfin : les nouvelles technologies. Cette dernière est divisée en quatre axes : le numérique, la robotique, la génétique et le biocontrôle, qui sont restés les quatre piliers du programme politique agricole actuel (PIA4, 2021). Les propositions de l'axe numérique ont notamment mené à la constitution de la plateforme de données AgDataHub et à l'Institut de Convergence DigitAg, qui finance des recherches sur le numérique dans l'agriculture, dont la présente thèse. Aujourd'hui le Programme d'investissements d'avenir 4 (PIA4, 2021) propose 428 millions d'euros pour « *développer des solutions innovantes au service de la résilience et de la compétitivité du monde agricole et de l'industrie agro-alimentaire dans la transition agroécologique* »[5]. Une première vague d'aide, ouverte en Avril 2022, propose 20M€ pour subventionner entre 20 et 40% les investissements des agriculteurs dans du « *matériel connecté et innovant* » (Plein champ, 2022). Un foisonnement d'initiatives publiques et privées, de financements, de subventions et de projets de recherche visent à transformer le secteur agricole, dans une dynamique que certains qualifient de nouvelle révolution agricole (Walter et al., 2017). Pourtant, les usages actuels du numérique par les agriculteurs sont peu connus. Peu d'études identifient les perceptions et attentes des acteurs du secteur envers la digitalisation. Ses effets et implications sur l'organisation et la trajectoire du secteur, sur les systèmes de production agricole et leur trajectoires d'écologisation restent une « boîte noire ».

3 Numérique et écologisation de l'agriculture

Le développement des technologies numériques, et leur soutien public, sont justifiés par le fait qu'elles permettraient de faire face aux enjeux actuels de l'agriculture. Ces nouvelles technologies numériques permettraient notamment de concilier des objectifs en termes de productivité et d'environnement, mais également en terme de rentabilité économique, de gestion du risque et

5. Ces financements apparaissent donc comme significatifs par rapport aux financements publics du secteur agricole. À titre d'illustration, pour l'année 2011, les Organisations Nationales à Vocation Agricole et Rurale (ONVAR) ont été financées à hauteur de 3 millions d'euros, les chambres d'agriculture autour de 380 millions d'euros, et les instituts techniques pour presque 71 millions d'euros (CGAAER, 2014).

de gestion du travail (Walter et al., 2017). Pourtant, les effets des technologies numériques sur les systèmes agricoles sont peu connus et font l'objet de questionnements et débats.

3.1 La numérisation de l'agriculture pour répondre aux grands enjeux ?

Le numérique est proposé comme solution aux enjeux de l'agriculture par un certain nombre d'acteurs. Premièrement, les entreprises du numérique se présentent comme apportant des solutions numériques aux problèmes agricoles. On peut citer par exemple l'association de start-up La Ferme Digitale qui a « *pour objectif de promouvoir l'innovation et le numérique pour une agriculture performante, durable et citoyenne* » (LaFermeDigitale, 2021). De même, un certain nombre d'organisations internationales et de politiques publiques proposent le numérique comme solution (Lajoie-O'Malley et al., 2020). Ainsi, peut-on lire en introduction d'un rapport de la FAO : « *Les stratégies d'agriculture numérique aideront à rationaliser les ressources financières et humaines et à aborder de manière holistique les opportunités et les défis des TIC dans le secteur agricole, tout en générant de nouveaux revenus et en améliorant la vie des personnes dans les communautés rurales.* » (traduit de FAO et ITU, 2016, p.ix). En France, le rapport Agriculture Innovation défend que « *l'acquisition et la mise à disposition de données, vues comme indispensables, sont des atouts majeurs face aux nouveaux défis mondiaux de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement* » (Bournigal et al., 2015, p.37). Plus récemment, le PIA4 soutient « *le développement des équipements intelligents et connectés* » pour « *accélérer le développement et la diffusion de pratiques agroécologiques* » (PIA4, 2021, p.19).

Le numérique permettrait ainsi la mise en œuvre d'une agriculture dite « augmentée » ou « intelligente ». Par ailleurs, la digitalisation est présentée comme un processus inévitable et naturel, qui va « révolutionner » l'agriculture. L'une des promesses majeures du numérique, utilisée pour légitimer les investissements publics dans le domaine, est la dimension environnementale. Cependant, les bénéfices environnementaux du numérique en agriculture font l'objet de controverses.

3.2 Une solution controversée

Barrett et Rose (2020) montrent que les médias et les documents politiques ont une vision très positive quant à la capacité du numérique à répondre aux enjeux de l'agriculture et notamment améliorer l'impact environnemental. Parmi les arguments mentionnés pour justifier cette affirmation, on trouve le fait que le numérique pourrait apporter plus de connaissances, permettre une meilleure gestion de la complexité et de la diversité et améliorer l'optimisation des intrants (Walter et al., 2017). Les technologies numériques, de précision notamment, sont admises comme permettant d'améliorer l'efficience de l'agriculture et de réduire ses impacts. Le numérique pourrait favoriser la diffusion accrue d'information, faciliter les échanges et l'apprentissage, catalyser l'innovation et favoriser la coopération (Wittman, James et Mehrabi, 2020). Il pourrait également alléger la charge de travail liée à certaines tâches, ce qui pourrait être intéressant pour des pratiques agroécologiques intensives en main-d'œuvre (Bonny, 2017).

En revanche, d'autres arguments opposent agriculture numérique et agroécologie. Selon certaines études, les gains en termes de précision, d'efficience et d'économie d'intrants seraient relativement faibles, par exemple de l'ordre de 10% pour les herbicides (Moschitz et Stolze, 2018 ; Zhang, M. Wang et N. Wang, 2002). Ces gains pourraient même être contrecarrés par des effets rebonds ou des contraintes techniques, et ne pas être à la hauteur des enjeux écologiques (Moschitz et Stolze, 2018 ; O. Visser, Sippel et Thiemann, 2021). En outre, les outils numériques génériques pourraient difficilement s'adapter aux singularités des systèmes productifs agricoles, aux particularités locales et ne pas intégrer les connaissances propres à chaque agroécosystème (Klerkx et Rose, 2020). Par ailleurs, l'impact écologique intrinsèque de ces technologies (utilisation de ressources, consommation d'énergie) questionne leur pertinence pour l'écologisation (Berkhout et Hertin, 2004 ; Lebrun, 2020). Une autre dimension de la controverse porte sur les modèles et trajectoires que le numérique supporte. Le développement de ces technologies est parfois décrit comme une continuité de la trajectoire basée sur la mécanisation, la simplification et l'homogénéisation des systèmes de production (Clapp et Ruder, 2020 ; Klerkx et Rose, 2020 ; Wolf et Buttel, 1996). Ainsi, le numérique encouragerait des objectifs productivistes plutôt qu'écologiques (Bronson, 2019). Un élément de cette critique porte sur l'autonomie de l'agriculteur. Les technologies numériques créeraient une dépendance aux fournisseurs de ces technologies, aux réseaux, aux données, et aux industries amont et aval (Carolan, 2020 ; Stone, 2022). Il peut également être vu comme une perte d'autonomie décisionnelle (Jeanneaux, 2018). En outre, une critique porte sur le coût des technologies numériques, qui ne sont pas forcément accessibles à toutes les exploitations, et qui favoriseraient une concentration du capital.

Des controverses scientifiques et sociétales existent donc autour de cette question de la compatibilité entre trajectoire d'écologisation et trajectoire de digitalisation de l'agriculture. La controverse englobe les différents aspects - matériel, cognitif, organisationnel – des technologies, ainsi que plus largement le modèle socio-économique qui accompagne ces dispositifs techniques. Cependant, la relation entre digitalisation et écologisation de l'agriculture est peu étudiée, et il n'existe que peu d'études empiriques qui traitent de cette question. Il apparaît donc nécessaire de questionner l'hypothèse implicite qui associe la digitalisation avec une écologisation plus forte de l'agriculture.

4 Problématique et déroulé de la recherche

4.1 Front de recherche et problématique

Au regard des différentes controverses évoquées, le questionnement de ma thèse part de l'idée qu'il est erroné d'associer, de fait, l'écologisation et la digitalisation comme deux trajectoires forcément compatibles. A priori, elles ne sont ni compatibles, ni incompatibles. Ce sont deux trajectoires différentes, portées par des acteurs différents, avec des objectifs différents. Elles vont cependant interagir, que ce soit au travers des pratiques mises en œuvre dans les exploitations agricoles, ou au travers des politiques publiques, des connaissances développées, des projets des organisations agricoles. La mise en compatibilité de trajectoires ne peut se faire qu'au travers d'institutions, comme cela a été le cas pour les trajectoires de mécanisation et de

génétique (Kirat, 1991). Pour étudier la question du lien entre numérique et écologisation de l'agriculture, analyser les mécanismes d'interactions, les possibles convergences, les paradoxes et les oppositions, il est donc nécessaire d'approcher la question en intégrant les politiques publiques, les connaissances, les acteurs et les usages, qui sont les éléments constitutifs du système d'innovation agricole.

La littérature en sciences sociales s'intéresse depuis déjà de nombreuses années au changement technique lié au numérique dans l'agriculture, avec notamment un article de S. Wolf et F. Buttel qui paraît dès 1996. Depuis 2010, les publications sur le sujet se multiplient. La littérature sur le sujet traite notamment de problématiques liées à l'adoption, l'usage et l'adaptation des technologies numériques dans les exploitations, s'intéresse aux effets de ces technologies sur les identités, les compétences et le travail, souligne les problématiques de pouvoir, d'éthique, de valeur, étudie la transformation des systèmes d'innovation et de connaissance et la transformation des chaînes de valeur (Klerkx, Jakku et Labarthe, 2019).

Toutefois, peu de travaux questionnent les changements liés aux usages du numérique par rapport à la trajectoire d'écologisation de l'agriculture. La transformation des modèles productifs et l'impact du numérique sur les évolutions en cours dans le secteur agricole sont peu abordés dans la littérature. En France notamment, la mise en œuvre de ce changement technique dans les exploitations agricoles est très peu renseigné. Par ailleurs, les analyses institutionnalistes de la digitalisation sont peu fréquentes, et notamment la prise en compte de l'hétérogénéité au sein du système d'innovation n'est pas du tout abordée. Ceci limite aussi les connaissances sur les dynamiques intersectorielles associées à ce processus. Plus largement, la question du changement technique en agriculture est une question peu traitée de manière systémique en économie.

Un enjeu fort de la littérature scientifique sur le développement du numérique en agriculture est donc de mieux renseigner empiriquement la manière dont il est mis en œuvre, notamment à l'échelle des exploitations, et d'étudier les effets et implications de son développement sur le secteur agricole, notamment en terme d'enjeux environnementaux. Renseigner et analyser ces processus semble crucial pour alimenter les débats et réflexions sur le développement du numérique en France et son soutien public. L'enjeu est de se demander comment le numérique est utilisé dans les exploitations agricole, comment il est associé aux trajectoires d'écologisation et s'il en favorise certaines plutôt que d'autres, si le numérique facilite la mise en place de pratiques agricoles plus écologiques, etc.

Ma recherche se centrera donc autour de la question suivante :

> Comment le développement du numérique interagit avec les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France ?

Cette question appelle à prendre en compte les usages des technologies numériques et les pratiques associées, mais aussi à investir les transformations à l'échelle des organisations du secteur et de ses institutions. De ce fait, je peux la décliner en sous-questions :

Comment le numérique se développe à l'échelle de l'ensemble des organisations du système d'innovation agricole, et existe-t-il des différences de

développement selon les types d'écologisation promus et soutenus par les organisations ?

Comment le numérique se développe plus précisément à l'échelle des exploitations agricoles, et ses usages diffèrent-ils selon les pratiques d'écologisation des agriculteurs et agricultrices ?

Comment la digitalisation à l'échelle des organisations du système d'innovation impactent les exploitations agricoles, et inversement ?

Comment les organisations du secteur articulent digitalisation et écologisation ?

Cette thèse a pour objectif d'analyser le développement du numérique dans les différentes trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France, à partir d'une approche originale qui étudie à plusieurs échelles les transformations d'un secteur : l'échelle méso-économique des organisations de son système d'innovation, l'échelle micro-économique de ses entreprises (agricoles) et de certaines organisations qui peuvent y jouer un rôle « d'intermédiaire ».

Pour ce faire, je propose une analyse en économie institutionnelle des systèmes d'innovation et une approche basée sur un travail empirique important constitué d'entretiens avec les différents acteurs du système d'innovation agricole, ainsi qu'une méthodologie associant analyses quantitatives et qualitatives.

4.2 Positionnement épistémologique et ancrage théorique

S'intéresser à l'agriculture en termes scientifiques soulève des questions relevant de multiples dimensions, qui ont guidé mon parcours et m'ont amenée de la biologie, à l'agronomie puis aux sciences sociales. La biologie nous apprend les mécanismes de croissance et de reproduction des êtres vivants, les processus physico-chimiques et réactions biologiques. Ces connaissances permettent de comprendre le fonctionnement d'un individu vivant mais hors d'un contexte particulier et hors d'une visée de production. L'agronomie intègre ces composantes propres au système agricole : le contexte pédoclimatique, les interactions spatiales et temporelles entre végétaux, animaux et agroécosystème, mais aussi le rôle des pratiques agricoles. Ces pratiques sont guidées par des objectifs divers : rentabilité économique, production alimentaire, construction de liens sociaux, interaction avec la nature, confort de travail etc. Ces pratiques sont favorisées ou contraintes par les marchés mais aussi par les politiques publiques, les connaissances et technologies disponibles, les routines, les interactions avec les conseillers, les consommateurs, les voisins, les collègues... sans oublier les contraintes et opportunités biophysiques. S'entremêlent alors des facteurs économiques, politiques, historiques, sociaux, institutionnels, individuels, technologiques, biologiques, climatiques, pédologiques, génétiques dans un système complexe, changeant et incertain.

Une thèse ne peut évidemment pas aborder tous ces aspects. Cependant, prendre conscience de cette complexité m'amène à me positionner et à définir certains principes pour le déroulement de ma recherche, que je précise ci-dessous.

Ma thèse s'inscrit en sciences sociales, et plus précisément en économie. L'économie n'est pas vue ici comme une discipline auto-suffisante ou un

domaine d'action indépendant du reste de la société. Elle est une discipline plurielle, une spécialité parmi d'autres, qui nécessite un dialogue avec les autres disciplines. Les phénomènes économiques ne sont pas considérés ici comme des équilibres de marché liés aux actions d'individus indépendants et rationnels. L'économie est abordée dans une perspective institutionnelle, dans laquelle les phénomènes dépendent d'institutions et de rapports de pouvoir, et s'inscrivent dans des trajectoires historiques. L'inscription temporelle des phénomènes économiques est notamment abordée par l'économie évolutionniste. La perspective en économie politique permet l'intégration des enjeux de pouvoir. L'économie est donc pour moi une perspective pour aborder les activités sociales, qui sont liées à une diversité de facteurs sociaux mais aussi biophysiques, matériels.

L'étude des transformations socio-économiques des secteurs, et notamment de l'agriculture, ne peut donc se défaire de leur dimension matérielle, qui doit être prise en compte. Tout au long de mon travail de recherche, j'ai donc croisé mon regard en économie avec les travaux issus d'autres travaux en sciences sociales, mais aussi des sciences agronomiques ou des sciences du numérique. J'intègre ainsi des considérations sur les conditions agronomiques et sur la matérialité des technologies, appréhendées par les perceptions de leurs utilisateurs. Cette perspective a été facilitée par mon inscription institutionnelle dans deux laboratoires pluridisciplinaires de l'INRAE (au sein du département Action, transitions et Territoires), associant sciences sociales et sciences agronomiques, dans lesquels j'ai pu échanger avec des chercheurs et chercheuses d'autres disciplines. Cette pluridisciplinarité est également promue par l'Institut de convergence DigitAg, dans le cadre duquel je réalise ma thèse et où j'ai pu aussi échanger sur la dimension matérielle des technologies étudiées au cours de mes recherches.

L'utilisation des théories scientifiques permet de décrire des phénomènes, de les expliquer et d'émettre des hypothèses prédictives, en dégageant des principes logiques, de portée générale. Avec les changements sociaux permanents, les théories doivent cependant toujours être mises à l'épreuve, et être associées à des formes d'incertitude. C'est dans cette logique inférentielle entre la théorie et l'empirique que j'inscris mon travail de recherche, dans une démarche dite abductive (Mabsout, 2015 ; Peirce, 1974). L'observation est alors au centre du processus de théorisation. « *La théorie apparaît comme une matrice exploratoire, nécessitant toujours de se plonger dans des données locales, spécifiques. Elle est processuelle, évolutive, jamais achevée. Elle est le produit de tâtonnements, de bifurcations, de reconsidérations des solutions envisagées* » (Labrousse, 2006, p.40). Cette confrontation permanente entre théorie et terrain me semble d'autant plus importante que cette thèse s'ancre dans des questions académiques mais également sociétales. De ce fait, la recherche, notamment avec une approche itérative, peut avoir des effets sociétaux. Cela implique donc de considérer que la recherche puisse être performative. « *La signification d'une théorie ne peut pas être comprise indépendamment de la pratique historique et sociale à laquelle elle correspond* » (Castoriadis, 1975, p.14) et qu'elle peut influencer.

Cette approche, ainsi que l'enjeu de construction de connaissances empiriques pour instruire la controverse, implique un travail de terrain important. Pour cela, j'ai assisté à une vingtaine d'événements ou séminaires sur le sujet du numérique en agriculture, réalisé une veille médiatique durant l'ensemble de la thèse et je me suis basée sur 175 entretiens avec des organisations du

système d'innovation agricole, des entreprises qui développent des technologies numériques pour l'agriculture, des agriculteurs et agricultrices, des coopératives agricoles. Les données issues de ce travail empirique ont pu faire l'objet d'analyses mixtes associant des analyses qualitatives et quantitatives qui ont permis de mettre en œuvre cette approche abductive.

Cette approche se traduit alors aussi dans les modes de valorisation des résultats de la thèse. Ils incluent des valorisations académiques à travers la publication d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, mais aussi des valorisations auprès d'autres publics. Mes travaux ont ainsi fait l'objet de plusieurs valorisations auprès des partenaires de recherche : les agriculteurs et agricultrices, à travers la rédaction d'un compte-rendu de terrain ; les organisations professionnelles, à travers la publication d'un article dans la revue cahiers du développement coopératif et la présentation de résultats au Salon International de l'Agriculture 2022 ; les étudiant(e)s, avec des interventions dans le master Agroécologie de Montpellier SupAgro et à l'école d'agriculture de Purpan.

4.3 Plan

Pour répondre à ma(mes) question(s) de recherche, avec cet ancrage épistémologique, ma démarche de thèse s'organise autour de trois étapes, terrains et analyses relativement autonomes (Chapitre 3, Chapitre 4, Chapitre 5). Ces trois chapitres, centraux pour la production de données et leur analyse, sont intégrés dans une revue empirique générale des liens entre écologisation et digitalisation de l'agriculture (Chapitre 1) eet la proposition d'une problématisation et démarche plus précise de ces recherches (Chapitre 2). Ils sont in fine discutés ensemble dans une perspective empirique, théorique et méthodologique globale (Chapitre 6).

La manuscrit est une thèse sur articles. De ce fait, les trois chapitres de résultat (Chapitre 3, 4 et 5) sont structurés autour de trois articles (dont 2 publiés et 1 soumis), complétés par des introductions et conclusions propres à chacun de ces chapitres. Les chapitres 1, 2 sont rédigés pour approfondir la contextualisation et la construction de la problématique générale commune aux trois articles. Le chapitre 6 organise une discussion transversale aux trois articles, dont les perspectives académiques et opérationnelles sont ensuite reprises en conclusion générale. Le manuscrit est organisé comme suit.

Le Chapitre 1 a pour objectif de définir et mieux comprendre mon objet d'étude : le numérique en agriculture, et ses impacts potentiels sur l'écologisation du secteur. Je montre ainsi que le numérique correspond à des objets techniques spécifiques, qui s'associent à des usages. Au-delà des évolutions technologiques, le développement du numérique s'associe également à des évolutions sectorielles que ce soit au niveau des politiques publiques, des dynamiques de connaissances et des changements d'acteurs. Cela m'amène à détailler la controverse qui existe autour de ce développement du numérique dans le secteur agricole, le manque de connaissances sur ce sujet, les enjeux soulevés, et d'arriver ainsi à une problématique autour de la compatibilité entre le développement du numérique en agriculture et les différentes trajectoires d'écologisation.

Le Chapitre 2 a pour objectif de détailler la base théorique sur laquelle repose mon travail de recherche, centré autour du concept d'innovation. La notion de système d'innovation est mobilisée afin d'étudier la digitalisation et l'écologisation de l'agriculture comme des processus endogènes résultant d'interactions entre des institutions, des connaissances, des acteurs et des usages. De manière originale, j'adopte une perspective en économie politique afin d'intégrer les hétérogénéités et rapports de force au sein du système d'innovation agricole français. Je précise également la manière dont j'intègre dans mon analyse les différentes échelles, allant du secteur aux exploitations agricoles. Cela m'amène à décliner cette perspective théorique en stratégie empirique, qui sera opérationnalisée dans les trois chapitres suivants.

Le Chapitre 3 se concentre sur l'échelle méso-économique du système d'innovation. Il se base sur l'analyse qualitative de 38 entretiens avec des acteurs du système d'innovation agricole français, dont les résultats ont été publiés dans la revue *Journal of Rural Studies* (Schnebelin, Labarthe et Touzard, 2021). Ce chapitre montre comment les acteurs du système d'innovation perçoivent et mettent en œuvre le processus de digitalisation. Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des formes d'agriculture au sein du système d'innovation, j'analyse les convergences et divergences entre des acteurs issus de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle. Ce chapitre permet de montrer que le numérique en agriculture ne signifie pas la même chose pour tous les acteurs, mais que les différences ne sont pas perçues et prises en compte par les acteurs qui développent le numérique en agriculture.

Le Chapitre 4 se focalise sur l'échelle microéconomique des usages des agriculteurs. Il est structuré autour d'un article paru dans la revue *Ecological Economics* (Schnebelin, 2022). Sur la base de 98 enquêtes auprès d'exploitations agricoles ayant des grandes cultures en Occitanie, je réalise une analyse mixte quantitative et qualitative qui vise à comprendre les relations entre usages du numérique et modèle d'exploitation. Des profils d'usage du numérique sont construits et mis en relation avec des variables qui décrivent le type d'exploitation agricole et le type d'écologisation dans lequel elle s'inscrit. Cela met en évidence le fait que tous les types d'écologisation ne sont pas associés à tout type d'usage du numérique. Les technologies numériques de production s'inscrivent principalement dans une trajectoire d'industrialisation de l'agriculture. Les technologies numériques d'information et de communication se généralisent et sont parfois associées à des trajectoire d'écologisation plus fortes.

Le Chapitre 5 questionne les interactions entre le système d'innovation et les usages du numérique en se focalisant sur un acteur majeur de ces interactions : les coopératives. Il se base sur un article soumis à la revue *RECMA* (Schnebelin, Touzard et al., soumis). Un focus sur les caves coopératives viticoles permet de rendre compte de la place de ces acteurs dans le développement du numérique, et de sa mise en lien avec les trajectoires d'écologisation. À partir de l'étude de 8 caves coopératives et de 43 de leurs adhérents, le chapitre précise comment les coopératives, à travers l'intégration de ces deux processus, renouvellent leur rôle d'intermédiaire économique, mais aussi politique et cognitif, et deviennent des organisations qui construisent et font émerger des innovations. Les résultats montrent que l'articulation entre écologisation et digitalisation reste limitée, même si des synergies apparaissent.

Le Chapitre 6 consiste en une discussion générale, qui permet de revenir sur les apports et limites de la thèse. Une première partie intègre les résultats empiriques des trois précédents chapitres, les discute au regard de dynamiques économiques et historiques pour finalement revenir sur ce que ces résultats nous disent des interactions entre écologisation et digitalisation de l'agriculture. Une deuxième partie revient sur les apports et limites du cadre théorique et des méthodes mobilisées, et souligne ce que ce travail nous apporte en termes d'analyse des mécanismes de transformation des systèmes d'innovation.

La conclusion générale revient sur les éléments clés de chaque chapitre, afin d'en dégager un ensemble de persepectives de recherche et de perspectives plus opérationnelles. Ce travail de thèse appelle en effet à confronter et comparer les résultats avec des travaux dans d'autres filières, d'autres territoires, afin d'analyser les transformations du secteur agricole, de ses exploitations et du travail. Il appelle également à approfondir les analyses des processus et des mécanismes de ces innovations, et d'inclure ce travail dans une réflexion plus dynamique sur les transformations à long terme du secteur agricole. Ce travail invite à intégrer l'hétérogénéité du secteur et ses rapports de pouvoir dans les politiques d'innovation.

Cette thèse propose ainsi une analyse multi-niveaux du développement du numérique dans les différentes trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France. Je me base sur une perspective en économie institutionnelle et politique et je mobilise le concept de système d'innovation afin d'intégrer les différentes dimensions qui interagissent dans la construction des trajectoires d'innovation tout en prenant en compte l'hétérogénéité au sein du secteur agricole. Cette thèse répond à un enjeu de construction de connaissances sur le développement du numérique en agriculture, pour instruire la controverse sur ses liens à l'écologisation de l'agriculture, grâce un travail empirique important basé sur des entretiens avec des acteurs du système d'innovation agricole, des agriculteurs et agricultrices et des coopératives agricoles.

CHAPITRE 1

1

VERS UNE AGRICULTURE NUMÉRIQUE ?

Introduction du chapitre

Cette thèse vise à comprendre les interactions entre deux trajectoires du secteur agricole : la digitalisation du secteur et son écologisation. La digitalisation de l'agriculture est un phénomène encore émergent dans la littérature scientifique. Il est donc moins connu, moins décrit, moins analysé que l'écologisation. La digitalisation de l'agriculture est le point de départ, le processus qui fonde ma question de recherche, qui interroge la manière dont le développement du numérique joue sur l'écologisation del'agriculture. Ce chapitre vise donc tout d'abord à préciser à quoi correspond le numérique en agriculture et de quelle manière il se déploie. Le numérique dans le secteur agricole recouvre une diversité de technologies et implique une diversité d'acteurs et de politiques publiques, qui jouent sur les pratiques de production agricole. Cet état des lieux amènera à préciser les controverses qui existent sur les liens entre digitalisation et écologisation, au regard de la littérature. Les pratiques liées à la digitalisation et à l'écologisation se mettent en œuvre à l'échelle des exploitations agricoles. Mais ces pratiques individuelles sont en interrelation avec les évolutions plus transversales du secteur agricole et s'ancrent dans un système socio-économique plus global. Ce chapitre se base intégralement sur un travail bibliographique, réalisé à partir de la littérature scientifique et de la littérature grise : documents institutionnels, presse et sites internet.

La première section du chapitre vise à décrire ce que recouvre le terme de numérique, comment les sciences sociales appréhendent cet objet de recherche et quel développement technologique caractérise le numérique dans le secteur agricole. La deuxième section fait un panorama des transformations associées au développement du numérique en agriculture, au niveau des acteurs, des politiques publiques et des usages. La troisième section dresse un panorama des controverses sur le numérique en agriculture par rapport aux enjeux environnementaux.

1 Le numérique en agriculture

Cette section a pour objectif de clarifier le concept de numérique, et de le spécifier par rapport à mon secteur d'étude : l'agriculture. Dans un premier temps je montre les dimensions multiples qui existent derrière le concept de *numérique*. Je détaille ensuite ce à quoi correspond empiriquement le numérique dans le secteur agricole.

1.1 Qu'est-ce que le numérique ?

Le numérique, bien qu'omniprésent dans les discours, est rarement défini. Cette partie vise à préciser les différentes dimensions que recouvre le concept de numérique, de ses aspects techniques à sa dimension économique.

1.1.1 *Définitions*

Le terme numérique vient de *numerus*, i.e. nombre. Il renvoie à une technique de codification de l'information par un système binaire. Le numérique implique donc une discrétisation de l'information et s'oppose à ce qui est analogique, c'est-à-dire proportionnel et continu. Un phénomène analogue ne peut donc être copié numériquement parfaitement car certaines de ses propriétés ne peuvent pas être digitalisées (Vaden, 2004). Cette codification, comme représentation de l'information, offre des possibilités de production et de reproduction, d'échange, de stockage et de traitement de l'information, indépendamment de l'objet physique (Vaden, 2004). Une des caractéristiques principales des objets numériques serait la capacité à changer le code sans changer l'objet physique Ceruzzi (2012) (in T. Dufva et M. Dufva, 2019). La codification numérique permet ainsi l'utilisation de l'information codée dans des outils variés. Cette information peut alors être gérée et utilisée à distance de l'objet physique.

Le numérique est donc caractérisé par la codification de l'information. Favorisant la circulation de l'information, cette codification a fait émerger une autre caractéristique : la mise en réseau de l'information, depuis notamment l'invention d'Internet, du World Wide Web dans les années 90, et de l'Internet des objets, domaine en croissance depuis les années 2010 (Srnicek, 2017 ; UIT-T, 2012).

Le numérique présente une forte hétérogénéité physique et fonctionnelle (Vaden, 2004). Les outils numériques mobilisent différentes techniques dont certaines sont brièvement décrites ci-dessous :

— Le *Big Data* peut être défini comme un ensemble d'informations caractérisées par un tel volume, une telle vitesse et une telle diversité qu'elles requièrent des technologies et méthodes d'analyse spécifiques pour être transformées en valeur (Wolfert et al., 2017). La limite est floue avec notamment la notion de 'Big' qui varie selon l'évolution des techniques (Carolan, 2017b).
— L'*Internet des Objets* ou Internet of Things (IoT), correspond à un réseau d'objets interconnectés, basé sur des protocoles de communication standardisés (Verdouw, Wolfert, Tekinerdogan et al., 2016).
— Le *Cloud* correspond à des services de stockage et de calcul de serveurs informatiques à distance.
— L'*Intelligence Artificielle* correspond à des processus algorithmiques d'apprentissage, qui permettent de résoudre des problèmes à partir d'un ensemble d'information donné.
— La *blockchain* est une méthode de stockage et de transfert de données, « *sans qu'aucun intermédiaire ne soit plus nécessaire pour garantir leur authenticité et leur intégrité* » (Acta, 2018).

Ces différentes techniques sont combinées entre elles et associées avec des dispositifs matériels et des connaissances pour en faire des technologies numériques, qui vont être construites, techniquement et socialement, dans le but de remplir certaines fonctions.

Le numérique est donc avant tout un dispositif technique qui prend forme dans des dispositifs matériels. Ceux-ci ont une composante terminale, celle avec laquelle on interagit directement, appelée terminal ou interface : les ordinateurs, les téléphones, etc. Ces dispositifs matériels ont aussi une com-

posante support, qui peut être à distance, notamment pour l'analyse, le stockage ou encore le transfert des données : data center mais également capteurs, câbles et antennes. L'utilisation du numérique est parfois qualifiée de *dématérialisation* ou de *virtualisation*. L'emploi de ces termes invisibilise la composante matérielle, notamment la composante support, pourtant intrinsèque au numérique. Mais le numérique repose bien sur un fonctionnement matériel, et donc utilise de l'énergie et des ressources (Marquet, 2019 ; Pitron, 2018). En revanche, la composante matérielle terminale est très valorisée, comme le montre l'importance du design et de la mode dans ces domaines, ou le développement de terminaux de luxe.

Il convient également d'ajouter la composante humaine, c'est-à-dire l'« *élément humain que les technologies numériques contribuent à mettre au travail* » (Casilli, 2019, p.34). Cette composante humaine intervient à diverses étapes, de la conception jusqu'à l'utilisation finale, en passant par le travail d'apprentissage des intelligences artificielles, de fabrication ou encore de logistique. Des travaux universitaires, dès les années 2000, ont mis en évidence l'émergence de nouvelles formes de travail, liées au numérique, regroupées sous le concept de « digital labor » (Huws, 2014 ; Scholz, 2012 ; Terranova, 2000). Des travaux montrent l'effort fait pour invisibiliser ce type de travail (Gray et Suri, 2019 ; Huws, 1999). Ce *digital labor* peut être défini comme les interactions avec les objets numériques qui sont des « *formes d'activités assimilables au travail parce que productrices de valeur, faisant l'objet d'un quelconque encadrement contractuel et soumises à des métriques de performance* » (Casilli, 2015, p.5). Il peut également être défini comme « *une contribution à faible intensité et à faible expertise mise à profit via des algorithmes et des fouilles de données* » (Casilli, 2015, p.10). Ce travail est utilisé notamment pour faire les tâches, supposées être réalisées par des algorithmes, mais qui le sont plus efficacement par des êtres humains (par exemple la reconnaissance faciale). Un ensemble de *micro-tâches* sont ainsi réalisées par ce qu'Antonio Casilli appelle les « *travailleurs du clic* » (Casilli, 2015). La plateforme Amazon Mechanical Turk (MTurk) est la plus connue dans ce domaine, proposant à des travailleurs du monde entier de réaliser des tâches telles que la réponse à des sondages ou l'identification d'images, en échange de (micro)salaires [1]. Dans un autre registre, les « *fermes à clic* » (Casilli, 2019) emploient des individus pour cliquer sur des liens et ainsi falsifier les quantités de connexion et donc augmenter les revenus liés à la publicité ou la visibilité.

Les travaux sur ce nouveau type de travail mettent aussi en évidence le travail effectué gratuitement et inconsciemment par les utilisateurs du numérique. En effet, les données produites par les utilisateurs du numérique sont valorisées par les entreprises qui les analysent. Elles alimentent l'apprentissage des algorithmes et les bases de données. Ce type de travail vient brouiller les limites classiques entre production et consommation, entre travail et loisir. Par ailleurs, l'économie dite collaborative, basée sur des plateformes numériques d'appariement (entre acheteurs/vendeurs ou entre utilisateurs), vient questionner ce concept de travail (Srnicek, 2017). La littérature met en évidence là aussi des phénomènes d'invisibilisation des travailleurs : invisibilisation de perception, invisibilisation institutionnelle, spatiale et individuelle (Gruszka

1. Le nom de cette plateforme fait d'ailleurs référence au canular du Turc Mécanique, automate présenté comme pouvant jouer aux échecs, mais en réalité contrôlé par un humain dissimulé

et Böhm, 2020). Ces phénomènes de révision des limites travail/consommation (Dujarier, 2014), de flexibilisation et individualisation du travail (Srnicek, 2017), d'invisibilisation des travailleurs (Daniels, 1987), ne sont pas nouveaux, mais le développement du numérique change leur nature et leur ampleur. Cette question de la composante humaine de la digitalisation est de plus en plus fréquente dans les débats : des images de fermes à clic ont été diffusées dans la presse, des mouvements sociaux des travailleurs et travailleuses de ce qu'on appelle *l'uberisation* de l'économie voient le jour, avec de premiers effets judiciaires et législatifs. En France, Deliveroo a par exemple été condamné à une amende de 375 000 euros le 19 Avril 2022 pour « travail dissimulé ». En Californie, malgré un référendum qui a enteriné le statut d'indépendant des chauffeurs Uber en 2020, les débats sur le statut des chauffeurs reste vifs.

Dans cette thèse, je m'intéresse à l'élément humain à l'étape finale, autrement dit aux usages. L'usage nécessite d'adopter la technologie, mais il suppose aussi généralement d'avoir des infrastructures, des intrants, des périphériques, des contenus appropriés, des services appropriables, des capacités d'utilisation, de financement, des apprentissages, une structure de gouvernance (Warren, 2007). L'usage effectif peut être défini comme « *la capacité et la possibilité d'intégrer avec succès les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans la réalisation d'objectifs définis par l'intéressé lui-même ou en collaboration* » (Gurstein, 2007, p.9). L'usage d'une technologie est donc associé à la construction de connaissances, à des ajustements et des interactions avec le contexte d'usage (Higgins et al., 2017). L'usage d'une technologie numérique va donc changer la nature, la temporalité et la spatialité des tâches effectuées.

Au-delà des composantes technique et matérielle, le terme numérique renvoie également à un phénomène socio-économique. L'utilisation de ce terme s'est en effet répandue pour désigner l'ensemble des technologies numériques mais également la manière dont elles sont articulées dans un modèle organisationnel et économique particulier. Les définitions du Big Data illustrent cette dualité. Une première définition se réfère à la règle des 3V (Beyer et Laney, 2012) en retenant ses spécificités techniques, qui le différencient de l'analyse de données classique :

— Variété : Les données sont issues de sources multiples et sont hétérogènes
— Volume : Le nombre de données utilisées est très grand
— Vélocité : Les flux de données sont en mouvement constant et rapide

Mais une seconde définition intègre le modèle organisationnel et économique associé aux caractéristiques techniques (Traduit de : Mayer-Schönberger et Cukier, 2013, p.5) :

> *« Le concept de Big Data fait référence à ce qui peut être fait à grande échelle, et qui ne peut être fait à plus petite échelle, afin d'extraire de nouvelles informations ou de créer de nouvelles formes de valeurs, de façon à modifier les marchés, les organisations, les relations entre les citoyens et les gouvernements, et bien plus encore »*

Dans les discours, l'acception du concept de *numérique* s'élargit donc et intègre ces composantes. Ainsi, les entreprises mais aussi les acteurs publics parlent d'Économie numérique, de République Numérique, d'Ambition

Numérique, d'Inclusion Numérique ou encore d'Agriculture Numérique. L'*économie numérique* désigne « *les entreprises dont les modèles de gestion reposent de plus en plus sur les technologies de l'information, les données et internet* » (Srnicek, 2017, p.10). Cette désignation montre ainsi que le numérique n'est pas qu'une transformation sectorielle mais touche tous les secteurs et joue un rôle de plus en plus important.

L'utilisation croissante du numérique dans un domaine est appelée *numérisation* ou *digitalisation* et peut être définie comme un processus de mise en données de la réalité. Ce processus est aussi politique et culturel. Il peut être analysé comme une étape de l'histoire du capitalisme et du développement technologique (Srnicek, 2017). Il s'inscrit dans une trajectoire du capitalisme basée sur la recherche de diminution des coûts et de contrôle du travail (Casilli, 2019, p.35) et sur une vision économique qui favorise la dérégulation, les droits de propriété et la flexibilité (Durand, 2020). Il s'ancre dans une trajectoire sociale de rationalisation et de quantification de la vie sociale (Huguet, 2017). Ce processus de numérisation est graduel, et Lupton (2014) en définit plusieurs étapes :

— Arrivée des ordinateurs et automatisation des tâches répétitives,
— Développement des systèmes d'identification électronique et de la gestion informatisée,
— Interactions, échanges de données entre différentes institutions et systèmes.

Ainsi, le concept de numérique renvoie non seulement à une définition technique mais également aux dispositifs matériels, aux fonctions, aux usages, ainsi qu'aux dimensions politiques et socio-économiques associées. Les technologies numériques peuvent être vues comme des artefacts culturels et matériels qui ont des implications politiques et qui impliquent des rapports imbriqués entre humains et non-humains (Lupton, 2014).

Ces différentes définitions renvoient à ce qu'est plus globalement une technologie. Une « technologie » n'est pas simplement un ensemble d'outils, de matériels et d'équipements utilisés pour une activité humaine. Pour reprendre les propos de Deleuze cités par Dockès (1990, p.35), « *les machines sont sociales avant d'être techniques* ». D'après Dosi (1982, p.151-152), une technologie est également « *un ensemble de connaissances, de savoir-faire, de méthodes, de procédures et d'expériences* ». Le changement technologique implique donc un ensemble complexe de transformations qui affectent l'organisation des firmes, les processus productifs, les configurations institutionnelles, les dynamiques intersectorielles, les relations sociales etc. (R. Boyer, 1989). Dobrov (1979) met en avant le fait que la technologie est un ensemble i) de composantes physiques : le hardware, ii) de connaissances et compétences : le software et iii) d'équipements organisationnels : l'orgware. Il définit l'orgware comme l'« *ensemble des mesures socio-économiques, d'organisation et de gestion qui sont destinées à assurer l'identification et l'utilisation efficace d'une technique et de connaissances socio-techniques données, ainsi que la capacité potentielle du système technologique à s'adapter, se développer et s'auto-perfectionner* » (dans Djellal, 1995). Une technologie numérique est ainsi caractérisée par les techniques qu'elle met en œuvre, l'outil, la ou les fonction(s) qu'elle sert, les connaissances et compétences nécessaires aux utilisateurs de cette technologie, l'organisation qu'elle implique, le modèle économique et organisationnel associé, ainsi que les valeurs sociales et culturelles sous-jacentes (T. Dufva et M. Dufva, 2019).

1.1.2 *Le numérique comme objet de recherche en sciences sociales*

Le numérique, dans ses multiples dimensions, est peu à peu devenu un objet de recherche en sciences sociales, étudié au travers de différentes questions. Un premier ensemble de questions renvoie au contexte (technique, économique, social, politique, culturel) de conception et de construction du numérique : pourquoi et comment le numérique se développe-t-il ? Un deuxième groupe de questions se pose autour des mécanismes de développement, de diffusion et d'usages : quels outils et quels usages pour quels usagers ? On retrouve ici également les différentes dimensions : technique, économique, sociale, politique, culturelle. Une troisième dimension des questionnements porte sur les effets et conséquences du numérique dans la société, sur les formes de régulations méso et macroéconomique qui l'accompagnent et plus globalement sur les liens entre numérique et formes de capitalisme : qu'est-ce qu'il change et qu'est-ce qu'il ne change pas ? Des travaux étudient les effets sur l'économie, mais aussi sur les dimensions sociales, politiques et culturelles.

Le premier ensemble de questions renvoie aux objectifs incorporés dans les technologies numériques, aux représentations, imaginaires, ainsi qu'aux usages envisagés et aux structures de pouvoir intégrées dans ces objets. Le développement technologique a tendance à être « naturalisé » dans les discours : celui-ci résulterait d'une évolution naturelle et inéluctable. Cette naturalisation est cristallisée dans des « lois » telles que la loi de Moore (la puissance et la complexité de l'informatique double tous les 18 mois) et sert à la production de légitimité et de crédibilité concernant les projets technologiques. Le numérique s'inscrit ainsi dans « l'économie des promesses techno-scientifiques » (P.-B. Joly, 2015). Cependant, le projet de numérisation n'est pas une évolution naturelle ou nécessaire mais bien un projet social, économique et politique. Des analyses sur la conception du numérique montrent ainsi que celui-ci a été conçu dans une idéologie issue de l'hybridation entre la contre-culture hippie américaine et les principes du libre marché des entrepreneurs californiens (Durand, 2020), mais aussi, pour Internet, de l'esprit méritocratique du monde de la recherche et des pratiques de coopération et de réputation des informaticiens (Cardon, 2010, p.13). Malgré un imaginaire centré sur l'entreprenariat individuel, des travaux montrent que le développement du numérique a largement été financé par les États (Mazzucato, 2011).

Ce contexte économique, politique et culturel aurait ainsi amené à incorporer les caractéristiques d'autonomie et de réseau lors de la conception des premières technologies numériques, mais aussi « *l'approfondissement et la radicalisation de l'individualisme contemporain* » (Cardon, 2010, p.9) : l'innovation sociale s'associe à l'innovation technique. Ces caractéristiques se retrouvent intégrées dans l'architecture technique, par exemple d'Internet et du micro-ordinateur, et donc performent et se renforcent à l'usage (Flichy, 2004). En effet, les représentations des usages potentiels sont incorporées dans le processus d'élaboration sociotechnique des technologies. Ainsi, « *les inventeurs de l'Internet ont matérialisé un ensemble de valeurs qui exercent un effet persistant sur la forme du réseau, sur son organisation et sur ses pratiques* » (Cardon, 2010, p.14).

Cette question se retrouve pour les « données », qui résultent d'une construction sociale et impliquent des choix politiques et économiques (quelles données on récolte, quelles données on regarde, comment on caractérise ces données ?) (Lupton, 2014 ; Madsen et al., 2016) et dont l'analyse n'est pas neutre. Ainsi des questions et débats apparaissent autour des algorithmes : quelle transparence, quelle gouvernance des algorithmes (Madsen et al., 2016) ?. Par ailleurs, d'autres travaux en sciences sociales se concentrent sur la construction des technologies numériques : enjeux économiques et politiques de la mobilisation des ressources, travail, ou encore intégration des enjeux écologiques dans la conception des technologies (Clapp et Ruder, 2020).

La deuxième catégorie de questionnements se focalise sur les pratiques mises en œuvre. En effet, la rhétorique du régime des promesses technoscientifiques se focalise sur des potentialités, sur des futurs possibles (P.-B. Joly, 2010). En revanche les modalités concrètes d'adoption de technologies, les pratiques et usages associés à des modèles de production, d'apprentissage, de changements ou même de résistances sont bien moins renseignés. Cette question s'intéresse aux situations concrètes d'utilisation au-delà des discours. Des travaux étudient l'adoption et la diffusion des technologies numériques dans la société, mais ils ont parfois tendance à naturaliser le fait social, l'évolution technologique étant souvent vue comme allant dans l'ordre des choses (Bertini, 2009). Les travaux plus ciblés sur l'adoption et l'usage ont toutefois mis en évidence des facteurs d'adoption individuels mais également économiques, sociaux ou géographiques. Des recherches étudient les phénomènes de fracture numérique, de capacités numériques, de compréhension et d'appropriation (Brandtzæg, Heim et Karahasanović, 2011 ; Richardson et Bissell, 2019 ; Warren, 2007). Afin de comprendre l'appropriation du numérique, des travaux se concentrent aussi sur l'usage effectif des technologies numériques, c'est-à-dire l'intégration de ces technologies dans les pratiques et les objectifs visés (Gurstein, 2007). En effet, l'usage d'une technologie est la résultante de l'interaction entre la technologie et l'usager : l'usager façonne l'objet technique en se l'appropriant (Williams et Edge, 1996).

Le troisième type de questions renvoie au fonctionnement économique et aux résultats et conséquences de cette mise en pratiques de la technologie. Ils peuvent avoir lieu à différentes échelles, à différents pas de temps, pour différentes dimensions. L'analyse de ces effets peut amener à se concentrer sur les changements, mais cela ne doit cependant pas faire oublier ce qui ne change pas. En effet, « *la technique relève d'une force de conservation et de reconduction du Même, à l'œuvre dans le réel* » (Bertini, 2009, p.19). Les effets du développement du numérique dans la société sont une question majeure de société, question qui soulève des débats et controverses, qui est porteuse d'espoir et de craintes multiples. Cette question des conséquences du numérique et plus globalement des technologies est parfois éludée afin d'éviter le risque d'un déterminisme technologique mais aussi le risque de ralentir le progrès technique et le développement économique en adoptant une perspective critique ou des principes de précaution (Bronner et Géhin, 2010). Cependant, technologie et société interagissent et s'impactent mutuellement (Williams et Edge, 1996).

Cette question des impacts du numérique est très complexe puisque le changement technologique agit toujours en interaction avec d'autres évolutions sociétales. Une partie des travaux sur les conséquences du numérique questionne les impacts sur les dynamiques économiques, ou plus globalement sur le capitalisme. Les effets sur la productivité et la croissance sont débattus : le paradoxe de Solow mettait en exergue le fait que le développement du numérique dans les années 70 n'avait pas d'effet sur la productivité. Cette absence d'effet sur la productivité et la croissance est débattue et pourrait être liée à la mesure de la productivité (Aghion et Antonin, 2017). Sur la structuration du marché, le développement de l'économie numérique amène des processus de monopolisation et de rente plutôt que d'investissement (Durand, 2020). Il renforcerait également les tendances vers l'accroissement de la sous-traitance et la production juste à temps et personnalisée (Srnicek, 2017). En revanche, le numérique est source d'opportunités commerciales dans de nombreux domaines (Bai et al., 2020).

Plusieurs travaux étudient les conséquences sur le travail, mettant en évidence l'usage du numérique comme outil facilitateur et facteur d'amélioration des conditions de travail et d'autonomie (Bai et al., 2020 ; Flichy, 2004). D'un autre côté le numérique peut être utilisé comme outil de contrôle et de subordination (Durand, 2020 ; Lupton, 2014), comme facteur de déqualification de certaines tâches, de précarisation et de fragmentation des structures professionnelles (Casilli, 2019 ; Rotz, Gravely et al., 2019). Le développement du numérique aurait également des impacts géographiques, avec des phénomènes de polarisation spatiale des activités économiques et de fracture socio-économique des populations (Durand, 2020 ; Warren, 2007). Cependant, il est aussi vu comme un facteur pour désenclaver et revitaliser les zones rurales, développer de nouveaux services, diffuser des savoirs et créer de la valeur dans les territoires ruraux (Réseau Rural Français, 2018). Le numérique change aussi les manières de construire des connaissances, dans la science et dans les entreprises, amènerait un changement épistémologique des sciences et favoriserait certaines rationalités plutôt que d'autres (Kitchin, 2014 ; Madsen et al., 2016). L'analyse scientifique dirigée par les données, qui « fait parler les données », aurait ainsi une importance croissante (Kitchin, 2014). Ceci amènerait une amplification des phénomènes de dépendance au sentier car le numérique se base beaucoup sur l'analyse des données passées (Madsen et al., 2016). Enfin, les effets du numérique sur l'environnement font également l'objet de travaux, que ce soit par rapport aux impacts environnementaux de leur usage direct, aux impacts des changements engendrés sur les processus de production, les dynamiques économiques et sociétales. Les controverses autour de ces impacts seront précisées dans la Section 3.1

Ces trois questions sont interdépendantes puisque les conséquences vont résulter à la fois de comment les technologies ont été conçues et de comment elles sont utilisées concrètement. De même, la conception et les usages de technologies vont être liées aux conséquences attendues. Ces questions peuvent être déclinées et étudiées à différentes échelles et sur différents territoires. En effet d'un pays à l'autre, les dynamiques ne vont pas être les mêmes puisque le développement du numérique va dépendre des infrastructures, des marchés, des ressources etc. Le numérique peut être étudié à l'échelle du capitalisme mondialisé afin de comprendre les dynamiques économiques

globales associées au développement du numérique (Durand, 2020 ; Srnicek, 2017). D'un autre côté, des travaux se concentrent sur l'échelle individuelle des pratiques et des représentations (Brandtzæg, Heim et Karahasanović, 2011). Des travaux déclinent ces questions à l'échelle sectorielle, étant donné que les fonctions et les impacts du numérique varient selon les secteurs : par exemple dans le secteur industriel (Frank, Dalenogare et Ayala, 2019), dans le secteur de la santé (Lupton, 2014), de l'urbanisme (Marquet, 2019), ou encore dans le secteur de l'agriculture.

1.2 Qu'est-ce que le numérique en agriculture ?

Le numérique renvoie à la fois à des objets techniques et des dynamiques économiques. Le développement et l'intégration des technologies numériques va interagir avec et impacter les modèles productifs et les pratiques, et donc va dépendre des secteurs. Qu'en est-il en agriculture ? Cette partie spécifiera ce à quoi correspond empiriquement le numérique dans le secteur agricole. Cette thèse s'intéresse plus particulièrement au développement du numérique à l'échelle de l'exploitation agricole. Cependant, l'exploitation agricole est en interdépendance avec les évolutions sectorielles plus globales, d'où la nécessité d'avoir une vision multi-échelles.

1.2.1 *La digitalisation des systèmes agri-alimentaires*

Le numérique se développe dans tous les secteurs économiques. Le secteur agri-alimentaire n'est pas une exception, avec de nouvelles technologies à toutes les étapes des chaînes de valeur agricoles et alimentaires. Un aperçu synthétique de la digitalisation de ce domaine a été réalisé par Prause, Hackfort et Lindgren (2020) à partir de l'analyse de services numériques existants. L'article recense ainsi les services digitaux le long de la chaîne de valeur, visibles Tableau 1.1, incluant l'approvisionnement, l'exploitation agricole, la commercialisation des produits primaires, la transformation, le conditionnement, le transport, le stockage, la commercialisation, la consommation, et l'organisation de la chaîne de valeur.

Ces chaînes de valeur alimentaires s'intègrent dans des systèmes agri-alimentaires plus larges, intégrant :

— La recherche et développement : on peut citer les technologies numériques de données satellitaires, le phénotypage haut-débit, le développement de modèles basés sur les données ou encore la recherche basée sur les données récoltées par la société civile
— L'enseignement, incluant par exemple les « Massive Open Online Courses » (MOOC) (Huyghe, 2014)
— Les modalités de régulations et les politiques publiques, qui elles aussi mobilisent des technologies numériques, par exemple pour effectuer les déclarations, le contrôle, l'information des agriculteurs ou l'instrumentation des mesures d'écologisation des politiques agricoles (Magnin, 2019).

Le numérique en agriculture recouvre ainsi une diversité de technologies et une diversité d'activités, à tous les maillons des systèmes agri-alimentaires. Ces technologies peuvent avoir différentes échelles d'application : une plante ou un animal, une parcelle, un troupeau, une exploitation agricole, ou encore

TABLE 1.1 – Technologies numériques le long de la chaîne de valeur agri-alimentaire (Traduit de : Prause, Hackfort et Lindgren, 2020)

Étape de la chaîne de valeur agri-alimentaire	Produit ou service numérique	Principaux acteurs et exemples d'entreprises
Intrants agricoles	FinTech pour des évaluations de crédit ou services de paiement	Start-ups (e.g. Advans Group) ; start-ups à but non lucratif (e.g. One Acre Fund)
	Assurances basées sur les données	Compagnies d'assurance agricole (e.g. AIG Crop Risk Services)
	Genome-edited seeds	Start-ups (e.g. Calyxt) ; firmes de l'agro-chimie (e.g. DowDuPont)
Exploitation agricole	Équipement d'agriculture de précision	Start-ups (e.g. Blue River Technology) ; firmes de l'agroéquipement (e.g. John Deere) ; firmes de l'agro-chimie (e.g. Yara International)
	Robots agricoles	Start-ups (e.g. Naio Technologies)
	Plateforme numérique sur le matériel agricole	Start-ups (e.g. Tro Tro Tractor) ; firmes de l'agroéquipement (e.g. Tractors and Farm Equipment Limited)
	Conseils et informations agronomiques basés sur les données	Start-ups (e.g. Indigo Ag) ; start-ups sociales (e.g. Green Dreams Tech) ; firmes de l'agro-chimie (e.g. Bayer Crop Science) ; organisations publiques (e.g. FAO)
	Plateformes de gestion des exploitations	Firmes de l'agro-chimie (e.g. Syngenta) ; firmes de l'agroéquipement (e.g. John Deere) ; start-ups (e.g. CropX)
Commerce de matières premières	Places de marché numériques	Start-ups (e.g. Indigo Ag) ; entreprises du numérique (e.g. Alibaba) ; multinationales du négoce alimentaire (e.g. Cargill)
Transformation alimentaire	Robots collaboratifs	Industries agroalimentaires (e.g. Nestlé)
	Impression 3D alimentaire	Industries agroalimentaires (e.g. Choc Edge)
Conditionnement	Emballage connecté	Entreprises du numérique (e.g. Adobe Inc)
	Impression 3D de matériaux à base de polymère	Entreprises du numérique (e.g. MakerBot Industries, LLC)
Transport	Capteurs et analyse de données	Entreprises de logistique (e.g. Purfresh) ; Entreprises du numérique (e.g. Tellspec)
	Gestion du fret numérisée	multinationales du négoce alimentaire (e.g. Cargill)
	Gestion numérique du transport pour les petits producteurs	Organisations de producteurs (e.g. Zambia National Farmers' Union) ; start-ups (e.g. Distrego)
Stockage	Entrepôts automatisés	Grande distribution (e.g. Ocado) ; Industries agroalimentaires (e.g. Nestlé)
Commerce et consommation	Smart shopping	Grande distribution (e.g. Carrefour) ; Entreprises du numérique (e.g. Amazon)
	Plateforme de e-commerce	Entreprises du numérique (e.g. Alibaba) ; Grande distribution (e.g. Wholefoods Market)
Chaîne de valeur dans son ensemble	Outils numérique de traçabilité des marchandises et transparence	Grande distribution (e.g. Carrefour) ; entreprises du numérique (e.g. Amazon) ; organisations de producteurs (e.g. Ugandan National Union of Coffee Agribusiness and Farm Enterprises) ; industries agroalimentaires (e.g. Nestlé) ; Entreprises de négoce alimentaire (e.g. Louis Dreyfus)

un territoire, une filière ou un marché. Dans cette recherche je me concentre sur le numérique à l'une de ces échelles : l'exploitation agricole. Mais l'exploitation agricole est insérée dans un *système agri-alimentaire*, c'est-à-dire un « *système sociotechnique que l'on peut définir comme englobant les agriculteurs, le conseil, la recherche, les acteurs de l'amont et de l'aval des filières, les politiques publiques et les instances de régulation, les consommateurs et la société civile* » (Lamine, 2012, p.139), et intégrée plus globalement dans un système socio-économique. De ce fait, l'exploitation agricole doit être envisagée dans son environnement socio-économique, qui évolue lui-même avec la digitalisation.

1.2.2 *À l'échelle de l'exploitation agricole*

Cette thèse porte sur le développement du numérique à l'échelle de l'exploitation agricole. L'exploitation agricole peut être définie comme une unité technico-économique ayant une activité de production de produits agricoles [2]. L'exploitation agricole est donc le lieu de flux et de processus de production, de travail, mais également de prises de décision, en fonction d'objectifs divers, de connaissances et de l'organisation (Laurent, Maxime et al., 2003). L'exploitation agricole est aussi une composante du système agri-alimentaire global. Les activités de l'exploitation agricole sont en interdépendance avec les activités en amont et en aval au sein de ce système, et s'ancrent dans un contexte socio-économique plus global. Cette thèse mettra précisément en évidence le rôle que jouent l'amont, l'aval et le contexte socio-économique sur le numérique au sein même des exploitations agricoles.

Les technologies numériques utilisées en agriculture sont nombreuses et basées sur des techniques variées. On peut distinguer ainsi :

i) Des techniques de collecte de données : géolocalisation, télédétection, capteurs divers (fixes, embarqués, sur drone, par système aérien ou satellite) qui vont capter des données sur la météo, l'état d'une culture (maturité, flux de sève…) ou d'un animal (chaleur, croissance…), sur le sol, une ressource ou encore une machine.

ii) Des techniques de traitement des données ou de transmission de données : outils d'aide à la décision, radio-identification, réseaux de capteurs, systèmes d'information géographique.

iii) Des techniques d'action : robots pour l'élevage (traite, alimentation, hygiène) ou pour les cultures (pulvérisation, désherbage, récolte etc.), drones, systèmes automatiques, guidage automatique, coupure de tronçon par GPS, technologie à taux variable (qui permet d'adapter l'apport de semences ou d'autres intrants selon les informations sur la parcelle) etc. (De Clercq, Vats et Biel, 2018 ; Van Es et Woodard, 2017).

iv) Des techniques d'information et de communication : ordinateurs de bords pour les engins agricoles, sites internet (météo, marchés, formation,

2. L'exploitation agricole est définie, par le ministère de l'agriculture, comme une unité économique et de production ayant une gestion courante indépendante et produisant des produits agricoles ou maintenant des terres dans de bonnes conditions agricoles et environnementales, au-delà d'une certaine dimension, définie selon le type de production (1ha de SAU en cultures non spécialisées) - Définition indiquée sur le portail Agreste et datant de Novembre 2021 : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/methodon/D-Exploitation%20agricole/methodon/

media, commercialisation etc.), logiciels et applications diverses (gestion, reconnaissance d'images etc.), ainsi que les plateformes numériques.

Souvent, ces techniques sont combinées entre elles pour constituer une technologie remplissant une certaine fonction. Ainsi plusieurs typologies de technologies sont proposées dans la littérature concernant le numérique en agriculture.

Typologies existantes

Une typologie souvent citée concerne les technologies d'agriculture de précision. Celles-ci sont catégorisées en technologies d'enregistrement, de guidage et d'exécution ou de réaction (Balafoutis et al., 2017). Les technologies d'enregistrement regroupent celles qui vont collecter de l'information comme les capteurs ou les imageries satellites utilisées pour réaliser des cartes. Les technologies de guidage regroupent toutes les technologies d'assistance au guidage des machines agricoles. Les technologies de réaction utilisent les données issues des technologies d'enregistrement afin d'optimiser les apports d'intrants (eau, engrais, pesticides, semences). Balafoutis et al. (2017) proposent un schéma qui détaille cette typologie des technologies d'agriculture de précision (Figure 1.1).
Cette classification permet de bien distinguer les techniques qui utilisent le numérique dans un équipement d'agriculture de précision. Issue d'une perspective en ingénierie mécanique, elle ne prend pas en compte comment ces techniques se combinent entre elles au sein des technologies. De plus, elle exclut d'autres technologies telles que définies dans la première partie de ce chapitre.

Dans une analyse économique de la *révolution numérique* en agriculture, Birner, Daum et Pray (2021) distinguent deux types de technologies : incorporées et non-incorporées. Les technologies incorporées sont celles qui sont intrinsèquement liées à un objet matériel précis, à une machine spécifique. Elles correspondent aux technologies dites d'agriculture de précision, c'est-à-dire celles classées par Balafoutis et al. (2017). Les technologies non-incorporées sont des technologies logicielles, qui vont avoir uniquement besoin d'un terminal générique (smartphone, ordinateur, tablette). Ces technologies correspondent aux applications mobiles, aux logiciels de gestion, aux plateformes numériques. Cette distinction est pertinente par rapport à une perspective qui étudie l'offre de technologies. En effet, les auteurs montrent que ce sont des acteurs différents qui sont impliqués dans la conception des technologies incorporées et de celle des technologies non-incorporées. Cependant, cette classification ne semble pas pertinente pour étudier les usages, qui peuvent associer les deux types de technologies. Par exemple, la modulation d'intrants nécessite des cartes parcellaires (technologie non-incorporée), ainsi qu'un épandeur d'engrais adapté à la modulation (technologie incorporée). Les concepteurs de ces deux composantes technologiques peuvent être différents. En revanche, l'usage résulte de la combinaison de ces deux composantes et les intermédiaires du secteur agricole (conseillers, coopératives etc.) jouent le rôle d'accompagnement aux diverses étapes de l'adoption de technologies, qu'elles soient incorporées ou non. De plus, incorporées ou non, les technologies peuvent avoir des fonctions très différentes.

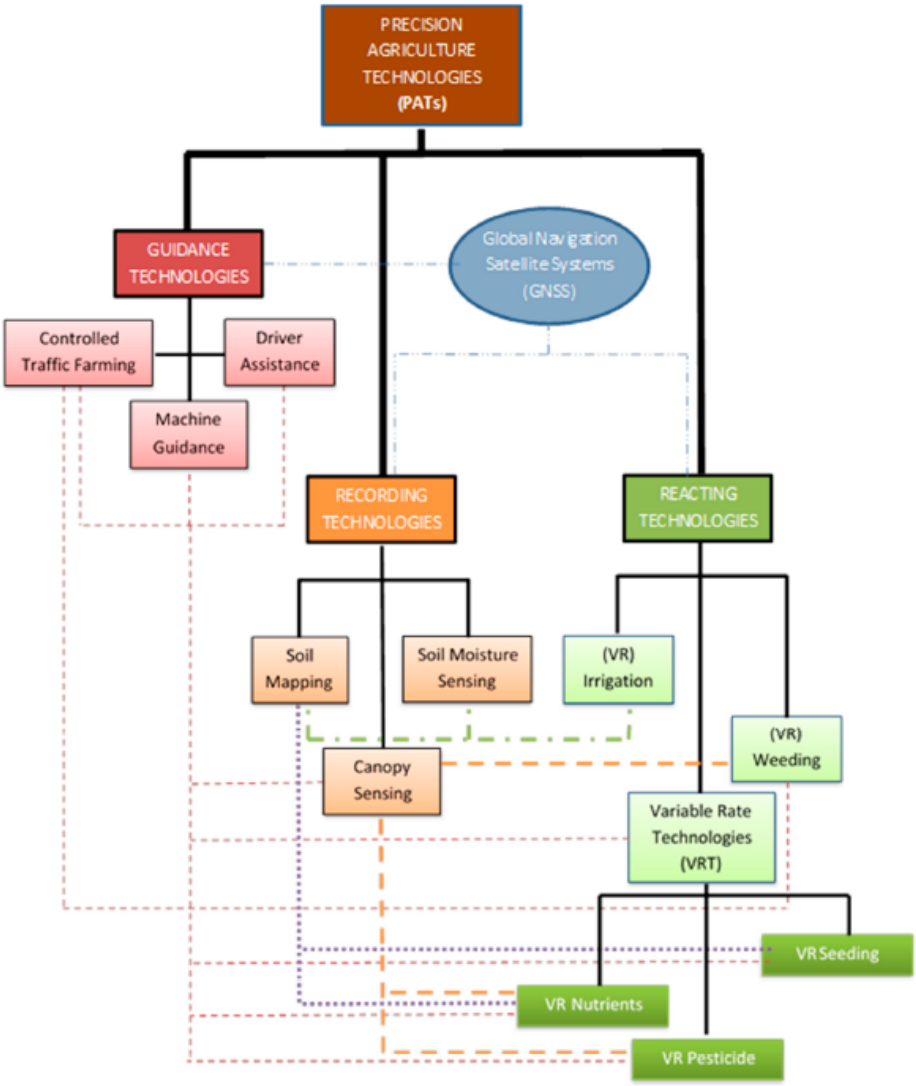


FIGURE 1.1 – Typologie des technologies d'agriculture de précision (Balafoutis et al., 2017)

Construction d'une typologie
Face à l'absence de typologie prenant en compte la diversité de ce que recouvre le numérique en agriculture ainsi que les usages des technologies, je propose une typologie, organisée à partir des fonctions que remplissent ces technologies. Celle-ci distingue six catégories indiquées dans le Tableau 1.2.

TABLE 1.2 – Typologies des technologies numériques en agriculture selon les fonctions des technologies (Source : auteur)

Catégorie	Fonctions
Production animale	alimentation animale (automatisation, apport de précision), récolte et diffusion d'information sur les animaux (sanitaire, chaleurs, vêlage etc.), traite, gestion du milieu (litière, bâtiments, silo), guidage des animaux, suivi des pratiques, aide à la décision
Production végétale	analyse du sol, analyse de l'état des végétaux (hydrique, azoté, sanitaire), reconnaissance ravageurs et maladies, pilotage des intrants (phyto, eau, engrais), travail du sol, traitement, désherbage, gestion prairies, récolte, transport de matériel ou de production, suivi des pratiques, géolocalisation, automatisation des tâches, aide à la décision
Gestion	comptabilité, services bancaires et financiers, analyse économique (calcul résultats/culture etc.), gestion des stocks, gestion du parcellaire, gestion environnementale, planification, déclaration officielles, demandes d'aides, gestion du matériel
Information	information météo, sur l'état sanitaire, les marchés, les pratiques, la législation, formations en ligne
Communication - collaboration	plateforme collaborative : location de matériel, échange de parcelle, réseaux de discussion, achat intrants, échange de services, financement participatif, achat/vente d'équipement, achat/vente de produits ou coproduits, mise en relation avec une ETA, mise en relation avec de la main-d'oeuvre
Valorisation	traçabilité, vente de la production (marchés financiers, circuits courts etc.), gestion de la vente, marketing, échanges avec les consommateurs

Cette typologie des technologies via les fonctions permet de considérer le numérique en agriculture en incluant toutes les dimensions des exploitations agricoles. Celles-ci sont le lieu de processus de production mais aussi de gestion économique, de prises de décisions articulant une diversité d'objectifs, de connaissances et de contraintes, en lien avec les systèmes économique, institutionnel, social et informationnel dans lesquelles elles s'insèrent. De plus, cette catégorisation est pertinente pour l'étude des usages, puisqu'elle

distingue les technologies en fonction des types d'utilisation qui peuvent en être faits.

Différentes initiatives existent afin de référencer les différentes technologies ou les différentes entreprises du numérique en agriculture : par exemple celui réalisé par l'entreprise Aspexit (disponible en ligne ici [3]), celui réalisé dans le cadre du projet FAIR-SHARE [4], ou encore dans les travaux de Chapus et Brailly (2022).

Ces outils et fonctions peuvent se retrouver à différentes échelles : la parcelle, le système d'exploitation, le territoire, la filière etc. Je considère donc le numérique comme un ensemble d'outils avec une diversité de fonctions et non l'agriculture numérique comme un modèle agricole en soi (Leveau et al., 2019).

2 La digitalisation du secteur agricole

Le développement du numérique dans le secteur agricole, que l'on qualifiera de digitalisation de l'agriculture, amène de nouveaux usages et des changements à l'échelle des exploitations agricoles. Ces transformations des pratiques dans les exploitations agricoles dépendent d'un ensemble de facteurs : les caractéristiques individuelles des exploitants et exploitantes (âge, formation...) peuvent jouer mais également les relations qu'ils/elles construisent avec d'autres acteurs, saisies à travers l'analyse de leurs réseaux égocentrés (Sutherland, Labarthe et al., 2018), ou encore des évolutions sectorielles plus larges (réglementation, marchés, incitations, subventions...). Ainsi, l'innovation n'est pas considérée ici comme un processus top-down allant de la recherche aux agriculteurs et agricultrices, mais comme un processus complexe, lié à un ensemble d'interactions entre différents types d'acteurs, d'organisations, d'institutions et de connaissances (Touzard, Temple et al., 2014). Les évolutions technologiques sont alors considérées comme plus endogènes au secteur et à l'économie. Ainsi, même si je m'intéresse au changement à l'échelle des exploitations agricoles, celui-ci est intimement lié à des changements à l'échelle plus globale du secteur. Cette section a pour objectif de décrire les changements sectoriels liés au développement du numérique en agriculture.

2.1 Des modifications à l'échelle des acteurs du secteur agricole

Dans le secteur agricole, le numérique peut apporter des modifications sur les acteurs et sur leurs manières d'interagir. En effet, le développement du numérique nécessite des compétences qui n'étaient pas présentes dans le secteur agricole : de nouveaux acteurs sont donc mobilisés pour apporter ces compétences. Cela peut se faire via l'extension d'activités des acteurs du domaine numérique ou aérospatial (Orange ou Airbus par exemple), via l'intégration de compétences numériques dans les organisations traditionnelles du secteur agricole, ou via l'émergence de nouvelles organisations propres à l'« AgTech », c'est-à-dire spécifiques aux nouvelles technologies pour l'agriculture.

3. https://www.lesoutilsnumeriquesdesagriculteurs.com/
4. http://www.acta.asso.fr/r-d/partenariats-europeens/projets-h2020/fairshare.html

2.1.1 *Les acteurs impliqués*

Les nouveaux acteurs : start-ups et acteurs du numérique
Le développement du numérique dans l'agriculture, amène de nouveaux acteurs dans le secteur, notamment des start-ups qui proposent des technologies basées sur le numérique pour l'agriculture (Chapus et Brailly, 2022). Dans les documents publics, ce sont les start-ups qui sont mises en avant pour susciter et développer l'innovation dans ce domaine. Le magazine institutionnel du Ministère de l'agriculture, Alim'Agri, a consacré un numéro au numérique en agriculture en 2016 (puis en 2018) (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016a). Celui-ci commence par une description générale de la stratégie du ministère sur le numérique, par Jean-Marc Bournigal, auteur du rapport Agriculture-Innovation 2025 l'année précédente (Bournigal et al., 2015). Les start-ups apparaissent au centre de cette stratégie [p.10] :

> *« Pour que ce big data soit au service de l'agriculteur, il faut rendre les données accessibles au plus grand nombre dans une logique d'innovation ouverte qui favorise l'émergence de start-up et de nouveaux opérateurs. »*

Le plan d'action parle essentiellement de l'accompagnement des start-ups (Cf p.11). Ainsi, en 2015, les investissements mondiaux dans les start-ups en technologies agricoles et alimentaires ont doublé, atteignant les 4,6 milliards de dollars (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016a, p.12). Ce rapport décrit un certain nombre de technologies numériques en cours de développement. Quasiment l'intégralité des technologies présentées sont proposées par des start-ups : Alkemics, Naïo Technologies, Arpent, Ekylibre, MaForêt, Usitab ou encore Phenix. Certaines arrivent avec de nouveaux services, d'autres se positionnent sur le renouvellement de services existants : par exemple la vente en ligne d'intrants.

Dans le panorama réalisé par Prause, Hackfort et Lindgren (2020) et récapitulé dans le Tableau 1.1, les start-ups sont en effet très présentes. Mais elles ne sont pas les seuls nouveaux acteurs qui arrivent dans le secteur agricole. Le développement du numérique en agriculture est aussi l'œuvre d'entreprises qui ont des compétences et de l'expertise dans le domaine du numérique et qui les étendent dans un nouveau secteur. Prause mentionne Alibaba et Adobe Inc. On peut également mentionner Google (projet Mineral en robotique par exemple) ou Microsoft (FarmBeats). En France, on peut citer l'entreprise Orange Business Services, partenaire d'AgDataHub et de Suez afin de « *faire émerger des solutions accélératrices de la transition numérique et environnementale du secteur agricole* »[5], ou bien SFR qui propose ses services pour la mise en place de solutions IoT, ou encore Airbus qui travaille sur des services de télédétection parcellaire.
On peut noter que le terme de start-up, bien que largement utilisé, est rarement défini. BpiFrance propose de définir une start-up comme « *une entreprise nouvelle innovante à fort potentiel de croissance et de spéculation sur sa valeur future* », mais aussi comme « *un état d'esprit* »[6]. Il existe donc un flou sémantique autour du concept de start-up, celle-ci se distinguerait des

5. Description de AgDataHub en date du 27/04/2021 accessible ici : https://agdatahub.eu/a-la-une/agdatahub-orange-business-services-et-suez-partenaires-au-service-de-la-transition-agro-environnementale/
6. https://bpifrance-creation.fr/moment-de-vie/quest-ce-quune-startup

autres entreprises par une petite taille (sans limite précise), le fait qu'elle soit émergente (sans durée indiquée), l'absence de rentabilité mais un fort potentiel de croissance (mais de fortes probabilités d'échec : de 60 à 90%), ainsi que des caractéristiques du travail qui serait informel, collaboratif, horizontal, à forte responsabilité et intense (Cockayne, 2019). D'après cet auteur, le concept de start-up serait plus un discours économique perfomatif qu'une réelle catégorie d'entreprise.

Les acteurs traditionnellement présents dans le secteur agricole et alimentaire
Pour autant, le développement du numérique n'est pas qu'une dynamique exogène au secteur agricole. Il résulte également du déploiement de stratégies numériques au sein des organisations classiques du secteur ou déjà présentes dans le secteur.

On retrouve ainsi les acteurs des industries d'amont de l'agro-chimie : Syngenta, Dow DuPont, Bayer Crop Science, Yara International ; mais aussi de l'agro-machinisme comme John Deere ou Claas par exemple. Ces acteurs sont notamment impliqués dans le développement de technologies d'agriculture de précision (Oui, 2021b). Par exemple, Yara développe l'outil de modulation d'azote N-Sensor et l'entreprise John Deere propose le hardware qui permet l'application de la modulation d'intrants. L'entreprise Bayer propose des cartes de modulation via Climate FieldView, depuis son rachat de The Climate Corporation. Ces entreprises proposent également une diversité d'autres Outils d'Aide à la Décision : on peut citer l'outil Movida proposé par Bayer pour la gestion du mildiou et de l'oïdium chez la vigne. Ces entreprises se positionnent également sur les logiciels de gestion tels que Myjohndeere par l'entreprise éponyme, ou AgriEdge proposé par Syngenta.

Des acteurs situés en aval des activités agricoles, comme Cargill, Nestlé ou encore Carrefour, jouent un rôle important en se positionnant notamment sur les technologies de commercialisation et de traçabilité.

Des acteurs qui gravitent autour du secteur agricole tels que les assurances, les fonds d'investissement (Demeter, CapAgro) ou des fondations (la fondation Bill et Melinda Gates par exemple) investissent également dans le développement du numérique.

Les organisations professionnelles agricoles participent également au développement du numérique notamment les coopératives agricoles, les entreprises de négoce, les chambres d'agriculture, les instituts techniques ou autres structures de conseil. Les chambres d'agriculture proposent par exemple l'outil MesParcelles, logiciel de gestion de l'exploitation, la Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles (FNSEA) a conçu et met en avant la charte Data Agri. On peut aussi évoquer InVivo, l'union française des coopératives agricoles, qui a racheté la start-up Smag en 2012 ou encore les DigiFermes, portées par des instituts techniques agricoles, qui proposent des fermes dédiées à l'expérimentation pour les technologies numériques.

Les acteurs publics
Le développement du numérique dans le secteur agricole n'est pas que le fruit de dynamiques d'entreprises privées. Des organisations et politiques publiques accompagnent le développement du numérique en agriculture. Le Rapport Agriculture-Innovation 2025 inscrit ainsi le numérique comme élément des politiques publiques agricoles (Bournigal et al., 2015). À l'échelle

nationale, la « délégation au numérique et à la donnée », créée en Avril 2017 au sein du ministère de l'Agriculture, vise à « *accompagner le développement du numérique, que ce soit dans le fonctionnement et les outils de l'administration ou dans les politiques publiques dont le ministère à la charge* » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b). Dans la recherche, des équipes se consacrent au machinisme de précision (au Cemagref, devenu Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA)) ou à la modélisation (INRA) dès les années 80, dont les travaux prennent un nouvel essor dans les années 2010 (Oui, 2021b). Petit à petit, la question du numérique s'invite dans les programmes de recherche publique (par exemple DigitAg), ou privé-publique (comme le PIA Occitanum) et dans les enseignements agricoles. Je détaille les politiques publiques d'innovation de ce domaine dans la Section 2.2.

2.1.2 *Les réseaux*

J'ai ici évoqué l'évolution des acteurs dans le secteur agricole liée à la digitalisation, mais ces acteurs n'agissent pas isolés les uns des autres. On peut constater que le numérique en agriculture évolue via de nombreuses dynamiques partenariales et de réseaux.

Les partenariats

Afin de combiner les compétences dans les domaines numériques et agronomiques, beaucoup de projets se développent en partenariat entre des acteurs spécialisés dans chacun de ces domaines, et notamment via des partenariats publics-privés, vus comme stratégiques dans ce *nouveau paradigme technoscientifique* de l'agriculture de précision puis de l'agriculture numérique (Oui, 2021b, p.139). Un exemple historique est l'outil Farmstar proposé par l'institut technique du Végétal Arvalis[7] (Labarthe, 2010). Farmstar est un service de conseil sur la fertilisation des cultures, qui se base sur de l'observation des parcelles par télédétection. Les images obtenues sont analysées afin de déterminer les doses de fertilisation à apporter sur une zone de la parcelle selon l'état des cultures à cet endroit donné et selon l'objectif visé. Ce service s'est construit sur un partenariat entre les instituts techniques Arvalis, Terres Inovia et l'entreprise Airbus, en utilisant les travaux académiques issus de l'INRAE (Oui, 2021b, Chapitre 5). D'autres types de partenariats sont mis en œuvre, notamment pour combiner les expertises numériques et agronomiques, tel que le partenariat de Microsoft avec InVivo.

Ces partenariats se développent pour la conception des technologies numériques, mais également pour l'ensemble des innovations qui s'associent à ce développement technologique. Ces innovations peuvent être des standards, des procédures, des chartes. Par exemple l'association Agro EDI Europe rassemble 280 adhérents : des industries de l'agrofourniture, des fournisseurs de technologies, des instituts techniques agricoles, des organisations professionnelles agricoles ainsi que des acteurs publics. Cette association créée en 1992 a pour objectif de fixer des standards d'échange de données entre tous ces acteurs. On peut citer également le projet Multipass, partenariat entre des instituts techniques agricoles, l'Association de Coordination Technique

7. Arvalis est un institut technique agricole, qui fait de la recherche appliquée dans le domaine des grandes cultures

Agricole (ACTA), l'INRAE, Orange et Smag afin de gérer le consentement d'échange de données agricoles, qui a mené à la création de la société Agdatahub. La charte Data Agri, conçue par la FNSEA en partenariat avec des entreprises du numérique agricole, fixe des règles de bonnes pratiques sur le traitement des données agricoles. Au-delà de ces alliances formelles, des rencontres, échanges, discussions se mettent en place entre acteurs, participant à construire une communauté de pratiques.
Cette dynamique d'interaction entre acteurs se traduit également par des fusions et acquisitions entre entreprises. La plus célèbre acquisition de ce domaine est le rachat de The Climate Corporation par Monsanto en 2013. D'autres exemples sont le rachat de Blue River Technology par John Deere, l'investissement de BASF dans ProAgrica. La fusion de Bayer et de Monsanto serait même liée à une stratégie de positionnement en leader dans le domaine du numérique agricole (Piot-Lepetit, 2019). Les entreprises de l'agro-industrie accompagnent et financent également directement l'émergence de start-up, avec des capital venture et incubateurs (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020), tels que Bayer Growth Ventures, Syngenta Group Ventures, Cargill Ventures ou InVivo Digital Factory.

La construction d'une communauté de pratiques
Au-delà des interactions autour de projets spécifiques, repérées via les partenariats entre acteurs, ces derniers interagissent autour de la question du numérique agricole et construisent des réseaux sur le sujet. Un certain nombre d'événements professionnels, d'échanges informels et d'associations participent à la création d'un cadre cognitif commun (répertoire de termes, de routines, etc.), d'une mission commune et d'engagement mutuel qui mettent en cohérence les pratiques de ces acteurs autour du numérique en agriculture, constituant ainsi une *communauté de pratiques* (Wenger et al., 1998).

Premièrement, ces dernières années ont vu l'apparition d'une 'communauté numérique' sur des événements traditionnels du secteur agricole français tels que le Salon International de l'Agriculture (SIA), le Salon International du Machinisme Agricole (SIMA), les différentes foires agricoles (Salon de l'élevage, SITEVI [8], Innov' Agri, etc.). Par exemple, un « Village Robotique » est présent sur le salon Innov'Agri, le SIMA lance en 2021 une journée spécifique aux services numérique appelée SIMA Tech Connect, le SITEVI organise un village start-up qui regroupe essentiellement des start-up dans le domaine du numérique.

Deuxièmement, des événements spécifiques à la question du numérique en agriculture sont mis en place. Des salons professionnels dédiés à la question sont apparus ces dernières années. Le Forum International pour la Robotique Agricole (FIRA) existe depuis 2016. Les journées de la Ferme Digitale (LFDay), organisées pour la première fois en 2017, regroupent des start-up et divers acteurs du secteur sur la thématique des « AgTech ». Des acteurs de l'enseignement et de la recherche organisent également des journées consacrées au numérique : l'ESA Connect à l'école supérieure d'agricultures d'Angers (ESA), les journées DigitAg ou encore les séminaire AgroTIC par exemple. Un certain nombre de séminaires/webinaires se sont développés sur cette

8. Salon international des équipements et savoir-faire pour les productions vigne-vin, olive, fruits-légumes

thématique tels que les webinaires organisés par DigitAg ou par Agreenium et l'ACTA.

De plus, cette communauté se constitue autour d'associations. En France, La Ferme Digitale ou encore CoFarming sont des associations qui regroupent des start-up du domaine agricole. Robagri est une association internationale qui regroupe les acteurs de la robotique agricole : start-up mais aussi entreprises du machinisme agricole, de l'électronique, laboratoires de recherche, pôles de compétitivité et acteurs agricoles. De même, la WineTech rassemble des start-ups qui développent des technologies numériques dans le domaine du vin (conservation, consommation, vente etc.). Du côté académique, des réseaux se structurent également, avec notamment l'*International Society of Precision Agriculture*, qui organise tous les ans une conférence internationale sur le sujet et dispose de sa propre revue scientifique.

Peu à peu, cette communauté professionnelle acquièrt une expertise reconnue, une légitimité et a un impact sur les institutions et politiques publiques, formant ce qu'on peut appeler une *communauté épistémique* (Cohendet, Grandadam et al., 2014 ; Haas, 1992).

2.2 Politiques publiques et développement du numérique

Le Rapport Agriculture-Innovation 2025 identifie deux priorités concernant l'Agriculture numérique (Bournigal et al., 2015, p.37). La première est la mise en place d'un portail de données agricoles, qui mènera au projet AgGate en 2016. Le rapport AgGate définit un cahier des charges concernant la mise en place de ce portail. C'est l'entreprise Api-Agro, issue d'un projet coordonné par l'ACTA, qui a été chargée de la mise en œuvre de ce portail à partir de 2016. La thèse en cours de Mathieu Rajaoba retrace la construction de ce portail de données. La deuxième priorité du Rapport Agriculture-Innovation 2025 est la structuration de la recherche sur cette question. Elle mène à la constitution de l'Institut de Convergence DigitAg en 2017, qui structure aujourd'hui la recherche française sur le sujet.

2.2.1 *Recherche et enseignement*

Un Institut de Convergence est une démarche proposée par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR), qui vise à développer des projets scientifiques pluridisciplinaires de grande ampleur, qui structurent et visibilisent la recherche autour de grands enjeux socioéconomiques, tout en produisant des connaissances et proposant des formations [9]. Financé dans le cadre des Investissements d'Avenir et porté par l'INRAE, l'institut DigitAg rassemble 16 partenaires publics et privées et 29 unités de recherche. L'objectif est de « *produire les bases scientifiques et pédagogiques nécessaires au déploiement harmonieux de l'agriculture numérique en France, en Europe et dans les pays du Sud* » [10]. Cet institut dispose de moyens conséquents (9,9M€) pour développer des recherches sur le sujet, via notamment le financement d'une centaine de thèses, en informatique, géomatique, statistiques, mathématique, optique, physique, agronomie etc. mais aussi en sciences sociales. Au-delà d'une source de financements dans ce domaine, l'institut est aussi une structuration

9. https://anr.fr/fileadmin/aap/2016/ia-convergences-2016.pdf
10. https://www.hdigitag.fr/fr/qui-sommes-nous-2/

de la recherche française sur le sujet, une mise en réseau des différentes équipes françaises travaillant sur ces thématiques, et aussi une force de communication à l'international.

Cependant, la recherche sur le numérique dans l'agriculture existait au préalable, sans forcément se nommer comme telle. Des équipes travaillent sur de la modélisation, intégrée dans des OAD, depuis les années 1980 à l'INRA et les recherches sur le machinisme de précision sont développées depuis les années 1990 au Cemagref (devenu IRSTEA puis INRAE) (Oui, 2021b). Les sciences sociales en France se sont plus tardivement intéressées à la question, avec les travaux de Nathalie Hostiou sur l'élevage de précision (Hostiou, Allain et al., 2014), les travaux de Danielle Galliano sur les TIC et les Industries Agro-Alimentaires (Galliano et Roux, 2006), ou encore les travaux de Pierre Labarthe sur le conseil et les connaissances (Labarthe, 2010) ou de Philippe Jeanneaux sur les processus de décision des agriculteurs (Jeanneaux, 2018). Plus récemment, ces travaux ont connu un fort essor, lié en partie à l'institut DigitAg. Cette thèse en est l'illustration

L'enseignement a aussi pris en compte ce développement technologique depuis plusieurs années. La spécialité AgroTIC a été créée à Montpellier SupAgro puis à Bordeaux Sciences Agro afin de former des ingénieurs avec la double compétence agronomie - numérique. L'ESA d'Angers et UniLaSalle Beauvais proposent également des enseignements sur cette thématique.

2.2.2 *Politiques d'appui à l'innovation*

Le développement du numérique dans le secteur agricole mobilise des ressources humaines mais également financières et politiques, à différentes échelles.

À l'échelle européenne, des projets de recherche ou des projets de développement du numérique en agriculture sont financés. Le site du partenariat européen pour l'innovation agricole (EIP-Agri) recense les projets de recherche et opérationnels soutenus par la commission européenne. En indiquant les mots-clés [11] proposés par le site qui renvoient au numérique au sens large, on obtient ainsi 163 projets. Par exemple, le projet de recherche *PigWise* vise à développer des outils numériques afin de gérer la performance de production, la croissance et la bien-être des porcs, financé par les programmes cadre européens ; le projet *Plateforme numérique expérimentale LoRa en agriculture* vise à créer une plateforme de communication entre objets connecté sur une ferme expérimentale, est financé à hauteur de 130 k€ par les fonds de développement rural 2014-2020 ; le projet *Smart beekeeping kept simple* vise à développer des bonnes pratiques apicoles basées notamment sur des capteurs, financé par Horizon 2020 ; ou encore le projet *Internet of Food and Farm 2020* financé également par les fonds Horizon 2020, vise à augmenter la productivité et la durabilité des systèmes agri-alimentaires via l'Internet des Objets. Ainsi, la Commission européenne aurait investi 192 M€ [12] entre 2014 et 2020 dans la recherche pour et sur le développement du numérique en agriculture.

11. Blockchain, data management, data sharing, data innovation hub, digital learning, digitisation, drone, Decision Support System (DSS), data-driven agriculture, ICT/software, ICT, information system, platform

12. Donnée indiquée sur : Agriresearch Factsheet - Digital Transformation in agriculture and rural areas 2019

À l'échelle nationale, j'ai déjà évoqué le financement de projets de recherche et d'éducation. De plus, les mesures économiques générales (accompagnement de l'innovation, financement des start-up, crédit impôt recherche) soutiennent massivement les entreprises proposant des technologies et services numériques dans le domaine agricole. Le *Grand Plan d'Investissement* 2018-2022 soutient « *l'innovation et la structuration des filières agricoles* » (500M€) et « *la montée en gamme de l'aval agricole* » (1,6Md€). En outre, le gouvernement français a lancé le 30 Août 2021 la « French AgriTech », plan d'investissement avenir qui va consacrer 200M€ au développement de start-up agricoles dans les 5 ans à venir (Voir le dossier de presse [13]).

2.2.3 *Politiques d'appui à l'innovation dans les exploitations agricoles*

La Politique Agricole Commune (PAC) soutient également le développement numérique agricole. Ce soutien dépend des orientations nationales mais est permis par différents éléments de la PAC. Premièrement, le développement de la télédéclaration de la PAC, rendue obligatoire en 2016, ainsi que différents outils de régulation (déclaration viticole en ligne auprès de la douane, traçabilité de l'usage de produits phytosanitaires...) constituent un facteur de numérisation important (Magnin, 2019 ; Mesnel, 2017). Deuxièmement, pour la PAC 2014-2020, le second pilier dispose de différents outils de financement du numérique [14]. L'article 17 propose le co-financement d'équipements afin de moderniser les exploitations agricoles. Cela peut faciliter l'investissement dans des systèmes de guidage ou de modulation. Les mesures agro-environnementales ou climatiques proposées dans l'article 28, peuvent être justifiées par l'utilisation de matériel d'agriculture de précision. L'article 35 qui vise à favoriser la coopération, peut financer l'achat commun de matériel d'agriculture de précision. Les mesures sur les services de conseil (article 14 et 15) peuvent également servir à la diffusion du matériel d'agriculture de précision. La place du numérique sera renforcée dans la future PAC, avec la mise en place de stratégies par les États-membres pour leur système de connaissance et d'innovation (article 5) et le focus explicite de la digitalisation comme axe de la modernisation, supportée par la commission européenne (article 102) (Labarthe, Prager et al., 2021). À l'échelle nationale, le *Grand Plan d'Investissement* 2018-2022 consacre plus d'un milliard d'euros au « *soutien aux investissements dans les entreprises agricoles* » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a).

Ainsi, les diverses politiques d'appui à l'innovation, visant le secteur privé, le secteur public ou les exploitations agricoles se rejoignent puisque la politique d'innovation se base sur les relations et partenariats entre ces types d'acteurs.

2.3 Usages du numérique

Le développement du numérique dans le secteur agricole se traduit par des changements en termes d'acteurs, de politiques publiques, mais aussi par

13. https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/09/310821-_dossier_de_presse_-_lancement_de_la_french_agri_tech.pdf

14. Indications d'après le document du parlement européen accessible ici : Precision agriculture: An opportunity for EU farmers - Potential support with the CAP 2014-2020, 2014

le développement de nouveaux usages, c'est-à-dire l'utilisation effective des technologies numériques, leur intégration dans les exploitations agricoles.

Les usages du numérique par les agriculteurs et agricultrices françaises sont relativement peu connus. Les statistiques agricoles officielles commencent à intégrer quelques chiffres sur l'équipement numérique dans les exploitations agricoles, mais ces informations restent très imprécises et sont peu à jour. Le recensement agricole de 2010 dispose de seulement quelques variables sur le numérique : l'utilisation d'internet, l'utilisation d'internet haut débit, l'utilisation d'un logiciel spécialisé en comptabilité et d'un logiciel spécialisé en gestion technique (suivi des parcelles, gestion des troupeaux...).

Par ailleurs, des études apportent quelques informations sur les usages du numérique dans les exploitations agricoles françaises. L'*observatoire des usages de l'agriculture numérique*, créé par la Chaire AgroTIC et l'institut de convergence DigitAg, a pour objectif de montrer l'usage actuel du numérique en France : les technologies utilisées, les types d'agriculture touchées et les applications. Des infographies sont réalisées sur l'usage d'outils particuliers. La récolte de données s'effectue par des recherches bibliographiques, des entretiens auprès des entreprises qui fournissent ces services, et auprès de conseillers et techniciens agricoles. D'après leurs études, la commercialisation de services de télédétection concernerait 905 000 Ha en 2020 (contre 1,1 Million en 2016). Cela représente 10% des surfaces en grandes cultures et 1,2% des surfaces en viticulture. Environ 30% des exploitations utiliseraient des capteurs de rendement. Les systèmes de géolocalisation des tracteurs (guidage) seraient utilisés par la moitié des agriculteurs et agricultrices en France, dont 30% avec une correction RTK. Une exploitation agricole sur deux aurait une station météo connectée. En élevage bovin, en 2018, plus de 10000 robots étaient utilisés. En production végétale, seulement quelques centaines de robots sont utilisés, pour le désherbage notamment, la plupart étant encore à l'état de prototypes. Le smartphone est utilisé pour les applications de réglage de matériel (épandeur, semoir, pneus...), les applications d'arpentage (dimensionnements plants...), pour le guidage (GPS), pour avoir accès à des informations sur la météo ou la saisie d'observations aux champs.

Depuis 2006, une enquête annuelle sur l'utilisation d'internet par les agriculteurs, l'enquête Agrinautes, est réalisée pour *Terre-net média*, sur un échantillon de près d'un millier d'agriculteurs, dont les réponses sont ensuite redressées en fonction de la région et de l'orientation technico-économique (OTEX) de l'exploitation. Ces études montrent qu'en 2020 95% des exploitations étaient couvertes par le réseau mobile. 70% des agriculteurs avaient un smartphone (45% en 2016), 86% se connectaient à internet au moins une fois par jour. L'étude indique qu'en ligne, les contenus les plus consultés (ie, par le plus grand nombre d'agriculteurs) étaient, dans l'ordre : la météo, les services bancaires et les petites annonces. Les résultats indiquent que 68% des agriculteurs connectés consultent les réseaux sociaux dans un but professionnel (42% en 2016), principalement Facebook (44,7%) et whatsApp (40,9%) mais aussi Youtube, Twitter etc. Les sources d'information privilégiées restent la presse agricole papier et les conseillers des distributeurs. Par ailleurs, presque trois quart des agriculteurs font des achats sur internet, principalement des petits consommables et des pièces détachées. Pour les OAD, 44% en utilisent. (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016a ; Terre-net Média, 2021).

Une enquête Agrodistribution-ADquation sur les usages du numérique en agriculture a été réalisée en 2014. Les données de ces deux enquêtes, bien que partielles, sont la principale source d'information sur les usages du numériques. Elles ont notamment été utilisées dans le rapport du Think Tank *Renaissance Numérique* réalisé en 2015, qui qualifie les agriculteurs de « early-adopters » et indique les chiffres suivants : 79% des agriculteurs et agricultrices utiliseraient internet, 76% consulteraient la météo en ligne plusieurs fois par semaine (Isaac et Pouyat, 2015). Ce rapport semble servir de référence au ministère de l'agriculture, qui relaie les données rassemblées dans ce rapport dans son infographie sur le numérique en agriculture (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016b).

Il n'existe que peu de données sur les usages du numérique dans la littérature scientifique, et notamment à l'échelle française. La littérature en économie analyse les facteurs qui jouent sur l'adoption des technologies numériques mais peu les usages en eux-mêmes. Pour les technologies de l'agriculture de précision, ces travaux mettent en évidence des facteurs individuels (âge, formation), des facteurs économiques (taille de l'exploitation, type de production, revenu, main-d'œuvre), des facteurs socio-économiques (appartenance à une coopérative, conseil) et technologiques (facilité à utiliser la technologie, temps nécessaire, informations disponibles sur son efficacité) (Barnes et al., 2019 ; Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). Ces travaux, qui seront présentés plus en détail dans le Chapitre 2, montrent que les facteurs varient selon les technologies concernées.

L'information sur l'utilisation des technologies numériques par les agriculteurs est donc encore limitée, avec très peu d'information sur les usages réels, l'appropriation et les conséquences de ces technologies dans les exploitations. Les statistiques nationales disposent pour l'instant de peu d'information sur les usages du numériques et la littérature scientifique est également limitée sur le sujet, en France mais également à l'international. Les données disponibles sont partielles, à la fois en termes de représentativité, mais également en termes d'usage, puisque la plupart des données concernent l'adoption d'une technologie ou l'usage d'un service de façon isolée. Les conséquences de ces technologies évoquées dans les documents scientifiques et institutionnels sont donc essentiellement des présupposés, des potentialités puisque peu de travaux étudient les effets de ces technologies dans leurs conditions d'utilisation. Les changements concrets amenés par ces outils sont mal connus. Pourtant, le numérique est largement soutenu par les fonds publics. Cette situation est d'autant plus pardoxale que la digitalisation fait l'objet de controverses, notamment vis-à-vis de sa capacité à répondre aux enjeux environnementaux de l'agriculture.

3 Les controverses sur le numérique et l'écologie dans l'agriculture

Le développement du numérique est mis en avant par des scientifiques, des organisations agricoles et des organismes internationaux pour à la fois améliorer la productivité de l'agriculture et réduire ses impacts sur l'environnement (Lajoie-O'Malley et al., 2020). De ce fait, le déploiement des technologies numériques est soutenu et inscrit dans des politiques agricoles qui ont des objectifs de double-performance économique et écologique (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020). Mais ce déploiement fait l'objet de controverses. Notamment,

la compatibilité entre la digitalisation de l'agriculture, et sa transformation pour intégrer les enjeux environnementaux fait débat. Premièrement, les impacts du numérique sur l'environnement font l'objet de controverses non spécifiques au secteur agricole. Deuxièmement, les impacts du numérique font l'objet de débats spécifiques à la question environnementale de l'agriculture, et notamment par rapport au(x) modèle(s) agricole(s) que le numérique peut soutenir.

3.1 Le numérique et l'écologie

Le numérique est présenté comme élément de solution face aux problèmes environnementaux dans de nombreux documents institutionnels, rapports scientifiques, rapports de think tank ou d'entreprise (ADEME et al., 2017 ; Babinet, 2021 ; Bai et al., 2020 ; Ministère de la transition écologique et Ministère de l'économie, 2021 ; Potier, 2020). Bien que rarement argumentés, les hypothèses alliant numérique et environnement se basent sur plusieurs éléments. L'élément principal est le fait que les données créées par les technologies numériques permettraient de mieux gérer les processus, de les optimiser, et donc de minimiser leurs impacts négatifs. Ainsi, on présente la gestion par le numérique comme une gestion « intelligente ». La « Smart City » par exemple, permettrait d'optimiser les flux et de mieux gérer la consommation énergétique des villes, en modulant l'éclairage des villes en fonction de la fréquentation ou en optimisant la consommation énergétique des bâtiments (Marquet, 2019 ; Potier, 2020). La « Smart Factory » gérerait les quantités et qualités des productions et limiterait le gaspillage (Lezoche et al., 2020). Les entreprises pourraient mieux gérer leurs déchets (Potier, 2020). Le numérique permettrait d'optimiser les transports de marchandises et de synchroniser au mieux les besoins et l'offre grâce à l'information (Babinet, 2021). Ces technologies pourraient aussi favoriser la mise en place de mécanismes d'économie circulaire en favorisant la transmission d'information (ADEME et al., 2017 ; Bai et al., 2020).

Cette vision positive qui transparaît dans ces documents institutionnels et professionnels participe à un pouvoir 'soft', c'est-à-dire à la capacité à inspirer, persuader et mobiliser au travers d'arguments éthiques ou intellectuels (Morgan, Marsden et Murdoch, 2008, p.4-5). Cela contribue à la construction d'un imaginaire autour d'un horizon désirable où les technologies numériques offriraient de nouvelles manières de répondre aux enjeux environnementaux de la société. L'innovation numérique s'inscrit ainsi dans le régime d'économie des promesses techno-scientifiques, qui concourt à donner une crédibilité à ses promoteurs, à légitimer leurs innovations et à mobiliser des ressources diverses (P.-B. Joly, 2015).

Afin d'éviter des liens mécanistes et simplistes entre l'utilisation de technologies numériques et l'environnement, Berkhout et Hertin (2004) décrivent les types d'interaction et donc les potentiels types d'impacts du numérique sur l'environnement. Cela les amène à qualifier trois types d'impacts.

— **Impacts directs**
  Ce sont les impacts directs issus de la production et de l'utilisation de ces technologies. On peut citer par exemple la pollution générée lors de la conception des technologies via l'extraction des métaux, ou la consommation d'énergie pour la conception et pour l'utilisation des

technologies, notamment pour le fonctionnement des serveurs. Les estimations de la consommation énergétique du secteur des TIC sont très diverses et débattues. Des estimations indiquent que ce secteur utilisait environ 8% de l'électricité mondiale en 2010 et pourrait monter autour de 14% en 2030 (Lange, Pohl et Santarius, 2020). Ces impacts directs peuvent être également liés à l'utilisation de ressources non renouvelables, aux déchets produits ou au recyclage.
Les auteurs montrent que tous ces impacts directs ont un bilan négatif sur l'environnement.

— **Impacts indirects**
Ces impacts découlent des effets de l'usage de ces technologies. On a par exemple des effets liés aux changements sur les processus de production, tels que l'optimisation des processus de production via la modélisation ou la gestion de la logistique et de la distribution par les données (Lange, Pohl et Santarius, 2020). De plus, les usages du numériques peuvent permettre la « dématérialisation » de produits, de services ou de travail : accès à de l'information, musique, réunions et conférences, réalisation de certaines tâches etc. (Berkhout et Hertin, 2004). Ceux-ci peuvent se substituer aux biens et services existants, permettant de réduire les impacts environnementaux, ou s'y additionner, créant de nouvelles pressions environnementales.
D'après les auteurs, ces impacts sont à la fois positifs (gains d'efficience, virtualisation, gestion environnementale) et négatifs (prolifération, addition plutôt que substitution).

— **Impacts structurels et comportementaux**
Ce sont des impacts plus larges, plus difficiles à évaluer car en interaction avec un ensemble d'autres facteurs. Ces impacts sont liés à des changements structurels de la société, par exemple la recomposition sectorielle de l'économie, les changements de modes de vie et de consommation, l'évolution des déplacements. Ces changements structuraux peuvent amener ce qu'on appelle un *effet rebond*. Un tel effet se produit lorsque les gains d'efficacité stimulent la demande, dont la croissance va contrebalancer, voire outrepasser, les effets positifs sur l'environnement liés au gain d'efficience (Berkhout et Hertin, 2004). En effet, un gain d'efficience va potentiellement amener une baisse des coûts, des capacités plus importantes et de nouvelles demandes. C'est ce qui a été constaté avec les gains d'efficience des ordinateurs, des serveurs mais aussi dans le secteur des transports ou de l'énergie (Berkhout et Hertin, 2004).
Ces changements peuvent être positifs ou négatifs sur l'environnement, et peuvent changer dans le temps et l'espace.

D'après la littérature réalisée sur le numérique, je peux ajouter un quatrième type d'impacts, celui sur les connaissances. Ces impacts pourraient s'intégrer dans la catégorie ci-dessus, puisque des changements sur les connaissances peuvent avoir des impacts structurels et comportementaux. Cependant, il me semble y avoir des spécificités liées aux impacts sur les connaissances. En effet, le développement du numérique dans la société change la construction et la circulation des informations et des connaissances dans la société. D'une part, le développement du numérique entraîne une augmentation des données disponibles et créent des données qui étaient

inaccessibles. Notamment, le déploiement de capteurs peut créer des connaissances sur le fonctionnement des processus écologiques ou sur les impacts des activités humaines (Berkhout et Hertin, 2004). Cette multiplication des données disponibles induit des nouvelles formes de construction de connaissances par la recherche, supposées plus inductives et exploratoires (Kitchin, 2014). Ces nouvelles données disponibles et ces nouveaux types d'analyse créent de la connaissance qui peut amener des changements dans les pratiques et comportements, dans les modes de gouvernance et de rationalité ou dans l'organisation des systèmes socio-économiques, et donc avoir des impacts écologiques (Madsen et al., 2016). D'autre part, le numérique change les dynamiques de circulation de connaissances, offrant des possibilités de stockage et de diffusion étendues. Cela peut donner un accès large à des connaissances écologiques (Burton et Riley, 2018), contribuer à la connaissances sur les impacts écologiques de telle pratique ou de telle industrie, mais aussi participer à des phénomènes de monopolisation de l'information (Rikap, 2021). Outre cela, le travail avec les technologies numériques amène à créer des connaissances et compétences, co-produites via l'interaction entre le corps et la machine. Cela peut intensifier les capacités humaines et modifier les processus productifs (Richardson et Bissell, 2019).

Il n'existe pas d'étude qui estimerait les effets de ces changements sur l'environnement.

Les travaux de Lange, Pohl et Santarius (2020) se focalisent sur les impacts uniquement énergétiques. Les auteurs catégorisent également les impacts en plusieurs catégories : impacts directs, efficience énergétique, croissance économique, changements sectoriels. Leur travail montre un effet global négatif des technologies d'information et de communication sur la demande énergétique globale.

Ce qu'il faut retenir de ces études est que pour étudier les effets potentiels ou réels, il ne faut pas s'en tenir aux effets les plus simples sur les processus de production, mais bien prendre en compte la globalité et la temporalité des effets. Or les hypothèses associant numérique et environnement ne retiennent souvent que de simples rapports de causalité de type augmentation de l'efficience d'un processus. Ces hypothèses négligent souvent les impacts intrinsèques de la production de ces technologies et les impacts plus larges, tels que l'effet-rebond. Ces impacts sont difficilement évaluables car complexes, interdépendants, incertains, et dépendants du contexte et de l'échelle envisagée (Berkhout et Hertin, 2004). Ils sont également liés aux effets sociaux, économiques et politiques qui peuvent interagir avec les questions environnementales.

3.2 Controverses dans le domaine agricole

Les innovations technologiques sont typiquement porteuses d'une double-vision dans la société : d'un côté, elles offrent des potentiels transformatifs et de l'autre, elles sont sources de conséquences inattendues et de potentiels nouveaux problèmes, entre autres environnementaux (Tenner, 1997). Ainsi le développement technologique est en tension permanente entre ces deux facettes (Clapp et Ruder, 2020). Le débat qui en découle sur les liens entre numérique et écologie se retrouve dans le secteur agricole. D'un côté, le

numérique est vu comme porteur de solutions efficaces pour répondre aux enjeux environnementaux de l'agriculture tout en maintenant une productivité élevée. D'un autre côté, le numérique amènerait des risques de renforcer voire d'étendre les impacts négatifs de l'agriculture sur l'environnement, mais aussi plus globalement d'encourager le système agro-industriel. Ce débat se retrouve dans des travaux académiques, des documents institutionnels, mais également dans un certain nombre de textes et manifestes politiques d'organisations économiques, environnementales ou agricoles, qui se sont emparées du sujet, pour le promouvoir ou le critiquer. Les principaux arguments de ce débat peuvent être organisés selon plusieurs catégories que j'ai identifiées : Pratiques agricoles et travail ; Connaissances ; Autonomie ; Dispositif matériel ; et Modèle agricole.

3.2.1 *Effets du numérique sur l'environnement par le prisme des pratiques agricoles et du travail*

L'argument le plus présent dans les discours proposant le numérique comme solution environnementale, est son effet sur l'efficience des processus (Walter et al., 2017). Cet effet correspond à des « impacts indirects », comme expliqué dans la section précédente. Notamment, beaucoup de documents signalent l'intérêt des technologies numériques pour optimiser l'utilisation d'intrants, que ce soit les engrais, les pesticides ou l'eau (Bai et al., 2020 ; INRAE, 2020 ; Microsoft, 2021). Cette optimisation serait permise grâce à la possibilité de prendre des décisions scientifiques basées sur des données. Le numérique favoriserait également de meilleurs rendements et donc nécessiterait moins d'espace dédié à la production pour « *nourrir 10 milliards d'individus* » (Microsoft, 2021). Il favoriserait également le non-labour et donc le stockage de carbone dans les sols (Clapp et Ruder, 2020). En outre, les gains liés à l'efficience des processus permettraient de limiter les pertes et les déchets, tels que les effluents d'élevage ou les pertes d'azote dans le sol. Le numérique pourrait aussi faciliter la gestion des ressources à l'échelle d'un territoire, par exemple en identifiant les flux de matières et en facilitant les décisions collectives (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022).

Les technologies numériques, en créant de nouvelles données, offrent des potentialités sur la compréhension et la gestion des processus écologiques, ce qui pourrait permettre une meilleure gestion de la complexité liée au vivant et contribuerait ainsi à une agriculture plus agroécologique (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Elles offriraient des capacités de gérer chaque décision agronomique au cas par cas et de prendre en compte la complexité des problèmes agronomiques, pour une « *agriculture mesurée* » (Grenier, 2018, p.30). À l'échelle des chaînes de valeur, le numérique permettrait une meilleure coordination entre les organisations et donc une meilleure efficacité (Sonka, 2020). Plus globalement, le numérique accompagnerait la transition écologique, voire agroécologique de l'agriculture (Bournigal, 2016)

Par ailleurs, ces technologies permettraient d'économiser du travail. Cela pourrait aider à la mise en place de tâches plus agroécologiques mais exigeantes en travail, telles que le désherbage mécanique (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017 ; Lebrun, 2020). On retrouve ces arguments notamment dans les discours des entreprises de robotique qui proposent de solutionner le

manque de main-d'œuvre ou de limiter le recours à de la main-d'œuvre précaire et de diminuer la pénibilité du travail (Lenain et al., 2021).

En revanche, d'autres travaux scientifiques affirment que les gains de l'agriculture de précision seraient relativement faibles (des études les estiment de l'ordre de 10%) et pourraient même être contrecarrés par un effet-rebond qui limiterait les économies envisagées (Moschitz et Stolze, 2018 ; Zhang, M. Wang et N. Wang, 2002). Par exemple, une meilleure efficience de la fertilisation pourrait inciter à plus fertiliser afin de maximiser les rendements, ou à fertiliser plus de cultures (Moschitz et Stolze, 2018). Ces technologies seraient conçues en incorporant des objectifs productivistes, en intégrant une vision de l'exploitation agricole basée sur la maximisation des profits, une optimisation de la quantité au détriment de la qualité, renforçant ainsi ce mode de raisonnement de l'exploitation agricole et les pratiques associées, telles que la monoculture, la simplification des itinéraires techniques etc. (Bronson et Knezevic, 2016 ; Carolan, 2020 ; Réseau Action Climat, 2020).

En outre, si les technologies sont conçues pour l'optimisation d'intrant, cela n'incite pas à supprimer les intrants concernés : cela créé des effets de dépendances entre les technologies, de verrouillage des pratiques (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022 ; Réseau Action Climat, 2020 ; Wolf et Buttel, 1996). Tout cela favoriserait la poursuite de la trajectoire productiviste basée sur l'augmentation de la productivité mais aussi la spécialisation et la concentration de la production (Clapp et Ruder, 2020 ; Lioutas et Charatsari, 2020). Du fait que ces outils incorporent des manières de faire, leur utilisation massive pourrait amener à une homogénéisation des systèmes de production (Jakku, Taylor, Fleming, Mason et Thorburn, 2016 ; Wolf et Buttel, 1996). Cela pourrait diminuer l'adaptation des agro-systèmes à leurs spécificités locales, engendrant ainsi une diminution de la biodiversité. Le développement du numérique pourrait également mener à une standardisation des tâches, et une déqualification des travailleurs agricoles, participant à leur précarisation (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Rotz, Gravely et al., 2019).

3.2.2 *Effets du numérique agricole sur l'environnement par le prisme des connaissances*

L'agroécologie nécessite beaucoup de connaissances sur le terrain et dans la recherche, que ce soit sur le fonctionnement des agro-écosystèmes, de la biodiversité ou de la nutrition. Les technologies numériques pourraient participer à la création de ces connaissances et à de nouvelles manières de savoir (Bonny, 2017 ; Ingram et Maye, 2020 ; Lebrun, 2020). Les agro-écosystèmes étant hétérogènes, la masse d'information permettrait de mieux gérer cette hétérogénéité spatiale et temporelle. Ce principe de gestion de l'hétérogénéité est à la base des technologies d'agriculture de précision dont la maxime est « *La bonne dose, au bon endroit, au bon moment* » (Bordes, 2017). Les données issues de nouveaux capteurs pourraient servir à la compréhension précise de processus écologiques et ainsi à une meilleure utilisation des services éco-systémiques ou une meilleure gestion intégrée de la santé des plantes ou des animaux (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017).

Les technologies numériques permettent de réduire le coût de stockage, de diffusion et d'accès à l'information. Cela pourrait favoriser l'échange de connaissances favorables à la mise en œuvre de pratiques plus écologiques

(Leveau et al., 2019 ; Phillips, Klerkx, McEntee et al., 2018), ainsi que la reconception de systèmes de production (Gkisakis et Damianakis, 2020). Il pourrait favoriser le décloisonnement des travaux de recherche (Damave, 2017). Le numérique pourrait être un outil dans la construction de communs autour des connaissances agroécologiques (Fraser, 2020). Le développement du numérique pourrait également faciliter la traçabilité, qui pourrait mettre en avant et permettre de valoriser économiquement des produits issus de production agroécologique (Wittman, James et Mehrabi, 2020).

En revanche, l'utilisation de technologies numériques pourraient amener une perte de connaissances tacites et empiriques des agriculteurs car ces connaissances seraient substituées par l'usage de technologies (Barrett et Rose, 2020 ; Clapp et Ruder, 2020). Cela pourrait amener une perte d'un savoir-faire agricole et d'une intelligence sensorielle (Atelier Paysan, 2021). Par ailleurs, en intégrant un nouvel artefact entre le producteur et l'environnement, cela pourrait détériorer le rapport à la nature, et donc la connaissance et la prise en compte de l'environnement dans les décisions (Rose, Wheeler et al., 2021). La quantification et la normalisation des pratiques par le numérique pourrait rigidifier les pratiques, réduire l'expérimentation au champ des agriculteurs et donc limiter l'adaptation des pratiques aux particularités locales et figer les connaissances écologiques (Burton et Riley, 2018).

3.2.3 *La question de l'autonomie au cœur des relations entre écologie et digitalisation de l'agriculture*

L'autonomie est un élément régulièrement cité dans les débats autour du numérique, et plus globalement des technologies, dans l'agriculture (Clapp et Ruder, 2020). Rarement défini, le concept d'autonomie peut renvoyer à une diversité d'acceptions, certaines plus individualistes et d'autres qui l'envisagent plutôt comme forme de construction collective de capacités (Atelier Paysan, 2021 ; Stone, 2022). De cette diversité d'acception découle une utilisation hétéroclite du concept d'autonomie, allant de la défense d'une autonomie des agriculteurs par rapport à de la main-d'œuvre extérieure à une autonomie des communautés professionnelles à réparer leur matériel, en passant par une autonomie dans la commercialisation de leur production ou une autonomie décisionnelle.

Dans les débats sur l'environnement et notamment sur l'agroécologie, l'autonomie est vue comme essentielle. D'une part, une moindre dépendance aux intrants externes permettrait aux exploitations d'être plus résilientes face aux aléas économiques et écologiques, et favoriserait une utilisation plus parcimonieuse des ressources (Van der Ploeg et al., 2019). D'autre part, l'autonomie des exploitations est aussi vue comme une certaine indépendance vis-à-vis du système agri-alimentaire industriel, et donc permettrait d'élargir les possibilités d'actions, en intégrant d'autres objectifs, d'autres valeurs, plus en adéquation avec l'environnement (Atelier Paysan, 2021 ; Wolf et Nowak, 1995). L'autonomie serait l'expression d'une forme de pouvoir pour les agriculteurs face aux autres acteurs économiques (Carbonell, 2016).

Les plateformes numériques ou sites internet pourraient redéfinir les formes de communication et de commercialisation des agriculteurs. Ainsi, le numérique est mis en avant comme manière d'accéder à des circuits de commercialisation indépendants des acteurs classiques (Carolan, 2017a). Il offrirait

de nouvelles possibilités de coopération entre agriculteurs, renforçant ainsi leurs capacités (CoFarming, 2017). Dans un autre domaine, le numérique favoriserait la mise en place de nouveaux dispositifs de recherche plus participatifs et pourrait permettre aux agriculteurs d'être directement acteurs de projets de recherche les concernant (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022). Le numérique serait un outil pour se poser des questions nouvelles, tout en laissant les capacités décisionnelles à l'agriculteur (Grenier, 2018). Les exploitants auraient plus d'autonomie grâce à une vision plus globale de leurs activités (Damave, 2017).

Enfin, le numérique permettrait d'accompagner la mise en place d'échanges directs entre agriculteurs : que ce soit pour vendre, louer ou acheter des productions, du matériel, des terres agricoles, des services etc. Cela favoriserait leur autonomie. Les entreprises de robotique agricole insistent également sur cette notion d'autonomie, qui serait amplifiée grâce à l'utilisation de robots, libérant l'agriculteur de dépendances à la main-d'œuvre, au travail, aux herbicides etc. (Lenain et al., 2021).

En revanche, certains mettent en avant le fait que le numérique créerait des dépendances technologiques et économiques, pouvant induire des formes de verrouillage (Lioutas et Charatsari, 2020). L'usage de technologies pour les intrants accroîtrait la dépendance à ces intrants (Wolf et Buttel, 1996). Un certain nombre de technologies numériques étant issues des GAFAM [15] : de nouvelles formes de dépendances envers ces entreprises se développeraient, favorisant ainsi la concentration de pouvoir (Lioutas et Charatsari, 2020). Le numérique participerait d'une privatisation des communs et d'une dépendance accrue aux acteurs du numérique (Confédération Paysanne, 2021). Les investissements élevés que peut impliquer l'achat de technologies numériques sur une exploitation, amènent une perte d'autonomie par exemple en créant des dépendance vis-à-vis des sources de financement ou de prêt, des nécessités de rentabiliser l'investissement effectué et donc de poursuivre le mode de production géré par la technologie achetée (Gkisakis et Damianakis, 2020). Ces phénomènes pourraient amener des exclusions de certaines exploitations (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022).

Les technologies apportant des informations et du conseil remettent également en question l'autonomie décisionnelle des agriculteurs (Jeanneaux, 2018 ; Réseau Action Climat, 2020). De plus, en se basant sur une vision très individualisée du conseil, le numérique tel que proposé par les entreprises, serait incompatible avec la dimension sociale et collective de l'autonomie paysanne, basée sur les relations sociales de travail et d'information (Stone, 2022). Globalement, le numérique amènerait une dépendance accrue envers le système agro-industriel (Atelier Paysan, 2021). Dans les discussions autour de l'autonomie, on retrouve les différentes approches de l'autonomie, individualiste ou collective. Par exemple les agriculteurs américains ont obtenu une loi d'exception qui autorise les modifications individuelles de la programmation sur leurs machines agricoles, mais qui empêche la construction de communautés épistémiques sur cette thématique (Carolan, 2017a). L'auteur y oppose le développement de plateformes open-source qui favorisent les communautés d'utilisateurs et l'autonomie collective.

15. GAFAM est un acronyme utilisé pour désigner les firmes dominantes du marché du numérique : Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft

3.2.4 *Dispositif matériel*

Un autre aspect du débat concerne les impacts les plus directs liés aux dispositifs matériels numériques. Cela correspond globalement aux impacts directs de ces technologies.

Ceux-ci peuvent permettre la « dématérialisation » de certaines tâches et réduire leur impact environnemental : par exemple en limitant l'utilisation de certaines ressources ou en limitant des déplacements. En revanche, la conception, l'utilisation et le fonctionnement de ces technologies nécessitent de l'énergie et des ressources, notamment des métaux rares (Atelier Paysan, 2021 ; Confédération Paysanne, 2021). L'extraction de ces ressources est connue pour ses conséquences négatives sur l'environnement et sur les populations travaillant à cette extraction ou vivant à proximité des mines (Pitron, 2018). L'utilisation potentielle massive de technologies numériques dans l'agriculture soulève également la question de l'obsolescence et de la gestion des déchets de ces technologies.

3.3 Controverses sur le numérique et les voies d'écologisation

Le secteur agricole est caractérisé par des débats sur les trajectoires d'écologisation à suivre. En effet, comme évoqué en introduction, il existe différentes manières d'envisager les transformations de l'agriculture afin qu'elle limite ses impacts environnementaux. Une des voies proposée est l'optimisation du modèle conventionnel, grâce à des innovations incrémentales et notamment des innovations technologiques. Une autre voie proposée est la reconception plus profonde des systèmes agri-alimentaires, basée notamment sur l'utilisation des services écosystémiques (Duru, Therond et Fares, 2015). L'agriculture biologique fait partie des modèles qui proposent une reconception plus globale, ou au moins un prototype d'un tel modèle (Bellon et Penvern, 2014), même s'il existe des débats au sujet d'une potentielle *conventionalisation* de l'agriculture biologique (Darnhofer et al., 2010). Plusieurs modèles agricoles coexistent donc au sein du secteur. Leur coexistence dépend des rapports de force qui structurent le secteur.

De ce fait, la controverse liée au numérique se retrouve dans ce débat sur les formes d'écologisation. Une partie de ce débat pose donc la question du modèle agricole qui serait favorisé par le numérique. Est-ce que le numérique créé un nouveau modèle agricole comme l'affirment certains ? (Bournigal, 2016) Quelle transformation plus structurelle accompagne-t-il ? S'applique-t-il de manière générique à toutes les formes d'agriculture et donc toutes les formes d'écologisation, ou en favorise-t-il certaines plutôt que d'autres ? Ces questions renvoient plus globalement aux impacts structurels du développement du numérique dans le secteur. Cependant, cette partie du débat est peu traitée dans la littérature.

Le concept d'*agriculture numérique*, souvent utilisé, peut amener à penser qu'il y aurait un nouveau modèle agricole, qui serait numérique, en opposition à une agriculture non numérique. Dans la caractérisation du numérique dans l'agriculture présentée précédemment, le numérique correspond à une multitude de technologies, mais également à une multitude de fonctions et d'acteurs. Ainsi, se pose la question des limites à partir desquelles l'agriculture pourrait être qualifiée de numérique. L'unité dans les discours d'une

agriculture numérique relèverait plutôt d'un *terme parapluie* qui participe à la construction d'une promesse techno-scientifique mais ne correspond pas à un modèle homogène d'agriculture (P.-B. Joly, 2015). Dans le travail présenté ici, le numérique n'est pas considéré comme porteur d'un nouveau modèle agricole mais comme un ensemble de technologies (Leveau et al., 2019).

Le numérique en agriculture ne semble donc pas être un nouveau modèle agricole : il s'intègre dans des modèles agricoles existants. Mais s'intègre-t-il de manière homogène dans tous les modèles ? Est-il plus adapté à un modèle qu'à un autre ?

Un des aspects de ce débat concerne la compatibilité de ces technologies avec des modèles agroécologiques. Les technologies de l'information et de la communication et l'agriculture de précision font en effet partie des principales controverses liées à l'agroécologie (Migliorini et al., 2020). Les autres questionnements très présents dans les débats sur l'agroécologie concernent la place de l'agrochimie et des biotechnologies, la taille des exploitations, les circuits courts, la justice sociale et les questions de genre.

Les innovations de tout type, dont les innovations techniques, ont joué un rôle important dans les évolutions passées des systèmes de production agricole et jouent un rôle important dans la trajectoire des modèles agricoles. Il est donc nécessaire de questionner quelles technologies sont acceptables et profitables pour les différents modèles agricoles. Cela implique des questionnements économiques, sociaux, environnementaux, organisationnels, culturels et politiques à propos de ces innovations. Ici, je développe une approche en économie : mes questionnements se porteront donc sur la compatibilité avec les modèles de productions.

Les définitions de l'agroécologie n'excluent pas en soi l'utilisation de technologies numériques. Cela dépend du type de technologies et de leurs effets. Il existe peu d'études à ce jour sur le numérique et l'agroécologie. Différents effets peuvent être discutés : les impacts de ces outils sur la production, les impacts sociaux, les coûts et bénéfices apportés, les mécanismes de dépendance économique. Les technologies pourraient favoriser la productivité, l'efficience des intrants, la concentration et la spécialisation (Carolan, 2020 ; Lebrun, 2020 ; Wolf et Buttel, 1996). Ainsi ces technologies ne favoriseraient pas des modèles agro-écologiques mais plutôt la continuité du modèle agricole conventionnel (Bronson et Knezevic, 2016 ; Lioutas et Charatsari, 2020). En revanche, les technologies pourraient apporter des solutions localisées, d'optimisation et prise en compte de l'hétérogénéité et des mécanismes du vivant, ce qui pourrait aider la mise en œuvre de pratiques agroécologiques. Ainsi la question des futurs agricoles favorisés par le développement du numérique reste ouverte.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de mettre en évidence le fait que l'introduction du numérique dans nos économies, loin d'être un simple changement technique qui impacte l'efficience des processus de production, implique des changements systémiques des secteurs : modifications du système d'acteurs, des politiques publiques, des connaissances etc. De ce fait, le numérique soulève des questions diverses sur la construction des technologies, sur ses usages et

ses conséquences. En agriculture, le numérique est porteur d'espoir quant à sa capacité à résoudre les enjeux multiples de l'agriculture contemporaine. Il est alors promu dans les discours d'organisations diverses, publiques et privées, nationales et internationales, agricoles ou non. Au-delà d'être promu dans les discours, le numérique dans l'agriculture mobilise des ressources, que ce soit pour la recherche, pour le financement de start-up dans le domaine, le financement de projets public-privé, ou encore pour favoriser l'investissement dans les exploitations agricoles. Pour autant, le développement du numérique dans l'agriculture est sujet à controverses. Celles-ci questionnent les effets économiques, sociaux et politiques du numérique mais remettent également en cause sa capacité à résoudre les enjeux environnementaux de l'agriculture. La réflexion sur ces controverses amène à deux constats sur l'état des connaissances dans ce domaine. Premièrement, l'information disponible sur les usages du numérique dans l'agriculture, et encore plus particulièrement dans l'agriculture française, est très partielle. Quelques études sur l'adoption des technologies numériques existent, mais il manque une vision systémique, qui intègre les usages du numérique à l'environnement socio-économique des agriculteurs et à leur système de production. Les études envisagent souvent le développement du numérique dans l'agriculture comme un processus linéaire et uniforme, et étudient peu les hétérogénéités et la diversité des trajectoires. Deuxièmement, peu de connaissances sont disponibles sur les interactions entre digitalisation et écologisation de l'agriculture. Les impacts des usages du numérique en contexte réel sont très peu documentés, et il n'existe que peu de littérature qui questionne les impacts structuraux des usages du numérique dans les exploitations agricoles. Ce paradoxe, entre une promotion importante du numérique d'une part, et des controverses auxquelles l'état des connaissances actuel ne permet pas de répondre d'autre part, m'amène à mon problème empirique. Comment est-ce que le développement du numérique dans le secteur agricole impacte et s'intègre dans les différentes trajectoires d'écologisation ? En favorise-t-il certaines plus que d'autres ?

L'état des lieux général réalisé dans ce chapitre de thèse soulève deux grandes implications pour répondre à ce problème. Afin de pallier les manques de connaissances sur le développement du numérique en agriculture, ses usages et ses implications, il apparaît nécessaire de réaliser un travail empirique important sur cette question, en intégrant l'échelle micro-économique des usages à un travail plus global sur les transformations du secteur agricole. Afin d'intégrer les différentes dimensions du développement des technologies numériques en agriculture et des controverses liées à leurs effets sur l'écologisation du secteur, il me semble important d'avoir une perspective systémique et institutionnelle. Pour répondre à ces implications, je vais donc développer un cadre d'analyse adapté à une vision systémique, multi-niveaux, hétérogène et dynamique de l'innovation en proposant une économie politique du système d'innovation agricole.

CHAPITRE 2

2

UNE ÉCONOMIE POLITIQUE DE L'INNOVATION POUR ANALYSER LA DIGITALISATION ET L'ÉCOLOGISATION DE L'AGRICULTURE

Introduction du chapitre

Le premier chapitre a montré que le développement du numérique joue sur plusieurs dimensions de l'activité agricole, semble conduire à des transformations systémiques du secteur, et fait l'objet de controverses et questionnements à propos de ses effets sur différentes voies d'écologisation de l'agriculture. Digitalisation et écologisation peuvent alors être vues comme des processus d'innovation sectorielle qui se jouent à la fois dans les institutions ou organisations qui cadrent ce secteur et à l'échelle des exploitations agricoles et des activités et pratiques des agriculteurs. En effet, ces processus impliquent des changements dans les pratiques des agriculteurs, mais également à l'échelle du secteur, dans les politiques publiques, les normes, le développement de connaissances, les dispositifs de conseil et d'apprentissage... Pour étudier ces différentes dimensions de manière conjointe, une analyse en termes d'adoption des technologies numériques à l'échelle des seules entreprises agricoles paraît insuffisante. Ce chapitre va présenter le cadre d'analyse du travail de recherche présenté dans cette thèse, qui associe ces différentes dimensions en proposant une économie politique du système d'innovation agricole, considéré comme hétérogène, dans lequel l'accent est mis sur les différentes échelles d'analyse du secteur.

L'écologisation et la digitalisation de l'agriculture sont des processus étudiés par différentes approches en agronomie et sciences sociales. Ils peuvent être analysés comme des processus d'innovation puisqu'ils correspondent à l'introduction de nouveautés dans les systèmes agricoles (nouveaux objectifs, nouvelles technologies, nouvelles pratiques...). L'économie de l'innovation apparaît alors comme un premier cadre d'analyse général pertinent, rassemblant les travaux en économie qui étudient théoriquement et empiriquement les processus d'innovation, avec des hypothèses ou courants différents. Ce cadre rejoint pour partie les « Innovation Studies » (B. Martin, 2012), qui rassemblent des travaux de plusieurs disciplines (Économie, Sciences Politique, Gestion, Géographie) et partagent des visions systémiques et dynamiques de l'innovation. Parmi les différentes conceptions de l'innovation, présentées brièvement dans ce chapitre, je choisis d'avoir une approche en termes de Système d'Innovation, mise en avant par les économistes présents dans les *Innovation Studies*. Ce cadre conceptuel permet d'appréhender les processus de digitalisation et d'écologisation de l'agriculture à travers différentes dimensions (connaissances, institutions, acteurs, technologies) et à différentes échelles (nationale, sectorielle, territoriale). Plus précisément, j'adopte une approche institutionnaliste, évolutionniste et politique des systèmes d'innovation. L'économie institutionnelle place les institutions au cœur de l'analyse des économies en étudiant leur nature, leur rôle, leur origine et leur changement (Chavance et al., 2012). Les institutions, entendues comme « *des entités*

collectives autonomes contribuant à la régulation du système socio-économique » (Walliser, 1989, p.339), ne sont pas considérées comme un élément contextuel mais comme des composantes endogènes du système économique. Elles constituent un ensemble de mécanismes de coordination, au-delà du seul marché. L'économie évolutionniste s'attache à l'étude des transformations des sociétés et des institutions. De son côté, la littérature sur l'écologisation de l'agriculture invite à considérer le système d'innovation agricole comme hétérogène, constitué de plusieurs paradigmes qui coévoluent, et fondent des manières différentes d'envisager l'écologisation de l'agriculture. L'économie politique est alors mobilisée afin d'intégrer cette hétérogénéité, les représentations et les rapports de force qui en découlent. Cette hétérogénéité se retrouve dans les organisations et institutions du secteur agricole. Mais elle s'incarne aussi dans les pratiques les modèles de production à l'échelle des exploitations agricoles. L'enjeu de cette thèse est donc d'analyser des transformations à l'échelle individuelle et à l'échelle sectorielle, qui s'influencent mutuellement et participent ainsi à la construction de trajectoires sectorielles. Ces choix théoriques permettront de préciser la problématique de la thèse et la méthode suivie, qui seront présentées dans la dernière partie du chapitre.

La première section du chapitre explique le choix d'avoir une approche en économie politique des systèmes d'innovation afin de répondre à la question de recherche, à partir d'un panorama croisé entre cadres théoriques de l'innovation et travaux sur la digitalisation de l'agriculture. La deuxième section précise les spécificités du cadre d'analyse développé dans cette thèse, en intégrant le concept de paradigme pour caractériser l'hétérogénéité, en ajoutant l'échelle micro-économique par l'analyse des usages et précisant les mécanismes d'interaction entre échelles individuelle et sectorielle. La dernière section pose la problématique, la démarche globale et ses implications méthodologiques.

1 Croiser économie de l'innovation et économie politique

Cette section vise à décrire le champ théorique global dans lequel s'inscrit cette thèse. Une première partie part de travaux en agronomie et sciences sociales, pour montrer que la digitalisation et l'écologisation du secteur agricole, peuvent être étudiées en économie de l'innovation en intégrant différentes dimensions qui seront précisées. La deuxième partie se base sur la littérature en sciences sociales sur le numérique en agriculture pour montrer que le caractère systémique de ces transformations et l'importance déjà repérée des institutions peuvent être pris en compte par une analyse en termes de système d'innovation, développée au sein des *Innovation Studies*. La troisième partie présente les différentes échelles et approches des systèmes d'innovation, pour présenter comment, au sein de l'économie de l'innovation et des *Innovation Studies*, une perspective en économie politique sera adoptée dans cette thèse.

1.1 La digitalisation et l'écologisation de l'agriculture comme processus d'innovation

Cette partie a pour objectif d'introduire comment la littérature en agronomie, en sciences sociales et en économie de l'innovation, définit et étudie les processus de digitalisation et d'écologisation de l'agriculture. Cet état des lieux conduit à relever plusieurs choix théoriques qui semblent pertinents pour ce travail de thèse.

1.1.1 *Le concept d'écologisation*

Les constats des effets nocifs sur l'environnement provoqués par certaines pratiques agricoles ont amené à un développement de la question environnementale dans les travaux sur l'agriculture. Face à ces constats, des chercheurs mais également des organisations agricoles et des mouvements sociaux ont proposé une analyse des synergies possibles entre agriculture et environnement, avec des perspectives agronomiques mais également sociales (Wezel et al., 2009). Certains auteurs identifient deux propositions principales d'écologisation de l'agriculture : une basée sur l'optimisation de l'agriculture conventionnelle et l'autre basée sur une agriculture alternative, ou agroécologique (Duru, Therond et Fares, 2015). La première proposerait une réduction des impacts environnementaux de l'agriculture par l'optimisation de ses pratiques, l'amélioration de l'efficience et de la productivité. La deuxième proposerait un fonctionnement de l'agriculture basé sur l'utilisation et l'optimisation des services écosystémiques afin de bénéficier d'effets positifs de l'environnement sur la production tout en limitant les impacts environnementaux négatifs voire d'avoir des effets positifs. En réalité, une grande diversité de propositions sont apparues afin de répondre aux enjeux environnementaux, associées plus ou moins explicitement à des questionnements sociaux, économiques et politiques (Gasselin et al., 2021 ; Ollivier et Bellon, 2013). Ces propositions sont mises en œuvre dans une diversité de formes d'agriculture ou modèles agricoles, notion sur laquelle je reviendrai dans la deuxième partie de ce chapitre. Des débats et controverses existent sur la capacité de ces propositions à répondre au mieux à ces enjeux environnementaux, mettant en confrontation ou en coexistence ces modèles agricoles. Est-ce par une amélioration de l'efficience des modes de production conventionnels ? (Connor, 2008) Par une généralisation de l'agriculture biologique ? (A. Muller et al., 2017) Ou de l'agriculture de conservation ? (Aune, 2012) Par une transition agroécologique des systèmes de production ? (Schutter et Vanloqueren, 2011) Par une coexistence de modèles de production multiples ? (Horlings et Marsden, 2011) Par l'introduction de technologies numériques dans ces différents modèles de production ? (Giles et Stead, 2021).

Afin d'intégrer ces différentes propositions et les processus de transformation de l'agriculture qui leurs sont associées, j'utilise le concept d'*écologisation*. L'écologisation peut se définir comme l'intégration croissante d'enjeux environnementaux dans les politiques publiques, les savoirs, les organisations et les pratiques professionnelles (Deverre et Sainte Marie, 2008 ; Lamine, 2011 ; Mormont, 2013 ; Oui, 2021b). J'ai choisi d'utiliser ce concept afin de rassembler les différentes démarches visant l'intégration d'enjeux environnementaux, quels que soient les objectifs fixés, les moyens utilisés, les effets mesurés ou la

temporalité envisagée. Le concept d'écologisation intègre donc une pluralité de points de vue. Il implique un changement des activités de production afin d'intégrer des contraintes ou opportunités écologiques (Mormont, 2013 ; Mzoughi et Napoléone, 2013).

Ce concept d'écologisation a donc de multiples facettes et dimensions. Comment étudier alors les processus d'écologisation de l'agriculture ? Différentes approches disciplinaires, à diverses échelles, en proposent des cadres d'analyse, présentés dans la partie suivante.

1.1.2 *Les cadres théoriques d'analyse de l'écologisation de l'agriculture*

En agronomie, les travaux sur l'écologisation cherchent à caractériser les pratiques selon leur impact sur l'environnement et selon les transformations induites dans les systèmes de production agricoles. Hill et MacRae (1996) ont proposé un modèle, appelé *ESR* décrivant trois stades possibles d'écologisation des pratiques. La première étape, *Efficience*, consiste à améliorer l'efficience des processus afin de réduire et d'optimiser l'usage d'intrants. La deuxième étape, la *Substitution*, va plus loin puisqu'elle consiste à substituer des intrants conventionnels par des intrants plus écologiques tels que des intrants organiques. Enfin, la *Reconception* ou le *Redesign* signifie une réorganisation plus en profondeur du système de production selon les principes de l'écologie. Ces stratégies d'efficience, de substitution et de reconception se superposent et se combinent dans les trajectoires d'écologisation des exploitations (Lamine, 2011). Les approches basées essentiellement sur l'efficience et la substitution correspondraient à une écologisation dite « faible » et celles basées sur une reconception à une écologisation dite « forte » (Horlings et Marsden, 2011) [1].

L'écologisation dite « forte » peut être rapprochée de l'*agroécologie* ou de l'agriculture « basée sur la biodiversité » (Duru, Therond et Fares, 2015). L'agroécologie est définie comme l'application des concepts et principes de l'écologie à la conception et la gestion de systèmes agri-alimentaires durables (Francis, Lieblein et al., 2003 ; S. R. Gliessman, Engles et Krieger, 1998). Les principes agronomiques de ces systèmes doivent permettre le recyclage de la biomasse, garantir les conditions de sol favorables, minimiser les pertes de ressources, favoriser la diversification génétique, permettre les interactions et synergies biologiques et valoriser l'agro-biodiversité (Stassart, Baret et al., 2012). Les travaux sur l'agroécologie ont relié ces caractéristiques agronomiques à des approches systémiques intégrant le système agri-alimentaire dans son ensemble, dans une perspective interdisciplinaire. Premièrement, cette évolution agronomique nécessite de nouvelles formes de connaissances et d'apprentissage. Stassart, Baret et al. (2012) rajoutent ainsi des principes méthodologiques, tels que le pilotage multicritère des agroécosystèmes dans une perspective de transition, la valorisation de la variabilité spatio-temporelle, l'exploration de situations nouvelles éloignées des optimas locaux déjà connus

1. Derrière ces différentes conceptions de l'écologisation de l'agriculture, la philosophie y associe différentes perceptions de la « nature ». D'un côté la nature est vue comme nécessitant une artificialisation afin de fabriquer un agro-écosystème adapté. De l'autre côté, la nature est vue comme nécessitant un pilotage afin d'orienter et de faire avec les processus naturels (Larrère, 2002). En philosophie, le concept d'écologisation peut être utilisé de manière plus restrictive que la vision proposée ici, dans une vision d'opposition à la modernisation (Latour, 1995).

et la construction de dispositifs de recherche participatifs. Deuxièmement, afin d'intégrer les diverses composantes du système agri-alimentaire qui sont en interaction avec les systèmes de production agricole, ce concept intègre des dimensions socio-économiques, politiques et scientifiques. L'agroécologie est ainsi devenu un concept fédérateur entre des disciplines scientifiques, des mouvements sociaux et des pratiques agronomiques (Wezel et al., 2009). L'agroécologie intègre alors des principes de rapprochement des producteurs et consommateurs ou encore d'autonomie des communautés locales, de création de connaissances et de capacités collectives d'adaptation, de création d'environnement favorable aux biens publics et de valorisation de la diversité des savoirs (Stassart, Baret et al., 2012). Le concept d'agroécologie a gagné en popularité et recouvre aujourd'hui une large diversité de réalités. En effet, selon le type d'acteur ou les zones géographiques, l'agroécologie n'est pas définie de la même manière (Van Hulst et al., 2020). Ainsi l'agroécologie n'est pas une forme unique d'agriculture, mais un ensemble diversifié de pratiques, de valeurs et d'objectifs.

D'autres caractérisations des systèmes agricoles intégrant perspective agronomique et socio-économique se sont développées afin de dépasser une division binaire simpliste, et d'aller au-delà de critères purement agronomiques. Therond et al. (2017) définissent trois modèles biotechniques (basés sur les intrants chimiques, basés sur les intrants biologiques, basés sur la biodiversité), avec lesquels se combinent quatre types de contexte socio-économique. Ils identifient ainsi six modèles qui se différencient notamment par leurs systèmes de valeurs sociales, ou registres de justification dans une perspective conventionnaliste (Plumecocq, Debril et al., 2018).

Les sciences sociales soulignent que l'écologisation se concrétise et s'oriente au travers de conventions qui vont structurer les pratiques (Mormont, 2013). Ces conventions peuvent impliquer ou non des règles, des incitations, des normes, des choix individuels, des évolutions commerciales, des engagements collectifs et des changements technologiques. La production de ces conventions implique des acteurs divers : organismes de recherche ou de développement, structures de conseil et de formation, organisations publiques, organismes professionnels agricoles, qui vont impacter les technologies et connaissances créées et diffusées pour l'écologisation (Lucas, 2021 ; Stassart et Jamar, 2009). Les entreprises des filières et chaînes de valeur vont également structurer ces différentes voies d'écologisation (Magrini, Anton et al., 2016). Cela pose la question des processus de décision qui gouvernent ces conventions, et donc des rapports de pouvoir qui vont influencer ces processus de décisions (Conti, Zanello et A. Hall, 2021 ; Mormont, 2013). Ainsi, l'écologisation ne se joue pas que dans les pratiques individuelles mais également à d'autres échelles puisqu'elle implique des décisions et des processus liés aux institutions, aux réseaux, aux technologies ou encore au développement de connaissances [2].

2. Le concept d'écologisation est parfois rapproché du concept de modernisation écologique, théorisé en sociologie par Spaargaren et Mol (1992). Ce concept peut être considéré comme une manière d'écologiser, qui fait un compromis entre une vision néolibérale de l'économie et les critiques environnementales (Mormont, 2013). Bien qu'étant un référentiel dominant dans la mise en place des politiques environnementales, ce concept correspond à une vision spécifique de l'écologisation et n'englobe pas la pluralité des trajectoires proposées.

L'écologisation est donc un processus plutôt endogène au secteur agricole. Il implique une diversité d'acteurs du secteur et des filières, ainsi que des institutions et connaissances, « indigènes » et nouvelles. Il peut être qualifié d'hétérogène au vu de la diversité des trajectoires proposées et mises en œuvre. Cette hétérogénéité est structurée par des rapports de pouvoir entre les acteurs qui portent ces différentes trajectoires. Ainsi, la question de l'écologisation, dans ses multiples échelles et dimensions, interroge les pratiques individuelles mais également les institutions qui stabilisent les rapports de pouvoir entre acteurs.

1.1.3 *Digitalisation*

Le panorama sur le numérique en agriculture réalisé dans le Chapitre 1 montre que les processus d'innovation que sont la digitalisation et l'écologisation semblent avoir des caractéristiques différentes. Le numérique renvoie à une dimension matérielle technique, il correspond à des technologies ayant une forte hétérogénéité physique et fonctionnelle (Vaden, 2004). Les technologies numériques regroupent des objets et processus divers et sont souvent qualifiées de génériques : elles peuvent répondre à une grande variété de fonctions. Le numérique renvoie aussi à des usages et pratiques de conception, de fabrication et d'utilisation (Casilli, 2019). Le numérique a une dimension politique et économique puisqu'il va impacter les modèles productifs et les dynamiques sociales et institutionnelles. Le numérique recouvre une diversité de modèles économiques, certains basés sur la commercialisation des artefacts matériels, d'autres sur la commercialisation des données ou des services, d'autres avec des logiques libres, ouvertes etc. Le développement du numérique est porté par une diversité d'acteurs incluant des entreprises du numérique, des start-up mais aussi des organisations publiques. Il implique ainsi des dynamiques économiques intersectorielles (Srnicek, 2017). Les politiques publiques et dispositifs de régulation impactent le développement du numérique, au travers de politiques économiques, d'orientation de la recherche, de règles mais également de politiques diverses qui peuvent inciter ou restreindre l'usage de ces technologies. Ce développement technologique s'intègre dans la dynamique historique du capitalisme et de ses trajectoires technologiques (Djellal, 1995 ; Srnicek, 2017). Le numérique se développe dans un ensemble de secteurs, dont l'agriculture.

Ainsi, la digitalisation est souvent abordée comme une transformation exogène et intersectorielle, caractérisée par l'arrivée de technologies génériques. Au-delà d'une évolution technique, la digitalisation est une trajectoire économique et politique qui pose elle aussi des questions institutionnelles.

1.1.4 *Comment analyser conjointement ces processus ?*

Le secteur agricole, et donc les exploitations agricoles, se retrouvent confrontées à ces deux processus, qui interagissent. Cette interaction peut être caractérisée par l'arrivée et le développement de technologies dites génériques dans un secteur aux besoins hétérogènes. Étudier cette interaction entre digitalisation et écologisation implique de prendre en compte différentes dimensions énumérées ci-dessous :

— Ces phénomènes sont *multiscalaires*. En effet, ces deux processus se jouent à la fois dans les usages et dans les évolutions sectorielles plus

larges. Ces deux transformations ne correspondent pas à des dynamiques de niche mais sont générales et transversales. Notre analyse devra donc se porter sur les échelles micro et les échelles méso ;
— Ces phénomènes sont *multifactoriels* et *multiacteurs*. Ils impliquent notamment des évolutions du marché, des politiques publiques, des connaissances, les stratégies d'acteurs plus ou moins spécialisés sur ces domaines ;
— L'étude de ces phénomènes et de leurs interactions nécessite une approche qui permette d'intégrer de l'*intersectoriel*, puisque la digitalisation se joue à l'intersection entre le secteur agricole et le secteur du numérique ;
— Cette étude nécessite également la prise en compte de l'*hétérogénéité* et des rapports de pouvoir, déjà mis en avant dans le cadre de travaux sur l'écologisation de l'agriculture, mais qui doivent aussi jouer dans le développement de technologies numériques dites génériques ;
— Ces phénomènes nécessitent également une perspective *dynamique* puisqu'ils impliquent des modifications des pratiques, des acteurs, des connaissances. Ils peuvent modifier la structure même du secteur agricole ;

Ces évolutions ne correspondent pas à des évolutions technologiques externes ou naturelles, qui viendraient transformer les économies. Ces évolutions sont endogènes à un système économique sectoriel, portées par les décisions des acteurs économiques et par les institutions qui les orientent, les coordonnent ou les déterminent : le régime socio-économique en place va impacter le type de connaissances développées, la conception de technologies, leur diffusion, leurs fonctions. Ces évolutions peuvent donc être analysées comme des constructions sociales et institutionnelles. Mais considérer ces évolutions techniques seulement comme un construit social fait perdre « *la faculté de rendre compte des destins différenciés que subissent les objets techniques* » (Akrich, 1989, p.32). La technique est construite et interagit sans cesse avec des dimensions sociales, techniques, économiques, culturelles. Afin de prendre en compte ce caractère mouvant et interactionniste du changement technique, j'utilise le concept d'innovation. Je me suis donc intéressée à la littérature en économie de l'innovation afin d'en tirer les concepts pertinents à notre analyse des transformations des systèmes agricoles par le numérique et l'écologisation.

1.2 Une approche systémique de l'innovation : analyse de ces processus dans le cadre d'un système d'innovation

L'innovation correspond à l'introduction d'une nouveauté dans un système socio-économique, qu'elle soit technologique, de produit ou de procédé, organisationnelle, commerciale, financière, sociale etc. (OECD, 1997). L'innovation caractérise le résultat, c'est-à-dire la nouveauté intégrée dans le système, mais aussi le processus par lequel se fait cette intégration. Elle se distingue de l'invention que Rogers (1978) définit comme « *le procédé par lequel une nouvelle idée est créée ou développée* » alors que l'innovation est « *le procédé d'adoption d'une idée existante* ». L'innovation peut également correspondre à de nouvelles combinaisons d'éléments existants (Edquist, 2013). L'innovation

est par définition un processus interactif puisqu'elle dépend du marché, des utilisateurs, du contexte, des connaissances, des ressources, etc.

À l'échelle des exploitations agricoles, il peut y avoir des innovations technologiques, par l'introduction de nouveaux outils tels que des technologies numériques, des innovations agronomiques et environnementales, organisationnelles ou encore commerciales. Une innovation est souvent associée à d'autres types innovations : par exemple, l'introduction d'un nouvel outil peut changer les pratiques agronomiques ou l'organisation. L'innovation agricole est un processus qui combine des changements technologiques, sociaux, économiques et institutionnels (Faure et al., 2018 ; Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012).

Différentes conceptions de l'innovation et différentes approches théoriques pour l'étudier existent et sont présentées dans cette section. Certaines approches se concentrent sur l'adoption des innovations par des individus indépendants. D'autres approches étudient plutôt le processus de conception d'une innovation, de son émergence jusqu'à son intégration dans les systèmes socioéconomiques. Des travaux envisagent l'innovation dans une approche structuraliste, comme résultante des dynamiques économiques, sociales et politiques. Les approches systémiques analysent l'innovation dans ses interactions avec l'économie et la société : elles considèrent conjointement les institutions, organisations, réseaux, acteurs, connaissances et technologies qui impactent et sont impactés par l'innovation.

1.2.1 *Intérêts et limites de l'individualisme méthodologique pour caractériser l'adoption du numérique*

Une innovation peut être étudiée à travers une des étapes du processus d'innovation : l'adoption par les utilisateurs. Cette perspective se base sur une hypothèse d'individualisme méthodologique, c'est-à-dire sur une conception des individus qui agissent selon leur objectif, des critères de choix d'optimisation et l'accès limité à des ressources. Le phénomène global de diffusion de l'innovation se comprend alors comme l'agrégation des comportements individuels (Cusinato, 2007). Le système institutionnel et politique est vu comme un facteur externe qui influence les comportements individuels (Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012). Les travaux cherchent alors à étudier les déterminants individuels de l'adoption afin d'expliquer le phénomène social de diffusion de l'innovation, dans un contexte institutionnel donné. L'hypothèse implicite à la base de ces travaux est que l'adoption de technologie est linéaire et suit une « courbe en S », comme décrit par Everett Rogers en 1962 (Rogers, 2010). Ainsi, le début de cette courbe correspondrait à l'adoption d'une nouvelle technologie, rapide, mais par une faible part de la population, les *pionniers*. Ensuite, la pente de la courbe augmenterait de manière exponentielle avec l'adoption de la technologie par les majoritaires précoces, puis ralentirait avec les majoritaires tardifs. Enfin, la courbe s'applanirait avec l'adoption tardive et lente de la technologie par les *retardataires*.

La littérature en économie sur le numérique en agriculture est principalement le fait de ce type d'approche : les travaux étudient l'adoption et les facteurs d'adoption des technologies (Barnes et al., 2019 ; Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). Ces travaux visent à comprendre pour quelles raisons certains agriculteurs adoptent une technologie numérique alors que d'autres ne

l'adoptent pas. Premièrement, ces travaux montrent que les déterminants varient en fonction de la technologie étudiée (Konrad et al., 2019). Par exemple Barnes et al. (2019) montrent que l'adoption de technologies d'agriculture de précision dépend de l'âge de l'agriculteur, du revenu de son foyer, de la taille de l'exploitation. Konrad et al. (2019) montrent que l'adoption de technologies de fertilisation de précision dépend de la taille de l'exploitation, de la propension à innover et de l'âge de l'agriculteur, du fait qu'il soit à temps plein ou temps partiel sur l'exploitation, mais aussi du système de production : présence ou non d'élevage ou d'agriculture biologique, utilisation ou non de fumier, et de la régulation en place sur la fertilisation. Michels et al. (2020) montrent que l'adoption du smartphone par les agriculteurs dépend de l'âge, des compétences et du comportement innovant de l'agriculteur, ainsi que de la taille et de la localisation de son exploitation. Torrez et al. (2016), pour un ensemble de technologies d'agriculture numérique, mettent en évidence le rôle de l'âge et de l'aversion au risque de l'agriculteur, de la taille de l'exploitation, de résultats économiques, ainsi que du temps depuis lequel l'agriculteur est installé. Les acteurs économiques font régulièrement référence à la courbe de Rogers et à cette vision individuelle de l'innovation, par exemple en qualifiant les agriculteurs de « early-adopters » (Isaac et Pouyat, 2015), ou au contraire en signalant un « retard » de l'agriculture française (A. Martin, 2019).

Si les facteurs varient d'une technologie à l'autre et d'une étude à l'autre, ces travaux montrent que l'adoption des technologies dépend i) de facteurs individuels tels que l'âge, la propension à innover, l'attitude face au risque etc., ii) de facteurs économiques tels que le revenu, la capacité d'investissement, iii) de l'information disponible sur l'innovation, ou encore iv) du type de système de production. Ces études évoquent aussi le rôle du contexte et des réseaux des agriculteurs sur l'adoption de technologies. Ainsi, l'appartenance à une coopérative, à un groupe d'agriculteurs ou encore le suivi par un conseiller peuvent jouer sur l'adoption de technologies d'agriculture de précision également (Barnes et al., 2019 ; Konrad et al., 2019). La régulation environnementale en place ainsi que des caractéristiques géographiques influencent également l'adoption (Konrad et al., 2019).

Ces approches sont intéressantes pour mettre en évidence un certain nombre de « conditions d'adoption technologique », comprendre des disparités dans la diffusion d'innovations et mettre en lumière des freins à l'adoption qui n'avaient pas été anticipés. Cependant, ces approches laissent des angles morts sur certaines composantes des phénomènes d'innovation. Tout d'abord, l'environnement d'innovation, les interactions sociales, les institutions, ne peuvent être considérées que comme un contexte exogène. L'innovation est à la fois un processus individuel et collectif, ou les individus et le système dans lequel ils évoluent interagissent et coévoluent (Hekkert, Suurs et al., 2007). Les approches individualistes captent peu les effets de réseau, au mieux limités à des « réseaux égocentrés » sans analyse structurale possible. Par ailleurs, les approches en termes d'adoption d'une technologie ne permettent pas de comprendre les usages et reconfigurations des technologies, qui peuvent être différents des usages anticipés. Pour étudier les effets de l'introduction d'une innovation, tels que les effets du numérique sur l'écologisation des pratiques, il est donc crucial d'aller au-delà de la simple adoption d'une technologie. Ceci est d'autant plus important que les tech-

nologies ne sont pas indépendantes les unes des autres mais se combinent entre elles ainsi qu'avec les pratiques des utilisateurs (Clapp et Ruder, 2020). En outre, les « adoptants » ne sont pas des utilisateurs passifs face à l'arrivée d'innovations externes, mais font partie d'un ensemble d'acteurs et praticiens de la construction des innovations (Glover et al., 2019). Le phénomène d'innovation ne peut donc pas être compris uniquement comme une agrégation de comportements individuels, mais comme une reconfiguration complexe de composantes sociales et techniques (Glover et al., 2019). L'innovation ne va donc pas ici être considérée par une approche en termes d'individualisme méthodologique mais par une approche en économie institutionnelle, même si des approches développées par les économistes de l'adoption pourront être mobilisées comme heuristique dans une démarche plus globale.

1.2.2 *Approches économiques de l'innovation comme un processus*

Une innovation technologique peut être étudiée dans une autre perspective qui vise à comprendre son processus de construction et la diversité des interactions qui le constitue. Ces approches étudient ainsi les différentes étapes de construction d'une innovation et mettent l'accent sur les processus, la dynamique et la temporalité de l'innovation.

Avant les années 50, l'innovation est un concept très peu présent dans la littérature économique, à l'exception du travail fondateur de Schumpeter. Ce dernier accorde une place centrale à l'innovation dans l'économie. Il la définit comme une modification de la fonction de production, qui est source de changements économiques et sociaux (Schumpeter, 1935). Mais le processus d'innovation en lui-même est peu étudié, étant vu avant tout comme résultant de l'activité d'entrepreneurs. Ce n'est que quelques années plus tard que l'innovation, en tant que processus, devient un sujet d'étude important, notamment avec l'idée d'apporter des éléments économiques, politiques, managériaux et organisationnels pour promouvoir l'innovation (B. Martin, 2012).

En économie, le processus d'innovation a d'abord été appréhendé comme un processus linéaire simple : l'invention émane de recherches scientifiques fondamentales puis de recherches appliquées, est développée, produite, puis est mise sur le marché et adoptée par des utilisateurs (B. Martin, 2012). Du point de vue de l'entreprise, l'innovation technologique est alors un facteur de production exogène (Solow, 1956). Ce modèle 'push', linéaire, dans lequel l'innovation provient de la science, a été repris dans de nombreux travaux académiques, mais surtout dans des documents ou guides opérationnels. D'autres travaux proposent une vision différente de l'innovation, linéaire elle aussi mais incitée par la demande, par le marché, c'est le modèle 'demand-pull' (Schmookler, 1966). La vision linéaire de l'innovation a été critiquée, à la fois pour sa faible capacité heuristique et pour les transformations qu'elle a soutenues (Forest et al., 2014). D'une part, les travaux de terrain montrent que la corrélation entre recherche scientifique et innovation n'est pas systématique, ou encore que des phénomènes de rétro-action ou de bifurcation se passent dans le développement d'une innovation, montrant que l'innovation ne se déroule pas forcément de manière linéaire (Griliches, 1979 ; Scherer, 1983). D'autre part, cette vision théorique participe à l'orientation des politiques publiques de recherche et d'innovation depuis les années 50, avec des effets

controversés (Forest et al., 2014). Ces politiques d'innovation ont par exemple soutenu la Révolution Verte, qui désigne un ensemble de programmes de recherche et de transfert de technologies agricoles occidentales (variétés, engrais, pesticides) vers le reste du monde, critiquée pour ses effets environnementaux, sociaux et politiques (Cornilleau et P.-B. Joly, 2014 ; Glaeser, 2010). Pour améliorer la compréhension des processus d'innovation, Kline et Rosenberg (1986) proposent alors le modèle de la chaîne interconnectée, dans lequel la conception reste le processus central mais où l'innovation résulte d'interactions et de rétroactions multiples. D'autres approches critiques et pluridisciplinaires se sont développées, proposant des concepts d'innovation basés par exemple sur l'expérience et les savoirs-faire empiriques locaux (Darré, Le Guen et Lémery, 1989 ; Von Hippel, 2006).

L'économie évolutionniste s'est également penchée sur la question du processus de développement des innovations, en y apportant et théorisant une perspective historique (R. Nelson et Winter, 1982). Les travaux montrent que le développement des innovations technologiques est lié aux technologies en place, aux connaissances et effets d'apprentissage ainsi qu'aux institutions. L'innovation n'est donc pas un processus externe mais s'inscrit dans des trajectoires technologiques. Les travaux fondateurs de David (1985) et de Arthur (1989) montrent l'importance d'étudier la dynamique du processus de changement technologique. Ils montrent que la temporalité peut affecter la valeur d'un choix technique : celle-ci peut s'accroître avec le degré d'adoption de ce choix technique, c'est ce qu'on appelle les *rendements croissants d'adoption*. Ce phénomène peut mener à des *verrouillages technologiques* qui font qu'une technologie reste dominante, alors qu'une technologie alternative plus efficace existe Arthur (1989). L'économie évolutionniste s'intéresse donc aux mécanismes économiques qui vont jouer sur le succès ou non d'une innovation parmi d'autres. Les travaux montrent qu'il va y avoir des mécanismes de *sélection* qui vont favoriser une innovation plutôt qu'une autre (R. Nelson et Winter, 1982).

Ces questions de verrouillages, d'irréversibilités, de sélection sont aussi abordées par d'autres approches institutionnelles (R. Boyer, Chavance et Godard, 1991). Celles-ci dialoguent avec les théories évolutionnistes, qui ont pour point commun de comprendre le changement économique comme un processus historique et ancré dans les institutions (Coriat et Dosi, 1995), et de placer les mécanismes de production de connaissances au cœur de ces dynamiques (Labarthe, 2018). Le changement technique doit alors être appréhendé selon un principe d'historicité (R. Boyer, 1989). Les arrangements institutionnels en place peuvent mener à des *verrouillages institutionnels* (Pierson, 2000). La stabilité d'une configuration économique peut ainsi être liée à des verrouillages sociotechniques : diverses externalités, infrastructures ou institutions spécifiques, ainsi que l'acquisition et l'exploitation de compétences vont renforcer les processus de verrouillage et d'irreversibilité (Kirat, 1991). Au-delà de figer des trajectoires technologiques, les institutions peuvent aussi être sources d'éviction d'alternatives ou de création de nouvelles possibilités technico-économiques (Godard et Salles, 1991). La direction du changement technique va alors dépendre des rapports de force en place (Dockès, 1990). Le système économique, le système technique ainsi et les institutions forment ainsi un *environnement de sélection*. Le processus d'innovation est donc un processus de coévolution technologique et institutionnelle (Perez, 1983).

Ces travaux soulignent l'importance de l'histoire pour comprendre les économies : les événements et choix passés vont influencer les choix présents, c'est ce qu'on appelle la *dépendance au sentier*. En agriculture, Cowan et Gunby (1996) montrent par exemple que le développement des pesticides a été favorisé par les connaissances sur les produits chimiques développées lors de la seconde guerre mondiale ainsi que par les objectifs de maximisation du rendement de l'époque. Les auteurs expliquent que bien que critiquée pour ses externalités négatives, la lutte chimique, basée sur les pesticides, tend à rester dominante face aux techniques de protection intégrée (qui visent à minimiser les pertes économiques en combinant les méthodes de prévention, de lutte biologique et de lutte chimique) en raison de problèmes de coordination, de liens à d'autres technologies et investissements (par exemple le matériel de traitement), de manque de connaissances scientifiques et empiriques sur ces techniques mais aussi en raison des politiques publiques, de représentations et des systèmes économiques en place. Cette « dépendance au sentier » est vraie à l'échelle d'un secteur mais également à l'échelle d'une firme, dont l'évolution va dépendre des bases de connaissances acquises (Dosi, 1982).

Les approches en termes de *Système Technologique d'Innovation* visent à étudier les processus de construction d'innovations spécifiques. Elles s'intéressent au réseau d'acteurs qui interagissent, sur un domaine technologique, dans des institutions, pour générer, diffuser et utiliser des technologies (Markard et Truffer, 2008). Ces approches mettent l'accent sur l'importance des flux d'informations et de connaissances dans ce processus (Carlsson et Stankiewicz, 1991). Elles permettent de comprendre les enjeux et les jeux d'acteurs en œuvre dans la construction d'une technologie. Ainsi, elles mettent en évidence les éventuels rapports de pouvoir et d'influence de différentes catégories d'acteurs, le rôle des politiques publiques ou encore les objectifs visés dans la conception de ces technologies. Ces approches peuvent être intéressantes par exemple pour étudier comment un problème écologique est intégré ou non dans le processus de conception. Elles permettent également de dépasser les frontières sectorielles en étudiant les échanges entre secteurs lors de la conception d'une innovation technologique. En outre, ce type d'analyse permet d'identifier avec précision les points bloquants dans ces processus (Bergek et al., 2008).

La *théorie de l'acteur-réseau*, développée dans les années 1980 par la sociologie des sciences et techniques (Akrich, Callon et Latour, 1988), mais vue comme une méthode utilisable en économie et management de l'innovation (P.-B. Joly, 2017), considère que l'innovation repose sur la construction de réseaux. Cette théorie se centre sur la dimension sociotechnique de l'innovation, vue comme un construit social et technique issu d'un « *réseau d'acteurs et d'objets mobilisés autour d'une idée nouvelle* » (Faure et al., 2018, p84-85). Cette théorie décompose le processus en plusieurs étapes : i) la problématisation (définition des problèmes et des points de passage obligés), ii) l'intéressement (fixation des entités et construction d'un système d'alliance), iii) l'enrôlement (définition et coordination des rôles), et iv) la mobilisation (porte-paroles et représentants, établissement d'un réseau de liens contraignants) (Callon, 1986). L'innovation serait d'autant plus un succès que le réseau mobilisé dans sa construction est grand, divers et robuste : l'intéressement des alliés expliquerait ainsi la réussite d'une innovation (Akrich, Callon et Latour, 1988).

Cette théorie permet de proposer un modèle d'innovation distribuée et évite les réductionnismes techniques ou sociaux (Faure et al., 2018).

Les approches des systèmes socio-techniques suivent également le processus d'émergence et de diffusion d'une innovation. La perspective multi-niveaux (« Multi-Level Perspective »), issue d'un croisement entre théorie de l'acteur-réseau, sociologie des sciences et techniques, économie évolutionniste et *innovation studies* a donné lieu à une communauté académique pluridisciplinaire : les *Transition Studies* (Geels, 2004). Elle propose une analyse des trajectoires d'innovation basée sur trois niveaux : la niche, le régime et le paysage. Ces approches se focalisent notamment sur la construction des niches d'innovation. Ces niches sont des espaces d'innovation plus stables et en partie protégés de la sélection du marché, par exemple grâce à des subventions ou à un marché de niche, dans lesquelles des innovations peuvent se développer en co-évolution avec des utilisateurs. Ces espaces protégés permettent la création d'innovation dites radicales, qui pourront ou non ensuite se développer et transformer le régime socio-technique dans son ensemble. Cette perspective d'innovation a eu un grand succès aussi bien dans la littérature scientifique que dans la mise en œuvre de politiques publiques, notamment dans le secteur agricole (Bui et al., 2016).

Ces différentes approches, qui se focalisent sur le processus, sont utilisées pour étudier les processus de conception des technologies numériques agricoles. Bronson (2019) montre ainsi que dans la conception des technologies basées sur le Big Data en Amérique du nord, les concepteurs se basent sur une vision simpliste des agriculteurs utilisateurs, vus comme des agents rationnels qui cherchent à maximiser leur revenu en produisant des cultures de base dans de grosses exploitations. La maximisation du rendement et du profit est au cœur de la conception de ces technologies, ce qui pourrait expliquer une faible adoption par les agriculteurs. Certains travaux se concentrent sur les acteurs impliqués dans ce processus et montrent la présence croissante d'industries non agricoles et des phénomènes d'intégration verticale de services digitaux, ainsi que l'importance du soutien public (Birner, Daum et Pray, 2021 ; Eastwood, Klerkx et Nettle, 2017). Le travail de Oui (2021a) montre quant à lui comment les frictions matérielles et économiques, rencontrées par les entreprises lors du processus de conception et commercialisation d'une innovation, amènent ces dernières à s'éloigner d'objectifs initiaux. Les travaux de Jakku et Thorburn (2010) et de Ayre et al. (2019) montrent que le processus de conception participative d'Outils d'Aide à la Décision facilite le dialogue, la coopération et l'apprentissage social entre les acteurs impliqués (agriculteurs, conseillers, chercheurs ou industriels), ce qui peut amener une meilleure compréhension des problématiques de chacun et des changements de posture et de pratiques.

Ces analyses permettent d'expliquer pourquoi et comment les innovations émergent et se diffusent ou non. En revanche, elles incluent peu les usages et les effets des innovations. Elles sont intéressantes pour comprendre l'émergence et le succès de certaines technologies ou entreprises du numérique agricole. Cependant, ces approches sont plutôt centrées sur une technologie et semblent moins adaptées au cadre de ma thèse, qui étudie des processus d'innovation plus larges, une diversité de technologies et qui cherche à étudier les transformations du secteur agricole et de ses modèles de production.

1.2.3 *Approches structuralistes du changement technique*

Les approches structuralistes de l'innovation étudient l'influence des modèles sociaux, économiques, politiques, institutionnels ou culturels sur l'innovation dans les sociétés. Ces approches structuralistes des transformations du secteur agricole se sont développées dans les années 80 et 90, dans un contexte de globalisation croissante, de dérégulation par les États, de politiques économiques internationales et d'accords internationaux (Buttel, 1994). La théorie de la régulation par exemple, propose d'étudier les modes de production et d'accumulation selon les formes institutionnelles des économies, c'est-à-dire les codifications des rapports sociaux fondamentaux (R. Boyer, 1986). Dans les économies capitalistes, les modes de développement vont évoluer dans une logique de profit. Les « styles technologiques », qui correspondent à la façon la plus efficiente et rationnelle de tirer avantage de la structure des coûts, vont se succéder et impacter les modes de développement (Perez, 1983). L'innovation est envisagée comme une production sociale qui dépend des institutions, en particulier des formes des rapports sociaux, du contexte politique et culturel et des modalités de comportement (Dockès, 1990). Ces perspectives ont notamment permis de mettre en évidence les liens entre les transformations de l'agriculture et les évolutions politico-économiques plus larges telles que le régime fordiste. Le livre *La Grande Transformation de l'Agriculture* montre que l'innovation en agriculture dans la seconde moitié du vingtième siècle, ancrée dans la dynamique économique fordiste, était alors ciblée vers l'augmentation de la productivité, la spécialisation et l'intensification du travail (Allaire et R. Boyer, 1995). Les travaux en théorie de la régulation montrent le rôle des rapports de travail, de l'État, de l'institutionnalisation de la cogestion entre État et syndicats agricoles, du marché et de la concurrence sur les transformations du secteur agricole (Touzard et Labarthe, 2016). Ces travaux ont également étudiés les crises et les transformations associées de l'agriculture, telles que l'évolution vers une économie de la qualité (Allaire, 2002). Les approches en termes de « food regime » proposent également un cadre d'analyse macro-historique pour étudier le secteur agri-alimentaire (Friedmann et McMichael, 1989). Ces travaux identifient trois périodes de stabilité du système agri-alimentaire, associées à des conditions politiques mais aussi commerciales et technologiques : l'hégémonie britannique de 1870 à 1914, l'hégémonie américaine de 1914 à 1970 puis l'hégémonie néo-libérale. Ce cadre d'analyse serait moins pertinent aujourd'hui du fait d'une diversité de pôles plutôt qu'une hégémonie, qui centre l'analyse sur l'Occident, et est critiqué pour son approche homogénéisante, qui ne donne pas à voir la diversité des trajectoires existantes (Wilkinson et Goodman, 2018).

Ces approches structuralistes, intéressantes d'un point de vue historique, sont en revanche plus difficiles à mobiliser pour analyser le changement en train de se faire. Sur la digitalisation de l'agriculture, on peut tout de même relever les travaux précurseurs de Steven Wolf (Wolf et Buttel, 1996 ; Wolf et Wood, 1997), qui montrent que le développement de l'agriculture de précision s'inscrit dans une continuité historique de plusieurs tendances : i) la diminution du rôle de l'État et la croissance du rôle de l'industrie dans la production et la dissémination de l'information agricole, ii) la concentration et la réorganisation des systèmes productifs vers une coordination et un contrôle par les industries d'amont et d'aval, et iii) l'importance croissante

de la justification environnementale. Ce travail montre comment la privatisation et la marchandisation de l'information qui s'opère dans l'agriculture de précision amène une concentration des actifs et une réorganisation de la production selon les exigences du capital industriel. Plus récemment, le travail de Prause, Hackfort et Lindgren (2020) questionne également les effets de la digitalisation sur le « food regime » en place. Ce travail montre que le numérique semble renforcer les caractéristiques du système en place que sont la financiarisation, le narratif écologique comme élément de justification, le pouvoir de contrôle des grandes firmes d'amont et d'aval, et une divergence croissante entre petites et grandes exploitations agricoles. Ce développement pourrait amener des changements plus structurels sur les acteurs en place (notamment dans la distribution, avec la montée en puissance d'Amazon et d'Alibaba) et sur le travail, avec l'automatisation de certaines tâches. Ces travaux soulignent l'importance de replacer l'analyse du numérique en agriculture dans une perspective historique et macro-économique. Cependant, le travail de Wolf et Wood (1997) conclut par la nécessité de développer des complémentarités entre approches globales et approches micro, notamment en étudiant les transformations dans les exploitations agricoles et dans plusieurs zones géographiques. Les approches micro apparaissent essentielles notamment pour étudier les impacts des technologies, le rôle des connaissances locales, la mise en œuvre de pratiques et technologies dans les fermes et leur complexité (Buttel, 1994). Étudier l'innovation implique donc la prise en compte à la fois de mécanismes macro-sociaux et micro-sociaux (Dockès, 1990).

1.2.4 *Le système d'innovation pour étudier le numérique en agriculture*

Les trajectoires d'écologisation et de digitalisation se développent dans le contexte économique et politique du secteur agricole, mais influencent en retour le secteur agricole. Ces trajectoires dépendent du contexte social et institutionnel mais impactent la société et les institutions en retour. Ce ne sont pas que des processus linéaires qui viennent de la science et vont aux agriculteurs. Une multiplicité de facteurs interviennent dans la construction de ces trajectoires : les connaissances disponibles, les institutions, les technologies diverses, les pratiques des agriculteurs, etc. De ce fait, l'analyse de ces trajectoires d'innovation nécessite une perspective systémique.

Le concept de système d'innovation propose une vision intermédiaire, qui prend en compte la diversité des acteurs pouvant jouer un rôle dans l'innovation, aussi bien de la recherche que « du terrain », leurs interactions, leurs connaissances et le contexte dans lequel ils évoluent. Le concept de Système d'Innovation constitue une approche systémique, multidisciplinaire et historique du processus d'innovation (Edquist, 2013). Il est utilisé pour analyser conjointement les institutions, les organisations, les réseaux et acteurs qui interagissent et impactent l'innovation dans un espace donné (Touzard, Temple et al., 2014). Ces impacts sur l'innovation se font par une multiplicité d'actions : développement, diffusion, usage, conception, promotion, formation, etc. (Granstrand, 2000). Ainsi, ce système va orienter le type d'innovation, il peut en favoriser certaines tout comme en bloquer d'autres. Ce concept de système d'innovation est développé dans le domaine interdisciplinaire

des *Innovation Studies*, et au croisement de l'économie de l'innovation et de l'économie institutionnelle.

Ce type d'approche apparaît pertinent pour étudier la digitalisation du secteur agricole. En effet, les études sur le sujet ont montré l'importance des acteurs (Busse, Doernberg et al., 2014 ; Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019), de la recherche, des connaissances et compétences (Knierim, Kernecker et al., 2019), des institutions et politiques publiques (Fielke, Garrard et al., 2019 ; Lajoie-O'Malley et al., 2020), des mécanismes de gouvernance de l'innovation et de pouvoir (Barrett et Rose, 2020 ; Klerkx et Rose, 2020), des marchés et modèles économiques (Fielke, Taylor et Jakku, 2020) ou encore des réseaux et apprentissages (Ingram et Maye, 2020).

Pour mon étude, j'adopterai donc une perspective systémique de l'innovation agricole, comme processus d'interaction entre de multiples facteurs et de multiples échelles, s'inscrivant dans un système socioéconomique qui structure des rapports de pouvoir.

1.3 Choix d'une approche en économie politique du système d'innovation agricole

Cette partie a pour objectif de présenter l'approche choisie pour aborder le concept de système d'innovation dans cette thèse. Après avoir présenté les différentes échelles auxquelles est décliné le concept de système d'innovation et les différentes perspectives d'analyse, je présente les approches en économie politique qui offrent une perspective systémique originale de l'innovation.

1.3.1 *Les différentes échelles du système d'innovation*

Les approches territoriales de l'innovation

L'approche en termes de système d'innovation a d'abord été utilisée pour analyser les différences nationales de dynamiques d'innovation, jouant sur la croissance économique et liées aux différences en termes d'organisations et d'institutions (Freeman, 1987 ; Lundvall, Johnson et al., 2002). La diversité des structurations de la recherche, des budgets recherche et développement, des universités, des régulations économiques, des routines etc. induirait diverses dynamiques d'innovation. Les auteurs ont ainsi développé le concept de *Système National d'Innovation* pour caractériser l'ensemble des dispositifs nationaux qui jouent un rôle sur l'innovation et pour comparer ces dipositifs entre plusieurs pays. Au-delà des différences institutionnelles et organisationnelles entre pays, ces approches mettent l'accent sur la spatialité de l'innovation à des échelles infra-nationales. Le concept de Système d'Innovation a ainsi été décliné à diverses échelles territoriales, telles que les districts industriels, les systèmes de production localisés ou encore les clusters d'innovation (Torre et Tanguy, 2014). Ces approches territoriales soulignent l'importance des conditions locales d'innovation, notamment le rôle des échanges de connaissances tacites, de la confiance ou encore des externalités de réseaux (Koschatzky et al., 2009 ; Torre et Tanguy, 2014). Ces idées ont mené à des politiques d'innovation telles que la mise en place de clusters d'innovation en France. Ces approches pourraient être utilisées pour

comparer le développement du numérique agricole dans différents pays ou différents territoires. Cela permettrait de comprendre le rôle des institutions propres à chaque pays ou territoire sur le développement du numérique.

Le « Corporate Innovation System »

Un nouveau concept a émergé avec le développement de firmes qui ont mis en place des politiques d'innovation : le « Corporate Innovation System », Système d'entreprise d'innovation (Granstrand, 2000). En effet, certaines firmes construisent des réseaux qu'elles dominent, et qui leur permet d'orienter l'innovation selon leurs propres besoin (Lundvall et Rikap, 2022). Les systèmes d'innovation des firmes très grandes viennent interagir et co-évoluent avec les systèmes nationaux d'innovation : à la fois par des processus de renforcement mutuel, et à la fois par des processus de conflit de pouvoir et de concurrence (Lundvall et Rikap, 2022). Le papier introductif au Big Data agricole de Bronson et Knezevic (2016), présente le fait que des firmes telles que John Deere ou Monsanto ont une place centrale dans le processus de digitalisation de l'agriculture et impactent la directionnalité de ce processus. Cela invite à des travaux qui pourraient aller plus loin sur le rôle et le positionnement de ces firmes dans ce processus. Mais en revanche ce type d'approche ne questionne pas les usages et effets des innovations.

Le Système Sectoriel d'Innovation

Les travaux sur les systèmes d'innovation se sont aussi focalisés sur les secteurs, qui peuvent être définis comme un « *ensemble d'activités unifiées par des groupes de produits, qui répondent à une demande existante ou latente, et qui partagent des bases de connaissances communes* » (Malerba, 2004). Les secteurs diffèrent fortement en termes de structures économiques, de nature des innovations, de sources de connaissances, de type de production, ce qui implique des régimes d'innovations très différents (Pavitt, 1984). L'innovation est généralement influencée par les caractéristiques d'un secteur et va en retour potentiellement transformer ou même créer un secteur d'activité (Touzard, 2014). Le concept de Système Sectoriel d'Innovation (SSI) est utilisé afin d'analyser l'innovation des secteurs dans une perspective multidimensionnelle, intégrée et dynamique (Malerba, 2004). Ce système va impacter l'innovation des firmes et autres acteurs, qui impactent en retour l'organisation du SSI : en effet les organisations sont considérées comme des agents actifs qui participent à construire l'environnement technologique et le marché. Notamment, l'apparition de nouveaux entrants ou les alliances avec des firmes d'autres secteurs peuvent modifier le système sectoriel d'innovation (Temri et al., 2014). Ainsi, les frontières des SSI sont au centre de l'analyse par ce concept, puisqu'elles vont évoluer dans le temps (Malerba, 2004). Certaines approches analysent les effets des institutions et des réseaux du secteur sur les processus d'innovation, les dynamiques économiques et les stratégies des entreprises. D'autres approches partent des processus d'innovation et des acteurs pour identifier les institutions et réseaux qui les impactent (Touzard, 2014). Le concept de SSI met en avant le rôle des institutions, des firmes mais également des autres organisations, des interactions marchandes mais également non-marchandes et considère le secteur comme dynamique et non comme une donnée constante.

Ces différentes approches de l'innovation peuvent être combinées puisque par exemple les facteurs sectoriels vont interagir avec les facteurs territo-

riaux, ou encore les systèmes technologiques d'innovation vont interagir avec les systèmes sectoriels d'innovation (Stephan et al., 2017). Ces différentes approches se basent sur une vision interactionniste de l'innovation, où interagissent une multiplicité d'acteurs, des connaissances, des institutions, des réseaux ainsi que l'environnement.

Le Système d'Innovation Agricole

Le concept de système d'innovation a été décliné de manière spécifique pour l'agriculture (Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012). Le secteur agricole a en effet des particularités qui justifient une approche sectorielle de l'innovation. Premièrement, le secteur agricole a fait l'objet de politiques publiques et de dispositifs de soutien à l'innovation spécifiques, au départ liés à l'enjeu de nourrir la population après la seconde guerre mondiale. En France, les politiques nationales et européennes ont ainsi joué un rôle crucial dans l'évolution du secteur agricole au sortir de la seconde guerre mondiale. Les travaux de Allaire et R. Boyer (1995) montrent par exemple que le changement technique associé au fordisme s'est propagé à l'agriculture sans affecter les rapports de production de manière similaire à l'industrie ou au reste de l'économie, du fait de dispositifs institutionnels spécifiques. Parmi les spécificités du secteur agricole, on peut également citer l'existence d'organismes de recherche et de formation dédiés (tels que l'INRAE, les lycées agricoles, les écoles d'agronomie). De plus, l'organisation du secteur est spécifique avec des acteurs en amont et en aval qui sont très concentrés alors que les exploitations agricoles forment un ensemble de petites entreprises atomisées. De plus l'action collective est importante dans ce secteur, qui a des institutions propres et une base de connaissances particulière. On peut rajouter à cela la spécificité due au rapport à la nature de ce secteur, ainsi qu'à la production de biens communs avec des enjeux nouveaux et majeurs tels que la préservation de la biodiversité ou la lutte contre le changement climatique (Touzard, Temple et al., 2014). La prise en compte de ces spécificités a amené plusieurs auteurs à proposer les notions de système d'innovation agricole (AIS) ou système d'innovation et de connaissance agricole (AKIS) (A. Hall, 2006 ; Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012).

Fielke, Garrard et al. (2019, p.2) ont développé le concept de DAIS, digitalisation des systèmes d'innovation agricoles, pour caractériser « *l'influence croissante des technologies numériques sur les productions agricoles, actuellement gérées par des réseaux d'acteurs et de technologies au sein de l'AIS traditionnel* ». L'idée de ce concept est d'étudier le développement du numérique, non pas comme un ensemble d'innovations technologiques indépendantes et exogènes, mais comme un ensemble d'innovations en interrelations, et en interaction avec le contexte dans lequel elles sont développées. Le développement du numérique va dépendre des acteurs, des valeurs, des technologies, des politiques publiques, des connaissances du secteur. Et ce développement va impacter ces éléments en retour. Fielke, Garrard et al. (2019) montrent dans ce premier article que les politiques publiques sont influencées et influencent en retour le développement du numérique. Les évolutions des systèmes de conseil sont précisées dans un autre article (Fielke, Taylor et Jakku, 2020).

Mon approche des processus de digitalisation et d'écologisation sera basée sur le concept de système agricole d'innovation. L'innovation dans le secteur

agricole dépend des acteurs et de leurs interactions, des connaissances, des technologies, des institutions et politiques publiques. La digitalisation et l'écologisation transforment le système d'innovation, avec par exemple l'arrivée de nouveaux acteurs venus d'autres secteurs, ou l'évolution des pratiques et usages.

1.3.2 *Différentes perspectives pour analyser le système sectoriel d'innovation*

Un système sectoriel d'innovation peut être appréhendé au travers une diversité d'approches : les approches fonctionnelles, celles centrées sur les processus et celles centrées sur les infrastructures (Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012). Ces approches sont résumées ci-dessous afin d'expliquer les choix réalisés dans la thèse.

Les approches fonctionnelles des SI
Certains auteurs proposent de mettre l'accent sur les activités et les fonctions réalisées au sein du système d'innovation. En effet, l'innovation va dépendre d'un certain nombre de fonctions qui vont pouvoir ou non être réalisées dans le contexte du système d'innovation. Hekkert, Suurs et al. (2007) définissent ainsi plusieurs fonctions qui interagissent lors de l'innovation technologique : le développement et la diffusion de connaissances, les activités entrepreneuriales, les orientations de la recherche, la création du marché, la mobilisation des ressources et la création de légitimité. Ces fonctions interagissent entre elles, en synergie ou en opposition. Cette approche permet de voir les points bloquants, les manquements du système d'innovation dans la réalisation de ces fonctions. En se basant sur cette approche, Eastwood, Klerkx et Nettle (2017) ont mis en évidence des défaillances en termes d'évaluation et de réflexivité dans la mise en place de technologies de précision pour l'élevage en Australie. Cette approche est surtout adaptée à l'innovation purement technologique, centrée sur les firmes, et prend peu en compte l'environnement (Markard et Truffer, 2008).

Les approches des SI par les processus
D'autres approches étudient l'innovation en termes de processus associés à un SI, c'est-à-dire en s'intéressant aux différentes étapes de trajectoire d'une innovation, de son émergence jusqu'à son éventuelle diffusion à large échelle dans la société. Le cadre des *Transition Studies*, évoqué précédemment, est notamment issu de travaux critiques sur les systèmes d'innovation (Geels, 2002), mais ne se revendique pas des *Innovation Studies*. Dans une autre perspective disciplinaire, cette approche a l'avantage d'intégrer la temporalité et l'interaction entre plusieurs échelles. En revanche, elle montre des limites pour analyser les rôles et stratégies des acteurs, leurs interactions et la distribution des ressources entre acteurs. De plus, si elle permet de comprendre les possibilités d'émergence de certaines innovations dans les niches, cette approche n'explique pas les dynamiques au-delà (Markard et Truffer, 2008). Cette approche n'apparaît donc pas totalement appropriée pour un travail sur les dynamiques de digitalisation et d'écologisation, qui concernent aujourd'hui des transformations plus globales et non restreintes à des niches.

Les approches en économies évolutionnistes évoquées un peu plus haut, peuvent être rapprochées également des analyses systémiques et proces-

suelles de l'innovation. En effet, toutes ces analyses intègrent les institutions, les connaissances et les acteurs qui vont interagir pour façonner les trajectoires d'innovation (Dosi, 1982). L'économie évolutionniste montre que cette trajectoire est le résultat de rapports de force entre acteurs et dépend des infrastructures, institutions et technologies du système ainsi que des connaissances (R. Nelson et Winter, 1982). Plus récemment, des travaux ont introduit le concept de directionnalité, qui évoque le fait d'orienter la trajectoire d'innovation dans une direction définie (Hekkert, Janssen et al., 2020 ; Klerkx et Begemann, 2020). Ce concept est notamment utilisé pour souligner le rôle de l'innovation sur le social et l'environnement. Il implique la mise en place d'une gouvernance de l'innovation et la coordination entre innovation technologique et institutionnelle. Ces approches ont donc un intérêt pour comprendre les trajectoires d'innovation, que sont l'écologisation et la digitalisation. Elles permettent non seulement d'analyser les trajectoires réalisées ou en train de se faire, mais également de réfléchir à comment concevoir et décider des trajectoires à venir (Klerkx et Rose, 2020). L'approche évolutionniste, et plus largement l'approche des systèmes d'innovation par les processus, sera donc mobilisée pour discuter des résultats de la thèse, et les resituer dans une perspective temporelle.

Les approches structurelles des SI

Les approches structurelles visent à étudier les composantes structurelles qui interagissent au sein des SSI. Malerba (2004) propose plusieurs catégories de facteurs principaux qui interagissent dans la construction et l'évolution de l'innovation : les connaissances, les technologies, les acteurs, les réseaux, les institutions et la demande. Il existe des contraintes et des interdépendances liées aux technologies existantes d'où leur rôle dans l'innovation. Tous les acteurs, que ce soit des individus, des entreprises ou d'autres formes d'organisation ou groupes d'organisations, ont des compétences, des croyances, un langage, des objectifs, des comportements propres, qui vont jouer sur l'innovation. Entre ces acteurs se mettent en place des processus de communication, d'échange, de coopération ou de compétition, qui vont dépendre d'institutions. On peut définir les institutions comme l'ensemble des contraintes sociétales qui structurent les comportements, qu'elles soient formelles (loi, textes juridiques…) ou informelles (règles normatives : valeurs, droits, responsabilités, et règles cognitives : cadres de pensée, langage, concepts…) (North, 1991). Les institutions vont cadrer la manière d'agir et d'interagir des acteurs, et donc avoir un impact sur l'innovation. La demande, formée par un ensemble d'individus et d'organisations hétérogènes, peut influencer le comportement des firmes et impacter l'innovation également.

Le cadre des SSI a été développé spécialement dans le but de caractériser les changements sectoriels, c'est-à-dire les transformations et évolutions des variables d'un système sectoriel (Malerba, 2002, p.258). Le changement fait partie intégrante des systèmes sectoriels. Et ce changement ne signifie pas seulement une croissance quantitative des variables mais peut impliquer la modification des variables elles-mêmes. L'analyse structurelle de ces variables permet justement l'analyse des changements structurels, de base, tels que l'arrivée de nouveaux acteurs, l'émergence de nouvelles compétences, de nouvelles formes organisationnelles et de nouvelle stratégies. Ces changements structurels vont affecter les fonctions et interactions dans un système d'in-

novation. De plus, ce cadre d'analyse permet d'analyser les transformations d'un secteur quand celles-ci impliquent des dynamiques qui vont au-delà des éléments traditionnels du secteur, dont la portée s'étend sur plusieurs secteurs et renouvelle les frontières du système sectoriel d'innovation (Malerba, 2002, p.259)

Cette perspective a été utilisée dans le travail de Busse, Doernberg et al. (2014) pour étudier le développement de l'agriculture de précision et de technologies numériques pour la gestion de l'élevage en Allemagne. Ce travail met en évidence les dynamiques du secteur, avec le renouvellement du rôle des conseillers, l'importance des agriculteurs dans ce processus, notamment dans la formulation des besoins et des retours d'expérience, l'importance des institutions et politiques publiques, notamment dans le financement de ces innovations, le rôle crucial des interactions entre les différents types d'acteurs et la trop faible prise en compte des technologies existantes (pour la compatibilité et les contraintes techniques).

Les transformations du secteur agricole que sont la digitalisation et l'écologisation, modifient les composantes structurelles du système d'innovation (acteurs, connaissances, technologies, institutions), jusqu'à redéfinir ses frontières. L'analyse structurelle sera ainsi privilégiée, tout en y intégrant des éléments d'analyse des processus. Cela m'amènera à analyser les interactions entre les composantes structurelles du système d'innovation et les transformations agricoles étudiées.

1.3.3 *Économie politique des systèmes d'innovation*

Les approches en termes de Système d'Innovation ont tendance à minimiser les asymétries de pouvoir au sein des processus d'innovation, dans lesquels les différentes parties prenantes sont considérées comme non hiérarchisées (Lundvall et Rikap, 2022). Pourtant, au sein d'un système d'innovation, il existe une diversité d'acteurs aux intérêts parfois divergents et aux capacités d'action qui ne sont pas forcément égales. Les rapports de pouvoir entre acteurs jouent sur les transformations du système, sur l'innovation, qui en retour joue sur ces rapports de pouvoir. L'économie politique intègre ces rapports de pouvoir pour étudier leur rôle dans l'innovation.

D'une part, les travaux en économie politique ont montré l'hétérogénéité des structures institutionnelles existantes. Ainsi il n'y aurait pas un capitalisme homogène mais une variété de capitalismes (Amable et al., 2005 ; P. Hall et Soskice, 2001). De ce fait, il existe aussi une variété de modèles d'innovation associés, théorisés par le concept de « Système Social d'Innovation et de Production (SSIP) », qui vise à mettre en avant les interrelations entre dynamiques d'innovation et dynamiques de production. Ils montrent ainsi qu'il existe différentes catégories de SSIP, selon le type d'institutions en place, leur complémentarités et leur hiérarchie (Amable, 2000). Les configurations institutionnelles jouent sur l'orientation de l'innovation via des incitations et contraintes qui vont favoriser une diversité d'objectifs (justice sociale, libéralisation ...) et vont changer le rôle des acteurs dans les processus d'innovation (entreprises, institutions publiques...).

D'autre part, l'économie politique insiste sur l'hétérogénéité des agents au sein même des systèmes socioéconomiques. De cette hétérogénéité, découle une divergence d'intérêts, qui peut être source de conflits. Les institutions,

c'est-à-dire les règles qui structurent les interactions sociales, résultent d'interactions stratégiques entre acteurs au sein d'une certaine structure de pouvoir (Amable et al., 2005, p53). Les institutions sont alors considérées ici comme l'expression stabilisée des rapports de pouvoir ou comme le résultat de compromis entre des intérêts hétérogènes, et dépendent des capacités des acteurs à influer sur les choix institutionnels (Amable et al., 2005 ; Théret, 2000). En retour, les institutions vont influer sur l'hétérogénéité des agents en impactant la distribution des gains ou l'accès aux ressources. Les travaux en théorie de la régulation ont ainsi montré que les arrangements institutionnels régulent l'accès aux ressources entre les différents groupes sociaux, et vont ainsi influencer les transformations des secteurs (Touzard et Labarthe, 2016). Notamment, ces règles vont jouer sur les conditions de création et de diffusion des connaissances, étapes centrales des processus d'innovation. Ainsi, les arrangements institutionnels vont avoir tendance à favoriser les innovations qui correspondent aux modèles de productions dominants. Par exemple, des travaux dans le secteur de l'agriculture ont montré comment le système de recherche en agriculture favorise le développement de l'ingénierie génétique plus que l'innovation agroécologique (Vanloqueren et Baret, 2009).

Cette question du pouvoir est abordée dans divers travaux en sciences sociales sur le développement du numérique en agriculture. Notamment, de nombreux travaux montrent comment le développement actuel du numérique renforce les relations de pouvoir existantes entre agriculteurs et firmes d'amont et d'aval et accentue la concentration du pouvoir (Lajoie-O'Malley et al., 2020 ; Lioutas et Charatsari, 2020). L'usage croissant de ces technologies pourrait même amener des transferts de pouvoir des agriculteurs vers les firmes, notamment concernant les informations et connaissances (Carbonell, 2016 ; Carolan, 2017a). Ces phénomènes de renforcement et de transfert sont notamment liés à l'accaparement des données et des bénéfices par ces firmes (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Rotz, Duncan et al., 2019). Ce pouvoir se manifeste sous différentes formes telles que la manipulation, l'attractivité, la dépendance (leadership) voire la contrainte ou la force (Ryan, 2020). Plus rarement, ces questions de pouvoir sont évoquées pour qualifier les oppositions qui existent entre plusieurs approches de l'agriculture dans le processus de digitalisation, qui pourrait mener à des phénomènes d'exclusion, de monopolisation de formes de production (Barrett et Rose, 2020). Les rapports de pouvoir jouent en effet sur le contrôle de la direction de l'utilité technologique, pouvant favoriser certaines visions de la durabilité plutôt que d'autres (Clapp et Ruder, 2020). Mais ces questionnements restent très théoriques et sont peu renseignés par des données sur les actions, les usages et les pratiques des acteurs agricoles.

La digitalisation et l'écologisation de l'agriculture peuvent être étudiés dans une perspective en termes de système d'innovation afin de prendre en compte les différentes échelles et dimensions que ces processus impliquent. Cependant, les travaux sur les systèmes d'innovation ont tendance à négliger les hétérogénéités internes au système (Malerba, 2002). Cette question de l'hétérogénéité apparaît d'autant plus importante que je m'intéresse à l'écologisation de l'agriculture, phénomène décrit comme hétérogène dans la littérature. Avoir une approche en économie politique des systèmes sectoriels d'innovation permet d'intégrer cette question de l'hétérogénéité et des rapports de pouvoir au sein des systèmes d'innovation.

2 Spécification du cadre d'analyse pour analyser les trajectoires d'écologisation et de digitalisation

Cette deuxième partie vise à proposer des spécifications théoriques afin de mieux prendre en considération les hétérogénéités du secteur, les rôles de l'échelle micro-économique et les interactions entre échelles, composantes qui restent encore peu analysées dans le cadre des systèmes d'innovation.

2.1 Un système d'innovation agricole hétérogène : une diversité de paradigmes

Les analyses en termes de système sectoriel d'innovation ont déjà permis d'identifier les variabilités sectorielles dans le domaine de l'innovation. En revanche, l'analyse des hétérogénéités au sein des secteurs reste un des points sur lesquels ces théories nécessitent d'être approfondies, notamment pour comprendre les dynamiques de ces systèmes (Malerba, 2002, p.262). Cette partie vise à préciser i) comment je vais intégrer cette hétérogénéité du système afin d'en avoir une approche en économie politique, ii) comment cette hétérogénéité joue sur la trajectoire des systèmes d'innovation et iii) comment se traduisent ces phénomènes dans le secteur agricole.

2.1.1 *Le concept de paradigme pour capturer l'hétérogénéité des systèmes*

À la diversité existante de systèmes sociaux d'innovation et de production, s'associent une diversité de *paradigmes socio-techniques*, c'est-à-dire de manières de penser la production, de concevoir les problèmes et le champ des solutions possibles (Dockès, 1990). Un *paradigme technologique* est « *un modèle de résolution de problèmes technologiques sélectionnés, fondé sur des principes sélectionnés dérivés des sciences de la nature et sur des technologies matérielles sélectionnées* » (Dosi (1982) traduit par Djellal (1995)). Le *paradigme technico-économique* est enrichi et prend en compte les structures de marché, les conditions de production et de distribution (Djellal, 1995). Le paradigme socio-technique considère l'innovation technologique « *comme faisant partie d'une innovation sociale plus large* ». Un paradigme va être une façon de voir les problèmes et d'envisager les solutions. Un paradigme socio-technique comprend donc une dimension socio-organisationnelle, une dimension technique et une dimension économique. On peut y ajouter une dimension plus culturelle et symbolique : relation à la nature, aux connaissances, à l'espace, à la société, vision du monde... (Beus et Dunlap, 1990). Ces paradigmes socio-techniques orientent les types d'innovation selon les modes de production en place, les ressources disponibles, mais également selon les structures économiques et institutionnelles.

Ces paradigmes se succèdent dans le temps et peuvent se transférer d'un secteur à un autre, d'un territoire à un autre. Les paradigmes peuvent également coexister : malgré un paradigme dominant, des façons marginales de penser la production (et ses rapports à la nature et à la société) persistent (Dockès, 1990). La coexistence est entendue ici comme l'existence reconnue et intentionnelle, en parallèle, de plusieurs systèmes qui peuvent être en compétition, en complémentarité ou en juxtaposition.

Cette hétérogénéité au sein des systèmes d'innovation est rarement étudiée, bien que pouvant jouer sur les pratiques des acteurs et les dynamiques à l'œuvre (Malerba, 2002, p.262). En effet cette hétérogénéité joue sur les trajectoires des systèmes d'innovation.

2.1.2 *Paradigmes et trajectoire des systèmes d'innovation*

Un paradigme se retrouve stabilisé dans un fonctionnement propre qu'on peut appeler régime. Un *régime technologique* est un « *ensemble de règles imbriquées dans les pratiques, les procédés de production, les caractéristiques des produits, les compétences et les procédures [. . .], eux-mêmes encastrés dans des institutions et des infrastructures* » (Traduit de : Rip, Kemp et al., 1998, p.338). Le concept de *régime socio-technique* y ajoute les différents groupes sociaux qui interagissent pour créer et maintenir ce régime (Geels, 2004). Les interdépendances et alignements entre les différentes composantes du régime (connaissances, infrastructures, règles, etc.) lui confèrent une stabilité (Geels, 2002). Un régime va évoluer selon une trajectoire qui dépend de son paradigme. En effet, les changements, technologiques ou institutionnels, vont dépendre des cadres de pensée, des connaissances existantes, des dispositifs d'apprentissages, des formes d'organisation, des ressources disponibles, des normes, des innovations déjà réalisées (Kirat, 1991). Pour analyser ce caractère cumulatif du changement, les théories économiques évolutionnistes introduisent le concept de trajectoire technologique.

Une *trajectoire technologique* est un « *potentiel technologique initial donné, qui en raison notamment des caractères cumulatifs, spécifiques et irréversibles des processus d'innovation, se développerait dans un certain nombre de directions ou trajectoires, mais à l'intérieur des limites précises définies par des arbitrages entre facteurs technologiques et économiques et avec un important pouvoir d'exclusion* » (Dosi (1982) traduit par Djellal (1995)). Ainsi une trajectoire technologique va se caractériser par des innovations incrémentales multiples, au sein du régime et du paradigme. À chaque régime, peut être adossé un système cognitif. Un *système cognitif* est un ensemble large de connaissances, de normes, de croyances et d'images guides qui stabilisent une filière de production (Stassart et Jamar, 2009). Les institutions et le système cognitif stabilisent le régime, pouvant mener à des verrouillages comme expliqué dans la première section de ce chapitre. Ces verrouillages sont accentués par les rapports de pouvoir qui s'instituent entre les acteurs (Bers et al., 2019). Les acteurs et organisations dominantes vont cadrer la direction du changement pour maintenir leurs intérêts, via des contraintes et dépendances, via des innovations techniques ou via leur influence sur les régulations et institutions (Cleaver, 2002 ; Conti, Zanello et A. Hall, 2021). Ces mécanismes vont exclure ou invisibiliser les alternatives. Les trajectoires dépendent ainsi des rapports de pouvoir.

Divers paradigmes et diverses trajectoires technologiques coexistent au sein des systèmes d'innovation. Cette coexistence implique des conflits, des négociations et des compromis. En effet, ces paradigmes peuvent entrer en compétition, ou au contraire agir en complémentarité. Ces interactions entre paradigmes impliquent des évolutions et peuvent jouer sur la directionnalité des systèmes d'innovation. D'une part, ces interactions vont définir quels sont les problèmes ou besoins pertinents auxquels l'innovation doit répondre (Kirat, 1991). La légitimité des actions et leur justification sociale a été re-

connue comme impactant la dynamique économique (Amable et al., 2005). Ceci peut mener à l'évolution des paradigmes en place. D'autre part, les interactions entre paradigmes vont jouer sur la manière de répondre à ces problèmes identifiés. Les interactions de ces paradigmes vont construire des représentations partagées sur les futurs souhaités et donc déterminer le type de solutions considérées comme légitimes (Lajoie-O'Malley et al., 2020). Cela va impacter la distribution des ressources entre acteurs et entre paradigmes et jouer sur le déploiement des innovations (Bronson, 2019 ; Pigford, Hickey et Klerkx, 2018). Des innovations alternatives peuvent se développer dans des niches puis potentiellement influencer plus tard le régime (Pigford, Hickey et Klerkx, 2018).

En sens inverse, les innovations participent à déterminer différentes trajectoires, qui peuvent impacter les paradigmes eux-mêmes (Gasselin et al., 2021). Les innovations ne sont pas neutres, elles peuvent avoir des impacts différents selon leur justification et leur forme, qui traduit une vision spécifique de la nature, de l'espace, de la société, des connaissances, des territoires, du marché, de l'État et de la technique.

Ainsi, la trajectoire d'un système d'innovation va dépendre des dynamiques d'émergence, de coexistence, de confrontation entre paradigmes. La direction et le type de déploiement des innovations sont le fruit de négociations, de luttes de pouvoir, et peuvent avoir un impact en retour sur les mécanismes de coexistence. Le déploiement des innovations dépend de leur compatibilité avec les institutions (droits de propriété, modèles de diffusion, structures productives, etc.). Ainsi, l'innovation correspond à un processus interactif de développement technologique et de changement institutionnel (Hayami, Ruttan et al., 1971).

2.1.3 *Hétérogénéité des paradigmes et des modèles au sein du secteur agricole*

Différentes manières d'écologiser l'agriculture sont proposées et mises en œuvre dans les pratiques agricoles mais également dans les modes de commercialisation, de développement de connaissances ou encore dans les institutions. Plusieurs paradigmes coexistent donc au sein du secteur et du système d'innovation agricole (Gaitán-Cremaschi et al., 2019). Ainsi, il y aurait un « paradigme conventionnel agro-chimique », basé sur la simplification des systèmes, l'utilisation d'intrants, la spécialisation, l'intensification et les économies d'échelles pour produire à bas coût, paradigme qui s'est institutionnalisé et est devenu dominant après la seconde guerre mondiale (Magrini, 2018 ; Touzard et Labarthe, 2016). Il y aurait également un paradigme agroécologique, basé sur l'utilisation et l'amplification de services écosystémiques pour gérer la fertilité des sols, la santé des plantes et des animaux et in fine la production agricole. Au-delà de cette vision centrée sur la production, plusieurs paradigmes pourraient être définis en incluant les types de commercialisation ou les liens au territoire (Plumecocq, Debril et al., 2018).

L'écologisation de l'agriculture recouvre une grande diversité de trajectoires possibles pour les exploitations agricoles, basées sur la mise en place de pratiques plus écologiques et de principes méthodologiques et socio-économiques adaptés. Mais ces pratiques individuelles sont promues, encadrées, renseignées et valorisées à d'autres échelles. Les pratiques individuelles

sont encastrées dans des systèmes de connaissances, des institutions, des politiques publiques, des chaînes de valeur. Elles sont intégrées dans les dynamiques sectorielles. En effet, les diverses conceptions de l'agriculture renvoient à une diversité de systèmes cognitifs (Stassart et Jamar, 2009). Par exemple, la filière agriculture biologique nécessite un système de connaissance différent (Morgan et Murdoch, 2000). Cela concerne les connaissances à propos des mécanismes de production mais aussi à propos de la commercialisation ou de la transformation. Les spécificités de l'agriculture biologique nécessitent notamment une articulation des connaissances scientifiques avec les connaissances locales et les mécanismes d'apprentissage dans les communautés. Ainsi, le développement de connaissances dans le secteur agricole va jouer sur le type de pratiques agricoles qui sont mises en œuvre. Dans la production scientifique, on retrouve également les divers pôles paradigmatiques des agricultures écologisées (Ollivier et Bellon, 2013). Vanloqueren et Baret (2009) montrent ainsi que la recherche scientifique en agriculture peut jouer sur les trajectoires agricoles en freinant l'innovation agroécologique. Notamment, les auteurs mettent en évidence comment la continuité de la trajectoire technologique agricole est favorisée par les orientations de la recherche, les partenariats, le rôle des médias et des lobbys, la propriété intellectuelle, la dynamique capitaliste, les hypothèses implicites du secteur public ainsi que l'organisation et les dispositifs d'évaluation de la recherche. Les politiques publiques vont influencer les orientations de la recherche et donc certains systèmes de connaissances. Mais au-delà, les politiques publiques et les institutions participent à la construction d'un système de croyance (Stassart et Jamar, 2009), favorisent certaines structures agricoles plutôt que d'autres, jouent sur l'équipement technologique des fermes, incitent ou contraignent les pratiques agricoles et les types de production. Cette hétérogénéité des connaissances et des institutions se retrouve également au niveau des organisations de conseil, de collecte et d'approvisionnement, ainsi qu'au niveau des organisations professionnelles. Les dynamiques collectives et d'accompagnement jouent un rôle un primordial dans l'évolution des modèles agricoles, notamment au travers du partage d'expérience, de la recherche de solution mais aussi via la construction d'une reconnaissance professionnelle (Lamine et al., 2009). Au niveau des marchés, il existe également une certaine segmentation par les organisations de distribution ou encore par les labels, notamment celui de l'*Agriculture Biologique* mais également les appellations d'origine ou autres labels sur des critères environnementaux, sociaux, géographiques ou nutritionnels. Dans la lignée de ces travaux, plusieurs articles soulignent que le développement du numérique tend à renforcer le système agricole industriel dominant (Bronson et Knezevic, 2016 ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Wolf et Buttel, 1996).

Les paradigmes se retrouvent dans les institutions, les organisations et les infrastructures. J'utilise le concept de paradigme pour reconnaître la diversité des principes et des institutions propres à chaque forme d'agriculture et d'écologisation. Cependant, je considère que ces différentes formes évoluent au sein d'un même système sectoriel d'innovation : elles sont soumises à la même réglementation et politique agricole, évoluent dans un environnement scientifique et technologique en partie similaire et dans des formes institutionnelles communes. Le concept de paradigme semble pertinent pour notre problématique car il articule plusieurs dimensions : socio-organisationnelle,

technique et économique, et permet d'intégrer les micro-systèmes productifs (ici les exploitations agricoles) et la société globale (ici limitée au secteur agricole) (Dockès, 1990).

Dans les faits, les frontières entre ces paradigmes sont floues : un continuum de pratiques existe et des processus de différenciation ont lieu dans chacun des pôles. Il n'y a donc pas de limite précise entre agriculture conventionnelle et agroécologique (Van der Ploeg et al., 2019). Les agricultures alternatives, ou durables, ou agroécologiques, rassemblent une diversité de phénomènes qui se construisent autour d'une diversité de conception de la qualité (Sonnino et Marsden, 2006). Au sein-même d'un idéal-type d'agriculture alternative formalisé : l'agriculture biologique, on observe des processus de différenciation avec par exemple des phénomènes de conventionnalisation de l'agriculture biologique (Darnhofer et al., 2010). L'agriculture conventionnelle fait également l'objet d'évolutions variées. Par exemple, Lucas (2021) décrit un phénomène d'agroécologie silencieuse qui correspondrait au développement de pratiques écologiques au sein même de la dite « agriculture conventionnelle », mais qui ne sont pas caractérisées comme telles par les agriculteurs qui évitent la terminologie écologique, et qui sont peu perçues dans les statistiques agricoles. La diversification des cultures ou l'agriculture de conservation, qui correspond à la mise en place de pratiques culturales pour protéger le potentiel des sols via la minimisation du travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des cultures, se développent également, dans l'agriculture conventionnelle ou biologique (Goulet et Vinck, 2012 ; Morel et al., 2020). De plus en plus d'innovations sont proposées pour la mise en place de pratiques de substitution, à l'intermédiaire entre agriculture conventionnelle et agroécologie, telles que le développement du biocontrôle (Aulagnier et Goulet, 2017). Des pratiques de commercialisation dites alternatives, telles que les circuits de proximité, la vente à la ferme, se développent à la fois dans des exploitations avec des modes de production conventionnels ou plus alternatifs. Le développement du numérique en agriculture est parfois présenté comme un nouveau paradigme, un nouveau modèle agricole (Bournigal, 2016). Parfois, le numérique est présenté comme pouvant s'adapter à la diversité de modèles agricoles existante (Lenain et al., 2021). Enfin, le numérique est parfois présenté comme une composante du modèle agricole conventionnel (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Wolf et Buttel, 1996).

L'agriculture est donc hétérogène : différents paradigmes coexistent. Ceux-ci se retrouvent dans les pratiques mais également à l'échelle des organisations et institutions. Ces paradigmes n'évoluent pas de manière indépendantes mais sont en interaction constante au sein du secteur agricole et de son système d'innovation, qui peut influencer les trajectoires technologiques et donc les modes de coexistence de ces paradigmes.

2.1.4 *Interactions entre paradigmes dans le secteur agricole*

Les institutions et organisations structurent les rapports de pouvoir entre les paradigmes, influençant ainsi les dynamiques du système agricole (Sonnino et Marsden, 2006) et construisant sa directionnalité (Pigford, Hickey et Klerkx, 2018). La coexistence de paradigmes peut résulter en des processus de co-évolution, de convergence mais également de différentiation, de

divergence (Hervieu et Purseigle, 2015), par divers mécanismes explicités ci-dessous.

L'hétérogénéité au sein du système d'innovation agricole crée de la concurrence pour la mobilisation de ressources, la reconnaissance sociale, l'accès au marché (Gasselin et al., 2021). La coexistence de paradigmes peut mener à des confrontations sur le type de connaissances à développer (Vanloqueren et Baret, 2009). Par exemple Morgan et Murdoch (2000) ont montré que les rapports de pouvoir entre agriculture conventionnelle et biologique ont joué sur le développement des connaissances, en défaveur de l'agriculture biologique. Ainsi, la programmation de la recherche publique ou privée joue dans le maintien de certains paradigmes agricoles (Vanloqueren et Baret, 2009). Au-delà des connaissances scientifiques, il peut y avoir des phénomènes de concurrence sur la place des systèmes cognitifs (connaissances, normes, croyance, imaginaires) propres à chaque paradigme dans les discours et politiques publiques (Stassart et Jamar, 2009). On y retrouve également des oppositions en termes de valeur, de position philosophique, de conception du rapport à la nature (Plumecocq, Debril et al., 2018). Ces rapports conflictuels entre agriculture conventionnelle et alternative se retrouvent dans les cercles scientifiques, ce qui amène des résultats différents car affectés par les croyances et valeurs de ceux qui les produisent (Beus et Dunlap, 1990). La recherche, le développement de connaissances ainsi que diverses formes de soutien à l'innovation peuvent influencer l'innovation technologique. Or l'innovation technologique, le numérique entre autres, peut également favoriser certains paradigmes plutôt que d'autres, en fonction des objectifs, valeurs, connaissances ou manières de faire qui sont intégrées dans les technologies (Bronson, 2019). Les rapports de force entre les paradigmes jouent sur également les formes institutionnelles, qui peuvent plus ou moins favoriser certains paradigmes plutôt que d'autres.

En revanche, des formes de synergie ou d'hybridation existent également dans cette coexistence des paradigmes. Premièrement, les paradigmes alternatifs permettent de répondre aux critiques du paradigme conventionnel, ce qui peut finalement favoriser son maintien plutôt que sa remise en cause plus globale. En intégrant des composantes du paradigme alternatif, le modèle dominant s'approprie des images positives liées au paradigme alternatif tout en ignorant ses implications plus radicales, ce qui lui permet de maintenir cette situation dominante (Beus et Dunlap, 1990). Mais des synergies peuvent aussi bénéficier aux différents paradigmes. Des complémentarités fonctionnelles peuvent exister, telles que le partage de ressources, de connaissances, de travail, de marché ou de valeur (Gasselin et al., 2021). Des sources d'innovation peuvent être réutilisées dans autres paradigmes pouvant mener à des formes d'hybridation (Plumecocq, Debril et al., 2018).

Notre approche en économie politique sera basée sur une conception du système d'innovation comme étant hétérogène, lieu de coexistence et de confrontation entre plusieurs paradigmes d'écologisation de l'agriculture. Ces paradigmes se retrouvent à l'échelle des pratiques individuelles mais également des organisations et institutions. Ces paradigmes interagissent, et des changements dans le système d'innovation peuvent affecter les mécanismes d'interaction, favorisant l'hybridation, la synergie ou la concurrence et la confrontation.

2.2 Une analyse de l'innovation par les modèles, les pratiques et les usages

Le cadre d'analyse des systèmes d'innovation, bien qu'intégrant les utilisateurs et la demande, ne permet pas de rendre compte du rôle spécifique des usages dans le processus d'innovation (Busse, Doernberg et al., 2014 ; Hekkert, Suurs et al., 2007). Des liens théoriques prometteurs sont à faire entre des analyses économiques structurelles des changements à l'échelle des industries/secteurs, et des approches micro-économiques des processus d'innovation à l'échelle des individus et des organisations (Dosi et al., 1988, p1162). S'intéresser aux pratiques individuelles et aux changements à l'échelle microéconomique permet d'étudier la matérialisation des changements globaux. Mais les pratiques individuelles ne sont pas considérées ici comme indépendantes des évolutions plus globales. Elles sont encastrées dans un système socio-économique, en interaction permanente avec celui-ci : elles sont donc soumises aux contraintes de ce système tout en le modifiant. L'innovation est donc bien un processus multi-scalaire, dont les approches par les systèmes et par les pratiques sont complémentaires. Cette section vise à préciser comment l'échelle micro sera intégrée dans l'analyse à partir des concepts de modèle agricole, de pratiques et d'usages, et pourquoi l'intégration de cette échelle est essentielle dans l'étude des processus d'innovation.

2.2.1 *Le modèle agricole pour distinguer les types d'exploitations*

Pour caractériser la diversité des micro-systèmes productifs qui s'adossent aux paradigmes, j'utilise le concept de *modèle productif agricole*.

En économie institutionnelle, le modèle productif sert à distinguer les différents systèmes productifs selon trois composantes (R. Boyer et Freyssenet, 2000). La première est la *politique produit* de l'entreprise. Les modèles productifs se distinguent ainsi selon les marchés visés, la gamme proposée, les objectifs de volume de vente, la diversité, la qualité, la nouveauté ou encore la marge visée. La seconde composante correspond à *l'organisation productive*. Cela inclue les méthodes et moyens choisis, le degré d'intégration des activités, la répartition spatiale, l'organisation de la conception, l'approvisionnement, la fabrication et la commercialisation, les techniques employées et les critères de gestion. Enfin, la troisième composante caractérise le travail et la *relation salariale*. Les modèles se distinguent alors selon les modes de recrutement, l'emploi, la classification ou encore la représentation des salariés. Les modèles productifs peuvent être définis comme des « *compromis de gouvernement d'entreprise, qui permettent de mettre en œuvre durablement une stratégie de profit viable dans le cadre des modes de croissances des pays où les firmes organisent leurs activités grâce à des moyens cohérents et acceptables par les acteurs concernés* » (R. Boyer et Freyssenet, 2000, p.33). Ce concept permet donc de distinguer les modèles d'entreprises tout en les intégrant dans leur contexte économique.

En agriculture, trois utilisations de la notion de modèle agricole existent (Gasselin et al., 2021 ; Touzard et al., 2021). La première renvoie au système concret, modélisé par les observateurs, définition qui peut être rapprochée de celle de modèle productif. La deuxième utilise le modèle agricole en tant que projet ou futur désiré, idéalisé afin d'en faire une référence pour légitimer ou contester des changements. La troisième utilisation du concept

de modèle agricole le définit comme cadre normatif (politiques agricoles, cahier des charges, règles) qui résulte de rapports de force. Les modèles se distinguent par leurs organisations technico-économiques, leurs valeurs (Plumecocq, Debril et al., 2018), leurs connaissances, leurs liens au marché, à l'état et au territoire (Gasselin et al., 2021). Ici, j'utiliserai la notion de modèle comme système concret, qu'on peut appeler « modèle productif agricole », dans la lignée de la perspective institutionnelle.

Appliquée à l'agriculture, la notion de modèle intègre les caractéristiques biotechniques, c'est-à-dire les pratiques agricoles, en plus de leur caractérisation socio-économique (Rémy, 1987 ; Therond et al., 2017). En effet, ces caractéristiques biotechniques rentrent dans l'*organisation productive* du modèle productif agricole. La notion de modèle agricole peut être rapprochée des « farming styles », définis par Van der Ploeg (1994), qui distinguent les modèles d'exploitation selon le type de ressources mobilisées et le type de combinaison entre ces ressources. Les modèles de l'exploitation agricole peuvent être conçus comme i) une unité micro-économique, avec des processus de production, des flux, des contraintes, ii) un « système piloté », qui fait l'objet de processus de décisions liées aux objectifs, connaissances et à l'organisation, iii) la composante d'un système social ou encore iv) une organisation complexe qui coordonne un ensemble d'activités (Laurent, Maxime et al., 2003). Les modèles agricoles caractérisent les productions, l'organisation productive, le travail, les pratiques des exploitations agricoles, vues comme insérées dans un système socio-économique. Le changement technique des exploitations est ici envisagé comme un processus de négociation entre des facteurs individuels, sociaux, économiques, institutionnels et politiques (Laurent, Maxime et al., 2003). Les modèles agricoles sont donc là où se matérialisent les paradigmes agricoles, ce sont les systèmes de production concrets qui se mettent en œuvre, évoluent sous l'influence de facteurs institutionnels et font évoluer ces facteurs. Les modèles agricoles peuvent donc être étudiés au travers des pratiques et usages mis en œuvre.

2.2.2 *Technologies, usages et pratiques*

Comme évoqué dans le premier chapitre, une technologie n'est pas qu'un objet matériel mais correspond à un ensemble de connaissances, de savoir-faire, de méthodes, de procédures et d'expériences (Dosi, 1982). Pour capter les différentes dimensions de la technologie, il faut donc s'intéresser à leurs usages.

La notion d'*usage* permet de considérer les technologies dans leur utilisation effective et en interaction avec leur contexte. Cette notion aborde la technologie au-delà de son achat et d'une utilisation prescrite, en considérant son intégration récurrente dans les pratiques et les systèmes de production (Badillo et Pélissier, 2015 ; DiMaggio, Hargittai et al., 2001). L'usage effectif est utilisé pour définir « *la capacité et la possibilité d'intégrer avec succès les TIC dans la réalisation d'objectifs définis par l'intéressé lui-même ou en collaboration* » (Gurstein, 2007, p.9). Cette notion d'effectivité a été ajoutée dans des travaux sur le numérique, afin de souligner l'enjeu autour des capacités des individus à utiliser de manière bénéfique les technologies numériques. Peu d'initiatives seraient mises en place pour répondre à cet enjeu, les politiques publiques se concentrant plutôt sur la problématique de l'accès, de la « fracture numé-

rique » (Gurstein, 2007). L'usage d'une technologie est pourtant associé à la construction de connaissances, à des ajustements et des interactions avec les différentes pratiques des utilisateurs (Higgins et al., 2017).

Cette notion d'usage permet d'une part de prendre en compte les interdépendances entre différentes technologies, mais également le contexte économique, social et culturel, qui va jouer sur l'usage (Badillo et Pélissier, 2015). D'autre part, cette notion permet d'aller au-delà d'une vision d'utilisateurs passifs et de comprendre comment ces derniers agencent, bricolent, adaptent les technologies pour répondre à leurs besoins (Higgins et al., 2017). La notion de *pratique* englobe celle d'usage, mais y ajoute les comportements, attitudes et représentations associées (Millerand, 2008).

Les travaux en économie sur le numérique en agriculture se focalisent principalement sur l'adoption des technologies. Cependant, un nombre croissant de travaux en sciences sociales vont au-delà de l'adoption et montrent l'importance de s'intéresser aux usages. On peut évoquer le travail de Gotor et al. (2020) qui montre différents types de combinaisons récurrentes de technologies d'agriculture de précision. Ces combinaisons s'associent avec des objectifs et ont des impacts sur le travail dans les exploitations (augmentation du travail de nuit par exemple). Le papier de Rose, Morris et al. (2018) montre que les usages d'OAD ne consistent pas en une application à la lettre des recommandations de l'outil, mais que les utilisateurs prennent du recul sur ces informations et les articulent avec leurs connaissances propres. Le travail de O. Visser, Sippel et Thiemann (2021) questionne la « précision » des usages des technologies basées sur le Big Data. Il y aurait une différence entre la promesse de précision et la précision réelle liée à la mise en œuvre concrète de ces technologies. Celle-ci ne serait pas qu'une conséquence d'un mauvais usage par les agriculteurs mais résulterait de l'ensemble de l'assemblage socio-technique autour de ces technologies.

2.2.3 *L'importance de l'échelle micro dans l'étude des processus d'innovation*

L'innovation n'est pas qu'une dynamique macro-économique : elle dépend également des conditions micro-individuelles dans lesquelles peut se concrétiser ou non l'innovation (Fleming et al., 2018). Sans ces usages et ces pratiques, il n'y a pas d'innovation. Les conditions de concrétisation des évolutions technologiques et institutionnelles font partie intégrante du processus d'innovation. Afin d'aller au-delà d'une vision idéalisée, déterministe ou simplifiée, dans laquelle les transformations technologiques et institutionnelles auraient un effet homogène et correspondant à l'effet anticipé, il est nécessaire d'étudier les effets concrets, la diversité des usages et des réalités derrière un effet macro (Buttel, 1994). Cela permet d'étudier comment interagissent les innovations en pratique, par exemple usages du numérique et écologisation.

Les pratiques et usages concrets peuvent être différents de ceux imaginés. Il peut y avoir des recompositions, des détournements, des verrouillages non anticipés etc. Par exemple, la différence de vision du métier d'agriculteur entre praticiens et développeurs d'OAD amène à des usages de ces technologies différents de ceux anticipés par les concepteurs (Rose, Morris et al., 2018). De même, Wolf et Wood (1997) montrent que sur le terrain, l'agriculture de précision répond à des fonctions différentes des prétentions économiques et écologiques qu'elle propose. Dans un autre domaine, l'article

de Hennessy, Läpple et Moran (2016) illustre la différence entre les effets attendus et ceux constatés sur le terrain, en montrant que l'usage d'internet par les agriculteurs ne permet pas de répondre au problème d'exclusion sociale puisque les personnes isolées utilisent moins internet. C'est dans les pratiques également que vont se jouer des phénomènes d'adaptation, de résistance, de constructions d'alternatives. On peut illustrer cela avec le cas de Farm Hack, une association d'agriculteurs qui coopérent afin de modifier ou réparer les composantes numériques de leur matériel agricole (Carolan, 2018). Ces transformations à l'échelle micro peuvent ensuite modifier les phénomènes à l'échelle macro, ce que je préciserai par la suite.

Les changements technologiques ont des effets micropolitiques souvent négligés (Carolan, 2020). Les politiques publiques se concentrent sur les effets macrosociaux tels que le nombre d'emploi ou le taux de croissance. Or les effets micropolitiques tels que les impacts sur le travail, les individus ou sur les pratiques agricoles doivent être pris en compte pour l'évaluation des politiques publiques. Les travaux de Rotz, Gravely et al. (2019) questionnent les effets de la digitalisation sur les travailleurs salariés du secteur agricole, qui pourraient être confrontés à plus d'asymétrie sociale et de contrôle. Le travail de T. Martin et al. (2021), basé sur une analyse systématique de la littérature sur les robots agricoles et le travail, souligne les changements sur la nature du travail réalisé, la charge de travail et la relation au travail, changements qui vont au-delà d'évolutions quantitatives. Carolan (2020) montre comment les usages de certaines technologies numériques s'associent à un imaginaire productiviste et limite les futurs possibles. L'auteur souligne la nécessité des approches in-situ pour capter ces effets.

2.2.4 *Usages du numérique et transformation des modèles productifs agricoles*

La littérature théorique et empirique présentée dans ce chapitre soulève la question des mécanismes micro-économiques de transformation des systèmes agricoles par l'introduction de technologies numériques. Les processus de digitalisation et d'écologisation vont nécessairement interagir à l'échelle des exploitations agricoles puisque les usages du numérique vont pouvoir modifier les décisions et les pratiques agricoles. Si on reprend le concept de technologie de Dobrov (1979), qui lui associe trois composantes : le hard, le soft et l'org-ware, le numérique va jouer sur trois aspects. D'une part, le numérique modifie les possibilités techniques, matérielles. Il va permettre de réaliser de nouvelles tâches - par exemple la géolocalisation précise (RTK) d'un semoir permet de réaliser un semis sous couvert vivant, ou des outils numériques facilitent certaines tâches telles que la traite, la surveillance des parcelles etc. D'autre part, le numérique va jouer sur les connaissances et compétences : les outils de collecte de données peuvent créer de nouvelles connaissances, des outils peuvent externaliser la connaissance, la codifier, ce qui peut permettre un traitement de l'information plus rapide, plus massif, mais ce qui peut enlever également une certaine maîtrise, une autonomie décisionnelle de l'agriculteur. Les outils de communication, d'information, donnent aussi accès à des sources de connaissances et peuvent également créer de la connaissance par l'échange. Enfin, le numérique impacte les possibilités organisationnelles : gestion de l'exploitation, de la main-d'œuvre, capacités d'adaptation, capacités de coordination, interactions entre acteurs –

que ce soit en simplifiant, améliorant, complexifiant, détériorant ou modifiant. Ces trois aspects, hard, soft et org, sont liés et s'entremêlent, s'influencent les uns les autres. Par exemple la possibilité accrue d'interactions entre professionnels agricoles peut permettre de se prêter des machines : les possibilités matérielles s'en trouvent modifiées. Le modèle économique et social de l'entreprise agricole peut donc être affecté par le développement technologique, par exemple la digitalisation peut amener une marchandisation accrue de services agricoles ou l'externalisation de certaines tâches (Wolf et Wood, 1997). Ainsi, les usages du numériques vont - en interaction avec un ensemble de facteurs économiques, institutionnels, sociaux, culturels, individuels - jouer sur les exploitations agricoles et leurs pratiques.

Mon approche des systèmes d'innovation sera approfondie via la mobilisation de plusieurs échelles d'analyse. L'étude de l'échelle micro-économique apparaît complémentaire à celle de l'échelle sectorielle, et semble essentielle pour capter les interactions entre digitalisation et écologisation. L'étude des usages du numérique permet de comprendre comment les technologies numériques sont utilisées, comment elles s'insèrent dans les modèles agricoles et comment elles interagissent avec les pratiques agricoles.

2.3 Interactions entre échelles

Les différentes échelles d'analyse apparaissent complémentaires pour analyser les processus d'innovation. Au-delà d'être complémentaires, échelles micro et méso sont interdépendantes et en interaction constante. En effet, le système d'innovation et les pratiques individuelles s'influencent mutuellement : « *l'évolution du secteur modifie l'exercice de l'activité agricole, [. . .] en retour, l'évolution des situations concrètes d'activité peut influencer la production des normes* » (Laurent, Maxime et al., 2003, p.146). Cette section précise les mécanismes par lesquels le système d'innovation peut impacter les pratiques individuelles, ceux par lesquels les pratiques individuelles peuvent en retour jouer sur le système d'innovation et le rôle particulier des acteurs intermédiaires dans ces interactions à double-sens.

2.3.1 *Comment le système d'innovation joue sur les pratiques individuelles*

Les changements de pratiques individuelles sont encastrés dans le système d'innovation. La mise en place d'innovations dans une exploitation agricole va dépendre d'une diversité de facteurs. En effet, une exploitation agricole est à la fois une unité micro-économique, avec des processus de production, des flux, des contraintes, des activités diverses et la composante d'un système socio-économique (Laurent, Maxime et al., 2003). Les décisions prises au sein de l'exploitation dépendent donc à la fois de facteurs et contraintes internes à l'exploitation, individuels, ou liés au système socio-économique dans lequel s'insère l'exploitation (du réseau égo-centré jusqu'au système global) mais aussi des représentations et croyances. Le changement technique dans l'exploitation agricole peut donc être vu comme un processus de négociation (Ansaloni et Fouilleux, 2006 ; Darré, Le Guen et Lémery, 1989) entre une diversité de facteurs que sont les facteurs technico-économiques, les connaissances, les objectifs personnels (par exemple les conditions de travail ou le confort), les caractéristiques individuelles, l'organisation du travail, les interactions

sociales, politiques publiques et déterminants politico-institutionnel. Ainsi les changements dans les exploitations agricoles vont dépendre de facteurs au-delà de l'exploitation : par exemple des connaissances disponibles dans le secteur, des technologies proposées, des régulations à l'œuvre, des politiques publiques et autres institutions. Mais les transformations à l'échelle du secteur ne parviennent pas à tous les agriculteurs de manière homogène. Par exemple, les petites exploitations agricoles, ou les « nouveaux entrants », c'est-à-dire les personnes non issues du monde agricole, sont moins insérées dans les réseaux de conseil (Mundler, Labarthe et Laurent, 2006 ; Sutherland, 2015). Les changements dans les exploitations agricoles vont donc dépendre des formes d'intégration des exploitations agricoles dans le système d'innovation (Klerkx et Leeuwis, 2009).

La littérature sur le numérique en agriculture évoque ces influences. Le développement de la régulation environnementale est maintenant reconnu comme un des facteurs important de la digitalisation des exploitations agricoles (Oui, 2021b ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020). Les études sur l'adoption soulignent le rôle de diverses institutions telles que les subventions, les dispositifs de crédits, et la législation (Konrad et al., 2019 ; Shang et al., 2021). Des études qualitatives montrent également l'influence des connaissances, des politiques publiques (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Fielke, Garrard et al., 2019) et de la dérégulation du conseil et du désengagement public (Jakku, Taylor, Fleming, Mason et Thorburn, 2016 ; Wolf et Wood, 1997) dans la digitalisation des exploitations agricoles. Les discours et représentations véhiculées par les organisations du secteur participent à créer des représentations qui peuvent influencer les usages du numérique (Lajoie-O'Malley et al., 2020). Les évolutions des institutions qui régulent le marché du travail et l'accès à la terre, peuvent jouer sur l'équipement numérique des exploitations (Rotz, Gravely et al., 2019).

Le type d'intégration des exploitations agricoles dans le secteur va alors jouer sur leur utilisation du numérique. Plusieurs études montrent l'importance du conseil agricole dans l'adoption de technologies numériques dans les exploitations (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Konrad et al., 2019). Le conseil va permettre de connaître les technologies mais également de combler le manque de compétences potentiel pour utiliser ces technologies (Newton, Nettle et Pryce, 2020). Eastwood, Chapman et Paine (2012) montrent également l'importance du réseau d'échange dans l'utilisation des technologies numériques. Le travail de Bechtet (2022) montre la nécessité d'investir pour que le conseil puisse aider les agriculteurs à évaluer les innovations agricoles.

L'étude des systèmes d'innovation peut ainsi participer à mieux comprendre le développement du numérique à l'échelle des exploitations.

2.3.2 *Comment les pratiques individuelles jouent sur le système d'innovation*

Les changements des pratiques individuelles dans les exploitations résultent en l'établissement de nouvelles routines, qui vont pouvoir modifier le système d'innovation (Laurent, Maxime et al., 2003). En effet les changements à l'échelle des exploitations peuvent impacter la demande, mais aussi les connaissances, la création d'innovation et les institutions. Les utilisateurs sont donc considérés comme acteurs à part entière dans le concept de Système Sectoriel d'Innovation. Premièrement, l'évolution des pratiques individuelles

va impacter la demande et donc jouer sur le comportement des organisations du secteur, qui peuvent orienter leur innovation pour répondre aux évolutions de la demande (Malerba, 2004). Notamment, l'évolution des besoins en connaissance peut faire émerger de nouveaux marchés de conseil (Laurent, Nguyen et al., 2021). Deuxièmement, l'exploitation agricole va être un lieu de construction de connaissances (expérimentation à la ferme, test de nouveaux outils, connaissances de l'écosystème local...), de circulation de connaissances et d'apprentissage mais aussi de sélection, d'agencement et d'entretien des connaissances (Cohendet et Llerena, 1999). Par interaction et effet d'agglomération, les connaissances issues des exploitations agricoles participent aux connaissances disponibles dans le secteur agricole dans son ensemble. De plus, les évolutions qui ont lieu dans les exploitations jouent sur la légitimité des connaissances et peuvent transformer les régulations sur le développement des connaissances par les acteurs du conseil agricole (Laurent, Nguyen et al., 2021). Troisièmement, au-delà de correspondre à une simple *demande*, les utilisateurs peuvent être sources d'innovation ou bien acteurs à différentes étapes du processus d'innovation (Darré, 1996). Ils peuvent mettre en évidence des problèmes, innover dans les pratiques agronomiques, créer ou modifier du matériel agricole, coopérer pour élaborer, tester et évaluer des innovations. Enfin, le changement des pratiques individuelles peut également s'institutionnaliser, les usages deviennent alors sociaux. Cela signifie que les modes d'utilisation d'une technique deviennent récurrents et s'intégrent dans un ensemble de pratiques culturelles qui peuvent se reproduire et résister à des formes de changement (Badillo et Pélissier, 2015). L'évolution des pratiques individuelles participent également à l'élaboration de nouvelles normes de légitimité et peut changer les rapports de force (Laurent, Nguyen et al., 2021). La littérature reconnaît que le changement institutionnel n'est pas que le résultat de changements exogènes ou d'institutions globales, mais est influencé aussi par les changements des pratiques individuelles (Micelotta, Lounsbury et Greenwood, 2017). Les pratiques individuelles jouent ainsi sur les institutions, qu'elles restent informelles ou se formalisent dans des normes, des règles ou des lois. Ainsi, les changements à l'échelle micro peuvent faire évoluer le système d'innovation.

Dans le domaine du numérique agricole, il n'existe que peu de littérature qui renseigne ce type de phénomène. Le travail de Laurent, Nguyen et al. (2021) montre que le développement du numérique participe à faire évoluer les normes de conseil agricole. Par exemple, les outils d'aide à la décision numériques dans les exploitations ajoutent de nouvelles formes de conseil par superposition, et peuvent impacter l'importance de certains types de conseil plutôt que d'autres. Fielke, Taylor et Jakku (2020) soulignent également des évolutions sur le conseil : le numérique amène des formes de spécialisation de l'expertise de décision. De plus, le développement des TIC a modifié le réseau informel de conseil mobilisé par les agriculteurs, puisqu'il a rendu la proximité géographique moins importante que ce qu'elle n'était (Laurent, Nguyen et al., 2021). Le travail de Fielke, Garrard et al. (2019) montre que la digitalisation, en offrant de nouvelles sources de données et nouveaux outils de mesure, influence les politiques environnementales. On peut aussi citer le travail de Rotz, Gravely et al. (2019) qui montre que les innovations numériques dans les fermes peuvent faire évoluer le marché du travail et les

relations salariales, mais également la structuration du marché, par exemple en favorisant la concentration des entreprises via le contrôle des données.

Ainsi, les pratiques individuelles vont impacter les institutions en place. Cela va pouvoir jouer sur la coexistence des paradigmes au sein du secteur agricole. L'étude des pratiques individuelles est donc essentielle aussi pour comprendre les changements institutionnels et les changements plus globaux. Pourtant, la littérature qui approfondit l'étude des pratiques individuelles liées au numérique reste limitée, et questionne peu les effets globaux liés à ces évolutions de pratiques.

2.3.3 *Le rôle des intermédiaires dans les systèmes d'innovation*

La littérature sur l'innovation met en avant le rôle des intermédiaires dans les dynamiques historiques de changement technique en agriculture (Klerkx et Leeuwis, 2009). Un intermédiaire d'innovation peut être défini comme une organisation ou une entité qui établit un lien entre deux ou plusieurs parties, à une étape du processus d'innovation (Howells, 2006). Ces intermédiaires vont ainsi participer à la diffusion des connaissances et des technologies, faciliter les collaborations et négociations entre acteurs, expliciter les besoins en innovation, mobiliser des ressources, capitaliser les expériences et savoirs ou encore coordonner les processus d'innovation (Faure et al., 2018). L'intermédiation concerne les connaissances, mais également les infrastructures, la réglementation ainsi que l'établissement des valeurs. Les intermédiaires en agriculture peuvent être de plusieurs natures. Ils peuvent être des consultants pour les exploitations agricoles ou pour des collectifs d'agriculteurs, des plateformes ou bases de données numériques, des organisations frontières entre la recherche et les utilisateurs, des organisations frontières entre la recherche, les acteurs politiques et la formation ou encore des organisations collectives (Klerkx et Leeuwis, 2009). Le rôle des intermédiaires est remis en avant avec les nouveaux enjeux d'écologisation de l'agriculture (Lucas et Gasselin, 2018 ; Steyaert et al., 2016) mais aussi de digitalisation (Newton, Nettle et Pryce, 2020).

Les intermédiaires sont donc des organisations ou acteurs qui vont faciliter les interactions entre les échelles micro et méso. Encastrées dans le secteur agricole, les intermédiaires ne peuvent pas être totalement impartiaux, ils sont des acteurs actifs dans l'orientation de l'innovation : c'est ce qui est appelé le paradoxe de l'impartialité (Klerkx et Leeuwis, 2009). En effet, les organisations intermédiaires établissent des relations informelles avec les acteurs du système d'innovation, formalisent des partenariats avec certains, et agissent aussi selon leurs propres intérêts et les ressources qu'elles mobilisent. De ce fait, des contradictions peuvent émerger entre les actions qu'elles mettent en œuvre dans ce contexte, et leur fonction idéale d'intermédiation neutre, notamment lorsque les organisations ont des financements publics et privés (Klerkx et Leeuwis, 2009). Ceci rend d'autant plus important le fait de s'intéresser à leur rôle dans le système d'innovation.

Les organisations collectives ont une place particulière dans le secteur agricole, comme intermédiaire, mais pas seulement. Historiquement, les organisations collectives telles que les organisations syndicales ou de conseil, ont joué un rôle central dans le processus de modernisation de l'agriculture, et plus récemment dans celui d'écologisation. En tant qu'intermédiaire, ces or-

ganisations font le lien entre dynamiques sectorielles et parcours individuels. Elles agissent comme prestataires de services intensifs en connaissances, comme organisation d'expérimentation, de diffusion et de transfert de technologies et de connaissance, comme interface marchande, elles jouent un rôle de coordination entre acteurs et de lobby auprès des politiques publiques (Howells, 2006 ; Labarthe, 2009).

Dans le contexte de digitalisation de l'agriculture, le rôle des intermédiaires est souligné, mais encore peu étudié. Comme évoqué précédemment, le conseil agricole, ou la présence de coopératives agricoles, joue sur la diffusion et l'adoption des technologies numériques (Barnes et al., 2019 ; Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Konrad et al., 2019). Dans certains cas, les conseillers jouent un rôle de déclencheur dans le processus d'adoption des innovations numériques par les agriculteurs (Bechtet, à paraître). Au-delà de ce rôle de « brokers », les intermédiaires participent à la construction de sens, de connaissances, et à partager les problèmes rencontrés (Ayre et al., 2019). Ils participent à des formes de médiation, essentielles au succès de l'innovation (Fielke, Taylor et Jakku, 2020). Notamment, ils peuvent apporter les compétences requises à certains agriculteurs pour pouvoir utiliser ces technologies, et ainsi aider à l'adaptation de ces technologies et à la création de valeur à la ferme (Newton, Nettle et Pryce, 2020). En retour, l'introduction de technologies numériques peut modifier les relations d'intermédiation, en y ajoutant un nouvel artefact technologique, ou en introduisant de nouveaux acteurs (Fielke, Taylor et Jakku, 2020). Le développement de services numériques par des organisations intermédiaires peut amener de nouvelles contraintes, mais aussi de nouvelles sources de revenu (Wolf et Nowak, 1995).

Pour conclure cette partie, il faut donc souligner que l'innovation est à la fois la résultante et un déterminant des paradigmes et modèles de développement. Produite par le système d'innovation, l'innovation va le modifier en retour et jouer sur les asymétries et rapports de pouvoir entre acteurs. « *Les impacts des innovations supposent alors d'en politiser la mise en œuvre au regard des risques qu'elles peuvent occasionner, des finalités qu'elles servent et du choix des acteurs cibles* » (Gasselin et al., 2021, p.94). Le système et les pratiques individuelles s'influencent mutuellement lors des processus d'innovation. Coupler ces deux échelles d'analyse permet d'étudier l'innovation dans ses diverses dimensions et dans sa complexité. Cette perspective va au-delà d'une vision des agriculteurs comme utilisateurs isolés et passifs face aux innovations sectorielles, qu'ils décideraient d'adopter ou non de manière indépendante. Elle permet d'intégrer les facteurs, les contraintes et les rapports de pouvoir du système sectoriel d'innovation, ainsi que les processus de changement institutionnel « par le bas » (Laurent, Nguyen et al., 2021).

3 Question de recherche et stratégie empirique

Cette section vise à synthétiser ce que je retire de la littérature pour mon travail de thèse et à expliquer comment je vais décliner ce cadre d'analyse dans une stratégie globale de recherche. Cette stratégie globale se décline en trois étapes, qui ont une autonomie méthodologique, se complètent, se sont enchaînées chronologiquement dans le travail de thèse, et constituent les trois chapitres de résultats.

3.1 Synthèse du cadre d'analyse et question de recherche

Mon analyse consiste en une approche intégrée afin de prendre en compte à la fois les composantes structurelles et dynamiques, sectorielles et individuelles, des transformations agricoles. En effet, les échelles méso et micro sont en interaction constante : les transformations du secteur impactent les évolutions des exploitations agricoles, qui peuvent en retour modifier les institutions sectorielles. J'étudie alors d'une part les changements sectoriels comme résultante et facteur d'évolution des changements dans les exploitations agricoles, et d'autre part les changements dans les exploitations agricoles à la fois comme résultante et comme facteur possible d'évolution des changements sectoriels. Pour cela, j'étudie ces changements comme intégrés dans un système d'innovation agricole hétérogène, dans lequel les acteurs agissent en fonction de leurs stratégies et perceptions, et interagissent, en particulier via les organisations dites intermédiaires des systèmes d'innovation.

Ce positionnement théorique m'amène à reformuler ma question de recherche initiale et à la décliner en sous-questions.

> **Comment est-ce que la digitalisation interagit avec le système d'innovation agricole français, ses paradigmes et in fine avec les trajectoires d'écologisation de l'agriculture ?**

Cette question peut se décliner en trois sous-questions.

1. Comment les acteurs du système d'innovation agricole français perçoivent et mettent en œuvre la digitalisation et cela dépend-il du paradigme d'écologisation dans lequel les acteurs se situent ?
2. Comment les exploitant(e)s agricoles perçoivent et utilisent les technologies numériques dans leurs exploitations et est-ce que leurs usages dépendent de leur modèle productif agricole et de leur modèle d'écologisation
3. Comment les coopératives agricoles, en tant qu'acteurs intermédiaires du système d'innovation, intègrent la digitalisation et comment interagit-elle avec l'écologisation ?

La sous-question 1 renvoie à la nécessité de comprendre les évolutions à l'échelle du système d'innovation, qui caractérise les acteurs et réseaux, les institutions, les organisations qui interagissent et impactent l'innovation, et donc les trajectoires de digitalisation et d'écologisation de l'agriculture. L'analyse des systèmes d'innovation reste généralement limitée à une caractérisation peu dynamique, à un moment donné. Cependant, les innovations qu'ils portent vont modifier leurs composantes ou même créer de nouvelles composantes ou en supprimer. Et inversement, le système et son histoire vont modeler le développement des innovations. En effet, la trajectoire historique va avoir une influence par l'aspect cumulatif des progrès et des connaissances, par les routines et toutes les institutions en place. L'analyse structurelle permettra l'identification des acteurs, des infrastructures associées, des mécanismes d'interactions entre eux. Cette approche permet également de prendre en compte les institutions qui façonnent les manières d'agir et d'interagir de

ces acteurs, les technologies ainsi que les connaissances (Malerba, 2004). Les dynamiques de transformations seront approchées via l'étude des processus d'innovation à l'échelle du secteur et de ses rapports de pouvoir. Afin de réaliser cette étude, je partirai des perceptions et représentations des acteurs mais aussi de leurs actions et projets sur la digitalisation. Les acteurs considérés ici représentent une diversité d'organisations du système d'innovation et de ses paradigmes.

Pour comprendre pleinement les trajectoires de digitalisation et d'écologisation, il faut également comment les entreprises innovent au cœur du secteur, là ou se jouent des transformations qui peuvent impacter le secteur en retour (sous-question 2). Ainsi, mon analyse de la digitalisation et de l'écologisation de l'agriculture se fera également sur celles et ceux qui mettent en œuvre les innovations, les agriculteurs et agricultrices. Ces derniers occupent une place particulière puisqu'ils sont à la fois partie prenante du système d'innovation, acteurs de son évolution, et encastrés et impactés par celui-ci : leurs pratiques vont être influencées par le système d'innovation. L'évolution des modèles productifs agricoles joue sur le secteur, notamment via l'action collective, par la production de normes, de connaissances, de régulations. En parallèle, l'évolution du secteur impacte les pratiques individuelles, au travers des institutions, des connaissances créées et diffusées, des interactions etc. De plus, c'est le changement à l'échelle des exploitations agricoles qui m'intéresse ici, qui peut être considéré comme l'objectif même de l'analyse du système d'innovation étudié.

Les coopératives agricoles, depuis leur apparition à la fin du XIXème siècle, participent aux transformations socio-économiques de l'agriculture. Mon analyse intégrera donc un focus sur les coopératives agricoles dans les processus d'interactions entre digitalisation et écologisation de l'agriculture (sous-question 3). Les coopératives, à la fois comme système d'interaction entre acteurs et comme organisation intermédiaire insérée dans un système d'innovation agricole, ont un rôle stratégique dans les processus d'innovation. Elles sont le lieu de décisions, de transfert et de création de connaissances, de formation et d'information, de réalisation d'activités économiques ainsi que d'expression et de défense des intérêts des coopérateurs. Via ces différentes fonctions, les coopératives participent aux interactions entre échelle micro et échelle méso et peuvent impacter les processus d'innovation.

Afin d'intégrer les différents choix théoriques présentés ici, ma démarche méthodologique se décline en trois étapes et approches complémentaires. La première étape se situe à l'échelle méso et questionne l'effet du numérique sur le système d'innovation agricole hétérogène. La seconde s'appuie sur une approche mixte à l'échelle micro-économique, afin de discuter la question du lien entre profils d'usage du numérique et modèles de production et d'écologisation. La troisième permet une analyse plus fine du rôle de certains intermédiaires : les coopératives agricoles. Cette approche, basée sur une représentation du système d'innovation qui intègre plusieurs échelles d'analyse et qui intègre la diversité des paradigmes d'écologisation, est représentée schématiquement Figure 2.1

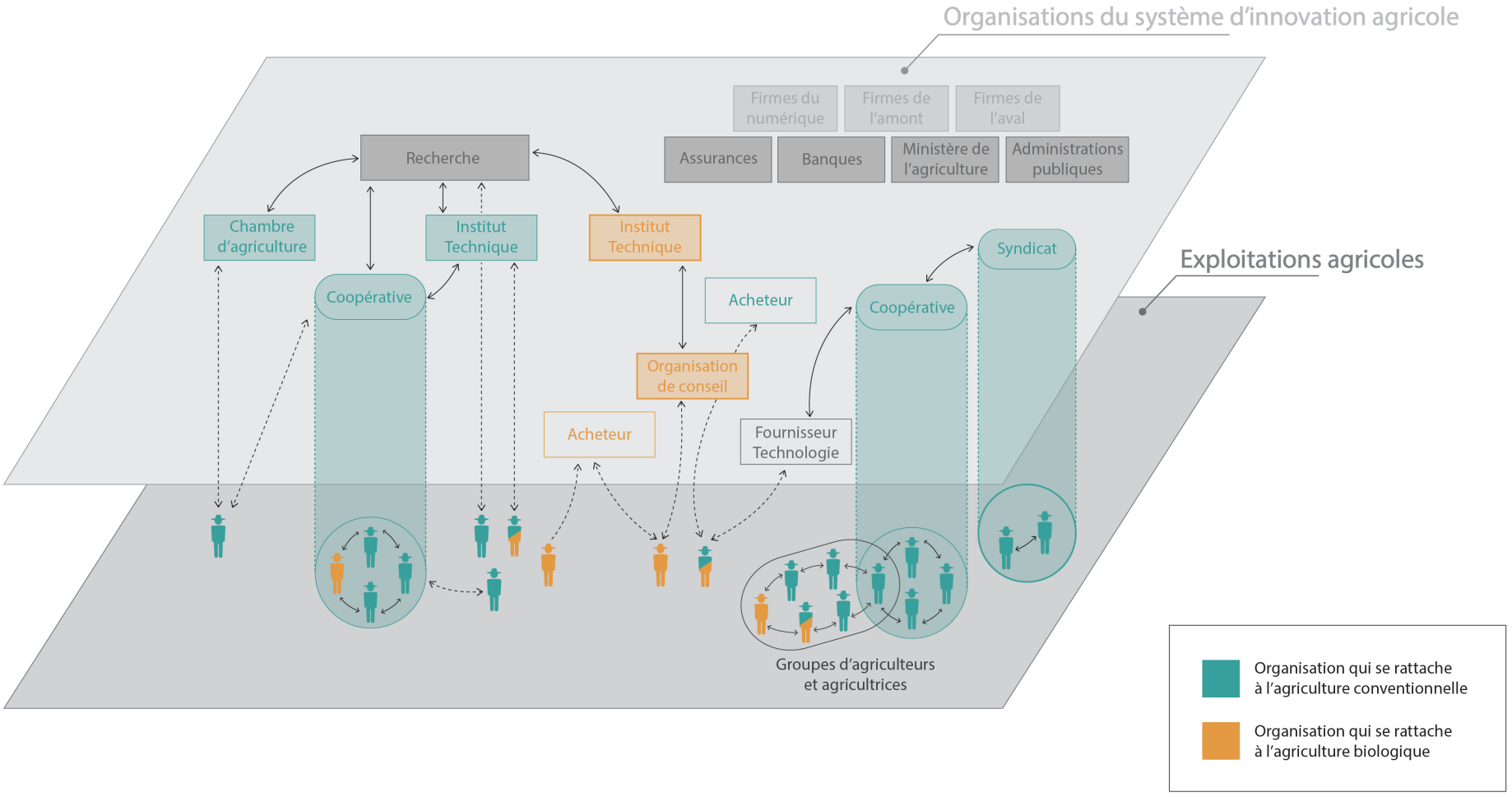


FIGURE 2.1 – Approche du système d'innovation agricole développée dans la thèse - Source : Auteur
La conception a été réalisée avec l'aide précieuse de Delphine Jacquot

3.2 Implications méthodologiques

3.2.1 *Analyser le système d'innovation agricole*

La première étape de mon travail de recherche questionne l'effet du numérique sur le système d'innovation agricole hétérogène (Chapitre 3). Le système d'innovation agricole peut être analysé à travers les représentations et actions de ses acteurs, qui peuvent jouer sur les pratiques individuelles. L'objectif de cette étape de travail sera de comprendre quelles sont les représentations et actions des acteurs du système d'innovation agricole français par rapport au processus de digitalisation, et si celles-ci varient ou non en fonction de différents paradigmes.

Afin de capter ces représentations et actions, je me base sur des entretiens semi-directifs avec les acteurs du secteur agricole. J'y intègre les acteurs de la recherche et de l'enseignement, du conseil, des filières (coopératives et négoces), des organisations professionnelles agricoles, des organisations publiques et des agriculteurs (Spielman et Birner, 2008). J'y ajoute des acteurs dédiés au développement du numérique dans le secteur agricole, qui caractérisent les nouveautés liées au numérique dans le système d'acteurs, qui impliquent parfois une redéfinition des frontières sectorielles (Malerba, 2004). Cela permet également de capter leurs représentations du secteur agricole, notamment sur les questions d'écologisation.

Les entretiens se sont déroulés à l'échelle du secteur agricole français. L'échelle nationale couplée à l'échelle sectorielle permet d'avoir une certaine unité institutionnelle et de pouvoir inclure dans les organisations enquêtées les têtes de réseaux des organisations professionnelles agricoles. En effet, de nombreuses organisations agricoles : syndicats, chambres d'agriculture, organisations de conseil, sont organisées avec des entités régionales, et/ou subrégionales, et des entités nationales, qui prennent en charge le rôle de représentation politique, de défense des intérêts de leurs organisations et de leur promotion dans le débat public. À l'échelle des acteurs plus proches du terrain : coopératives et agriculteurs, je suis restée à l'échelle de la région Occitanie, qui sera notre échelle d'analyse pour la l'étape suivante.

L'hétérogénéité du système d'innovation agricole est vaste. Pour capter cette hétérogénéité, je vais me concentrer sur le paradigme dominant ainsi qu'un paradigme alternatif : l'agriculture biologique. L'agriculture biologique est un des exemples de forme d'agriculture alternative qui s'est le plus institutionnalisée, notamment en France (Bellon et Penvern, 2014). En effet, l'agriculture biologique est étudiée, développée, représentée et promue dans une diversité d'organisations spécifiques : recherche et science, conseil, organisations professionnelles (syndicats, interprofessions), organisations de collecte, de stockage et de transformation et organisations pour la commercialisation et la distribution (Piriou, 2002). Cette distinction institutionnelle permet d'établir une frontière entre deux paradigmes, relativement simple à délimiter. L'agriculture biologique est vue comme une des formes d'agroécologie, ou comme un prototype de l'agroécologie, même si l'agroécologie irait au-delà de ce qu'est l'agriculture biologique (Van der Ploeg et al., 2019). D'autres formes d'agricultures alternatives s'institutionnalisent cependant, par exemple au travers de systèmes de certifications ou d'associations de producteurs.

Pour analyser les changements liés à la digitalisation, je vais privilégier l'approche structurelle des SSI. Celle-ci permet d'intégrer différentes échelles, d'étudier les dynamiques et offre la possibilité d'inclure l'hétérogénéité du système. Pour cela j'analyserai les données en opérationnalisant le cadre théorique proposé par Malerba (2004) et en y ajoutant le concept de paradigme. Le concept de Système Sectoriel d'Innovation (SSI) développé par (Malerba, 2004) propose d'étudier l'innovation d'un secteur au travers de cinq composantes centrales qui vont interagir et impacter l'innovation : les acteurs et les réseaux, les connaissances, les institutions, les technologies et la demande. Le concept de Système Sectoriel d'Innovation (SSI) développé par (Malerba, 2004) paraît approprié afin d'étudier les dynamiques d'un secteur agricole hétérogène. Des éléments structuraux vont être communs et d'autres spécifiques à des paradigmes. Cette hétérogénéité intra-sectorielle est importante dans la dynamique des systèmes sectoriels d'innovation (Malerba, 2002, p.262).

Ainsi, cette étape consistera en une analyse croisée entre composantes structurelles du système agricole d'innovation et entre catégories d'acteurs : acteurs du paradigme conventionnel, acteurs du paradigme de l'agriculture biologique ainsi que les acteurs sectoriels communs et les acteurs spécialisés dans la digitalisation de l'agriculture. Cette première étape de l'approche globale de la thèse peut être visualisée Figure 2.2.

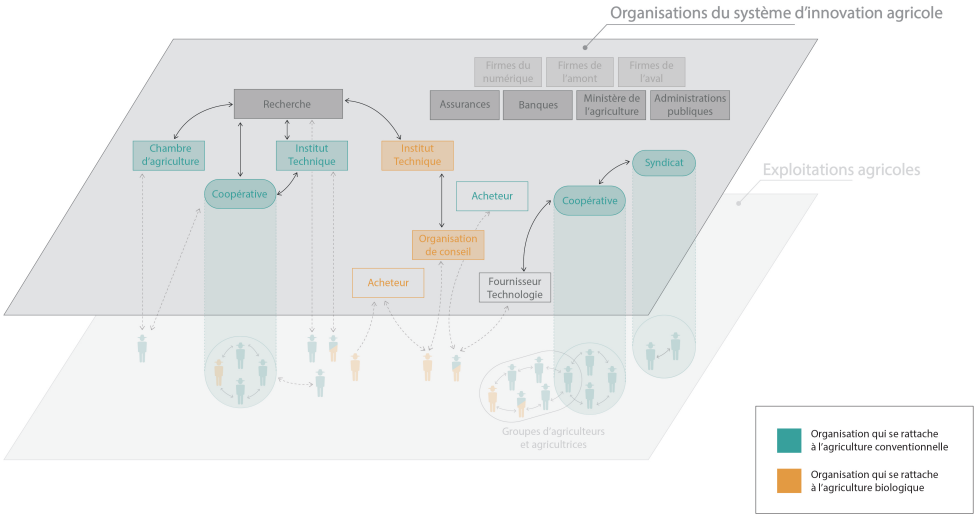


FIGURE 2.2 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 3 par rapport à l'approche globale de la thèse

3.2.2 *Une analyse par les usages dans les exploitations agricoles*

La seconde étape de ma recherche questionne les usages concrets du numérique à l'échelle des exploitations agricoles, et ses interactions avec l'écologisation de ces dernières (Chapitre 4). Cette deuxième étape de l'approche globale de la thèse peut être visualisée Figure 2.3.

Pour étudier ces trajectoires d'innovation, je vais me concentrer sur une filière spécifique : les grandes cultures. Premièrement, cette filière est emblématique de la modernisation agricole française, et fait l'objet de recherche et de développements technologiques nombreux, notamment dans le domaine du numérique (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). Cette filière est perçue comme économiquement stratégique en France, et dispose de capacités d'investissement élevées. Par ailleurs, cette filière soulève des enjeux environnementaux importants, en raison d'une consommation importante d'engrais de synthèse et de pesticides, entraînant des pollutions de l'eau, de l'air et des sols. Diverses propositions d'écologisation des pratiques en grandes cultures se sont développées et institutionnalisées, avec le développement important de l'agriculture biologique, mais également celui de techniques de conservation des sols et de biocontrôle ainsi que des dynamiques de diversification et d'allongement des rotations ou encore d'agroforesterie.

Afin d'avoir un échantillon qui recouvre une grande diversité de modèles d'exploitation et de pratiques, j'ai choisi la région Occitanie comme terrain d'étude. D'une part c'est une région où les grandes cultures ont une place importante puisqu'elles occupent plus d'un million d'hectares (Chambre d'agriculture Occitanie, 2021). D'autre part cette région est leader en France dans le développement numérique en agriculture, avec notamment l'implantation de l'institut de convergence DigitAg et la présence de nombreuses entreprises de ce domaine. De plus, c'est également une région très dynamique en terme d'écologisation, avec des projets et soutiens sur ce thème, et un développement important de l'agriculture biologique. L'Occitanie est la première région française en termes de Grandes cultures bio avec 24.5% de la production française (Interbio Occitanie, 2018).

Pour analyser les usages et pratiques dans leur complexité, j'ai choisi une méthode d'entretien face à face avec 98 agriculteurs et agricultrices. La grille d'entretien, conçue en interdisciplinarité, comprenait un ensemble de questions fermées afin de pouvoir caractériser les modèles d'exploitations de manière systémique. Ces questions fermées portaient sur la structure de la ferme, les caractéristiques individuelles de l'enquêté(e), les productions et pratiques, la commercialisation et le réseau socio-économique. Des « fiches technologies » permettaient d'approfondir les usages du numérique. Une discussion plus ouverte et plus générale sur les enjeux autour du numérique en agriculture était réalisée en fin d'entretien.

Ces données ont alimentées des analyses mixtes. Les questions fermées et la conception d'une base de données à partir de ces entretiens, a permis de réaliser des analyses quantitatives de ces données. Une première méthode d'analyse quantitative mobilisée est l'analyse par classification, ou clustering. Celle-ci consiste à regrouper les individus en catégories assez homogènes, les clusters, par rapport à un ensemble de variables spécifiées. En catégorisant ainsi les enquêtés, à partir de variables pour caractériser leurs usages du numériques, l'analyse par classification fait émerger des *profils d'usage du numérique*. Une deuxième analyse quantitative consiste en des tests statistiques pour comparer les moyennes ou pourcentages. Cette méthode permet de calculer les moyennes (pour les variables quantitatives), ou les pourcentages (pour les variables qualitatives), pour des variables dans différents groupes, et de tester s'il y a des différences significatives entre ces groupes. Cela permet par exemple de voir s'il y a des différences de taille d'exploitation

entre les individus des différents profils d'usage. Ces analyses quantitatives permettent de mettre en évidence des liens, des corrélations entre variables. Pour compléter cette analyse quantitative j'ai réalisé une analyse qualitative, à partit d'idéaux-types de chacun des profils. Celle-ci permet d'étudier les perceptions des enquêtés, de voir leurs représentations, de comprendre leurs mécanismes de décisions, d'appréhender leurs usages en détail, de comprendre des dynamiques temporelles sur leur exploitation et donc d'émettre des hypothèses explicatives des liens entre variables. Cela permet également de comprendre le rôle des différents acteurs du système d'innovation agricole à l'échelle des exploitations. Des entretiens d'agriculteurs ou agricultrices ayant un rôle de représentation dans le secteur agricole, ont par ailleurs été intégrés dans l'analyse de l'étape précédente. Les réponses aux questions plus ouvertes des entretiens ont fait l'objet d'analyses textuelles et qualitatives. Celles-ci ont été utilisées pour réaliser le compte-rendu des entretiens à l'échelle des exploitations agricoles, visible en Annexe 6, et pour des analyses complémentaires présentées en discussion du chapitre 4.

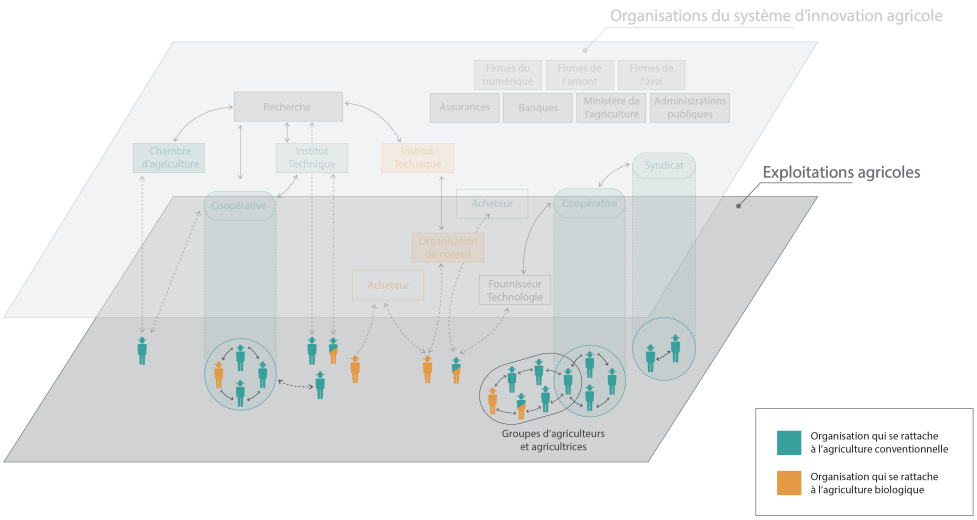


FIGURE 2.3 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 4 par rapport à l'approche globale de la thèse

3.2.3 *Le rôle spécifique des organisations collectives et intermédiaires*

Dans la littérature, les intermédiaires sont mentionnés comme ayant un rôle central dans les trajectoires d'innovation du secteur agricole (Klerkx et Leeuwis, 2009). Lors du terrain réalisé pour la première étape de cette thèse, les organisations collectives agricoles, et notamment les coopératives, sont apparues comme ayant un rôle important dans la digitalisation. Celles-ci sont au carrefour entre différents enjeux et exigences. Elles se situent donc à une place cruciale dans l'articulation des trajectoires d'innovation. L'objectif de cette étape est donc d'approfondir leur rôle dans ces trajectoires et leur articulation (Chapitre 5).

Pour étudier le rôle des organisations coopératives, j'ai choisi une filière où le rôle des coopératives s'est avéré particulièrement important lors des transformations agricoles des dernières décennies : la filière viticole en région Occitanie (Touzard, 2011). Au départ, une analyse similaire à celle réalisée en grandes cultures était envisagée. Deux éléments ont cependant mené à ce que l'analyse de la filière viticole se concentre plus spécifiquement sur les caves coopératives. Premièrement, les entretiens réalisés ont montré peu d'usages de technologies numériques à l'échelle individuelle. Les usages du numérique étaient souvent liés à la cave coopérative. Deuxièmement, le terrain avec les viticulteurs devait commencer en Avril 2020, après une fin de terrain avec les agriculteurs céréaliers envisagée à fin Mars 2020. Cela n'a pas pu être mis en œuvre avec la mise en place d'un confinement national lié à la crise du covid-19. Le terrain a donc été décalé en début d'été 2020 puis interrompu avec la période des vendanges. Une autre phase de terrain devait être réalisé en hiver 2020 mais également empêchée par un deuxième confinement.

Au final, des entretiens ont été réalisés auprès de directeurs ou responsables techniques de huit caves-coopératives, ainsi que de 43 viticulteurs et viticultrices adhérents à ces coopératives. Les coopératives d'Occitanie ont été choisies en fonction de différents niveaux d'engagement dans la transition écologique de la viticulture et différentes localisations entre plaine et coteaux, recouvrant des catégories de vin produit (IGP et AOP). Cette sélection a été effectuée grâce à des échanges avec une responsable viticole de Coop de France Occitanie. Les exploitations viticoles recouvraient également une diversité de structures et de pratiques.

Les données de ces entretiens ont été analysées de manière qualitative et thématique. Un répertoire des projets des coopératives concernant le numérique et l'écologisation a été réalisé. Ce répertoire rassemble les données issues des entretiens qui indiquent les informations suivantes sur les projets liés à la digitalisation et à l'écologisation : dates, description, partenaires, objectifs, problèmes rencontrés, avantages et dispositifs de fonctionnement. Ce travail descriptif a servi de première base pour l'analyse, ensuite complétée par l'analyse des entretiens avec les responsables des caves coopératives et avec les viticulteurs. Cette première étape de l'approche globale de la thèse peut être visualisée Figure 2.4.

3.2.4 *Intégrer les échelles d'analyse*

Un chapitre de discussion générale permet de synthétiser, d'intégrer et d'articuler les résultats issus des trois terrains, étapes et chapitres de la thèse, dans une analyse globale de la digitalisation et de l'écologisation de l'agriculture. Ce chapitre discute des résultats notamment à partir de la littérature thématique identifiée dans ces deux premiers chapitres de thèse. Après une synthèse des trajectoires observées, j'inscris les résultats dans une perspective plus historique avant de revenir à la question de recherche sur les interactions entre digitalisation et écologisation. Une deuxième partie du chapitre revient sur le cadre théorique et méthodologique développé dans le présent chapitre, afin de discuter ses apports et limites au regard de mes résultats.

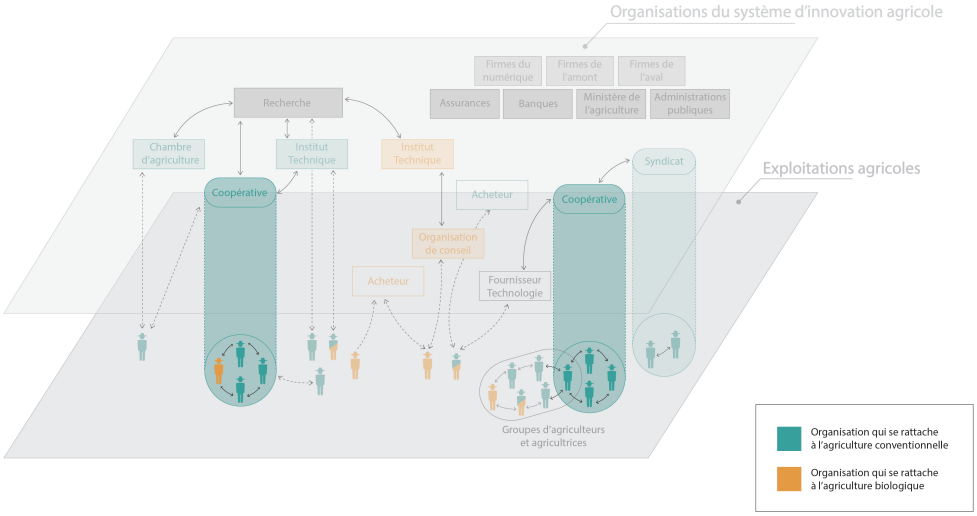


FIGURE 2.4 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 5 par rapport à l'approche globale de la thèse

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de présenter le cadre théorique choisi pour construire, analyser et discuter des interactions entre digitalisation et écologisation du secteur agricole français. Le cadre théorique est construit à partir d'une double revue de littérature : une portant sur les théories économiques de l'innovation et une portant sur le développement de l'écologisation et de la digitalisation de l'agriculture. Le croisement entre ces deux types de littérature scientifique permet de construire, à partir des connaissances théoriques et empiriques existantes, un cadre d'analyse adapté à mes questions de recherche. Les approches en termes de système d'innovation offrent une perspective générale sur le secteur agricole qui permet de questionner ses transformations globales et structurelles. La spécification de l'approche par l'économie politique et institutionnelle, en intégrant le concept de paradigme, offre un cadre pour analyser le système d'innovation comme hétérogène, lieu de rapports de force entre différents paradigmes. L'approfondissement de l'échelle micro, via l'étude des pratiques et usages, offre une perspective complémentaire qui permet de mettre en évidence les changements concrets, parfois non anticipés ou non perçus à d'autres échelles, et donnent à voir des processus de changements institutionnels par les changements de pratiques. Le focus sur des acteurs intermédiaires vient préciser des mécanismes d'interactions entre échelles. Ce cadre propose donc une analyse multi-échelle et systémique des transformations agricoles. Dans ce cadre, mon analyse partira des actions et représentations des acteurs, aux différentes échelles proposées, pour analyser ces transformations au-delà de représentations générales, dans leurs effets micro-économiques et politiques.

CHAPITRE 3

3

LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE DANS LE SYSTÈME D'INNOVATION AGRICOLE

Introduction du chapitre

Ce chapitre s'intéresse à l'articulation entre digitalisation et trajectoires d'écologisation à l'échelle du système d'innovation, c'est-à-dire à l'échelle des institutions, des organisations, des réseaux et acteurs qui interagissent et impactent l'innovation dans un espace donné (Touzard, Temple et al., 2014). Ce chapitre vise à comprendre comment des acteurs inscrits dans différents paradigmes agricoles, ici de l'agriculture biologique et conventionnelle, perçoivent et mettent en œuvre la digitalisation. Les institutions, connaissances et technologies à l'échelle du secteur, sont modifiées par et pour la digitalisation et peuvent influencer le développement du numérique et les usages qui en sont faits dans les exploitations agricoles. Or l'hétérogénéité du secteur agricole fait que ces changements n'impactent pas forcément de la même manière tous les acteurs et agriculteurs. Avant de s'intéresser aux différences en termes d'usages dans les exploitations agricoles, je me suis donc interessée aux différences en termes de perceptions des acteurs du système d'innovation agricole et de leur implication dans le processus de digitalisation. À partir d'entretiens semi-directifs auprès d'acteurs du conseil, de la recherche, de coopératives agricoles, d'instituts techniques, de syndicats et d'entreprises, j'analyse les divergences et convergences entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle dans le processus de digitalisation de l'agriculture, à la fois sur les objectifs, les enjeux et risques perçus et les stratégies mises en œuvre. J'analyse également comment cette hétérogénéité est perçue et prise en compte par les acteurs spécialisés dans le développement du numérique agricole.

Ce chapitre se base sur un article paru en Juillet 2021 dans la revue *Journal of Rural Studies*, écrit avec Jean-Marc Touzard et Pierre Labarthe. Cette introduction vise à apporter différents éléments complémentaires à l'article, notammant sur l'opérationnalisation du cadre d'analyse, ainsi qu'à resituer l'article dans la thèse. Suite à l'article, une section conclusive apporte une synthèse et une mise en perspective des résultats de celui-ci.

Contexte et historique de l'article

La thèse a débuté en Septembre 2018. En parallèle d'une revue de littérature, les premiers mois de thèse ont été l'occasion de participer à divers événements portant sur le numérique en agriculture. La liste de ces événements est présenté dans le Tableau 3.1.

Ces participations ont permis de faire un premier panorama des technologies et des acteurs impliqués dans cette thématique. J'ai pu ainsi appréhender les discours et les représentations des acteurs, à la fois au travers des conférences données, de l'observation de la mise en représentation effectuée

TABLE 3.1 – Événements sur le numérique en agriculture ayant fait l'objet d'une participation et observation durant la première phase de thèse

Événement	Date	Lieu	Description
Réunion de lancement du projet Occitanum	Octobre 2018	Pech-Rouge (34)	Réunion de présentation du projet, rencontre entre les acteurs
Les RDV de l'agriculture connectée (ESA Connect)	Novembre 2018	Paris	Conférences, tables-rondes, salon et pitchs de start-up
Séminaire DigitAg sur agriculture de précision	Novembre 2018	Montpellier	Conférences de scientifiques et d'entreprises du numérique agricole
Lancement du projet DIVA par Agri Sud Ouest Innovation	Novembre 2018	Toulouse	Conférences et rencontres entre acteurs économiques des secteurs agricole/alimentaire/forestier et du secteur du numérique
Séminaire DigitAg sur données numériques	Décembre 2018	Montpellier	Conférences de scientifiques et d'entreprises du numérique agricole
Forum International pour la Robotique Agricole (FIRA)	Décembre 2018	Toulouse	Conférences et salon d'entreprises de robotique agricole
Salon International du Machinisme Agricole (SIMA)	Février 2019	Paris	Salon professionnel : exposition des entreprises d'agroéquipement et de technologies agricoles, conférences
Journée des Doctorants DigitAg	Février 2019	Montpellier	Rencontres et travaux entre doctorant(e)s DigitAg
EIR-A, séminaire Agreenium	Avril 2019	Dijon	Conférences diverses dont 2 conférences sur le numérique en agriculture (Krijn Poppe et Xavier Reboud)
Séminaire AgroTIC sur la géolocalisation	Avril 2019	Montpellier	Conférences de scientifiques et d'entreprises du numérique agricole
Agora DigitAg	Mai 2019	Sète	Conférences d'entreprises et de doctorant(e)s
LFDays	Juin 2019	Paris	Salon des start-up du numérique agricole (La Ferme Digitale), conférences
Journée ANRT Agriculture Connectée	Juin 2019	Montpellier	Conférences de scientifiques et d'entreprises du numérique agricole
BtoField, les rencontres de l'innovation digitale pour une agriculture durable et compétitive	Juillet 2019	Montpellier	Conférences et convention d'affaires, organisé par Add'Occ et Agri Sud Ouest Innovation
InnovAgri	Septembre 2019	Ondes (31)	Salon professionnel agricole
Journées DigitAg	Septembre 2019	Montpellier	Conférences, présentations des doctorant(e)s SHS DigitAg, table-ronde
T-tAg	Juin-Octobre 2020	Visioconférence	Webinaires mensuels de présentation des doctorant(e)s DigitAg
AgroWebinaires ACTA Agriculture Numérique	Octobre-Décembre 2020	Visioconférence	Webinaires hebdomadaires de scientifiques, d'organisations professionnelles et d'entreprises
Digital Forum IFOAM	Avril 2020	Visioconférence	Conférences de scientifiques et d'organisations professionnelles sur le numérique en agriculture
DigiColloque	Avril 2020	Visioconférence	Présentation d'expérimentations menées dans les DigiFermes
Digicrop2020	Novembre 2020	Visioconférence	Conférences scientifiques sur le numérique en agriculture
Les RDV de l'agriculture connectée (ESA Connect)	Novembre 2020	Visioconférence	Conférences, tables-rondes, salon et pitchs de start-up

(affiches, slogans etc.), ainsi que par la réalisation de micro-entretiens lors de ces événements. Les échanges que j'ai pu avoir lors de ceux-ci ont également permis d'établir des contacts avec diverses organisations, qui ont ensuite pu aboutir à la réalisation d'entretiens approfondis.

Cette phase d'observation, en addition avec la littérature, m'a confortée dans l'idée de réaliser une première étude à l'échelle du système d'innovation agricole. D'une part, j'ai pu constater la diversité des acteurs impliqués, avec l'arrivée de nouveaux acteurs qui n'étaient auparavant pas présents dans le système d'innovation agricole français. D'autre part, cela a soulevé un certain nombre de questionnements, sur les dynamiques à l'œuvre dans le secteur, sur les connaissances, le rôle des institutions et des politiques publiques. En outre, la faible présence de la question des usages par les agriculteurs m'a aussi frappée, ce qui m'a incitée à creuser cet aspect, ce qui constituera le chapitre suivant de la thèse.

À partir du cadre d'analyse des systèmes d'innovation, j'ai établi une grille d'entretien adaptée pour réaliser des entretiens semi-directifs. Les aspects théoriques seront précisés dans la partie suivante. Les entretiens ont majoritairement été réalisés entre Mars et Novembre 2019. Dans l'objectif de présenter ce travail au colloque de l'IFSA (*International Farming System Association*), un résumé court a été rédigé et soumis en Septembre 2019. Suite à l'acceptation de ce résumé, j'ai réalisé l'analyse des entretiens et rédigé une communication pour la soumettre en Novembre 2019. Ce premier travail a bénéficié d'une relecture par deux reviewers anonymes, ce qui a permis de travailler et d'améliorer la communication entre Janvier et Février 2020. L'objectif était alors d'en faire un article suite aux retours du colloque de l'IFSA. En raison de la crise sanitaire, ce colloque n'a pas eu lieu. De plus, mon terrain auprès des agriculteurs, commencé en Décembre 2019 a été interrompu. J'ai alors repris ce travail à partir de Mars 2020 et l'ai approfondi avec des données supplémentaires issues d'entretiens avec des agriculteurs, comme cela avait été recommandé lors du processus de reviewing de la communication. J'ai également repris le codage des entretiens et approfondi l'analyse. Cette analyse a été discutée, avec mes directeurs de thèse, mais également avec les membres de mon comité de thèse qui a eu lieu en Juillet 2020. J'ai pu notamment avoir une *review* par Laurens Klerkx, membre de mon comité de thèse. Après plusieurs sessions de travail en collaboration avec Jean-Marc Touzard et Pierre Labarthe, l'article a été soumis en Novembre 2020 à la revue *Journal of Rural Studies*. Des retours très complets et constructifs ont été faits par deux reviewers anonymes et m'ont été envoyée en Mai 2021. Ces retours m'ont notamment amenée à restructurer les parties résultat et discussion, afin de faire ressortir de manière plus claire les résultats saillants et éléments de discussion centraux. La version finale de l'article, présentée dans ce chapitre, a été publiée en Juillet 2021.

Opérationnalisation du cadre d'analyse

Afin d'analyser la digitalisation à l'échelle sectorielle, nous avons mobilisé le cadre d'analyse de Malerba (2002). Ce cadre permet d'intégrer la diversité des acteurs du secteur, l'hétérogénéité et les dynamiques du secteur. Il apparaît donc pertinent pour travailler sur les interactions entre digitalisation et écologisation à l'échelle du secteur agricole. Cependant, l'opérationnalisation

de ce cadre est peu précise dans les travaux se référant au cadre de Malerba. J'ai donc contruit une stratégie empirique ad-hoc en lien avec ma question de recherche.

Implications pour la collecte des données

Terrain

Afin d'étudier le développement du numérique dans le système d'innovation agricole, j'ai choisi d'interroger les acteurs traditionnels du secteur agricole, ainsi qu'un certain nombre d'acteurs spécialisés sur le numérique agricole, caractéristiques des « frontières » dynamiques d'un système d'innovation (Malerba, 2002). J'ai ainsi constitué un échantillon raisonné (Etikan, Musa et Alkassim, 2016). Les organisations traditionnelles du SI agricole correspondent aux organisations de recherche, de formation, de conseil agricole, aux organisations professionnelles, aux organisations de collecte et d'approvisionnement (coopératives, négoces) (Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012 ; Spielman et Birner, 2008). Dans ces organisations, j'ai ciblé les individus identifiés comme étant référents sur la question du numérique ou ayant une vue d'ensemble de cette thématique dans leur organisation. Pour identifier les acteurs 'nouveaux', je me suis basée sur les observations décrites dans la partie précédente, sur la littérature grise et scientifique, et sur les données issues des entretiens réalisés (technique « boule de neige ») (Atkinson et Flint, 2001). J'ai ainsi identifié des entreprises du numérique qui étendent leurs activités au secteur agricole, des entreprises qui se créent et ciblent spécifiquement le numérique agricole, ou des organisations existantes qui créent de nouveaux projets dédiés au numérique agricole. Pour les agriculteurs intégrés dans ce travail, j'ai choisi des individus ayant un positionnement de représentation (élus syndicaux notamment). Lors des entretiens avec les agriculteurs, j'ai identifié plusieurs d'entre-eux ayant un rôle de formation et de diffusion de technologies numériques. Je les ai alors intégrés au groupe « numérique ». La liste complète des personnes interrogées est visible dans le Tableau 3.3 de l'article.

Entretiens

La réalisation des entretiens ne reposait pas sur le déroulement d'un questionnaire précis mais sur un entretien semi-directif, qui permet de s'adapter aux acteurs interrogés. De manière générale, les acteurs du système d'innovation étaient interrogés sur quatre domaines. Une première partie visait à avoir des informations sur l'organisation, son histoire, ses fonctions, et le rôle de la personne enquêtée dans cette organisation. Une deuxième partie se focalisait sur les activités de l'organisation sur le numérique agricole. Une troisième partie interrogeait leurs connaissances sur les usages du numérique dans les exploitations agricoles. Une quatrième partie visait à discuter de manière plus générale sur les perceptions des potentialités, des risques et des liens avec l'écologisation de l'agriculture.

Intégration de l'hétérogénéité

Le système d'innovation agricole français n'est pas homogène. Plusieurs voies d'écologisation sont proposées et mises en œuvre en agriculture. Schématiquement, l'agriculture serait divisée entre une agriculture conventionnelle et

une agriculture agroécologique, dont l'agriculture biologique. L'agriculture biologique est un des exemples de forme d'agriculture alternative qui s'est le plus institutionnalisé (Meyer et Jeanneaux, 2012 ; Piriou, 2002). Ce point est présenté en détail dans l'article et je n'y reviendrai pas ici.

Implications pour l'analyse

Analyse des entretiens

L'analyse a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, j'ai relu mes notes d'entretiens, ainsi que les retranscriptions d'entretiens, sans faire de codage (Dumez, 2016). Dans un second temps j'ai codé les retranscriptions à l'aide du logiciel MaxQDA©. Ce codage était en partie basé sur les catégories de Malerba (connaissances, technologies, acteurs, institutions), et en partie sur des sous-codes créés de manière inductive (Cf Tableau 3.4). Les résultats ont d'abord été décris par acteur et par catégorie. Suite au processus de reviewing de l'article, nous avons réfléchi à rajouter une analyse supplémentaire pour décrire les résultats de ce travail de manière plus pertinente. Avec les co-auteurs, nous avons alors analysé les résultats afin d'en faire ressortir les éléments clés, dans une démarche abductive, c'est-à-dire dans un processus itératif entre les modèles théoriques et les résultats empiriques (Lawson, 1989 ; Peirce, 1974). Le processus abductif apparaît en effet pertinent pour une perspective en économie institutionnelle (Labrousse, 2006). Nous avons alors distingué cinq éléments : la diversité des attentes envers le développement du numérique, en partie liée au paradigme conventionnel ou biologique ; la place centrale des connaissances et technologies ; la diversité des stratégies de digitalisation ; le positionnement des acteurs du numérique par rapport à l'hétérogénéité du Système d'Innovation ; les risques perçus par les acteurs des paradigmes. Nous avons ensuite souligné les divergences et convergences entre paradigmes dans la discussion.

Enjeux pour la thèse

Les deux premiers chapitres ont montré que le développement du numérique dans les exploitations agricoles n'est pas qu'une question individuelle mais implique des évolutions plus larges du secteur agricole. Questionner la compatibilité de la digitalisation de l'agriculture avec son écologisation implique donc d'analyser non seulement les pratiques et usages des agriculteurs, mais également les évolutions sectorielles (Cf Figure 3.1). Faire un premier travail à cette échelle permettait de faire un panorama de ce à quoi correspond la digitalisation de l'agriculture, tout en étudiant sa compatibilité avec l'écologisation du point de vue des acteurs du système d'innovation. Ce travail permet de répondre notamment aux questions suivantes : Quelles sont les représentations et actions des acteurs du SI agricole quant à la digitalisation ? Est-ce que celles-ci divergent selon que les acteurs travaillent plutôt dans le domaine de l'agriculture conventionnelle ou de l'agriculture biologique ? Est-ce que les acteurs du numérique travaillent avec les organisations du secteur agricole ? Si oui, avec lesquelles ? Comment est-ce que les acteurs du numérique agricole prennent en compte la diversité des formes d'écologisation de l'agriculture ?

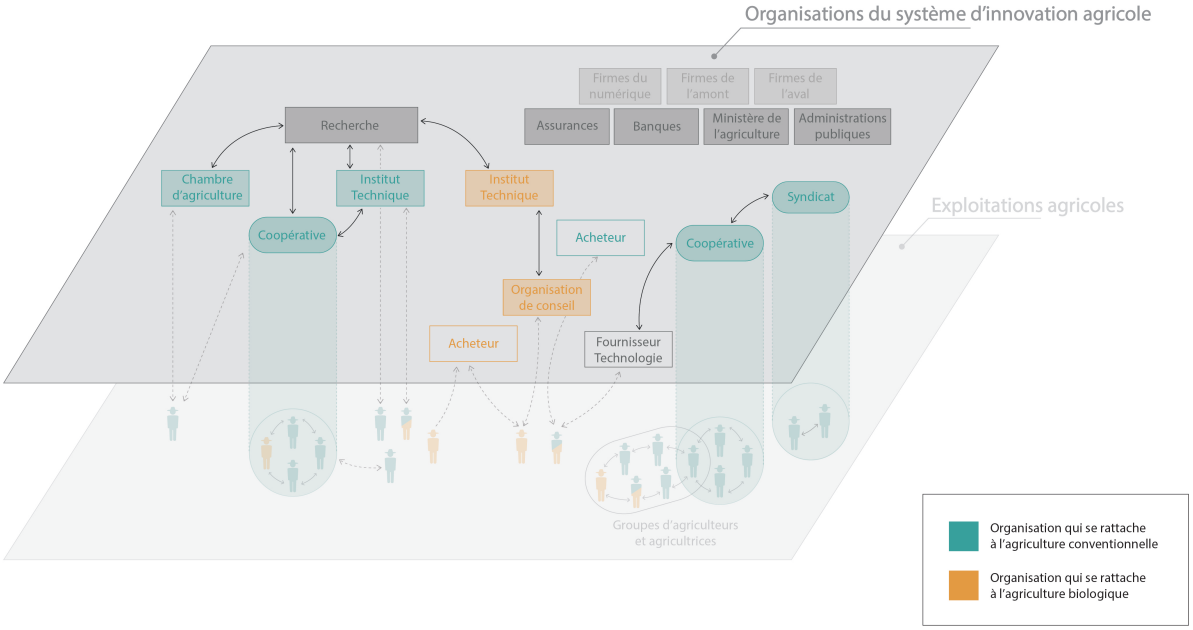


FIGURE 3.1 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 3 par rapport à l'approche globale de la thèse

Article

HOW DIGITALISATION INTERACTS WITH ECOLOGISATION? PERSPECTIVES FROM ACTORS OF THE FRENCH AGRICULTURAL INNOVATION SYSTEM

Schnebelin É., Labarthe P., Touzard J-M.

Article publié dans *Journal of Rural Studies*, en Août 2021, volume 86
DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.07.023

Abstract

Two major agricultural transformations are currently being promoted worldwide: digitalisation and ecologisation, that include different practices such as organic farming and sustainable intensification. In the literature and in societal debates, these two transformations are sometimes described as antagonistic and sometimes as convergent but are rarely studied together. Using an innovation system approach, this paper discusses how diverse ecologisation pathways grasp digitalisation in the French agricultural sector; and do not discriminate against organic farming. Based on interviews with key representatives of conventional agriculture, organic agriculture and organisations that promote or develop digital agriculture, we explore how these actors perceive and participate in digital development in agriculture. We show that although all the actors are interested and involved in digital development, behind this apparent convergence, organic and conventional actors perceive neither the same benefits nor the same risks and consequently do not implement the same innovation processes. We conclude that digitalisation has different meanings depending on the actors' paradigm, but that digital actors fail to perceive these differences. This difference in perception should be taken into account if digital development is to benefit all kinds of agriculture and not discriminate against organic farming and more widely, against agroecology.

Highlights

- Impacts and opportunities of digitalisation are shared across the agricultural sector
- Digitalisation is perceived differently by organic and conventional players
- Consequently, organisations participate differently in digitalisation innovation processes
- Differences in digitalisation processes are not perceived by digital organisations
- Promoting the diversity of digitalisation pathways is a challenge for policies

Keywords

Digitalisation; Agriculture; Digital Technology; Agricultural Innovation System; Organic Farming; Institutional Economics; Ecological transition

1 Introduction

This paper deals with the relations between two major transformations of agriculture: ecologisation and digitalisation. Ecologisation is defined as "the growing importance of environmental issues within agricultural policies and practices" (Lamine, 2011; Lucas, 2021). Digitalisation refers to the increasing use of digital technology throughout the economy and society in general (Lange, Pohl, and Santarius, 2020). Our aim was to understand how different ecologisation pathways grasp digitalisation. The originality of our approach is addressing the issue through the perception of digitalisation by French Agricultural Innovation System actors, that is, the set of diverse actors, networks, institutions and knowledge that enable innovation in the agricultural sector (Klerkx, Van Mierlo, and Leeuwis, 2012).

Ecologisation is promoted as a way to cope with the adverse effects of farming. These effects include loss of biodiversity, water, soil and air pollution, and climate change as well as food safety and occupational health issues. Schematically, two main ecologisation pathways coexist in agriculture, which their promotors each claim address these challenges (Dalgaard, Hutchings, and Porter, 2003; HLPE-FAO, 2019; Plumecocq, Debril, et al., 2018). The first corresponds to the sustainable intensification of the industrial model of agriculture. It consists in optimising inputs to increase efficiency and reduce negative externalities on the environment. The second promotes new practices that stimulate ecosystem services. It involves a more transformative and systemic reconfiguration of production systems mainly grouped under the general term "agroecology" (Duru, Therond, and Fares, 2015). Organic agriculture is usually recognised as belonging to the second ecologisation pathway, even if academic debate concerning their links or similarities continues (Abreu et al., 2012; Bellon and Penvern, 2014). Most research addresses the coexistence of ecologisation pathways through their ontological basis (Ollivier, Magda, et al., 2018), their values (Plumecocq, Debril, et al., 2018) and their actors' perceptions (Van Hulst et al., 2020). With the notable exception of institutional analyses of specific technological lock-in of certain crops or varieties, the role of agricultural innovation systems in the ecologisation of agriculture is much less widely studied (Magrini, Anton, et al., 2016; Vanloqueren and Baret, 2008).

Alongside the promotion of the ecologisation of agriculture, digitalisation is also accelerating in the agricultural sector, with a bundle of new and diverse technologies (Van Es and Woodard, 2017; Wolfert et al., 2017). Digital technology consists of the codification of information through numbers which facilitates its transfer and storage. In agriculture, digitalisation covers a wide range of technologies including digital platforms or precision agriculture or connected objects or digital social networks. Here we focus on digitalisation at farm level. Through the hard-, soft- and orgware components of technology (Dobrov, 1979), digitalisation can transform not only farming tools, but also practices, knowledge processes, and work organisation. Digitalisation has led to the development of new products and services for farmers, to new knowledge and uses, but also to new players and networks in agricultural R&D (Fielke, Taylor, and Jakku, 2020). On the other hand digitalisation can be framed by institutions, knowledge and actors from the digital sector as well as from the agricultural sector targeted here (Jakku, Taylor, Fleming,

Mason, Fielke, et al., 2019), where it can lead to a specific digital agricultural innovation system (Fielke, Garrard, et al., 2019).

Although the relations between digitalisation and ecologisation are the subject of academic debate (Clapp and Ruder, 2020; Rotz, Duncan, et al., 2019; Wolf and Buttel, 1996), little work has directly addressed this issue. Some papers highlight the potential of digital technologies to support ecologisation of agriculture, to provide new knowledge, improve management of complexity and diversity, foster exchanges and innovations and reduce the agroecological workload (Bellon-Maurel and Huyghe, 2017; Bonny, 2017). However, most social science papers are more critical of the compatibility between ecology and digital technology. Digitalisation could lead to simplification and homogenisation of production systems, loss of autonomy and of knowledge and instead promote a high-capital agriculture (Carolan, 2017a; Plumecocq, Debril, et al., 2018; Wolf and Buttel, 1996).

The development of digital technologies in agriculture is a process that involves a set of innovations with a strong systemic dimension (Klerkx, Jakku, and Labarthe, 2019). Digitalisation transforms not only exchanges of information and farmers' decisions, but also potentially the very knowledge and actors of agricultural innovation system (Fielke, Garrard, et al., 2019; Ingram and Maye, 2020). In other words, like other innovations, digitalisation is not neutral. It fosters system transformations and affects actors, knowledge, and power relations (Bronson, 2018). However, the systemic aspect of digitalisation and its directionality remains to be further explored.

The notion of Agricultural Innovation Systems (AIS) has been used at national scales to study the "*interactive development of technology, practices, markets and institutions*" in agriculture (Klerkx, Van Mierlo, and Leeuwis, 2012, p.465), leading to a growing literature (Touzard, Temple, et al., 2014). But AIS are not homogeneous. A "*plurality of socio-technical configurations, supported by different key actors pursuing different aims, and shaped by different rules, lock-in effects and path dependence, can potentially coexist in the current socioeconomic and political context*" (Dumont, Gasselin, and Baret, 2020, p.107). The diversity of agricultural models is embodied in a multiplicity of practices and is supported by a variety of institutions, organisations, and infrastructures. In other words, different paradigms built around ecologisation can coexist within AIS (Beus and Dunlap, 1990; Gaitán-Cremaschi et al., 2019). Paradigms are framed by actors and institutions, who structure power relationships (Sonnino and Marsden, 2006), thereby influencing the dynamics of agricultural systems and shaping their directionality (Pigford, Hickey, and Klerkx, 2018). Conversely, AIS can structure the coexistence of different forms of agriculture (Stassart and Jamar, 2009; Vanloqueren and Baret, 2009). The coexistence of paradigms may not only result in co-evolution and convergence, but also in differentiation, and divergence (Hervieu and Purseigle, 2015). As pointed out by Pigford, Hickey, and Klerkx (2018), AIS tend to promote the dominant paradigm which frames technological trajectories and locks in other possible trajectories. Directionality of digitalisation is beginning to be included in the literature (Bronson, 2019; Carbonell, 2016; Klerkx and Rose, 2020). However, few studies include actors representing alternative paradigms, such as organic agriculture. Structural analysis of AIS makes it possible to account for the heterogeneity within the AIS and understand how it affects trajectory and directionality of the AIS.

The research question we address in this paper is the following: How do actors of the AIS in relation with different paradigms of ecologisation perceive and respond to digitalisation, and what are the points of convergence and divergence? We address the question by referring to the French agricultural context.

The paper is organised as follows. First, we present our analytical framework. We link the issues of digitalisation and ecologisation of agriculture through a structural analysis of sectoral system of innovation using Malerba's categories (2004). We propose an operationalisation of this framework that is consistent with the existing literature on the digitalisation of agriculture. We continue with a description of material and methods we used for our qualitative analysis. Our method is based on 38 semi-structured interviews covering the diversity of players of the French AIS. The results provide an overview of the perception and enactment of digitalisation according to the actors' paradigm. A perception of impacts and opportunities that is shared in some aspects across actors but with different aims and risk perception. We end with a discussion of our findings and their implications.

2 Revisiting the digitalisation process through an institutional analysis of the agricultural innovation system

2.1 Analytical framework: relations between digitalisation and the four dimensions of innovation systems

The sectoral innovation systems (SSI) concept was developed to analyse sectoral specificities in innovation (Malerba, 2004). In parallel, scholars have developed the concept of Agricultural Innovation Systems (AIS) specifically for the farming sector (see Hayami, Ruttan, et al., 1971; Klerkx, Van Mierlo, and Leeuwis, 2012). In the framework of AIS studies, innovation is considered as a "*complex web of related individuals and organisations – notably private industry and collective action organisations – all of whom contribute something to the application of new or existing information and knowledge*". It "*includes the farmers as part of a complex network of heterogeneous actors engaged in innovation processes, along with the formal and informal institutions and policies environments that influence these processes*" (Spielman and Birner, 2008, p.1-2).

Actors' perceptions of innovation systems can be analysed from different perspectives (Klerkx, Van Mierlo, and Leeuwis, 2012), with the focus on processes (R. Nelson and K. Nelson, 2002), and interactions (Spielman, Davis, et al., 2011), functions (Hekkert, Suurs, et al., 2007) or on structures (Knierim, Boenning, et al., 2015). We use Marlerba's analytical framework of the structures of sectoral systems of innovation (Malerba, 2002), which was already applied to digitalisation of agriculture by Busse, Schwerdtner, et al. (2015). This structural analysis appears to be an appropriate way to grasp how the different paradigms connect to digitalisation within AIS. First, the framework is used to characterise change, i.e. the transformation and evolution of the variables of a sectoral system (Malerba, 2002, p.258). Second, the framework is useful "*when the transformation of sectors involves not just traditionally defined sectors [...], but the emergence of new clusters that span over several sectors*" (Malerba, 2002, p.259). Third, Malerba himself acknowledged

the importance of describing heterogeneity within the sectoral system of innovation (Malerba, 2002, p.262).

The different ways of conceiving agriculture can be considered as different paradigms, i.e. different outlooks, along with the definition of relevant problems and of the specific knowledge required to solve them, supplemented by production, marketing and distribution conditions (Djellal, 1995; Dosi, 1982). The nature of the paradigm defines its boundaries, along with a framework for possible technological trajectories (Dosi, 1982) that are supported by specific institutions and organisations for knowledge exchange and innovation. Our aim is to point out how players involved in different agricultural paradigms, perceive and make sense of digitalisation, how they themselves grasp the digital concept, i.e. how they understand, are aware of, expect and transform digitalisation (T. Dufva and M. Dufva, 2019).

We analyse how actors engage with digitalisation using Malerba's categories: actors and networks, technologies, knowledge, institutions and public policies. Table 1 below provides an overview of our analytical framework, the categories and the actors we analyse and links them with the questions we aim to answer together with literature on digitalisation. Some of these studies show that the different actors of AIS (researchers, advisors, industry, farmers) have different expectations and perceptions of the risks involved in digitalisation (Fielke, Garrard, et al., 2019; Jakku, Taylor, Fleming, Mason, Fielke, et al., 2019). Depending on how they understand and enact digitalisation, the process of digitalisation can affect their identity and their organisation (Rijswijk, Klerkx, and Turner, 2019). Moreover, the use of digital technologies can foster new learning processes and create new networks, new kinds of interactions (Eastwood, Chapman, and Paine, 2012; Eastwood, Klerkx, and Nettle, 2017). Digitalisation may exclude some actors, or reinforce the power of others, including upstream and downstream industries (Bronson and Knezevic, 2016; Ryan, 2020). Digitalisation can also encourage the entry of new players into a sector, in particular digital firms. Digital technologies are based on information. They influence information and knowledge processes (Higgins et al., 2017). Codification of information and knowledge makes them easy to diffuse and organise. But the codification process can change the nature of information, for instance by suppressing tacit knowledge or transforming it into explicit knowledge. In addition, organisations can benefit from knowledge creation and knowledge diffusion thanks to digital technologies. Interdependencies between humans and technologies influence workers' skills and capacities (Richardson and Bissell, 2019). Organisations can develop specific knowledge and skills to cope with digitalisation (Eastwood, Ayre, et al., 2019; Rijswijk, Klerkx, and Turner, 2019). Digitalisation also affects both formal institutions (legislation, especially on data, public policies, etc.) and informal institutions (new ways to act, to communicate etc.), and reciprocally, institutions affect digitalisation. Institutions play an essential role in technology trajectories in agriculture (Hayami, Ruttan, et al., 1971), and this role is underlined by many authors including Eastwood, Klerkx, and Nettle (2017), Jakku, Taylor, Fleming, Mason, and Thorburn (2016), Wolf and Buttel (1996), and Wolfert et al. (2017).

Table 3.2 – Analytical framework, inspired by Malerba (2002)

Category	Description	Questions	Literature informing the questions
Actors and Networks	Beliefs, assumptions, purpose	What do players expect from digitalisation?	Dufva and Dufva (2018)
	Organisations, learning processes	Which risks do they perceive?	Jakku et al. (2016)
	Collaboration - Competition	How does digitalisation affect interactions within or between organisations?	Eastwood (2017)
	Interactions	Does digitalisation result in collaboration or in competition between organisations? Do digital players include/exclude certain AIS organisations?	Rijswijk et al. (2019)
	Communication - Exchange		Bronson and Knezevic (2016)
Technologies	Development of technologies	How do agricultural organisations engage in the development of technologies?	Jakku and Thorburn (2010) Rijswick (2019) Bronson (2019)
		Are digital technologies on the market include the two paradigms? Do they account for their specificities? How are the technologies perceived? What curbs 'AgTech' development?	Carbonell (2016), Lioutas and Charatsari (2020)
	Constraints and interdependencies of technologies		
Knowledge	Knowledge and skills within the organisation	How do organisations develop knowledge and skills for digital innovation?	Rijswijk et al. (2019) Eastwood et al. (2019)
	Learning process	Has digital innovation led to new sources of knowledge?	Jakku and Thorburn (2010) Ingram and Maye (2020) Eastwood et al. (2012)
Institutions and public policies	Laws	What roles do formal institutions play in digitalisation?	Rijswijk et al. (2019)
	Regulation	How does digitalisation change formal institutions?	Wolf and Buttel (1996)
	Public policies	How do institutions that are concerned with digitalisation articulate paradigms and digitalisation?	Wolfert et al (2017) Eastwood et al. (2012) Jakku et al. (2016)
	Values	How do informal habits, routines, practices, affect digital innovation in the paradigms and inversely?	
	Routines		
	Practices		

2.2 Organic and conventional paradigms

To illustrate the diversity of paradigms within the French AIS, we focus on conventional and organic farming. "Conventional farming" refers to mainstream agriculture, i.e. "*capital-intensive, large-scale, highly mechanised with monocultures of crops and extensive use of artificial fertilizers, herbicides and pesticides, with intensive animal husbandry*" (Knorr and T. R. Watkins, 1984, in) (Beus and Dunlap, 1990). This type of agriculture emerged in France in the post-World War II period in response to the political aim to achieve food security and has been supported by scientific, political and technical actors (Brechet and Schieb-Bienfait, 2006). In France, the development of conventional farming led to an increase in farm size (from 19 Ha in 1970 to 63 Ha in 2016), a reduction in the total number of farms (from 1 588 000 in 1970 to 436 000 in 2016), an increase in yield (e.g. for wheat from 4T/Ha to 7T/Ha) and of the use of inputs (+ 60% in volume) [1] . Conventional farming does not only involve the farm level, but the whole value chain including input suppliers, the food industry and retailers (Darnhofer et al., 2010). It has been supported by professional unions, advisory organisations, research and education. Hence, the construction of the AIS is inherent of the development of conventional agriculture (Labarthe, 2010). In France, conventional farming is mainly based on family farms, a component of the wider agro-industrial food system and has been studied as a paradigm by institutional economics (see Touzard and Labarthe, 2016, for a review). It supplies around 80% of French food (Touzard and Fournier, 2014). Criticized in France for its adverse effects on the environment and health, French conventional farming has changed over the last twenty years, notably through the integration of environmental concerns, supported by public policies (Duru, Therond, and Fares, 2015). Some of the farmers linked to this paradigm have in fact opted for different forms of ecologisation, by optimising inputs or adopting more emblematic practices such as integrated pest management or no-till (Barbier and Goulet, 2013).

Organic farming emerged from social and ideological struggles against the development of productivist farming. The acknowledgment of organic farming within AIS, which was also framed by and for conventional agriculture (Brechet and Schieb-Bienfait, 2006), was one dimension of the confrontation between organic and conventional agriculture. The first organic group was created in 1959, followed by the creation of the French Association for Organic Agriculture in 1962. This movement led to the institutionalisation of organic farming with the creation of the Research Group on Organic Agriculture in 1978, official recognition of organic farming in 1980, followed by the creation of the organic farming technical institute (1982) and the organic label (1985) (Piriou, 2002). Thus, the development of organic farming is not only characterised by different practices and values at the level of individual farmers and consumers, but also by specific institutions and organisations which frame the balance of power in the AIS. Today, in France, organic farming is the most 'institutionalised' alternative paradigm. Its growth rate has been more than 15% for the last 15 years. Since 2018, organic farmers have been

1. The data come from the official census of the French Ministry of Agriculture available at: https://agreste.gouv.fr

supplying more than 6% of French food and account for more than 8% of the agricultural area (Agence Bio, 2020).

Conventional and organic farming constitute two different paradigms, framed by specific actors, institutions, knowledge and organisation systems. Farmers who refer to one of the two paradigms co-exist in all the French regions, although organic agriculture has greater weight in the South of France (Gasselin et al., 2021). However, the limit between paradigms is sometimes blurred. At farm level, the ecologisation of conventional farmers can lead to practices that are very similar to those used in organic farming, and organic farmers can use external inputs similarly to conventional farmers. At the other stages of the food systems, economic organisations such as supermarkets may also choose strategies that combine organic and conventional products under general policy of food greening, which is sometimes confusing for consumers (Le Velly and Dufeu, 2016).

2.3 Material and Methods

2.3.1 *Delimitation of innovation systems*

Delimitation of innovation systems

The AIS framework underlines the importance of including a diversity of stakeholders who shape innovation in the farming sector (A. Hall, Mytelka, and Oyeyinka, 2005). The AIS includes agricultural research and education organisations, advisory organisations, private sector actors in the value chain, agricultural cooperatives, public organisations, professional organisations and farmers (Klerkx, Van Mierlo, and Leeuwis, 2012; Spielman and Birner, 2008). We interviewed members of these different categories along with a number of digital players who characterise the dynamic frontier of this AIS (Fielke, Garrard, et al., 2019) (for a list of interviewees see Table 2). We interviewed different categories of AIS stakeholders representing each of two paradigms (conventional and organic agriculture). The categories include farmers, value-chain players, advisory and political organisations, research and education systems, and public structures.

Digitalisation brings new actors dedicated to digital farming. Those actors may originate i) from digital firms which extend their activities to the farming sector, ii) from new organisations specialised in "AgTech" or iii) from existing organisations which create new activities (notably research and education) dedicated to digital farming. We interviewed actors who can play a key role in digitalisation directionality in agriculture, by selecting or prioritising one model, thereby strengthening or weakening organic or conventional agriculture.

Another important aspect of an SSI is the technological profile of farm businesses, the demand of users of digital technologies, i.e. the farmers. We consequently conducted on-farm interviews which included the farmers' use of digital technologies, their opinion on, and their role in the AIS. For this purpose, we selected both farmers with a representative role in organic or conventional agriculture, and farmers who play an active role in promoting or expanding/demonstrating digital innovation in agriculture.

Table 3.3 – List of interviewees (n=38); Nat: National level; Reg: Regional level (Occitanie region)

Group		Organisation	Role
Transversal (n=5)	Tr-Minis	Ministry of Agriculture (Nat)	Digital manager
	Tr-PubAdm	Public administration (Nat)	Innovation manager
	Tr-PubRes	Public research institute (Nat)	Scientific programming manager
	T-Advis	Private advisory company (Nat)	Manager
	Tr-Journ	Journalist (Nat)	Author of a book on digital farming
Conventional (n=12)	Conv-ProfUn	Professional Union (Nat)	President
	Conv-AppRes	Private applied research institute (Nat)	Manager
	Conv-coopUn	Cooperative Union (Nat)	Innovation manager
	Conv-coop1	Cooperative company 1 (Reg)	Director
	Conv-coop2	Cooperative company 2 (Reg)	Innovation manager
	Conv-comp	Private company (Reg)	Innovation manager
	Conv-advis	Advisory Services (Nat)	Innovation manager
	Conv-coop3	Cooperative company 3 (Reg)	Technical manager
	Conv-farm1	Farm 1 (Reg)	Vice president of local professional union
	Conv-farm2	Farm 2 (Reg)	Vice president of local professional union
	Conv-farm3	Farm 3 (Reg)	Elected member of professional union and technical institute
	Conv-farm4	Farm 4 (Reg)	Member of a cooperative bureau, and president of an advisory company
Organic (n=10)	Org-advis1	Advisory Service (Nat)	Manager
	Org-advis2	Advisory Service 2 (Nat)	Innovation manager
	Org-ProfUn	Professional Union (Nat)	Deputy director
	Org-advis3	Collective organisation (advisory + applied research) (Nat)	Manager
	Org-ProfOrg	Professional organisation (Nat)	Director
	Org-PubRes	Public research institute (Nat)	Scientist
	Org-farm1	Farm 1 (Reg)	President of a professional union
	Org-farm2	Farm 2 (Reg)	Member of a national professional union bureau
	Org-farm3	Farm 3 (Reg)	Member of a collective organisation bureau
	Org-farm4	Farm 4 (Reg)	Elected member of a chamber of agriculture
Digital (n=11)	Dig-StUp	Start-Up (Nat)	CEO
	Dig-Res1	Research (Nat)	Project manager
	Dig-Res2	Research 2 (Nat)	Project manager
	Dig-Educ1	Education project (Nat)	Manager
	Dig-Educ2	Agro-digital observatory (Nat)	Manager
	Dig-firm1	AgTech firm 1 (Nat)	CEO
	Dig-firm2	AgTech firm 2 (Nat)	CEO
	Dig-assoc	Firms' association (Nat)	Director
	Dig-firmTIC	TIC firm (Nat)	Manager
	Dig-farm1	Farm 1 (Reg)	Sales and training agent in an AgTech firm
	Dig-farm2	Farm 2 (Reg)	Former sales and training agent in an AgTech firm

Sampling and interviews

We purposively selected interviews representing this diversity of actors (Etikan, Musa, and Alkassim, 2016). Most interviews were conducted at national level, but in the case of farms and cooperatives, the interviews were conducted at regional level to ensure the homogeneity of the context. We chose the French administrative region Occitanie, which is characterised by the coexistence of organic and conventional farming. The farmers we interviewed were crop farmers because this sector has been the scene of digital and ecological development for many years. All the interviews were conducted in French, recorded, transcribed, translated into English by the authors and checked by a professional.

The semi-structured interviews were divided into four parts. The first part covered general information about the organisation, its history, its functions. The second part concerned the digital activities of the organisation. The third part addressed the interviewee's knowledge about farmers' use of digital technologies. The fourth part was more forward looking as we wished to collect information concerning the potential and the risks associated with digital technologies, and the links between digital technologies and agroecology. In the interviews, we mainly asked open questions to allow the interviewers to express their opinions freely without attempting to guide their responses too much. We had a list of Malerba's categories and if certain items on the list did not come up, we then asked the appropriate questions. This approach made the interview more flexible while ensuring nothing was forgotten. The interview was more natural, and the interviewees had more opportunity to talk spontaneously. In the interviews with the farmers, we first collected data concerning their farm and the rest of the interview was focused on their use of digital technologies, farming practices, micro-AKIS and their opinion on digitalisation.

Data Analysis

All 38 interviews took place between March 2019 and March 2020. The interviews lasted between 50 minutes and two hours and were recorded and transcribed [2]. The transcriptions and documents provided by the interviewees were processed using MaxQDA© software. Data analysis was inspired by the methodology proposed by Ayache and Dumez (2011) and Miles and Huberman (1994). First, we read the transcriptions with no attempt at categorisation (Dumez, 2016). Next, we coded the transcriptions based on Malerba's broad categories as outlined above: actors and interactions, technologies, knowledge, and institutions. In each category, we created inductive sub-topics grouped in the eight sub-categories listed in Table 3. The first author coded all the interviews. Results of coding were discussed with the two co-authors, which led to a second coding process. Consistency was achieved by saturation. We condensed data using summary sheets of interviews and a matrix that cross-referenced themes of analysis and interviewees (Miles and Huberman, 1994). After listing the different results per actor and category in the first level of analysis, we added an inductive level of analysis to highlight the main transformations, gaps, and stakes involved.

2. For technical reasons, interviews with two farmers were not been recorded and could thus not be transcribed

3 Results

Our results show how the different categories of actors, i.e., those belonging to digital organisations and those who represent conventional and organic paradigms, perceive and enact digitalisation. Table 3 summarizes the actors' statements concerning the different categories used for the data analysis. The following sections present the results according to the five major stakes that emerged: the diversity of expectations, the key role of knowledge and technologies, the new interactions between actors generated by this cross-sectoral transformation, the specific role of digital actors in the AIS, and the crucial issue of perceived risks.

3.1 A diversity of expectations partly linked to organic vs conventional paradigms

The actors mentioned different expectations concerning digitalisation (cf. the *global vision* column in Table 3). Some impacts of digitalisation were expected by all. This includes optimising practices, accessing information and advice, gaining traceability, managing hazards and risks, or improving technical and economic management of the farms. Farmers also mentioned convenience and time saving. However, divergences can also be noted referring to communication with consumers, knowledge and value creation. Digitalisation is considered by conventional actors more as a way to create new economic opportunities while organic actors consider it more as a way to develop knowledge.

A set of opportunities identified by the interviewees concerned communication with consumers. Conventional actors mainly mentioned traceability as a way to improve communication and the marketing of agricultural products. One interviewee cited a statement heard at a meeting with a mass distribution actor: "*We're selling a product, it's true, but what we're missing is the story of the product.*" Using digital technologies, organisations can ensure increasingly precise traceability and hope to gain added value. Organic farmers see digital technologies more as a way to improve sales, to deepen interactions with consumers, or create direct marketing chains.

The development of environmental regulations and private standards (such as implementation of the HVE[3] certification in wine, or CRC[4] in cereals) promote digitalisation tools that are consistent with traceability.

> *"The regulatory obligation to register practices, manage organic fertilisation, register for the Common Agricultural Policy etc., are what actually drove farmers to digitalisation." (Conv-advis)*

Another set of opportunities concerned the emergence of a new market based on data and digital technology. Some conventional agricultural organisations consider engaging in digitalisation and being able to propose digital services to their farmers as an economic strategy. They invest in digital

3. HVE stands for 'High Environmental Value'. It is a public French certification launched in 2011 to label the global management of an environmentally friendly farm.("HVE," 2020)

4. CRC stands for 'Controlled Reasoned Farming'. It is a French label which testifies to the sustainable cultivation of cereals ("Filière CRC® - Culture Raisonnée Contrôlée," 2020)

Table 3.4 – Summary of actors' key perceptions and enactment of digitalisation

	Knowledge		**Technologies**		**Actors**		**Institutions**	
	Capabilities	Creation/Exchange	Development	Constraints	Global vision	Interactions	Formal	Informal
Organic	Developing farmers' skill is essential. Lack of projects about digital and organic farming	Digital technologies enable sharing of experience, capitalisation of knowledge, ecological processes and the analysis of practices. Complementary to real exchanges	Internal development of technologies to capitalise on and exchange information/knowledge	Many of the technologies not suitable for technical, organisational, or economic issues	Possibility to manage complexity and the global technical, economic, social system. Risk of dependence, of loss of know-how and power	Few partnerships with digital players due to differences in global vision of digitalisation; some informal exchanges	Environmental norms are associated with digitalisation. There is no public support for digital technologies aimed at collaboration	Some actors' conception of farming may be against digitalisation because they can be based on costs/investment reduction, autonomy...
Conventional	Important development of digital skills within human resources of organisations to enact digitalisation	Need to develop data management to create value for their organisations. Added value is expected from the use of traceability data	Adoption of new technologies, co-development and development. Economic strategy: sell services, meet the demand for precise traceability	Problem of data ownership – of misuse by farmers. For farmers: need to better account for field realities	Digitalisation: a way to renew the economic model of farming organisations, change the negative image of farming, increase efficiency. Risks concern data ownership	Collaboration with digital organisations to test, to promote or co-develop digital tools. Could lead to market foreclosure	Legislation drives digitalisation - Need to adapt formal institutions to protect farmers' ownership of data and to ensure interoperability	Farmers' routines and culture are seen as a major obstacle to digitalisation
Specialised in Digital	Farmers' lack of skills curb the use of digital technologies. Digital organisations have the necessary skills to process data	Data and digital technologies could help experiment, model and predict, undertake global analysis...	Technologies are needed to help farmers digitalise their farms. Technologies are adapted to all kinds of farming including organic farming	Issues of data access, data quality, compatibility, complexity, economic models	Digitalisation is still in its infancy. Digitalisation is necessary for economic and environmental stakes. Data is an immaterial capital	Need for agricultural organisations to reach farmers. Digitalisation requires data sharing. Issues of governance	Legislation and regulation is at the basis of digitalisation but can curb some digitalisation	Farmers routines are a major obstacle to digitalisation
Transversal	Early investment in digital through regulation – Need for digital training for farmers	Data generated by digital tools could create knowledge but there is need for cooperation, sharing and means	No development of technologies	Potential of digital tools for environmental sustainability? Issues of adaptation to a diversity of farming systems	Digitalisation is seen as a potential for policy implementation – Digitalisation has potential but can have unintended negative effects	Digitalisation generates more interactions between agricultural players. Need to keep a watch on digital evolution	Legislation is a major development factor but innovation is not in their hands but in the hands of economic actors	Agricultural sector needs to change its habits to enable radical innovation

technologies to ensure they will still be present on the advisory market tomorrow and to find 'new economic models' in the current legislative context (especially the obligation to separate sales and consultancy). For some of these organisations, the objective is clear: it is to sell services. Moreover, digital technologies are considered to be essential to cope with farming issues: environmental impacts, animal welfare, profitability, working conditions, attractiveness. Digital technology is seen as 'the future of agriculture' and as a precondition for their future survival. And also as a way to improve the image of the agricultural world in the eyes of society because it vehicles an image of a modern sector that embraces environmental issues.

> *"So, we've got a market [plant protection products] that's probably going to decline. And so we have to position ourselves with respect to other niches that can be vectors of profit." (Conv-comp)*

> *"It will help farmers show society [...] that they are doing better and better and that they are willing to profit from all the new technologies to improve their production." (Conv-ProfUn)*

In the same line of thought concerning digitalisation, agri-digital players underline the potential advantages of digital technology: gains in productivity, yield, time saving, security, forecasting, better management and communication, simplification, and efficiency. Data are seen as a value, as *"intangible capital" (Dig-firm2)*. For these actors, digitalisation is seen as essential for the future of farming to cope with agricultural stakes including environmental problems, climate change and new societal expectations. They mention a necessary and inevitable transformation that will revolutionise farming. The use of digital tools in farming practices is seen as intrinsically good and sustainable, as an objective per se. This development of digital technology *"is highly supported politically" (Dig-Res2)* and is strongly supported by funders and by research.

Members of organic organisations add expectations concerning learning and helping conceive the system, help in achieving systemic management of farms, creating links, exchanging knowledge, sharing experience and being able to make better observations.

3.2 Knowledge and technologies at the heart of digitalisation for conventional and organic organisations

Beyond these expectations and promises concerning digitalisation, interconnections between knowledge and technologies were underlined as major stakes by all actors. A need for knowledge is emerging with digitalisation, while digitalisation generates opportunities for the creation of new knowledge.

First, there was a consensus concerning the need for new knowledge and competencies to appropriate digitalisation. Conventional interviewees put more emphasis on knowledge at the organisational level, while organic interviewees put more emphasis on knowledge at the farm level (cf. the *capabilities* column in Table 3).

Conventional agricultural organisations emphasised the importance of developing new kinds of knowledge within their structure, such as agricultural

cooperatives. Jobs and dedicated teams are being created specifically for digitalisation, and awareness raising and training are provided. Internal positions in agricultural organisations are even sometimes filled by digital specialists.

> *"Farmers are more and more in need of experts (. . .). It forces us to train ourselves differently, or even to train people in certain aspects, etc." (Conv-coop2)*

Organic organisations put more emphasis on the need to develop farmers' skills. The interviewees agreed on the need for new knowledge to increase organic farmers' autonomy to be able to appropriate the basic tools in order to manage they farm.

> *"And mastering IT is essential for us[...] for people to be independent. We don't think it is complicated but [some say] it's too complicated for farmers and that it's not their job. We say it is possible to use the basic tools, and it creates critical thinking about their exploitation" (Org-advis2)*

Developing skills at other levels, such as research and development, was also mentioned by organic actors, for instance by the French Scientific Committee of Organic Farming. However, these organisations have limited means and have other priorities.

Actors agreed on the fact that the development and use of a new technology create data opportunities that could help build new information and knowledge. The second column in Table 3 summarizes the interviewees' statements, showing that organic actors put the emphasis on knowledge creation concerning agronomic practices whereas conventional actors put the emphasis on the creation of information through traceability.

According to organic actors, digital technologies in organic farming would be useful to obtain information on regulations, trade, and machinery, to analyse and understand ecological processes, to help farmers conceive or think about their own system, to analyse their practices, while letting farmers take their own specificities and choices into account. Capitalising and sharing knowledge appears to be a key advantage of digitalisation, and these actors mentioned a 'conversion-support tool' or a 'conception-support tools' to help farmers engage in organic farming. They mainly considered that digitalisation could provide new "knowledge input" for designing, assessing, and sharing their farming practices. This will nevertheless still require physical and concrete approaches. The digital exchange of knowledge is seen as a way to complement real exchanges but not to replace them.

Conventional actors put more emphasis on the creation of information through traceability technologies to "better meet value chain standards and build consumer confidence and knowledge on the products". Traceability is increasingly required by buyers (i.e. mass distributors, wholesalers, exporters) but is difficult to set up. Collective organisations hope to create knowledge as a result of data collection. However, they have difficulties in processing their data, due to a lack of resources.

Through digital technologies, digital companies hope to create new knowledge that will be a driving force for the development of their own business:

digitalisation could create new forms of experimentation, new tools to perform global analyses of farming practices and environmental criteria, to improve modelling and forecasting.

> *"We are convinced that, as time goes by, a lot of know-how will come out of the vineyard. We are at the very beginning of the process because the speed of accumulation is not very high, so it takes time." (Dig-firm1)*

3.3 Different strategies regarding partnerships with digital actors

Cross-sectoral dynamic was perceived as a major factor for the development of the AIS. Digitalisation brings new actors and partnerships to the farming sector. Both start-ups and firms from other sectors invest in agriculture, leading to new kinds of interactions between actors (cf. the *interactions* column in Table 3).

One might think this would limit the role of agricultural organisations, but this is not the case. Agricultural organisations, i.e. cooperatives, associations, chambers of agriculture, commercial firms and advisory providers play a central role, especially in data collection but also in data "redistribution" and in the diffusion of technologies. Many digital players say that they cannot access farmers directly. They need farmers-based intermediaries to collect the large amount and diversity of data needed to run data-based tools. Agricultural organisations are also needed to legitimise digital projects.

> *"The objective [for our company] is not to sell directly to farmers but to sell to cooperatives or traders or management centres – which will be distributors of our solutions to farmers, because they have a self-interest in collecting and federating data to carry out their work [...]" (Dig-firm2)*

However, we noted differences between paradigms. Digitalisation is seen by conventional actors as an exogenous change and by organic actors as a more endogenous one.

Conventional organisations work in partnership with digital actors at different levels: to test, co-develop, or promote digital tools. These interactions may be informal or formal. When agricultural organisations collaborate with a digital firm, they position themselves as distributors, but also as service providers. They also offer support and training to farmers. In other words, they wish to transform the technology into a service they can sell to farmers. Conventional organisations see digital partnership as strategic. Digital technology is said to be increasingly providing inputs combined with advice, with machinery, with knowledge, via data links. According to one interviewee, that could lead to market foreclosure and reinforces their opinion that digitalisation is an important business strategy for them.

Organic actors are less involved in collaborative projects with new digital actors. On one hand, digital actors do not often call upon and work with the actors of organisations specific to organic farming.

> *"But by working with everyone in a balanced way, we mostly work especially with those who are most prominent. And you don't work much with small producers, agroecology." (Dig-Res1)*

On the other hand, when organic organisations are called upon, it does not necessarily work out well because of the differences in the way they work and differences in values. Additionally, organic organisations have other priorities and do not have the financial means to invest more in digitalisation.

> *"Each time, the choice, the cultural difference is a little too strong. Even if we have a similar attitude to environmental issues, our methods are quite different." (Org-advis3)*

Although organic digitalisation is thus considered in a more endogenous way, organisations do have informal exchanges with digital players and follow the development of digital technologies. Developers of digital technologies consider developing partnerships between organisations to be strategic. They claim that digitalisation will require organisations to set up an ecosystem to develop information systems. Sharing data and ensuring compatibility is essential to achieve efficient digitalisation. Beyond the strategic partnerships, some digital actors regret the limited space accorded to farmers in digital projects.

3.4 Digital actors do not perceive heterogeneity within AIS

Digital actors bring a new perspective to the AIS. They underlined governance issues between the different categories of actors but did not perceive differences between organic and conventional farming.

Digital actors aim to support farming through the process of digitalisation. Digitalisation is seen as an objective per se for the agricultural sector, which will have to digitalise to increase its economic and environmental performances. In the opinion of digital actors, farmers are not aware of the advantage of digitalisation and are not particularly attracted by the idea of using digital technologies. The digital organisations we interviewed either develop technologies directly (start-ups, firms), are involved in projects to develop technologies (research, TIC firm) or test technologies (educational organisations). The TIC firms want to transfer their technologies from other sectors to the agricultural sector.

> *"We need to evangelize, to make people understand the ins and outs of what we do" (Dig-StUp)*

Digital organisations consider digital technologies suitable for both organic and conventional agriculture. They do not consider 'organic' as a differentiation criterion.

> *"In fact, at least since the beginning of the project, I don't have the impression that being organic or not influences the interest we have in it or not. I have the impression that it is transversal." (Dig-Educ1)*

Digital organisations see diverse impediments to their development in the agricultural sector. First, concerning access to data, they mention several obstacles including data quality, compatibility and technological interoperability, the cost of the technologies and the constraints caused by the specific farming context, especially long-term temporality, variability and complexity. Second,

concerning data management, they underline issues of governance. Third, concerning the acceptability of their technologies, they are aware that digital technologies lead to outsourcing part of the analysis, which may discourage farmers from adopting the technologies. Fourth, they emphasize the capacity of the farmers to pay and to use digital technology.

> *"To do big data and analysis, you need good quality data. And that's hard to get" (Dig-assoc)*

> *"And in all projects, whatever the technology, the weak link is governance." (Dig-Assoc)*

> *"When we use an interface like ours there is this idea that behind it they [farmers] outsource part of the data analysis and they have to accept that. And I think that's very difficult to accept." (Dig-firm1)*

3.5 The crucial issue of perceived risks by actors from the two paradigms

The actors emphasized the risks associated with the opportunities they mentioned. Organic actors underlined risks related to knowledge while conventional actors underlined the value of the data.

Both organic organisations and farmers listed many risks: in particular, that these technologies are too expensive, the risk of becoming dependent on them and of losing power, the "risk of standardization", the risk of data-hacking or data appropriation. Other risks mentioned included stress or the time required, loss of concrete interactions between people, loss of connection to the land and loss of local knowledge. Specific problems were mentioned when farmers do not have the necessary digital tools or the necessary skills to use them. Digitalisation sometimes -and in some ways- does not match the philosophy of some organic farmers or is simply too disconnected from their way of life. In particular, organic farming may reduce costs and investments whereas digital technologies may require investments.

Consistently, not all the digital technologies currently under development are considered to be suitable for organic farming, either for technical or socio-economic reasons: they may not suit the economic model, the farmers' ways of thinking and decision making, etc. As one farmer pointed out, he cannot use his farming software properly because it is not designed for a global reflection about the farm: it is designed for a technical itinerary, or plot management rather than for general management at scale of the whole farm. The farmer's reservations are reflected in a comment made by an advisor:

> *"But for us, in the way we advise, we consider that in organic farming, decisions must really take the whole farm into account (...). You either have to visit the farm or at least talk on the phone, and give really customized advice." (Org-advis1)*

Digital technologies are complex and complete control over them does not seem possible to those actors. This could change the balance of power between actors.

> *"Beyond loss of know-how, the balance of power in an agricultural system will be upset. In other words, we're going to be very dependent on the equipment or services provided in connection with these devices, on data processing, which is sometimes a little bit of a black box too." (Org-advis3)*

Conventional actors underlined the risks associated with data ownership, especially the risk that AgTech actors grab all the value created. They also mentioned the risk of farmers being excluded, because of the lack of infrastructure, skills or because of the cost. Farmers mentioned additional risks concerning the reliability of digital technologies and dependence on repairing it, and stressed the risk associated with the extra cost of the equipment when farmers already face economic problems.

Uncertainty concerning the value of the data, farmers' capacity to understand the potential of the technologies, and misuse of tools by farmers are cited as constraints by organisations involved in the development of digital technology. For their part, farmers testified to the need to better account for on-field realities in the design of digital technologies.

It is thus clear that diverse visions of digitalisation co-exist. Depending on the vision of digitalisation they vehicle, institutions that frame digitalisation could thus promote the directionality of this trajectory.

4 Discussion

In this paper, we address the question of how actors of AIS perceive and respond to digitalisation depending on their relation with the two different ecologisation paradigms. We highlight convergences and divergences.

4.1 Digitalisation beyond paradigms

Our research confirms that digitalisation not only changes technological possibilities but is involved in the reorganisation of the whole AIS in interrelationship with multiple factors, as suggested by previous studies (Busse, Schwerdtner, et al., 2015; Fielke, Garrard, et al., 2019; Rijswijk, Klerkx, and Turner, 2019). Interactions among actors, knowledge and institutions are jointly modified by digitalisation within the AIS, revealing characteristics that are shared across different ecologisation paradigms.

i) Whatever their paradigm, agricultural organisations play an important role in digitalisation, by acting as an intermediary between digital firms and farmers, but also by being proactive actors of digital development and in gathering, analysing and transferring information. Digitalisation does not reduce the role of intermediaries, but may even reinforce it, as shown by Busse, Schwerdtner, et al. (2015). This is a further illustration of the role of innovation brokers in agriculture (Klerkx and Leeuwis, 2009).

ii) All the actors we interviewed agreed on the potential of digitalisation to improve working conditions, to optimise practices and to manage risks. They also mentioned possible advantages for economic management of farms, traceability, information for consumers, information and training for farmers. Digitalisation of agriculture is thus a part of the regime of "technoscientific promises" (P.-B. Joly, 2010).

iii) On the other hand, all the interviewees mentioned different risks that could limit the adoption of digital technology or lead to the exclusion of farmers. Economic risks for farmers are described as being linked to the cost of the technologies, lack of skills or dependence on outsiders to repair the machinery. With the exception of 'digital farmers', farmers agreed on other risks concerning data hacking or data appropriation by value-chain actors. They also referred to the risk of the technologies not being appropriate for small farms. These results are consistent with the perception of digitalisation in the New Zealand AKIS, and of Big Data in the grain industry in Australia (Jakku, Taylor, Fleming, Mason, and Thorburn, 2016; Rijswijk, Klerkx, and Turner, 2019).

iv) The need to take control of the ongoing digitalisation was mentioned in both paradigms. Actors of the AIS want to be pro-active agents of digitalisation rather than passive receiver. They aim to reach the final stage of digi-grasping described by Fielke, Taylor, Jakku, et al. (2021). All those interviewed emphasised that digital technology should complement other kinds of innovation, not only technological innovation. This is recognized by Rotz, Duncan, et al. (2019) as a major challenge to digitalisation.

v) Digitalisation affects knowledge in a back-and-forth movement: it creates a need for new knowledge for digital technology, while simultaneously creating new knowledge. The creation and diffusion of knowledge is a major evolution, as shown by the literature review by Fielke, Taylor, and Jakku (2020). But making this knowledge effective turns out to be complicated, because of the diversity of needs and the context, and the management of complexity, among others. Several organisations claim they have data but cannot perform the analysis because they do not have the necessary means. Various transversal actors even think the value of the data is a myth: they believe agricultural actors hope to exploit the value of data, which will not happen.

vi) Regulations, standards, and specifications were considered by the interviewees as major drivers of the accelerated development of digital technologies. Digital technology may be both the cause and the consequence of changing regulations, allowing new kinds of regulations to be established and enabling new forms of control and traceability (Pearson et al., 2019).

On all those points, digitalisation appears to be more a source of convergence than of divergence between actors with respect to the conventional versus the organic paradigm. This convergence results from the perception of shared advantages (better information, work made easier, etc.) or problems (autonomy, learning and evaluating the technologies, etc.). Our results provide a basis for reflection or action on digitalisation that incorporates the diversity of farming systems.

Convergence may also be linked to the changing dichotomy between paradigms, as this distinction has become less clear (Sonnino and Marsden, 2006). The rapid development of organic farming is leading to hybridisation mechanisms between organic and conventional organisations. On the one hand 'conventional' organisations, especially cooperatives, are extending their activities to organic farming (Stassart and Jamar, 2009). On the other hand, organic farming organisations are incorporating innovations that allow them to scale up and "become conventional" (Le Velly and Dufeu, 2016). The

distinction between the two paradigms and their institutions is still applicable. However, in practice, there is more and more a form of continuum. Thus, some "conventionalised" organic actors may have a "conventional" vision of digitalisation.

4.2 A diversity of desired trajectories of digitalisation

Although this digital transformation is global, it is not perceived in the same way by all the actors and points of divergence exist between organic and conventional players concerning their 'digi-grasping' (T. Dufva and M. Dufva, 2019; Fielke, Taylor, Jakku, et al., 2021). Digitalisation could reinforce different directionalities of the AIS.

i) The main differences between organic and conventional players appears to be in the directionality each expects of digitalisation

- Digitalisation for traceability is expected by conventional actors whereas organic actors mention the risk of standardisation, fearing that the "industrialisation" of organic products may result from norms linked to or imposed by digital technologies aimed at promoting traceability (Klerkx, Jakku, and Labarthe, 2019; Ringsberg, 2014; Rotz, Gravely, et al., 2019).
- Digitalisation for endogenous knowledge is expected by organic actors, who hope digital technologies will help them conceive and analyse their production systems in a systemic way and will support experimentation. However, this is not how digital technologies are currently designed, they are more segmented than holistic, more top down than bottom up. This could lead to discrepancies between digital technologies and organic farming. Organic actors mention the potential risks of loss of power and know-how.
- Digitalisation for value creation is expected by both conventional and digital actors, who hope to improve the image of agriculture and its attractiveness, to improve profitability, and limit environmental impacts. Conventional farmers and their organisations mention risks concerning the ownership of data.

ii) Here we refer to different innovation processes and strategies of digitalisation. Organic players underline the importance of farmers' training and of the design specific technologies to support their own vision of digitalisation. Conventional players collaborate with digital players with the aim of rendering farmers' activities simpler and more efficient. Thus, players involved in digitalisation differ because organic organisations focus on internal development while conventional organisations develop technical and economical partnerships.

iii) However, in our interviews, the digital actors did not perceive these different views. They work with the most influential actors and see no difference between organic and conventional farming. They consider that most digital technologies are generic and consequently appropriate for both conventional and organic farmers. However, the knowledge basis differs between organic and conventional farming, and, to be successful, farmers' knowledge must be included in digital technologies (Rose, Morris, et al., 2018). Including actors in the conception of the tools is essential if the end users are to make sense of them (Bronson, 2019; Jakku and Thorburn,

2010). Not considering the diversity within the AIS, and consequently not incorporating this diversity in the conception of tools could lead to the exclusion of other forms of farming than conventional. It could reinforce the dominant paradigm. Conversely, a diversity of digitalisation could reinforce their differences.

Here, we consider organic farming as one example of the paradigm that embraces the agroecological transition in France, but not as the only one. Moreover, the diverse conception of digitalisation depends on a diversity of factors, not only on paradigms. It opens research opportunities to study digitalisation for new forms of alternative farming, or in other places, or depending on other factors.

4.3 Enriching the analysis of digitalisation of AIS by taking heterogeneity and power relations into account

Structural analysis based on Malerba's framework highlighted transformation of the AIS for and by digitalisation, while accounting for change in the nature of the AIS variables, cross-sectoral dynamics, and heterogeneity within the AIS. This analysis enabled us to highlight both convergence and divergence within the innovation system concerning the process of digitalisation in agriculture. Our conclusions are in line with the results of Fielke, Garrard, et al. (2019), who showed that digitalisation leads to power issues and pointed out that powerful incumbents may capture more gains through digitalisation. There may thus be power issues between the different stakeholders (AgTech actors vs farmers for instance). We add possible power issues between different types of farming systems and different visions of digitalisation. Research by Bronson (2019) and Bronson and Knezevic (2016) supports the fact that digital technologies are meaningful for conventional farming. Our research is complementary, as it provides insights into how digitalisation could be meaningful for organic farming according to the interviewees. It seems there is no opposition against digitalisation per se, rather against a certain definition of digitalisation that currently predominates. This conception of digitalisation tends to be prescriptive, requires high investment, concentrates power and standardises production. It is supported not only by private actors but also by some public actors (Lajoie-O'Malley et al., 2020).

This situation calls for the inclusion of the paradigm concept and of power relations in the innovation system. It invites scholars to analyse not only how digitalisation happens but also its possible directionality and how it is steered by the AIS. Transversal actors could work with digital actors to make the latter aware of this issue and to promote a diversity of research and development to avoid lock-in in digitalisation. This raises the question of the governance of digitalisation. Governance will influence which opportunities digitalisation responds to, which risks it will avoid, and consequently, which farming paradigm it will encourage. In line with the conclusion of Newton, Nettle, and Pryce (2020), it is essential to involve farmers and citizens in the decisions concerning the trajectory of digitalisation. We add the need to involve a diversity of farming systems in order to promote their diversity. In that respect, functional and relational analysis could complete this work in identifying blocking mechanisms and incentives (Bergek et al., 2008). Directionality of change also depends on the use of digitalisation by producers

and the constraints they face, which, in turn, calls for further research on farmers' concrete uses and practices of digital technology.

Conclusion

Our result prompt us to take a step back when referring to the concept of digitalisation. In practice, digitalisation is not a single phenomenon with a single definition: it does not mean the same thing to different actors. Digitalisation may have different objectives, occur in different ways, and in different forms. We argue that there are no different 'stages' of digitalisation. All actors are engaged in understanding, awareness and transformation of digitalisation. But we suggest that there are different 'processes' of digitalisation. However, we question whether the coexistence of different processes of digitalisation is possible or whether power imbalances will impose a standardised digitalisation, meaning only the future imagined now by dominant actors will become reality (Carolan, 2020). Our findings thus call for the inclusion of heterogeneity in AIS to enable the development of technologies that suit different trajectories of ecologisation. We provide conceptual and empirical elements to help actors become aware of this heterogeneity. Moreover, many interviewees emphasised that digital technologies are but one component of transformation, others being changes in advisory services, in farm structure, new relations with consumers, new policies supporting open innovation. Thus, the popularity of digitalisation should not mask other dimensions of AIS and there is a need to explore further their interrelations.

Conclusion du chapitre

Synthèse

Cette analyse à l'échelle du système d'innovation agricole français fait ressortir plusieurs résultats clés.

Premièrement, les attentes envers le développement du numérique dans le secteur agricole dépendent en partie des paradigmes conventionnels ou biologiques. Certaines sont communes, telles que l'amélioration des conditions de travail, l'optimisation des pratiques, la gestion des risques, la gestion économique, la formation ou encore le gain d'information et de communication avec les consommateurs. En revanche, les acteurs du paradigme conventionnel insistent sur les potentiels pour améliorer la traçabilité, la rentabilité, pour créer de nouvelles sources de valeur, améliorer l'image de l'agriculture et les impacts sur l'environnement. Les acteurs du paradigme biologique évoquent plutôt les potentiels pour créer des connaissances pour aider à concevoir et analyser les systèmes de production de manière systémique, pour faciliter l'expérimentation. Une originalité de mes résultats est d'ajouter les attentes spécifiques aux acteurs rattachés à l'agriculture biologique par rapport à celles mentionnées dans la littérature (Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019 ; Wolfert et al., 2017). Ces acteurs étaient jusque là peu intégrés dans les études sur le numérique en agriculture.

Deuxièmement, tous les acteurs insistent sur les besoins en connaissances liés au développement du numérique, plutôt internes aux organisations pour les acteurs qui se rattachent à l'agriculture conventionnelle, plutôt ciblés sur les besoins des agriculteurs pour celles qui se rattachent à l'agriculture biologique. Le premier aspect confirme la littérature, qui souligne les besoins en connaissances notamment pour les conseillers agricoles (Busse, Doernberg et al., 2014 ; Eastwood, Ayre et al., 2019 ; Fielke, Taylor, Jakku et al., 2021) ou acteurs des filières (Jakku, Taylor, Fleming, Mason et Thorburn, 2016). Le deuxième en revanche, évoque les besoins en connaissances des agriculteurs pour prendre du recul, gagner en autonomie et maîtriser les technologies. Dans la littérature, les manques de connaissances des agriculteurs sont mentionnées également, mais essentiellement dans une perspective de frein à l'adoption perçu par les entreprises du secteur (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019).

En outre, dans notre étude, les acteurs mentionnent les potentialités pour créer de nouvelles connaissances avec les technologies numériques. Les acteurs du paradigme biologique mentionnent leur intérêt pour la création et l'accès à de nouvelles connaissances agronomiques, écologiques, mécaniques mais aussi institutionnelles, via la complémentarité entre numérique et dispositifs d'échanges de connaissances non numériques. Les acteurs du paradigme conventionnel mettent plutôt l'accent sur la création de données de traçabilité. Dans la littérature, les attentes des consommateurs pour une traçabilité des produits sont en effet régulièrement mentionnées comme facteur de digitalisation (Knierim, Kernecker et al., 2019 ; Regan, 2019 ; Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019). Dans nos résultats, la réglementation ainsi que les chartes/labels etc., apparaissent comme des facteurs importants dans le développement du numérique, qui permet de nouvelles formes de contrôle et de traçabilité. Par ailleurs, les organisations agricoles mentionnent la difficulté

à créer concrètement des connaissances à partir des données collectées. Les acteurs du numérique évoquent quant à eux l'enjeu de création de données dans l'objectif d'améliorer les technologies numériques qu'ils proposent.

Troisièmement, les organisations intermédiaires (coopératives, conseil, développement) ressortent comme ayant un rôle central dans la digitalisation de l'agriculture. Celles-ci peuvent tester, co-développer, promouvoir, diffuser, vendre, former au numérique. Cela vient confirmer l'hypothèse que le numérique a plutôt tendance à renforcer le rôle des intermédiaires (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019), tout en modifiant certaines de leurs fonctions (Eastwood, Ayre et al., 2019). Ces modifications sont perçues différemment par les organisations agricoles de notre étude. Les organisations du paradigme conventionnel voient plus le développement de technologies numériques comme exogène, dans lequel elles se positionnent comme acteur intermédiaire. Les organisations du paradigme biologique voient plutôt des potentialités pour développer des outils en interne, afin qu'ils correspondent à leurs besoins spécifiques. L'implication dans la digitalisation de l'ensemble des organisations agricoles renvoie au concept de digi-grasping, qui décrit plusieurs niveaux d'appropriation du numérique (T. Dufva et M. Dufva, 2019 ; Fielke, Taylor, Jakku et al., 2021). Les organisations agricoles semblent ainsi tendre vers l'étape d'appropriation forte : celle de transformation, qui permet d'orienter le développement des technologies numériques. En revanche, nos résultats montrent un manque de connaissances de ces organisations sur les usages du numérique dans les exploitations agricoles, ce qui peut limiter cette appropriation.

Quatrièmement, les risques perçus quant au développement du numérique dans le secteur agricole sont différents selon les paradigmes des acteurs interrogés. Certains risques identifiés sont communs tels que les risques économiques liés au coût des technologies numériques, le manque de compétence et de capacité à réparer les outils numériques, la faible pertinence des technologies pour les petites exploitations, le piratage de données ou encore l'appropriation des données par les acteurs des chaînes de valeur. Les organisations du paradigme conventionnel insistent sur ce dernier point, qui menace leurs attentes quant aux retombées économiques de la digitalisation. L'ensemble de ces risques correspond là aussi aux résultats de la littérature (Jakku, Taylor, Fleming, Mason et Thorburn, 2016 ; Regan, 2019). Les organisations du paradigme biologique ajoutent des risques de standardisation accrue par la traçabilité, de renforcement du pouvoir des organisations de l'amont et de l'aval ou des risques de perte de savoir-faire. Elles ajoutent le risque d'avoir des technologies qui ne sont pas adaptées aux modèles de production biologique, que ce soit par rapport aux pratiques agricoles en elles-mêmes ou aux processus de raisonnement, de décision ou aux modèles économiques associés. Ces risques précisent ceux évoqués dans les travaux en économie politique sur la digitalisation de l'agriculture (Clapp et Ruder, 2020 ; Lioutas, Charatsari et De Rosa, 2021).

Enfin, les organisations du numérique cherchent à se situer en dehors du clivage agriculture biologique/conventionnelle et veulent s'adresser à tout le monde et proposer une écologisation générique. Elles ne perçoivent pas les implications que peuvent avoir les différences de paradigme d'écologisation sur les perceptions et stratégies de digitalisation. De ce fait, les organisations du numérique tendent à travailler avec les acteurs qui ont le plus de visibilité,

et donc conçoivent le numérique plutôt en adéquation avec les besoins et connaissances du modèle conventionnel. Elles ne sont pas conscientes de potentiels effets de sélection ou d'exclusion que cela pourrait avoir. L'absence de prise en compte de l'hétérogénéité des paradigmes d'écologisation par les acteurs du numérique pourrait ainsi renforcer les écarts et les rapports de pouvoir entre agriculture biologique et conventionnelle (Bronson et Knezevic, 2016 ; Knierim, Kernecker et al., 2019).

Ces résultats montrent que la digitalisation est mise en œuvre dans le secteur agricole dans son ensemble. Des enjeux forts sont mis en avant sur le développement de connaissances et compétences pour s'approprier et maîtriser cette digitalisation. Un autre enjeu ressort autour des dispositifs de régulation publics et privés, qui influencent le processus de digitalisation tout en étant modifiés par ce développement. Les acteurs perçoivent tous des potentialités et risques, et se montrent actifs dans le développement du numérique, afin d'essayer d'engager une trajectoire technologique qui corresponde à leurs attentes. Ces attentes sont diverses selon les acteurs, et notamment entre acteurs des paradigmes conventionnels et biologiques. Du fait de formes de dépendance au sentier et des rapports de pouvoir existants, cette hétérogénéité d'attentes est peu perçue et prise en compte, les acteurs du numérique travaillant plutôt dans le cadre de partenariats, représentations et objectifs liés à l'agriculture conventionnelle. La trajectoire technologique de digitalisation semble ainsi plutôt correspondre aux besoins de l'agriculture conventionnelle. Les acteurs du paradigme biologique, dans notre échantillon, n'étaient pas opposés au numérique en soi mais à une certaine définition dominante de la digitalisation, qu'ils caractérisaient comme plutôt prescriptive, basée sur des investissements élevés, qui concentre le pouvoir et standardise la production.

Perspectives

Dans le cadre de ce travail de thèse, cette analyse à l'échelle du système d'innovation soulève plusieurs questions et perspectives.

Le constat de ces différences entre paradigmes à l'échelle du système d'innovation soulève des interrogations à l'échelle des exploitations agricoles. Ces oppositions se retrouvent-elles à l'échelle individuelle ? Les usages des technologies numériques dans les exploitations sont-ils liés aux différents modèles agricoles et aux formes d'insertion des agriculteurs dans le système d'innovation ? Les usages du numérique s'associent-ils à certaines pratiques d'écologisation de l'agriculture plutôt qu'à d'autres ? Les hétérogénéités d'attentes et de risques perçus, mis en évidence dans ce travail, invitent à se demander s'il existe de telles hétérogénéités à l'échelle des agriculteurs. Nos résultats appellent à étudier l'échelle des exploitations agricoles afin de voir également si d'autres mécanismes de différenciation y sont à l'œuvre, révélateurs de transformations bottum-up des systèmes d'innovation (Laurent, Nguyen et al., 2021). Ces questions apparaissent d'autant plus cruciales que les résultats montrent le manque de connaissance des acteurs du secteur agricole à propos des usages du numérique par les agriculteurs. Elles seront addressées dans le Chapitre 4.

De plus, les résultats montrent la dépendance des organisations numériques aux intermédiaires. Le développement du numérique dans les exploitations agricoles peut être lié aux organisations intermédiaires avec lesquels ils sont en contact. Comprendre le rôle de ces intermédiaires auprès des exploitations agricoles est une clé de l'analyse de leur insertion dans le système d'innovation, et de l'évolution des rapports entre paradigmes. Les exploitations qui ne sont pas en lien avec ces intermédiaires, qui sont en dehors de ces réseaux, pourraient alors ne pas avoir accès à certaines technologies. Pour les organisations numériques, les agriculteurs concernés sont ceux qui sont insérés dans les réseaux. Cela peut amener à réfléchir à de potentiels problèmes d'exclusion de certains agriculteurs dans la digitalisation, d'autant plus que la littérature montre que tous les agriculteurs ne sont pas en lien avec des intermédiaires, notamment ceux qui ont des petites exploitations ou ceux qui ne sont pas issus du secteur agricole (Kinsella, 2018 ; Labarthe et Laurent, 2013 ; Sutherland, Madureira, Dirimanova et al., 2017).

Les résultats de ce chapitre questionnent également le positionnement de ces organisations intermédiaires dans leurs différentes fonctions. Elles peuvent avoir un rôle technologique, tel que l'intervention dans les processus d'innovation technologique, la participation à la conception ou à des tests et expérimentations, la diffusion des technologies, l'accompagnement ou la formation des agriculteurs. Elles ont aussi un rôle organisationnel qui peut être modifié, tel que leurs interactions avec les acteurs du secteur agricole, avec les entreprises du numérique agricole et avec les agriculteurs, mais aussi leur fonctionnement et leur organisation interne. La digitalisation peut également transformer leur rôle d'intermédiaire économique : choix de modèles économiques pour la digitalisation, investissements, externalisation, partenariats. Enfin, cela interroge leur positionnement politique, et notamment les dispositifs de gouvernance mis en place dans ce développement. Ces questionnements seront intégrées dans le Chapitre 5.

CHAPITRE 4

4

LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE DANS LES EXPLOITATIONS AGRICOLES

Introduction du chapitre

À l'échelle des organisations du système d'innovation agricole français, la digitalisation est perçue et mise en œuvre de façon hétérogène. Mais qu'en est-il au niveau des exploitations agricoles ? Ce chapitre vise à étudier les liens concrets entre digitalisation et écologisation à leur échelle. Adopter et mettre en œuvre de nouvelles technologies dans une exploitation agricole implique des changements dans les modes d'organisation, dans la gestion des connaissances et dans les pratiques agricoles. Pour saisir tous ces changements, il faut dépasser des approches qui se limitent à « l'adoption » en questionnant comment les innovations technologiques s'intègrent concrètement dans le système d'exploitation, entrainent des ajustements et apprentissages. Il est nécessaire d'analyser comment se construisent leurs usages. Or les usages du numérique dans les exploitations agricoles sont peu connus. L'enjeu majeur de ce chapitre est de saisir les usages du numérique à l'échelle d'exploitations agricoles et les logiques et conditions associées à ces usages. Ces usages sont développés par des individus (agriculteurs, agricultrices ou leur salariés), mais ils sont considérés comme insérés dans un système socio-économique et peuvent donc être influencés par les institutions, les chaînes de valeur, le réseau égocentré et la formation de ces acteurs, et dépendent du modèle de production de l'exploitation. Pour étudier ces usages et leurs conditions liées aux modèles de production et au système d'innovation, je me suis concentrée sur les agriculteurs et agricultrices spécialisés en grandes cultures en Occitanie, en réalisant 98 entretiens. Ce travail de terrain important est central dans l'analyse proposée dans cette thèse. Cet investissement empirique était pour moi fondamental. Il m'a permis d'aller au-delà d'une vision du numérique portée par les discours institutionnels, les communications commerciales ou plus globalement les promesses technoscientifiques. Il s'agit entre autres d'aller voir la digitalisation quotidienne, dans ses pratiques, ses apprentissages, ses bricolages (Higgins et al., 2017). Les enquêtes permettent d'étudier quelles technologies numériques sont utilisées, comment, pourquoi, et ce qu'elles changent dans les pratiques. Avec un échantillon suffisamment important d'exploitations, l'intégration de données sur les usages du numérique, sur les structures d'exploitation et sur les pratiques agricoles donne la possibilité d'analyser statistiquement les liens entre modèle d'exploitation agricole et utilisation de technologies numériques. Ce chapitre se base sur un article paru en avril 2022 dans la revue *Ecological Economics*.

Cette introduction vise à compléter l'article en précisant le processus de construction du questionnaire et de la base de données, notamment concernant les deux composantes clés de ces enquêtes : le numérique et l'écologisation. Une première partie revient sur la constitution de l'échantillon, la réalisation des entretiens et leur mise en données. Dans un deuxième temps, je précise comment j'ai abordé la question du numérique et de ses usages

dans les entretiens. Je décris et illustre certaines technologies numériques plus en détail, afin de bien comprendre à quoi correspondent chacune des technologies. Dans un troisième temps, je précise comment je caractérise l'écologisation à l'échelle des exploitations agricoles. Cela m'amène à présenter les hypothèses et les enjeux de ce chapitre pour la thèse. Une section conclusive vient ensuite amender l'article avec une synthèse de l'article enrichie par des exemples issus des entretiens, une discussion sur les facteurs de digitalisation de l'agriculture et la mise en lumière des apports et perspectives soulevés dans ce chapitre.

Contexte et historique de l'article

Le terrain sur lequel se base ce chapitre a été effectué entre Novembre 2019 et Mars 2020. Les données issues de ces entretiens ont été rentrées dans une base de données au fur et à mesure de leur collecte. Des premières analyses statistiques ont été faites au cours de la collecte de donnée afin de situer l'échantillon par rapport aux statistiques régionales et de pouvoir cibler les entretiens suivants. Après la collecte des données, des statistiques descriptives ont été réalisées avec le logiciel R. J'ai notamment étudié les usages des technologies une à une selon un ensemble divers de variables caractérisant les exploitations. Ces résultats ont été présentés lors de mon 2ème comité de thèse en Octobre 2020. Suite aux échanges lors de ce comité de thèse, j'ai décidé de construire des profils d'usage du numérique, notamment pour prendre en compte les imbrications entre technologies. J'ai alors réalisé les classifications. J'ai pu discuter de la méthode et cibler les fonctions R à utiliser grâce à des échanges avec Olivier Pauly, statisticien de l'UMR Agir. Suite à la construction des profils, j'ai choisi d'approfondir l'analyse en la complétant avec une analyse qualitative de certains entretiens. En parallèle, j'ai également fait des analyses par technologie.

Une première version de l'article a été soumise à la revue *Ecological Economics* en Juillet 2021. Des retours de reviewers en Octobre 2021 ont permis de retravailler la partie théorique, de réorganiser les parties résultats et discussion afin de clarifier le propos et de mieux spécifier le contexte français. Suite à quelques remarques complémentaires pour enrichir la discussion et la conclusion, l'article a été accepté en Mars 2022.

Des versions antérieures de cet article ont fait l'objet de présentations à différents colloques : au congrès annuel de l'Association Française d'Economie Politique en Juillet 2021, au congrès de l'*EAEPE* en Septembre 2021, aux JRSS organisées par la *SFER* en Décembre 2022 ainsi qu'au colloque thématique Agriculture Numérique de la *SFER* en Mars 2022. Une partie des données issues des entretiens et de l'analyse des profils d'usage a fait l'objet d'un rapport, destiné en premier lieu aux personnes enquêtées, mais pouvant également intéresser les organisations du secteur agricole. En effet, les données produites par ce travail de thèse ont une portée académique mais également opérationnelle. Ce rapport, dans sa version longue et sa version courte, est accessible en Annexe 6 et 7. Par ailleurs, le travail de terrain a été valorisé dans des sphères non académiques, notamment pour l'animation de travaux dirigés à Montpellier SupAgro. Ce travail a également été présenté au Salon International de l'Agriculture 2022, dans le cadre de la conférence INRAE sur l'agriculture numérique.

L'exploitation agricole : composante d'un système d'innovation

De la conceptualisation au questionnaire

L'exploitation agricole peut être conceptualisée comme un modèle productif agricole (cf Chapitre 2). Cette perspective permet de prendre en considération la production (type de produit, qualité, quantité, marchés visés, etc.), les ressources mobilisées qu'elles soient biotechniques (terre, intrants, équipements...) ou humaines (main-d'œuvre, formation, capital social des agriculteurs), mais aussi l'organisation des activités et du travail dans le temps et l'espace (combinaison d'opérations technique ou d'ateliers, assolements, approvisionnement, commercialisation...) et le projet de l'agriculteur ainsi que le contexte économique dans lequel les exploitations s'insèrent (marché, système d'innovation, réseaux) (Bourgeois et Sébillotte, 1978). Pour analyser les exploitations agricoles, j'ai donc établi un questionnaire reprenant ces diverses dimensions structurelles, individuelles, socio-économiques, agronomiques et techniques. Le questionnaire est disponible en Annexe 1. Il comprend notamment des questions sur l'exploitant(e) et son parcours, les productions, la commercialisation, le travail (interne et sous-traitance), les machines agricoles, les pratiques agricoles, l'économie de l'exploitation, son insertion dans le système d'innovation via le réseau égocentré de l'exploitant(e) (liens de conseil, appartenance à des groupes professionnels), ainsi que sur les usages et perceptions du numérique.

Le questionnaire pointe des demandes d'informations précises mais est aussi semi-directif. Il a servi de support pour réaliser les entretiens, s'assurer de renseigner toutes les informations et dimensions recherchées, tout en permettant une prise de notes plus large, incluant les avis, justifications et explications des enquêté(e)s. Il a pu être adapté, dans sa mise en œuvre, à chaque agriculteur, selon sa situation et la gestion des échanges lors de l'entretien.

Réalisation des entretiens

Pour constituer mon échantillon d'agriculteurs, je suis partie d'un premier ensemble identifié au sein de l'ancienne région Midi-Pyrénées, i) par l'intermédiaire de coopératives ou d'entreprises de négoce enquêtées au préalable, ii) par l'appui d'un technicien de la chambre régionale d'agriculture d'Occitanie, et iii) via des annuaires d'agriculture biologique des départements d'Occitanie. Afin de saisir des profils divers tant d'un point de vue agroécologique que numérique, j'ai demandé aux organisations agricoles de m'indiquer des agriculteurs correspondant aux catégories du Tableau 4.1.

Table 4.1 – Outil d'aide à l'identification de profils agroécologiques et numériques contrastés

	Conventionnel	Bio	Autre
Utilise services numériques	A	C	E
Peu d'utilisation du numérique	B	D	F

Cette classification, simple et a priori, servait de support de discussion avec les acteurs d'organisations agricoles et permettait de garantir un minimum de

diversité de profils lors de la constitution de l'échantillon. Cette classification utilisée en amont n'a pas été réutilisée par la suite. Pour constituer l'ensemble de mes enquêtes j'ai mobilisé la technique « boule de neige » afin d'élargir mon échantillon, et de l'éloigner des organisations agricoles initiales (Atkinson et Flint, 2001). Pour cela, j'ai systématiquement demandé aux agriculteurs et agricultrices rencontré(e)s le contact de collègues ayant un profil différent (en termes de structure d'exploitation, d'utilisation du numérique ou de pratiques agronomiques).

Le travail de terrain a été réalisé en plusieurs phases. J'avais ciblé la période hivernale où les agriculteurs spécialisés en grandes cultures ont souvent plus de temps disponible. J'ai réalisé une première phase seule entre Novembre et Décembre 2019. À partir de Janvier 2020, j'ai encadré une ingénieure d'étude, Clara Valiente, pour poursuivre les enquêtes avec moi. Nous avons réalisé ensemble deux semaines de terrain, conduisant 11 entretiens en binôme. Les enquêtes suivantes ont été réalisées en parallèle, tout en gardant des moments d'échanges hebdomadaires, afin de discuter de nos impressions, étonnements ou régularités constatés. Afin de respecter la réglementation sur les données personnelles, nous avons systématiquement demandé la signature d'un formulaire de consentement qui indiquait le type d'utilisation qui allait être fait des données récoltées.

Au final, 98 enquêtes ont été réalisées, entre le 6 novembre 2019 et le 13 mars 2020, dont la répartition géographique est visible Figure 4.1 Les données étaient prises en note dans la grille et systématiquement enregistrées (sauf en cas d'impossibilité). Les données étaient rentrées au fur et à mesure dans une base de données. La constitution de cette base de données s'est faite progressivement, en discutant entre nous, afin qu'elle soit bien adaptée aux informations récoltées, et remplie de manière homogène.

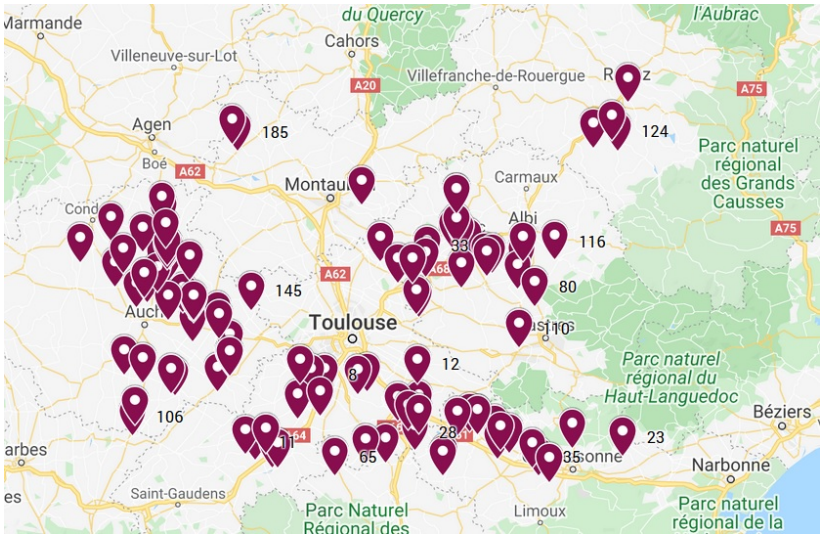


Figure 4.1 – Localisation géographique des exploitations agricoles enquêtées

Ces données ont fait l'objet d'une analyse mixte. Les méthodes mixtes sont des méthodes d'analyse de données qui intègrent des données quantitatives et qualitatives afin de combiner les forces des deux approches : comprendre de manière large des phénomènes globaux pour les approches quantitatives,

comprendre ces phénomènes en profondeur, dans leur contexte, et leur expérience par les acteurs pour les approches qualitatives (D. Watkins et Gioia, 2015). Dans un premier temps, j'ai réalisé des statistiques descriptives, à l'aide du logiciel R, à partir de la base de données, ce qui a permis de situer l'échantillon par rapport aux statistiques agricoles régionales, mais aussi d'avoir un premier panorama sur les usages du numérique dans les exploitations enquêtées, ainsi que sur les pratiques, les structures d'exploitations, etc.

Dans un deuxième temps, les données sur les usages du numérique ont été utilisées pour faire une classification ascendante hiérarchique, permettant de regrouper les individus en catégories ayant des profils d'usages du numérique relativement proches. Plusieurs classifications ont été réalisées, en intégrant toutes les technologies, ou seulement certaines, ou en les catégorisant etc. J'ai finalement retenu deux classifications, pour les deux catégories de technologies détaillées dans l'article : les Technologies Numériques de Production et les Technologies Numériques d'Information et de Communication. Dans chacune des classifications, j'ai obtenu trois clusters, c'est-à-dire trois profils d'usage. Ces classifications ont été réalisées grâce à la fonction « *Hierarchical Clustering on Principle Components* » (HCPC) de R (Lê, Josse et Husson, 2008). Cette fonction combine l'analyse en composantes multiples, la classification ascendante hiérarchique et le partitionnement en k-moyennes. Elle permet d'obtenir un nombre de clusters qui minimise les différences intra-cluster et maximise les différences inter-clusters. Ensuite, une série de test a été réalisée afin d'étudier la composition de chacun des profils obtenus. La fonction HCPC indique les individus spécifiques à chacun des clusters, c'est-à-dire les individus les plus éloignés des autres clusters, qu'on peut qualifier d'idéaux-types. 12 entretiens avec ces individus ont été retranscrits et analysés qualitativement. J'ai extrait des verbatims de ces retranscriptions afin d'illustrer les propos de l'article. Des entretiens d'agriculteurs ayant un rôle de représentation dans le secteur agricole, ont également été retranscrits afin de les intégrer dans le chapitre précèdent. Au total, 18 des entretiens avec les agriculteurs ont été retranscrits.

Les technologies numériques dans les exploitations agricoles

Cette section précise comment les usages des technologies numériques ont été intégrés dans le questionnaire. Je décris également les technologies les plus caractéristiques.

La littérature grise, la première phase de terrain, ainsi que les entretiens exploratoires avec des agriculteurs m'ont permis d'identifier les technologies numériques potentiellement utilisées dans les exploitations. Lors des entretiens, cette liste n'était pas présentée dans un premier temps : nous demandions quelles technologies numériques étaient utilisées sur l'exploitation de manière ouverte. Cela permettait d'une part de ne pas évacuer des technologies que nous n'aurions pas mises dans la liste, et d'autre part d'adapter les questions en prenant en compte les interdépendances entre technologies. Je présente brièvement les technologies utilisées de manière plus fréquente, catégorisées selon le type de fonctions qu'elles remplissent. Cette catégorisation est issue de l'état de l'art réalisé dans le chapitre 1. Dans ce chapitre 4, je centre mon analyse sur deux catégories de technologies : celles pour l'information et la communication et celles pour la production.

Cette catégorisation est en cohérence avec la littérature, qui étudie souvent soit l'agriculture de précision (Barnes et al., 2019 ; Busse, Doernberg et al., 2014), qui correspond à peu près à nos technologies pour la production, soit internet et les réseaux sociaux (Phillips, Klerkx, McEntee et al., 2018 ; Warren, 2004), ce qui correspond à celles pour l'information et la communication.

Première vision globale du numérique sur l'exploitation

Outils génériques

Avant de rentrer dans les détails sur les usages de technologies spécifiques, je demandais aux agriculteurs ce que leur évoquait l'« agriculture numérique ». Ensuite je leur demandais s'ils avaient accès aux technologies génériques que sont internet (et avec quelle qualité de réseau), l'ordinateur, le smartphone et la tablette.

Compétences

Afin de comprendre si les agriculteurs maîtrisaient ou non l'utilisation des outils numériques génériques, ceux-ci étaient amenés à s'autoévaluer sur 15 compétences. Cette liste a été constituée à partir de la grille d'évaluation gouvernementale PIX [1] et illustrée et adaptée au contexte agricole.

Les technologies numériques de gestion

Le logiciel de comptabilité

L'utilisation ou non d'un logiciel de comptabilité dépend surtout du mode de comptabilité choisi, qui était donc demandé dans l'entretien : est-ce que l'enregistrement des factures ou la comptabilité sont réalisés ou non au sein de l'exploitation, ou par un prestataire.

Le logiciel de gestion parcellaire

Le logiciel de gestion parcellaire est un logiciel utilisable depuis un ordinateur, et parfois depuis un smartphone, qui permet d'enregistrer et d'accéder aux données de l'exploitation, à la cartographie, aux interventions effectuées ou aux préconisations faites par un conseiller (Cf Figure 4.2 et Figure 4.3). Il sert également d'interface à de nombreux services numériques (OAD notamment).

Fonctions administratives et numérique

Les agriculteurs étaient interrogés sur la manière dont ils réalisaient les plans de fumure, les déclarations PAC, les analyses économiques. Cela permettait d'identifier s'ils utilisaient ou non du numérique pour ces fonctions (logiciel spécifique ou générique), et d'identifier également s'ils avaient recours à une prestation pour ces fonctions (auprès d'un centre de gestion, d'une chambre d'agriculture, d'une coopérative...).

Les technologies numériques d'information et de communication

Le numérique en agriculture recouvre aussi les technologies plus génériques d'information et de communication. Lors des enquêtes, nous discutions de l'utilisation du numérique et d'internet pour s'informer, communiquer, valoriser, autour de thématiques variées : information agronomique et technique,

1. https ://pix.fr/

information économique ou réglementaire, agroéquipement, achat/vente de produits ou services, vente et communication.

Les pratiques pour s'informer étaient approfondies : fréquence d'utilisation, type de sites consultés, consultation ou participation à des réseaux sociaux (forums spécifiques à l'agriculture, pages Facebook, chaîne YouTube etc.). Nous échangions également sur les effets de ces informations sur les pratiques.

Les technologies numériques de production

Le guidage
L'utilisation d'un système de géolocalisation sur les machines agricoles permet de guider (guidage) ou d'automatiser (autoguidage) la conduite d'une machine agricole dans la parcelle. La précision classique obtenue avec le GPS à correction différentielle (DGPS) est d'environ 20cm. La précision peut être augmentée jusqu'à environ 2cm avec le système RTK, qui nécessite un abonnement payant.

La coupure de tronçon
La technologie de coupure de tronçon, basée sur le positionnement GPS, est un dispositif qui ferme automatiquement certaines sections du pulvérisateur, semoir ou épandeur à engrais, afin d'éviter les recouvrements dans l'apport d'intrants.

La station météo connectée
Une station météo connectée est un ensemble de capteurs (selon les cas : pluviomètre, hygromètre, anémomètre, baromètre, thermomètre, spectromètre, sonde dans le sol) qui mesurent, transmettent en temps réel et stockent des données météorologiques (cf Figure 4.4, Figure 4.5 et Figure 4.6). Elles peuvent être mises en réseau (par exemple les différentes stations météo d'une coopérative) : ce qui donne à chaque agriculteur ayant une station, l'accès aux données des autres stations. Elles peuvent aussi être associées à des Outils d'Aide à la Décision (OAD).

Le contrôleur de rendement
Le contrôleur de rendement est un capteur qui, associé à un GPS, permet de mesurer et de cartographier le rendement (et aussi l'humidité) d'une production lors de la récolte. Les cartes établies montrent les zones où le rendement est plus faible ou plus fort que la moyenne, comme montré à la Figure 4.7. Elles peuvent être éventuellement utiliser avec la technologie de modulation.

La modulation
Les cartes de modulation sont des cartes établies pour caractériser les hétérogénéités intraparcellaires, à partir d'analyses de sol, de végétation ou de rendement. Les doses recommandées de fertilisation, ou de semences, sont ajustées à ces hétérogénéités comme on peut le voir Figure 4.8. Ces cartes peuvent être utilisées avec un épandeur ou semoir adapté à la modulation. Dans ce cas, l'épandeur ou le semoir ajuste la dose d'engrais ou de semis appliquée au fur et à mesure de l'avancement, afin d'adapter la dose à la zone selon les données issues de la carte de modulation.

Les OAD traitements
Divers Outils d'Aide à la Décision numériques sont proposés aux agriculteurs. Ces OAD sont basés sur des modèles de prédiction maladie et sur des données météo (intégrant ou non des données des stations météo). Ils indiquent, pour une parcelle et une variété données, si la maladie risque ou non de se développer. Un exemple est visible Figure 4.9.

Les technologies d'irrigation connectées
Les technologies d'irrigation connectées rassemblent les technologies qui permettent de gérer à distance des système d'irrigation, de vérifier le fonctionnement de l'irrigation ou encore d'avoir des données sur les besoins en irrigation.

La description des technologies montre qu'il existe des interdépendances entre technologies, que celles-ci s'intègrent dans un système de production et qu'elles peuvent avoir des effets sur les pratiques et l'organisation. Cela vient renforcer l'idée qu'il est pertinent de s'intéresser aux usages et aux profils d'usage.

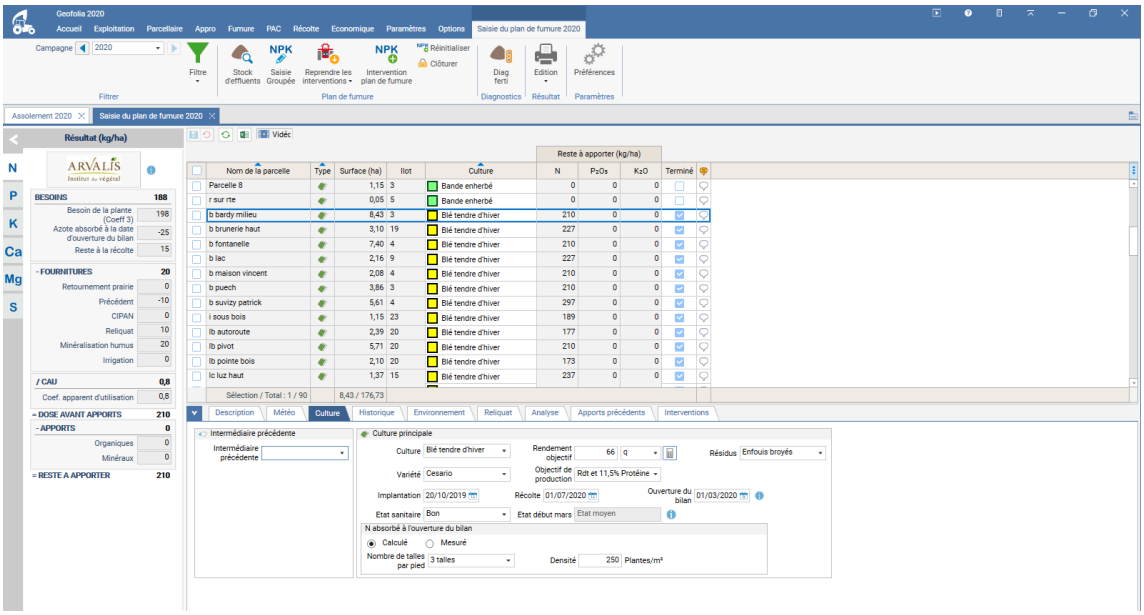


FIGURE 4.2 – Interface d'un logiciel de gestion parcellaire (plan de fumure)

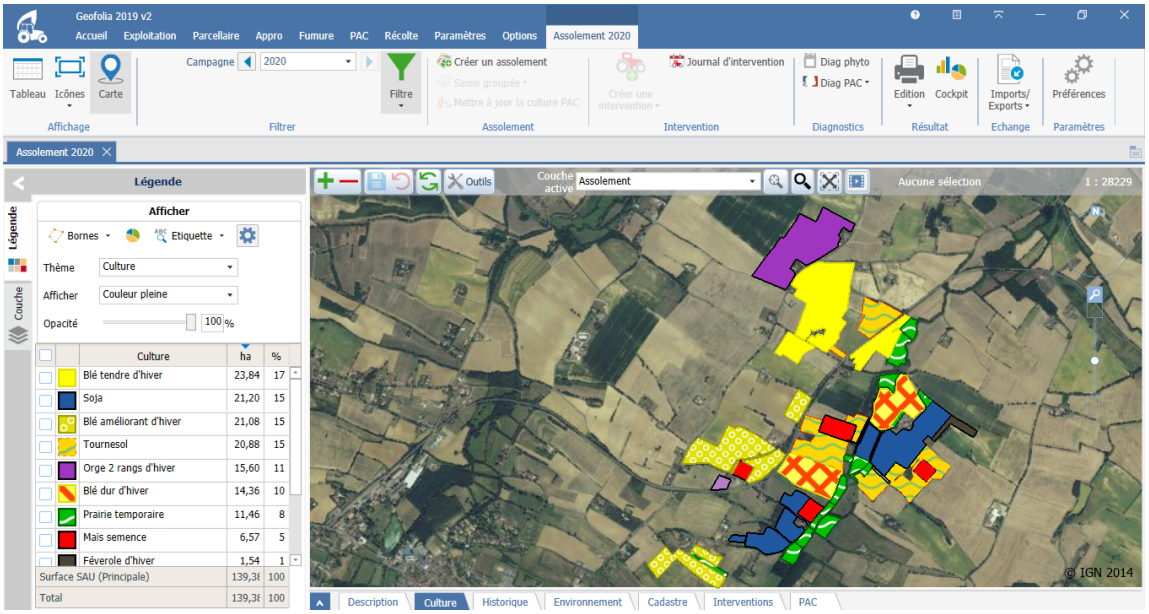


FIGURE 4.3 – Interface d'un logiciel de gestion parcellaire (cartographie de l'exploitation)

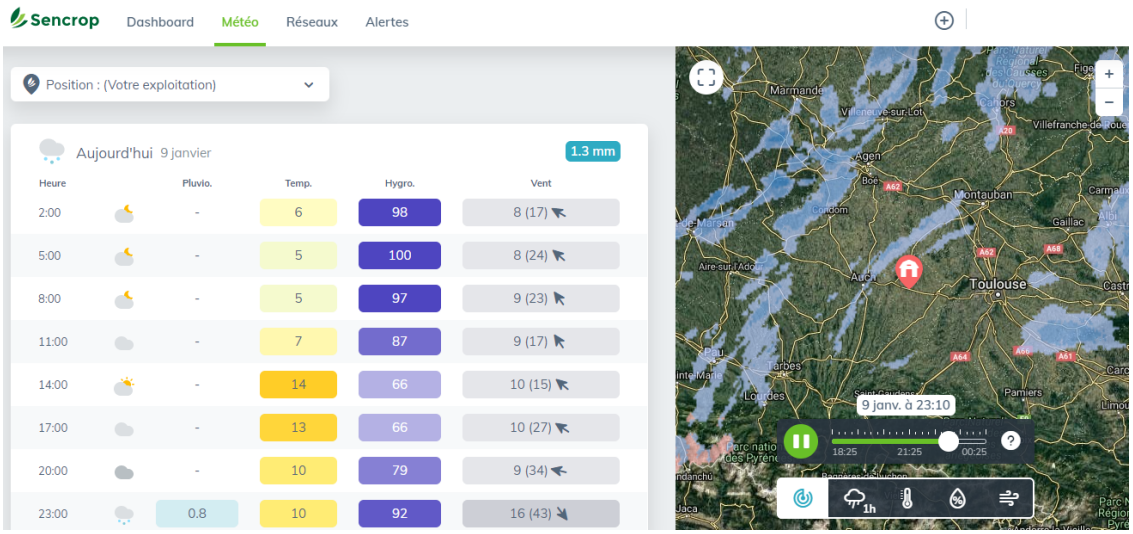


FIGURE 4.4 – Interface d'une station météo connectée (météo du jour)

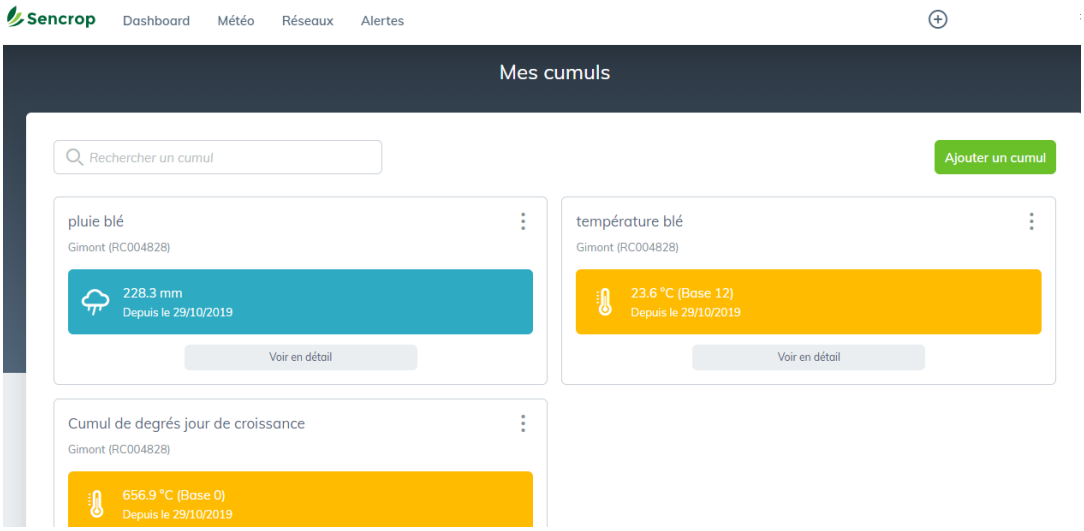


FIGURE 4.5 – Interface d'une station météo connectée (bilan pour une culture)

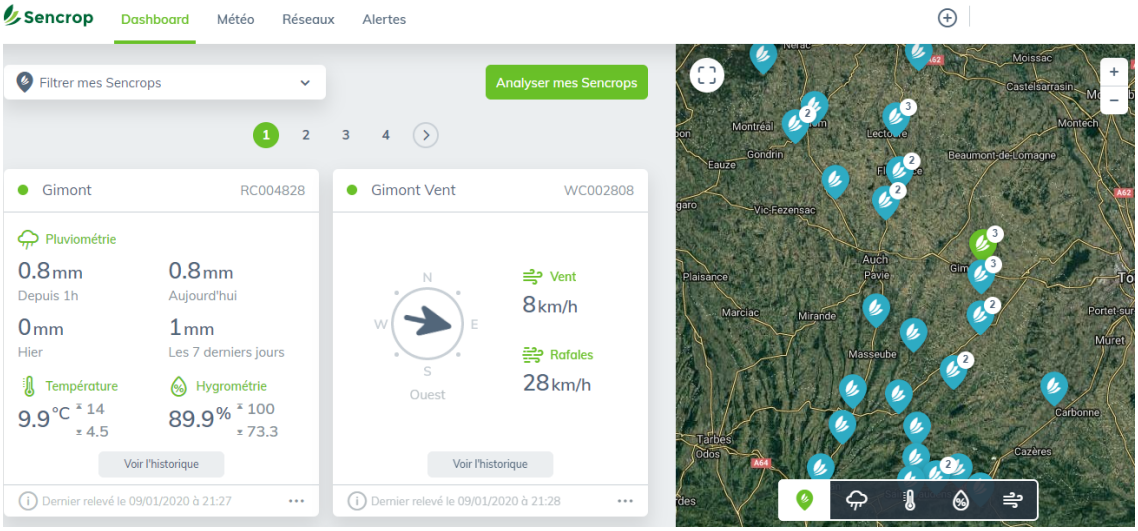


FIGURE 4.6 – Interface d'une station météo connectée (accès aux stations en réseau)

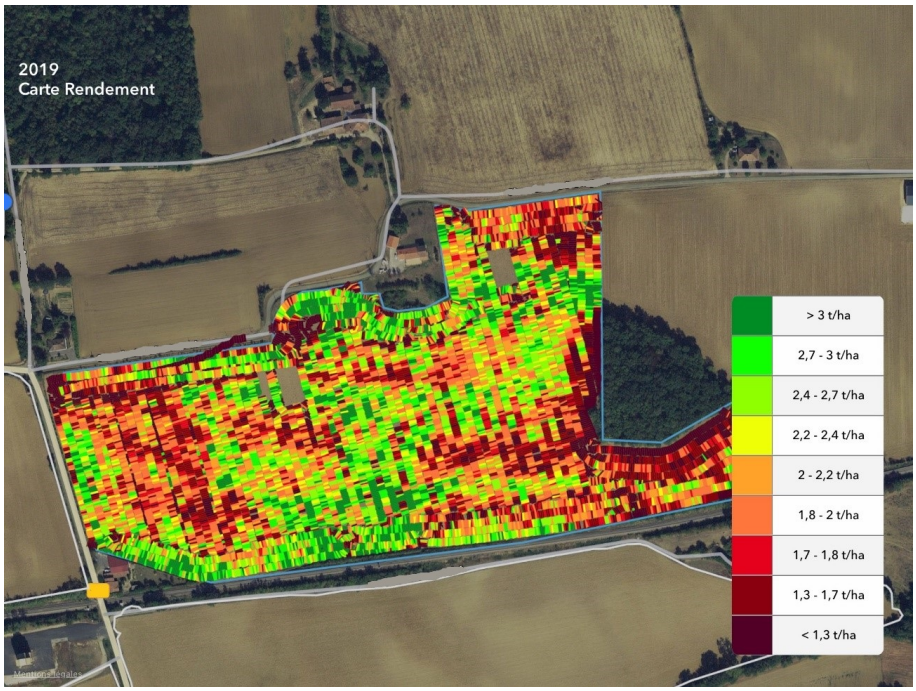


FIGURE 4.7 – Cartographie à partir des données d'un contrôleur de rendement

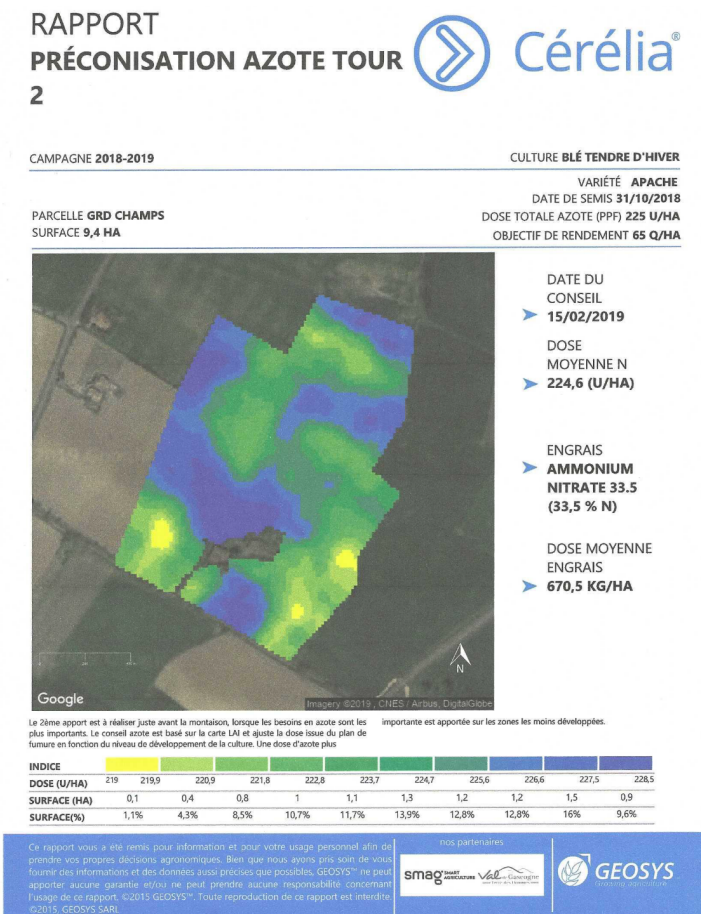


FIGURE 4.8 – Cartographie de modulation d'engrais azoté

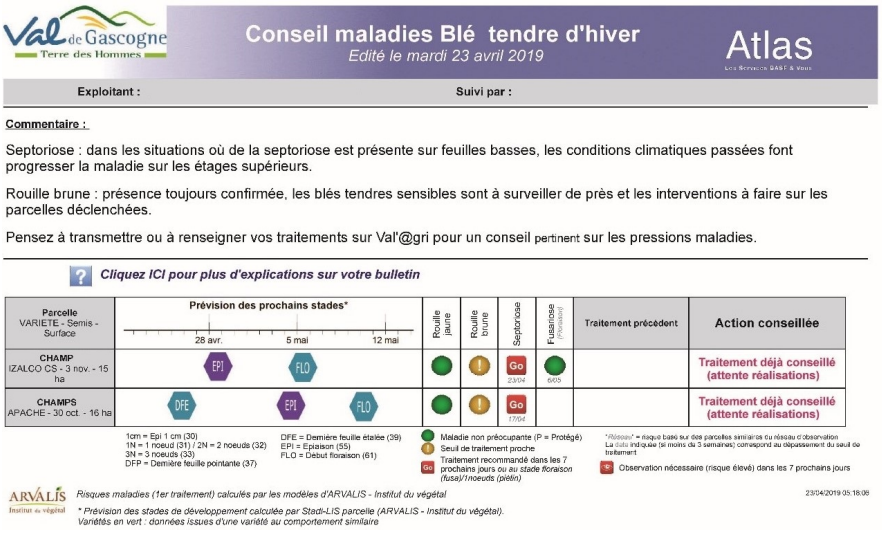


FIGURE 4.9 – Bilan d'un OAD traitement pour un blé tendre d'hiver

L'agroécologie dans les exploitations agricoles

Comment intégrer l'écologisation des pratiques dans les questionnaires ? Comme évoqué dans les chapitres précédents, il existe une multiplicité de manière d'envisager l'écologisation, qui peuvent être controversées et en confrontation. Par exemple, l'arrêt du labour est promu pour améliorer la vie du sol et augmenter le stockage de carbone, tout en étant critiqué pour l'usage d'herbicide qui peut y être associé (Clapp, 2021). De ce fait, il est difficile de hiérarchiser de manière linéaire l'écologisation des exploitations. En revanche, il est possible d'identifier différentes composantes caractéristiques de l'écologisation. J'ai établi cette identification, à partir de la littérature sur l'agroécologie (Darnhofer et al., 2010 ; Stassart, Baret et al., 2012) et à l'aide de discussions avec des experts spécialistes de l'agroécologie des laboratoires AGIR et Innovation auxquels j'étais rattachée.

Les domaines d'écologisation des pratiques sont essentiellement : la protection du sol, la biodiversité cultivée et la gestion des intrants. La protection du sol peut être appréhendée par l'intermédiaire de variables sur le type de travail du sol, et sur la couverture du sol (mise en place de couverts végétaux). La biodiversité cultivée peut être appréhendée via la diversité inter-espèces (légumineuses, céréales, oléagineuses, prairie) ou intra-espèces (variétés), spatiale et temporelle (cultures associées, assolement, couverts). La gestion des intrants rassemble la gestion de la fertilisation (minérale, organique, rotation), la gestion de la santé des plantes (pesticides, biocontrôle, variétés, rotations) et la gestion des adventices (herbicides, désherbage mécanique, rotations). Pour ces trois domaines d'écologisation, j'ai construit des clusters afin de catégoriser les modes d'écologisation des exploitations. La description des clusters est visible en Annexe 2 et 3.

Construction des hypothèses

Afin de structurer l'analyse et la discussion, l'article se base sur deux propositions sur les liens possibles entre usages du numérique et modèle

d'écologisation. Celles-ci sont décrites dans l'article mais je détaille ici leur construction.

Les technologies numériques de production (TNP) rassemblent des technologies qui vont être utilisées directement pour modifier les pratiques de production, telles que l'apport d'intrants ou le travail du sol. Ces technologies sont promues notamment pour améliorer l'efficience des processus de production et optimiser les intrants. En effet, ces technologies sont basées sur la prise en considération de données nouvelles, telles que les caractéristiques intra-parcellaires du sol ou les données météo locales, pour faire des prédictions et guider les décisions afin de les rendre plus « intelligentes » et efficientes (Eastwood, Klerkx et Nettle, 2017 ; Lioutas, Charatsari, La Rocca et al., 2019). Les données permettraient d'adapter plus précisément les pratiques en tenant en compte des conditions locales, mais aussi d' « objectiver » les raisonnements et de prendre des décisions basées sur des preuves (O. Visser, Sippel et Thiemann, 2021). Ces éléments, associés à la littérature issue des revues techniques et aux résultats du chapitre 3, amènent à émettre l'hypothèse que ces technologies sont plutôt utilisées dans des modèles d'écologisation faible.

Ces objectifs d'optimisation seraient conçus par rapport aux modèles agricoles conventionnels et industriels et basés sur la recherche d'efficience et de gains de productivités (Bronson, 2019). De plus, la surface de l'exploitation ainsi que sa dimension économique aurait un effet sur l'adoption des technologies de l'agriculture de précision (Barnes et al., 2019). Cela m'amène à formuler la première proposition ci-dessous.

> Proposition 1 : L'usage des TNP est associé à des formes faibles d'écologisation inscrites dans des modèles d'industrialisation de l'agriculture

En revanche, les technologies d'information et de communication sont présentées comme une source de connaissances essentielle pour la transition agroécologique, qui permet de combler le manque de connaissances disponibles dans le réseau plus classique de conseil (Skaalsveen, Ingram et Urquhart, 2020). En effet, la mise en place de pratiques d'écologisation forte nécessite de nouvelles connaissances et de nouveaux modes d'apprentissage (Duru, Therond et Fares, 2015). Les TNC permettraient de capitaliser des connaissances, de faciliter leurs échanges, offriraient de nouvelles connaissances et de nouvelles manières de savoir (Bonny, 2017 ; Ingram et Maye, 2020). Elles ouvriraient de nouvelles possibilités de co-création de connaissances, de collaboration et de communication favorables à la transition agroécologique (Gkisakis et Damianakis, 2020 ; Leveau et al., 2019). Cela m'amène à la deuxième proposition :

> Proposition 2 : L'usage des TNC est associé à des formes d'écologisation plus fortes basées sur une reconception des systèmes de production

Ces propositions nécessitent d'être éprouvées empiriquement. En effet, d'autres mécanismes peuvent jouer. Par exemple des travaux montrent que les usages de technologies numériques, dans la société, amènent une marchandisation de l'information, qui entraînerait une concentration et industrialisation

des entreprises (Rikap et Lundvall, 2020 ; Wolf et Wood, 1997). Cela peut amener des formes de monopolisation des connaissances (Rikap, 2021), ce qui pourrait limiter le développement de connaissances et d'apprentissages nécessaires à une écologisation forte des systèmes agricoles. D'autres travaux émettent l'hypothèse que le numérique amène à des pertes de connaissances et d'intuition (Regan, 2019 ; Shepherd et al., 2020). Ces mécanismes peuvent alors limiter l'intérêt du numérique pour l'écologisation.

Enjeux pour la thèse

L'analyse à l'échelle des exploitations agricoles est au cœur de la démarche théorique et empirique de ce travail de thèse (Figure 4.10). Premièrement, ce terrain permet d'étudier quelles technologies les agriculteurs utilisent, et comment ils les utilisent. Les données informent les logiques d'utilisation, les différents types d'usages, les effets perçus par les agriculteurs. De plus elles permettent d'étudier comment ces usages s'associent ou non avec des pratiques d'écologisation et des transformations des exploitations. Cette étude permet également de décrire les modèles productifs et les réseaux socioéconomiques dans lesquels s'insèrent les exploitations. Ce travail de caractérisation des pratiques agricoles, du travail, des réseaux, de la structure et des usages du numérique permet une analyse des interdépendances entre ces composantes. Tout cela donne à voir l'émergence d'institutions par les pratiques individuelles, autour du développement du numérique. L'enquête permet également de comprendre comment les agriculteurs s'insèrent dans le système d'innovation, et comment celui-ci impacte leurs pratiques. Globalement, les données donnent aussi des informations sur les perceptions, les avis, les critiques des agriculteurs sur la digitalisation de l'agriculture.

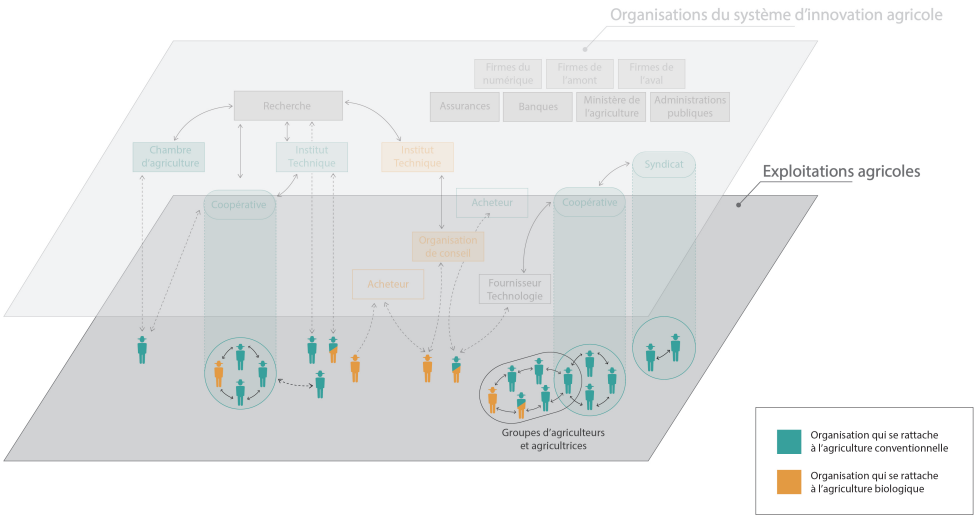


FIGURE 4.10 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 4 par rapport à l'approche globale de la thèse

Article

LINKING THE DIVERSITY OF ECOLOGISATION MODELS TO FARMERS' DIGITAL USE PROFILES

Schnebelin Éléonore

Article publié dans *Ecological Economics*, en Avril 2022
DOI : 10.1016/j.ecolecon.2022.107422

Abstract

Digitalisation is promoted by both private and public actors as a way of contributing to the ecologisation of agriculture. However, this idea remains controversial. The debate is all the more crucial, as different ecologisation models exist, and as agriculture is experiencing new levels of industrialisation. In the literature, use of digital technology in agriculture has mainly been approached from a linear perspective of adoption but is rarely linked to ecologisation. In this paper, we aim to define digital use profiles of farmers and explain how they relate to ecologisation models. We distinguish production and information technologies. Based on 98 interviews with crop farmers in Occitanie (France), we show that there is a diversity of digital profiles. Through a mixed-method, we relate these profiles to a set of variables representing ecological and economic transformation in agriculture. It highlights links between some digital profiles and the further industrialisation of agriculture intertwined with weak or symbolic ecologisation. However, some digital uses associate with new forms of ecologisation that are based on input substitution. Digital use does not appear to support stronger ecologisation of farming. This study highlights the risk of a single model of digitalisation that only promotes one type of ecologisation pathway.

Highlights

- A diversity of digital technology use profiles exists
- Some digital uses are linked to the industrialisation of farming models
- Some digital uses are associated with the industrial development of organic farming
- Digital technology for information helps ecologisation changes already underway

Keywords

Agriculture; Ecology; Digital technology; Trajectory; Farmer heterogeneity; Conventionalisation

1 Introduction

The objective of this paper is to investigate how the diversity of farmers' use profiles of digital technology can be tied or not to different models of ecologisation in agriculture. Ecologisation is defined as "the growing importance of environmental issues within agricultural policies and practices"

(Lamine, 2011; Lucas, 2021). A diversity of farming models exists, each claiming to ecologise agriculture. Digital technology encompasses a wide range of technologies, including precision farming equipment, digital platforms, decision support systems for farmers and advisors, etc. (Prause, Hackfort, and Lindgren, 2020). Different actors promote these technologies, including some representatives from the fields of science, farming and public policy. A series of high-level documents mention digitalisation as a way of improving farm productivity and reducing the adverse effects of agriculture on the environment (Lajoie-O'Malley et al., 2020). Public policies have participated in the rapid development of digital technology for farming, with increasing public and private investments, and a rising number of start-ups (Barrett and Rose, 2020).

However, the actual effects of digital technology on the ecologisation of farming practices is a matter of both scientific controversy and political debate (HLPE-FAO, 2019; Lioutas and Charatsari, 2020; Walter et al., 2017). One side of the debate concerns the compatibility of these technologies with the different models of agricultural ecologisation (Fleming et al., 2018; Klerkx and Rose, 2020; Knierim, Kernecker, et al., 2019). Among the diversity of ecologisation models, some seek to reduce the impact of conventional or industrial farming by pursuing an optimisation of input use (fertilizers, pesticides). Others aim for a more radical reconception of farming systems. This later trend includes for instance organic or soil conservation farming models (Duru, Therond, and Fares, 2015). Critical analyses suggest that digital technologies might reinforce the industrial model of agriculture, to the detriment of more alternative and ecologised models (Carolan, 2020; Lioutas and Charatsari, 2020; Rotz, Duncan, et al., 2019; Wolf and Buttel, 1996). Other analyses are more positive on the impact of digital technology on ecologisation (Walter et al., 2017).

A paradox is that there is still a lack of social science research that links knowledge about farmers' actual uses of digital technologies on the one hand with knowledge about their practices and technological trajectories towards ecologisation on the other (Klerkx, Jakku, and Labarthe, 2019). The majority of research into the subject focuses on better understanding the adoption of precision farming technologies. They most often posit that these technologies have positive effects on the environment (Barnes et al., 2019) and go on to identify a series of obstacles and factors impacting the adoption of technologies, including variables of farm structure (farm size, specialisation), equipment, and farmer profiles (age, education, etc.). However, such research has not examined how digital technologies interact with the diversity of practices and organisations of farms. Other social science research has started to investigate this issue, particularly in sociology and the management sciences. However, most of these studies do not make the connection to broader debates about changes in farm economic models and trajectories (Eastwood, Klerkx, and Nettle, 2017; Lioutas, Charatsari, La Rocca, et al., 2019; Moreiro, 2017). In total, even though digital technologies are promoted by public policy, very little is actually known about their use and effects on different categories of farms related to different agricultural models.

This leads us to the following question: does the development of digital technology benefit all models of ecologisation, or does it favour some models over others? To answer this question, it is firstly necessary to study the

uses of digital technologies in all their diversity, and secondly, to associate these uses with different production and ecologisation models. We have used a mixed methods research protocol (Fakis et al., 2014), based on 98 interviews with farmers from a region in South-West of France, which is engaged both with digital technologies and ecologisation. Our contribution is twofold: First, a quantitative analysis has allowed us to construct use profiles using a hierarchical cluster analysis (HCA) for two types of technologies - production digital technologies on the one hand, and information and communication technologies on the other. Moreover, it has allowed us to highlight the statistical differences between farmers with different use profiles of digital technologies. Second, the qualitative analysis has allowed us to understand the causal relationships and elements of the trajectory that are behind these differences. Combining the quantitative and qualitative analysis has contributed to an understanding of how these use profiles integrate into the different paths towards the ecologisation of farming, and more generally, of how they are tied to economic models.

Firstly, we will define and describe digital technology in farming for the purpose of studying those uses in more detail. We will then outline our methodology. Subsequently, we will present the use profiles and show how these profiles are tied to i) structural and economic characteristics, and ii) the ecologisation practices of farms. Finally, a qualitative analysis and discussion will return to these ties, with the aim of understanding how digitalisation and ecologisation are inter-connected.

2 Background to Digital Technology Innovation and the Ecologisation of Farming

Our analytical framework is based upon innovation and institutional economics, with the aim to provide a systemic understanding of the relations between digitalisation and ecologisation. This perspective has led us to consider three steps: construction of farmers' use profiles for digital technologies and characterisation of agricultural models (2.1); grasping of digitalisation and ecologisation practices at farm level (2.2); interconnection between digitalisation and ecologisation (2.3).

2.1 Linking Use Profiles to Agricultural Models

The concept of use allows us to consider technologies in the light of their effective utilisation, and in interaction with farming contexts. This concept takes the technology beyond its purchase and prescribed use. It also considers its recurring integration into farming systems and practices (Badillo and Pélissier, 2015; DiMaggio, Hargittai, et al., 2001). Effective use is defined as "*the capacity and opportunity to integrate IT successfully into the achievement of objectives defined by the interested actors themselves, or in collaboration with others*" (Gurstein, 2007, p.9). The use of a technology is therefore associated with the construction of knowledge, and with adjustments and interactions between the different components of a farm (Higgins et al., 2017).

This concept of use makes it possible to consider the interdependencies between various digital technologies, but also between these technologies and

farm production systems. So far, most economic research has studied digital technologies one by one, showing how individual, economic and technological variables affect their adoption (Barnes et al., 2019; Lowenberg-DeBoer and Erickson, 2019; Michels et al., 2020). However, digital technologies integrate and combine with each other, and with other technologies (Clapp and Ruder, 2020). These combinations of practices can be institutionalised over time. To facilitate accounting for these combinations, we decided to characterise farmers' use profiles of digital technologies. This profile-based approach has been applied in building typologies of uses in industrial sectors (Frank, Dalenogare, and Ayala, 2019) or more general typologies about Internet (Brandtzæg, Heim, and Karahasanović, 2011).

Farming models are used to characterise farming heterogeneity. Institutional economics differentiates between productive models by three means: productive organisation (methods and techniques, spatial organisation, resource mobilisation etc.), employment relationships, and product policy (target markets, volume, quality, etc.) (R. Boyer and Freyssenet, 2000). In agriculture, farming models are distinguished by their biotechnical types, their socio-economic contexts, or by both (Therond et al., 2017). They also differentiate by their values (Plumecocq, Debril, et al., 2018), by the organisations and institutions that support them, and by their knowledge, their links to market, the state, the territory and the associated farming practices (Gasselin, 2019). They are also studied through the lens of "farming styles", which profiles farms depending on their mobilisation of various resources (Van der Ploeg, 1994). This diversity of models is explained by a diversity of sub processes that lead to complex and non-linear processes of differentiation (Van der Ploeg, 2018). In France, farming models are still largely based on familial structures. However, the number of familial structures is decreasing (39% reduction between 2000 and 2016) (Forget et al., 2019). Dominance of familial structure is questioned, with the existence of diverse farming models and differentiation mechanisms including the development of firm agriculture, the growing importance of outsourcing as well as the defence of more traditional (peasant) agricultural models (Gasselin et al., 2021; Nguyen, Brailly, and Purseigle, 2020).

Linking digital uses profiles to variables that characterise farming models allows us to go beyond adoption mechanisms and understand how digitalisation is tied or otherwise to different farming models, through reinforcement, lock-in and exclusion processes. Those processes can inform technological trajectories and possible path-dependency (Dosi, 1982).

2.2 Ecologisation and Digitalisation Trajectories

2.2.1 *Digitalisation Studied through Two Categories of Technology*

Digitalisation can be defined as the growing utilisation of Information and communication technologies in the economy, and in society (Lange, Pohl, and Santarius, 2020). Several categories of digital technology can be defined, depending on the techniques employed, the functions performed and the impacts envisioned. For this study we differentiated two major technological areas with respect to their potential impact on the ecologisation of farming (Rotz, Gravely, et al., 2019).

First, Digital Technology for Production (DTP) brings together technologies designed to modify the process of production directly. These include technologies for precision farming, which are categorised in the literature as recording, guidance and implementation or response technologies (Balafoutis et al., 2017; Schimmelpfennig, 2016). DTP is based on the use of satellite guidance technologies, parcel mapping and sensors. It can have a variety of impacts: on the management of inputs such as fertilizers, pesticides, and seeds; on outputs such as yield and production quality; on the implementation of certain practices such as tillage or crop rotation; on the nature, organisation and arduousness of work, and on productivity. DTP corresponds in part to the category of "embedded technologies" described by Birner, Daum, and Pray (2021).

Second, Digital Technology for information and Communication (DTC) brings together technologies used to access information and communicate with peers, advisers and customers, in order to exchange or co-create knowledge. It includes the use of specialised farming websites, social media networks such as YouTube or Facebook and other digital platforms or media. It can have an impact on the process of gaining knowledge and training (Burton and Riley, 2018; Leveau et al., 2019), or of getting information on markets, social movements or policies, which in turn, have an impact on the process of production.

Distinguishing between these two types of technology allowed us to capture the diversity of digitalisation. We also studied the ties between the two types of technology, which are often considered separately in academic literature.

2.2.2 *Ecologisation: A New Factor in the Differentiation of Farms*

Ecologisation means the integration of environmental components into policies, knowledge and practices. The environmental challenge has brought new dimensions of differentiation between farming models, depending on their ecologisation strategy (Duru, Therond, and Fares, 2015). We use the concept of ecologisation here, to integrate a diversity of objectives, means and temporality, towards a more environmentally friendly agriculture, as well as their political dimension. There are controversies on the effectiveness and environmental performance of those models, which create political confrontations between ecologisation models. There are two main approaches, sometimes referred to as "weak" and "strong" forms of ecologisation (Duru, Therond, and Fares, 2015). One seeks to optimise the existing conventional model. The other, agroecology, seeks to reconceive production systems more systematically by relying on ecosystem services. This involves agronomic practices as well as methodological and socio-economic principles (Stassart, Baret, et al., 2012). Organic farming in France is recognised as a form or prototype of agroecology which has been gradually institutionalised (Bellon and Penvern, 2014). However, the reality of these practices is more complex, with, on one hand, the process of a "silent agroecology", a "*farmer-led movement for agricultural change [...] that is largely unrecognized and poorly understood*" (Lucas, 2021, p.18); and on the other, a "conventionalisation" of organic farming (Darnhofer et al., 2010). Introducing variables such as soil management, inputs and biodiversity management into agroecological

practices helps to fine-tune the distinction between conventional and organic farming.

These approaches to ecologisation are intertwined with the structural and socio-economic characteristics of production systems. Certain forms of ecologisation might require specific organisations and knowledge systems (Stassart and Jamar, 2009), as well as adapted economic models, for instance market segmentation for organic farming (Van der Ploeg, 2018).

2.3 How Digitalisation can link to Ecologisation Trajectories

We have examined the relationship between digitalisation and ecologisation in farming through a consideration of two types of digital technology, which have potentially different impacts on ecologisation pathways.

DTP aims to enhance the efficiency of agricultural production processes, and was designed for the optimisation of the industrial farming production system. Some authors argue it only has sense within such systems (Bronson, 2019). As a result, economic variables such as Utilised Agricultural Area (UAA), economic size and workforce are expected to have positive and significant effects on the adoption of DTP (Barnes et al., 2019). Further, the subcontracting of certain tasks to an agricultural outsourcing company, as well as membership of a cooperative, is playing a growing role in farming businesses and with their equipment (Nguyen, Brailly, and Purseigle, 2020; Wolf and Nowak, 1995). Moreover, DTP have been shown to foster industrial agriculture and to increase dependence on chemical inputs (Wolf and Buttel, 1996). As mentioned in 2.2, ecologisation trajectories are connected to economic models, and this leads us to our first proposition on the ties between the use of DTP and ecologisation:

— Proposition 1: the use of DTP is associated with weak forms of ecologisation that are intertwined with industrial economic models of farming.

DTC modifies the flow of information and knowledge exchanges and opens new possibilities for the co-creation and sharing of them. Through its technical, social and political dimensions, ecologisation requires changes in knowledge creation and circulation, especially concerning agroecological models (Duru, Therond, and Fares, 2015). DTC can facilitate those knowledge transformations and promote a strong ecologisation (Bonny, 2017). This brings us to our second proposition:

— Proposition 2: The use of DTC is associated with stronger forms of ecologisation, which are based on a reconception of production systems.

However, this proposition is worth challenging empirically. In fact, digital technologies can lead to information and knowledge commodification, concentration and industrialisation (Rikap and Lundvall, 2020; Wolf and Wood, 1997). It could lead to de-skilling and path-dependencies that encourage the continuity of conventional agricultural systems. Furthermore, strong ecologisation requires learning that remains based on local and on-farm knowledge exchanges and experimentation (Van der Ploeg et al., 2019).

We could add social and institutional factors here, which may differ according to the farming model, and could play a role in the adoption of technology use. Regulations, funding, specifications and social norms have

an impact on the use of these technologies (Fielke, Taylor, and Jakku, 2020). In France in particular, environmental regulations, or the CAP (Common Agricultural Policy) are examples of institutions that can have an effect on farming equipment. Other research has shown that these environments are not neutral in the ecologisation trajectory that they support (Vanloqueren and Baret, 2009). At farm level, the micro socio-economic environment, such as relations with suppliers of advisory services or cooperatives, also influences the use of these technologies (Barnes et al., 2019; Wolf and Nowak, 1995).

3 Research Method

In order to understand the diversity and complexity of farmers' uses of digital technology, we conducted 98 face-to-face interviews, using a mixed method that combined quantitative and qualitative approaches. It allowed us to integrate two types of data into the construction of our interpretation (D. Watkins and Gioia, 2015).

3.1 A Mixed Method for a Better Understanding of interrelations between Digitalisation and Ecologisation

In order to study farms with a systemic approach the questionnaire included closed-ended questions on structural, individual, socio-economic and agronomic dimensions of farms (as detailed in the Appendix A). The answers were then entered into a data base. Subsequently, each technology used was studied in more detail. More open–ended questions and moments of discussion gave substance to the collected material. They allowed us to i) adopt a systemic perspective on farming, ii) adjust the questions depending on the technology used, and iii) gain clarity about the uses and their impacts.

We used a hierarchical cluster analysis to categorize these uses while taking into account the connections between different digital technologies. Most of our variables being qualitative, we first completed a multiple-component factor analysis (MCFA). More specifically, we used the HCPC (Hierarchical Clustering on Principle Components) of the FactoMineR R software package (Lê, Josse, and Husson, 2008). We selected technologies that are used by no less than 5% of the population for the two types of technology chosen, DTP and DTC.

For DTP, we selected 12 binary variables concerning the use of the following technologies: guidance, automatic guidance, section control, connected weather station, field mapping, variable-rate technology (VRT) for fertilizers, variable-rate technology (VRT) for seeding, connected tensiometer, yield map, decision support tool for crop protection, connected irrigation technology and farm management software. The percentage of inertia explained by the classification is 41%.

For DTC, we took the following seven variables for finding technical information: the frequency with which the internet is used, the use or otherwise of social networks, Facebook, YouTube, specialised agronomic websites, technical institute websites, and farming press websites. The percentage of inertia explained by the classification is 36%. During the interview, we asked farmers about their use of digital technologies to create or share knowledge. However,

the majority of farmers were only using these technologies for consultation, so we did not include more participatory use in this profile construction.

The clusters obtained in this way can be considered as profiles of types of use. We linked them to the ecological practices and the socioeconomic status of the farms.

The HCPC R function enabled the identification of specific individuals- i.e. the ideal type for each of the profiles. The transcriptions of these individuals were coded with MaxQDA and analysed. This qualitative analysis allowed us to 1) better understand the connections between variables to explore causality, 2) reveal other aspects which had not surfaced before, and 3) illustrate the analysis with quotes from the transcript.

3.2 The Occitanie Region as a Field of Study

We chose to concentrate on field crops. This sector is emblematic of the history of modernisation of French agriculture. It is characterised by a substantial capacity for investment, and has been the focus of developing digital technologies for many years (Lowenberg-DeBoer and Erickson, 2019). The field interviews were conducted in the Occitanie region of France. This region is pioneer in both digital technologies for farming, and in ecologisation, while being in the average range of French farms in terms of size and production. Occitanie is the leading region in France for organic field crops, with 24.5% of France's organic farmland (Interbio Occitanie, 2018).

Our sampling was not representative but purposive to explore the diversity of profiles. To that end, we made contact with farmers through farming organisations (cooperatives) and via organic farming directories, and afterwards by snowball sampling (Atkinson and Flint, 2001). We aimed to have users and non-users of digital technology, as well as a range of agronomic practices (conventional and organic farming, conservation farming or other ecological practices). We could assess the selection bias of our farm sample through a comparison with data from the official census of the Ministry of Agriculture (using variables such as Utilised Agricultural Area, standard gross production and workforce).

4 Results of Cluster Analysis: Relation between Digital Uses and Farms' Characteristics

4.1 Survey Description

Our sample brought together a diverse range of farms (n=98), as can be seen on Table 4.2. The utilised agricultural area of farms ranged from 9.5 Ha to 570 Ha, with an average of 162 Ha, which is greater than the regional average of 59 Ha. This difference can partly be explained by the inclusion of farms run by multi-active farmers or retirees in the official census. We chose not to integrate these categories in our sample as they do not carry much economic weight. The standard gross production (SGP) and the workforce were consequently greater in our sample than the regional average, and with a high diversity. The interviewees were between 24 and 67 years old.

Table 4.3 shows the population distribution defined by some qualitative variables. 'Mixed' farms are those where only a proportion of the crops are farmed organically, with the other crops being not certified organic [2]. Interviewees had a range of levels of education.

Table 4.2 – Descriptive statistics – Quantitative variables

Variable	Obs	mean	sd	min	max	Regional mean [3]
Utilised Agricultural Area	98	162,1	113,0	9,5	570	59
Standard Gross Production	98	243156	193841	5559	1053895	58123
Total workforce	98	1,9	1,1	1	6	0,9
Age	98	44,1	10,8	24	67	49,3 in France (MSA, 2017)

Table 4.3 – Descriptive statistics – Qualitative variables

	Modality	**Number**	**%**
Crop certification	Organic	28	28,6%
	Conventional	58	59,2%
	Mixed	12	12,2%
Education level [4]	<Bac2	31	31,6%
	Bac+2	42	42,9%
	>Bac2	25	25,5%
Gender	Male	89	90,8%
	Female	9	9,2%

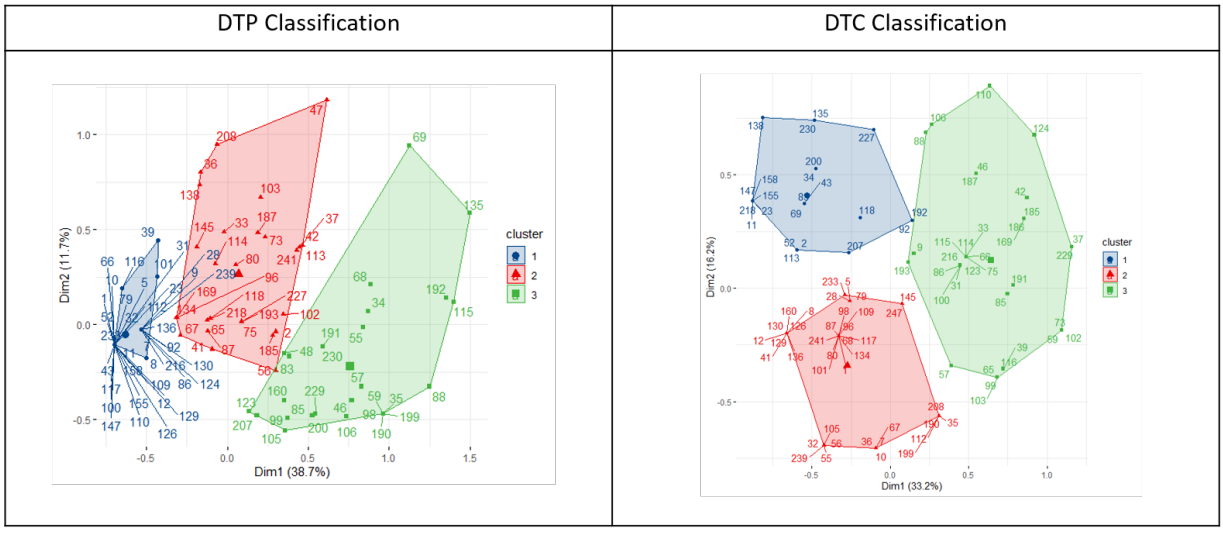


Figure 4.11 – R classification results

2. European Organic certification allows to have clearly separated units which are not all managed under organic production, only if units grow different varieties that can be easily differentiated and do not store organic and non-organic production (Council Regulation, 2007. No 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation)

Table 4.4 – Cross-referencing digital use profiles

	No-DTC	*Website DTC*	*Network DTC*	*DTC N/A*	*Total*
No-DTP	8	19	10	0	37
Average DTP	6	11	13	1	31
Intensive DTP	8	8	11	1	28
DTP N/A	0	1	1	0	2
Total	22	39	35	2	98

The clustering method resulted in three groups for DTP and three groups for DTC, as shown in figure 1.

Two profiles were constructed to characterise the two types of technologies: for production (DTP), and for information (DTC). By cross-referencing these profiles, (Table 4.4), we demonstrated that there is no significant overlap. The Pearson test allowed us to reject a dependence hypothesis between the types of digital use on farms.

4.2 Use Profiles for Digital Technologies for Production (DTP)

The three DTP use profiles are described below. We characterise the farms of those profiles. Table 4.5 recaps the variables that show the greatest differences between the three groups. A detailed description of the profiles and all their characterisations can be found in the Appendix B.

No-DTP Profile

The first profile, that we called 'No-DTP', makes up 39% of the sample. In this group, most of the farmers do not have digital technology for production. A little less than one third of them, however, do have farm management software (land and administrative management).

In this profile, farms that provide outsourcing services are under-represented, as are those which cultivate seeds, or which have contract farming. Organic farms, farms that sell directly to the customer, or that farm livestock, are, on the other hand, over-represented. The farms in this group are smaller in terms of economic size and agricultural area, have fewer annuities and a smaller workforce than the average. However, they do not have a lower Gross Operating Surplus (GOS). The costs for inputs per hectare and yields are significantly lower.

Average DTP Profile

The second profile, named 'average DTP', consists of 32% of the sample. It includes farmers who use some digital technology for production, but who do not have the full precision farming software package: nearly all use guidance technologies (97%) or automatic guidance (63%), and the great majority (87%) have land management software, but none of them use variable-rate technology for inputs. Furthermore, between 20 and 40% of them use section control technologies, decision making tools for their treatments, weather stations, and connected tensiometers and irrigation technologies.

Farms fitting this profile generally represent the sample average, but they also use more irrigation, have a higher salaried workforce, a greater expenditure

on fertilizer per hectare, and do less direct marketing. The organic farms in this group (N=8), have greater GOS, SGP, annuities, more irrigation, and do more trading within cooperatives.

Intensive DTP Profile

The third profile, 'intensive DTP', includes 29% of the sample, and is characterised by the intensive use of digital technologies for production. We found wide use of precision farming technologies: guidance (96%), variable rate fertilizer (92%), connected weather stations (65%), and yield monitoring (46%). 23% of the group use variable rate for seeding.

In this profile, farms practicing outsourcing, mixed farms, farms with seed cultivation and integrated pest management are over-represented. This group is higher than average with the variables Utilised Agricultural Area (UAA), SGP, total employed workforce and salaried workforce, GOS, costs of pesticides and fertilizer, and soft wheat yields. There are fewer certified organic or mixed crops.

4.3 Use Profiles of Digital Technology for Information and Communication (DTC)

We will describe below the three DTC profiles [5], and characterise farms belonging to those profiles. Table 5 recaps the variables that show the greatest differences between the three groups. A detailed description of the profiles and all their characterisations can be found in the Appendix B.

No-DTC profile

The first profile, 'No-DTC', is defined by a limited use of the Internet to find information. Two thirds only use the internet to search for information from time to time, or use it rarely or never. Three quarters do not use social networks and do not consult specialist sites. Nearly none of them use YouTube, or the technical institute websites. However, 45% consult the online farming press.

This profile is characterised by a lower percentage of farmers with the French equivalent of a bachelor's degree or who belong to farmers' knowledge exchange groups (CETA). In this group, there is a higher percentage of farmers who get advice within cooperatives and have the lowest level of digital literacy. These farms have a higher expenditure on pesticides per hectare than average, have more ploughed land, and less no-tillage.

Website DTC Profile

The second profile, 'Website DTC', is defined by the use of the specialised sites to look for information. Although they do not use Facebook, YouTube, or the farming press online, all use specialised websites, in particular from technical institutes (36%).

The farmers in this profile cultivate less seeds, with more non-tillage or minimum tillage. On average, they grow a higher proportion of pulses, have lower costs of pesticides and higher yields of irrigated maize and hard wheat. The farmers are older on average, a higher proportion of them have

5. The constitution of DTC clusters was less obvious. Also, it seems that the use of DTC is more characterised by a continuation of practices, rather than distinct groups of uses

an intermediate grasp of IT tools, and they are less likely to belong to a trade union.

Network DTC Profile

The third group, 'Network DTC', is made up of farmers who use social networks in a professional context (100%), in particular Facebook and YouTube. They either use the internet often or very often (91%), and they consult specialised websites (89%).

Farms in this profile have more irrigation. Farmers have started farming more recently than the average, and are younger. In this group, members generally have the best grasp of digital tools, as well as a more negative opinion of the economic health of their farm.

Table 4.6 summarises the effects of the variables that show the greatest differences between the three groups. Compared to production technology clusters, fewer variables are significantly different between one group and another.

5 Qualitative Insights and Discussion of Results

The profiling of digital uses has allowed us to highlight how these technologies are interconnected within productive models (Clapp and Ruder, 2020). By these means, we have been able to identify some use profiles that correspond with reoccurring combinations of these technologies. We complement those profiles description with a qualitative analysis. This allows us to discuss the relationship between digitalisation and ecologisation trajectories.

5.1 Digital Technologies for Production, Industrialisation and Ecologisation

Our first proposition was that DTP use is tied to weak forms of ecologisation intertwined with the industrialisation of farming models. Our analysis confirms the link between the use of DTP and industrialisation, and fine-tunes its link towards ecologisation.

5.1.1 *DTP uses support enlargement and industrialisation of farms*

The importance of economic size stands out as one of the main factors driving the use of DTP, as demonstrated in previous research (Barnes et al., 2019; Konrad et al., 2019). Firstly, economic size influences the capacity to invest in this type of tool. This capacity may be attained by increasing farm size, by collective investment (relatively little-used in our sample) or by expansion through outsourcing. Nguyen, Brailly, and Purseigle (2020) have demonstrated that outsourcing is a way of being able to access use of digital device without investing in it. We have completed this analysis by showing how having an outsourcing activity could be seen as a means of investing, as a way of expanding agricultural land and revenue, and consequently, expanding investment capacity.

Secondly, the results show that DTP are also a response to the specific needs of more industrial production models based on expansion, outsourcing activities, salaried employees, specialisation and intensification. DTP sometimes become an indispensable managing tool for organising man-power,

Table 4.5 – Synthesis of the ties between digital technology for production use profiles and variables

Variables	*No-DTP*	*Average DTP*	*Intensive DTP*
Structural			
Utilised Agricultural Area (UAA)	- ***		+ ***
Has outsourcing business	- ***		+ ***
Standard Gross Production (SGP)	- ***		+ ***
Total workforce	- *		+ **
Salaried workforce	- **	+ ***	+ **
Annuities	- ***	+ *	
Gross Operating Surplus (GOS)			+ **
Farms livestock	+ ***		- *
Individual			
Digital skills	3 : + **	3 : - *	
Socio-economic environment			
Gets advice from cooperative	- **		+ *
Sells wholesale	- **	+ **	
Sells seeds	- ***		+ **
Does contract farming	- ***		
Part of a CETA = Farmer's knowledge exchange group	- **		
Part of an Organic Farmers' Group	+ **		- *
Part of a CUMA = Farmers' machinery exchange group		+ *	
Attends agricultural shows	- ***		+ ***
Does direct marketing	+ ***	- **	
Practices agro economics			
Type of input management (1 conventional ; 2 integrated; 3 organic)	1 : - ** 2 : - * 3 : + ***		1 2 : + ** 3 : - ***
Cultivated biodiversity (1 meadow, 2 cereals 3 diverse 4 pulses)	1 : + *** 2 : - *	1 : - **	
Main type of soil management (1 ploughed, 2 deep, 3 shallow, 4 no-till)	2 : - * 3 : + **		
Crop type	Organic+ *** Conv - **	Organic Mixed - * Conv + *	Organic - *** Mixed + *** Conv
Has associated crops	+ **		- ***
Cost of fertilizer per ha	- ***	+ ***	+ ***
Cost of pesticides per ha	- ***	+ *	+ ***
Soft wheat yield	- ***		+ ***
Hard wheat yield	- ***	+ ***	+ *
Irrigated land	- ***	+ ***	

Table 4.6 – Synthesis of the connections between DTC use profiles and variables

Factor	**No-DTC**	**Website DTC**	**Network DTC**
Individual			
Age		+ **	- ***
Founding of the farm	- *		+ ***
Computer literacy	3 : + **	1 : - ** 2 : + ***	1 : + ** 2 : - *
Background	>Bac+2 - ***	>Bac+2 + *	
Personal opinion on their farm economic performance			Negative+ **
Have children		+ **	
Socio-economic environment			
Advice from a cooperative	+ *		
Trading with seed companies	+ *	- ***	
Contracts		- *	
Part of a CETA = Farmers' knowledge exchange group	- **	+ *	
Belongs to a professional union		- **	+ *
Part of a farmers' knowledge exchange group on minimum/no tillage		+ *	
Agronomy			
Main type of soil management (1 ploughed, 2 deep, 3 shallow, 4 no-till)	1 : + ** 4 : - **		
No Till part	- **		
Pulse crops		+ **	
Costs of pesticides/ha	+ **	- **	
Hard wheat yield	- *	+ *	
Irrigated land		- **	+ *

knowing what has been done with what field of land, standardising, and managing logistics and traceability. Furthermore, these technologies facilitate expansion, as Baptiste explained:

> *"I don't know if I have saved time in fact. Because in the time that you save, you have more other things to do. It's a cycle [...] my great grandfather had 16 ha. My grandfather had 200. My father 400-450. Now we work 8 or 900" Baptiste (Intensive DTP[a])*

a. Our indication in brackets signals that the interviewee is a specific individual within this profile. Interviewees' names have been changed

Our results confirm a part of our first proposition: the link between DTP uses and industrialisation. Economic size influences the adoption of these technologies, which in turn facilitate the expansion trajectory of these models. This reinforces the hypothesis put forward in many social science research, that digital technologies, and more particularly those for precision farming, tend to favour and lock in the dominant industrial farming system (Bronson, 2019; Carbonell, 2016; Clapp and Ruder, 2020; Rotz, Duncan, et al., 2019).

5.1.2 *Value-chains organisations play a role in the use of DTP*

Economic actors working for the industrialisation of farming can favour the use of DTP. As stated in 2.3, technological trajectories are tied to the socio-economic environment. We confirm the role of advisory services provided by cooperatives or groups of farmers in the adoption of DTP (Barnes et al., 2019). Our results show first and foremost, that seed cultivation and trading contracts, which are associated with a specific trading and advice model, favours, or even imposes, the use of DTP. Moreover, specific crops are high added value crops which also favour investment (Lowenberg-DeBoer and Erickson, 2019). Downstream businesses encourage or demand the use of these technologies through contracts in order to standardise and better control their supply.

5.1.3 *DTP to optimise or to justify conventional models of agriculture*

These technologies aim for an optimisation of inputs (mostly fertilizers and pesticides). This can limit their interest for others, such as organic farmers, who don't use the same inputs and have other strategies besides optimisation, as illustrated below:

> *"Other farmers who have GPS [...] they save money on diesel, seeds, fertilizer and weed killer. Because they only use what they need. So perhaps they can pay for things with what they save. But me, I am only going to save on diesel, and on time." Thomas (No-DTP)*

Moreover, a large percentage of organic farmers say that DTP is not adapted to their production systems, or is even counterproductive. Some farmers who have changed over to organic farming, have stopped using land management software or decision support tools which were no longer useful for them. In the *No-DTP* group, the Standard Gross Production is weaker but the Gross Operating Surplus is not. This could signal that farmers from the

No-DTP profile implement different strategies to optimise and to increase profits, rather than those suggested by precision farming. It can be through transformation or direct marketing, or by optimising ecosystem services etc. DTP makes sense for farms that have a strategy based on increasing productivity, efficiency and maximum yield (Bronson, 2019), but less so for those whose strategy is more concerned with reducing external inputs by agronomic techniques, or with diversification rather than specialisation. Then, DTP could be linked with weak ecologisation trajectories focused on optimisation and efficiency.

However, it is evident from the interviews that this link between the use of DTP and a better efficiency is a matter of debate. The reasons given for using DTP are essentially ergonomics, comfort, time-saving and productivity. However, their effects are disputed by some users, in particular in the case of variable rate technology. Some farmers state that the variable rate does not save money, so they may stop using it. Farmers question some effects on yield and input consumption. This is in line with the critical assessment that finds DTP to be a tool for a "symbolic ecologisation" based on quantification and justification, rather than on real optimisation (Wolf and Wood, 1997).

5.1.4 *DTP uses for input substitution strategies*

The results show that the choice of agronomic practices and the choice of tools have an effect on each other, and that the use of DTP seems to encourage optimisation over redesign. This needs to be qualified, however, as we have also observed links between more radical changes of practice and the use of DTP. The implementation of sustainable soil management has led farmers to use DTP, in particular, precision auto guidance (RTK) as explained by Louis:

> *"We have come to RTK because we have changed agronomic practices. As a lot of our work is with cover crop, [. . .] when we sow maize among beans, which are a bit taller, it is good to have guidance." Louis (Average DTP)*

Some farmers have used DTP as a means of introducing organic farming, as explained by Baptiste:

> *"If I had not had guidance for organic crops, perhaps I would not have done it, plain and simple. Because we have the capacity, we have the size, and so we have big tools. Where we are organic, we can use 8.2 m tools with guidance, it's great." Baptiste (intensive DTP)*

In Louis' case, a change in practice brought about the use of DTP. Conversely, for Baptiste, the use of DTP led to the installation of new agronomic practices.

The results show an over-representation of mixed farmers in the Intensive DTP profile. We could propose the hypothesis that digital technology allows some conventional farmers to move towards organic farming, while retaining a somewhat similar way of working: organic fertilizer rather than chemical, pesticides authorised in organic rather than in conventional farming, mechanical weeding with precision hoeing rather than chemical weed-killer. Thus DTP could be consistent not only with efficiency strategies, but also with

substitution strategies (Hill and MacRae, 1996). This over-representation of mixed farmers should be contextualised by the fact that these farmers have a larger area of land and often have outsourcing activities. They belong to a more 'industrial' model of organic farming.

Digital technology seems to favour another form of ecologisation: the development of organic farming in big farms. This echoes a political and academic debate about the 'conventionalisation' of the organic farming (Darnhofer et al., 2010; Stassart and Jamar, 2009). Digital technology could be an accelerant in this conventionalisation, to the detriment of more radical organic farming, and smaller farms.

5.2 Digital Technologies for Information and Communication, Knowledge and Ecologisation

Our second proposition was that the use of DTC is tied to stronger forms of ecologisation than DTP is. DTC profiles characterisation highlights that DTC profiles relate to completely different variables than DTP. Consistently with Konrad et al. (2019), factors leading to adoption and use depend on the digital technology studied. However, the links between DTC and ecologisation models needs to be refined.

5.2.1 *The use of DTC is linked to a socio-economic environment, but above all, to individual characteristics*

Individual characteristics of farmers: education, age and skills, as well as individual preferences are key variables to distinguish between DTC profiles. However, economic factors are not significant, contrary to the results of Michels et al. (2020), although that research was only onto the adoption of smartphones.

Socio-economic environment plays a role, for good or ill, in the use of DTC. Both being a member of a cooperative and benefiting from advice by seed companies are tied negatively with the use of DTC. This could be a result of the formalisation and standardisation of production processes integrated within contracts with downstream industry, which limits possible changes for farmers, making them less inclined to look for information and knowledge. It could also be explained by the fact that production contracts and membership of a cooperative already include knowledge exchanges (Cholez, Magrini, and Galliano, 2020). Membership of a trade union is tied positively with the use of social networks. Membership of a Farmers' knowledge exchange group or to other forms of farmers groups, is also tied positively. Belonging to this kind of group could signal an interest in agronomic and technical innovation information. Moreover, the internet is a source of information that appears to be complementary to local knowledge sources. It allows insight into what is being done elsewhere as opposed to what is being done locally, or having a lot of information as opposed to having precise information that is adapted to local conditions.

5.2.2 *The internet facilitates access to new information on new and more radical practices, but with limitations*

It came out during the interviews that the internet seemed to be source of information for what to do in atypical situations, or for getting knowledge that is not available in local networks. It equally acts as a source of inspiration to try out new practices, and a means of monitoring agronomic practices. These range from the adjustment of practices (what to do when faced with the new conditions caused by climate change, for example), to the search for information on more radical changes in practice, in particular, because information is not available on the usual information networks, as Baptiste explains:

> *"The cooperative was a bit behind in this, so I went to see what they are doing there quite a lot. Also plant species mixes. I bought and made my own little mixes." Baptiste (Network DTC)*

We should add to this the idea of exchange, participation, and being themselves a source of information. However, interviewees often mentioned problems with the reliability or the relevance of information, in terms of local soil and weather conditions, as seen below:

> *"Well, people have different experiences, but something that works for one person, does not necessarily work here" Corentin*

Our second proposition also needs some qualifications. First, it seems that the links between the use of DTC and agronomic practices could go one of two ways: as both a cause and a consequence. Using the internet means discovering new practices, and the desire to establish new practices encourages the use of the internet to search for information. Second, the internet is not necessarily a privileged form of access to knowledge, but it makes it possible to fill the gap in agro-ecological information from traditional networks (advisors, neighbours, family) (Lucas, 2021). For instance, the internet appears to be a major source of information for cover crops and conservation agriculture. Knowledge gained from the internet does not seem to be able to completely replace knowledge acquired orally, in particular in the case of ecological, localised and adaptive know-how (Burton and Riley, 2018). Moreover, in our sample, there is no widespread use of DTC in order to co-create knowledge and redesign knowledge systems.

DTC uses allow for a combination of information sources, rather than replacing direct exchanges. It is therefore often the farmers who are involved in local knowledge exchange groups that make the most use of technical information on the internet.

5.3 Understanding Use Profiles Highlights Trajectory Mechanisms

Qualitative insights complement the quantitative description of the profiles. They made it possible to demonstrate trajectory mechanisms, and in particular non-linearity processes. First, we have shown the non-linearity of the process of digitalisation at the level of individual farmers' decisions. We note phenomena of farmers trying out the technologies, but then abandoning them. Second, farmers are not on a unique "S curve" of adoption (Rogers,

2010). Categorisation as "pioneers" or "laggards" does not seem relevant here. Not adopting a technology does not necessarily signal a resistance to change, or a slower adoption process that "laggard" farmers would follow. It can be a coherent choice that matches their practices and objectives, towards a different technological trajectory (Eastwood, Klerkx, and Nettle, 2017; Rogers, 2010; Van der Ploeg, 2018). The adoption and use of a technology may not be so much the result of individual "pioneer" behaviour, but the result of a production model interacting with a socio-economic system that encourages, or even imposes, these technologies.

Moreover, we have observed reinforcement mechanisms: the use of digital technologies for production (DTP) facilitates further industrialisation trajectory and expansion of farms, which in turn favours the use of DTP. This leads to mechanisms of path dependency and reinforces the dominant farming production systems as suggested by Bronson (2019) or Vanloqueren and Baret (2009). However, our analysis is only one snapshot in time, and it would be interesting to complete it with a long-term longitudinal analysis. It would make it possible to go more deeply into the processes tied to the trajectories. This would involve on-farm and long-term research, but also underlines the importance of having access to public databases on farms structures, practices and uses of technology.

Our research also confirms the major role of intermediaries, such as advisory services, but also training organisations and value-chain actors, such as agricultural cooperatives, in digital uses and trajectories (Eastwood, Klerkx, and Nettle, 2017; Fielke, Taylor, and Jakku, 2020). Moreover, regulation, agricultural policies and private norms play a role in digital uses and participate in farming trajectories and path dependency mechanisms. There is a need to provide institutional analysis of the roles of intermediary actors on rules and practices that impact the relation between digitalisation and ecologisation trajectories. It also implies that digitalisation policies must be considered alongside public policies on knowledge development and extension services as well as with economic incentives and social and environmental regulations.

Technologies and practices are interconnected within technological systems (Clapp and Ruder, 2020). Only focusing on one form of digitalisation would mean supporting only one form of ecologisation of agriculture. We can put forward a range of propositions to enable digitalisation to embrace more agroecological and diverse models, including the following. The basis unit of digital technologies could move from one crop to one complex system. Participatory conception could be promoted (Jakku and Thorburn, 2010). Digitalisation objectives could integrate a diversity of expectations, such as promoting on-farm experimentation, systemic analysis and knowledge exchanges rather than optimising inputs and increasing traceability (Lacoste et al., 2021; Schnebelin, 2021). There is also a need to renew the economic and political models of technologies, such as open or collective technology as data commodification is tied with industrialisation (Carolan, 2017a; Wolf and Wood, 1997).

More broadly, to avoid a monolithic orientation of digitalisation, there is a need to question who and what drive innovation trajectories. Innovation trajectories depend on the complex interplay between economic forces, institutional and political factors (Dosi, 1982). Authors argue that digital agriculture is mostly driven by private industries, notably agri-business and

digital firms, supported by national policy (Birner, Daum, and Pray, 2021; Prause, Hackfort, and Lindgren, 2020). There is a risk that this configuration reinforces the lock-in of ecological innovation (Vanloqueren and Baret, 2009), especially as AgTech firms do not perceive the ecologisation heterogeneity and its implication for digitalisation as previously shown in Schnebelin (2021). National policies such as research funding and orientation, can play a role to escape such a lock-in effect (Cowan and Gunby, 1996). These policies could acknowledge the heterogeneity of innovation system to better include actors outside the dominant paradigm (Klerkx and Rose, 2020). They could also re-balance power and invest in alternative digitalisation pathways. There is also a need to study digital technologies conditions of use and to provide evidence on their real effects (Ingram, Maye, et al., 2022). Digitalisation policies are not neutral and there is a need to engage a reflection on changes in governance and orientation of innovation systems (Klerkx and Rose, 2020; Pigford, Hickey, and Klerkx, 2018).

6 Conclusion

Based on a large number of interviews with crop farmers in France about their use of digital technology, our research identifies a diversity of digital use profiles rather than a single digitalisation. These profiles relate to farming models. Intensive uses of Digital Technologies for Production are tied to, and reinforce, the industrialisation of farming that is characterised by expansion, outsourcing activities and a salaried workforce. The use of DTP facilitates the industrialisation trajectory, which favours the use of DTP in return. This leads to mechanisms of path dependency, and reinforces the dominant farming production systems. Uses of DTP can be linked to weak ecologisation or "symbolic ecologisation" strategies. It can also support some substitution strategies such as the development of industrial organic farming. The use of Digital Technologies for Information and Communication appears to complement and to add new possibilities for knowledge exchanges while, thus far, not challenging farmers' knowledge and production systems. This analysis invites a consideration of the adoption and use of technology as the result of production models interacting with socio-economic systems, rather than the choice of an independent individual. This cross-sectional analysis allows us a glimpse of the technological trajectory that is being promoted by the current development of digital tools in farms. At a time when French farm structures are being challenged and are undergoing a more profound differentiation, current digital use is mostly encouraging the development of industrialisation, rather than the agroecological farming system. This work calls for other research, to better understand technological trajectories. There is a need for multi-disciplinary research, to evaluate changes and environmental performances through a longitudinal analysis of digital use by farmers, and to develop tools, digital or not, that support agroecological farming systems. The policies of digitalisation are not neutral, as the technologies promoted are used more by certain models than by others. Limiting focus to one technological model means promoting a specific farming trajectory. To promote a diversity of ecologisation pathways, other forms of digitalisation development should be considered alongside knowledge, economic and so-

cial policies, that imply changes in policy and in orientation of innovation systems.

Conclusion du chapitre

Les informations issues de mes enquêtes auprès des agriculteurs sont très riches et diverses. La catégorisation par profils d'usage permet de simplifier le réel pour comprendre, à l'échelle concrète d'entreprises, des dynamiques sectorielles, des tendances, des généralités. Cependant, derrière l'unité apparente d'un profil d'usage, se cache une multiplicité d'usages, de raisons d'agir, de réalités. De plus, les enquêtes avec les agriculteurs finissaient par une discussion plus ouverte et plus générale, visant à capter les perceptions et les avis des enquêtés. Toutes ces informations ne sont pas présentes dans l'article. Je vais donc ici présenter brièvement certaines de ces données complémentaires, qui pourront faire l'objet d'analyses plus approfondies et d'articles complémentaires, suite à la thèse. Une première partie fait une synthèse des résultats de l'article et y ajoute des informations sur les liens entre pratiques d'écologisation et usages du numérique. Une deuxième partie informe comment la digitalisation des exploitations agricoles peut être imposée, désirée ou contestée. Cela m'amène à décrire les liens entre l'analyse des usages réalisée ici et le chapitre précédent sur les systèmes d'innovation, et ouvre des perspectives soulevées par ce travail.

L'annexe 5 apporte des précisions sur les usages de certaines technologies numériques.

Usages du numérique et écologisation

Les résultats de l'article mettent en évidence des liens entre les usages du numérique et les modèles économiques et d'écologisation des exploitations agricoles. Cette section fait une synthèse de ces résultats, étayée et illustrée par des données complémentaires et des exemples sur les usages du numérique et pratiques agricoles dans les exploitations.

Des usages des TNP inscrits dans des trajectoires d'industrialisation et d'écologisation faible ou symbolique

Les résultats de l'article confirment l'hypothèse de liens entre usages des technologies numériques pour la production (TNP) et trajectoires d'industrialisation et d'agrandissement des exploitations (Bronson, 2019 ; Carbonell, 2016). La dimension économique ressort comme un facteur d'usage. Une dimension économique plus importante offre des capacités d'investissement plus élevées, mais génère aussi des besoins en outils pour gérer la main-d'œuvre, standardiser et intensifier la production. Par exemple, des outils numériques sont utilisés pour enregistrer et tracer le travail effectué sur les différentes parcelles, ou pour communiquer aux tractoristes les itinéraires techniques à suivre. L'utilisation du guidage GPS permet également d'augmenter la vitesse de travail mais aussi le temps de travail en diminuant la fatigue liée à la conduite du tracteur et en permettant la conduite de nuit. L'agrandissement de la dimension économique peut alors être vue non seulement comme une cause mais aussi comme une conséquence de l'usage des TNP, qui permettent de soulever des obstacles à l'agrandissement et parfois d'augmenter la productivité du travail. On observe ainsi des dynamiques de renforcement entre usage des TNP et dimension économique. Cela étaye l'hy-

pothèse avancée dans beaucoup de travaux en sciences sociales, montrant que les technologies numériques, et plus spécifiquement celles de l'agriculture de précision, tendent à favoriser et verrouiller le système agricole industriel dominant (Bronson, 2019 ; Carbonell, 2016 ; Clapp et Ruder, 2020 ; Rotz, Duncan et al., 2019).

Les usages des TNP sont aussi fortement associés aux entreprises ayant des activités de prestation agricole, c'est-à-dire celles qui vont réaliser des travaux agricoles dans d'autres exploitations. D'une part faire de la prestation est une manière de s'inscrire dans une logique d'expansion des surfaces travaillées, des revenus et donc des capacités d'investissement. On pourrait parler d'« agrandissement par prestation ». De cette manière, certains augmentent leur surface travaillée de quelques dizaines d'hectares, d'autres travaillent sur des surfaces jusqu'à 10 fois plus élevées que celle de leur l'exploitation. Ce travail peut concerner une intervention spécifique, telle que le semis ou la moisson, ou une prestation appelée A-à-Z, c'est-à-dire concernant l'ensemble des interventions à faire, de la préparation du sol jusqu'à la récolte, voire en intégrant les démarches administratives et décisionnelles. Les technologies numériques répondent également aux besoins de traçabilité et de standardisation des entreprises de travaux agricoles, qui interviennent parfois dans des dizaines d'exploitations différentes.

En outre, les résultats mettent en lumière le rôle de l'inscription dans les chaînes de valeur : les relations avec des semenciers, des coopératives, des négoces ou la contractualisation étant liés positivement à l'usage des TNP. Ces éléments montrent que des trajectoires de digitalisation sont impactées par les institutions associées à l'industrialisation de l'agriculture (conseil, formation, travail) et sont en interdépendance avec les mécanismes de transformation associés : agrandissement, sous-traitance, salariat, intensification.

Les trajectoires de digitalisation s'inscrivent ainsi dans des trajectoires technologiques que l'on peut qualifier d'écologisation faible, associées à des modèles économiques plus industriels. Les TNP sont en cohérence avec les exploitations qui ont une stratégie basée sur l'augmentation de la productivité et de l'efficience et sur la maximisation du rendement (Bronson, 2019), mais peu avec celles ayant des stratégies basées sur une diminution des intrants externes par les techniques agronomiques ou sur une diversification plutôt qu'une spécialisation. Les effets sur l'optimisation, reconnus pour certaines technologies telles que le guidage GPS, sont discutés par les utilisateurs d'autres technologies (modulation d'intrant, autres OAD). Ces avis mitigés des agriculteurs sur les effets environnementaux des technologies numériques ont déjà été mentionnés dans un travail réalisé en Allemagne (Knierim, Kernecker et al., 2019). Ces technologies répondraient alors plus à une logique de quantification, de traçabilité et de justification que de réelle optimisation, s'inscrivant alors dans une « écologisation symbolique » (Wolf et Wood, 1997).

Des usages des TNP minoritaires vers des pratiques d'écologisation plus fortes

Certains résultats amènent tout de même à nuancer notre première proposition, avec un usage important des TNP chez certains agriculteurs en agriculture biologique (AB) ou mixtes. On peut émettre l'hypothèse que le numérique permet à des agriculteurs qui étaient en conventionnel d'aller vers une production biologique en gardant un mode de travail un peu similaire :

engrais organique à la place d'engrais chimique, produits phytosanitaires autorisés en agriculture biologique (AB) plutôt que produits conventionnels, désherbage mécanique avec le binage de précision plutôt que chimique. Ainsi, les TNP seraient en cohérence non seulement avec des stratégies d'efficience, mais également avec des stratégies de substitution (Hill et MacRae, 1996 ; Lamine, 2011).

Le numérique apparaît comme un facteur favorisant une forme d'écologisation spécifique : le développement de l'agriculture biologique dans les exploitations industrielles. Cela fait écho à un débat politique et académique sur la 'conventionnalisation' de l'AB (Darnhofer et al., 2010 ; Le Velly et Dufeu, 2016 ; Stassart et Jamar, 2009) : le numérique pourrait être un accélérateur de cette conventionnalisation, au détriment d'une agriculture biologique plus radicale et sur de petites exploitations.

Par ailleurs, des usages de TNP sont parfois induits par d'autres pratiques qui peuvent être associées à de l'agroécologie. Par exemple, certains agriculteurs utilisent le guidage GPS pour mettre en place des techniques de semis sous couvert vivant. Cette technique consiste à venir semer une culture alors qu'une autre plante, appelée couvert, est déjà en place. Elle est mise en avant comme technique de gestion durable des sols, mais aussi pour limiter l'apport de traitements phytosanitaires et le temps de travail [6]. Le guidage est utilisé pour compenser la perte de visibilité liée à la présence du couvert végétal. D'autres utilisent du numérique afin de réaliser un désherbage mécanique, avec du guidage de précision ou avec l'aide de caméras. Ces technologies permettent aux agriculteurs de désherber au plus près des cultures en place. Un agriculteur utilisait également le guidage pour la mise en place de culture en bande, autrement appelé « strip-cropping », technique qui consiste à diviser une parcelle en bandes qui alternent deux ou plusieurs cultures, et qui limite l'érosion des sols et réduit les besoins en engrais (Francis, A. Jones et al., 1986).

Des usages des TNC pouvant accompagner de manière limitée l'écologisation des pratiques

Notre deuxième proposition nécessite également d'être précisée. L'utilisation d'internet apparaît à la fois comme une cause et une conséquence de changements de pratiques. Internet n'est pas forcément la forme privilégiée d'accès aux connaissances, mais permet de combler un manque d'information agroécologiques dans le réseau classique (organisation de conseil technique, voisins, famille) (Lucas, 2021). Les connaissances par internet ne semblent pas pouvoir remplacer complètement celles acquises oralement en face à face, voire même en obsrevation in situ, notamment pour des connaissances écologiques localisées et adaptatives (Burton et Riley, 2018). Ce sont d'ailleurs souvent des agriculteurs impliqués dans des groupes d'échanges de connaissances locaux qui mobilisent le plus l'information technique par internet. L'appartenance à des groupes d'agriculteurs peut être d'une part signe d'un intérêt pour l'innovation agronomique et technique. D'autre part, ce sont des sources d'informations qui peuvent être complémentaires, comme précisé

6. Pauline David, Chloé Descombe, Laurent Bedoussac. 2016. Semis direct sous couvert végétal : Définition. Dictionnaire d'Agroecologie, https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/semis-direct-sous-couvert-vegetal/

dans les entretiens : elles permettent de voir ce qui se fait ailleurs versus voir ce qui marche localement, voir un grand nombre d'information versus avoir des informations précises et adaptées au terrain.

Globalement, les résultats des enquêtes auprès des agriculteurs montrent que l'adoption et l'usage des technologies numériques n'apparaissent pas comme la résultante d'un comportement individuel dit 'pionnier', mais dépendent avant tout des modèles productifs agricoles, c'est-à-dire des pratiques agricoles, du travail et de la structure économique des exploitations, en interaction avec leur réseau socio-économique de conseil et de commercialisation qui leur propose, les incite, voire impose ces technologies. Ces résultats suggèrent des tendances et des dynamiques sur la trajectoire de digitalisation de l'agriculture.

La digitalisation : une trajectoire imposée, désirée ou contestée ?

Cette analyse transversale met en évidence des facteurs qui jouent sur la trajectoire de digitalisation de l'agriculture en France. Elle apparaît à la fois imposée aux agriculteurs qui se voient obligés de se digitaliser, désirée par des professionnels en quête d'un avenir meilleur, et contestée sur des aspects techniques, économiques, politiques ou environnementaux.

Influence de la régulation, des institutions et politiques publiques

Le développement du numérique dans le secteur agricole dans son ensemble est soutenu par des politiques publiques d'innovation. À l'échelle individuelle également, les enquêtes auprès des agriculteurs ont mis en évidence le rôle joué par les institutions sur la digitalisation. Premièrement, les exigences réglementaires ont été un point de départ à l'usage du numérique dans beaucoup d'exploitations. Les exigences comptables ont amené de nouvelles procédures de gestion, suivies par la « dématérialisation » de services publics et de procédures de déclaration (la télédéclaration pour la PAC devient obligatoire en 2016) et par des régulations diverses, telles que les obligations de traçabilité des pratiques (apports d'engrais ou de pesticides). Nos résultats montrent l'importance des réglementations environnementales, qui ont impulsé une dynamique de digitalisation, comme déjà évoqué dans la littérature (Koutsos et Menexes, 2017 ; Oui, 2021b). Les obligations de plans de fumure et la traçabilité des apports d'intrants ressortent en effet comme des éléments déclencheurs de l'adoption d'une technologie numérique centrale : le logiciel de gestion parcellaire.

La complexification des réglementations sur les pesticides s'ajoute à ces obligations : le numérique est devenu une manière d'avoir accès à cette information, qui est sans cesse en évolution. Le logiciel de gestion permet de connaître la réglementation et donc de pouvoir la mettre en œuvre. Cela amène des stratégies de contournement : ayant une alerte si les informations qu'ils rentrent ne concordent pas avec la réglementation, certains agriculteurs peuvent modifier les informations rentrées dans le logiciel. La technologie de modulation sert également des objectifs réglementaires puisqu'elle permet de justifier des « besoins » des plantes et donc d'un apport d'engrais pouvant dépasser le seuil de base autorisé. Les stations météo connectées

permettent également aux agriculteurs une traçabilité réglementaire. En effet, l'application de produits sanitaires est interdite si le vent est trop fort. L'enregistrement des données de l'anémomètre permet alors aux agriculteurs de justifier de leur droit d'appliquer un produit phytosanitaire à un moment où le vent était trop fort selon les données météo officielles, mais assez faible selon les données locales de la station météo. Le développement du numérique peut alors être vu comme une réponse aux exigences règlementaires. Cependant, la réglementation environnementale apparaît comme une demande de traçabilité et de justification plutôt que de changements réels de pratiques.

Par ailleurs, la régulation des pratiques agricoles n'est pas seulement le fait de normes et politiques publique. En effet, la régulation contemporaine du secteur agri-alimentaire résulte de l'imbrication de dispositifs de régulation publics et privés (Touzard et Labarthe, 2016). Ainsi, des normes techniques imposées par des industries agroalimentaires ou acheteurs, peuvent impacter fortement les pratiques de production agricole et leurs justification (Cholez, Magrini et Galliano, 2017). Dans la même logique de quantification, normalisation et traçabilité que suscitent les réglementations, mes résultats montrent que les normes privées peuvent inciter voire obliger l'usage du numérique. Par exemple, des contrats pour la filière blé, avec des industries agroalimentaires, imposent l'utilisation de la technologie de modulation d'engrais. De même, des semenciers imposent contractuellement l'utilisation de technologies de modulation d'engrais ou de technologies d'irrigation aux producteurs de semences. Cela confirme des hypothèses évoquées dans la littérature sur le fait que les standards privés pouvaient devenir des facteurs de digitalisation (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020).

Plusieurs éléments concourent au développement de cette normalisation et de la digitalisation associée. D'une part, l'usage du numérique offre des sources de données, précieuses pour les industries d'amont et d'aval. Ces données peuvent permettre un contrôle accru de la production, la vente de services basés sur les données aux agriculteurs, l'anticipation et la gestion de la production etc. Pour les industries d'aval, les données peuvent être valorisées, par exemple avec des labels ou des QR code, afin de segmenter le marché, d'ajouter de la valeur ajoutée au produit, en créant une rente de différenciation et une crédibilité grâce à la traçabilité (Valceschini, 2006). Cette traçabilité n'est pas forcément associée à des changements de pratiques, mais devient en soi une qualité valorisée sur le marché, que l'on pourrait appeler « qualité traçabilité » ou « qualité informationnelle ».

Ainsi, la digitalisation résulte en partie d'évolutions des dispositifs de régulation à la fois publics et privés. De ce fait, lors des entretiens, plusieurs agriculteurs percevaient la digitalisation de leur métier comme une obligation à laquelle ils étaient soumis plus qu'à un choix technologique. Bien que l'évolution des dispositifs de régulation soit identifiée comme un facteur de digitalisation par toutes les organisations du système d'innovation, à l'échelle des exploitations, cela semble encore plus le cas pour celles en conventionnel. D'une part le mode de production conventionnel implique l'utilisation de produits plus exigents en terme de traçabilité. D'ailleurs, 22% des agriculteurs conventionnel trouvent un avantage dans le fait d'avoir des technologies numériques pour respecter les exigences réglementaires ou de

traçabilité, contre 7% en bio. D'autre part, les filières aval qui poussent à l'usage du numérique semblent concerner en majorité les filières biologiques.

Des agriculteurs investis et moteurs dans le développement du numérique

Mais la digitalisation dans les exploitations n'est pas induite uniquement par les régulations. Elle est aussi mise en œuvre et développée pour d'autres objectifs et est porteuse d'espoirs pour certains agriculteurs. Tout d'abord, la majorité y voient déjà des avantages : le gain de temps (mentionné par 33% des agriculteurs de mon échantillon), l'accès à de l'information ou la communication (26% ; mais par 40% de ceux en agriculture biologique (AB) ou mixte) et la simplicité (23% ; 11% en AB), mais aussi l'aspect réglementaire (19% ; 7% en AB), le confort et la praticité (19%), la précision et la technicité (16%), les économies (10% ; 4% en AB), la vente, la production (rendement ou qualité) ou encore l'analyse et la compréhension de leur système. Ces avantages correspondent à ceux mis en évidence dans des travaux en Allemagne (Knierim, Kernecker et al., 2019) et plus globalement en Europe (Kernecker et al., 2020). De plus, certains agriculteurs enquêtés voient des potentiels au développement du numérique dans leur secteur d'activité. Pour certains, le numérique « *est l'avenir et offrira des possibilités infinies à l'agriculture* »[7]. Pour ceux-là, le numérique va permettre une meilleure rentabilité des exploitations, de meilleures conditions de travail et un meilleur respect de l'environnement. Au contraire, d'autres (16%) ne voient aucun potentiel, trouvant que « *l'évolution dans ce domaine est déjà allée trop loin* »[8]. Pour beaucoup, le numérique pourrait avoir des potentiels pour l'agriculture mais avec des limites. Il permettrait de moduler et d'économiser des intrants et donc d'amener un bénéfice à la fois économique et environnemental, pourrait améliorer les conditions de travail en augmentant le confort de travail ou la suppression ou simplification de tâches répétitives, accéder à de l'information, donner une bonne image de l'agriculture à la société, mieux analyser le fonctionnement de leur système et de progresser en termes agronomique. Quelques-uns mentionnent la robotique comme pouvant apporter des bénéfices à l'agriculture. Ces potentiels sont parfois mis en perspective avec les conséquences à plus long terme qu'ils peuvent entraîner : par exemple le gain de temps lié au numérique pourrait être utilisé pour d'autres activités ou encore le confort de travail lié au numérique permettrait de travailler plus longtemps.

Le numérique représente ainsi un attrait pour certains agriculteurs, dont une partie est intéressée par le côté technologique de l'agriculture, la perspective d'« *être moderne* », ou parce qu'ils « *aiment les gadgets* ». Certains s'investissement dans ce développement. Par exemple, plusieurs des enquêtés se sont proposés pour tester des technologies pour leur coopérative, confirmant là aussi des dynamiques mises en évidence en Allemagne (Knierim, Kernecker et al., 2019). Je montre un autre type d'investissement d'agriculteurs dans la digitalisation : le rôle de communication et de formation auprès de leurs collègues, au service d'entreprises du numérique agricole. En échange de l'accès gratuit à des logiciels, ces agriculteurs en faisaient la promotion et aidaient ceux qui souscrivaient à l'offre à mettre en place ces logiciels.

7. mentionné par un agriculteur des profils TNP_moyen et TNC_reseaux
8. mentionné par un agriculteur des profils TNP_moyen et TNC_non

Les avantages du numérique perçus par les agriculteurs diffèrent en partie entre ceux en agriculture biologique et ceux en conventionnel, notamment en ce qui concerne les économies, la simplicité, la traçabilité, la précision (plus mentionnés par les agriculteurs en conventionnel), ou l'accès à l'information et la vente (plus mentionnés par les agriculteurs en AB). En revanche les potentiels perçus sont relativement similaires.

Malgré un attrait pour ces technologies, certains reconnaissent que ces technologies ont parfois un côté superflu. D'autres, déçus par les tests effectués par la coopérative, ont même décidé d'abandonner des technologies. Des critiques voire des oppositions au numérique se manifestent chez une partie des agriculteurs.

Des oppositions au numérique

La majorité des agriculteurs enquêtés voient des inconvénients à l'usage du numérique dans leurs exploitations. L'inconvénient le plus cité est le coût des équipements numérique (41%), ce qui confirme la littérature sur le sujet (Kernecker et al., 2020 ; Knierim, Kernecker et al., 2019). Mes résultats montrent que les agriculteurs mentionnent d'autres inconvénients, tels que le temps consacré à l'utilisation du numérique (21%), les problèmes de bugs, de pannes, de compatibilité (19%) et les soucis pour réparer ces outils (11%). Les agriculteurs y voient aussi des problèmes pour se former et être compétent (17%), ainsi que des possibilités d'appropriation des données personnelles ou de surveillance (10%). Cette évolution est vue comme allant trop vite et les outils sont vite obsolètes. De plus certains mentionnent le fait que cela « *nuit au relationnel, au dialogue* ». Le numérique est parfois vu comme non adapté aux tailles des exploitations, mais aussi, par les agriculteurs en AB, aux conditions locales, ou à l'agriculture biologique.

Les agriculteurs, qu'ils soient utilisateurs ou non de technologies numériques, perçoivent de nombreux risques associés à leur développement. Le premier risque est lié aux données, mentionné par un tiers des enquêtés : les données pourraient être piratées ou appropriées par les entreprises du numérique, facteur qui peut jouer sur la non utilisation de certaines technologies numériques (Briggeman et Whitacre, 2010). Ainsi, ils sont plusieurs (17%) à citer des risques de surveillance, de contrôle. De plus, plusieurs critiquent les risques de dépendance amené par le numérique : dépendance aux technologies numériques mais aussi au réseau, à l'industrie agricole ou à leur coopérative. Ces risques de dépendance sont largement plus mentionnés chez les agriculteurs en AB (environ 1/3) que chez les agriculteurs en conventionnel (environ 10%). Les agriculteurs évoquent les risques liés au fait qu'ils ne vont plus être en capacité de réparer le matériel, trop complexe avec le numérique, et que les technologies numériques seraient vite obsolescentes ou abîmées au contact de la poussière, l'humidité etc. Par ailleurs, certains voient des risques liés à la perte de savoir-faire, de sens du terrain et de l'observation, notamment pour ne pas appliquer des conseils sans prise de recul personnel. Ces risques sur le contrôle, la capacité à réparer ou sur la perte de connaissances ressortent également dans la littérature an Angleterre (Barrett et Rose, 2020), ou en Australie (Jakku, Taylor, Fleming, Mason, Fielke et al., 2019). En termes d'évolution du secteur, certains craignent que cela accentue l'agrandissement et la concentration des exploitations, nuise

à l'emploi agricole, et exclue une partie de la population agricole (qui n'a pas les compétences, ou sur des zones moins productives et donc ne pouvant pas se permettre d'investir dans ce type de technologies). En effet, le coût des technologies, et l'endettement et le surinvestissement associés, sont vus comme un risque majeur. Certains, et notamment les agriculteurs en AB, indiquent des risques de perte « *de relationnel* » (notamment avec les conseillers). Des agriculteurs en AB évoquent aussi les risques sur l'environnement, liés à l'énergie nécessaire pour le fonctionnement du numérique ainsi qu'aux métaux utilisés pour la construction de ces technologies. Les discours des agriculteurs donnent également à voir des risques de perte de sens, de changement de métier : cela pourrait les rendre comme de simples « *exécutants* », ou les « *faire encore plus travailler au bureau* ». Concernant les réseaux sociaux, les risques d'agribashing, de diffusion de données sont aussi régulièrement mentionnés.

Les risques perçus sont donc assez divers et le sont donc à la fois chez les agriculteurs en conventionnel et ceux en agriculture biologique. Ces derniers mettent toutefois plus en avant trois risques : le risque de dépendance, le risque de perte de relationnel et le risque d'impacter l'environnement via l'utilisation d'énergie et de matériaux. Au-delà d'oppositions individuelles, retrouvées dans nos enquêtes, des critiques envers la digitalisation de l'agriculture sont formulées à l'échelle collective par des organisations et syndicats agricoles tels que l'Atelier Paysan (2021) ou la Confédération Paysanne (2021). Mais aussi par des associations environnementales (Réseau Action Climat, 2020), des journalistes (Reinert, 2022 ; Tardieu, 2017) ou d'autres acteurs du secteur (Aspexit, 2021).

Apports et perspectives

Cette analyse des usages du numérique dans les exploitations agricoles révèle des mécanismes qui jouent sur la dynamique de transformation du système d'innovation agricole et vient apporter un ensemble d'éléments complémentaires à l'analyse réalisée dans le chapitre précédent. Conformément aux résultats de mes analyses à l'échelle du système d'innovation, les enquêtes à l'échelle des exploitations montrent que le type d'écologisation joue sur le type d'usage du numérique. En effet, certaines technologies numériques apparaissent plus avantageuses pour des exploitations spécialisées, en conventionnel. Ainsi, on constate des divergences entre les usages du numérique par les agriculteurs en agriculture biologique ou en conventionnel qui peuvent liés à des différences en terme de raisonnement et logique (reconception et diversification versus optimisation et simplification), d'intrants utilisés (organiques ou de synthèse), de régulations et de système socioéconomique. En revanche, on retrouve des attentes et des risques plutôt partagés par l'ensemble des agriculteurs. Les agriculteurs espèrent du numérique un outil de gain de temps et de confort, d'économie et d'accès à de l'information et des connaissances. Ils appréhendent par contre l'appropriation des données par les entreprises, la surveillance et le contrôle, les coûts et la perte de capacité pour réparer le matériel. Les agriculteurs en production biologique rajoutent des risques de dépendance, de perte de relationnel et d'impact environnemental. L'analyse de ce chapitre montre que les usages

du numérique sont également liés à d'autres facteurs de différentiation et semblent renforcer les transformations en cours que sont l'agrandissement des exploitations, la place croissante de la main-d'œuvre salariée et de la sous-traitance, ou la spécialisation. Ainsi, ces usages renforcent des clivages entre modèles agricoles et accroissent les différenciations, ce qui pourrait accentuer des phénomènes de verrouillage (Bronson, 2019 ; Clapp et Ruder, 2020).

Cependant, l'analyse des usages du numérique montre aussi des formes de décloisonnement ou d'hybridations entre paradigmes. Les usages des TNC notamment semblent constituer des communautés d'échanges de connaissances au-delà des frontières organisationnelles classiques. Les profils mixtes, combinant agriculture biologique et conventionnelle, qui utilisent beaucoup de TNP, constituent également une forme d'hybridation nouvelle. Les technologies apparaissent alors comme un artefact qui vient faciliter l'hybridation de pratiques issues de l'agriculture biologique à celles de l'agriculture conventionnelle. Des formes de bricolages et d'ajustement forment aussi des mises en cohérence entre la digitalisation et l'écologisation forte des exploitations. La construction de ces interactions peuvent participer au changement graduel des institutions (Mahoney et Thelen, 2009), et pourrait ainsi mener à de nouvelles formes d'hybridations entre modèles. Cela pourrait à l'opposé renforcer l'intégration de composantes de modèles alternatifs dans le modèle dominant, pour faire face aux critiques et renforcer sa légitimité (Beus et Dunlap, 1990).

Mes enquêtes donnent à voir la digitalisation de l'agriculture « en train de se faire ». L'article écrit à partir de celles-ci permet d'avoir une représentation assez générale des dynamiques à l'œuvre avec la digitalisation. Ces données de terrain pourraient être valorisées par des analyses complémentaires et des articles scientifiques associés, notamment sur les usages détaillés du numérique et leurs impacts sur les pratiques agricoles et agroécologiques, sur les liens entre perceptions du numérique et usages du numérique ou entre perceptions et paradigmes. Il serait également intéressant de mieux analyser les dynamiques liées aux usages de ces technologies : apprentissages, appropriation, effets de dépendance au sentier, afin de creuser leurs interactions avec l'écologisation de l'agriculture. En outre, ces données complétées par d'autres analyses, pourraient être mobilisées dans une réflexion sur les impacts micro-économiques des usages de ces technologies : quels sont leurs effets sur les résultats économiques des exploitations et les revenus des agriculteurs ?

Enfin, les résultats de ce travail de terrain soulignent là encore le rôle d'acteurs intermédiaires. L'analyse des réseaux égocentrés des agriculteurs, indique leur insertion dans le système d'innovation, signale des organisations ou acteurs qui influent sur les usages du numérique : entreprises du réseau de commercialisation comme les coopératives agricoles, organismes de conseil comme les chambres d'agriculture, ou encore groupes professionnels (syndicats, CUMA, GIEE etc.). Les acteurs intermédiaires semblent donc jouer un rôle clé dans la diffusion de technologies, mais aussi dans l'information, la formation, le test, l'évaluation, le développement. Cela invite à approfondir le rôle qu'ils jouent et comment la digitalisation transforme ces acteurs, en prenant ou non en compte les enjeux de l'écologisation. Cette question est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5

5

LE RÔLE DES COOPÉRATIVES DANS LE DÉVELOPPEMENT DU NUMÉRIQUE

Introduction du chapitre

Les interactions entre digitalisation et écologisation se jouent à la fois à l'échelle du système d'innovation et à celle des pratiques individuelles. Ces dernières peuvent être vues comme « encastrées » dans le système d'innovation (Cooke, Uranga et Etxebarria, 1997 ; Klerkx, Van Mierlo et Leeuwis, 2012 ; Spielman, Ekboir et Davis, 2009). Celui-ci les impactent par une diversité de mécanismes économiques, institutionnels, relationnels ou cognitifs : contraintes réglementaires (politiques publiques) ou incitations liées aux marchés amont (prix et accès aux technologies) et aval (contrats, demande...), normes et représentations véhiculées, connaissances techniques portées par la formation ou la recherche, réseaux de relations entre acteurs, etc. Les intermédiaires peuvent être définis comme des organisations, ou entités, qui établissent des liens entre deux ou plusieurs parties, à une étape d'un processus d'innovation, participent à ces mécanismes (Howells, 2006). Ils font le lien entre les différentes échelles du système d'innovation. Dans le secteur agricole, les intermédiaires sont vus comme centraux dans les processus d'innovation et sont largement étudiés dans la littérature (Touzard, Temple et al., 2014). Plusieurs types d'organisations peuvent jouer le rôle d'intermédiaire : organisations de producteurs, coopératives, consultants privés, réseaux d'entreprises, organismes de transfert de la recherche, de formation, de conseil et même plateforme numérique (Klerkx et Leeuwis, 2009).

Les coopératives agricoles sont un intermédiaire majeur du secteur agricole. Elles correspondent à un regroupement de producteurs, et donc participent à représenter ceux-ci dans les interactions politiques ou économiques, et à mettre en commun des ressources. Elles sont également une interface marchande, articulant production et commercialisation, en bénéficiant d'économies d'échelles technologiques et commerciales. Par ailleurs, elles jouent un rôle clé dans le transfert de connaissances, de mise en œuvre et d'accompagnement des politiques publiques. Elles sont notamment centrales dans le conseil technique aux agriculteurs (Laurent, Nguyen et al., 2021), à tel point qu'elles ont été l'objet de débats spécifiques concernant la séparation de leur fonction de vente et de conseil sur les produits phytosanitaires (Chomel, 2019). Pourtant, relativement peu d'études se concentrent sur les coopératives et leur fonction d'intermédiaire dans le système d'innovation (Filippi et al., 2015). Les intermédiaires agricoles, et notamment les coopératives, ont eu un rôle majeur dans les transformations historiques du secteur agricole et sont remises en avant pour faire face aux nouveaux enjeux de transition écologique mais aussi de digitalisation de l'agriculture.

Ce chapitre vise à comprendre le rôle des organisations coopératives dans ces transformations et dans leur articulation. Il se base sur un article soumis à la Revue Internationale de l'Economie Sociale (*RECMA*) en Avril 2022.

Cette introduction vise à contextualiser cet article et compléter la perspective théorique. Suite à l'article, une section conclusive précise les contributions de l'article aux travaux sur les caves coopératives, revient sur la diversité des caves coopératives dans ces processus et discute ces résultats au regard de résultats complémentaires sur les coopératives en grandes cultures.

Contexte et historique de l'article

Durant la thèse, deux filières avaient été ciblées : grandes cultures et viticulture. Elles apparaissaient à la fois intéressantes et complémentaires pour étudier la digitalisation et l'écologisation. Ces filières se distinguent notamment par le mode de production (culture annuelle / culture pérenne), les marchés ciblés (produits de base majoritairement / produits de qualité liée à l'origine), les enjeux d'écologisation, l'organisation du travail, les structures d'exploitation etc. La filière grandes cultures est une filière dans laquelle des technologies numériques sont développées et utilisées depuis longtemps (notamment avec les technologies d'« agriculture de précision »), et qui fait l'objet de travaux nombreux sur le sujet (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). En viticulture, les usages du numérique tout comme les travaux sur le sujet sont plus rares et plus récents (Moreiro, 2017). Ces deux filières, importantes en région Occitanie, nous permettaient donc de couvrir deux situations contrastées, d'élargir nos analyses, de saisir des spécificités pouvant être liées à des productions différentes au sein du secteur agricole.

La phase de terrain auprès des agriculteurs en grandes cultures devait être suivie, à partir d'avril 2020, d'une phase de terrain équivalente avec des viticulteurs. Cette phase de terrain devait se faire en collaboration avec une personne en stage de fin d'études ingénieur ou Master. Plusieurs changements ont été effectués dans le contexte de crise sanitaire liée au Covid-19. Premièrement, le stage a été réorienté vers un travail bibliographique plus important, et un travail de terrain réduit. Deuxièmement, la phase de terrain a été raccourcie entre les confinements et la période de vendanges, une période durant laquelle les viticulteurs et salariés des caves coopératives sont très occupés. Au-delà de cette phase de terrain réduite, les entretiens avec les responsables de caves coopératives et avec les viticulteurs ont montré que les usages du numérique à l'échelle des exploitations viticoles étaient assez peu nombreux, et par contre plutôt liés à des démarches collectives en lien avec les caves coopératives. Ainsi, alors que les résultats des chapitres 3 et 4 pointaient globalement le rôle des coopératives agricoles dans la digitalisation, le terrain viticole soulignait leur place centrale dans cette filière, avec des projets en cours, souvent récents et en débat, donc particulièrement intéressants à étudier. Pour ces différentes raisons, j'ai décidé d'orienter l'analyse du terrain viticole sur le rôle des caves coopératives.

Nous avons donc revu l'organisation de nos enquêtes en maintenant des entretiens auprès des viticulteurs (43 en tout), adaptant le questionnaire développé dans le chapitre 4, mais en les répartissant selon une sélection de caves coopératives (8) dont les responsables et salariés ont fait l'objet d'entretiens spécifiques. J'ai donc analysé les données issues des entretiens avec les responsables de caves coopératives et les viticulteurs, dans la perspective de préciser le rôle de ces organisations comme intermédiaires pour les processus de digitalisation et d'écologisation, au sein du système sectoriel d'innovation.

J'ai rédigé un premier résumé sur cette question pour une session spéciale sur les coopératives dans la digitalisation de l'agriculture pour le colloque *SFER Agriculture & Numérique*, prévu en Mars 2021 (qui a finalement été décalé en Mars 2022). Nous avons ensuite rédigé l'article présenté ici pour le soumettre à la revue *RECMA*, une revue francophone reconnue depuis longtemps pour ses publications sur les coopératives.

Les résultats de cet article ont fait l'objet d'une présentation au colloque thématique Agriculture Numérique de la SFER en Mars 2022. De plus, une première analyse a été effectuée et a fait l'objet de la rédaction d'un article, suite à une demande pour la revue Cahiers du Développement Coopératif, disponible en Annexe 10. Ces cahiers sont le fruit d'une collaboration entre la FNCUMA et La Coopération Agricole, et la thématique de cette année porte sur le conseil agricole.

Les intermédiaires dans les systèmes et processus d'innovation

Intermédiaires dans les systèmes d'innovation

Un intermédiaire d'innovation est défini comme « *une organisation, ou entité, qui établit des liens entre deux ou plusieurs parties, à toute étape d'un processus d'innovation. Les activités intermédiaires comprennent : l'aide à la fourniture d'informations sur les collaborateurs potentiels ; la négociation d'une transaction entre deux ou plusieurs parties ; le rôle de médiateur ou d'intermédiaire entre des organismes ou des organisations qui collaborent déjà ; et l'aide à la recherche de conseils, de financement et d'accompagnement pour la mise en œuvre d'innovations issues de ces collaborations* » (traduit de Howells, 2006, p.720). Ce rôle d'« intermédiaire » peut être central ou secondaire par rapport à d'autres fonctions de l'organisation (Klerkx et Leeuwis, 2009). Ces auteurs identifient trois grandes composantes de la fonction d'intermédiation : i) identifier et articuler les besoins en innovation ; ii) former des réseaux et faciliter les liens entre acteurs ; et iii) gérer les processus d'innovation (diffuser des connaissances et technologies, orienter la recherche, mobiliser des ressources, créer une légitimité, éviter des résistances au changement).

L'importance de ces organisations intermédiaires pour l'innovation a été mise en avant (Howells, 2006), et notamment en agriculture (Klerkx et Leeuwis, 2008). Elles semblent jouer ou pouvoir jouer un rôle central pour répondre aux nouveaux enjeux d'écologisation (Kivimaa et al., 2019 ; Van Lente, W. P. Boon et Klerkx, 2020) mais aussi de digitalisation (Eastwood, Chapman et Paine, 2012 ; Newton, Nettle et Pryce, 2020), dans un contexte de privatisation de ces organisations (Labarthe, 2009). Se pose alors la question de la transformation du rôle de ces intermédiaires par la digitalisation et l'écologisation, et de l'articulation de ces deux processus par ces organisations.

Les coopératives comme intermédiaires clés du système d'innovation agricole français

L'alliance coopérative internationale définit une coopérative comme « *une association autonome de personnes unies volontairement pour répondre à leurs besoins et aspirations économiques, sociaux et culturels communs par le biais d'une entreprise détenue conjointement et contrôlée démocratiquement* » (ACI, 1995). Dès le XIXème siècle en Europe, des coopératives agricoles se développent et permettent

aux agriculteurs d'améliorer leur pouvoir de négociation, d'éviter certains intermédiaires, d'accéder à des marchés, des produits ou des services, de réduire les coûts grâce à des économies d'échelle, de contrôler la qualité mais aussi de gérer et mutualiser les risques (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012 ; Ortmann et King, 2007). Au départ, les principes éthiques d'auto-organisation et d'assistance mutuelle sont centraux et visent notamment à lutter contre la domination économique, sociale et politique de négociants ou d'agriculteurs importants (grands domaines viticoles par exemple). Les coopératives, leurs rôles et raisons d'être ont évolué et elles ont accompagné la modernisation et la production de masse, la gestion des crises, l'internationalisation et la diversification (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012 ; Valiorgue, Bargues et Hollandts, 2020). Peu à peu, elles ont alors endossé un rôle politique de co-gestion avec l'État et un rôle technique, notamment par la mise en place de R&D, de conseil et de formation.

Aujourd'hui, les coopératives apparaissent comme des organisations centrales dans la fourniture de services de conseil aux agriculteurs (Laurent, Nguyen et al., 2021). Pourtant, elles sont peu étudiées comme intermédiaire d'innovation. Le travail de Yang, Klerkx et Leeuwis (2014) montre qu'à travers leur position d'organisation collective, elles permettent de générer des connaissances contextualisées et intégrées, adaptées aux réalités complexes des exploitations et des pratiques. À travers leur multi-fonctionnalité, elles permettent de combiner les dimensions techniques, économiques et sociales des innovations. Cependant, en tant qu'organisation économique et politique, elles sont aussi critiquées pour l'existence possible de conflits d'intérêt, en particulier entre des fonctions de vente d'intrants et de conseil, ne cherchant pas forcément à en réduire l'usage pour l'écologisation (Chomel, 2019). Portant les intérêts de (la majorité de) leurs adhérents, elles ne seraient pour autant pas des intermédiaires « neutres » au regard d'enjeux sectoriels (Yang, Klerkx et Leeuwis, 2014).

Au-delà de ce rôle d'intermédiaire, les coopératives ont en effet la particularité d'être des organisations collectives fondées sur des principes démocratiques, et propriétés d'agriculteurs adhérents qui en sont aussi les fournisseurs (coopérative de collecte et commercialisation), les usagers (coopératives d'approvisionnement, de service) ou les deux (coopératives polyvalentes). Les relations entre les agriculteurs adhérents et leur coopérative doivent donc s'analyser comme un système d'interactions (complexe, original) entre acteurs. Elles sont donc caractérisées par des dispositifs de gouvernance (Saïsset, 2021) et de coordination des activités, et sont cadrées par une législation et un droit spécifique aux coopératives agricoles, mais aussi par des interactions sociales moins formelles entre agriculteurs adhérents (et souvent voisins) et entre ceux-ci et d'autres acteurs des territoires (Chiffoleau, 2005 ; Touzard et Draperi, 2003).

Comme institution aussi bien que comme système d'interaction entre acteurs, la coopérative est une organisation dynamique, en évolution constante. Cette évolution résulte à la fois des transformations internes et externes à la coopérative. Ainsi, reprenant l'analyse de M. Cook (2018), les coopératives suivraient des cycles constitués i) d'une phase d'émergence, où des acteurs font converger leurs intérêts, portent un projet et décident de la justification de la coopération, puis ii) d'une phase de design organisationnel où le fonctionnement de la coopérative se définit concrètement, s'ajuste. Suivrait

alors iii) une phase de croissance, au cours de laquelle des hétérogénéités, divergences d'intérêt apparaîtraient, créant des frictions, des problèmes de coordination liés à des portefeuilles de production différents, des situations de « passagers clandestins » ou d'horizons d'activité variables, différenciant les gains attendus des investissements de la coopérative, incitant certains membres à sortir de l'organisation. La coopérative entrerait alors iv) dans une phase d'analyse des frictions, de résolution de ces problèmes de coordination, débouchant sur plusieurs issues possibles : la crise pouvant conduire à l'arrêt, la fusion ou l'absorption par une autre organisation, le maintien grâce à l'ajustement du projet et des règles internes, ou encore la restructuration plus globale pouvant aller jusqu'à une modification des statuts de l'organisation (par exemple la pondération des voix, la création d'une filiale, ou, aux USA, la création de « nouvelle coopérative » avec par exemple l'ouverture du capital à des non coopérateurs). La digitalisation et l'écologisation peuvent venir intervenir dans ces cycles en modifiant les justifications de la coopération et surtout les hétérogénéités entre adhérents, les différences de capacité, de projets et d'intérêts au regard de ces deux processus.

Avec la digitalisation et l'écologisation, se pose en effet la question de l'évolution des « raisons d'être » des coopératives, de leurs activités de conseil, mais également de leurs transformations internes, et leurs capacités à répondre pour leurs adhérents aux nouvelles « frictions » et problèmes posés par les différenciations associées à ces deux processus. En effet, la digitalisation et l'écologisation peuvent modifier à la fois le système d'acteurs intermédiaires au sein du système d'innovation, impactant notamment les dispositifs d'échanges de connaissances et de conseil (Fielke, Taylor et Jakku, 2020 ; Kivimaa et al., 2019 ; Labarthe, 2009), et les dispositifs internes de gouvernance des coopératives (Duvaleix-Tréguer, Ledos et Lepetit, 2019).

Opérationnalisation

Afin d'analyser les transformations des rôles et positionnements des caves coopératives avec les processus de digitalisation et d'écologisation, nous avons donc choisi d'étudier la coopérative à la fois comme institution d'un système d'innovation, et comme un système d'interaction entre acteurs, une double dimension dont je précise ici l'opérationnalisation.

Implications pour la collecte des données

Terrain

Le secteur viticole apparaissait donc comme une filière pertinente pour étudier le rôle des coopératives, comme organisations collectives et intermédiaires du système d'innovation agricole. Le choix a été fait de rester sur une même zone administrative : la région Occitanie. D'une part cela permettait d'étudier une autre filière mais dans un contexte institutionnel territorial similaire. D'autre part, la région Occitanie dispose du premier vignoble national (environ 270 000Ha) (Chambre d'agriculture Occitanie, 2021). De plus, elle est la première région française en termes de surfaces viticoles bio (34 827Ha, soit 37% des surfaces françaises en 2018). Les productions recouvrent une diversité de marchés (appellations, IGP, marché national, export).

Pour choisir les terrains, j'ai procédé en plusieurs étapes. En premier lieu, j'ai échangé avec une responsable du secteur viticole chez Coop de France Occitanie. Cet échange a été l'occasion de discuter des enjeux et questionnements de la filière, et d'identifier des coopératives aux profils divers au regard du développement du numérique et de l'engagement dans des projets et productions préservant l'environnement (bio, viticulture raisonnée, Haute Valeur Environnementale (HVE)...). La personne de Coop de France m'a communiqué une liste de 18 caves-coopératives illustrant cette diversité de profils, en indiquant leur zone géographique, les surfaces et volumes produits, le nombre d'adhérents et quelques commentaires sur les projets de la coopérative (certifications, projets européens, utilisation de technologies numériques). J'ai alors contacté ces coopératives en cherchant à avoir un échantillon diversifié, en termes de taille de structure et de type de production. Huit coopératives ont été retenues au final (échantillon décrit dans l'article). La méthode repose sur une série d'entretiens réalisés en 2020 auprès de responsables de ces caves-coopératives viticoles (directeurs/directrices ou responsables viticoles) ainsi que de viticulteurs et viticultrices adhérents à ces caves coopératives (entre 4 et 10 adhérents par coopérative, 43 au total). Par ailleurs, 11 entretiens ont été réalisés dans des domaines viticoles géographiquement proches de ces coopératives à titre de compréhension du contexte, mais n'ont pas été intégrés dans l'analyse.

Choix des adhérents

Comme pour les agriculteurs ayant des grandes cultures, j'ai cherché à rencontrer une diversité de profils de viticulteurs adhérents aux coopératives enquêtées, à la fois en termes de mode de production que d'usage du numérique. Le choix s'est effectué à la suite des entretiens avec les responsables des coopératives, ce qui a pu introduire un biais (adhérents plutôt en accord avec la direction de la coopérative) même si nous avons à chaque fois insisté pour couvrir une diversité de situations, avec des adhérents proches du conseil d'administration et d'autres moins.

Stage

Une partie du terrain a été fait en collaboration avec une stagiaire en Master 2 Gestion des territoires, Isabelle Macaine. Celle-ci a assisté aux entretiens avec les responsables de caves-coopératives et co-mené deux d'entre eux. Après plusieurs entretiens réalisés avec moi, elle a fait 13 entretiens avec des viticulteurs en face à face.

Entretiens

Les entretiens avec les responsables de cave-coopératives portaient sur i) l'organisation de la coopérative (taille, production, commercialisation, gouvernance) ; ii) l'engagement dans des projets liés à l'agroécologie ; iii) les activités liées au numérique dans la coopérative ; et iv) les usages du numérique par les viticulteurs et perceptions des personnes enquêtées. La grille d'entretien est disponible en Annexe 8.

Implications pour l'analyse

L'analyse de ces données s'est faite en plusieurs étapes, en suivant une méthode qualitative, de catégorisation, de croisement d'information au sein

de chaque coopérative et d'attention portée aux justifications et explications apportées par les interviewés. Dans un premier temps, pour chacune des coopératives, nous avons identifié chaque projet lié à l'écologisation ou à la digitalisation. Pour chacun des projets, nous avons répertorié la date de début, les partenaires, les motivations, les freins & limites, le fonctionnement, les avantages et inconvénients perçus. Par la suite, une analyse globale des projets des coopératives a permis d'identifier les domaines et objets d'action, pour l'écologisation ou la digitalisation. Cela a permis de resituer ces processus dans les différentes stratégies des coopératives. Pour comprendre ces stratégies, nous avons identifié les acteurs impliqués, explicité les logiques d'action et les fonctions des caves coopératives. Nous avons identifié le rôle de la coopérative et ses transformations à la fois comme interface marchande et comme organisation de coordination entre acteurs.

À l'échelle des viticulteurs, j'ai adapté le questionnaire élaboré pour les agriculteurs en grande culture, en développant davantage les questions sur leurs relations à la coopérative. Les données issues des entretiens ont été entrées dans une base de données. Cela a permis d'informer les stratégies d'écologisation et de digitalisation à leur échelle, et de les relier aux stratégies des caves coopératives. Nous avons aussi identifié les perceptions des viticulteurs sur la place de leur coopérative à la fois pour les projets d'écologisation et de digitalisation.

Le processus s'est fait de manière itérative, avec des phases de travail individuel et des phases de discussion avec les auteurs de l'article.

Enjeux pour la thèse

Les chapitres d'analyse à l'échelle du système d'innovation (Chapitre 3) et à celle des pratiques des agriculteurs (Chapitre 4) ont fait ressortir l'importance des coopératives pour diffuser des technologies, former les agriculteurs et les accompagner, proposer des services sur la base de technologies numériques ou encore faire le lien avec les acteurs de l'aval. Il paraissait donc important d'approfondir leur rôle dans la digitalisation et dans son articulation avec l'écologisation (Cf Figure 5.1). En effet les coopératives se retrouvent au croisement des transformations des connaissances, des politiques publiques, de l'accès aux technologies mais aussi du suivi (ou parfois contrôle) des pratiques des agriculteurs, à la fois pour la dimension de la digitalisation et pour celle de l'écologisation. Elles sont aussi en lien avec les différents acteurs du système d'innovation (instituts de recherche, instituts techniques, chambres d'agriculture etc.) et doivent répondre aux exigences des acteurs de l'aval (agro-industri, grande distribution, négociants etc.). Cela questionne comment leur rôle évolue dans ces deux transformations, et comment elles participent à leur articulation. Notre travail soulève en effet plusieurs questions : Comment les coopératives agricoles mettent en œuvre la digitalisation ? Est-ce que cette mise en œuvre dépend de, ou impacte, les activités liées à l'écologisation des pratiques des adhérents ? Est-ce que la digitalisation et l'écologisation modifient leurs raisons d'être ? Est-ce qu'elles transforment leur organisation et leur gouvernance ?

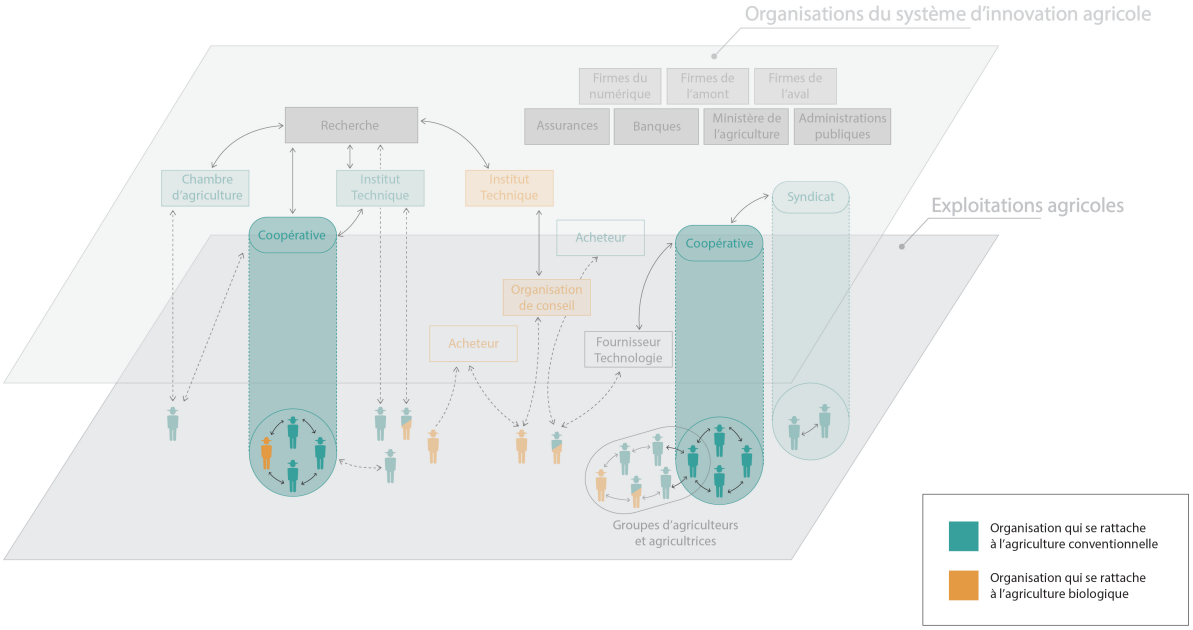


FIGURE 5.1 – Visualisation de l'échelle d'analyse du chapitre 5 par rapport à l'approche globale de la thèse

Article

Les coopératives face aux enjeux d'écologisation et de numérisation dans l'agriculture : l'exemple des caves coopératives en Occitanie
Schnebelin Éléonore, Touzard Jean-Marc, Labarthe Pierre, Macaine Isabelle
Article soumis à la RECMA

Abstract

1 Introduction

Depuis leur origine à la fin du XIXème siècle, les organisations coopératives participent aux transformations économiques, sociales et techniques de l'agriculture en jouant une diversité de fonctions, qui se combinent différemment selon les périodes, les régions ou les filières. Elles permettent à des agriculteurs de bénéficier d'économies d'échelle ou de variété pour collecter, transformer et vendre leurs produits, s'approvisionner en intrants ou accéder à des services. Elles peuvent aussi favoriser l'information, la formation et l'innovation pour accompagner les agriculteurs dans les transformations de leur activité (Bidet, Filippi et Richez-Battesti, 2019 ; Chomel et al., 2013 ; Ortmann et King, 2007). Mais elles sont aussi questionnées sur la manière dont elles assurent ces fonctions, par exemple lorsqu'elles apparaissent porteuses d'inertie ou sont jugées sous l'influence de logiques économiques, techniques ou politiques, qui peuvent les éloigner des principes originels d'auto-organisation (Filippi, Frey et Mauget, 2008). L'analyse de l'évolution des coopératives agricoles reste de fait une question scientifique d'actualité, au croisement de travaux en économie, sociologie ou gestion (M. Cook, 2018 ; Valiorgue, Bargues et Hollandts, 2020). Cette question est ravivée par les débats sur deux transitions en cours : i) la transition agroécologique, qui suscite de nouvelles formes de coopération (Lucas et Gasselin, 2018) et ii) le développement du numérique qui pourrait modifier les relations des agriculteurs vis-à-vis de leurs organisations (Schnebelin, Labarthe et Touzard, 2021).

Des travaux sur l'engagement des coopératives dans l'écologisation de l'agriculture se sont développés depuis une quinzaine d'années en lien avec l'analyse de leur contribution à l'agriculture biologique, au développement durable ou territorial (Candemir, Duvaleix et Latruffe, 2021 ; Draperi, 2018 ; Favreau et Hébert, 2012). Les études sur le rôle des coopératives dans la digitalisation de l'agriculture sont plus récentes et centrées sur les implications en terme de gouvernance, en particulier pour les grosses structures (Duvaleix-Tréguer, Ledos et Lepetit, 2019 ; Y.-n. Wang, Jin et Mao, 2019). En revanche, les liens entre écologisation et digitalisation n'ont pas été encore abordés. Quel rôle jouent ou peuvent jouer les coopératives agricoles dans cette double transition agroécologique et numérique ?

Cette question concerne en particulier les coopératives du secteur de la vigne et du vin, notamment en Occitanie. Dans cette région, celles-ci se sont constituées durant la première moitié du XXème siècle pour produire du vin de table, puis ont été confrontées, à partir des années 1980, à une succession de révisions stratégiques majeures pour produire des vins de qualité, les commercialiser, puis intégrer les enjeux d'environnement et de

développement durable (Saïsset, 2021 ; Touzard, 2011). Le développement du numérique vient aujourd'hui se superposer à ces changements (Macaine, 2020 ; Moreiro, 2017). Mais quelle est son ampleur réelle ? Vient-il bouleverser ou conforter l'organisation et les projets des caves coopératives ? Peut-il favoriser la poursuite de la transition écologique dans le secteur ? L'article analyse comment, dans le secteur viticole, les coopératives sont aujourd'hui engagées dans les transitions agro-écologiques et numériques et comment ces deux transitions peuvent se combiner et réinterroger les projets et perspectives de ces organisations.

2 Une représentation duale des caves coopératives : systèmes d'acteurs et institutions

Notre étude s'appuie sur une représentation duale et dynamique de la coopérative viticole, une organisation économique considérée à la fois comme un système d'interactions entre acteurs et comme une institution insérée dans un secteur et un territoire (Touzard et Draperi, 2003), mais aussi dans un système d'innovation (J. Boyer et Touzard, 2017).

La coopérative viticole peut d'abord être considérée comme un *système d'interactions entre acteurs* qui met en œuvre et coordonne des activités répondant à une diversité de fonctions, devant bénéficier aux adhérents. Ces activités s'organisent autour de la collecte et vinification du raisin, puis du conditionnement et de la commercialisation des vins. Ces opérations s'appuient sur des investissements collectifs, sont en partie assurées par des salariés de la coopérative, sont coordonnées par des règles et conventions et s'inscrivent dans une stratégie définie par un conseil d'administration et validée en Assemblée Générale (Saïsset, 2021). Les viticulteurs adhérents sont ainsi engagés dans des relations contractuelles, soutiennent des décisions collectives, et doivent résoudre une succession de problèmes de coordination liés en particulier à l'hétérogénéité de leurs situations (Bareille, Bonnet-Beaugrand et Duvaleix-Treguer, 2017 ; M. Cook, 2018). Mais au-delà de ces relations formelles et statutaires, la cave coopérative est animée par d'autres interactions sociales, liées à des commissions internes, des projets ou des événements, et plus largement à des réseaux de dialogue et de conseil entre adhérents et entre ceux-ci et d'autres acteurs du territoire (Chiffoleau, 2005). À travers tous ces réseaux, la coopérative contribue à la diffusion et au partage de connaissances. Elle peut donc orienter les choix techniques des adhérents à la fois par ses investissements, sa stratégie et ses règles construites collectivement, notamment les règles de classement et paiement des raisins (Touzard, 2010), mais aussi à travers les différents réseaux de dialogues qui l'animent et participent à sa gouvernance.

La coopérative viticole est aussi une *institution* reconnue juridiquement, une entreprise de l'économie sociale insérée dans le secteur de la vigne et du vin. Elle y développe des relations économiques pour commercialiser ses vins, acheter des biens et services, contracter des prêts… La justification économique des caves coopératives est liée en particulier au pouvoir de marché qu'elles peuvent établir dans un secteur où les marchés sont très segmentés et réglementés (Indications géographiques, traçabilité…). Les coopératives participent aussi à des relations politiques, pour défendre leurs intérêts et influencer les politiques viticoles (via coop de France par exemple), ou ap-

puyer des projets d'investissement qui demandent un portage politique. Dans le secteur, elles sont aussi au cœur de flux d'information et de relations de conseil avec des organisations dédiées (chambres d'agriculture, interprofessions, IFV, œnologue, médias...), mais aussi avec d'autres coopératives au sein de clusters (Chiffoleau et Touzard, 2014). La cave coopérative peut alors être vue comme une composante d'un système d'innovation viticole (J. Boyer et Touzard, 2017), dans lequel elle joue un rôle d'acteur innovant, par exemple pour ses activités de vinification ou commercialisation, mais aussi un rôle d'intermédiaire (Klerkx, Aarts et Leeuwis, 2010) au regard des innovations mises en œuvre par ses adhérents. Elle peut en effet favoriser et orienter l'accès des viticulteurs à des ressources économiques et à des informations qui vont jouer sur les changements de pratiques dans leurs exploitations.

Ces deux représentations complémentaires des caves coopératives permettent de proposer une analyse dynamique : les interactions des acteurs de la coopérative, qui débordent largement de l'organisation, peuvent constituer des « systèmes d'acteurs innovants » (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012) qui jouent sur la stratégie et les performances de l'organisation, sur son évolution et son positionnement dans le secteur ; en retour l'institution coopérative s'impose aux adhérents comme un cadre d'action et une interface avec le marché et l'ensemble du système d'innovation, influençant l'évolution de leurs pratiques. Cette approche a montré sa pertinence pour étudier en Languedoc les innovations de la « révolution vers la qualité » des caves coopératives à partir des années 1980, en pointant l'importance des ressources immatérielles et des capacités à favoriser des projets « d'entreprises responsables » (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012), mais en montrant aussi l'enjeu de résoudre une succession de problèmes de coordination, redéfinissant leur gouvernance et trajectoire (M. Cook, 2018 ; Saïsset, 2021).

Nous mobiliserons cette vision duale et dynamique des caves coopératives pour analyser comment elles participent aux transitions écologiques et numériques. Nous retenons ainsi une approche de l'organisation qui prend en compte les attentes et perceptions de ses acteurs, les intérêts qui les lient à l'organisation, mais aussi leurs interactions qui contribuent aux décisions collectives, à l'innovation et aux transformations de l'organisation dans un système d'innovation.

3 Une enquête sur les caves-coopératives d'Occitanie

Notre étude repose sur une série d'entretiens réalisés en 2020 auprès de dirigeants, salariés et adhérents de caves-coopératives viticoles de la région Occitanie, une région pionnière pour les démarches agroécologiques, et première en France pour ses surfaces en vigne biologique [1].

Huit caves coopératives ont été choisies représentant une diversité de situations au regard i) de leur engagement dans la transition écologique, ii) de leur taille, et iii) de leur localisation en plaine ou coteaux, correspondant à des types de vins différents (IGP ou AOP). Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.

Les entretiens ont été réalisés d'une part auprès de directeurs ou responsables techniques de ces coopératives, et, d'autre part, de 43 de leurs

1. www.agencebio.org , consulté en 2021

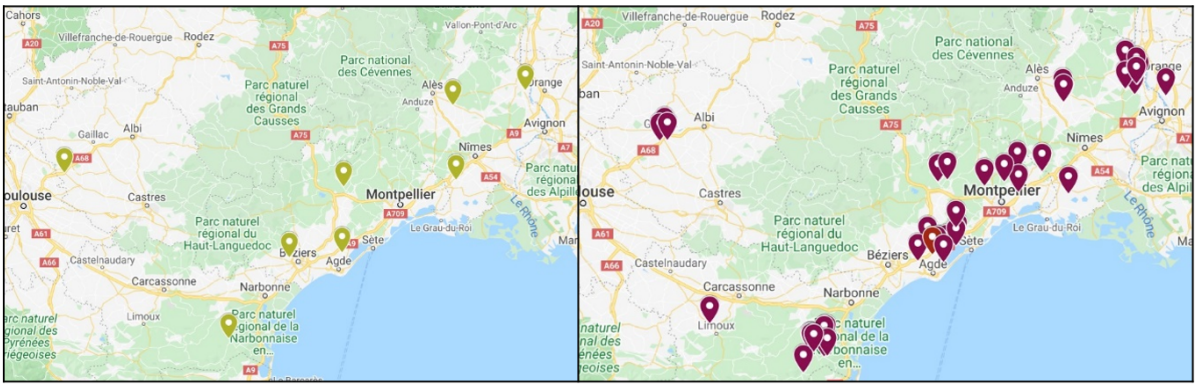


FIGURE 5.2 – Localisation géographique des caves-coopératives (à gauche) et des exploitations viticoles (à droite) enquêtées

adhérents, en cherchant une diversité d'âge, de surface et de proximité de la direction (entre 4 et 10 adhérents par coopérative). Les entretiens auprès des responsables de la coopérative étaient semi-directifs et ciblés sur i) les projets de la coopérative concernant le numérique et l'écologisation des pratiques, ii) les conditions de mise en œuvre de ces projets à différentes échelles (adhérent, vinification, commercialisation), iii) les interactions entre ces projets, iv) leurs implications pour les relations internes et externes à l'organisation. Les enquêtes auprès des adhérents suivaient un questionnaire plus précis, sur leurs usages du numérique et leurs pratiques agroécologiques, complétés par des informations sur la structure de leur exploitation, et des dimensions personnelles et relationnelles (Schnebelin, 2022).

TABLE 5.1 – Caractéristiques des caves coopératives enquêtées (2020)

Cave	Surface (Ha)	Viticulteurs	Vin AOP	Vin Biologique		Certification HVE ou Terra Vitis	
				Part surfaces	Début	Part surfaces	Début
E	2000	200	70%	0%	2019	10%	2019
F	500	100	60%	10%	2013	70%	2009
J	800	110	80%	7%	2009	39%	2003
M	3800	380	80%	15%	2018	24%	2019
G	3000	600	0%	7%	2009	30%	2019
B	2811	150	70%	5%	2012	75%	2018
C	1050	72	2%	76%	1994	0%	*nc*
A	2000	23	0%	11%	2010	14%	2019

À partir de ces enquêtes, nous avons caractérisé dans chaque coopérative les projets liés à l'écologisation ou à la digitalisation, en renseignant notamment les partenaires impliqués, les motivations, freins, limites, avantages et inconvénients perçus par les dirigeants et les adhérents. Nous avons ensuite catégorisé les domaines et objets d'action concernés sur l'ensemble des coopératives pour organiser une approche comparée (tableau en Annexe 9). Sur cette base, nous avons identifié les logiques d'action, l'évolution des activités ou fonctions de la coopérative à la fois comme interface marchande et technique dans le secteur et comme organisation soutenant la coordination des adhérents. Cette analyse s'est organisée à travers plusieurs phases de discussion entre les auteurs.

4 Les coopératives au cœur de plusieurs formes d'écologisations de la viticulture

Nos enquêtes montrent que les coopératives sont engagées depuis une vingtaine d'années dans une diversité d'actions qui répondent à des degrés divers « aux enjeux environnementaux ». L'écologisation des caves coopératives et de leurs adhérents concerne principalement quatre domaines d'action : la diminution des intrants, la gestion des sols, les infrastructures paysagères et la réduction des émissions de gaz à effets de serre. Ces actions s'organisent selon différentes démarches Tableau 5.2 : certaines sont liées à des certifications (HVE, Terra Vitis, Bio…), d'autres à des projets « conduits en interne » (commission ou technicien environnement, expérimentations…) ou à des politiques publiques (MAEC, GIEE, Ecophyto…). Ces démarches peuvent ou non faire l'objet de communication et de valorisation commerciale (site web de la coopérative, contre-étiquette des vins, événements…). Deux coopératives ont même intégré dans leur stratégie communicationnelle un animal emblématique de l'environnement local (lézard, pie grièche).



FIGURE 5.3 – Cave de la coopérative C - Source : auteur

Le développement de ces démarches environnementales est vu comme stratégique par tous les dirigeants, avant tout pour des enjeux d'image et de réponses aux évolutions de la demande. Les avis divergent néanmoins sur l'appréciation de leur intérêt économique. Certains misent sur le bio, dont l'intérêt est nuancé par d'autres, au regard des risques et coûts de production, mais également de sa valorisation effective sur le marché. Les certifications moins exigeantes en termes de changement de pratiques (HVE, viticulture raisonnée) offrent peu de valorisation à court terme, mais permettent de remplir des conditions réglementaires ou fixées par les acheteurs (traçabilité), en particulier pour l'exportation. Ces certifications sont vues comme devenant un enjeu de soutien public, via la conditionnalité de la PAC par exemple. L'enjeu en terme de communication est renforcé par les pressions sociétales récentes et la « valorisation plus environnementale des produits AOP ». Ces projets reposent sur des collaborations avec une diversité d'acteurs externes. Ils suscitent différentes positions et débats au niveau des adhérents : cer-



FIGURE 5.4 – Une bouteille d'une « cuvée Totem » de la coopérative J - Source : site de la coopérative

tains sont proactifs dans ce domaine (bio ou mise en place d'innovations agroécologiques), d'autres sont plus réticents (refus de prescriptions, suivi a minima des contraintes réglementaires). L'écologisation introduit de fait une diversité nouvelle de situations et projets individuels, en partie liés à l'âge, à la trajectoire personnelle, à la double-activité... La coopérative joue alors un rôle important dans la gestion de cette « nouvelle hétérogénéité ». Il s'agit de segmenter et valoriser la production, d'accompagner techniquement et former les adhérents, de construire une image et identité et de jouer le rôle d'intermédiaire avec d'anciens ou nouveaux partenaires. Il convient alors de distinguer deux situations contrastées : des coopératives ont des projets stratégiques qui intègrent fortement l'enjeu environnemental et cherchent à embarquer l'ensemble des adhérents, allant jusqu'à engager des expérimentations et actions collectives importantes (coopératives A et C) ; d'autres coopératives ne mettent pas vraiment la question environnementale au cœur de leur stratégie, cherchant à assurer pragmatiquement la coexistence de modèles sans explicitation d'une vision commune. Ces différentes stratégies se traduisent dans les règles de classement et rémunération du raisin (bonification pour le bio ou pour HVE par exemple).

Les caves coopératives ressortent comme des acteurs locaux essentiels pour l'écologisation des pratiques, permettant l'accès à des connaissances nouvelles, un accompagnement technique et administratif ainsi qu'une valorisation commerciale. Elles travaillent surtout avec des partenaires établis, en privilégiant globalement des options « d'écologisation faible » (viticulture raisonnée, durable, HVE...), à l'exception de quelques coopératives précurseurs en bio.

TABLE 5.2 – Engagement des caves coopératives dans des démarches environnementales

Coop	Certification(s)	Accompagnement technique et recherche
E	bio, HVE, Terra vitis	formation, suivi du vignoble
F	Terra Vitis, VDD	Conseil pour la lutte raisonnée Groupe 30000 : réflexion sur les IFT, travail du sol MAE avec l'agence de l'eau
J	Terra Vitis, HVE, Bio	Démarche interne REVE, notamment sur les phyto
M	HVE, Bio	Groupe 30000, projet biodiversité avec herpétologues Recherche sur la démarche 0 pesticides
G	Bio	Démarche volontaire de conservation, confusion sexuelle MAEC
B		Tests sur confusion sexuelle, enherbement
C	Bio, Biodynamie	projet Bio+ : plantation de haies, mise en place de nichoirs Plantation test de cépages résistants
A	Bio, Terra Vitis HVE, VDD	SCEA participative pour que les viticulteurs testent AB Plantation test de cépages résistants

5 De nouveaux rôles liés au développement du numérique en viticulture

Les coopératives sont engagées dans la digitalisation au niveau de quatre domaines (Tableau 5.3) : gestion du vignoble, organisation des vendanges et sélection parcellaire, traçabilité, communication. La digitalisation est vue par les dirigeants et adhérents des coopératives avant tout comme une réponse à des exigences administratives et logistiques, accentuées par la segmentation accrue de la gamme des vins, les réglementations environnementales, les normes et contrats privés et les contraintes à l'export. Les outils numériques visent alors à faciliter le travail des salariés de la coopérative, notamment lors de la période des vendanges et pour la traçabilité, ou pour répondre à une complexification de la logistique liée à l'extension spatiale des caves coopératives, devenues souvent multi-sites. Les technologies numériques permettent aussi de répondre à un besoin de repositionnement des caves coopératives dans le conseil agricole, qui se renouvelle avec les enjeux climatiques et environnementaux, les certifications (accompagnements techniques et audits internes) ou l'évolution réglementaire (séparation vente-conseil qui limite le conseil par les structures d'approvisionnement en intrants). La mise en place de services numériques repose alors sur deux types de collaborations : économiques avec des prestataires de logiciels ou technologies numériques ; partenariales avec des organisations agricoles pour des formations, expérimentations ou diffusions de technologies.

La coopérative joue donc à la fois un rôle de diffusion d'innovation numérique vers les adhérents et d'investisseur du numérique en faisant payer ou non le service aux adhérents. Par exemple, des stations météo connectées ont été achetées par plusieurs coopératives et installées sur ses terrains, permettant de faire remonter des données dans une application commune pour les viticulteurs et techniciens de la coopérative. Les coopératives peuvent

également tester ou expérimenter des technologies, mais avec souvent des difficultés pour les évaluer. La coopérative peut aussi coordonner la collecte de données (état hydrique du vignoble via des sondes par exemple) utilisées dans des outils d'aide à la décision. Elle joue donc un rôle nouveau dans le conseil et l'accompagnement des adhérents dans leurs usages du numérique, parfois via une « démonstration » suscitée par un fournisseur, ou « en interne » afin de prendre plus de recul au regard des sollicitations externes.

Le développement de la communication numérique en interne se généralise (intranet, emails, What's App…) et est une réponse à un besoin d'échange d'information, mais aussi un moyen pour renforcer l'appartenance des viticulteurs à leur organisation, et limiter des risques de « fracture numérique interne » auxquels sont sensibles les directeurs. La communication externe est poussée par les demandes d'information et d'achat des consommateurs, et réalisée parfois avec des adhérents (vidéos personnalisées, témoignages, photos). Elle est également demandée par les viticulteurs pour faire face à des critiques sociales et des difficultés avec le voisinage. À travers le numérique, c'est l'identité professionnelle des viticulteurs en coopérative qui se joue, dans un secteur ou la communication sur les vins, les producteurs, leurs entreprises et leurs territoires est au cœur de la création de valeur.

Les caves coopératives jouent aussi un rôle de coordination technique pour répondre aux exigences de traçabilité qui s'étendent et se complexifient. Différents logiciels de traçabilité (vignes, cave) doivent être combinés, souvent associés à des modules ou logiciels liés à la certification (VDD, HVE), ce qui génère des problèmes de compatibilité ou de simplification de procédures. Les coopératives cherchent alors à intégrer ces informations pour leur propre pilotage stratégique. La mise en place de ces systèmes d'information, appelle à un accompagnement des salariés et viticulteurs pour l'utilisation de ces logiciels, voire la prise en charge directe d'actions pour des adhérents qui n'ont pas les compétences. Cet accompagnement est d'autant plus nécessaire que les viticulteurs sont souvent découragés face à la croissance du nombre de démarches en ligne, avec des aptitudes différentes pour le numérique. Plusieurs coopératives ont pris en charge le coût de ces logiciels afin de financer ceux « qui avancent le plus » et/ou développent des formations spécifiques pour appuyer ceux qui ont des difficultés dans ces usages. L'enjeu majeur est de développer en interne un réseau de compétences permettant de soutenir ce nouveau rôle de coordination technique, mobilisant les outils numériques.

Les caves coopératives jouent donc un rôle central dans la digitalisation des activités. Avec des degrés différents d'engagement, elles investissent dans des outils numériques, sont des intermédiaires entre les adhérents et des prestataires ou partenaires, assurent une coordination technique et accompagnent les viticulteurs vers des usages du numérique ciblés essentiellement sur les fonctions de l'organisation coopérative.

6 Une fonction d'intermédiaire pour combiner la digitalisation et l'écologisation

Au sein du système d'innovation de la viticulture française, les caves coopératives ont donc un rôle d'intermédiaire à la fois pour l'écologisation et

TABLE 5.3 – Outils numériques dans les caves coopératives

Cave coop	**Gestion vignoble**	**Vendanges et parcellaires**	**Traçabilité**	**Communication**
E	OAD traitement (2020) en test	télédétection parcellaire (2019) : en test	traçabilité parcellaire et cave (2017) ; traçabilité pratiques (2020)	Espace adhérents sur le site, blog interne (organisation vendanges) ; Site, vente en ligne
F			traçabilité traitements (2018) : gratuit pour viti ; logiciel diagnostic certification ; logiciel traçabilité cuverie	Espace extranet adhérents ; Site, vente en ligne, réseaux sociaux
J	stations météo avec OAD	logiciel de gestion parcellaire	traçabilité cave, traçabilité certification (payée par la cave)	Site, réseaux sociaux, vente en ligne
M	OAD traitement, test modulation fertilisation ; test autoguidage, test robot	gestion des vendanges ; logiciel de gestion parcellaire	traçabilité cave	Application organisation vendange ; Site, vente en ligne, réseaux sociaux
G	stations météo avec OAD	gestion des vendanges	traçabilité cave, traçabilité certification	Espace adhérent sur le site ; Site, vente en ligne
B	stations météo avec OAD		logiciel de traçabilité traitements	Groupe What's App technicien-adhérents ; Site, vente en ligne, réseaux sociaux
C	stations météo avec OAD, OAD irrigation	logiciel de gestion parcellaire	logiciel de traçabilité traitements	Site, vente en ligne, réseaux sociaux
A	OAD traitement	télédétection parcellaire ; gestion des vendanges	logiciel de traçabilité traitements	Espace adhérent sur le site, lettre d'info ; Site, vente en ligne, réseaux sociaux

la digitalisation du secteur. Elles peuvent alors combiner ces deux processus sur des aspects économiques, cognitifs ou politiques.

Ce double rôle d'intermédiaire a tout d'abord une dimension économique. Le numérique renvoie à des innovations qui peuvent améliorer l'efficacité de pratiques plus écologiques et surtout renforcer leur valorisation, via la traçabilité ou la communication. Dans ce cas, la coopérative peut jouer un rôle de mise en œuvre du numérique comme un nouveau facteur de production de l'écologisation, avec des impacts environnementaux qui restent toutefois à préciser, selon les technologies utilisées (O. Visser, Sippel et Thiemann, 2021). Par les achats et investissements qu'elles réalisent, sur des équipements, des logiciels ou des services, les coopératives recherchent des options qui peuvent intégrer les deux enjeux, avec des économies possibles. Mais elles doivent aussi faire des arbitrages qui les amènent souvent à privilégier soit l'écologisation, soit la digitalisation. De fait, les coopératives ont de nouvelles relations économiques avec des fournisseurs, des acheteurs, des prestataires ou partenaires de l'écologisation ou de la digitalisation, qui ont des objectifs souvent divergents. L'enjeu de la coopérative comme double intermédiaire est alors de faciliter la mise en cohérence de ces deux processus, pour réduire les coûts de transaction (Ménard, 2007) au bénéfice de leurs adhérents.

Le rôle d'intermédiaire des coopératives se joue aussi dans la construction de connaissances pour accompagner à la fois l'écologisation et la digitalisation au sein du système d'innovation. Le numérique est utilisé pour favoriser des échanges de connaissances pouvant participer à l'écologisation, via des OAD, sites internet, lettres d'information numérique ou réseaux sociaux. Il reste un support de diffusion de connaissances avant tout descendantes, qui s'articulent encore peu avec les connaissances localisées et les échanges entre viticulteurs, ce qui limite l'intérêt pour les pratiques écologiques (Chiffoleau, 2005). Les coopératives pourraient favoriser des échanges plus horizontaux, mais elles font face à des attentes divergentes des adhérents, certains privilégiant les échanges de visu, d'autres l'accès à des connaissances sur des sites web ou réseaux en dehors de la coopérative... Pour autant, face à la multiplicité d'informations parfois mal adaptées au vignoble local, les adhérents et salariés soulignent l'importance de la coopérative pour collecter et capitaliser des données sur les expérimentations et les pratiques plus écologiques, partager des contenus de formation, et faire « le tri » entre des informations portées par différentes organisations du secteur, y compris la recherche.

Les coopératives sont aussi des intermédiaires dans la mise en œuvre de politiques publiques concernant la digitalisation et l'écologisation. Les certifications (HVE notamment) ou cahiers des charges sont associés à un usage généralisé de logiciels, du fait des exigences de traçabilité répondant à des besoins de contrôle. Nos enquêtes montrent que cette traçabilité renvoie souvent à des formes d'écologisation symbolique (Wolf et Wood, 1997), répondant à l'écologisation des politiques plus qu'à celle des pratiques agricoles. L'utilisation d'outils numériques pour l'enregistrement d'opérations techniques (dose, date de traitement...) contribue toutefois à faciliter la prise en compte des contraintes réglementaires environnementales. Plus largement, les coopératives apparaissent comme des organisations centrales dans la mise en œuvre de politiques publiques de digitalisation et d'écologisation, par exemple pour la réponse à des appels à projets de R&D, l'accompagnement de mesures agro-environnementales ou l'accès à des subventions. En soi, les

politiques publiques jouent sur les deux processus mais ne semblent pas (encore) construire de liens entre numérique et écologisation à l'échelle de la production viticole.

Dans cette fonction d'intermédiaire, les caves coopératives sont donc surtout marquées par des évolutions exogènes, économiques, techniques et politiques. Leurs projets et certaines actions engagées montrent qu'elles ont aussi des marges de manœuvre pour orienter les trajectoires d'innovation au sein du secteur. Elles peuvent sélectionner des prestataires et des services qui se diversifient et se réfèrent à différents modèles techniques et économiques. Elles peuvent aussi être force de proposition en formulant leurs besoins et ceux de leurs adhérents auprès des fournisseurs de services numériques, par exemple pour adapter un logiciel à des engagements plus écologiques. Elles disposent également de marge de manœuvre à travers les choix d'expérimentations, de formations et de services de conseil. Enfin, l'usage du numérique pour communiquer sur des démarches d'écologisation ouvre des perspectives nouvelles, par exemples en valorisant des initiatives des adhérents ou en affirmant une identité environnementale de la coopérative.

7 Digitalisation et écologisation modifient les relations entre et avec les adhérents

La coopérative, comme système d'interaction entre acteurs, est transformée par la digitalisation et l'écologisation qui modifient les enjeux de mutualisation, de différenciations entre adhérents et de communication interne.

L'écologisation et la digitalisation peuvent en effet jouer sur des conditions économiques de mutualisation pour les adhérents des caves coopératives. Les investissements associés génèrent de nouvelles économies d'échelles par exemple pour un logiciel, une station météo connectée, une chaine spécifique de vinification ou l'accès à un marché d'un vin biologique. La coopérative permet aussi de mutualiser de nouveaux risques liés à ces innovations, par exemple lors de la mise en place d'expérimentations, l'utilisation de technologies encore incertaines ou la diversification de marchés et clients. Pour les adhérents, la coopérative offre aussi des « économies de variété », par exemple dans la mise en commun de nouvelles compétences sur l'environnement ou les usages du numérique. Toutefois les ressources financières, techniques ou humaines (en temps et compétences), restent limitées, impliquant des choix qui peuvent favoriser certains adhérents, modifier leurs relations, orienter la stratégie et la gouvernance de la coopérative, en combinant différemment écologisation et digitalisation.

Cette gouvernance est en effet complexifiée par de nouvelles hétérogénéités entre adhérents, générées par les processus de digitalisation et d'écologisation (Candemir, Duvaleix et Latruffe, 2021). Les pratiques, les engagements ou mêmes les opinions sur l'écologisation se diversifient au sein des coopératives, avec des positions d'optimisation (HVE…), plus radicales (bio, biodynamie…) ou d'attente. Les outils numériques peuvent faciliter la gestion et la valorisation de cette hétérogénéité dans la logistique, la commercialisation, la communication. Mais ils deviennent eux-mêmes une source d'hétérogénéité, ou même d'exclusion, au regard des compétences, de la formation, de l'âge ou des aspirations des adhérents, mais aussi des caractéristiques de chaque

exploitation (agroéquipements, taille et hétérogénéité des parcelles, travail…). La coopérative doit alors résoudre des problèmes de coordination, voire des conflits, liés à cette nouvelle hétérogénéité d'intérêts, en développant des actions spécifiques, en redéfinissant des règles internes, en construisant de nouveaux compromis, pour maintenir ou renouveler le projet coopératif (M. Cook, 2018).

Dans les coopératives enquêtées, la gestion conjointe de l'écologisation et de la digitalisation, et la prise en compte de l'hétérogénéité des adhérents, appelle alors à repenser la communication et les échanges en interne. Le développement d'une innovation concrète dans le vignoble, par exemple la mise en œuvre de stations météo et d'OAD, donne lieu dans la plupart des cas à des échanges limités sans réflexion spécifique sur l'écologisation des pratiques. Il peut même amener une surconsommation d'intrants, avec un raisonnement basé sur une prise de risque plus faible que celle qu'aurait prise le viticulteur, ou l'absence de prise en compte de connaissances localisées. Mais dans plusieurs coopératives, ces innovations sont devenues un support de discussion, d'échange et de prise de recul sur les pratiques entre viticulteurs, ou entre viticulteurs et techniciens, avec une réflexion sur les risques et l'adaptation du raisonnement au contexte (climat et cépage). Dans ce cas les initiatives de la coopérative sont cruciales pour favoriser ces échanges, qui ensuite peuvent enclencher des interactions plus informelles entre adhérents, favoriser leurs engagements dans de nouveaux projets portés par la coopérative… De même des actions de communication impliquant des adhérents dans la valorisation de leurs pratiques environnementales (vidéos, photos) ont suscité de nouvelles interactions avec les adhérents, en particulier des jeunes, faisant évoluer la gouvernance de la coopérative et renouvelant son identité comme entreprise responsable.

8 Conclusion

Dans les processus d'écologisation et de digitalisation de la viticulture, les caves coopératives ressortent comme des organisations centrales. Pour l'écologisation, elles participent à l'accompagnement technique et à la valorisation économique, en privilégiant des évolutions progressives (HVE), à l'exception de coopératives précurseurs en bio. Pour la digitalisation, elles réalisent des investissements collectifs, coordonnent la traçabilité numérique et mettent en place de nouveaux dispositifs de communication. L'articulation entre ces deux processus reste encore limitée, même si des synergies apparaissent via la mise en œuvre de la traçabilité et le développement d'une communication numérique. Les technologies numériques sont mises en œuvre pour répondre à une diversité d'objectifs des coopératives. La capacité de ces technologies à répondre aux enjeux d'écologisation dépend de l'évolution des politiques publiques, des stratégies de R&D, de l'offre technologique, mais aussi d'actions engagées par les coopératives elles-mêmes. Celles-ci jouent en effet un rôle d'intermédiaire au sein du secteur pour l'écologisation et la digitalisation et peuvent donc ajuster, mettre en cohérence, ou même concevoir des innovations qui s'inscrivent dans ces deux processus. Avec la digitalisation et l'écologisation, les caves coopératives pourraient ainsi réaffirmer et renouveler leur intérêt et leurs missions, et permettre aux viticulteurs de mieux contrôler les innovations et les transformations de leurs activités.

Conclusion du chapitre

L'article présenté ici vient informer le rôle que peuvent jouer les caves coopératives dans les processus de digitalisation et d'écologisation de l'agriculture. Cette conclusion propose une synthèse des résultats de l'article, à laquelle sont ajoutés des éléments de résultats complémentaires qui n'ont pas pu être mis dans l'article compte tenu des contraintes de longueur exigées par la revue. Les caves coopératives apparaissent intéressantes à étudier pour analyser les changements dans le secteur à travers des questions de coordination et d'action collective. Les résultats issus d'enquêtes dans la filière viticole peuvent alors être discutés au regard d'autres résultats issus de mon terrain dans la filière grandes cultures. Ces éléments contribuent aux réflexions et débats sur les transformations des coopératives agricoles de manière plus générale, mais aussi sur les rôles d'acteurs intermédiaires au sein du système d'innovation de l'agriculture, au regard de sa digitalisation et son écologisation.

Synthèse sur le rôle des caves coopératives dans l'écologisation et la digitalisation

L'écologisation des caves coopératives et de leurs adhérents concerne principalement quatre domaines d'action (Encadré 1) : la diminution des intrants, la gestion des sols, les infrastructures paysagères et la réduction des émissions de gaz à effets de serre. La digitalisation peut se caractériser par quatre domaines principaux (Encadré 2) : gestion du vignoble, organisation des vendanges et sélection parcellaire, traçabilité, communication.

Encadré 1 : Précisions sur les domaines d'écologisation

i) La mise en œuvre de pratiques qui réduisent l'utilisation d'intrants concerne les herbicides, insecticides, fongicides ou l'irrigation. Ces pratiques peuvent être basées sur l'optimisation de l'application des intrants (ajustement des doses, des dates ou des modes d'application), sur leur substitution par des alternatives (biocontrôle, confusion sexuelle, désherbage mécanique, écopaturage etc.), et par des reconceptions plus globales des pratiques (lutte intégrée, association de cultures...).

ii) La gestion des sols a été identifiée comme un levier majeur de l'écologisation des pratiques agricoles, que ce soit pour la santé des végétaux, la nutrition, le stockage du carbone. Les pratiques de gestion des sols incluent le travail (ou non) du sol, l'amendement ainsi que la gestion de l'enherbement.

iii) Les infrastructures paysagères font partie des pratiques mises en œuvre pour répondre aux enjeux environnementaux. Les haies, les arbres, les murets peuvent constituer des réservoirs de biodiversité et fournir des services écosystémiques

iv) On peut rajouter également les pratiques visant à limiter les gaz à effet de serre ou capturer du carbone : par exemple la diminution du travail du sol, ou la diminution de passages d'engins agricoles.

Encadré 2 : Précisions sur les domaines de digitalisation

Gestion du vignoble des adhérents : les technologies numériques incluent les services météo, le recours (encore limité) à des outils d'aide à la décision (OAD) pour les traitements (prédiction des risques maladie), la gestion de l'irrigation, ou encore la robotique (encore à l'état de prototype). Les OAD correspondent à l'utilisation de données, modèles, applications web ou smartphone, pour prédire des situations (risque maladie, risque ravageurs, stress hydrique, besoins en fertilisation etc.) et aider à prendre des décisions agronomiques. Ces OAD peuvent être directement fournis par un prestataire de stations météo ou de sondes, des instituts techniques (IFV), des entreprises de l'agrochimie ou encore des coopératives d'approvisionnement en intrants.

Organisation des vendanges et sélection parcellaire : des services de télédétection parcellaire ont par exemple été développés afin d'estimer la vigueur des vignes sur les parcelles et le niveau de maturité des raisins, permettant de sélectionner les parcelles à l'échelle de la coopérative et de déterminer les dates de vendange. Des outils logistiques numériques sont aussi utilisés pour planifier les vendanges et s'organiser avec les adhérents, gérer les apports de raisin au quai et les premières étapes de vinification, plus complexes à organiser avec l'élargissement des gammes de vin. Les outils d'organisation des vendanges et de sélection parcellaire visent avant tout à faciliter le travail des salariés de la coopérative lors de ce moment intensif en travail et stratégique pour élaborer des vins de qualité.

Gestion de la traçabilité : Le numérique est également utilisé pour gérer la traçabilité des flux qui concourent à la production et commercialisation du vin de la coopérative. Cette collecte et organisation de l'information est utilisée pour garantir le respect de cahiers des charges (notamment HVE) ou de contrats vrac (négoce export ou marques). Elle fait plus largement le lien entre d'une part, la structure de vinification et commercialisation et, d'autre part, les adhérents (gestion des comptes adhérents), mais aussi les autres parties-prenantes de l'organisation : fournisseurs, acheteurs, ODG et administration (gestion des achats et comptes client, suivi des stocks et signes officiels de qualité). Les caves coopératives sont ainsi engagées dans la mise en œuvre d'une traçabilité numérique sur l'ensemble des flux de matières et flux économiques.

Communication interne/externe : En interne, il s'agit surtout d'informer et partager des connaissances sur les techniques viticoles, la logistique, la réglementation, la vie interne de la coopérative avec des moments clés comme la période de vendange. Les supports sont variables : groupe WhatsApp, SMS, intranet, Email, visioconférence. Certains de ces outils ne sont pas encore généralisés (y compris pour l'organisation des conseil d'administration par exemple) mais ils deviennent essentiels pour coordonner les relations aux adhérents, les activités de vinification ou commerciales, et la gestion de la coopérative, surtout lorsque celle-ci est implantée sur plusieurs sites. La communication externe s'organise autour des réseaux de fournisseurs et de clients, mais elle s'étend aussi de plus en plus vers les consommateurs via des sites web et réseaux sociaux.

Les caves coopératives se retrouvent avec de nouveaux rôles liés à leur position d'intermédiaire.

Premièrement, en tant qu'intermédiaire économique, elles mettent en place des relations avec des nouveaux acteurs économiques, tels que les entreprises qui fournissent des technologies numériques, proposent des services numériques ou mettent en place des projets d'écologisation. Certaines coopératives misent sur les entreprises plus grandes afin d'assurer une continuité du service, alors que d'autres préfèrent travailler avec de petites structures pour avoir une relation plus individualisée et permettre d'adapter les services numériques (ajout d'un module sur un logiciel par exemple). Elles

modifient aussi leurs relations économiques existantes, par exemple avec les coopératives d'approvisionnement en intrant, qui peuvent fournir des technologies. Plusieurs coopératives utilisent ainsi les stations météo et OAD fournis par les vendeurs de produits phytosanitaires, d'autres travaillent avec des entreprises indépendantes. Les caves coopératives peuvent ainsi devenir des organisations de diffusion de technologies, proposer des services commerciaux associés, ou réaliser des investissements pour le collectif. Pour les logiciels qui permettent la traçabilité des traitements effectués par les viticulteurs, on distingue par exemple deux stratégies. La première consiste à ce que les coûts de ce logiciel soient pris en charge par la coopérative : cela peut inciter leur usage par les viticulteurs, ce qui facilite le travail de traçabilité pour les salariés de la coopérative ensuite. La deuxième consiste à faire payer le service aux adhérents, ce qui permet de laisser plus de marge de manœuvre aux individus concernant le choix d'investir ou non dans la digitalisation. Dans ce rôle d'intermédiaire économique, l'articulation entre écologisation et digitalisation semble complexe, du fait de différences d'attentes et de perceptions des partenaires de ces deux processus ainsi que des intérêts économiques et politiques de la coopérative elle-même, ce qui fait écho aux questions sur la neutralité des coopératives (Yang, Klerkx et Leeuwis, 2014).

Deuxièmement, les caves coopératives modifient leurs dispositifs d'intermédiation de connaissances, avec de nouveaux supports de transfert ou d'échanges de connaissances (OAD, réseaux sociaux…). Le défi est d'articuler ces nouveaux supports de connaissances avec des dispositifs permettant la prise en compte des savoirs existants, la co-production de connaissances et les apprentissages, nécessaires à l'écologisation des pratiques (Chiffoleau, 2005 ; Plumecocq, Del Corso et Kephaliacos, 2015). Les coopératives se retrouvent avec de nouveaux rôles de construction de connaissances sur les technologies numériques et les pratiques écologiques, et de sélection de connaissances diffusées par les outils numériques. En effet, l'évaluation des technologies ou pratiques innovantes par la coopérative mais aussi la validation collective apparaissent nécessaires et décisives dans le processus d'innovation (Bechtet, 2022 ; Del Corso, Kephaliacos et Plumecocq, 2015). Cela souligne là encore le rôle central des connaissances dans le processus de digitalisation (Fielke, Taylor et Jakku, 2020).

Enfin, les caves coopératives peuvent articuler ces deux processus via leur fonction d'intermédiaire politique et réglementaire. D'une part, elles accompagnent les viticulteurs dans le respect de la réglementation environnementale, domaine pour lequel les logiciels de traçabilité et outils de communication numérique sont mobilisés. De plus, les coopératives sont des organisations qui peuvent être chargées de la mise en œuvre de politiques publiques (Plumecocq, Del Corso et Kephaliacos, 2015). Elles se retrouvent porteur, partenaire de projets d'écologisation et/ou de digitalisation, avec des soutiens publics qu'elles doivent articuler selon leurs ressources internes et leurs objectifs, centrés avant tout sur la création de valeur. De plus, les coopératives, en tant qu'organisations de commercialisation, ont des enjeux forts d'intégration des régulations privées, qui se renforcent avec l'écologisation comme avec la digitalisation. La gestion de la traçabilité (des pratiques jusqu'à la commercialisation) devient ainsi une fonction majeure des coopératives, puisqu'elle est une condition d'accès à des marchés, de segmentation

et de création de valeur, et implique la formation et l'accompagnement des viticulteurs dans la prise en main de logiciels de traçabilité.

Mais les caves coopératives ne sont pas seulement impactées par la digitalisation et l'écologisation parce qu'elles seraient des intermédiaires vis-à-vis de leurs adhérents viticulteurs. Elles sont aussi innovantes dans leur propres investissements et activités productives et commerciales, adoptent des innovations technologiques et numériques, peuvent en faire émerger, et participent à faire évoluer les institutions et régulations du secteur (Yang, Klerkx et Leeuwis, 2014). Les entretiens montrent en particulier que sur les aspects d'information et de communication, toutes les coopératives utilisent les technologies numériques. En interne, les caves coopératives utilisent des lettres d'information, voire mettent en place des réseaux d'échange sur les réseaux sociaux. Des réseaux d'échanges entre viticulteurs se construisent aussi au-delà de la coopérative, dans des groupes plus restreints ou plus ciblés sur des objets d'intérêts commun.

Écologisation et digitalisation sont liées à la diversité de trajectoires des caves coopératives

Les caves coopératives ne sont pas homogènes et n'évoluent donc pas toutes de la même manière avec la digitalisation et l'écologisation. L'hétérogénéité des caves coopératives a été étudiée à l'échelle internationale. Six catégories peuvent être distinguées (Touzard, Coelho et Hannin, 2008) :

— Les coopératives villageoises qui produisent du vin de base (aujourd'hui marginales)
— Les petites coopératives qui produisent du vin de qualité
— les coopératives agroindustrielles
— les coopératives spécialisées au sein d'une union
— les sections de coopératives polyvalentes
— les coopératives intégrées au négoce

Les coopératives se distinguent donc selon leur taille, leur type de production et le degré de contractualisation avec les organisations amont et aval. Ici, l'échantillon de coopératives étudiées représente seulement une partie de cette hétérogénéité. On peut faire l'hypothèse que selon le type de coopérative, l'écologisation et la digitalisation ne s'abordent pas de la même manière, en lien avec les différences en termes de ressources, d'enjeux et de produits (Filippi et Triboulet, 2006). Par exemple, on peut imaginer que les plus grosses structures sont plus ciblées par les entreprises du numérique, et plus contraintes de s'engager dans des démarches de traçabilité et de responsabilité sociétale des entreprises (RSE). Les résultats présentés ici doivent être pris avec du recul du fait du faible nombre de coopératives rencontrées, même s'ils ont pu être discutés avec des experts de ces organisations (chercheurs Inrae, responsables environnement et viticulture à Coop de France Occitanie).

Il semble que les coopératives de plus petite taille aient moins de projets sur le numérique, ce qui va dans le sens du constat que les ressources dont disposent les coopératives impactent leur digitalisation (Y.-n. Wang, Jin et Mao, 2019). De fait, la digitalisation apparaît moins comme une priorité pour les plus petites coopératives, qui ont aussi moins de besoins car moins de production, de marchés, de sites de vinification, et qui peuvent jouer sur

des liens plus « domestiques » pour leur communication interne (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012) etc. Ces coopératives sont en revanche autant investies dans des projets sur l'écologisation, sans effet de taille bien identifié. La littérature met en évidence d'autres facteurs que la taille des coopératives qui jouent sur les comportements d'innovation, tels que le type de client et le type de produit, la pression concurrentielle, l'insertion dans des réseaux ou groupes d'entreprises coopératives, l'organisation logistique ou encore les dispositifs de mutualisation des connaissances entre organisations (Filippi et Triboulet, 2006 ; Magrini, Triboulet et Bedoussac, 2013). Je peux identifier plusieurs facteurs qui pourraient impacter les types de digitalisation et d'écologisation des caves coopératives : les relations amont-aval, le positionnement dans le système d'innovation, les hétérogénéités internes, les relations à l'écologisation et leur légitimité perçue à se positionner dans ces processus.

Relations amont-aval

Les projets de digitalisation semblent dépendre des exigences des acheteurs, confirmant le rôle croissant de ces derniers dans l'innovation des coopératives agricoles (Filippi et Triboulet, 2006). Par exemple des caves coopératives mettent en place des procédures de traçabilité pour répondre aux exigences de clients à l'exportation. Dans certains cas des négociants sont eux-mêmes porteurs d'incitations ou de conseils sur ces innovations, avec, au-delà des aspects réglementaires, des volontés de renforcer le contrôle sur les conditions de production du raisin et du vin, au moins dans le cadre de relations contractualisées pour des vins de qualité. Dans ce cas, le numérique participerait directement au renforcement de la structure de gouvernance d'une transaction dans laquelle les parties (négociant, coopérative, viticulteurs) ont accru la spécificité de leurs actifs partagés, pour produire et vendre un vin de qualité, liée par exemple à une marque du négociant (Touzard, Gaullier et Jarrige, 2001). Le développement du numérique pour la traçabilité apparaît alors comme un outil qui renforce le pouvoir des acteurs de l'aval sur les caves coopératives et les viticulteurs (Salançon, 2009).

Les projets mis en œuvre dépendent aussi des propositions des fournisseurs d'intrants en termes de technologies numériques.

Rôles et fonctions des coopératives dans le système d'innovation

Les caves coopératives peuvent également orienter leurs projets numériques selon les besoins en conseil. Ainsi, les outils numériques viennent appuyer le développement de services de conseil technique sur la production viticole par certaines caves coopératives. Ce type de conseil n'existait pas avant et se développe dans un contexte de nouveaux besoins des adhérents (notamment pour la mise en place de certifications) et/ou de baisse de l'offre de conseil. Les projets dépendent aussi des liens avec les organisations de recherche et développement, qui peuvent solliciter les coopératives pour mettre en place des expérimentations, confirmant l'importance du réseau dans lequel s'insère les coopératives (Filippi et Triboulet, 2006).

Les projets mettant en œuvre le numérique peuvent dépendre aussi de difficultés internes aux caves coopératives, en apparaissant comme une solution pour les résoudre. Par exemple certaines caves coopératives ont mis en place des technologies numériques pour faciliter la gestion des vendanges car elles faisaient face à des difficultés pour les organiser, du fait de la multiplication

des critères d'évaluation, ou pour optimiser la qualité du raisin et mieux segmenter les apports en fonction des parcelles. Le numérique apparaît alors comme une manière de gérer la segmentation et l'hétérogénéité des productions.

Hétérogénéités internes

Dans les caves coopératives, la technologie est depuis longtemps invoquée pour « objectiver » une évaluation, définir la qualité ou gérer une complexité trop forte d'indicateurs de qualité (taux de sucre, qualité sanitaire, cépages, maturité phénolique…) (Touzard, Gaullier et Jarrige, 2001). Des lectures conventionnalistes indiquent que les options technologiques sont aussi portées par des justifications, des conventions « industrielles » de qualité au sein des coopératives et de leurs règles internes (Chiffoleau, Dreyfus et Touzard, 2012). L'usage du numérique s'inscrirait dans cette ligne, en étant soutenu par ces mêmes conventions de qualité, et fait l'objet de critiques se référant à d'autres conventions (« domestiques », « marchande », « civique » …).

La diversité des trajectoires semble aussi liée à la manière de gérer les hétérogénéités et différenciations internes, provoquées ou accentuées par l'écologisation et la digitalisation (Iliopoulos, 2022). En effet, les hétérogénéités entre adhérents se renforcent, au regard des pratiques, des compétences, des équipements et des projets des adhérents, par rapport à l'écologisation (notamment bio ou HVE) et la digitalisation (avec différents profils d'usage, et de capacité à les utiliser). Les caves coopératives doivent alors « gérer » ces nouvelles hétérogénéités qui renvoient à des intérêts différents, notamment au regard des investissements collectifs à réaliser. La stratégie de la coopérative peut alors être de laisser ces divergences se développer en veillant à ne pas trop impacter l'organisation, ou au contraire de les valoriser et de mieux les intégrer dans les choix technologiques et organisationnels pouvant modifier la trajectoire de l'organisation. C'est le cas par exemple lorsque la cave coopérative décide d'ouvrir un segment bio ou d'investir dans un outils permettant un pilotage à distance de l'irrigation, ne concernant que certains adhérents. Selon ces stratégies, les coopératives choisissent en effet d'investir plus ou moins dans des transformations, rejoignant certains faits stylisés analysés par M. Cook (2018).

Relations à l'écologisation

Il ne semble pas y avoir de corrélation ou d'opposition entre l'investissement des caves coopératives dans l'écologisation et celui dans la digitalisation. Les coopératives engagées dans la viticulture biologique indiquent des besoins similaires dans la gestion des vendanges et dans l'optimisation des pesticides. Elles témoignent du fait que les OAD sont aujourd'hui configurés aussi bien pour les pesticides conventionnels que pour ceux autorisés en production biologique. Les incompatibilités ou frictions entre mode de production biologique et technologies numériques semblent ainsi moins fortes en viticulture que ce que j'ai pu mettre en évidence dans les deux chapitres précédents.

Légitimité des organisations coopératives

Les évolutions de ces rôles des coopératives peuvent alors renforcer leur légitimité et leur utilité. En effet, elles permettent aux adhérents de bénéficier de nouvelles économies d'échelles pour investir dans une technologie

numérique, de partager les risques liés à leurs expérimentation ou dépendance nouvelle (maintenance par exemple), de construire collectivement des connaissances et d'évaluer des technologies ou pratiques. Elles peuvent aussi fournir des économies de variété en renforçant la gamme de vins proposée, à travers notamment des segmentations écologiques ou liées à la traçabilité (Valceschini, 2006). D'autre part, les technologies numériques contribuent largement à développer la communication interne et externe, à faciliter la construction d'une identité collective et pourraient renouveler la gouvernance des coopératives (Duvaleix-Tréguer, Ledos et Lepetit, 2019). Elles offrent aussi un accompagnement technique et administratif vers la mise en place de cahiers des charges ou de démarches de traçabilité, permettant l'accès à certains marchés.

Cependant, la légitimité de ces organisations peut être remise en cause sur plusieurs points. D'une part, des adhérents peuvent choisir de se retirer de l'organisation collective si celle-ci ne permet pas de valoriser les démarches d'écologisation mises en place sur leurs exploitations, renforçant des dynamiques de départ d'adhérents dans les coopératives (Barraud-Didier et Henninger, 2009). Cette option est renforcée par le fait que les TIC offrent des possibilités de communication et de commercialisation personnalisées, valorisant même les initiatives individuelles, incitant à une vinification et commercialisation indépendantes. D'autre part, les réseaux d'échange se complexifient et se diversifient avec l'usage généralisé d'internet (Phillips, Klerkx, McEntee et al., 2018). Si les échanges au sein de la coopérative ne satisfont pas aux besoins des adhérents, d'autres communautés d'échanges, via internet, peuvent être privilégiées, pouvant affaiblir l'organisation, contester sa stratégie et son rôle de conseil technique.

A contrario, la capacité des coopératives à construire un espace d'autonomie technique et politique, par et pour le numérique, apparaît comme une voie intéressante pour éviter une digitalisation qui serait avant tout poussée par d'autres organisations, sans articulation avec les besoins des adhérents, et sans mise en cohérence avec les autres enjeux tels que l'écologisation.

Les caves coopératives apparaissent donc comme une échelle d'analyse et d'action qui reste pertinente pour les transformations du secteur de la viticulture, prenant en compte aujourd'hui le développement du numérique et l'écologisation des pratiques. Elles permettent d'avoir une perspective sur les transformations micro-économiques de viticulteurs adhérents, et leur coordination locale, mais aussi d'étudier les liens entre d'une part cette coordination et gouvernance coopérative et, d'autre part, l'évolution de politiques publiques, la circulation des connaissances et les dynamiques économiques sectorielles. Les analyses effectuées pour les caves coopératives questionnent alors plus globalement le rôle des coopératives agricoles. Pour cela, ces résultats peuvent être discutés au regard de mes observations dans le secteur des grandes cultures.

Les coopératives agricoles comme intermédiaires de l'écologisation et de la digitalisation : complément d'analyse à partir de mes enquêtes en grandes cultures

Bien que n'ayant pas fait l'objet d'une étude approfondie, les entretiens menés avec les producteurs et organisations liés aux grandes cultures (chapitre 3 et 4) donnent des informations plus larges sur les coopératives de ces filières, que je peux confronter aux résultats issus des enquêtes dans les caves coopératives. Ces informations se basent avant tout sur trois entretiens menés avec des responsables de coopératives en grandes cultures (ouest Occitanie), sur plusieurs entretiens et rencontres avec des chargés de mission de Coop de France, ainsi que sur les données issues des entretiens auprès des agriculteurs eux-mêmes. Afin d'illustrer mon propos, je mobilise des éléments de discours issus de ces entretiens. Les informations donnent à voir des points communs et des différences avec ce qui a été souligné pour les caves coopératives dans les cinq thématiques identifiées.

Relations amont-aval

Digitalisation et écologisation poussent les coopératives à établir de nouveaux partenariats économiques et à proposer de nouveaux services aux adhérents. Le développement de technologies numériques participe à modifier des relations avec l'amont, notamment avec les fournisseurs d'intrants, et avec l'aval, notamment avec les industries agro-alimentaires qui cherchent à avoir des filières spécifiques appelant à une plus forte traçabilité.

Les coopératives en grandes cultures, comme en viticulture, cherchent à inciter à la traçabilité via les logiciels pour répondre aux besoins de ces industriels, pour développer des filières qualité, et donc renforcer des segments de marchés à plus haute valeur ajoutée (Valceschini, 2006). Cependant, la traçabilité via les logiciels y apparaît moins cruciale qu'en viticulture, où les enjeux de segmentation par la traçabilité sont plus forts, voire obligatoires, et moins habituelle et moins acceptée par les producteurs. Les coopératives en grandes cultures font état d'un enjeu majeur lié à l'usage des logiciels de traçabilité, mais avec des difficultés techniques ou organisationnelles, comme cela a pu être le cas dans la filière viticole il y a une dizaine d'années (Salançon, 2009). Ces difficultés peuvent s'illustrer par le témoignage de la coopérative ci-dessous :

> « *Pour nos filières qualité, il faut une traçabilité extrêmement importante, qui va du champ jusqu'au paquet de pâtes. Je caricature mais à peine, il va falloir bientôt mettre la photo de l'adhérent sur chaque grain de blé, vous voyez. On a en théorie tous les outils pour pouvoir le faire tout ça, et pour répondre à la demande de nos clients des industries agroalimentaires, sauf que si les cases sont vides des outils de traçabilité… donc on rame aujourd'hui pour aller à la pêche de toutes ces infos.* » (Responsable d'une coopérative du Sud-Ouest)

Ces filières qualité, qui se développent dans le contexte d'une « économie de la qualité », recouvrent des conventions de qualités différentes, qui peuvent mettre en avant les technologies numériques (convention industrielle) ou les critiquer (Allaire, 2002), confirmant les analyses réalisées dans les caves

coopératives. L'information qui vise à détailler cette qualité devient elle-même une qualité que l'on pourrait qualifier de « qualité informationnelle » du produit. Ceci s'illustre par un témoignage sur les attentes de la grande distribution envers les organisations de collecte :

> « *Par exemple la semaine dernière on était en réunion Smag à Paris, et ils ont fait intervenir le groupement des Mousquetaires qui disait « on vend un produit c'est vrai, mais ce qui nous manque c'est l'histoire du produit. » Et aujourd'hui nous on en est bien conscient, mais l'agriculteur lui comme il n'y a pas la rétribution au bout lui il s'en moque un peu* » (Négoce du sud-ouest)

Rôles et fonctions des coopératives dans le système d'innovation

En grandes cultures comme en viticulture, les coopératives doivent faire face à des besoins de montée en compétences des techniciens pour accompagner ces nouveaux services. En grandes cultures, les conseils techniques sur la production font partie des missions de longue date des coopératives, et les outils numériques viennent apporter de nouveaux segments de conseil, accompagner les conseils existants, transformer la nature ou recomposer les rôles des acteurs du conseil (Di Bianco, 2019). Certaines coopératives en grandes cultures développent un service dédié et du conseil spécialisé pour la mise en œuvre et l'accompagnement à l'usage de technologies numériques. D'autres s'appuient sur les services et conseillers existants. Le témoignage ci-dessous illustre les questionnements des coopératives sur l'organisation du conseil.

> « *Aujourd'hui le technicien ne peut plus supporter tout, ne peut pas être expert sur tout ce qu'on lui demande de faire. Et les agriculteurs sont de plus en plus demandeurs d'experts aussi. Et de gens spécialisés. Que ce soit sur les services numériques d'ailleurs ou sur d'autres thématiques. Derrière nous ça nous oblige à nous former différemment voire à former des gens sur certains aspects, etc.* » (Responsable numérique d'une coopérative du sud-ouest)

Cependant, les avis sur le rôle des coopératives divergent entre adhérents et participent aux hétérogénéités internes à la coopérative

Hétérogénéités internes

Comme en viticulture, les hétérogénéités entre adhérents se renforcent avec l'écologisation et la digitalisation. Certaines coopératives cherchent alors à développer au maximum les technologies numériques, d'autres cherchent à distinguer les différents besoins. L'intégration de ces hétérogénéités de besoins peut participer à l'implication des adhérents et leur confiance, facteurs clés de la fidélité des adhérents à leur coopérative (Barraud-Didier et Henninger, 2009).

> « *C'est pareil, après tous les services ne correspondent pas à tous les agriculteurs, les agriculteurs n'en ont pas forcément besoin d'ailleurs. Après si un technicien sait d'identifier le besoin réel de son agriculteur et lui proposer le bon service, forcément que là ça fonctionne. Il faut être en capacité de le faire aussi, c'est pas toujours évident.* » (Responsable numérique d'une coopérative du sud-ouest)

Relations à l'écologisation

En termes d'écologisation, les coopératives en grandes cultures soulignent davantage que le développement de services numériques pourrait apporter des bénéfices environnementaux. Pour autant, elles n'ont pas évalué ces gains potentiels, et cette position semble associée à un discours général porté par les fournisseurs, conseillers, instituts techniques qui contribuent au développement de l'agriculture de précision et font partie du système d'innovation de ces filières. D'autre part, le numérique est développé avant tout pour la traçabilité (écologisation symbolique) et l'optimisation (écologisation faible). Cependant, dans une des trois coopératives en grandes cultures enquêtée, le développement de services numériques est aussi pensé comme une construction de connaissances pour les agriculteurs sur leurs sols, dans l'objectif d'amorcer des réflexions globales sur la santé des plantes, la fertilité et l'irrigation. Cette coopérative espère aussi valoriser l'ensemble des données collectées pour faire des analyses sur les pratiques, distinguer celles qui fonctionnent bien, mais sont limitées par le temps et les moyens disponibles pour réaliser de telles analyses. Il y a donc aussi différentes postures et stratégies pour les coopératives de ces filières. Il faudrait réaliser dans ce sens un travail spécifique, à l'échelle nationale, pour mieux en saisir les caractéristiques et les facteurs qui les expliquent.

Légitimité des organisations coopératives

En grandes cultures, la légitimité du positionnement des organisations coopératives dans le numérique semble plus remise en question, notamment à travers deux dimensions : l'évaluation des technologies et la traçabilité.

Comme en viticulture, les coopératives sont parfois impliquées dans des processus d'évaluation des technologies, et font état de difficultés pour les réaliser. Des agriculteurs sont impliqués dans ces évaluations, mais certains critiquent la qualité des évaluations réalisées. Un agriculteur témoigne ainsi avoir arrêté un service proposé par la coopérative.

> « *Disons que on a fait partie du groupe pilote pour le tester. On nous avait dit que ça allait être testé 2-3 ans. Nous la 1ère année qu'on l'a testé, sur 2 parcelles, ça a pas amené le résultat escompté. Par contre avant qu'on améliore les techniques, ils ont commercialisé à tous les autres adhérents en se servant un peu de nous. J'étais pas le seul, on était une dizaine. Pour moi c'était pas suffisamment testé et validé avant de le commercialiser. Et après, ils le factuurent 20-25€/ha ...* » (Agriculteur 47)

En effet, il peut y avoir des conflits d'intérêt entre le rôle d'évaluation d'une technologie numérique par la coopérative et ses fonctions de prestataire de service. Les coopératives rencontrées en grande culture sont plutôt dans une

optique de proposition de nouveaux services payants aux agriculteurs, plus que dans une démarche d'investissement collectif comme cela pouvait être le cas pour certaines caves coopératives. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les coopératives en grande culture cherchent de nouveaux segments de marge dans un contexte de baisse de leur vente d'intrants, alors que les caves coopératives ne font pas de vente d'intrants.

L'exigence de traçabilité numérique est vue comme envahissante, avec le risque d'« *être surveillé* », le risque de dépendance, de contrôle par la coopérative, comme en témoigne un agriculteur.

> « *Tout doit être transparent chez l'agriculteur mais rien n'est transparent chez la coopérative. Nous sommes de plus en plus liés à la coopérative* » (Agriculteur 47)

En revanche, la coopérative apparaît comme une interface qui facilite la mise en œuvre du numérique, comme en témoigne un agriculteur qui « *ne passe que par la coopérative pour avoir le maximum de passerelles entre [ses] outils* » (Agriculteur 83).

La digitalisation dans les coopératives en grandes cultures semble être un processus plus individualisé, via des services, conseils et formations individuels, alors qu'en viticulture, la démarche est plus collective et souvent prise en charge par les caves coopératives (investissement, accompagnement). Les différences constatées entre ces filières peuvent être liées à plusieurs facteurs. Premièrement, le fait que d'un côté on soit sur des produits peu différenciés et de l'autre des produits (vins) dont la qualité est liée à la gestion collective de ressources territoriales, considérées comme des formes de biens publics (terroir, paysage, nom de lieu »...), ce qui impose une action collective plus importante dans la mise en oeuvre d'innovations qui pourraient modifier la qualité intrinsèque (ex maturité du raisin) ou extrinsèque (image) du produit (Belletti, Marescotti et Touzard, 2017). Il faut aussi souligner que les structures coopératives en grandes cultures sont beaucoup plus grandes que celles en viticulture, à la fois en terme de nombre d'adhérents, de surfaces impliquées et de salariés. Cela peut jouer sur leurs besoins, mais aussi sur la gouvernance et la gestion des hétérogénéités internes, avec des adhérents qui se connaissent moins et travaillent dans des contextes plus variés. En outre, au niveau individuel, les usages de technologies numériques, notamment pour la production, sont plus restreints dans le secteur viticole étudié. Plusieurs hypothèses peuvent être émises sur ces différences. Premièrement, les exploitations viticoles sont plus petites, ce qui peut expliquer le plus fort recours au collectif concernant la digitalisation. Deuxièmement, les viticulteurs témoignent du fait que certaines technologies numériques ne sont pas adaptées à leurs parcelles, qui sont très découpées, avec beaucoup de pente et d'obstacles. Troisièmement, l'optimisation d'intrants, qui reste au cœur de la plupart des technologies numériques proposées actuellement, est sans doute moins cruciale en viticulture, au moins pour la fertilisation. En effet, la part des coûts consacrée aux intrants est moins importante en viticulture qu'en grandes cultures. De plus, la maximisation du rendement est moins un objectif des viticulteurs, qui visent plutôt à maximiser la qualité, ce qui peut impliquer de limiter les rendements (les cahiers des charges AOP ou IGP imposent un rendement maximal).

Apports et perspectives

Le focus sur les caves coopératives, puis plus globalement sur les coopératives agricoles, permet d'apporter un regard complémentaire aux résultats des chapitres 3 et 4. Tout d'abord, le rôle des organisations intermédiaires, ici des coopératives, est confirmé dans la digitalisation de l'agriculture (Fielke, Taylor et Jakku, 2020). Comme évoqué dans les chapitres précédents, elles diffusent des technologies, peuvent participer à leur évaluation, accompagner et former les viticulteurs ou agriculteurs. Mais elles peuvent aussi investir directement dans des technologies numériques et permettre aux adhérents de bénéficier d'économies d'échelle, ou d'assumer pour eux une partie du risque lié à la mise en œuvre de ces innovations, pas toujours adaptées aux conditions locales ou aux compétences des adhérents. Elles sont aussi un interlocuteur des organisations du numérique, et permettent de formuler des besoins et mutualiser des compétences (Filippi et Triboulet, 2006). Elles jouent enfin un rôle dans l'articulation de la digitalisation avec d'autres enjeux et notamment l'écologisation. Cette articulation peut notamment se faire par l'expérimentation, par la mise en cohérence des évolutions réglementaires et technologiques, par la construction collective de connaissances et de capacités. Cependant, cette articulation est contrainte par les évolutions externes aux coopératives, mais aussi par leurs fonctions internes. En effet, les coopératives sont des organisations qui ne sont pas neutres, ont leurs propres intérêts, qui peuvent être parfois contradictoires avec ceux d'une partie de leurs adhérents ou avec des objectifs sociétaux (Yang, Klerkx et Leeuwis, 2014).

Ce travail met aussi en lumière et questionne la particularité des coopératives par rapport à d'autres organisations intermédiaires. Comme système d'interaction entre acteurs coordonnés par une gouvernance particulière, mais aussi par leur rôle de représentation politique, les coopératives peuvent s'impliquer de manière différentes à d'autres organisations intermédiaires. De plus, les deux processus d'innovation étudiés impliquent le travail et les compétences des salariés des coopératives et peuvent mobiliser des ressources locales dont l'utilisation appelle à une action collective que peut porter la coopérative. Les coopératives semblent alors toujours « *une forme bien adaptée aux transformations actuelles de l'agriculture* » (Carrère, I. Joly et Rousselière, 2011, p.95). Cela invite à approfondir les recherches sur les transformations des relations de travail et l'action collective au sein des coopératives agricoles.

DISCUSSION GÉNÉRALE

6

DISCUSSION GÉNÉRALE

Introduction du chapitre

Les trois chapitres précédents ont permis d'étudier comment la digitalisation était mise en œuvre à différentes échelles d'action dans le secteur agricole et comment elle pouvait s'articuler avec ses différentes voies d'écologisation. À l'échelle du système d'innovation, j'ai montré que les attentes et risques perçus sont différents selon que les acteurs se rattachent à l'agriculture biologique ou conventionnelle. Ceux-ci ne mettent pas en place les mêmes stratégies de digitalisation. Ces différences sont toutefois peu perçues par les acteurs du numérique. Il y a alors un risque que les technologies soient développées selon le seul référentiel de l'agriculture conventionnelle. À l'échelle des exploitations agricoles en grandes cultures, les profils d'usage des technologies numériques varient selon le modèle de production agricole et les trajectoires d'écologisation. Les résultats confirment l'hypothèse selon laquelle le développement actuel du numérique tend à renforcer les trajectoires d'agrandissement, de spécialisation, de croissance du salariat et de la sous-traitance, en s'articulant de façon limitée à l'écologisation du secteur. Nos résultats montrent ensuite que les caves coopératives sont centrales dans les processus d'écologisation et de digitalisation. Elles éprouvent cependant des difficultés pour les articuler du fait d'objectifs, de partenaires et de politiques publiques qui ne sont pas forcément en cohérence. Ces coopératives ont toutefois des marges de manœuvre pour réaffirmer leur rôle et permettre aux viticulteurs de jouer un contre-pouvoir dans la trajectoire de digitalisation. Ce chapitre de discussion vise à tirer les enseignements de l'ensemble du travail réalisé dans la thèse, au niveau empirique, théorique et méthodologique.

Au niveau empirique (Section 1), je présenterai les apports des trois chapitres de résultats pour préciser comment la digitalisation interagit avec les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France. Mes résultats montrent qu'il existe une diversité de digitalisations à l'œuvre, qui sont liées aux modèles de production et qui s'associent à des transformations du système d'innovation. La digitalisation s'inscrit dans des transformations à plus long terme du secteur agricole, et vient jusque-là plutôt renforcer des dynamiques préexistantes que révolutionner l'organisation du secteur. La digitalisation apparaît plutôt en opposition avec l'écologisation du secteur, même si certaines hybridations se font ou semblent possibles. Au niveau théorique et méthodologique (Section 2), je préciserai comment mon travail de thèse peut contribuer à l'analyse des mécanismes de transformation des systèmes d'innovation. L'intégration de l'hétérogénéité intra système d'innovation, l'approfondissement de l'échelle micro-économique des usages et l'analyse du rôle d'intermédiaires permettent en effet de mettre en lumière une diversité de mécanismes économiques à l'œuvre. La méthodologie suivie pour appliquer le cadre théorique expliqué dans le Chapitre 2 montre des intérêts et limites que je soulignerai ensuite.

1 Ce que la thèse nous apprend sur les interactions entre digitalisation et écologisation

Cette section résume et intègre les connaissances empiriques produites dans les trois chapitres de résultats de la thèse. Je montre que le développement du numérique dans le secteur agricole dépend des modèles de production agricole et des paradigmes d'écologisation et les modifie en retour (Section 1.1). Je propose d'inscrire la digitalisation dans les transformations à plus long terme de l'agriculture et de ses modèles de production (Section 1.2). Ces analyses me permettent alors de revenir sur les liens entre les trajectoires de digitalisation et d'écologisation (Section 1.3).

1.1 Des trajectoires de digitalisation liées aux modèles de production agricole

« *Ce que va permettre le numérique, à travers les plateformes, c'est de démultiplier les opportunités pour « faire ensemble » dans une profession qui a déjà la capacité à collaborer* » annonce l'association Cofarming dans son livre blanc publié en 2017 [1], prolongeant l'annonce d'une publication du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2016a, p.12) Alim'Agri en 2016 : « *La révolution du big data implique une mutualisation : tout le monde apprend à coopérer !* ». Le ministère ajoute que « *Pour que ce big data soit au service de l'agriculteur, il faut rendre les données accessibles au plus grand nombre dans une logique d'innovation ouverte qui favorise l'émergence de start-up et de nouveaux opérateurs* » (ibid, p.10). D'un autre côté, les industriels se questionnent : « *la France en retard sur l'agriculture numérique ?* » [2], tandis que les auteurs du livre Agricultural Robotics distinguent les agriculteurs selon leur comportement d'innovation : « *Cependant, tous les agriculteurs ne sont pas destinés à être des pionniers. Il y aura toujours des personnes qui préféreront utiliser les pratiques de la vieille école et les méthodologies traditionnelles.* » (Traduit de : Lenain et al., 2021, p.16).

Les discours sur le numérique en agriculture oscillent ainsi entre des visions d'« innovation ouverte », de « co-construction » ou de « participation », et une conception de l'innovation linéaire et descendante, à laquelle font référence les concepts d' « acceptabilité » des technologies, de « résistance au changement », de « retardataires » ou de « pionniers », largement mobilisés par les entreprises du numérique et dans les documents institutionnels. Le travail empirique réalisé dans cette thèse met en évidence les caractères non linéaire et hétérogène du développement du numérique, en lien avec la diversité des modèles agricoles.

Que ce soit aux échelles des exploitations agricoles, des coopératives agricoles ou du système d'innovation, mes résultats montrent qu'il existe une pluralité de trajectoires de digitalisation. Par exemple, certains agriculteurs utilisent de nombreuses technologies numériques sur leurs machines agricoles, sans jamais aller sur internet ou sur les réseaux sociaux pour se renseigner. D'autres au contraire sont très investis dans des forums, ont des sites internet, mais ne disposent d'aucun objet numérique sur leur agroéquipement

1. CoFarming, 2017. Livre Blanc # CoFarming : Le faire ensemble en réseau. Paris. P.26
2. Fontaine, S., 2017. Indice mondial de l'innovation 2017 : la France en retard sur l'agriculture numérique ? Publié le 16/06/2017

(cf Chapitre 4). À l'échelle des coopératives et d'autres organisations agricoles, différentes stratégies sont également à l'œuvre : commercialisation de services numériques pour la production en partenariat avec des entreprises du numérique, développement en interne de plateformes numériques ou logiciels divers, investissement collectif dans une technologie, renouvellement des modes d'information et de communication via le numérique etc. (cf Chapitre 3 et Chapitre 5). Les acteurs font des choix différents en termes de digitalisation, de type de technologies développées ou mobilisées, d'usages, mais aussi en termes de modèle économique (investissement collectif, recours ponctuel à un service numérique, abonnement régulier, développement interne) et de partenariats (achat, formation, expérimentation, prestation etc.).

Mes résultats montrent aussi que les trajectoires de digitalisation ne se déroulent pas de manière linéaire. Le travail de terrain met en évidence des phénomènes d'ajustement, de tâtonnement, d'abandon ou encore d'usage ponctuel, à l'échelle des exploitations mais aussi à l'échelle des organisations. Certains agriculteurs essaient une technologie, l'arrêtent, et parfois y reviennent. D'autres utilisent ponctuellement une technologie par l'intermédiaire d'un voisin ou d'un prestataire. Des utilisateurs abandonnent une technologie parce qu'ils n'arrivent pas à l'utiliser correctement mais aussi parce qu'ils n'y ont pas trouvé d'intérêt, parce qu'ils changent de pratiques agricoles ou revoient leurs stratégies économiques et décident de limiter les investissements. Ces observations renforcent et complètent la littérature sur les « droppers » ou « dis-adopter », c'est-à-dire les agriculteurs qui cessent d'utiliser une technologie, une littérature qui souligne le manque de conseil ou le manque d'intérêt constaté comme facteur d'abandon (Sutherland, Madureira, Elzen et al., A paraître). L'abandon d'une technologie peut venir d'une décision suite à une auto-évaluation ou d'une bifurcation plus globale de stratégie, constituant une forme d'« innovation par retrait » (Goulet et Vinck, 2012).

J'ai également montré que certaines coopératives essaient et testent des technologies, et choisissent ou non de les promouvoir ensuite auprès de leurs adhérents. D'autres changent régulièrement de prestataire pour des services numériques. Les résultats donnent à voir des processus d'apprentissage, par exemple des coopératives ou des agriculteurs qui mobilisent une première fois un service numérique (tel que la télédétection parcellaire), puis utilisent les données produites et les connaissances acquises plusieurs années sans réutiliser le service. Certains adaptent leur manière d'utiliser des logiciels ou technologies pour mieux répondre à leurs besoins, comme souligné par Higgins et al. (2017). D'autres adoptent une technologie numérique en réponse à une norme, une évolution réglementaire, ou un contrat. Par ailleurs, la description des technologies et de leurs usages montrent que les technologies sont interdépendantes les unes des autres, ce qui est généralement peu intégré dans les travaux sur l'adoption tels que ceux de Barnes et al. (2019) ou de Lowenberg-DeBoer et Erickson (2019). Ces interdépendances peuvent créer des phénomènes de seuil et de renforcement (Clapp et Ruder, 2020) : à partir du moment où l'on dispose d'une technologie, il est plus simple d'avoir accès aux autres (par exemple l'utilisation de technologies de modulation d'intrants ou de coupure de tronçons est conditionné par le fait d'avoir le guidage GPS). Elles peuvent aussi engendrer des phénomènes d'exclusion : s'il est difficile d'avoir accès à une technologie, cela limite l'accès à un ensemble d'autres

technologies. Ces contingences et ces interrelations techniques qui jouent sur la trajectoire technologique renvoient à des mécanismes de dépendance au sentier mis en évidence dans des travaux en économie évolutionniste (David, 1985).

Ces observations invitent à aller au-delà d'une vision trop simplifiée et linéaire de l'adoption d'innovation, comme celle qui avait été proposée initialement par Rogers (2010), et distingue les « innovateurs » et « retardataires ». Il semble plus pertinent de se poser la question des conditions dans lesquelles il devient intéressant d'utiliser une technologie. En effet, mes résultats montrent que l'hétérogénéité à l'échelle des exploitations agricoles, mais aussi des organisations du secteur, ne s'explique pas seulement par les caractéristiques individuelles, mais s'inscrit dans une diversité de modèles de production, associés à différents objectifs, contraintes techniques, représentations, connaissances et moyens disponibles.

À l'échelle des organisations et coopératives agricoles, le développement du numérique dépend des filières concernées, mais aussi du type d'écologisation que ces organisations développent. Ces formes d'écologisation impactent notamment leurs attentes envers le numérique. Par exemple les attentes des organisations rattachées à l'agriculture conventionnelle sont plutôt tournées vers l'amélioration de la rentabilité, la traçabilité pour valoriser et segmenter les marchés, le développement de nouveaux services commerciaux, l'image et l'attractivité de l'agriculture, l'amélioration des conditions de travail, l'optimisation des pratiques, la réduction des impacts sur l'environnement. Certains de ces enjeux renvoient à une vision d'écologisation dite « faible ». Les organisations qui se rattachent à l'agriculture biologique mettent en avant leurs attentes d'un numérique accessible à tous, favorisant l'exploration, l'analyse ou la conception systémique d'agroécosystèmes, renforçant les échanges horizontaux, permettant de valoriser des productions, d'échanger des services ou des connaissances. Elles ont aussi des attentes de technologies qui pourraient résoudre des problématiques spécifiques à la production biologique, notamment faciliter le désherbage mécanique et le travail du sol (pour allier production biologique et conservation des sols notamment), ou limiter le recours aux intrants, notamment au cuivre dans la viticulture biologique. En viticulture, les attentes de technologies numériques peuvent converger davantage autour d'enjeux concernant la réduction d'intrants, commune à plusieurs voies d'écologisation (viticulture conventionnelle et biologique). Les enjeux soulignés par les organisations qui se rattachent à l'agriculture biologique renvoient alors aux différentes formes d'écologisation (optimisation et reconception), mais aussi à un modèle socio-économique.

À côté d'attentes divergentes, les risques perçus à propos de la digitalisation sont également différents. Les acteurs liés au paradigme conventionnel craignent l'appropriation de données et de valeur par les entreprises du numérique. Ils s'inquiètent de problèmes techniques, tels que la compatibilité entre technologies, les problèmes de bande-passante ou de fiabilité. Les acteurs de l'agriculture biologique mentionnent quant à eux des risques plus importants de dépendance, de perte de pouvoir et de connaissances ou encore des risques de standardisation ou d'exclusion. Ces éléments de résultats ont notamment contribué au chapitre sur les risques du numérique en agriculture, dans le livre blanc INRAE-INRIA (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022). Ces différences de représentations et de perceptions liées au modèle

agricole expliquent en partie les différences de stratégie et de mise en œuvre de la digitalisation par les organisations agricoles. Elles donnent à voir une diversité potentielle de trajectoires de digitalisation.

À l'échelle des exploitations agricoles, la littérature met en évidence l'impact de facteurs tels que la taille des entreprises dans les travaux sur l'adoption des technologies d'agriculture de précision (Barnes et al., 2019 ; Konrad et al., 2019). Je montre que les usages du numérique dépendent de manière plus globale du modèle productif de l'exploitation (niveau de capitalisation et nature des technologies, forme et organisation du travail, qualité des produits, écologisation) en interaction avec son insertion dans le système d'innovation agricole (conseil, commercialisation, réseaux professionnels). Par exemple, l'usage important des technologies numériques pour la production (TNP) est lié à l'agrandissement des exploitations, mais aussi à leur l'insertion dans les réseaux de conseil et de commercialisation des semenciers ou des coopératives. Ces acteurs peuvent en effet inciter ou imposer l'usage de technologies numériques. La mise en œuvre de l'agriculture biologique ou de productions diversifiées est plus faiblement associée à l'usage des TNP, à l'exception des grandes exploitations mixtes biologique-conventionnelle. L'usage des technologies numériques pour l'information et la communication (TNC) tend à se généraliser, notamment chez les agriculteurs déjà engagés dans des groupes d'échange d'expériences. La littérature souligne le rôle des coopératives dans l'adoption de technologies numériques (Barnes et al., 2019). Je montre dans cette thèse le rôle des modèles de production, qui peuvent être portés par les coopératives, dans l'adoption et l'usage de ces technologies.

Mes résultats sur la digitalisation de l'agriculture confirment donc le caractère systémique, interactif et collectif du processus d'innovation, lié à des déterminants technico-économiques, individuels, politico-institutionnels, ainsi qu'aux groupes professionnels locaux (Ansaloni et Fouilleux, 2006 ; Darré, Le Guen et Lémery, 1989). Ils invitent à prendre du recul sur la vision individuelle et linéaire du processus d'innovation inscrit dans les représentations économiques et politiques de l'innovation. La mobilisation de cette conception individuelle de l'innovation naturalise et individualise le déploiement des technologies. Elle sert de justification politique et économique au soutien aux entreprises, afin de « combler le retard » (par exemple : A. Martin, 2019), et masque la diversité des besoins, des attentes, et des logiques technologiques dans l'agriculture. Les trajectoires de digitalisation dépendent des modèles économiques et agronomiques, des valeurs, des objectifs (Klerkx et Begemann, 2020). Elles dépendent donc des évolutions structurelles du secteur agricole et le font évoluer également.

La digitalisation renvoie à une diversité de nouvelles technologies, de nouveaux services et de nouveaux acteurs dans le secteur agricole. Une partie de ces technologies, telles que la géolocalisation ou des outils d'aide à la décision basés sur des modèles, est issue de la recherche puis de l'industrialisation de ces inventions, de leur diffusion par des organisations intermédiaires et de leur adoption dans les exploitations pour répondre aux besoins liés à leur industrialisation. Une partie du développement technologique du numérique se fait ainsi dans une perspective diffusionniste, qui intègre peu la diversité des besoins lors des processus de conception (Bronson, 2019). Les politiques d'innovation, le plus souvent centrées sur l'offre, proposent généralement des partenariats entre la recherche et les entreprises, et semblent basées sur une

conception linéaire de l'innovation, d'après mes observations de terrain. Les organisations agricoles jouent alors un rôle « classique » d'intermédiaire pour la diffusion mais elles sont aussi des espaces de formation et d'expérimentation. Plusieurs organisations enquêtées, notamment celles de l'agriculture biologique et les coopératives viticoles, mettent en avant l'importance de la formation et de l'accompagnement des agriculteurs (Newton, Nettle et Pryce, 2020). Les organisations agricoles peuvent également être partenaires de projets sur le numérique, ou initiatrices d'innovation. On observe des formes de structuration des acteurs autour du numérique en agriculture, mais qui restent majoritairement organisés autour de l'offre (consortium recherche/entreprises, associations de start-up, partenariats entreprises numérique et entreprises agricoles), et qui intègrent peu les agriculteurs. Il y a tout de même une mise en place de partenariats entre les acteurs du numérique et les organisations agricoles, mais qui tendent à se centrer autour du modèle agricole dominant, sans prise en compte, jusqu'à présent, de l'hétérogénéité du secteur agricole.

Le numérique en agriculture apparaît alors comme un ensemble d'innovations qui présentent des caractéristiques spécifiques. Les technologies numériques, loin d'être des innovations de niches, concernent une large partie des organisations et exploitations agricoles. Leur développement n'est pas qu'exogène ; il résulte de partenariats entre acteurs du numérique et acteurs agricoles, mais aussi de projets internes aux organisations agricoles. La digitalisation est liée à un ensemble d'agencements entre des acteurs, qui participent à ce processus de manière hétérogène selon leurs intérêts, leur vision et leur pouvoir, et des politiques publiques, de recherche et développement, de transformations économiques. Ces trajectoires de digitalisation, bien que spécifiques, s'inscrivent dans des dynamiques de plus long terme, que j'aborde dans la section suivante.

1.2 La digitalisation comme poursuite des transformations historiques du secteur agricole

La digitalisation du secteur agricole est parfois présentée comme une « *nouvelle révolution agricole* » (Barrett et Rose, 2020 ; Rolandi et al., 2021) et parfois, à l'opposé, comme une continuité voire un renforcement et une accélération des transformations industrielles de l'agriculture (Bronson et Knezevic, 2016 ; Wolf et Buttel, 1996). Cette section s'inscrit dans ce débat. L'industrialisation de l'agriculture peut être caractérisée par la spécialisation, l'intensification et l'agrandissement des exploitations, par la standardisation de la production, par l'augmentation du salariat, par le recours croissant aux énergies et matériaux extérieurs aux exploitations, ainsi que par l'intégration croissante dans les chaînes de valeur (Daviron, 2021 ; Diry, 1988). Mes résultats confortent plutôt l'idée que la digitalisation se développe en continuité des transformations historiques des modèles de production agricole, de leur industrialisation, tout en intégrant de nouveaux aspects voire en ouvrant la perspective de nouvelles trajectoires.

1.2.1 *La digitalisation, accélérateur des transformations des modèles productifs agricoles*

À l'échelle des modèles productifs, caractérisés par leur organisation productive (méthodes, technologies, ressources, organisation spatiale) et biotechnique (pratiques agricoles, rapport à la nature), les formes et l'organisation du travail, la qualité des produit et leur insertion marchande, les résultats du Chapitre 4 montrent des continuités mais aussi des effets paradoxaux dans la transformation des organisations, des pratiques agricoles et du travail.

Le travail de terrain réalisé dans les exploitations agricoles en grandes cultures montre qu'une partie des technologies numériques utilisées favorisent la spécialisation, l'**intensification** et l'**agrandissement** des exploitations, c'est-à-dire des dynamiques déjà enclenchées depuis le milieu de XXème siècle (Allaire et R. Boyer, 1995 ; Servolin, 1989). En effet, des technologies, notamment des outils d'aide à la décision, ne fonctionnent qu'avec certaines cultures, et peuvent donc inciter à augmenter les surfaces qui y sont consacrées pour rentabiliser les investissements réalisés. On peut également penser que l'investissement dans des technologies numériques pour l'irrigation tend à renforcer la production des cultures irriguées. Les technologies basées sur un seul type de production entraînent ainsi des recherches d'économie d'échelle et des orientations technologiques qui favorisent des trajectoires de spécialisation. Les objectifs d'intensification et d'augmentation de la production sont intégrés dans la conception de technologies numériques (Bronson, 2019), et les exploitations qui utilisent le plus le numérique sont globalement celles qui sont orientées vers un productivisme plus marqué. Des usages de technologies numériques facilitent également l'agrandissement des exploitations, en augmentant la productivité du travail ou en facilitant la gestion et le contrôle du travail. Ces technologies semblent également offrir de nouvelles possibilités de **substitutions** d'intrants et de procédés, ce qui avait été également constaté avec la moto-mécanisation de l'agriculture dans la seconde moitié du XXème siècle (Byé, Chanaron et Perrin, 1989).

Les effets sur la **standardisation** sont plus paradoxaux. Les technologies numériques sont à la fois porteuses d'une individualisation du conseil (Stone, 2022), avec la prise en compte des hétérogénéités de sols et de conditions climatiques. Mais elles sont perçues par certains acteurs aussi comme des formes de standardisation des itinéraires techniques et du conseil. Nos enquêtes montrent que les pratiques qui ne rentrent pas dans ces standards peuvent poser des problèmes lors de l'utilisation de technologies, qui ne sont pas paramétrées pour des intrants ou des techniques non conventionnelles. Par exemple, des agriculteurs rencontrent des problèmes pour l'utilisation de la modulation parcellaire avec des engrais organiques, ou pour la saisie dans des logiciels lorsqu'ils utilisent des semences ou intrants qui ne sont pas catalogués dans ceux-ci. Les normes de traçabilité, notamment liées aux contrats et cahiers des charges des acheteurs, semblent également amener à une standardisation des pratiques.

Mais cette traçabilité offre aussi des nouvelles possibilités de segmentation des productions, donc de valorisation de la diversité, largement utilisées en viticulture, mais mobilisées également en céréales avec le développement de filières qualité (Heintz, 1990). De plus, l'usage des technologies numériques

de production (TNP) est associé à des nouveaux modes de production avec les exploitations mixtes, ou avec des exploitations en agriculture de conservation des sols. L'usage des technologies numériques d'information et de communication (TNC) amène aussi parfois des changements de pratiques, notamment sur les couverts végétaux, l'agriculture de conservation. Le numérique peut donc favoriser des standardisations au sein de segmentations, qui s'inscrivent dans une économie de la qualité (Allaire, 2002 ; Valceschini et Nicolas, 1995). Plutôt qu'une standardisation vers une production homogène, le numérique standardise vers une segmentation de la production. Les effets du numérique sur la standardisation des modes de production sont encore peu analysés dans la littérature : ils sont parfois évoqués comme hypothèse (Fraser, 2021 ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020), mais il n'existe pas, à ma connaissance, d'études empiriques qui approfondissent cet aspect.

La digitalisation s'intègre également dans la transformation des modes de **décision** et de gestion des **connaissances** au sein des exploitations (Rose, Morris et al., 2018). Ces artefacts techniques nouveaux peuvent être vus comme une forme d'externalisation des décisions et des responsabilités, associée à un transfert des compétences décisionnelles vers les firmes (Carbonell, 2016 ; Carolan, 2017b), ou comme une forme d'automatisation du travail intellectuel (Lele et Goswami, 2017). En effet, l'utilisation de certaines technologies numériques vient modifier en partie le processus de décision, en y ajoutant de nouvelles données, de nouveaux leviers, modèles ou algorithmes, et de nouveaux acteurs (les fournisseurs de technologies). Elles modifient aussi le processus de gestion des données et connaissances sur l'exploitation : enregistrement de l'historique des pratiques, traitement de données sur l'ordinateur, nouvelles formes de visualisation des données... Mes résultats sont là aussi paradoxaux. Ils montrent les risques perçus sur une perte d'autonomie décisionnelle, associée à une perte de pouvoir, confirmant des résultats de la littérature (Jeanneaux, 2018). Les modes de décision peuvent inclure des formes de transfert de compétences vers les firmes (Fraser, 2019). La construction des données et leur traitement apparaît peu transparent et peu compris par les utilisateurs, qui remettent parfois en question leur validité ou pertinence.

Cependant, mon travail tend à relativiser l'importance de ces transferts de compétences et d'externalisation. En effets les utilisateurs sont nombreux à témoigner d'un certain recul sur les connaissances issues d'outils digitaux d'aide à la décision (OAD) ou d'internet. Les conseils et connaissances transmises par les technologies numériques sont souvent, quand l'agriculteur en a la possibilité, re-situées et mises en perspectives avec les connaissances locales, l'expérience personnelle et les conseils de l'entourage professionnel, ce qui correspond au « re-scripting » de l'OAD décrit par Rose, Morris et al. (2018). Ils sont aussi adaptés aux objectifs et risques qu'ils acceptent de prendre. Certains agriculteurs n'en ont cependant pas la possibilité. En effet, plusieurs technologies qui intègrent capteur, modélisation et application automatique empêchent toute intervention de la part de l'utilisateur. Parfois, ce sont les arrangements associés à ces technologies qui empêchent l'utilisateur d'intervenir. Par exemple, un agriculteur témoigne qu'il est contractuellement obligé d'appliquer la dose d'engrais prescrite par la carte de modulation, qui est envoyée par l'entreprise semencière qui lui achète ses productions.

Le développement du numérique apparaît également comme un support des transformations du **travail** en agriculture. La littérature sur le numérique en agriculture, quand elle s'intéresse au travail, le fait principalement d'un point de vue de l'individu. Des travaux montrent ainsi comment le numérique vient modifier l'identité professionnelle et la nature du travail, et impacte également le sens et la satisfaction au travail, négativement dans certaines études, positivement dans d'autres (Bronson, 2019 ; Hansen et Stræte, 2020 ; Mazaud, 2017 ; Rose, Wheeler et al., 2021). Mes enquêtes font ressortir une même ambivalence des effets de la digitalisation sur les individus. D'un côté, les technologies numériques permettent de gagner du temps de travail sur certaines tâches et de les faciliter, améliorent les connaissances ou réduisent la pénibilité du travail (un exemple souvent mentionné est la conduite assistée par GPS, qui évite au conducteur du tracteur de se retourner régulièrement). D'un autre côté, elles s'accompagnent de nouvelles tâches qui peuvent contrebalancer le temps gagné, donnent un sentiment de contrôle, réduisent l'autonomie (notamment pour la réparation du matériel), impliquent des tâches fastidieuses et moins appréciées et nuisent au relationnel. Carolan (2020) définit ces effets du numérique sur le travail comme micro-politiques, et souligne qu'ils sont essentiels à comprendre et à prendre en compte. Dans nos enquêtes, ces effets micro-politiques sont également ambigus.

Les usages du numérique dans les exploitations s'associent aussi à des transformations plus globales de l'organisation du travail dans les modèles productifs, dont l'étude permet de comprendre les évolutions contemporaines de l'agriculture. Alors que la modernisation agricole se basait essentiellement sur le modèle familial d'exploitation agricole, le numérique semble répondre aux besoins du développement du salariat et de la sous-traitance en agriculture dans des modèles qui restent familiaux mais dont l'intensité en capital les rapproche de l' « agriculture de firme » (Hervieu et Purseigle, 2009 ; Nguyen et Purseigle, 2012). En effet, les usages de TNP s'associent à des exploitations ayant un plus fort recours à de la main-d'œuvre salariée et/ou une activité de prestation agricole. Il faut noter que l'augmentation du recours à la main-d'œuvre salariée en parallèle d'une diminution de la main-d'œuvre familiale est une tendance générale dans le secteur agricole, tout comme l'augmentation de la sous-traitance (Cf RGA 2020 [3]). Dans mes enquêtes, les technologies numériques apparaissent comme des moyens d'organisation, d'enregistrement et de contrôle du travail (aussi bien de son propre travail que de celui des salariés) dans les exploitations et les entreprises de travaux agricoles. Ces résultats vont dans le sens des hypothèses formulées sur le fait que le numérique en agriculture favoriserait des formes de surveillance et de contrôle du travail des salariés au sein des exploitations (Giles et Stead, 2021 ; Prause, 2021 ; Rotz, Gravely et al., 2019). Mon travail montre plus largement que le numérique sert des formes d'enregistrement, d'historique et de contrôle du travail (prestation, associés, salariés), dans un contexte d'agrandissement et de complexification de la gestion des exploitations.

Avoir une activité de prestation de travaux agricoles peut créer des besoins en technologies numériques, et être une manière de rentabiliser des investissements dans le numérique. On constate ainsi des formes d'agrandissement par prestation, qui correspondent à une augmentation des surfaces travaillées

3. https://agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2020-julien-denormandie-presente-les-premiers-resultats-du-recensement-decennal

sans augmenter la surface de l'exploitation en elle-même. Dans mon échantillon, les surfaces travaillées sont parfois multipliées par dix grâce à la prestation. La prestation peut être ciblée sur une fonction liée à une machine spécifique, telle que la moisson ou le semis d'une culture. Elle peut également être une prestation dite de A-à-Z, incluant toutes les opérations techniques voire administratives et décisionnelles. Dans l'autre sens, le recours à de la prestation est, pour un agriculteur, une manière de limiter l'investissement matériel, de limiter les aléas et donc de mieux gérer les risques (Nguyen, Brailly et Purseigle, 2020). Dans mon travail, il apparaît aussi comme une manière d'accéder à de l'information technique et économique, les prestataires pouvant alors jouer un rôle de nouveaux prescripteurs. Un parallèle peut être fait entre ce recours croissant à la prestation et les tendances de flexibilisation du travail associées au développement du numérique dans la société (Srnicek, 2017), mais aussi à des formes d'invisibilisation (Gruszka et Böhm, 2020) ; le travail des prestataires étant beaucoup moins renseigné dans la littérature et dans les statistiques publiques.



FIGURE 6.1 – Stockage de matériel agricole dans une exploitation et entreprise de travaux agricoles - Source : auteur

Dans la société, les usages du numérique sont parfois associés à un brouillage entre sphère professionnelle et personnelle (Casilli, 2019). L'agriculture est déjà en soi un travail où les limites entre ces sphères sont très floues (Gregoire, 2002). La littérature a souligné le fait que les sollicitations numériques (alertes, notifications) pouvaient accroître ce brouillage et le stress au travail notamment en élevage (Hostiou, Fagon et al., 2017). Dans mes enquêtes, les usages du numérique pour s'informer et communiquer apparaissent également à la frontière entre travail et loisir avec des agriculteurs qui témoignent aller sur les réseaux sociaux « *par curiosité* », « *juste pour voir* », ou parce-qu'ils « *aiment bien ça* ». On retrouve ce brouillage chez les agri-youtubeurs, agriculteurs qui se mettent en scène dans leur travail, mais aussi dans leur vie personnelle, à travers des vidéos publiées régulièrement sur internet (Rénier et al., 2022). En revanche, les effets de sollicitations numériques permanentes ont peu été évoquées, à l'exception des sollicitations publicitaires sur internet, ce

qui souligne la différence des problématiques entre production végétale et animale, où les questions d'astreinte restent plus marquées.

1.2.2 *La digitalisation réoriente les transformations du secteur agricole*

Le développement du numérique s'intègre et transforme les modèles productifs des exploitations agricoles. Les transformations de leur organisation productive et biotechnique, de leur organisation du travail, de leur type de production et de leur insertion marchande sont en lien avec les transformations sectorielles plus larges (R. Boyer et Freyssenet, 2000), avec là aussi des formes de continuités avec les transformations sectorielles passées.

Concernant l'**émergence des technologies**, la recherche continue de jouer un rôle important, notamment pour les technologies de géolocalisation, de modélisation et d'agriculture de précision (Oui, 2021b). À l'échelle des firmes de l'amont, mes résultats évoquent une continuité de la substitution de services aux produits, tendance amorcée dès l'industrialisation et qui participe à la restructuration du secteur de fourniture d'intrants agricoles, avec notamment des concentrations et fusions de ces firmes (Byé, Chanaron et Perrin, 1989). En revanche, ce développement est poussé par des dynamiques extra-sectorielles nouvelles, à travers des projets avec des entreprises comme Airbus, Orange, Microsoft etc. Mes résultats montrent aussi d'autres formes d'émergence d'innovation numérique, dont certaines telles que des logiciels, plateformes ou outils de communication se conçoivent au sein d'organisations agricoles, par et pour elles-mêmes et/ou les agriculteurs.

Cependant, une partie des dynamiques d'adoption résultent d'un rapport de force favorable aux industries aval (agroalimentaires, négoce, distribution...) qui imposent des innovations aux agriculteurs (Meynard et al., 2017). Ce constat portait essentiellement sur les processus de production (semences, fertilisation, etc.). Mes résultats montrent que s'y ajoutent aujourd'hui des innovations organisationnelles et numériques. Par exemple des contrats de production en blé de qualité pour l'industrie agro-alimentaire imposent l'utilisation de technologies numériques de modulation d'engrais. Des contraintes à l'export, des cahiers des charges de la grande distribution ou des contrats spécifiques imposent ou incitent à l'utilisation de logiciels de traçabilité. Ces innovations peuvent être liées à des objectifs de fin, qui laissent une marge de manœuvre décisionnelle sur la manière d'atteindre un objectif donné, ou à des objectifs de moyens, qui imposent le recours à la technologie en question (Cholez, Magrini et Galliano, 2017). La dynamique de digitalisation semble donc en partie prolonger des formes d'**intégration** des exploitations aux structures agro-industrielles ou commerciales d'amont et d'aval (Bartoli et Boulet, 1989), notamment via les données.

La digitalisation vient aussi questionner le **rôle de l'État**. Lors de la période de modernisation, l'État a participé à orienter et rythmer le progrès technique en agriculture, mais a participé aussi à sa genèse (Byé, Chanaron et Perrin, 1989). En effet, l'innovation technologique n'est pas que le fruit de dynamiques privées, elle est souvent associée à des soutiens importants de la part de l'Etat, y compris dans le secteur du numérique (Mazzucato, 2011). Les politiques agricoles en premier lieu, intègrent une séries d'incitations, de contraintes et de normes qui orientent les transformations des modèles et

l'innovation, telles que la politique foncière, la politique fiscale, les soutiens à la formation, ou même des politiques de soutien, de stabilisation des marchés ou de gestion du risque. En France, les politiques agricoles sont influencées par une persistance des intérêts néo-mercantiles, c'est-à-dire qui cherchent à moderniser l'agriculture et soutenir les exportations, par des instruments de soutien à la compétitivité des exploitations, tels que les aides aux investissements (Trouvé, 2009). Celles-ci peuvent alors favoriser les investissements des exploitations dans les technologies numériques. Mes résultats montrent que les politiques agricoles jouent sur les usages du numérique également par leurs exigences (traçabilité, comptabilité) et les modalités administratives qu'elles impliquent (télédéclaration par exemple) (Mesnel, 2017). La traçabilité numérique répond également aux besoins des filières dans un contexte de **dérégulation** par les Etats, comme déjà montré dans travaux aux Etats-Unis (Wolf et Buttel, 1996 ; Wolf et Wood, 1997).

Mais le développement des technologies numériques agricole est aussi soutenu par des politiques d'innovation centrées sur l'offre. L'état participe à **orienter les évolutions technologiques**, mais plus indirectement, via le financement de start-ups, de projets publics-privés ou de projets de recherche. Ces politiques d'innovation sont avant tout des politiques économiques, dont l'arbitrage est en dehors du champ d'action du ministère de l'agriculture, comme me l'a souligné en entretien le responsable de la délégation au numérique du ministère de l'agriculture. Le développement du numérique et le rôle que l'état y joue pourraient participer à la réorientation des politiques d'innovation vers une perspective plus néo-libérale, perspective qui semble déjà dominante dans d'autres pays pour les politiques de digitalisation de l'agriculture (Fraser, 2019 ; Stone, 2022) (respectivement au sujet de l'Irlande et des pays du sud). Mes résultats montrent que ces politiques d'innovation pourraient alors participer à des formes d'exclusion de certains acteurs du secteur agricole, qui n'envisagent pas les mêmes modèles économiques pour la digitalisation, ou qui ne constituent pas un marché intéressant pour ces entreprises. En outre, ces politiques donnent un rôle croissant aux entreprises privées dans l'orientation de l'innovation, d'où l'importance que jouent les firmes telles que John Deere ou Bayer dans la trajectoire de développement du numérique à l'international (Bronson et Knezevic, 2016 ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020). Les « Corporate Innovation System » (Lundvall et Rikap, 2022) peuvent alors interagir avec les systèmes sectoriels d'innovation dans le financement, la structuration des acteurs et des connaissances, la formation des utilisateurs, le développement de technologies numériques et l'organisation du secteur, participant à la construction des trajectoires technologiques.

Ceci est d'autant plus important qu'avec la digitalisation, on assiste à des formes de monopolisation intellectuelle et de concentration des firmes (Rikap, 2021). En effet, les transformations actuelles du capitalisme sont notamment liées à des formes d'extraction et d'accumulation de données, guidées par la croissance et la concurrence des firmes dans une économie capitaliste, et facilitées par l'organisation en plateforme, ce qui conduirait à un *capitalisme de plateforme* (Srnicek, 2017). L'économie de plateforme rassemble « *les activités économiques dans lesquelles des ressources matérielles ou immatérielles sont échangées entre les fournisseurs et les utilisateurs par l'intermédiaire de plateformes électroniques centralisées* » (traduit de Montalban, Frigant et Jullien, 2019, p.3).

L'extension du capitalisme de plateforme pourrait alors amener une restructuration du secteur agricole avec de nouvelles formes de concentration et de monopolisation (Giles et Stead, 2021).

Ces pistes de réflexion questionnent le rôle de la digitalisation sur l'évolution des politiques agricoles. Elle pourrait renforcer l'hégémonie des intérêts néo-libéraux, au détriment des intérêts néo-mercantiles et multifonctionnels [4] (Trouvé, 2009). Ces questionnements sont un enjeu actuel fort de la recherche et des politiques dans le domaine, pris en main par exemple dans le projet PADAC [5], projet de recherche sur les « Plateformes numériques dans le secteur agricole et dynamiques de l'action collective ». Ils font écho à des débats sur les stratégies d'innovation à adopter entre soutenir la R&D, ou soutenir le déploiement des technologies par la demande (Labarthe, Coléno et al., 2021).

Le développement du numérique questionne également la **circulation des connaissances** dans le secteur. D'une part la digitalisation modifie structurellement l'organisation des services de **conseil** avec l'arrivée de nouveaux acteurs et de technologies numériques. Les données, créées par les technologies numériques, peuvent être transformées en capacités prédictives et alimenter des technologies ou dispositifs de conseil qui peuvent être vendus. De ce fait, les entreprises de l'agri-business cherchent à accumuler des données, phénomène décrit par le concept de « data-grab » (Fraser, 2019). Dans le capitalisme contemporain, cette logique d'accumulation, basée sur les données d'expériences personnelles transformées en capacités prédictives et en capacités d'influence qui peuvent être revendues, est appelée capitalisme de surveillance (Zuboff, 2019). Le développement du numérique participerait ainsi à une logique d'accumulation et d'extension des entreprises de l'agri-business, vers une « agriculture de surveillance » (Rose, Wheeler et al., 2021 ; Stone, 2022). Ces entreprises se baseraient sur les données pour créer des formes d'individualisation et de marchandisation, dans une logique de renforcement de la privatisation du conseil agricole, amorcée depuis plusieurs années déjà (Labarthe, 2009). Mes résultats montrent en effet que les firmes de l'agri-business (agroéquipement, agrochimie, semenciers, industries d'aval) sont nombreuses à proposer des technologies numériques, qui participent à collecter des données sur la production agricole (météo, pratiques, production). Les acteurs du secteur agricole, notamment ceux qui se rattachent à l'agriculture conventionnelle, soulèvent alors des risques d'une appropriation de la valeur créée par les technologies numériques, dont ils espèrent eux-mêmes tirer profit. Cependant, les organisations agricoles in-

4. À partir d'une analyse des politiques agricoles, Aurélie Trouvé identifie différentes formes de politiques agricoles, qui correspondent à différents compromis entre des intérêts divergents et issus de rapports de pouvoir spécifiques à chaque espace. Ces intérêts se caractérisent par trois idéaux-types :

- Les intérêts néo-mercantiles, qui visent à augmenter la production et la balance commerciale du secteur agricole, par des mesures de soutien aux exportations, de protection des marchés et d'accompagnement à la modernisation des exploitations
- Les intérêts néo-libéraux, qui visent à promouvoir l'internationalisation des échanges et marchandisation croissante des activités
- Les intérêts multifonctionnels, qui visent à soutenir les fonctions environnementales et sociales de l'agriculture

5. Informations accessibles sur le site de l'Agence Nationale de la Recherche : https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE26-0003

termédiaires gardent un rôle central et ne sont pas exclues de ce processus de digitalisation, qu'elles participent à construire, orienter, évaluer, décider par exemple avec des investissements collectifs, des expérimentations, ou le développement plus endogène de technologies numériques et suivant d'autres modèles économiques.

Par ailleurs, les usages du numérique pour la capitalisation, l'accès et l'échange de connaissances tendent à se généraliser dans le secteur agricole et peuvent impacter les réseaux et la circulation de connaissances. Certains usages sont en continuité avec des dynamiques d'échanges de connaissances entre groupes de pairs, et viennent renforcer les échanges internes de coopératives, groupes d'agriculteurs ou autres organisations, qui développent des outils d'échanges et de capitalisation de connaissances. Ils confirment ainsi l'importance des communautés existantes pour les échanges entre agriculteurs sur internet (Skaalsveen, Ingram et Urquhart, 2020). D'autres usages constituent de nouvelles communautés d'échanges, autour d'objets d'intérêt commun tel que l'agriculture de conservation des sols, qui s'étendent parfois au-delà des frontières organisationnelles ou territoriales classiques de ce type d'échange, et dans des dynamiques plus horizontales, confirmant là aussi des travaux existants (Compagnone et Pribetich, 2017). Ces nouvelles communautés d'échanges compenseraient l'absence de communauté existante par des dispositifs qui renforcent le sentiment d'appartenance et la confiance au sein de ces groupes (Phillips, Klerkx, McEntee et al., 2018). Les échanges d'information apparaissent en complémentarité avec les échanges en face à face, qui restent essentiels notamment sur les questions des pratiques d'écologisation (Burton et Riley, 2018 ; Klerkx et Rose, 2020). Globalement, la consultation des sites techniques se généralise, participant à une diversification des sources d'information, ce qui confirme la littérature sur le sujet (Fielke, Taylor et Jakku, 2020). Mes résultats montrent que les échanges de connaissances sur internet sont particulièrement mobilisés pour le machinisme agricole (avis sur le matériel, réparation) et la réglementation, domaines où les connaissances sont moins spécifiques au contexte local. Cependant, les usages d'internet ne semblent pas bouleverser pour l'instant les réseaux d'information et de connaissances, mais modifient la géographie des échanges, et implique de nouveaux intermédiaires et prescripteurs de connaissances.

Le développement du numérique apparaît donc comme un facteur qui renforce des mouvements d'agrandissement et de spécialisation, au moins dans la filière grandes cultures, transforme le travail et créé aussi de nouvelles sources de différenciations entre les exploitations et organisations du secteur agricole (Van der Ploeg, 2018). À l'échelle du secteur agricole, la digitalisation vient questionner l'organisation des entreprises, le rôle de l'Etat et les dynamiques de circulation des connaissances, sans pour l'instant remettre en question le rôle des organisations intermédiaires du secteur. Les transformations numériques des modèles productifs agricoles et du secteur, en modifiant l'organisation structurelle des exploitations, les pratiques, le travail, les processus de connaissances, le rôle de l'état et des industries, peuvent venir impacter l'écologisation de l'agriculture et la coexistence des modèles.

1.3 Oppositions, coexistence ou combinaisons entre digitalisation et écologisation

Le développement du numérique est parfois présenté comme une solution aux enjeux environnementaux, parfois comme incompatible avec ceux-ci. Mais les données empiriques manquent pour instruire ce débat. Cette section revient sur cette controverse, en montrant comment mes résultats mettent en évidence des oppositions entre la digitalisation et l'écologisation, tout en donnant à voir des hybridations ou articulations possibles.

1.3.1 *Des oppositions entre digitalisation et écologisation*

En premier lieu, les résultats sur les usages et perceptions du numérique par les acteurs confirment des oppositions entre les usages actuels du numérique et le développement de l'agroécologie. En effet, une partie des technologies apparaît comme conçue avant tout selon les **besoins, référentiels** technico-économiques, **connaissances** et modes de **décisions** des modes de production conventionnels.

Mes résultats montrent des formes d'**opposition technique**, voire des incompatibilités technologiques entre des technologies numériques et des pratiques d'écologisation fortes. Plusieurs technologies ne fonctionnent qu'avec une ou quelques cultures, ce qui peut inciter à augmenter la production de cette/ces culture(s) plutôt que de diversifier, et donc favoriser les systèmes basés plutôt sur la monoculture, ce qui vient confirmer des hypothèses émises dans la littérature sur ce sujet (Bronson, 2018). De plus, les intrants considérés dans la conception des technologies sont essentiellement les intrants conventionnels (semences, pesticides, engrais), ce qui peut impliquer des dysfonctionnements si elles sont utilisées avec des intrants alternatifs (semences paysannes, engrais organiques, biocontrôle), ce dont témoignent certains agriculteurs.

Des formes d'opposition apparaissent également en termes d'**objectif**. Les objectifs intégrés dans ces technologies, et donc les recommandations, restent généralement basés sur la maximisation des rendements et l'optimisation des intrants (Oui, 2021b). Cela peut limiter la capacité de ces technologies à répondre à la diversité des objectifs des agriculteurs, notamment ceux qui guident des modèles alternatifs (Bronson, 2019). Par exemple des agriculteurs mettent en place des formes d'écologisation où la maximisation de l'efficience des intrants n'est pas l'objectif premier mais où la traçabilité et la communication sont majeures (vins de qualité par exemple). La logique d'optimisation de certaines technologies est raisonnée en terme de gestion du risque et de sécurisation de la production par les pesticides, qui peut se retrouver en opposition avec des objectifs environnementaux, comme en témoignent des travaux sur les dispositifs du plan Ecophyto (Guichard et al., 2017). Par ailleurs, la logique d'optimisation mène parfois aussi à des effets rebonds, avec notamment des agriculteurs qui notent avoir augmenté leurs apports d'intrants avec l'usage de certaines TNP, confirmant là aussi des hypothèses de la littérature (Moschitz et Stolze, 2018). En viticulture, nos résultats montrent moins d'incompatibilités, ce qui peut s'expliquer par une plus grande proximité des enjeux autour de l'optimisation des pesticides

entre les modes de production biologiques et conventionnels (Serrano et al., 2019).

La cohérence entre technologies numériques et pratiques d'écologisation n'apparait pas uniquement comme un problème d'objectif (Bronson, 2019), mais renvoie aussi à un **raisonnement global**. Les résultats montrent par exemple que l'unité de base de certaines technologies est l'itinéraire technique de la culture, ce qui correspond à une manière conventionnelle de raisonner, mais n'intègre pas forcément d'autres manières de raisonner, basées sur les rotations, la gestion des couverts ou cultures associées, les interactions avec des infrastructures paysagères, le territoire ou le système agri-alimentaire. Des oppositions existent donc en termes de raisonnement technique, mais également de raisonnement économique. En effet, mes entretiens donnent à voir des pratiques d'écologisation qui sont intégrées à des formes de raisonnement économique différentes du modèle conventionnel. Ainsi, des agriculteurs et organisations agricoles priorisent la baisse des investissements et coûts de production, ce qui peut être incompatible avec l'investissement dans du matériel numérique haut de gamme. Des oppositions peuvent également être liées au registre des idées, des valeurs. Par exemple certains ont pour objectif de limiter les dépendances de leur exploitation ou de renforcer les circularités locales (bioéconomie territoriale, réintroduction de l'élevage, stabilisation des marchés dans le cadre de systèmes alimentaires territoriaux...). D'autres enfin placent le rapport aux objets de nature comme primordiaux, associé à un rapport sensible qui n'est pas pris en compte dans les technologies numériques déployées aujourd'hui, à l'exception d'expérimentation encore balbutiantes (Javelle et Garcia, 2022).

De plus, des oppositions peuvent être liées au **modèle social** ou à l'organisation de formes d'écologisation. Par exemple, l'individualisation et la marchandisation du conseil ainsi que l'influence des pratiques associées à des technologies numériques, peuvent être incompatibles avec l'aspect social ou la gestion collective des risques de l'agroécologie (Stone, 2022). De même, l'augmentation de la taille des exploitations, facilitée par les technologies numériques, peut apparaître en contradiction avec des objectifs sociaux de certaines conceptions de l'agroécologie tels que la réinstallation d'agriculteurs et l'augmentation du tissu social des zones rurales (Lebrun, 2020).

Ces mécanismes d'oppositions en termes de technique, d'objectif ou de raisonnement font que les technologies numériques ne supportent pas de la même manière toutes les **formes d'écologisation**. Mes résultats confirment en effet qu'une partie des technologies numériques répond avant tout aux besoins d'une écologisation faible, basée sur l'optimisation des intrants. Cette optimisation est nécessaire dans toutes les formes d'écologisation. Cependant, des formes d'écologisation optent pour des pratiques réduisant les intrants avant même de chercher à les optimiser. Cela limite leur intérêt et leur retour sur investissement pour des technologies d'optimisation des doses d'intrant. Une partie des technologies répond également à des formes d'écologisation symbolique, c'est-à-dire basées sur la justification et l'affichage plus que sur les changements de pratiques (Wolf et Wood, 1997). Ainsi, l'usage du numérique pour la traçabilité réglementaire se généralise : pour tracer ses apports d'intrants et pour les justifier. Cette justification permet de contourner des limites réglementaires générales en justifiant du besoin localisé (dose d'engrais ou condition de pulvérisation par exemple), comme évoqué dans la

littérature (Oui, 2021b). Nos enquêtes montrent que ces outils peuvent même être utilisés comme manière de détourner la réglementation, en modifiant les données pour que celles-ci correspondent aux exigences réglementaires, par exemple en modifiant la date ou la dose de traitement. Ils sont également utilisés pour effectuer la traçabilité exigée par des labels ou cahiers des charges, par exemple pour la certification Haute Valeur Environnementale (HVE) en viticulture ou des filières qualité en céréales. Dans nos entretiens, les acteurs du modèle conventionnel voient ainsi le numérique comme une manière d'« améliorer l'image de l'agriculture ». Ces technologies répondent ainsi à une **légitimation environnementale**, promue notamment par les industries d'aval, et les politiques publiques, et propre au régime agri-alimentaire contemporain (Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Wolf et Wood, 1997). Les régulations et quantifications environnementales apparaissent alors comme moteurs central du développement du numérique dans les exploitations agricoles (Koutsos et Menexes, 2017 ; Oui, 2021b).

Mes résultats, issus d'une analyse transversale, donnent des informations sur les phénomènes observés à un instant donné. Cependant, ils offrent des pistes pour analyser les effets à plus long terme. Si ces technologies nécessitent un investissement de la part de l'agriculteur utilisateur, cela peut créer des effets de **verrouillage**. Kirat (1991) montrait que le développement du machinisme agricole amenait des phénomènes de complexification et d'accroissement des interdépendances entre les composantes de production, qui créent des irréversibilités et consolident le paradigme dominant. Nos résultats amènent à penser que certaines technologies numériques continuent d'accroître la complexité et l'interdépendance et verrouillent plus encore le paradigme dominant et ses différentes composantes, dont l'utilisation d'intrants conventionnels. Ce phénomène de verrouillage peut-être d'autant plus important quand ces technologies numériques sont associées à des contraintes et normes de filière (Magrini, Anton et al., 2016), ou à des structures de conseil et de régulation qui ne sont pas orientées vers l'écologisation forte des pratiques (Labarthe, 2010 ; Vanloqueren et Baret, 2008). Les technologies d'optimisation du modèle conventionnel apparaissent de plus comme une manière de défendre et de poursuivre ce modèle (Wolf et Buttel, 1996).

Des verrouillages peuvent également être liés aux transformations dans les connaissances du secteur qu'amène la digitalisation. L'orientation des ressources et dispositifs de connaissance vers le développement du numérique peuvent mettre à l'écart le développement de connaissances sur les stratégies d'écologisation alternatives et verrouiller la trajectoire technologique (Cowan et Gunby, 1996 ; Vanloqueren et Baret, 2009). Ce verrouillage peut être accentué par le rôle croissant des firmes de l'agri-business dans l'orientation de l'innovation. La privatisation du conseil et la marchandisation des données et connaissances tendent à amener de nouvelles formes d'industrialisation plus que d'écologisation (Wolf et Wood, 1997). En outre, les usages de technologies numériques peuvent être associés à des formes de standardisation, et peuvent limiter l'expérimentation et la recherche de nouvelles techniques (Lioutas, Charatsari, La Rocca et al., 2019), notamment quand ils sont liés à des formes d'intégration où le contenu technique est prédéfini par l'aval. Ces formes de standardisation peuvent figer les itinéraires techniques, ce qui peut limiter des formes d'écologisation impliquant leur reconception.

Cette question des oppositions, voire de l'incompatibilité entre ces trajectoires peut aussi être discutée avec une perspective plus politique, sociale et économique.

Tout d'abord, le développement du numérique dans le secteur agricole vient jouer sur les relations de **pouvoir**. La littérature met en avant le fait que la collecte et l'analyse des données via les technologies numériques tend à renforcer le pouvoir des industries d'amont et d'aval (Barrett et Rose, 2020 ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020 ; Regan, 2019 ; Wolf et Buttel, 1996). Cela amènerait une appropriation des données et de la valeur par les firmes, dont les effets sur l'écologisation sont abordés de manière assez brève dans la littérature. Des travaux soulignent les problèmes de **dépendance** aux firmes et de verrouillage des modèles dominants (Lioutas et Charatsari, 2020), excluant d'autres visions de la durabilité et contrôlant la direction de l'innovation technologique (Clapp et Ruder, 2020). Certains travaux évoquent aussi la question de la capacité à réparer, adapter, modifier leur matériel agricole selon les objectifs propres à chacun plutôt que selon ceux fixés par les constructeurs et par l'industrie (Carolan, 2017b). Mes enquêtes de terrain soulignent en effet que le développement du numérique est pour partie une réponse aux besoins de standardisation et de contrôle de l'approvisionnement des industries, ce qui peut figer les pratiques. Les outils fournis par les industries d'amont semblent également jouer sur des nouvelles formes de dépendance et de verrouillage envers ces firmes et le modèle d'agriculture qu'elle promeuvent.

Ces rapports de pouvoir jouent également sur les représentations et les principes qui participent à construire les futurs souhaitables et les décisions politiques. Les entreprises du numérique agricole s'inscrivent dans le régime des promesses technoscientifiques (P.-B. Joly, 2015), en proposant l'agriculture numérique comme solution pour intégrer les enjeux productivistes, écologiques et sociaux et proposer comme horizon une agriculture diversifiée, collaborative et productive mais aussi un secteur de l'AgTech compétitif et souverain [6]. Cette promesse est reprise et relayée par la presse, dans des documents de politiques publiques ou d'organisations internationales (Lajoie-O'Malley et al., 2020), et pourrait tendre vers une forme d'hégémonie culturelle qui place le numérique au cœur des transformations de la société et du secteur agricole. Ces représentations participent à légitimer les solutions, à construire et évaluer les politiques publiques et à distribuer les ressources en orientant les budgets. D'une part, les politiques d'innovation pourraient avoir tendance à financer plutôt le numérique et le high-tech au détriment d'autres innovations, low-tech, organisationnelles, sociales, institutionnelles, qui pourraient favoriser directement l'agroécologie (Barrett et Rose, 2020). D'autre part, mon travail de recherche montre que les rapports de pouvoir orientent les ressources vers un numérique qui répond aux formes d'agriculture dominantes et à leur écologisation faible ou symbolique, et renforcent ainsi des rapports de pouvoir existants au sein du secteur.

Le numérique semble donc renforcer certaines **divergences entre modèles agricoles**, dont les organisations et individus n'ont pas les mêmes attentes, ne perçoivent pas les mêmes risques et n'ont pas les mêmes usages du

6. Dans un travail réalisé avec Théo Martin, nous avons caractérisé cette promesse technoscientifique à partir d'une analyse de la littérature grise. Cette analyse a fait l'objet de la rédaction d'un article accessible en Annexe 11

numérique. Cela questionne la potentielle exclusion à long terme de modèles agricoles alternatifs, qui ne pourraient par exemple plus répondre à des exigences de réglementation ou d'acheteurs, qui se baseraient sur le numérique.

1.3.2 *Des hybridations potentielles à construire*

L'analyse empirique, et notamment l'analyse des usages à l'échelle micro-économique, vient cependant nuancer ces effets de divergence et de renforcement. Mes résultats donnent en effet à voir des formes d'hybridations ou de convergence entre le développement du numérique et une écologisation plus ou moins forte du secteur agricole.

Un résultat original et sans doute inattendu du travail de terrain auprès des agriculteurs ayant des grandes cultures, est la surreprésentation des exploitations mixtes (biologique-conventionnel) parmi celles qui utilisent fortement le numérique. Le numérique apparaît comme un outil qui facilite la mise en place de modes de productions biologiques, tout en gardant une organisation proche de l'agriculture conventionnelle. Le numérique favoriserait ainsi des formes d'**écologisation industrielle** et de conventionnalisation du processus de transition agroécologique, y compris en partant de références comme l'agriculture biologique (Gkisakis et Damianakis, 2020). Il participerait à des nouvelles formes de différenciation au sein de l'agriculture biologique notamment (Dufeu et al., 2020).

Certaines enquêtes témoignent d'usages originaux de technologies numériques, ou bricolés, et trouvent des formes d'**adaptation** des technologies numériques pour des besoins liés à leurs pratiques écologiques. Ces besoins sont liés au désherbage mécanique, à la diversification spatiale et intra-parcellaire des cultures, au travail avec des couverts végétaux... L'appropriation, l'instrumentation de l'artefact technique, permet en effet de mieux articuler l'usage avec les connaissances et savoir-faire de certains utilisateurs, et d'améliorer l'usage en terme de durabilité (Moreiro, 2017).

L'arrivée dans le secteur des « nouveaux entrants », ayant des idées et compétences différentes, soulève à ce propos des enjeux spécifiques. Ces nouveaux entrants sont caractérisés par des niveaux d'éducation plus élevés que la moyenne des agriculteurs, des compétences acquises lors d'expériences professionnelles antérieures et un fort taux d'engagement dans des formes d'agricultures alternatives et notamment dans l'agriculture biologique (Sutherland, 2015). D'une part, ces nouveaux entrants ont des besoins importants en connaissances et moins accès aux réseaux classiques de conseil, ce qui rend Internet d'autant plus central dans leur accès à des connaissances (Sutherland, Madureira, Dirimanova et al., 2017). D'autre part leurs compétences facilitent des usages voire des développements de technologies numériques. Sur mon terrain, j'ai ainsi observé l'exemple d'un groupement d'agriculteurs qui développait un service numérique grâce à un agriculteur, anciennement informaticien. Je peux aussi évoquer l'Atelier Paysan, coopérative d'intérêt collectif centrée sur l'autoconstruction pour promouvoir une agroécologie paysanne, et qui propose des formations en programmation pour utiliser les technologies d'électronique libre Arduino (Giotitsas, 2019). Les espaces de friction ainsi créés entre mondes agricoles et mondes numérique pourrait

faire émerger une culture écologique et numérique dans laquelle des formes d'hybridations peuvent se créer.

Les informations et **connaissances** échangées grâce aux technologies numériques offrent également des perspectives d'hybridation. Les résultats, aux différentes échelles d'analyse, montrent que les usages de technologies d'information et de communication peuvent s'associer avec le développement d'une écologisation, même forte. En effet, ces technologies viennent appuyer les échanges au sein des organisations et entre agriculteurs. Elles sont utilisées pour diffuser de l'information technique et scientifique, et permettent de diversifier et compléter les sources classiques d'information technique des agriculteurs. Cependant, d'après mes résultats, elles ne s'associent pas de manière systématique avec des changements de pratiques écologiques et elles restent dépendantes d'autres formes d'échanges de connaissances. D'une part, l'utilisation du numérique pour des connaissances écologiques a ses limites, puisque ces dernières ont aussi des formes tacites et localisées, qui impliquent des échanges locaux et des expériences concrètes (Burton et Riley, 2018). D'autre part, ces technologies participent à une multiplication des sources d'information, dont la pertinence et la validité peuvent difficilement être vérifiées. Les entretiens faisaient également ressortir le fait que les informations ont tendance à simplifier/idéaliser des réalités, et ne pas montrer les échecs. Tout cela limite leur utilisation effective par les agriculteurs. Les technologies numériques pourraient aussi faciliter les « On Farm Experimentation » ou projets de recherche collaboratifs, en offrant de nouvelles manières d'échanger des connaissances, de les capitaliser, mais aussi en créant des outils d'analyse et d'évaluation intégrant les composantes écologiques et paysagères (Lacoste et al., 2021).

Un quatrième aspect porte sur de nouvelles formes d'**autonomie** qui pourraient favoriser la transition agroécologique. Certains agriculteurs utilisent le numérique pour se fournir en biens ou services pour des pratiques agroécologiques, d'autres développent de nouveaux circuits de commercialisation. Le numérique propose ainsi de nouveaux outils qui pourraient permettre de s'émanciper de certains rapports de dépendance et de créer de nouvelles possibilités. Par exemple, l'usage du numérique peut faciliter l'accès à du matériel agricole pour expérimenter des pratiques agroécologiques (semoir pour semis direct, bineuse, trieur...) ou l'accès à des intrants du territoire (semences locales, fertilisants organiques).

Le numérique semble aussi apporter des **convergences** entre modèles, notamment à l'échelle des exploitations agricoles. Des attentes communes ressortent, telles que l'amélioration du confort de travail, l'autonomie, la capacité de réparer le matériel. Les réseaux d'échanges d'information, semblent aussi dépasser certains clivages entre modèles, tout comme les collectifs d'agriculteurs qui communiquent sur leur métier sur YouTube (Rénier et al., 2022). Des enjeux communs ressortent autour de l'image de l'agriculture, de la communication avec les consommateurs et riverains. On voit toutefois, comme dans d'autres secteurs ou espaces sociaux, des effets d'enfermement de communauté cognitives, par exemple autour de médias ou de communauté sur les réseaux sociaux, qui s'affichent explicitement sur une logique productiviste et anti agribashing, et qui n'impactent que leur communauté. Des acteurs, collectivités locales ou médias, cherchent au contraire un positionnement plus large à l'interface de différents modèles, et utilisent le

numérique pour promouvoir des principes de coexistence (la plateforme BoCal portée par la métropole de Montpellier en est un exemple).

Les résultats de la thèse suggèrent que ce qui semble important pour favoriser un numérique compatible avec la transition agroécologique, est à la fois une hybridation des enjeux techniques, de connaissances et économiques, et une intégration d'actions à différentes échelles, individuelles et collectives. L'aspect collectif peut être mobilisé à plusieurs étapes. D'une part, le collectif facilite les apprentissages et l'appropriation des technologies (Badillo et Pélissier, 2015), et donc leur utilisation plus durable (Moreiro, 2017). Le travail sur les caves coopératives montre que les organisations collectives sont des intermédiaires pertinents pour répondre aux enjeux de maîtrise et d'appropriation des technologies par les agriculteurs, soulevés par les résultats de cette thèse. D'autre part, l'organisation collective permet de formuler des besoins et de participer à la conception de technologies pour mieux intégrer la diversité des besoins (Bronson, 2019).

1.3.3 *Comment orienter l'innovation ?*

Ce travail de recherche amène à insister sur l'orientation de l'innovation. En effet, les politiques d'innovation ne peuvent être neutres : elles s'inscrivent dans des trajectoires technologiques, répondent à certains besoins ou intérêts, favorisent certains acteurs. Le concept de directionnalité évoque cette orientation de la trajectoire d'innovation dans une direction définie (Hekkert, Janssen et al., 2020 ; Pigford, Hickey et Klerkx, 2018). Il souligne le fait que le système d'innovation n'est pas uniquement un catalyseur de toute innovation, mais participe à orienter les innovations le long d'une trajectoire, vers des objectifs, explicites ou non. Des mécanismes de sélection des innovations y sont à l'œuvre, basés sur des valeurs et principes, des forces économiques, des facteurs institutionnels et sociaux (Dosi, 1982), dont les interactions façonnent des trajectoires d'innovation (Malerba, 2002). Les changements vont dépendre du paradigme des acteurs du système d'innovation, qui participent à orienter l'innovation selon les connaissances, les normes, les innovations déjà réalisées etc. (Dockès, 1990 ; Kirat, 1991). Il est donc essentiel de prendre en considération cette non neutralité et de réfléchir aux facteurs qui orientent l'innovation et aux manières de jouer sur cette orientation.

Plusieurs travaux de recherche récents incorporent de telles réflexions sur l'orientation des systèmes d'innovation pour répondre à des objectifs sociétaux. Des auteurs proposent de favoriser des niches d'innovation écologique (Pigford, Hickey et Klerkx, 2018). D'autres développent le concept de « mission-oriented innovation system » (Hekkert, Janssen et al., 2020 ; Klerkx et Begemann, 2020), qui implique la mise en place d'une gouvernance de l'innovation, la définition d'une orientation et la coordination entre innovation technologique, institutionnelle, sociale etc. Mais cela pose le problème de la définition de l'orientation : comment la définir face à des enjeux globaux, un contexte incertain tout en étant démocratique ? Klerkx et Rose (2020) proposent d'inclure une diversité des voies de transition dans les politiques d'innovation. D'autres proposent un développement du numérique plus participatif pour favoriser la transition agroécologique (Wittman, James et Mehrabi, 2020). Mais l'orientation de l'innovation dépend aussi des rapports de force. Les démarches participatives ou incluant la diversité n'évacuent

pas les rapports de pouvoir et comportements stratégiques (Shove et Walker, 2007). Les acteurs qui ont suffisamment de pouvoir peuvent jouer sur le changement institutionnel afin de faciliter les innovations qui répondent à leurs intérêts (Kukk, Moors et Hekkert, 2016).

Ce que soulève cette thèse, c'est que l'orientation de la digitalisation vers l'écologisation nécessite la prise en compte de l'hétérogénéité intra-sectorielle, des rapports de pouvoir et de la pluralité des besoins et des futurs. Elle implique d'intégrer les questions techniques aux questions économiques et politiques. L'orientation de la digitalisation vers l'écologisation implique de réfléchir aux complémentarités potentielles entre les technologies numériques et l'agroécologie (Gkisakis et Damianakis, 2020), mais aussi de contrebalancer les rapports de pouvoir au sein des systèmes d'innovation et de promouvoir un futur polyphonique (Tsing, 2017).

2 Les enseignements de la thèse au niveau théorique et méthodologique

Cette section vise à présenter les apports théoriques et méthodologiques de ma thèse pour des recherches plus générales sur la dynamique des systèmes sectoriels d'innovation, en discutant la pertinence et les limites des choix que j'ai réalisés et des résultats que j'ai obtenus.

2.1 Apports théoriques : prise en compte des usages et de l'hétérogénéité au sein d'un système d'innovation

La mobilisation d'une approche systémique, via l'analyse structurelle de Malerba, permet d'étudier à l'échelle d'un secteur, ici l'agriculture française, les transformations conjointes des technologies, des acteurs, des institutions, des connaissances et des marchés. Ces dimensions ont toutes été décrites comme jouant un rôle important dans la digitalisation de l'agriculture (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Fielke, Garrard et al., 2019 ; Knierim, Kernecker et al., 2019 ; Rijswijk, Klerkx et Turner, 2019). Ma thèse propose deux apports théoriques originaux aux travaux sur les systèmes d'innovation. Le premier est l'intégration de l'hétérogénéité au sein du système d'innovation. Le deuxième est l'intégration des usages d'une technologie à l'échelle micro-économique dans une perspective systémique.

2.1.1 *Intégration des paradigmes pour structurer la diversité des formes d'écologisation*

Le fait de m'intéresser à l'écologisation de l'agriculture m'a amenée à interroger la question de l'hétérogénéité au sein du système d'innovation. Dans sa conceptualisation du système sectoriel d'innovation, Malerba (2002) reconnaît l'enjeu de préciser et d'étudier l'hétérogénéité des firmes au sein du système, en particulier pour mieux saisir les phénomènes de leadership d'entreprise, de dynamique et concurrence technologique, ou de rattrapage des firmes (Lee et Malerba, 2017). Il souligne toutefois que des efforts restent à faire pour mieux intégrer cette hétérogénéité dans son cadre théorique, une question reformulée à plusieurs reprises (Lee et Malerba, 2017) et pointée plus globalement dans les analyses sectorielles de l'innovation (Faria et Andersen,

2017 ; Touzard, Temple et al., 2014) ou des travaux sur les transitions (Bui et al., 2016 ; Maassen, 2012). L'intégration du concept de paradigme m'a permis de structurer et de conceptualiser cette question de l'hétérogénéité, en dépassant une acception parfois seulement associée à certaines caractéristiques des entreprises.

Un paradigme est défini comme un modèle de résolution de problèmes, fondé sur des principes et des technologies matérielles sélectionnés, associé à des structures de marché, des conditions de production et de distribution (Djellal, 1995). De ce fait, les paradigmes peuvent se distinguer par les innovations qu'ils mobilisent, créent ou favorisent (Dockès, 1990 ; Perez, 2010). Utiliser ce concept permet d'intégrer l'hétérogénéité intra-sectorielle, pas seulement comme une hétérogénéité d'agents individuels, mais comme une hétérogénéité structurée et structurante du secteur, regroupant des individus ou organisations au sein d'ensembles relativement homogènes sur les critères identifiés, notamment autour des questions d'innovation (Dockès, 1990). Ces paradigmes peuvent se succéder dans le temps, mais aussi coexister. La diversité des paradigmes n'est pas spécifique au secteur agricole, on retrouve des paradigmes différents dans les secteurs de l'énergie, du bâtiment, du transport, de la culture, de l'écologie industrielle, qui peuvent être liées à des conceptions de la durabilité faible ou forte (Beus et Dunlap, 1990 ; Laperche et Merlin-Brogniart, 2016). Cependant le secteur agricole a la particularité d'avoir des paradigmes institutionnalisés et donc clairement identifiables.

Mon travail de thèse montre la pertinence d'intégrer le concept de paradigme dans l'analyse d'un système d'innovation. Premièrement, cela permet de souligner l'hétérogénéité des besoins et des dynamiques d'innovation au sein du secteur. Cette hétérogénéité est parfois sous-estimée, voire occultée et peu prise en considération dans les politiques d'innovation. L'intégrer est pourtant primordial, notamment pour favoriser une transition, en offrant des réponses qui peuvent être adaptées à différentes trajectoires technologiques, par exemple en terme de soutien à des investissements, formations, ou réglementations (Klerkx et Rose, 2020). L'idée est par exemple qu'une politique répondant à une pluralité de conditions, exprimant différents paradigmes, peut être globalement plus efficace et inclusive. Par exemple la conception de technologies numériques qui n'intègrent pas la diversité des situations agricoles et des modes de raisonnements, limite leur utilisation dans les exploitations (Bronson, 2019).

Deuxièmement, cela permet de rendre compte du fait que les politiques d'innovation ne sont jamais neutres. Les innovations vont être plus ou moins ancrées dans certains paradigmes plutôt que d'autres. Les politiques d'innovation peuvent être vues comme une forme de distribution plus ou moins ciblée de ressources. Elles peuvent amener des effets adverses de sélection, par exemple lorsque le soutien de l'offre d'innovation vient renforcer certains paradigmes plutôt que d'autres. Cette sélection peut être volontaire (privilégier un modèle d'entreprises, un type de produit ou de système technologique), mais ce n'est pas toujours le cas. Par exemple le Rapport Agriculture Innovation 2025 propose le développement du numérique pour toute forme d'agriculture (Bournigal et al., 2015, p.36). Pourtant, les organisations impliquées dans des projets sur le numérique restent celles du modèle agricole dominant et les acteurs des projets numériques sont peu conscients

des hétérogénéités d'attentes et de besoins concernant le numérique en agriculture.

Troisièmement, ce concept permet de prendre en considération les rapports de pouvoir entre paradigmes. En effet, les travaux sur les systèmes d'innovation montrent que les innovations tendent généralement à favoriser un paradigme dominant (Pigford, Hickey et Klerkx, 2018). Notre travail confirme cette tendance. Cependant, il montre aussi que d'autres trajectoires d'innovation co-existent. Par exemple des organisations rattachées à l'agriculture biologique développent en interne des outils numériques pour capitaliser des connaissances ou pour faciliter les échanges de biens ou de services entre agriculteurs. Ces organisations mentionnaient leurs difficultés à financer ce genre de projet, qui ne « fait pas partie des grandes orientations » de support à l'innovation. Les politiques publiques pourraient alors chercher à contrebalancer ces rapports de pouvoir, afin de promouvoir des innovations qui répondent à la diversité des besoins ou à ceux considérés comme les plus importants pour la société. Elles peuvent par exemple orienter la recherche et investir vers les alternatives pour éviter des effets de verrouillage (Cowan et Hultén, 1996). Enfin, notre travail montre que l'hétérogénéité peut aussi être en soi source d'innovation, phénomène qui commence à émerger dans la littérature sur l'agriculture (Gasselin et al., 2021 ; Groot-Kormelinck et al., 2022). Les phénomènes de réappropriation d'innovations issues d'autres paradigmes constituent des innovations. Par exemple, on observe des phénomènes d'adaptation de technologies numériques pour mettre en place des pratiques agroécologiques. Des mécanismes d'hybridation, de concurrence jouent sur la dynamique des trajectoires d'innovations (Gasselin et al., 2021). La prise en compte de l'hétérogénéité est donc essentielle pour comprendre les dynamiques des systèmes d'innovation (et agir à leur échelle).

Cependant, cette approche théorique a des limites, notamment dans une perspective de montée en généralité. Tout d'abord, la délimitation des paradigmes est évidemment une simplification d'une réalité plus complexe, avec des zones hybrides entre paradigmes et des nuances ou différenciations au sein des paradigmes. Le paradigme, comme le modèle, reste une construction faite pour l'analyse, pour prendre en compte des logiques et régularités, qui peut masquer la diversité (Gasselin et al., 2021). Par exemple, la dualité entre une agriculture biologique d'un côté, et une agriculture conventionnelle de l'autre, peut être remise en question. La frontière entre les deux devient plus floue, avec l'intégration d'activités liées à l'agriculture biologiques (production, conseil, transformation, commercialisation. . .) dans des organisations à la base tournées vers l'agriculture conventionnelle (Sonnino et Marsden, 2006 ; Stassart et Jamar, 2009) et, inversement, l'intégration de logiques conventionnelles dans les filières biologiques (Le Velly et Dufeu, 2016). Une plus grande diversité de paradigmes peuvent se distinguer selon les valeurs, les modes de production et de commercialisation des exploitations (Plumecocq, Debril et al., 2018). Ceci est d'autant plus vrai à l'échelle individuelle, avec des exploitations dites « conventionnelles » dans lesquelles sont développées des pratiques agroécologiques (Lucas, 2021), des exploitations biologiques qui deviennent plus « conventionnelles » (Darnhofer et al., 2010), et des exploitations qui mettent en place à la fois des productions conventionnelles et des productions biologiques.

De plus, la prise en compte de l'hétérogénéité via le concept de paradigme centre l'analyse sur une forme de différenciation parmi d'autres, pertinente pour étudier l'écologisation, mais qui ne doit pas faire oublier les autres. En effet, les organisations et acteurs se distinguent aussi selon leur position ou fonction dans les chaînes de valeur (exploitation agricole, organisation de conseil, entreprises d'amont ou d'aval etc.), qui influe à la fois sur leur implication dans la digitalisation (Fielke, Taylor, Jakku et al., 2021) et leurs perspectives d'écologisation (Van Hulst et al., 2020)). Les organisations se distinguent également par rapport à leur capital (économique, humain, social...), leur dimension et organisation (par exemple les coopératives dans le secteur agricole), mais aussi leur situation géographique (T. Martin et al., 2021), qui contraint l'accès aux technologies, aux connaissances, aux marchés, au pouvoir de décision (Stone, 2022). Les rapports de pouvoir entre acteurs liés à différents paradigmes ne sont en effet pas seuls, et le secteur agricole est également structuré autour de rapports de pouvoir entre catégories fonctionnelles d'entreprises (agriculteurs vs grande distribution par exemple), entre territoires (concurrence entre régions viticoles), entre filières (céréaliers vs éleveurs), entre catégories de produits (signes de qualités) ou entre structures d'exploitations agricoles (avec par exemple des aides selon le capital économique des exploitations) (Ansaloni et A. Smith, 2021 ; Morgan, Marsden et Murdoch, 2008). Ces rapports de pouvoir se superposent à ceux liés aux différents paradigmes d'écologisation et participent à la construction des politiques publiques et à l'orientation des innovations. Sans être au cœur de l'analyse de cette thèse, ces dimensions ne sont pas non plus complètement évacuées, notamment grâce à l'introduction de variables pour caractériser le positionnement et l'inscription des exploitations agricoles dans les chaînes de valeurs et à l'utilisation de méthodes qui combinent des analyses quantitatives et qualitatives. Les résultats invitent alors à explorer ce rôle des filières et chaînes de valeur.

2.1.2 *Une approche micro-économique par les usages pour étudier les effets du numérique sur l'écologisation d'un secteur*

Le concept de système sectoriel d'innovation inclue la demande et les usages individuels comme partie prenante du système (Malerba, 2004). Cependant, une des critiques sur ce concept est que l'utilisation effective des innovations et leurs effets sont souvent peu intégrés dans les analyses (Geels, 2004), ou renvoyés à des travaux de sociologues, d'ergonomes, d'ingénierie (ou d'agronome pour l'agriculture). Les évolutions des usages sont parfois peu visibles dans les analyses macro et méso-économiques qui donnent à voir une apparente stabilité institutionnelle. Ces évolutions peuvent pourtant amener des changements institutionnels (Laurent, Nguyen et al., 2021 ; Micelotta, Lounsbury et Greenwood, 2017). L'intégration de l'échelle micro-économique apparaît alors essentielle pour comprendre les transformations en cours et à venir d'un secteur, notamment dans un contexte de complexification et de superposition des dispositifs de régulation (Buttel, 1994).

L'intégration des usages dans l'analyse permet de mettre en évidence des hétérogénéités d'usages mais aussi de perceptions, d'attentes, et donc de comprendre les liens avec l'hétérogénéité des paradigmes et avec les autres dimensions de la diversité (inscription dans les chaînes de valeur, travail,

organisation structurelle…). L'étude des usages permet aussi de comprendre l'innovation au-delà d'une vision magnifiée ou simplifiée. Elle permet d'étudier les conditions concrètes de mise en œuvre d'une innovation incluant les difficultés et incohérences auxquelles font face les utilisateurs. Ceci permet de contrebalancer des discours qui fétichisent les technologies, à des fins évidentes de marketing, de légitimation ou de mobilisation de ressources, et qui raisonnent en terme d'« acceptabilité sociale » d'une innovation, forcément bonne face à des entreprises (agriculteurs) qui manquent de connaissances, sont averses au risques et auxquels on attribue les problèmes constatés (O. Visser, Sippel et Thiemann, 2021). L'analyse économique des usages peut montrer des effets adverses, sur les pratiques, par exemple les effets rebonds, ou les effets sur la spécialisation, mais aussi sur le travail et l'organisation. Intégrer cette échelle d'analyse dans les travaux sur l'innovation offre alors des pistes intéressantes pour intégrer les effets adverses des innovations, alors que l'économie et la mise en œuvre des politiques publiques font face à des difficultés pour les intégrer dans les réflexions et la gouvernance (Jas et Boudia, 2019).

Ces effets micro-politiques des innovations et les transformations sociales associées, nécessitent d'être pris en compte par les politiques d'innovation, mais aussi par les organisations et syndicats agricoles (Carolan, 2020). Ils peuvent aussi montrer les difficultés, risques concrets, auxquels font face les utilisateurs, qui pourraient alors être adressés via des mesures d'accompagnement, de protection etc. Ils permettent aussi de rendre compte des faits, plutôt que de se baser sur la promesse pour orienter les politiques publiques (Laurent, Berriet-Solliec et al., 2012). Le régime de l'économie des promesses technoscientifiques comme mode de gouvernance de l'innovation (P.-B. Joly, 2010), notamment dans le monde des 'startups' (Cockayne, 2019), peut en effet amener des décalages importants entre la promesse annoncée (qui vise l'attraction de ressources) et les usages réels et leurs effets. L'étude des usages montre aussi les adaptations et bricolages, qui peuvent constituer des pistes pour penser les futurs possibles (Higgins et al., 2017).

Au-delà des effets micro-politiques, les usages renseignent aussi des tendances plus globales sur les modèles productifs agricoles, telles que les transformations dans l'organisation du travail et de la production. Ils permettent d'engager des réflexions sur ces tendances : sont-elles à supporter, à faire bifurquer, à éviter ? L'analyse micro-économique invite plus globalement à réfléchir à nos cadres d'analyse et référentiels, par exemple sur ce qu'est une exploitation agricole ou sur ce à quoi correspond le travail en agriculture.

Par ailleurs, les enquêtes réalisées dans les exploitations agricoles mettent en évidence le rôle des réseaux socio-économiques et les effets du système d'innovation sur les usages. Ces enquêtes permettent de voir comment des acteurs du système d'innovation, des politiques publiques, des réglementations ou des normes impactent directement les usages, et parfois de manière non anticipée. Par exemple, notre terrain a souligné l'importance des régulations environnementales et des normes privées sur le développement du numérique dans les exploitations agricoles. Des contrats de production au sein des chaînes de valeur peuvent imposer certains usages du numérique. Ce type de mécanisme est peu documenté dans la littérature, qui renvoie plutôt l'adoption de technologies aux compétences et comportements individuels (Barnes et al., 2019), ou à des mécanismes de co-innovation et de co-design

(Berthet, Hickey et Klerkx, 2018). De plus, l'étude micro-économique montre que les transformations sectorielles vont avoir des implications différenciées puisqu'elles vont dépendre de l'insertion des exploitations dans le système d'innovation.

L'approche micro-économique permet également d'aborder les usagers comme actifs dans les processus d'innovation. Nos résultats montrent qu'ils ne sont pas seulement des adoptants passifs qui se distinguent selon leur comportement « innovateur » ou « retardataire », contrairement à la vision proposée par Rogers (2010). Les agriculteurs évaluent, expérimentent, construisent des connaissances. Ils articulent et négocient des contraintes techniques, économiques, sociales, politico-administratives, avec leurs objectifs individuels (Ansaloni et Fouilleux, 2006 ; Darré, Le Guen et Lémery, 1989). Les utilisateurs participent aussi, notamment via les organisations collectives, à d'autres formes d'émergence de l'innovation numérique. Ils participent ainsi à faire émerger des changements institutionnels bottum-up (Laurent, Nguyen et al., 2021 ; Micelotta, Lounsbury et Greenwood, 2017).

Cependant, l'approche en termes d'usage présente des limites et doit être prise avec un certain recul. D'une part, les usages et pratiques des agriculteurs restent très liés à leur contexte géographique, social, économique, institutionnel, et ont donc un caractère singulier. De ce fait, les résultats sont spécifiques du territoire et des filières étudiées, et des études complémentaires pourraient sans doute mettre en évidence des dynamiques différentes dans d'autres régions ou pour des exploitations engagées dans d'autres types de production. De plus, l'usage d'une technologie n'informe pas le processus qui a amené à cet usage, les différentes étapes et apprentissages préalables. Ainsi, un même usage peut être lié à différents processus et différentes stratégies. En outre, il est important de souligner les limites de la méthode utilisée pour étudier ces usages : en effet, les données sont issues d'entretiens et donc reposent sur les déclarations des utilisateurs. Observer les usages, voire y participer, pourraient apporter de nouvelles données qui pourraient compléter, voire remettre en question certains éléments issus du déclaratif. Enfin, se concentrer sur l'étude individuelle des usages peut avoir tendance à masquer les effets de réseaux, les dynamiques économiques et sociales qui amènent ces usages (Glover et al., 2019). Cela peut alors conduire à exagérer la diversité des configurations individuelles, sous-estimer les forces structurantes et les déterminismes, et amener des formes de sur-responsabilisation individuelle (Buttel, 1994). Etudier les fonctions d'organisations intermédiaires et les dynamiques collectives répond en partie à cette limite.

2.1.3 *Préciser les fonctions d'intermédiaires au sein du systèmes d'innovation*

L'étude des transformations du système d'innovation associée à celle des usages permet d'étudier l'innovation dans les différentes échelles qui l'impactent et sont impactées par celle-ci (Malerba, 2004). Elle permet de prendre en considération les différentes dimensions d'un paradigme (Dockès, 1990). Cependant, combiner les deux échelles d'analyse ne signifie pas expliciter les effets des transformations d'une échelle sur celles de l'autre. Rendre compte des interactions croisées entre ces échelles est un front de recherche des travaux sur l'innovation. Les systèmes d'innovation jouent sur les pratiques individuelles à travers les marchés, les dispositifs de régulation, les représen-

tations, les connaissances (Ansaloni et Fouilleux, 2006 ; Klerkx et Leeuwis, 2009 ; Laurent, Maxime et al., 2003). Les pratiques individuelles vont quant à elles faire émerger des besoins, façonner des routines et des institutions, construire des connaissances et des innovations, élaborer des normes et des valeurs sociales (Badillo et Pélissier, 2015 ; Darré, 1996 ; Laurent, Nguyen et al., 2021 ; Micelotta, Lounsbury et Greenwood, 2017). Des organisations intermédiaires peuvent établir des liens entre ces différentes échelles, en accompagnant la mise en œuvre de transformations sectorielles et, dans l'autre sens, en formulant ou structurant les besoins et transformations individuels (Faure et al., 2018 ; Howells, 2006). L'intégration des organisations intermédiaires permet alors d'étudier une zone de rencontre entre les transformations sectorielles et individuelles.

Dans ma thèse, les organisations intermédiaires sont abordées dans les différentes étapes à la fois comme partie-prenante du système d'innovation (Chapitre 4 et Chapitre 5), comme organisation du système d'innovation qui influence les usages individuels (Chapitre 4), et comme système d'interaction entre acteurs (Chapitre 5). Cela a permis de mettre en évidence différents éléments des processus de digitalisation et de l'articulation avec l'écologisation. Premièrement, les organisations agricoles jouent un rôle d'intermédiaire de diffusion des technologies, ce que confirme la littérature sur le sujet (Busse, Schwerdtner et al., 2015 ; Fielke, Taylor et Jakku, 2020). De plus, leur intégration a permis de montrer que le rôle et la nature d'intermédiaires se modifie avec la digitalisation (Eastwood, Ayre et al., 2019). Les organisations agricoles apparaissent dans mon travail comme des espaces de formation, d'expérimentation et de développement d'innovation. Cependant, ce sont parfois les entreprises qui fournissent les technologies numériques qui viennent direcement jouer ce rôle de formation des agriculteurs. Cela questionne la neutralité et la pertinence des informations, notamment avant l'adoption, confirmant l'importance de la confiance et de l'accès à du conseil indépendant sur le sujet (Jakku, Taylor, Fleming, Mason et Thorburn, 2016).

Le focus sur les organisations agricoles a montré leur positionnement en tant que partenaires de projets sur le numérique, apportant leur expertise de terrain, formulant les besoins et remontant les problèmes d'usage, confirmant leur rôle central dans ces fonctions (Ayre et al., 2019). Cependant, les capacités de ces organisations à expérimenter et évaluer les technologies font l'objet de débat et de nouvelles recherches (Bechtet, 2022). En outre, le focus sur ces organisations pose aussi la question de leur neutralité, notamment lorsqu'elles développent des services commerciaux basés sur les technologies numériques (Yang, Klerkx et Leeuwis, 2014). En outre, la circulation des données induite par l'utilisation de technologies numériques créé de nouvelles formes d'intermédiation. Cela implique en particulier un nouveau rôle des organisations dans la collecte et la redistribution des données. Les données et technologies associées peuvent constituer de nouveaux artefacts du conseil, qui peuvent être associés ou non à une marchandisation du conseil (Eastwood, Ayre et al., 2019 ; Fielke, Taylor et Jakku, 2020). On constate aussi des formes de déplacement du conseil vers les entreprises qui fournissent ces technologies. L'étude des organisations intermédiaires permet ainsi de mettre en évidence le fait que le développement de technologies numériques et de connaissances associées n'est pas une dynamique exogène et ne résulte pas uniquement d'innovations externes qui se déploient dans le secteur agricole

(Fielke, Garrard et al., 2019). Cela permet de voir que ce n'est pas non plus seulement une simple réponse à la demande des utilisateurs (Schmookler, 1966).

L'étude des organisations agricoles montre qu'elles sont aussi elles-mêmes initiatrices d'innovation liée au numérique, par exemple en développant, avec des technologies numériques, de nouvelles manières d'échanger de l'information technique, de capitaliser les connaissances au sein de l'organisation ou d'organiser la production. Les organisations agricoles mettent en œuvre des expérimentations sur des technologies numériques, développent des services numériques à l'aide de prestataires spécialisés, construisent des stratégies de communication basées sur le numérique, etc. On observe même, de manière certes marginale, des organisations agricoles qui collaborent avec des agriculteurs qui ont des compétences en numérique (via une expérience professionnelle antérieure) pour développer en interne un service numérique. Tout cela confirme l'engagement des organisations collectives dans l'étape de « transformation » de la digitalisation, et pas seulement de réception passive (Fielke, Taylor, Jakku et al., 2021). Les organisations intermédiaires participent ainsi à orienter l'innovation et ne sont donc pas impartiales dans les transformations qu'elles accompagnent (Klerkx et Leeuwis, 2009).

La digitalisation du secteur agricole rassemble des processus et technologies très divers, dont l'unité se fait dans la manière d'être mobilisés par les acteurs, dans les discours, et dans les politiques publiques. L'approche structurelle de Malerba a permis de saisir la digitalisation dans son unité tout en donnant à voir la diversité des transformations associées. L'intégration du concept de paradigme et de l'analyse des usages a permis de structurer l'analyse de la diversité, pour en définir les facteurs, les caractéristiques et les limites. L'analyse conjointe du système d'innovation agricole, des usages dans les exploitations agricoles et des intermédiaires a conduit à faire des liens entre paradigmes et usages. Ces derniers se relient aux paradigmes par leur inscription dans les marchés, leur type de production, mais aussi par leur système cognitif et leurs principes. Les organisations intermédiaires, et notamment les coopératives agricoles, participent ainsi à établir les liens entre paradigmes et usages. Elles impactent les usages selon leur fonction de commercialisation qu'elles orientent vers des marchés sélectionnés, elles accompagnent ou contraignent l'évolution des types de production et participent à faire évoluer le référentiel cognitif par leurs activités de conseil, de formation et d'expérimentation. En sens inverse, elles participent à l'évolution du système d'innovation en formulant des besoins, développant des innovations ou des partenariats, ou via leur rôle de représentation politique des adhérents. Ainsi, le cadre théorique développé dans la thèse a permis d'intégrer les interactions entre échelles et entre paradigmes pour étudier les transformations du secteur que sont la digitalisation et l'écologisation.

2.2 Apports et limites méthodologiques de la thèse

Afin d'étudier la digitalisation de l'agriculture et son interaction avec l'écologisation, j'ai mis en œuvre une méthodologie générale qui inclut plusieurs terrains, plusieurs échelles d'analyse, et pour chacune d'entre elles, une méthode spécifique de collecte et d'analyse des données, mobilisant des

analyses qualitatives et quantitatives. Dans cette section, je vais revenir sur les apports et limites méthodologiques de la thèse, en insistant notamment sur deux spécificités : le multi-échelle, et l'analyse mixte.

Une analyse multi-échelle

L'analyse multi-échelle mobilisée dans cette thèse présente plusieurs intérêts pour étudier un phénomène dans sa globalité. En effet, un phénomène tel que la digitalisation implique des transformations à l'échelle de la société, dans les politiques publiques, les marchés, les stratégies des firmes et des organisations d'un secteur etc. Mais il se joue aussi à l'échelle des pratiques et usages individuels. L'intégration de plusieurs échelles d'analyse a permis d'étudier l'hétérogénéité des paradigmes et la diversité socio-économique dans laquelle ils s'insèrent. Les effets sectoriels et individuels s'impactent mutuellement et leur analyse croisée a permis d'enrichir l'approche globale et ses apports.

L'étude à l'échelle du secteur, ici via l'analyse en terme de système d'innovation a été utile pour réaliser ensuite celle à l'échelle des exploitations agricoles. Premièrement elle a permis de bien comprendre le contexte socio-économique et l'objet d'étude, ce qui a été utile lors de la réalisation des premiers entretiens et de la construction du questionnaire. Deuxièmement, elle a permis d'identifier les acteurs qui pouvaient jouer un rôle dans la digitalisation, ce qui a nourri les questions aux agriculteurs sur leurs liens avec ces acteurs (conseil, commercialisation, fourniture). En revanche, cette échelle sectorielle n'étant pas au centre de la thèse, l'échantillon d'acteurs enquêtés a été forcément limité, notamment pour les entreprises développant les technologies numériques. J'ai rencontré des acteurs représentant des start-up, des entreprises, la recherche et l'enseignement. Mais la digitalisation mobilise une grande diversité d'acteurs, dont l'écosystème est encore instable, avec de nombreuses créations et disparitions d'entreprises et l'émergence de nombreux projets de recherche sur le sujet. L'une des limites principales de ce travail est donc la représentativité limitée des acteurs du numérique, lors de ma première phase de travail (Chapitre 3). Une analyse plus approfondie et complète pourrait affiner nos résultats sur le type de regard portée par les acteurs du numérique sur la diversité du monde agricole et sur leurs stratégies d'inclusion ou de sélection des acteurs agricoles. En effet, le positionnement des acteurs du numérique peut varier selon le type d'organisation concernée, la formation des personnes impliquées et leurs liens avec les acteurs agricoles (Biao et Temri, 2021). Des formes de saturation ont tout de même été atteintes sur les questions principales de l'enquête, ce qui relativise cette limite.

L'étude à l'échelle des exploitations, pertinente pour étudier les effets sur les transformations des modèles productifs, est complémentaire de l'analyse à l'échelle du secteur. Premièrement, elle m'a permis d'intégrer des données issues des entretiens avec certains agriculteurs lors de l'analyse du système d'innovation. Cela n'était pas prévu au départ, mais est apparu essentiel lors de l'analyse du système d'innovation dans son ensemble. Les résultats issus des enquêtes dans les exploitations agricoles ont permis de renforcer les résultats sur les divergences de perception en mettant en évidence des divergences d'usage. Elles ont aussi permis de nuancer ces résultats en montrant des convergences de perceptions entre agriculteurs, par exemple sur les risques liés au numérique, et des formes d'hybridation et d'adaptation

dans les usages. Ces résultats ont aussi été utiles pour mieux comprendre des changements institutionnels qui impactent le numérique, incluant la réglementation environnementale et les formes d'intégration croissante par les industries de l'aval. Ils ont aussi amené des éléments de compréhension sur le rôle des acteurs intermédiaires que sont les coopératives, les négoces, ou autres organisations agricoles.

Choix des terrains

Mais les choix des terrains présentent aussi des limites. Dans le cas des exploitations en grandes cultures (bassin toulousain), la représentativité des exploitations n'est pas totale, avec notamment des types d'exploitations sous-représentées, comme celles gérées par des retraités ou double-actifs ou encore avec un recours important ou complet à de la prestation. De plus les enquêtes n'ont été réalisées qu'auprès des chefs d'exploitation, alors que le numérique concerne aussi de plus en plus de salariés agricoles. J'ai pu intégrer des chefs d'exploitation ayant des entreprises de travaux agricoles (ETA), mais le fonctionnement de ces ETA aurait pu faire l'objet d'entretiens spécifiques. Les liens entre numérique et travail amènent à penser que la digitalisation va dépendre du marché du travail, de son coût et de ses régulations, comme l'évoquent Rotz, Gravely et al. (2019). Les facteurs pédoclimatiques et plus globalement géographiques ou territoriaux peuvent également impacter le développement et les usages du numérique, en fonction des modèles de production, des types de culture, des contraintes physiques et climatiques, et des aspects sociaux des territoires (Rose, Morris et al., 2018). Ainsi, la digitalisation peut varier d'une région ou d'un pays à l'autre et nos résultats ne sont pas généralisables sans limite. Par exemple, la littérature montre que la régulation environnementale joue globalement un rôle dans le développement du numérique (Koutsos et Menexes, 2017). En France, mon travail souligne le rôle de la PAC, des réglementations sur les nitrates et sur la traçabilité. On peut alors se demander le type de lien entre régulation environnementale et usages du numérique dans des contextes institutionnels différents. Nos résultats à l'échelle des exploitations agricoles montrent que les usages du numérique dépendent des intermédiaires agricoles et des inscriptions dans les chaînes de valeur, qui peuvent également varier d'un territoire à l'autre, où ce ne sont pas les mêmes coopératives ou organisations de conseil qui sont implantées.

En outre, une limite importante de ce travail est de ne pas avoir inclus de filières d'élevage. En effet, l'élevage est un secteur pionnier de la digitalisation, avec notamment des technologies de traçabilité, des robots et des capteurs largement utilisés dans les exploitations. Mais c'est aussi un secteur qui a connu de récentes mutations économiques et politiques, qui impactent l'organisation de l'ensemble des filières agricoles (notamment via l'allocations des terres), et est au cœur d'enjeux environnementaux (gaz à effet de serre, pollution des sols), sociaux (conditions de travail notamment), sanitaires (épidémies) et éthiques (rapport au vivant et aux animaux). L'intégration d'une filière d'élevage (exploitations laitières en Bretagne) avait été pensée au début de la thèse, mais le choix a été fait de recentrer l'analyse sur deux filières importantes au sein d'une même région.

L'étude à l'échelle des caves coopératives permettait d'étudier le rôle d'acteurs intermédiaires, dans un secteur où nos résultats ont fait ressortir leur rôle

central dans le développement du numérique dans les exploitations viticoles. En effet, ces dernières, comparativement avec celles en grandes cultures, étaient peu concernées par des usages individuels, à l'exception de ceux visant à s'informer. La représentativité des coopératives rencontrées est là aussi une limite, le terrain ayant été par ailleurs « bousculé » par les contraintes liées aux confinements successifs de l'année 2020. Les structures coopératives de la filière viticole restent très spécifiques, par rapport à d'autres filières où les coopératives sont beaucoup plus grandes et couvrent des territoires et des filières plus divers. Il aurait ainsi été intéressant d'avoir un panel plus important de caves coopératives, mais aussi de coopératives céréalières, pour pouvoir engager plus finement une comparaison entre ces secteurs.

Une analyse mixte

L'analyse des interdépendances des transformations aux échelles micro et méso-économiques a également été permise par le type d'analyse de données mobilisée.

Les chapitres 3 et 5 sont basés sur une analyse qualitative, et le chapitre 4 sur une analyse mixte. L'analyse quantitative est reconnue pour comprendre des phénomènes globaux, des déterminismes, des tendances, et appréhender de manière large les phénomènes étudiés. L'analyse qualitative est reconnue pour comprendre en profondeur l'expérience humaine, contextualiser les phénomènes et étudier le vécu des participants et les raisons qu'ils se donnent pour agir. L'analyse mixte permet des interprétations qui découlent des forces des deux types de données (D. Watkins et Gioia, 2015). Ici, les analyses qualitatives ont permis de comprendre les perceptions et objectifs des acteurs. Ceux-ci donnent à voir des futurs possibles (Boehlje, 1999). En revanche, des analyses plus quantitatives sur les politiques publiques, ou à partir de documents institutionnels ou de communications d'entreprises auraient permis de compléter cette perspective. Les analyses qualitatives ont permis aussi d'avoir des descriptions sur les actions en cours, les utilisations du numérique. L'analyse quantitative a permis de caractériser le rôle de certaines variables, de mettre en évidence des liens et des tendances, que l'analyse qualitative complémentaire a permis de comprendre. Des analyses quantitatives et qualitatives complémentaires pourraient permettre d'étudier plus en détail certaines dimensions, telles que le rôle de la prestation agricole, les perceptions et argumentaires des agriculteurs, les stratégies d'adaptation etc.

Conclusion du chapitre

L'approche théorique développée dans cette thèse, et ses implications méthodologiques, ont permis d'analyser des dynamiques à l'œuvre dans le secteur agricole. Empiriquement, j'ai pu mettre en évidence que selon les paradigmes et les modèles agricoles auxquels les acteurs se rattachent, ceux-ci n'ont pas les mêmes attentes, ne perçoivent pas les mêmes risques et n'ont pas les mêmes usages du numérique. Dans l'ensemble, les usages du numérique dans les exploitations accompagnent une trajectoire d'industrialisation, caractérisée par la spécialisation, la concentration, l'augmentation du salariat et l'intégration dans les chaînes de valeur agrialimentaires. Les effets sont plus paradoxaux en ce qui concerne la standardisation des pratiques et les

dynamiques autour des connaissances dans le secteur, avec des formes de marchandisation et d'externalisation, mais aussi des dynamiques nouvelles d'échanges de connaissances entre pairs. Les théories et méthodes développées dans cette thèse ainsi que les faits empiriques mis en évidence peuvent être vus comme une première étape d'analyse des transformations contemporaines de l'agriculture que sont la digitalisation et l'écologisation, et ouvrent des perspectives de recherche intéressantes.

CONCLUSION

CONCLUSION GÉNÉRALE

La digitalisation de l'agriculture transforme le secteur dans ses institutions, ses organisations, ses acteurs, leurs connaissances et leurs pratiques. Le Chapitre 1, à travers un état des lieux fondé sur la littérature scientifique et la littérature grise, permet une première description des différentes dimensions de la digitalisation de l'agriculture et des controverses qu'elle suscite. Cela m'amène à formuler une première question sur cette transformation : le développement du numérique dans le secteur agricole favorise-t-il ou non sa transition écologique ? Le Chapitre 2 s'appuie sur une revue de la littérature plus théorique en sciences sociales et en économie afin de définir les concepts et de construire un cadre d'analyse pour étudier cette question. Le choix d'aborder la question avec une perspective en économie politique de l'innovation est motivé par l'enjeu d'une analyse systémique intégrant les différentes dimensions et échelles de l'écologisation du secteur, mais aussi l'hétérogénéité des trajectoires déjà identifiées dans le chapitre précédent. Pour cela, j'analyse les transformations du secteur agricole à partir du cadre conceptuel du système d'innovation, en y intégrant la notion de paradigme. La prise en compte de plusieurs échelles organise alors la démarche qui sera conduite tout au long de la thèse, croisant analyse des évolutions sectorielles et individuelles : échelle du système d'innovation sectoriel ; focus sur les exploitations agricoles et leurs usages du numérique ; analyse du rôle des coopératives agricoles comme intermédiaires dans le système d'innovation. La mobilisation de ce cadre d'analyse, m'amène à préciser et problématiser ma question initiale : Comment est-ce que la digitalisation interagit avec le système d'innovation agricole français, ses paradigmes et in fine avec les trajectoires d'écologisation de l'agriculture ? Cette question est déclinée dans une démarche globale de recherche qui intègre les trois échelles d'analyse comme trois étapes (et chapitres) complémentaires : le système d'innovation, les exploitations agricoles et les coopératives agricoles.

1 Les trajectoires de digitalisation de l'agriculture

Terme « parapluie » recouvrant un spectre large de technologies (P.-B. Joly, 2015), l'« agriculture numérique », se présente à la fois comme une révolution, un « nouveau modèle agricole » (Bournigal, 2016) et comme transformation du secteur au-delà des clivages entre grandes et petites exploitations, entre exploitations biologiques et conventionnelles, entre celles produisant pour le marché local et celles produisant pour les marchés mondiaux. Pourtant, ma thèse montre que le développement des technologies numériques en agriculture génère une diversité de perceptions, d'usages et de trajectoires, qui semblent renforcer des distinctions entre paradigmes, et accompagne des mécanismes de différenciations des modèles productifs agricoles en continuité des transformations du secteur depuis la seconde guerre mondiale.

Dans le Chapitre 3, je m'attache à décrire les transformations du système d'innovation agricole par la digitalisation, à travers les perceptions d'acteurs qui se rattachent à différents paradigmes d'écologisation. Certaines

perceptions sont consensuelles entre les acteurs de différents paradigmes d'écologisation, comme le rôle des organisations agricoles dans l'accompagnement et la mise en œuvre de la digitalisation, les risques d'appropriation des données par les entreprises du numérique ou de perte d'autonomie, les attentes pour de meilleures conditions de travail et l'accès à des connaissances nouvelles. Mais des différences scindent le secteur agricole, loin de la vision unificatrice que porte globalement les entreprises du numérique. Alors que les organisations qui se rattachent à l'agriculture biologique espèrent du numérique une aide pour observer, analyser et concevoir de façon systémique les systèmes de production, faciliter les partages de connaissances ou renforcer des échanges directs avec les consommateurs, celles qui se rattachent à l'agriculture conventionnelle espèrent que le numérique facilitera la traçabilité, sera source de valeur pour les organisations agricoles, limitera les impacts négatifs sur l'environnement et améliorera l'image de l'agriculture. Alors que les premières craignent une standardisation, une perte de savoir-faire, de contrôle et de pouvoir, les deuxièmes voient des risques d'appropriation de valeur et des usages limités par les compétences des agriculteurs. Finalement, les organisations qui se rattachent aux paradigmes biologiques ou conventionnels se distinguent par les directionnalités de digitalisation qu'elles envisagent. Les premières envisagent une digitalisation qui renforce les échanges et collaborations d'un côté, et qui vient appuyer la mise en œuvre de systèmes de production complexes et basés sur les services écosystémiques d'un autre. Les deuxièmes envisagent un développement technologique pour renforcer les processus de traçabilité et la valorisation de la production d'un côté, et le développement de technologies pour optimiser et simplifier la production, améliorer la rentabilité tout en limitant les impacts sur l'environnement de l'autre.

Dans le Chapitre 4, je m'intéresse aux dimensions micro-économiques et matérielles de la digitalisation. À l'échelle des exploitations agricoles en grandes cultures et de leurs usages des technologies numériques, on retrouve des différences entre les exploitations biologiques et celles en conventionnel. Globalement, les profils d'usages diffèrent selon le type de modèle productif. Ainsi, les exploitations qui ont une plus petite dimension économique, sont plus diversifiées, sont en agriculture biologique ou font de la vente directe, sont surreprésentées dans celles qui utilisent peu de Technologies Numériques pour la Production (TNP). Celles qui ont plus de main-d'œuvre salariée et qui sont en conventionnel sont surreprésentées dans le profils TNP-moyen. Celles qui ont une plus grande dimension économique, ont des activités de prestation agricole, ont plus de main-d'œuvre, ou sont en système mixte (biologique-conventionnel), sont surreprésentées dans les exploitations qui utilisent le plus de TNP. Les exploitations mixtes, qui ont des productions biologiques et conventionnelles, montrent que les technologies numériques peuvent faciliter des formes d'écologisation industrielle (Gkisakis et Damianakis, 2020). Ces résultats mettent également en avant le fait qu'au-delà du mode de production biologique ou conventionnel, c'est aussi et surtout le caractère industrialisé ou non des exploitations qui caractérise leur usage des TNP. En effet, le numérique semble plutôt facilité par - et facilitateur de - dynamiques qui caractérisent l'industrialisation agricole. Ces dynamiques sont la spécialisation, la concentration, le salariat, l'augmentation des capitaux et l'intégration des exploitations aux industries de l'amont et de l'aval

(Daviron, 2021 ; Diry, 1988). Les résultats font ressortir une autre dimension : la sous-traitance. L'usage de technologies numériques accompagne la mise en œuvre de la prestation. Dans l'autre sens, le recours à des prestataires peut amener du numérique dans les exploitations, mais ne ressort pas comme un élément décisif dans le choix des prestataires. Les interrelations entre usages du numérique, prestation et écologisation de l'agriculture restent à approfondir.

Le développement du numérique en agriculture recouvre aussi des dynamiques plus générales au secteur. Ainsi, les usages du numérique pour avoir de l'information technique se généralisent chez les agriculteurs. Les différences d'usage sont liées avant tout à des caractéristiques individuelles et de réseau. Ainsi, les agriculteurs qui sont conseillés par les coopératives ou semenciers utilisent moins les Technologies Numériques pour l'Information et la Communication (TNC), alors que celles qui font partie de CETA ou autres groupes d'échanges entre agriculteurs s'informent plus via le numérique. Les agriculteurs les plus jeunes ou membres d'un syndicat agricole utilisent plus les réseaux sociaux pour accéder à de l'information.

Dans le Chapitre 5, je me focalise sur les caves coopératives, vues à la fois comme organisations intermédiaires du système d'innovation agricole et comme systèmes d'interactions entre viticulteurs, pour étudier les formes de coordination et les liens entre évolutions sectorielles et pratiques individuelles. En viticulture, les usages du numérique dans la région Occitanie apparaissent avant tout comme une dynamique collective, poussée par les exigences de l'aval, les propositions technologiques de l'amont, et par des volontés internes aux coopératives d'accroitre les dynamiques d'échanges de connaissances, de communication avec les consommateurs, voire de gouvernance. La digitalisation est avant tout mise en œuvre pour accompagner la mise en place de la traçabilité, réglementaire ou associée à des cahiers des charges spécifiques, dans une vision d'écologisation faible voire symbolique. Elle est aussi largement mobilisée pour la communication, dans un secteur où la qualité et la création de valeur se construisent largement par l'image et l'identité du territoire et de ses producteurs. L'exemple des caves coopératives suggère plus largement que les coopératives agricoles peuvent devenir des espaces de construction des trajectoires de digitalisation et d'écologisation, de développement de capacités individuelles et collectives et d'articulation de ces trajectoires.

La discussion générale de la thèse intègre les éléments de ces trois chapitres de résultats et permet d'en dégager trois apports empiriques principaux.

— La digitalisation de l'agriculture rassemble des trajectoires diverses et n'est pas linéaire, avec des phénomènes d'abandons, d'apprentissages, d'adaptations, de renforcement etc. L'usage du numérique et plus globalement la digitalisation du secteur n'apparaît pas comme la résultante de comportements dits « pionniers » mais dépend de la diversité des paradigmes et des trajectoires d'écologisation.
— La digitalisation accompagne l'industrialisation de l'agriculture, caractérisée par la spécialisation productive, le recours croissant au salariat, l'intensification, l'agrandissement des exploitations, l'utilisation croissante de produits, énergies et services externes et l'intégration dans les chaînes de valeur. La digitalisation s'accompagne toutefois de transformations plus en rupture concernant les dynamiques de circulation des

connaissances dans le secteur et questionne le rôle de l'Etat, des firmes et des organisations collectives et intermédiaires.
— La digitalisation actuelle montre plusieurs formes d'oppositions vis-à-vis de l'écologisation forte de l'agriculture, que ce soit en terme techniques, d'objectif, de raisonnement, de dynamique temporelle mais aussi d'enjeux politiques et sociaux. Des hybridations de la digitalisation semblent toutefois possibles avec des formes d'écologisation industrielle, mais aussi par une transformation plus globale de la digitalisation en repensant ses modèles techniques, économiques et politiques.

La discussion est également l'occasion de revenir sur les apports et limites théoriques et méthodologiques de mes travaux. L'approche globale organisée selon trois échelles a permis d'analyser la digitalisation et ses relations avec l'écologisation au travers ses dimensions sectorielles, collectives et individuelles et leurs interrelations. Avec des méthodes attachées à la construction d'information primaires (enquêtes) et leur analyse mixant qualitatif et quantitatif, j'ai pu intégrer les perceptions, les usages et les logiques des acteurs pour appréhender ma question de recherche en dépassant des approches purement déterministes ou individualistes. Cette approche apparaît intéressante pour comprendre, analyser, voire transformer des grandes dynamiques d'innovation. Mon travail de thèse s'inscrit dans un domaine de recherche encore en émergence. Il contribue à dresser un panorama de la digitalisation du secteur agricole, et de ses interactions avec l'écologisation. Il soulève des perspectives de recherche qu'il convient de préciser pour des travaux futurs.

2 Perspectives

2.1 Confronter et comparer les résultats pour une analyse globale des transformations de l'agriculture

2.1.1 *Intégrer les filières et territoires dans l'étude de la digitalisation de l'agriculture*

Pour aller au-delà des spécificités des résultats de la thèse liées aux territoires et filières étudiés (Rose, Morris et al., 2018), mon travail de recherche appelle à les confronter et les comparer avec des études sur d'autres terrains.

Des comparaisons internationales permettraient de mettre en lumière les spécificités de la digitalisation de l'agriculture en fonction des systèmes nationaux d'innovation (Lundvall, Johnson et al., 2002). Ces comparaisons permettraient notamment d'analyser le rôle de différentes politiques publiques qui jouent sur la digitalisation du secteur agricole. Ceci impliquerait une analyse multi-niveaux car une diversité de politiques publiques (politiques économiques, environnementales, d'innovation etc.), qui ne sont pas centrées directement sur la digitalisation, peuvent l'impacter de manière indirecte.

Le choix de la région Occitanie a permis d'avoir une diversité structurelle et écologique des exploitations agricoles, aussi bien en grandes cultures qu'en viticulture. Des études dans d'autres régions, en France ou à l'international, permettraient de compléter les observations empiriques avec d'autres contextes institutionnels, géographiques et agricoles. Par exemple le secteur viticole pourrait être étudié en région bordelaise, caractérisée par des exploita-

tions viticoles plus grandes et avec une production à plus forte valeur ajoutée. Des travaux incluant une perspective territoriale permettraient d'étudier les disparités géographiques de la digitalisation de l'agriculture, en lien avec les ressources de ces territoires, et notamment les ressources humaines. Les études de terrain pourraient être articulées avec des données issues de recensement nationaux, afin d'approcher la question de manière plus exhaustive et quantitative. De telles études permettraient aussi d'appréhender le territoire comme milieu innovateur, comme ensemble de ressources et relations de proximité, et d'analyser les disparités de ces milieux (Laperche et Uzunidis, 2011).

Par ailleurs, l'étude d'autres filières serait également complémentaire. Des filières d'élevage, par exemple bovin laitier, avicole ou porcin, sont des filières dans lesquelles la digitalisation est déjà fortement développée, où il y a des enjeux forts en termes de bien-être au travail (des personnes et des animaux) et d'environnement, et où les modèles productifs sont très contrastés (Hostiou, Allain et al., 2014 ; T. Martin et al., 2021). La filière maraîchage combine également des enjeux fort sur le travail et la coexistence de modèles différents. Ces filières apparaissent donc comme des terrains potentiels pertinents pour compléter le travail effectué dans cette thèse. L'analyse en termes de filière apporterait aussi des éléments pour étudier le rôle du numérique dans les relations avec l'amont et l'aval, et dans les différents niveaux d'intégration des exploitations.

L'intégration d'études empiriques sur la digitalisation de l'agriculture dans différents territoires et différentes filières pourrait par exemple faire l'objet de projets de recherche européens.

2.1.2 *Repenser l'analyse des exploitations, de leur gestion et du travail agricole*

Notre analyse soulève l'importance des transformations du travail associé à la digitalisation de l'agriculture. Un travail de terrain auprès des salariés agricoles des exploitations et des entreprises de travaux agricoles, offrirait un regard intéressant sur ce processus. Une telle recherche permettrait de voir comment les salariés travaillent avec le numérique, quel rôle ils jouent, et comment ils sont impactés par le développement du numérique dans leur entreprise. Alors que les structures d'exploitations se modifient, avec plus de salariat et plus de sous-traitance, il apparaît essentiel de faire évoluer les méthodologies de recherche dans le domaine agricole pour saisir ces transformations, et ne pas invisibiliser ces nouvelles formes de travail. Des études spécifiques pourraient également porter sur la sous-traitance, qui accompagne et est accompagnée par le développement du numérique (Nguyen, Brailly et Purseigle, 2020). Ces études permettraient de comprendre comment le numérique peut jouer sur les choix de faire de la sous-traitance ou d'y recourir, et des implications que cela entraîne sur le fonctionnement des exploitations et leurs pratiques.

Les usages des technologies numériques accompagnent la transformation des modèles d'exploitation et des types de gestion et de stratégies de ces dernières. La nécessité de renouveler les théories et analyses de ces questions n'est pas nouvelle (Jeanneaux et Blasquiet-Revol, 2012 ; Laurent et Rémy, 2000 ; Nguyen et Purseigle, 2012). Nos résultats confirment ces besoins et invitent à des travaux scientifiques, mais aussi à des réflexions politiques sur

la caractérisation des exploitations agricoles et de leurs modes de gestion. Il semble notamment indispensable d'étudier l'impact du numérique sur les revenus agricoles et sur l'endettement des agriculteurs (Piet et Hérault, 2021).

2.2 Analyser les processus et les mécanismes de la digitalisation

Au-delà d'un état des lieux général, cette thèse ouvre des perspectives de recherche sur les mécanismes et les processus impliqués dans la digitalisation de l'agriculture.

Au niveau des acteurs, l'étude des réseaux qui se construisent autour du numérique permettrait d'étudier plus précisément les modifications du système d'innovation par et pour la digitalisation, en montrant comment ces transformations impliquent les acteurs du système d'innovation, modifie leurs interactions, et mobilisent des organisations d'autres secteurs également. Des focus sur les grandes firmes du secteur agricole pourraient être intéressants. En effet, des travaux sur le numérique soulignent l'importance de firmes telles que John Deere ou Bayer sur le développement du numérique (Bronson et Knezevic, 2016 ; Prause, Hackfort et Lindgren, 2020). Leur rôle est globalement peu renseigné, bien qu'il puisse être majeur dans la construction et l'orientation de la digitalisation de l'agriculture, notamment en venant interagir avec les systèmes nationaux ou sectoriels d'innovation. Le rôle de firmes, et notamment de multinationales, dans la construction des trajectoires d'innovation, peut être décrit grâce au concept de « Corporate Innovation System » (Lundvall et Rikap, 2022). Une autre perspective de recherche consiste en l'étude du rôle des collectifs dans la digitalisation. Comme le montrent mes résultats à l'échelle de coopératives agricoles, les organisations collectives apparaissent comme des lieux d'apprentissage, de construction de connaissances, d'expertise et d'évaluation. Elles peuvent être le lieu d'émergence de trajectoires de digitalisation alternative ou de construction de contre-pouvoir face à un développement du numérique centré sur les firmes de l'agri-business.

Les approches par les processus, évoquées dans le chapitre 2, pourraient être mobilisées également. L'étude d'une innovation précise, via par exemple le concept de Système Technologique d'Innovation (Carlsson et Stankiewicz, 1991), peut mettre en évidence de manière plus précise le rôle de l'Etat, les réseaux d'acteurs impliqués, les institutions qui jouent dans le processus d'innovation, les rapports d'influence, mais également les a priori et objectifs implicites intégrés dans la conception de l'innovation en question. Cela peut aussi mettre en lumières des défaillances, des problèmes dans ce processus. Creuser un cas d'étude sur un outil numérique utilisé spécifiquement dans une perspective d'écologisation forte des pratiques permettrait d'analyser comment les contraintes spécifiques d'écologisation sont intégrées dans la conception de l'outil. Cela permettrait d'étudier les valeurs qui se matérialisent dans les technologies conçues et qui persistent sur l'organisation et les pratiques liées à ces technologies (Cardon, 2010). Des perspectives pluridisciplinaires pourraient également étudier le cycle de vie de ces technologies pour estimer les coûts écologiques intrinsèques de celles-ci.

2.3 Analyser les dynamiques et les trajectoires

Il me semble important de mettre aussi en perspective mes résultats avec la dynamique des phénomènes observés. En effet, depuis le début de cette thèse fin 2018, plusieurs changements importants ont eu lieu, qui montrent que les évolutions dans ce domaine peuvent être rapides. Du point de vue des entreprises, j'ai pu observer des dynamiques d'entrée et de sortie, avec la création de start-up mais aussi la faillite d'entreprises considérées comme importantes dans le secteur. J'ai aussi pu voir la structuration des entreprises autour du numérique, avec l'importance croissante des salons, des conférences professionnelles sur le sujet. Cette dynamique peut en partie être liée à l'évolution des politiques publiques, car plusieurs programmes ont été lancés sur le sujet. Dans la recherche, les publications sur le sujet ont augmenté drastiquement en France comme à l'international. Au niveau de DigitAg et de INRAE, des questionnements ont été intégrés sur les risques du développement du numérique, sur l'agriculture biologique, sur la diversité des trajectoires possibles, notamment avec la publication du livre blanc *Agriculture et numérique* (Bellon-Maurel, Garcia et al., 2022). Dans les caves coopératives, des nouveaux dispositifs de communication interne, de vente en ligne ont été mis en œuvre avec le covid, qui pourront ou se développer à plus long terme. Pour les agriculteurs, l'ouverture d'un guichet FranceAgriMer en Avril 2022, pour cofinancer les investissements dans du matériel connecté et innovant pourrait également amener des modifications. Au niveau de la société, des critiques ont commencé à émerger dans la presse et par des associations (Atelier Paysan, 2021 ; Reinert, 2022 ; Réseau Action Climat, 2020). Ainsi, les résultats présentés ici montrent un instant, une photographie mais doivent être replacés dans leur contexte historique.

Des études longitudinales permettraient d'étudier ces dynamiques. À l'échelle du système d'innovation, il serait intéressant de voir comment évolue le système d'acteurs, notamment pour étudier le devenir de la multiplicité des start-up du domaine, dont l'existence économique est pour l'instant largement liée aux financements publics dont elles bénéficient. Une étude sur les créations et disparitions de start-up complèterait les travaux sur les trajectoires de fondateurs de ces entreprises (Biao et Temri, 2021 ; Chapus et Brailly, 2022), en intégrant la question de la performance et des effets des régulations sectorielles. À l'échelle des exploitations, des études longitudinales et des observations in-situ seraient également pertinentes. Les phénomènes d'apprentissages, d'ajustement, voire de détournement, dans le temps long, pourraient ainsi être mises en évidence (Higgins et al., 2017). De telles études pourraient mettre en lumière les rapports de pouvoir et l'émergence de trajectoires technologiques alternatives.

De plus, les transformations des modèles de production et du secteur peuvent être pensées comme exprimant des dynamiques plus larges du capitalisme. Historiquement, la modernisation agricole s'est inscrite dans le modèle fordiste liée aux transformations du capitalisme de l'époque (Allaire, 1988). Aujourd'hui, le développement du numérique s'inscrit dans les transformations contemporaines du capitalisme. S'appuyer sur les travaux sur le capitalisme de plateforme (Montalban, Frigant et Jullien, 2019 ; Srnicek, 2017), le capitalisme de surveillance (Zuboff, 2019) ou le techno-féodalisme (Durand, 2020) pour étudier les transformations de l'agriculture avec le numérique

en lien avec les transformations du capitalisme offre des perspectives de recherche intéressantes. L'extension du capitalisme de plateforme pourrait par exemple amener une restructuration du secteur agricole avec de nouvelles formes de concentration et de monopolisation (Giles et Stead, 2021). Ce concept offre des perspectives de recherche sur le développement des plateformes dans le secteur agricole, ou sur les effets du capitalisme de plateforme de manière générale sur ce secteur. Des travaux se centrant sur l'analyse des firmes et de leurs stratégies liées au développement du numérique permettraient de discuter les logiques d'accumulation du capitalisme de surveillance (Stone, 2022).

Globalement, les liens entre digitalisation et évolution macro-structurelles pourraient faire l'objet d'analyses plus approfondies, notamment dans des perspectives pluridisciplinaires, avec la sociologie, les sciences politiques, l'histoire et l'agronomie. Une analyse historique, comme conseillée par les travaux en économie évolutionniste permettrait de voir comment le développement du numérique a été amorcé, facilité ou contraint par des politiques publiques et structures économiques et institutionnelles passées et participerait à mieux comprendre les liens entre les transformations actuelles du secteur agricole et celles du capitalisme.

2.4 Intégrer l'hétérogénéité et les rapports du pouvoir dans les politiques d'innovation

Au-delà de perspectives de recherche, mon travail peut avoir des implications plus opérationnelles pour les politiques publiques, les organisations agricoles et autres acteurs économiques.

Tout d'abord, ce travail répond à un manque de connaissances sur le développement du numérique en agriculture, et pourrait servir de source d'information et de support pour des discussions et débats incluant des organisations agricoles et publiques, pour l'élaboration de politiques de recherche et d'innovation ou pour des réflexions sur le rôle et les fonctions des organisations agricoles. Pour les politiques de recherche et d'innovation, ce travail offre des éléments de réflexion, notamment sur l'intégration de l'hétérogénéité et des rapports de pouvoir.

Les résultats de ce travail soulignent que le développement du numérique dans l'agriculture n'est pas neutre. De ce fait, il me semble important de réfléchir au mode de gouvernance de l'innovation, dont la forme dominante actuelle est le régime des promesses technoscientifiques. Ce régime se base sur la problématisation d'enjeux et la présentation de technologies comme seule manière de répondre à ces enjeux, en proposant une nouveauté radicale tout en construisant une crédibilité, qui s'appuie sur une naturalisation de l'évolution technologique proposée et le soutien d'un cercle d'expertise (P.-B. Joly, 2015). Ce mode de gouvernance créé un état de nécessité, divise la société entre promoteurs de technologies et utilisateurs, exclue des solutions alternatives et évacue les réflexions sur les enjeux sociétaux des innovations. Il me semble donc important de renouveler ce mode de gouvernance. Les politiques d'innovation devraient se baser sur des études sur les effets de ces développements technologiques, et des réflexions critiques, qui intègrent les enjeux économiques et sociaux réels, plutôt que sur les simples promesses.

En outre, les politiques de recherche et d'innovation pourraient favoriser des formes d'expérimentations collectives et faciliter l'émergence de solutions alternatives, afin d'éviter des verrouillages technologiques (Cowan et Hultén, 1996 ; P.-B. Joly, 2015). Il me semble essentiel de ne pas voir le développement du numérique, ou de tout autre technologie, comme une fin, mais comme un potentiel moyen, parmi une diversité de leviers, pour atteindre des objectifs environnementaux, sociaux ou économiques.

Au-delà des modes de gouvernance, les modèles d'innovation pourraient être eux-mêmes renouvelés. En effet, le modèle de financement de la R&D, de transfert aux industries puis d'application par les utilisateurs semble limité pour répondre aux enjeux sociaux et environnementaux de l'agriculture. Les résultats de ma recherche indiquent par exemple qu'une manière d'accompagner la digitalisation peut être dans l'accompagnement des organisations agricoles (coopératives, groupes d'agriculteurs etc.) vers la construction de compétences et de réflexion collective sur les besoins, les moyens et les manières de faire en termes de digitalisation. De plus, les évolutions des politiques d'innovation font écho à des débats sur les stratégies à adopter entre soutenir la R&D, ou soutenir le déploiement des technologies par la demande. Les résultats de cette thèse, au-delà de l'opposition entre politiques d'innovation 'push' ou 'pull' (Labarthe, Coléno et al., 2021), viennent mettre au centre la question de la prise en compte de l'hétérogénéité dans les politiques d'innovation. Introduire l'hétérogénéité dans ces politiques implique d'inclure l'hétérogénéité des besoins et attentes des acteurs, mais aussi d'inclure la diversité d'acteurs, la diversité de modèles économiques de l'innovation envisagée et les rapports de pouvoir. En outre, les modèles d'innovation pourraient mieux intégrer l'articulation des innovations entre elles. Ainsi, le numérique ne doit pas être pensé en dehors des innovations agronomiques, organisationnelles et sociales proposées pour répondre aux enjeux de l'agriculture.

Des travaux de recherche avec une importante dimension empirique, tels que celui proposé dans cette thèse, peuvent accompagner des formes de réflexivité des acteurs et mieux informer les politiques publiques et l'action collective, afin d'éviter des verrouillages, de construire et d'orienter l'innovation vers des objectifs sociétaux (Cowan et Hultén, 1996). Mon travail pourrait également contribuer à des travaux de prospective sur les évolutions du secteur agricole. Il souligne également la nécessité d'avoir accès à des bases de données sur le secteur agricole pour pouvoir faire des études longitudinales sur les évolutions des pratiques et des technologies dans les exploitations, ainsi que sur les modes de gestion, les formes d'entreprises et de travail.

Pour les acteurs des filières et les organisations agricoles, les résultats de ma thèse soulèvent également plusieurs éléments de réflexion. Le développement du numérique amène de nouveaux besoins en compétences et en capacités de la part des agriculteurs et agricultrices, mais aussi des organisations agricoles. Les organisations agricoles peuvent être le lieu de construction collective de ces capacités, pour comprendre, utiliser et transformer la digitalisation. Ainsi, les organisations agricoles peuvent être le lieu d'expérimentations sur des outils et services numériques, voire même une échelle de construction de technologies numériques. Les organisations collectives agricoles pourraient participer à construire ainsi un contre-pouvoir de contrôle et d'orientation des trajectoires d'innovation.

Ma thèse propose une approche multi-niveaux de la digitalisation du secteur agricole, et de ses interactions avec les trajectoires d'écologisation. Le choix d'une telle approche répondait à un enjeu fort de construction de connaissances dans un domaine en pleine transformation et au cœur de controverses. Alors que les politiques publiques, les entreprises, et les recherches se tournent vers la digitalisation dans l'espoir de répondre aux enjeux économiques, environnementaux et sociaux du secteur agricole, il me paraissait important de prendre un peu de recul et d'étudier empiriquement ce phénomène complexe. Les faits mis en évidence dans cette thèse offrent un regard à un moment donné et montrent des mécanismes de trajectoires. Cependant, les évolutions futures restent incertaines et tributaires des évolutions économiques, politiques, sociétales et environnementales à venir. Les évolutions futures seront aussi liées aux initiatives des acteurs économiques et scientifiques, ou encore des politiques publiques. Ma question de recherche initiale interrogeait comment la digitalisation interagit avec le système d'innovation agricole français, ses paradigmes et les trajectoires d'écologisation de l'agriculture. Elle appelle alors à une question plus globale et politique : Comment orienter les trajectoires d'innovation, dont celle de la digitalisation, pour répondre aux enjeux multiples de l'agriculture ? Finalement ma thèse vient questionner comment les acteurs et organisations agricoles peuvent s'approprier le développement du numérique et la construction de leurs innovations. Elle interroge comment accompagner les innovations dans l'agriculture pour prendre en compte la diversité des besoins, des contextes et des pratiques que nécessite la transformation écologique et sociale du secteur agricole.

BIBLIOGRAPHIE

Abreu, LS de, Stéphane Bellon, Alfio Brandenburg, Guillaume Ollivier, Claire Lamine, Moacir Roberto Darolt, Pascal Aventurier et al. (2012). « Relations between organic agriculture and agroecology : current challenges around the principles of agroecology. » In : *Desenvolvimento e Meio Ambiente* 26, p. 143-160.

ACI (1995). *Alliance Coopérative Internationale*. fr. URL : https://www.ica.coop/fr/coop%5C%C3%5C%A9ratives/identite-cooperative (visité le 04/04/2022).

Acta (2018). *La blockchain dans le monde agricole : quels usages pour quels bénéfices ?* ISBN : 978-2-85794-305-1.

ADEME, Deloitte Développement Durable, Deloitte in Extenso, G-SCOP et SATIE (2017). *Industrie du futur : Comment allier transition numérique et transition énergétique et écologique ?* Rapp. tech. URL : https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/1766-comment-allier-transition-numerique-et-transition-energetique-et-ecologique-.html.

Agence Bio (2020). *Les chiffres clés – Agence Bio*. fr-FR. URL : https://www.agencebio.org/vos-outils/les-chiffres-cles/ (visité le 09/06/2021).

Aghion, Philippe et Céline Antonin (2017). « Progrès technique et croissance depuis la crise ». In : *Revue de l'OFCE* 4, p. 63-78.

Akrich, Madeleine (1989). « La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques ». In : *Anthropologie et sociétés* 13.2, p. 31-54. DOI : https://doi.org/10.7202/015076ar.

Akrich, Madeleine, Michel Callon et Bruno Latour (1988). « A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement ; 2 : Le choix des porte-parole ». In : *Gérer et Comprendre. Annales des Mines-Annales des mines. Gérer et comprendre-Gérer & comprendre* 11 & 12, p. 4-17.

Allaire, Gilles (1988). « Le modèle de développement agricole des années 1960 ». In : *Économie rurale* 184.1, p. 171-181. DOI : 10.3406/ecoru.1988.3908.

– (2002). « L'économie de la qualité, en ses secteurs, ses territoires et ses mythes ». In : *Géographie économie société* 4.2, p. 155-180. DOI : 10.1016/S1295-926X(02)00019-9.

Allaire, Gilles et Robert Boyer (1995). *La grande transformation de l'agriculture : lectures conventionnalistes et régulationnistes*. Inra-Quae. ISBN : 978-2-7380-0566-3.

Amable, Bruno (2000). « Institutional complementarity and diversity of social systems of innovation and production ». In : *Review of International Political Economy* 7.4, p. 645-687.

Amable, Bruno et al. (2005). *Les cinq capitalismes. Diversité des systèmes économiques et sociaux dans la mondialisation*. Rapp. tech. HAL.

Ansaloni, Matthieu et Eve Fouilleux (2006). « Changement de pratiques agricoles. Acteurs et modalités d'hybridation technique des exploitations laitières bretonnes ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 292, p. 3-17. DOI : 10.4000/economierurale.695.

Ansaloni, Matthieu et Andy Smith (2021). *L'expropriation de l'agriculture française - Pouvoirs et politiques dans le capitalisme contemporain*. fr. Dynamique socio-économique. Editions du croquant. ISBN : 978-2-36512-291-7.

Arthur, W Brian (1989). « Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events ». In : *The economic journal* 99.394, p. 116-131. DOI : 10.2307/2234208.

Aspexit (oct. 2021). *Agriculture & Numérique : prenons-nous vraiment la bonne direction ?*

Atelier Paysan (2021). *Reprendre la terre aux machines - Manifeste pour une autonomie paysanne et alimentaire*. Anthropocène, p. 288.

Atkinson, Rowland et John Flint (2001). « Accessing hidden and hard-to-reach populations : Snowball research strategies ». In : *Social research update* 33.1, p. 1-4.

Aulagnier, Alexis et Frédéric Goulet (2017). « Des technologies controversées et de leurs alternatives. Le cas des pesticides agricoles en France ». In : *Sociologie du travail* 59.3. DOI : 10.4000/sdt.840.

Aune, Jens B (2012). « Conventional, organic and conservation agriculture : production and environmental impact ». In : *Agroecology and strategies for climate change*. Springer, p. 149-165. DOI : 10.1007/978-94-007-1905-7_7.

Avril, Pauline, Aude Ridier et Élisabeth Samson (2021). « PAC et environnement : les exploitations les plus vertueuses sont-elles récompensées ? » In : *Economie rurale* 3, p. 84-84.

Ayache, Magali et Hervé Dumez (2011). « Le codage dans la recherche qualitative une nouvelle perspective ? » In : *Le libellio d'Aegis* 7.2-Eté, p. 33-46.

Ayre, Margaret, Vivienne Mc Collum, Warwick Waters, Peter Samson, Anthony Curro, Ruth Nettle, Jana-Axinja Paschen, Barbara King et Nicole Reichelt (2019). « Supporting and practising digital innovation with advisers in smart farming ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100302. DOI : 10.1016/j.njas.2019.05.001.

Babinet, Gilles (mars 2021). *Comment concilier transition écologique et numérique ?* fr. URL : https://www.institutmontaigne.org/blog/comment-concilier-transition-ecologique-et-numerique (visité le 23/09/2021).

Badillo, Patrick-Yves et Nicolas Pélissier (2015). « Usages et usagers de l'information numérique. Renouvellement des problématiques et nouveaux enjeux pour les SIC ». In : *Revue française des sciences de l'information et de la communication* 6. DOI : https://doi.org/10.4000/rfsic.1448.

Bages, Robert (1992). « Pratiques de l'informatique chez les agriculteurs et degrés d'appropriation. Une enquête dans la région Midi-Pyrénées ». In : *Économie rurale* 210.1, p. 10-16. DOI : 10.3406/ecoru.1992.4476.

Bai, Chunguang, Patrick Dallasega, Guido Orzes et Joseph Sarkis (2020). « Industry 4.0 technologies assessment : A sustainability perspective ». In : *International journal of production economics* 229, p. 107776. DOI : 10.1016/j.ijpe.2020.107776.

Balafoutis, Athanasios, Bert Beck, Spyros Fountas, Jurgen Vangeyte, Tamme Van der Wal, Iria Soto, Manuel Gómez-Barbero, Andrew Barnes et Vera Eory (2017). « Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics ». In : *Sustainability* 9.8, p. 1339. DOI : 10.3390/su9081339.

Barbier, Jean-Marc et Frédéric Goulet (2013). « Moins de technique, plus de nature : pour une heuristique des pratiques d'écologisation de l'agriculture ». In : *Natures Sciences Sociétés* 21.2, p. 200-210. DOI : 10.1051/nss/2013094.

Bareille, François, Florence Bonnet-Beaugrand et Sabine Duvaleix-Treguer (2017). « Objectives' alignment between members and agricultural cooperatives ». In : *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies* 98.1, p. 75-91. DOI : 10.1007/s41130-017-0048-3.

Barnes, Andrew, Iria Soto, Vera Eory, Bert Beck, Athanasios Balafoutis, Berta Sánchez, Jürgen Vangeyte, Spyros Fountas, Tamme van der Wal et Manuel Gómez-Barbero (2019). « Exploring the adoption of precision agricultural technologies : A cross regional study of EU farmers ». In : *Land use policy* 80, p. 163-174. DOI : 10.1016/j.landusepol.2018.10.004.

Barraud-Didier, Valérie et Marie-Christine Henninger (2009). « Les déterminants de la fidélité des adhérents de coopératives agricoles ». In : *Revue internationale de l'économie sociale : recma* 314, p. 47-62. DOI : 10.7202/1020964ar.

Barrett, Hannah et David Rose (2020). « Perceptions of the fourth agricultural revolution : what's in, what's out, and what consequences are anticipated ? » In : *Sociologia Ruralis*. DOI : 10.1111/soru.12324.

Bartoli, P. et D. Boulet (1989). « Dynamique et regulation de la sphere agro-alimentaire : l'exemple viticole ». fr. Thèse de doct. Université Montpellier 1, p. 910. ISBN : 9782738002037.

Bechtet, Noemie (mars 2022). « L'influence de la digitalisation sur les institutions de contrôle de l'efficacité des technologies en agriculture. Le cas des outils numériques d'aide à la décision pour la fertilisation azotée. » In : Montpellier : Société Française d'Economie Rurale.

Belletti, Giovanni, Andrea Marescotti et Jean-Marc Touzard (2017). « Geographical indications, public goods, and sustainable development : The roles of actors' strategies and public policies ». In : *World Development* 98, p. 45-57. DOI : 10.1016/j.worlddev.2015.05.004.

Bellon, Stéphane, Claire Lamine, Guillaume Ollivier et Lucimar de Abreu (2011). « The relationships between organic farming and agroecology ». In : *3. ISOFAR Scientific Conference at the 17. IFOAM Organic World Congress*. ISOFAR-International Society of Organic Agriculture Research.

Bellon, Stéphane et Servane Penvern (2014). « Organic food and farming as a prototype for sustainable agricultures ». In : *Organic farming, prototype for sustainable agricultures*. Springer, p. 1-19. ISBN : 978-94-007-7927-3.

Bellon-Maurel, Véronique, Frédérick Garcia, Ludovic Brossard, Nathalie Mitton et Alexandre Termier (jan. 2022). *Agriculture et numérique - Livre Blanc INRIA- INRAE : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables*.

Bellon-Maurel, Véronique et Christian Huyghe (2017). « Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology ». In : *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 24.3, p. 1-7. DOI : 10.1051/ocl/2017028.

Bergek, Anna, Staffan Jacobsson, Bo Carlsson, Sven Lindmark et Annika Rickne (2008). « Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems : A scheme of analysis ». In : *Research policy* 37.3, p. 407-429. DOI : 10.1016/j.respol.2007.12.003.

Berkhout, Frans et Julia Hertin (2004). « De-materialising and re-materialising : digital technologies and the environment ». In : *Futures* 36.8, p. 903-920. DOI : 10.1016/j.futures.2004.01.003.

Berriet-Solliec, Marielle (1997). *Institutions et territoires : vers le renouvellement des politiques publiques ? Les interventions des départements et des régions dans le secteur agricole*. 109. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

Bers, Caroline van, Aogán Delaney, Hallie Eakin, Laura Cramer, Mark Purdon, Christoph Oberlack, Tom Evans, Claudia Pahl-Wostl, Siri Eriksen, Lindsey Jones et al. (2019). « Advancing the research agenda on food systems governance and transformation ». In : *Current Opinion in Environmental Sustainability* 39, p. 94-102. DOI : 10.1016/j.cosust.2019.08.003.

Berthet, Elsa T, Gordon M Hickey et Laurens Klerkx (2018). « Opening design and innovation processes in agriculture : Insights from design and management sciences and future directions ». In : *Agricultural systems* 165, p. 111-115. DOI : 10.1016/j.agsy.2018.06.004.

Bertini, Marie-Joseph (2009). *Ni d'Eve ni d'Adam : Défaire la différence des sexes-Essais-documents*. Max Milo. ISBN : 978-2-315-00260-3.

Beus, Curtis E et Riley E Dunlap (1990). « Conventional versus alternative agriculture : The paradigmatic roots of the debate ». In : *Rural sociology* 55.4, p. 590-616. DOI : 10.1111/j.1549-0831.1990.tb00699.x.

Beyer, Mark A et Douglas Laney (2012). « The importance of 'big data' : a definition ». In : *Stamford, CT : Gartner*, p. 2014-2018.

Biao, Boris et Leila Temri (2021). « Engagement différentié des parties prenantes dans les processus d'innovation en agriculture numérique : leçons pour l'innovation responsable dans le secteur privé ». In.

Bidet, Eric, Maryline Filippi et Nadine Richez-Battesti (2019). « Repenser l'entreprise de l'ESS à l'aune de la RSE et de la loi Pacte ». In : *RECMA* 3, p. 124-137.

Birner, Regina, Thomas Daum et Carl Pray (2021). « Who drives the digital revolution in agriculture ? A review of supply-side trends, players and challenges ». In : *Applied Economic Perspectives and Policy*. DOI : https://doi.org/10.1002/aepp.13145.

Boehlje, Michael (1999). « Structural changes in the agricultural industries : how do we measure, analyze and understand them ? » In : *American Journal of Agricultural Economics* 81.5, p. 1028-1041. DOI : 10.2307/1244080.

Boinon, Jean-Pierre (2011). « Les politiques foncières agricoles en France depuis 1945 ». In : *Economie et Statistique/Economics and Statistics* 444-445, p. 19-37.

Bonneuil, Christophe et François Hochereau (2008). « Gouverner le «progrès génétique» Biopolitique et métrologie de la construction d'un standard variétal dans la France agricole d'après-guerre ». In : *Annales. Histoire, sciences sociales*. T. 63. 6. Cambridge University Press, p. 1303-1340. DOI : 10.1017/S0395264900038142.

Bonny, Sylvie (2017). « High-tech agriculture or agroecology for tomorrow's agriculture ? » In : *Harvard College Review of Environment & Society* 4.Spring 2017, p. 28-34.

Bordes, Jean-Paul (2017). « Numérique et agriculture de précision ». In : *Annales des Mines-Responsabilite et environnement*. 3. FFE, p. 87-93.

Bourgeois, Ariane et Michel Sébillotte (1978). « Réflexion sur l'évolution contemporaine des exploitations agricoles ». In : *Économie rurale* 126.1, p. 17-28. DOI : 10.3406/ecoru.1978.2570.

Bournigal, Jean-Marc (déc. 2016). *Big Data : "Oui, nous changeons de modèle agricole !"* fr. URL : https://agriculture.gouv.fr/big-data-oui-nous-changeons-de-modele-agricole (visité le 20/09/2021).

Bournigal, Jean-Marc, François Houllier, Philippe Lecouvey et Pierre Pringuet (oct. 2015). *Agriculture Innovation 2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement*. Rapp. tech. URL : https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf.

Boyer, James et Jean-Marc Touzard (2017). « Research, innovation and competitiveness of French vineyards : an analysis by the institutions ». In : *Systèmes alimentaires* 2016.1, p. 69-96.

Boyer, Robert (1986). *La théorie de la régulation : une analyse critique*. La découverte. ISBN : 2-7071-1628-9.

– (1989). « Histoire des techniques et théories economiques ». In : *Cepremap*, p. 33.

Boyer, Robert, Bernard Chavance et Olivier Godard (1991). *Les figures de l'irréversibilité en économie*. École des hautes études en sciences sociales.

Boyer, Robert et Michel Freyssenet (2000). *Les modèles productifs*. La Découverte Paris.

Brandtzæg, Petter Bae, Jan Heim et Amela Karahasanović (2011). « Understanding the new digital divide—A typology of Internet users in Europe ». In : *International journal of human-computer studies* 69.3, p. 123-138. DOI : 10.1016/j.ijhcs.2010.11.004.

Brechet, Jean-Pierre et Nathalie Schieb-Bienfait (2006). « Projets et pouvoirs dans les régulations concurrentielles. La question de la morphogenèse d'une filière d'agriculture biologique ». In : *Revue d'économie industrielle* 113, p. 9-29. DOI : 10.4000/rei.233.

Briggeman, Brian C et Brian E Whitacre (2010). « Farming and the internet : Reasons for non-use ». In : *Agricultural and Resource Economics Review* 39.3, p. 571-584. DOI : 10.1017/S1068280500007528.

Bronner, Gérald et Etienne Géhin (2010). *L'inquiétant principe de précaution*. Presses universitaires de France. ISBN : 978-2-13-064070-7.

Bronson, Kelly (2018). « Smart farming : including rights holders for responsible agricultural innovation ». In : *Technology innovation management review* 8.2, p. 7-14. DOI : 10.22215/timreview/1135.

– (2019). « Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100294. DOI : 10.1016/j.njas.2019.03.001.

Bronson, Kelly et Irena Knezevic (2016). « Big Data in food and agriculture ». In : *Big Data & Society* 3.1, p. 1-5. DOI : 10.1177/2053951716648174.

Bui, Sibylle, Aurélie Cardona, Claire Lamine et Marianne Cerf (2016). « Sustainability transitions : Insights on processes of niche-regime interaction and regime reconfiguration in agri-food systems ». In : *Journal of rural studies* 48, p. 92-103. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2016.10.003.

Burton, Rob JF et Mark Riley (2018). « Traditional Ecological Knowledge from the internet ? The case of hay meadows in Europe ». In : *Land Use Policy* 70, p. 334-346. DOI : 10.1016/j.landusepol.2017.10.014.

Busse, M, A Doernberg, R Siebert, A Kuntosch, W Schwerdtner, B König et W Bokelmann (2014). « Innovation mechanisms in German precision farming ». In : *Precision agriculture* 15.4, p. 403-426. DOI : 10.1007/s11119-013-9337-2.

Busse, M, W Schwerdtner, R Siebert, A Doernberg, A Kuntosch, B König et W Bokelmann (2015). « Analysis of animal monitoring technologies in Germany from an innovation system perspective ». In : *Agricultural Systems* 138, p. 55-65. DOI : 10.1016/j.agsy.2015.05.009.

Buttel, Frederick (1994). « Agricultural Change, Rural Society, and the State in the Late Twentieth Century : Some Theoretical Observations ». en. In : *Agricultural restructuring and rural change in Europe*. Sous la dir. de David Symes et Anton J. Jansen. Wageningen sociologische studies 37. Wageningen : Agricultural Univ, p. 13-32. ISBN : 978-90-6754-372-9.

Byé, Pascal, J-J Chanaron et Jacques Perrin (1989). « Les déterminants de l'innovation en agriculture à travers la littérature sur le machinisme et les engrais ». In : *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales (CESR)* 10.905-2016-70513, p. 65-96.

Callon, Michel (1986). « Éléments pour une sociologie de la traduction : la domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc ». In : *L'Année sociologique (1940/1948-)* 36, p. 169-208. ISSN : 0066-2399.

Candemir, Ahmet, Sabine Duvaleix et Laure Latruffe (2021). « Agricultural cooperatives and farm sustainability–A literature review ». In : *Journal of Economic Surveys* 35.4, p. 1118-1144. DOI : 10.1111/joes.12417.

Caplat, Jacques (2014). *Changeons d'agriculture : Réussir la transition*. Éditions Actes Sud. ISBN : 978-2-330-03539-6.

Carbonell, Isabelle (2016). « The ethics of big data in big agriculture ». In : *Internet Policy Review* 5.1. DOI : 10.14763/2016.1.405.

Cardon, Dominique (2010). *La démocratie Internet : Promesses et limites*. Seuil.

Carlsson, Benny et Rikard Stankiewicz (1991). « On the nature, function and composition of technological systems ». In : *Journal of evolutionary economics* 1.2, p. 93-118. DOI : 10.1007/BF01224915.

Carolan, Michael (2017a). « Agro-digital governance and life itself : food politics at the intersection of code and affect ». In : *Sociologia Ruralis* 57, p. 816-835. DOI : 10.1111/soru.12153.

– (2017b). « Publicising food : big data, precision agriculture, and co-experimental techniques of addition ». In : *Sociologia Ruralis* 57.2, p. 135-154. DOI : 10.1111/soru.12120.

– (2018). « 'Smart'farming techniques as political ontology : access, sovereignty and the performance of neoliberal and not-so-neoliberal worlds ». In : *Sociologia Ruralis* 58.4, p. 745-764. DOI : 10.1111/soru.12202.

– (2020). « Automated agrifood futures : robotics, labor and the distributive politics of digital agriculture ». In : *The Journal of Peasant Studies* 47.1, p. 184-207. DOI : 10.1080/03066150.2019.1584189.

Carrère, Myriam, Iragaël Joly et Damien Rousselière (2011). « De la longévité coopérative : une étude de la survie des coopératives agricoles françaises ». In : *Revue internationale de l'économie sociale : recma* 320, p. 82-98. DOI : 10.7202/1020910ar.

Carson, Rachel (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin Harcourt. ISBN : 978-0-547-52762-8.

Casilli, Antonio (2015). *Digital Labor : travail, technologies et conflictualités*. DOI : 978-2-86938-2299.

– (2019). *En attendant les robots-Enquête sur le travail du clic*. Média Diffusion. ISBN : 978-2-02-140189-9.

Castoriadis, Cornelius (1975). *L'institution imaginaire de la société*. Points.
Ceruzzi, Paul E (2012). *Computing : a concise history*. MIT press. ISBN : 978-0-262-51767-6.
CGAAER (2014). *Évaluation de la politique de développement agricole*. Rapp. tech. Paris : Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
Chambre d'agriculture Occitanie (juill. 2021). *Agriscopie 2021 : Viticulture*. fr. URL : https://occitanie.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/viticulture/agriscopie-2020-viticulture/ (visité le 05/03/2022).
Chapus, Quentin et Julien Brailly (mars 2022). « Enjeux autour de l'encastrement relationnel des créateurs de plateformes numériques dans le secteur agricole ». In : Montpellier : Société Française d'Economie Rurale.
Chavance, Bernard et al. (2012). *L'économie institutionnelle*.
Chiffoleau, Yuna (2005). « Learning about innovation through networks : the development of environment-friendly viticulture ». In : *Technovation* 25.10, p. 1193-1204. DOI : 10.1016/j.technovation.2004.04.003.
Chiffoleau, Yuna, Fabrice Dreyfus et Jean-Marc Touzard (2012). « Ethics in French Wine Cooperatives : Part of Social Movement ? » In : *Creating food futures : Trade, ethics and the environment*. Sous la dir. de Cathy Farnworth, Janice Jiggins et Emyr Thomas. Routledge. ISBN : 978-1-315-57459-2.
Chiffoleau, Yuna et Jean-Marc Touzard (2014). « Understanding local agri-food systems through advice network analysis ». In : *Agriculture and Human Values* 31.1, p. 19-32. DOI : 10.1007/s10460-013-9446-6.
Cholez, Célia, Marie-Benoît Magrini et Danielle Galliano (2017). « Les contrats de production en grandes cultures. Coordination et incitations par les coopératives ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 360, p. 65-83. DOI : 10.4000/economierurale.5260.
– (2020). « Exploring inter-firm knowledge through contractual governance : a case study of production contracts for faba-bean procurement in France ». In : *Journal of Rural Studies* 73, p. 135-146. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2019.10.040.
Chomel, Chantal (2019). « Loi Egalim : quel avenir pour les spécificités des coopératives agricoles ? » In : *RECMA* 4, p. 120-130.
Chomel, Chantal, Francis Declerck, Maryline Filippi, Olivier Frey et René Mauget (2013). *Les coopératives agricoles : identité, gouvernance et stratégies*. Primento. ISBN : 978-2-8044-6662-6.
Clapp, Jennifer (2021). « Explaining growing glyphosate use : The political economy of herbicide-dependent agriculture ». In : *Global Environmental Change* 67, p. 102239. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2021.102239.
Clapp, Jennifer et Sarah-Louise Ruder (2020). « Precision technologies for agriculture : digital farming, gene-edited crops, and the politics of sustainability ». In : *Global Environmental Politics* 20.3, p. 49-69. DOI : 10.1162/glep_a_00566.
Cleaver, Frances (2002). « Reinventing institutions : Bricolage and the social embeddedness of natural resource management ». In : *The European journal of development research* 14.2, p. 11-30. DOI : 10.1080/714000425.
Cockayne, Daniel (2019). « What is a startup firm ? A methodological and epistemological investigation into research objects in economic geography ». In : *Geoforum* 107, p. 77-87. DOI : 10.1016/j.geoforum.2019.10.009.
CoFarming (2017). *Livre Blanc #CoFarming : Le faire ensemble en réseau*. Rapp. tech. Paris, p. 45.

Cohen, Aurélien Gabriel (2017). « Des lois agronomiques à l'enquête agroécologique. Esquisse d'une épistémologie de la variation dans les agroécosystèmes ». In : *Tracés. Revue de Sciences humaines* 33, p. 51-72. DOI : 10.4000/traces.6989.

Cohendet, Patrick, David Grandadam, Laurent Simon et Ignasi Capdevila (2014). « Epistemic communities, localization and the dynamics of knowledge creation ». In : *Journal of economic geography* 14.5, p. 929-954. DOI : 10.1093/jeg/lbu018.

Cohendet, Patrick et Patrick Llerena (1999). « La conception de la firme comme processeur de connaissances ». In : *Revue d'économie industrielle* 88.1, p. 211-235. DOI : 10.3406/rei.1999.1751.

Compagnone, Claude et Justine Pribetich (2017). « Quand l'abandon du labour interroge les manières d'être agriculteur ». In : *Revue française de socio-économie* 1, p. 101-121.

Confédération Paysanne (déc. 2021). *Une agriculture Robotique, Numérique et Génétique pour 2030, sans paysans ni paysannes ? La Confédération paysanne de la Drôme s'est mobilisée à Bourg-lès-Valence*.

Connor, DJ (2008). « Organic agriculture cannot feed the world ». In : *Field Crops Research* 106.2, p. 187. DOI : 10.1016/j.fcr.2007.11.010.

Conti, Costanza, Giacomo Zanello et Andy Hall (2021). « Why are agri-food systems resistant to new directions of change ? A systematic review ». In : *Global Food Security* 31, p. 100576. DOI : 10.1016/j.gfs.2021.100576.

Cook, Michael (2018). « A life cycle explanation of cooperative longevity ». In : *Sustainability* 10.5, p. 1586. DOI : 10.3390/su10051586.

Cooke, Philip, Mikel Gomez Uranga et Goio Etxebarria (1997). « Regional innovation systems : Institutional and organisational dimensions ». In : *Research policy* 26.4-5, p. 475-491. DOI : 10.1016/S0048-7333(97)00025-5.

Coriat, Benjamin et Giovanni Dosi (1995). « The institutional embeddedness of economic change. An appraisal of the" evolutionary" and" regulationist" research programmes ». In.

Cornilleau, Lise et Pierre-Benoît Joly (2014). « La révolution verte, un instrument de gouvernement de la" faim dans le monde". Une histoire de la recherche agricole internationale ». In : *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis*, p. 171-201.

Coulomb, Pierre et Henri Nallet (1980). *Le syndicalisme agricole et la création du paysan modèle*. FeniXX. ISBN : 978-2-307-17354-0.

Cowan, Robin et Philip Gunby (1996). « Sprayed to death : path dependence, lock-in and pest control strategies ». In : *The economic journal* 106.436, p. 521-542. DOI : 10.2307/2235561.

Cowan, Robin et Staffan Hultén (1996). « Escaping lock-in : the case of the electric vehicle ». In : *Technological forecasting and social change* 53.1, p. 61-79. DOI : 10.1016/0040-1625(96)00059-5.

Cusinato, Augusto (2007). « Quelle approche pour l'économie informelle ? De l'individualisme méthodologique à la perspective institutionnaliste ». fr. In : *Commission suisse pour l'Unesco*. Université de Neuchâtel, p. 65-88.

Dalgaard, Tommy, Nicholas J Hutchings et John R Porter (2003). « Agroecology, scaling and interdisciplinarity ». In : *Agriculture, ecosystems & environment* 100.1, p. 39-51. DOI : 10.1016/S0167-8809(03)00152-X.

Damave, Marie-Cécile (2017). « Tous acteurs de la transition numérique agricole ». In : *Saf agr'iDées*.

Daniels, Arlene Kaplan (1987). « Invisible work ». In : *Social problems* 34.5, p. 403-415. DOI : 10.2307/800538.

Darnhofer, Ika, Thomas Lindenthal, Ruth Bartel-Kratochvil et Werner Zollitsch (2010). « Conventionalisation of organic farming practices : from structural criteria towards an assessment based on organic principles. A review ». In : *Agronomy for sustainable development* 30.1, p. 67-81. DOI : 10.1051/agro/2009011.

Darré, Jean-Pierre (1996). *L'invention des pratiques dans l'agriculture : vulgarisation et production locale de connaissance*. Karthala Editions. ISBN : 978-2-86537-678-0.

Darré, Jean-Pierre, Roger Le Guen et Bruno Lémery (1989). « Changement technique et structure professionnelle locale en agriculture ». In : *Economie rurale* 192.1, p. 115-122. DOI : 10.3406/ecoru.1989.4004.

David, Paul A (1985). « Clio and the Economics of QWERTY ». In : *The American economic review* 75.2, p. 332-337. ISSN : 0002-8282.

Daviron, Benoit (déc. 2021). « Aux origines de l'agriculture industrielle ». fr. In : *Une écologie de l'alimentation*. Sous la dir. de Nicolas Bricas, Damien Conaré et Marie Walser. éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-3353-3. (Visité le 18/04/2022).

De Clercq, Matthieu, Anshu Vats et Alvaro Biel (2018). « Agriculture 4.0 : The future of farming technology ». In : *Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE*, p. 11-13.

Del Corso, Jean-Pierre, Charilaos Kephaliacos et Gaël Plumecocq (2015). « Legitimizing farmers' new knowledge, learning and practices through communicative action : Application of an agro-environmental policy ». In : *Ecological Economics* 117, p. 86-96. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2015.05.017.

Deverre, Christian et Christine de Sainte Marie (2008). « L'écologisation de la politique agricole européenne. Verdissement ou refondation des systèmes agro-alimentaires ». In : *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement-Review of agricultural and environmental studies* 89, p. 83-104. DOI : hal-02663276.

Di Bianco, Soazig (2019). « Chapitre 4. Le conseil agricole à l'épreuve du numérique ». In : *Les agriculteurs dans le mouvement de numérisation du monde*. Éducagri éditions, p. 99-133.

DiMaggio, Paul, Eszter Hargittai et al. (2001). « From the 'digital divide'to 'digital inequality' : Studying Internet use as penetration increases ». In : *Princeton : Center for Arts and Cultural Policy Studies, Woodrow Wilson School, Princeton University* 4.1, p. 4-2.

Diry, Jean-Paul (1988). « Agriculture industrielle et agriculture industrialisée (Industrial agriculture and industrialized agriculture) ». In : *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 65.2, p. 125-137. DOI : 10.3406/bagf.1988.1426.

Djellal, Faridah (1995). *Changement technique et conseil en technologie de l'information*. Editions L'harmattan. ISBN : 978-2-296-30892-3.

Dobrov, GM (1979). « La technologie en tant qu'organisation ». In : *Revue Internationale des Sciences Sociales* 31.4, p. 628-648.

Dockès, Pierre (1990). « Formation et transferts des paradigmes socio-techniques ». In : *Revue française d'économie* 5.4, p. 29-82. DOI : 10.3406/rfeco.1990.1264.

Dosi, Giovanni (1982). « Technological paradigms and technological trajectories : a suggested interpretation of the determinants and directions of

technical change ». In : *Research policy* 11.3, p. 147-162. DOI : 10.1016/0048-7333(82)90016-6.

Dosi, Giovanni, Christopher Freeman, Richard Nelson, Gerald Silverberg et Luc Soete (1988). *Technical change and economic theory*. Rapp. tech. Laboratory of Economics et Management (LEM), Sant'Anna School of Advanced ...

Draperi, Jean-François (2018). « L'environnement, nouvel horizon coopératif ? » In : *RECMA* 1, p. 4-5.

Dufeu, Ivan, Ronan Le Velly, Jean-Pierre Bréchet et Allison Loconto (2020). « Can standards save organic farming from conventionalisation ? Dynamics of collective projects and rules in a French organic producers' organisation ». In : *Sociologia ruralis* 60.3, p. 621-638. DOI : 10.1111/soru.12298.

Dufva, Tomi et Mikko Dufva (2019). « Grasping the future of the digital society ». In : *Futures* 107, p. 17-28. DOI : 10.1016/j.futures.2018.11.001.

Dujarier, Marie-Anne (2014). *Le travail du consommateur : De Mac Do à eBay : comment nous coproduisons ce que nous achetons*. La découverte. ISBN : 978-2-7071-8255-5.

Dumez, Hervé (2016). *Méthodologie de la recherche qualitative : Les questions clés de la démarche compréhensive*. Vuibert. ISBN : 978-2-311-01391-7.

Dumont, Antoinette M, Pierre Gasselin et Philippe Baret (2020). « Transitions in agriculture : three frameworks highlighting coexistence between a new agroecological configuration and an old, organic and conventional configuration of vegetable production in Wallonia (Belgium) ». In : *Geoforum* 108, p. 98-109. DOI : 978-2-311-01391-7.

Durand, Cédric (2020). *Technoféodalisme : Critique de l'économie numérique*. Zones. ISBN : 978-2-35522-163-7.

Duru, Michel, Olivier Therond et M'hand Fares (2015). « Designing agroecological transitions ; A review ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 35.4, p. 1237-1257. DOI : 10.1007/s13593-015-0318-x.

Duvaleix-Tréguer, Sabine, Françoise Ledos et Guillaume Lepetit (2019). « L'usage du numérique, facilitateur de la gouvernance ? » In : *RECMA* 1, p. 68-80. DOI : 10.3917/recma.351.0068.

Eastwood, Callum, Margaret Ayre, Ruth Nettle et Brian Dela Rue (2019). « Making sense in the cloud : Farm advisory services in a smart farming future ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100298. DOI : 10.1016/j.njas.2019.04.004.

Eastwood, Callum, DF Chapman et MS Paine (2012). « Networks of practice for co-construction of agricultural decision support systems : Case studies of precision dairy farms in Australia ». In : *Agricultural Systems* 108, p. 10-18. DOI : 10.1016/j.agsy.2011.12.005.

Eastwood, Callum, Laurens Klerkx et Ruth Nettle (2017). « Dynamics and distribution of public and private research and extension roles for technological innovation and diffusion : Case studies of the implementation and adaptation of precision farming technologies ». In : *Journal of Rural Studies* 49, p. 1-12. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2016.11.008.

Edquist, Charles (2013). *Systems of innovation : technologies, institutions and organizations*. Routledge. ISBN : 978-0-203-35762-0.

Etikan, Ilker, Sulaiman Abubakar Musa et Rukayya Sunusi Alkassim (2016). « Comparison of convenience sampling and purposive sampling ». In : *American journal of theoretical and applied statistics* 5.1, p. 1-4. DOI : 10.11648/j.ajtas.20160501.11.

Fairbairn, Madeleine et Julie Guthman (2020). « Agri-food tech discovers silver linings in the pandemic ». In : *Agriculture and Human Values* 37.3, p. 587-588. DOI : 10.1007/s10460-020-10052-6.

Fakis, Apostolos, Rachel Hilliam, Helen Stoneley et Michael Townend (2014). « Quantitative analysis of qualitative information from interviews : A systematic literature review ». In : *Journal of Mixed Methods Research* 8.2, p. 139-161. DOI : 10.1177/1558689813495111.

FAO et ITU (2016). *E-Agriculture Strategy Guide*. EN. Rapp. tech. Bangkok : Food, Agriculture Organization of the United Nations et International Telecommunication Union, p. 222. URL : http://www.fao.org/documents/card/en/c/24f624ea-7891-45e8-9b24-66cbf13f004d/ (visité le 13/07/2021).

Faria, Lourenço Galvão Diniz et Maj Munch Andersen (2017). « Sectoral patterns versus firm-level heterogeneity-The dynamics of eco-innovation strategies in the automotive sector ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 117, p. 266-281. DOI : 10.1016/j.techfore.2016.11.018.

Faure, Guy, Yuna Chiffoleau, Frédéric Goulet, Ludovic Temple et Jean-Marc Touzard (2018). *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*. éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-2812-6.

Favreau, Louis et Mario Hébert (2012). *La transition écologique de l'économie : La contribution des coopératives et de l'économie solidaire*. Puq. ISBN : 978-2-7605-3546-6.

Fielke, Simon, Robert Garrard, Emma Jakku, Aysha Fleming, Leanne Wiseman et Bruce Taylor (2019). « Conceptualising the DAIS : Implications of the 'Digitalisation of Agricultural Innovation Systems' on technology and policy at multiple levels ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100296. DOI : 10.1016/j.njas.2019.04.002.

Fielke, Simon, Bruce Taylor et Emma Jakku (2020). « Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks : A state-of-the-art review ». In : *Agricultural Systems* 180, p. 1-11. DOI : 10.1016/j.agsy.2019.102763.

Fielke, Simon, Bruce Taylor, Emma Jakku, Martijn Mooij, Cara Stitzlein, Aysha Fleming, PJ Thorburn, Anthony J Webster, Aaron Davis et Maria P Vilas (2021). « Grasping at digitalisation : turning imagination into fact in the sugarcane farming community ». In : *Sustainability Science* 16.2, p. 677-690. DOI : 10.1007/s11625-020-00885-9.

Filippi, Maryline et al. (2015). « Le conseiller, une pièce maîtresse sur l'échiquier de la coopérative agricole ». In : *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement-Review of agricultural and environmental studies*, p. 439-466.

Filippi, Maryline, Olivier Frey et René Mauget (2008). « Les coopératives agricoles face à l'internationalisation et à la mondialisation des marchés ». In : *Revue internationale de l'économie sociale : recma* 310, p. 31-51. DOI : 10.7202/1021102ar.

Filippi, Maryline et Pierre Triboulet (2006). « Typologie des comportements à innover des coopératives agricoles. Une étude en région Midi-Pyrénées ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 296, p. 20-35. DOI : 10.4000/economierurale.1873.

Flamant, Jean-Claude (2010). « Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20è siècle ». In : *Mission Agrobiosciences, ENSAT, Toulouse, France* 20.

Fleming, Aysha, Emma Jakku, Lilly Lim-Camacho, Bruce Taylor et Peter Thorburn (2018). « Is big data for big farming or for everyone ? Perceptions in the Australian grains industry ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 38.3, p. 1-10. DOI : 10.1007/s13593-018-0501-y.

Flichy, Patrice (2004). « L'individualisme connecté entre la technique numérique et la société ». In : *Réseaux* 2, p. 17-51.

Forest, Joëlle et al. (2014). « Petite histoire des modèles d'innovation ». In : *Principes d'économie de l'innovation*. Sous la dir. de Peter Lang, p. 514. DOI : hal-00972671.

Forget, Vanina, Bruno Hérault, Jean-Noël Depeyrot, Muriel Mahé, Estelle Midler, Mickaël Hugonnet et Raphaël Beaujeu (nov. 2019). *Actif'Agri : transformations des emplois et des activités en agriculture*. fr. Analyse 145. Paris : Centre d'études et de prospective, p. 8. URL : https://agriculture.gouv.fr/actifagri-transformations-des-emplois-et-des-activites-en-agriculture-analyse-ndeg145 (visité le 20/09/2021).

Francis, Charles, Alice Jones, Kent Crookston, Kyle Wittler et Sondra Goodman (1986). « Strip cropping corn and grain legumes : A review ». In : *American Journal of Alternative Agriculture* 1.4, p. 159-164.

Francis, Charles, Geir Lieblein, Stephen Gliessman, Tor A Breland, Nancy Creamer, R Harwood, Lennart Salomonsson, Juha Helenius, D Rickerl, R Salvador et al. (2003). « Agroecology : The ecology of food systems ». In : *Journal of sustainable agriculture* 22.3, p. 99-118. DOI : 10.1300/J064v22n03_10.

Frank, Alejandro Germán, Lucas Santos Dalenogare et Néstor Fabián Ayala (2019). « Industry 4.0 technologies : Implementation patterns in manufacturing companies ». In : *International Journal of Production Economics* 210, p. 15-26. DOI : 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

Fraser, Alistair (2019). « Land grab/data grab : precision agriculture and its new horizons ». In : *The Journal of Peasant Studies* 46.5, p. 893-912. DOI : 10.1080/03066150.2017.1415887.

– (2020). « The digital revolution, data curation, and the new dynamics of food sovereignty construction ». In : *The Journal of Peasant Studies* 47.1, p. 208-226. DOI : 10.1080/03066150.2019.1602522.

– (2021). « 'You can't eat data'? : Moving beyond the misconfigured innovations of smart farming ». In : *Journal of Rural Studies*. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.06.010.

Freeman, Christopher (1987). *Technology Policy and Economic Performance : Lessons from Japan*. Pinter Publishers. Great Britain.

Friedmann, Harriet et Philip McMichael (1989). « The rise and decline of national agricultures, 1870 to the present ». In : *Sociologia ruralis* 29.2, p. 93-117. DOI : https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.1989.tb00360.x.

Gaitán-Cremaschi, Daniel, Laurens Klerkx, Jessica Duncan, Jacques H Trienekens, Carlos Huenchuleo, Santiago Dogliotti, María E Contesse et Walter AH Rossing (2019). « Characterizing diversity of food systems in view of sustainability transitions. A review ». In : *Agronomy for Sustainable Development* 39.1, p. 1-22. DOI : 10.1007/s13593-018-0550-2.

Galliano, Danielle et Pascale Roux (2006). « Les inégalités spatiales dans l'usage des tic ». In : *Revue économique* 57.6, p. 1449-1475. DOI : 10.3917/reco.576.1449.

Gasselin, Pierre (2019). « Transformation of French Family Farming : from Diversity Study to Coexistence Analysis of Agricultural Models ». In : *The Natural Resource Economics Review* March 2019, p. 61-73. DOI : hal-02118112.

Gasselin, Pierre, Sylvie Lardon, Claire Cerdan, Salma Loudiyi et Denis Sautier (2021). *Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires : Un nouveau paradigme du développement territorial ?* Quae. ISBN : 9782759232420.

Geels, Frank W (2002). « Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes : a multi-level perspective and a case-study ». In : *Research policy* 31.8-9, p. 1257-1274. DOI : 10.1016/S0048-7333(02)00062-8.

– (2004). « From sectoral systems of innovation to socio-technical systems : Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory ». In : *Research policy* 33.6-7, p. 897-920. DOI : 10.1016/j.respol.2004.01.015.

Gerbaux, Françoise et Pierre Muller (1984). « La naissance du développement agricole en France ». In : *Economie rurale* 159.1, p. 17-22. DOI : 10.3406/ecoru.1984.3019.

Giles, David Boarder et Victoria Stead (2021). « Big Data won't feed the world : global agribusiness, digital imperialism, and the contested promises of a new Green Revolution ». In : *Dialectical Anthropology*, p. 1-17. DOI : 10.1007/s10624-021-09631-8.

Giotitsas, Chris (2019). « Open Source Agriculture : A Social Movement ? » In : *Open Source Agriculture*. Springer, p. 25-68. ISBN : 978-3-030-29341-3.

Gkisakis, Vasileios D et Konstantinos Damianakis (2020). « Digital innovations for the agroecological transition : A user innovation and Commons-based approach ». In : *J Sustainable Organic Agric Syst* 70.2, p. 1-4. DOI : 10.3220/LBF1595407375000.

Glaeser, Bernhard (2010). *The Green Revolution revisited : critique and alternatives*. T. 2. Taylor & Francis. ISBN : 978-1-136-89163-2.

Gliessman, Stephen R, Eric Engles et Robin Krieger (1998). *Agroecology : ecological processes in sustainable agriculture*. CRC press.

Glover, Dominic, James Sumberg, Giel Ton, Jens Andersson et Lone Badstue (2019). « Rethinking technological change in smallholder agriculture ». In : *Outlook on Agriculture* 48.3, p. 169-180. DOI : 10.1177/0030727019864978.

Godard, Olivier et Jean Michel Salles (1991). « Entre nature et société, les jeux de l'irréversibilité dans la construction économique et sociale du champ de l'environnement ». In : *Les figures de l'irréversibilité en économie*.

Gotor, Alicia Ayerdi, Elisa Marraccini, Christine Leclercq et Olivier Scheurer (2020). « Precision farming uses typology in arable crop-oriented farms in northern France ». In : *Precision Agriculture* 21.1, p. 131-146. DOI : 10.1007/s11119-019-09660-y.

Goulet, Frédéric et Dominique Vinck (2012). « L'innovation par retrait. Contribution à une sociologie du détachement ». In : *Revue française de sociologie* 53.2, p. 195-224. DOI : https://doi.org/10.3917/rfs.532.0195.

Granstrand, Ove (2000). « Corporate innovation systems : a comparative study of multi-technology corporations in Japan, Sweden and the USA ». In : *Chalmers University, Gothenburg*.

Gray, Mary L et Siddharth Suri (2019). *Ghost work : How to stop Silicon Valley from building a new global underclass*. Eamon Dolan Books. ISBN : 978-1-328-56624-9.

Gregoire, Alain (2002). « The mental health of farmers ». In : *Occupational Medicine* 52.8, p. 471-476. DOI : 10.1093/occmed/52.8.471.

Grenier, Gilbert (juin 2018). « De la révolution numérique à la révolution agronomique ». fr. In : *Agronomie, Environnement et Sociétés* 8.1, p. 23-32.

Griliches, Zvi (1979). « Issues in assessing the contribution of research and development to productivity growth ». In : *The bell journal of economics*, p. 92-116. DOI : 10.2307/3003321.

Groot-Kormelinck, Annemarie, Jos Bijman, Jacques Trienekens et Laurens Klerkx (2022). « Producer organizations as transition intermediaries ? Insights from organic and conventional vegetable systems in Uruguay ». In : *Agriculture and Human Values*, p. 1-24. DOI : 10.1007/s10460-022-10316-3.

Gruszka, Katarzyna et Madeleine Böhm (2020). « Out of sight, out of mind ?(In) visibility of/in platform-mediated work ». In : *New Media & Society*, p. 1-20. DOI : 10.1177/1461444820977209.

Gueslin, André (1988). « Crédit agricole et agriculture en France au XXe siècle ». In : *Économie rurale* 184.1, p. 107-115. DOI : 10.3406/ecoru.1988.3899.

Guichard, Laurence, François Dedieu, Marie-Hélène Jeuffroy, Jean Marc Meynard, Raymond Reau et Isabelle Savini (2017). « Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer ». In : *Cahiers Agricultures* 26.1, p. 1-12. DOI : 10.1051/cagri/2017004.

Gurstein, Michael (2007). « Effective use : A community informatics strategy beyond the Digital Divide (originally published in December 2003) ». In : *First Monday*. DOI : 10.5210/fm.v0i0.1798.

Haas, Peter M (1992). « Introduction : epistemic communities and international policy coordination ». In : *International organization* 46.1, p. 1-35. DOI : 10.1017/S0020818300001442.

Hall, Andy (2006). « Public-private sector partnerships in an agricultural system of innovation : concepts and challenges ». In : *International Journal of Technology Management & Sustainable Development* 5.1, p. 3-20. DOI : 10.1386/ijtm.5.1.3/1.

Hall, Andy, Lynn Mytelka et Banji Oyeyinka (2005). « Innovation systems : Implications for agricultural policy and practice ». In : *ILAC Brief*.

Hall, Peter et David Soskice (2001). *Varieties of capitalisms. The Institutional Foundations of Comparative Advantage*. Oxford University Press, p. 201.

Hansen, Björn Gunnar et Egil Petter Stræte (2020). « Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems ». In : *NJAS : Wageningen Journal of Life Sciences* 92.1, p. 1-13. DOI : 10.1016/j.njas.2020.100328.

Hayami, Yujiro, Vernon W Ruttan et al. (1971). *Agricultural development : an international perspective.* Baltimore, Md/London : The Johns Hopkins Press. ISBN : 0-8018-1259-3.

Heintz, Wilfried (1990). « Stratégie des organismes de collecte et qualité : le cas du blé ». In : *Économie rurale* 198.1, p. 39-39. DOI : 10.3406/ecoru.1990.4098.

Hekkert, Marko P, Matthijs J Janssen, Joeri H Wesseling et Simona O Negro (2020). « Mission-oriented innovation systems ». In : *Environmental Innovation and Societal Transitions* 34, p. 76-79. DOI : 10.1016/j.eist.2019.11.011.

Hekkert, Marko P, Roald AA Suurs, Simona O Negro, Stefan Kuhlmann et Ruud EHM Smits (2007). « Functions of innovation systems : A new approach for analysing technological change ». In : *Technological forecasting and social change* 74.4, p. 413-432. DOI : 10.1016/j.techfore.2006.03.002.

Hennessy, Thia, Doris Läpple et Brian Moran (2016). « The digital divide in farming : a problem of access or engagement ? » In : *Applied Economic Perspectives and Policy* 38.3, p. 474-491. DOI : 10.1093/aepp/ppw015.

Hervieu, Bertrand et François Purseigle (2009). « Pour une sociologie des mondes agricoles dans la globalisation ». In : *Études rurales* 183, p. 177-200. DOI : 10.4000/etudesrurales.8999.

– (2015). « The sociology of agricultural worlds : from a sociology of change to a sociology of coexistence ». In : *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement-Review of agricultural and environmental studies*. DOI : hal-01884926.

Higgins, Vaughan, Melanie Bryant, Andrea Howell et Jane Battersby (2017). « Ordering adoption : Materiality, knowledge and farmer engagement with precision agriculture technologies ». In : *Journal of Rural Studies* 55, p. 193-202. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2017.08.011.

Hill, Stuart B et Rod J MacRae (1996). « Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture ». In : *Journal of sustainable agriculture* 7.1, p. 81-87. DOI : 10.1300/J064v07n01_07.

HLPE-FAO (2019). « Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems that Enhance Food Security and Nutrition ». In : *High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security : Rome, Italy*, p. 163.

Horlings, Lummina G et Terry Marsden (2011). « Towards the real green revolution ? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world' ». In : *Global environmental change* 21.2, p. 441-452. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.004.

Hostiou, Nathalie, Clément Allain, Sophie Chauvat, Amélie Turlot, Christèle Pineau et Jocelyn Fagon (2014). « L'élevage de précision : quelles conséquences pour le travail des éleveurs ». In : *INRA Prod. Anim* 27.2, p. 113-122.

Hostiou, Nathalie, Jocelyn Fagon, Sophie Chauvat, Amélie Turlot, Florence Kling-Eveillard, Xavier Boivin et Clément Allain (2017). « Impact of precision livestock farming on work and human-animal interactions on dairy farms. A review ». In : *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement/-Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 21.4, p. 268-275.

Howells, Jeremy (2006). « Intermediation and the role of intermediaries in innovation ». In : *Research policy* 35.5, p. 715-728. DOI : 10.1016/j.respol.2006.03.005.

Huguet, Thibault (2017). « La société connectée : contribution aux analyses sociologiques des liens entre technique et société à travers l'exemple des outils médiatiques numériques ». Thèse de doct. Université Paul Valéry-Montpellier III. DOI : tel-01582952.

Huws, Ursula (1999). « Material world : The myth of the weightless economy ». In : *Socialist register* 35.

– (2014). *Labor in the global digital economy : The cybertariat comes of age*. NYU Press.

Huyghe, Christian (2014). « Les nouvelles ressources pour la formation sur les prairies et cultures fourragères ». In : *Fourrages* 219, p. 247-252. DOI : hal-02629864.

Iliopoulos, Constantine (2022). « Hétérogénéité dans les préférences des membres des coopératives agricoles : le rôle de la gouvernance ». In : *RECMA* 364.2, p. 144-155.

Ingram, Julie (2018). « Agricultural transition : Niche and regime knowledge systems' boundary dynamics ». In : *Environmental innovation and societal transitions* 26, p. 117-135.

Ingram, Julie et Damian Maye (2020). « What are the implications of digitalisation for agricultural knowledge ? » In : *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4, p. 66. DOI : 10.3389/fsufs.2020.00066.

Ingram, Julie, Damian Maye, Clive Bailye, Andrew Barnes, Christopher Bear, Matthew Bell, David Cutress, Lynfa Davies, Auvikki de Boon, Liz Dinnie et al. (2022). « What are the priority research questions for digital agriculture ? » In : *Land Use Policy* 114, p. 105962. DOI : 10.1016/j.landusepol.2021.105962.

INRAE (2020). *Partageons la science et l'innovation pour un avenir durable*. Rapp. tech. INRAE, p. 52.

Interbio Occitanie (2018). *L'observatoire régional de l'agriculture biologique d'Occitanie - Grandes cultures*. Rapp. tech. URL : https://www.interbio-occitanie.com/content/uploads/2019/10/fiche_filiere_gc_2018_vd.pdf.

Isaac, Henri et Marine Pouyat (nov. 2015). *Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique*. Rapp. tech. Paris : Renaissance Numérique, p. 106. URL : https://www.renaissancenumerique.org/system/attach_files/files/000/000/010/original/LB_AGRI_HD.pdf?1485335906.

Jakku, Emma, Bruce Taylor, Aysha Fleming, Claire Mason, Simon Fielke, Chris Sounness et PJ Thorburn (2019). « "If they don't tell us what they do with it, why would we trust them ?" Trust, transparency and benefit-sharing in Smart Farming ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100285. DOI : 10.1016/j.njas.2018.11.002.

Jakku, Emma, Bruce Taylor, Aysha Fleming, Claire Mason et PJ Thorburn (2016). « Big data, Trust and Collaboration : Exploring the socio-technical enabling conditions for big data in the grains industry ». In : *Brisbane, QLD : CSIRO* 34. DOI : 10.13140/RG.2.2.26854.22089.

Jakku, Emma et PJ Thorburn (2010). « A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems ». In : *Agricultural systems* 103.9, p. 675-682. DOI : 10.1016/j.agsy.2010.08.007.

Jas, Nathalie (2001). *Au carrefour de la chimie et de l'agriculture : les sciences agronomiques en France et en Allemagne, 1850-1914*. Editions des archives contemporaines (EAC). ISBN : 978-90-5709-016-5.

Jas, Nathalie et Soraya Boudia (2019). *Gouverner un monde toxique*. Editions Quae, p. 1-124. ISBN : 978-2-7592-2947-5.

Javelle, Aurélie et Frédérick Garcia (mars 2022). « Plantes et TIC : la médiatisation numérique du végétal permet-elle le développement de pratiques agroécologiques ? » In : Montpellier : Société Française d'Economie Rurale.

Jeanneaux, Philippe (2018). « Agriculture numérique : quelles conséquences sur l'autonomie de la décision des agriculteurs ? » In : *Agronomie, Environnement & Sociétés* 8.1, p. 13-22. DOI : hal-02065867.

Jeanneaux, Philippe et Hélène Blasquiet-Revol (2012). « La gestion des exploitations agricoles : un état des lieux de la recherche en France ». In : *Annales des Mines-Gérer et comprendre* 1, p. 29-40.

Joly, Pierre-Benoît (2010). *On the economics of techno-scientific promises*.

– (2015). *Le régime des promesses technoscientifique*.

– (2017). « Beyond the competitiveness framework ? Models of innovation revisited ». In : *Journal of Innovation Economics Management* 1, p. 79-96. DOI : 10.3917/jie.pr1.0005.

Kernecker, Maria, Andrea Knierim, Angelika Wurbs, Teresa Kraus et Friederike Borges (2020). « Experience versus expectation : Farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe ». In : *Precision Agriculture* 21.1, p. 34-50. DOI : 10.1007/s11119-019-09651-z.

Kinsella, Jim (2018). « Acknowledging hard to reach farmers : cases from Ireland ». In : *International Journal of Agricultural Extension*, p. 61-69.

Kirat, Thierry (1991). « Processus d'innovation et creation d'irréversibilités : essai sur les trajectoires technologiques (le cas du machinisme agricole) ». Thèse de doct. Lyon 2.

Kirsch, Alessandra, Jean-Christophe Kroll et Aurélie Trouvé (2017). « Aides directes et environnement : la politique agricole commune en question ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 359, p. 121-139.

Kitchin, Rob (2014). « Big Data, new epistemologies and paradigm shifts ». In : *Big data & society* 1.1, p. 2053951714528481. DOI : 10.1177/2053951714528481.

Kivimaa, Paula, Wouter Boon, Sampsa Hyysalo et Laurens Klerkx (2019). « Towards a typology of intermediaries in sustainability transitions : A systematic review and a research agenda ». In : *Research Policy* 48.4, p. 1062-1075. DOI : 10.1016/j.respol.2018.10.006.

Klerkx, Laurens, Noelle Aarts et Cees Leeuwis (2010). « Adaptive management in agricultural innovation systems : The interactions between innovation networks and their environment ». In : *Agricultural systems* 103.6, p. 390-400. DOI : 10.1016/j.agsy.2010.03.012.

Klerkx, Laurens et Stephanie Begemann (2020). « Supporting food systems transformation : The what, why, who, where and how of mission-oriented agricultural innovation systems ». In : *Agricultural systems* 184, p. 102901. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102901.

Klerkx, Laurens, Emma Jakku et Pierre Labarthe (2019). « A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0 : New contributions and a future research agenda ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100315. DOI : 10.1016/j.njas.2019.100315.

Klerkx, Laurens et Cees Leeuwis (2008). « Matching demand and supply in the agricultural knowledge infrastructure : Experiences with innovation intermediaries ». In : *Food policy* 33.3, p. 260-276. DOI : 10.1016/j.foodpol.2007.10.001.

– (2009). « Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels : Insights from the Dutch agricultural sector ». In : *Technological forecasting and social change* 76.6, p. 849-860. DOI : 10.1016/j.techfore.2008.10.001.

Klerkx, Laurens et David Rose (2020). « Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0 : How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways ? » In : *Global Food Security* 24, p. 100347. DOI : 10.1016/j.gfs.2019.100347.

Klerkx, Laurens, Barbara Van Mierlo et Cees Leeuwis (2012). « Evolution of systems approaches to agricultural innovation : concepts, analysis and interventions ». In : *Farming Systems Research into the 21st century : The new dynamic*, p. 457-483.

Kline, Stephen J et Nathan Rosenberg (1986). « An overview of innovation. The positive sum strategy : Harnessing technology for economic growth ». In : *The National Academy of Science, USA* 35, p. 36.

Knierim, A, K Boenning, Monica Caggiano, A Cristóvão, V Dirimanova, T Koehnen, Pierre Labarthe et K Prager (2015). « The AKIS concept and its relevance in selected EU member states ». In : *Outlook on AGRICULTURE* 44.1, p. 29-36. DOI : 10.5367/oa.2015.0194.

Knierim, A, Maria Kernecker, Klaus Erdle, Teresa Kraus, Friederike Borges et Angelika Wurbs (2019). « Smart farming technology innovations–Insights and reflections from the German Smart-AKIS hub ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100314. DOI : 10.1016/j.njas.2019.100314.

Knorr, Dietrich et Tom R Watkins (1984). « Alterations in food production ». In.

Konrad, Maria Theresia, Helle Ørsted Nielsen, Anders Branth Pedersen et Katarina Elofsson (2019). « Drivers of farmers' investments in nutrient abatement technologies in five Baltic Sea countries ». In : *Ecological economics* 159, p. 91-100. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2018.12.022.

Koschatzky, Knut, Elisabeth Baier, Henning Kroll et Thomas Stahlecker (2009). *The spatial multidimensionality of sectoral innovation : the case of information and communication technologies*. Rapp. tech. Arbeitspapiere Unternehmen und Region.

Koutsos, Thomas et Georgios Menexes (2017). « Benefits from the adoption of precision agriculture technologies. A systematic review ». In : *18th Panhellenic Forestry Congress & International Workshop*, p. 1-12.

Kukk, Piret, Ellen HM Moors et Marko P Hekkert (2016). « Institutional power play in innovation systems : The case of Herceptin® ». In : *Research Policy* 45.8, p. 1558-1569. DOI : 10.1016/j.respol.2016.01.016.

Labarthe, Pierre (2006). « La privatisation du conseil agricole en question. Evolutions institutionnelles et performances des services de conseil dans trois pays européens (Allemagne, France, Pays-Bas) ». Thèse de doct. Université Paris Est Créteil Val de Marne (Paris 12).

– (2009). « Extension services and multifunctional agriculture. Lessons learnt from the French and Dutch contexts and approaches ». In : *Journal of environmental management* 90, S193-S202. DOI : 10.1016/j.jenvman.2008.11.021.

– (2010). « Services immatériels et verrouillage technologique. Le cas du conseil technique aux agriculteurs ». In : *Économies et sociétés* 44.2, p. 173-96.

– (2018). « Dynamiques intersectorielles des services de conseil et changement technique en agriculture ». Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches. Université de Lille - Ecole Doctorale SESAM.

Labarthe, Pierre, François Coléno, Jérôme Enjalbert, Aline Fugeray-Scarbel, Mourad Hannachi et Stéphane Lemarié (2021). « Exploration, exploitation and environmental innovation in agriculture. The case of variety mixture in France and Denmark ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 172, p. 121028. DOI : 10.1016/j.techfore.2021.121028.

Labarthe, Pierre et Catherine Laurent (2013). « Privatization of agricultural extension services in the EU : Towards a lack of adequate knowledge for small-scale farms ? » In : *Food policy* 38, p. 240-252. DOI : 10.1016/j.foodpol.2012.10.005.

Labarthe, Pierre, Katrin Prager et al. (2021). *Strengthening farm advice for innovation and Sustainability*. Policy Recommendations Report 5.7. Agrilink.

Labrousse, Agnès (2006). « Éléments pour un institutionnalisme méthodologique : autonomie, variation d'échelle, réflexivité et abduction ». In : *Économie et institutions* 8, p. 5-53. DOI : 10.4000/ei.1107.

Lacoste, Myrtille, Simon Cook, Matthew McNee, Danielle Gale, Julie Ingram, Véronique Bellon-Maurel, Tom MacMillan, Roger Sylvester-Bradley, Daniel Kindred, Rob Bramley et al. (2021). « On-Farm Experimentation to transform global agriculture ». In : *Nature Food*. DOI : 10.1038/s43016-021-00424-4.

LaFermeDigitale (2021). *La Ferme Digitale*. fr-FR. URL : https://www.lafermedigitale.fr/l-association/ (visité le 13/07/2021).

Lajoie-O'Malley, Alana, Kelly Bronson, Simone van der Burg et Laurens Klerkx (2020). « The future (s) of digital agriculture and sustainable food systems : An analysis of high-level policy documents ». In : *Ecosystem Services* 45, p. 101183. DOI : 10.1016/j.ecoser.2020.101183.

Lamine, Claire (2011). « Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM ». In : *Journal of rural studies* 27.2, p. 209-219. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2011.02.001.

– (2012). « «Changer de système» : une analyse des transitions vers l'agriculture biologique à l'échelle des systèmes agri-alimentaires territoriaux ». In : *Terrains travaux* 1, p. 139-156. DOI : 10.3917/tt.020.0139.

Lamine, Claire, Jean Marc Meynard, Nathalie Perrot et Stéphane Bellon (2009). « Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques : les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection Intégrée ». In : *Innovations agronomiques* 4, p. 483-493. DOI : hal-02667262.

Lange, Steffen, Johanna Pohl et Tilman Santarius (2020). « Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand ? » In : *Ecological Economics* 176, p. 106760. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2020.106760.

Laperche, Blandine et Céline Merlin-Brogniart (2016). « Écologie industrielle et développement territorial durable le rôle des services ». In : *Marché et organisations* 1, p. 87-118.

Laperche, Blandine et Dimitri Uzunidis (2011). « Crise, innovation et renouveau des territoires : dépendance de sentier et trajectoires d'évolution ». In : *Innovations* 2, p. 159-182. DOI : 10.3917/inno.035.0159.

Larrère, Raphaël (2002). *Agriculture : artificialisation ou manipulation de la nature ?*

Larrère, Raphaël et Dominique Vermersch (2000). « Agriculture et environnement. L'économie rurale revisitée ». In : *Economie rurale* 255.1, p. 104-113. DOI : 10.3406/ecoru.2000.5162.

Latour, Bruno (1995). « Moderniser ou écologiser. A la recherche de la septième cité ». In : *Écologie & politique : sciences, culture, société* 13, p. 5-27. DOI : hal-01719379.

Laurent, Catherine, Marielle Berriet-Solliec, Pierre Labarthe et Aurélie Trouvé (2012). « Evidence-based policy : de la médecine aux politiques agricoles ? » In : *Notes et études socio-économiques* 36, p. 79-101.

Laurent, Catherine, Françoise Maxime, Armelle Mazé et Muriel Tichit (2003). « Multifonctionnalité de l'agriculture et modèles de l'exploitation agricole ». In : *Économie rurale* 273.1, p. 134-152. DOI : 10.3406/ecoru.2003.5395.

Laurent, Catherine, Geneviève Nguyen, Pierre Triboulet, Matthieu Ansaloni, Noemie Bechtet et Pierre Labarthe (2021). « Institutional continuity and hidden changes in farm advisory services provision : evidence from farmers' microAKIS observations in France ». In : *The Journal of Agricultural Education and Extension*, p. 1-24. DOI : 10.1080/1389224X.2021.2008996.

Laurent, Catherine et Jacques Rémy (2000). « L'exploitation agricole en perspective ». In : *Le courrier de l'environnement de l'INRA* 41, p. 5-22.

Lawson, Tony (1989). « Abstraction, tendencies and stylised facts : a realist approach to economic analysis ». In : *Cambridge journal of Economics* 13.1, p. 59-78.

Lê, Sébastien, Julie Josse et François Husson (2008). « FactoMineR : an R package for multivariate analysis ». In : *Journal of statistical software* 25, p. 1-18. DOI : 10.18637/jss.v025.i01.

Le Velly, Ronan et Ivan Dufeu (2016). « Alternative food networks as "market agencements" : Exploring their multiple hybridities ». In : *Journal of rural studies* 43, p. 173-182. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2015.11.015.

Lebrun, Manon (2020). « Agriculture de précision et transition agroécologique des exploitations : regards croisés des acteurs du monde agricole ». Mémoire de fin d'études en Agronomie. Agrocampus Ouest Rennes.

Lee, Keun et Franco Malerba (2017). « Catch-up cycles and changes in industrial leadership : Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems ». In : *Research Policy* 46.2, p. 338-351. DOI : 10.1016/j.respol.2016.09.006.

Lele, Uma et Sambuddha Goswami (2017). « The fourth industrial revolution, agricultural and rural innovation, and implications for public policy and investments : a case of India ». In : *Agricultural Economics* 48.S1, p. 87-100. DOI : 10.1111/agec.12388.

Lenain, Roland, Julie Peyrache, Alain Savary et Gaëtan Severac (sept. 2021). *Agricultural robotics : part of the new deal ? FIRA 2020 conclusions*. Quae. ISBN : 978-2-7592-3382-3. DOI : 10.35690/978-2-7592-3382-3. (Visité le 28/09/2021).

Leveau, Lola, Aurélien Bénel, Jean-Pierre Cahier, François Pinet, Pascal Salembier, Vincent Soulignac et Jacques-Eric Bergez (2019). « Information and communication technology (ICT) and the agroecological transition ». In : *Agroecological transitions : from theory to practice in local participatory design*. Springer, Cham, p. 263-287.

Lezoche, Mario, Jorge E Hernandez, Maria del Mar Eva Alemany Díaz, Hervé Panetto et Janusz Kacprzyk (2020). « Agri-food 4.0 : A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture ». In : *Computers in Industry* 117, p. 103187. DOI : 10.1016/j.compind.2020.103187.

Lioutas, Evagelos D et Chrysanthi Charatsari (2020). « Big data in agriculture : Does the new oil lead to sustainability ? » In : *Geoforum* 109, p. 1-3. DOI : 10.1016/j.geoforum.2019.12.019.

Lioutas, Evagelos D, Chrysanthi Charatsari et Marcello De Rosa (2021). « Digitalization of agriculture : A way to solve the food problem or a trolley dilemma ? » In : *Technology in Society* 67, p. 101744. DOI : 10.1016/j.techsoc.2021.101744.

Lioutas, Evagelos D, Chrysanthi Charatsari, Giuseppe La Rocca et Marcello De Rosa (2019). « Key questions on the use of big data in farming : An activity theory approach ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100297. DOI : 10.1016/j.njas.2019.04.003.

Lowenberg-DeBoer, JM et Bruce Erickson (2019). « Setting the record straight on precision agriculture adoption ». In : *Agronomy Journal* 111, p. 1552-1569. DOI : 10.2134/agronj2018.12.0779.

Lucas, Véronique (2021). « A "silent" agroecology : the significance of unrecognized sociotechnical changes made by French farmers ». In : *Review of Agricultural, Food and Environmental Studies* 102.1, p. 1-23. DOI : 10.1007/s41130-021-00140-4.

Lucas, Véronique et Pierre Gasselin (2018). « Gagner en autonomie grâce à la Cuma. Expériences d'éleveurs laitiers français à l'ère de la dérégulation et de l'agroécologie ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 364, p. 73-89. DOI : 10.4000/economierurale.5554.

Lundvall, Bengt-Åke, Björn Johnson, Esben Sloth Andersen et Bent Dalum (2002). « National systems of production, innovation and competence building ». In : *Research policy* 31.2, p. 213-231. DOI : 10.1016/S0048-7333(01)00137-8.

Lundvall, Bengt-Åke et Cecilia Rikap (2022). « China's catching-up in artificial intelligence seen as a co-evolution of corporate and national innovation systems ». In : *Research Policy* 51.1, p. 104395. DOI : 10.1016/j.respol.2021.104395.

Lupton, Deborah (2014). *Beyond techno-utopia : Critical approaches to digital health technologies*. DOI : 10.3390/soc4040706.

Maassen, Anne (2012). « Heterogeneity of lock-in and the role of strategic technological interventions in urban infrastructural transformations ». In : *European Planning Studies* 20.3, p. 441-460. DOI : 10.1080/09654313.2012.651807.

Mabsout, Ramzi (2015). « Abduction and economics : the contributions of Charles Peirce and Herbert Simon ». In : *Journal of Economic Methodology* 22.4, p. 491-516. DOI : 10.1080/1350178X.2015.1024876.

Macaine, Isabelle (2020). *Le rôle des coopératives dans la transition agroécologique et numérique en viticulture.* Mémoire de Master 2 Gestion des Territoires et Développement Local. Toulouse/Albi : Université Champolion.

Madsen, Anders Koed, Mikkel Flyverbom, Martin Hilbert et Evelyn Ruppert (2016). « Big data : issues for an international political sociology of data practices ». In : *International Political Sociology* 10.3, p. 275-296. DOI : 10.1093/ips/olw010.

Magnin, Léo (2019). « La politique agricole commune et les données retardataires ». In : *Techniques Culture* 2, p. 130-143. DOI : https://doi.org/10.4000/tc.12329.

Magrini, Marie-Benoît (2018). « Economie de l'innovation et des transitions : analyser et accompagner. Comprendre les processus sociotechniques de l'innovation et des transitions pour accompagner la transition agroécolo-

gique et nutritionnelle ». Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches. Toulouse : Université de Toulouse - Ecole Doctorale TESC.

Magrini, Marie-Benoît, Marc Anton, Célia Cholez, Guenaelle Corre-Hellou, Gérard Duc, Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marc Meynard, Elise Pelzer, Anne-Sophie Voisin et Stéphane Walrand (2016). « Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits ? Analyzing lock-in in the French agrifood system ». In : *Ecological Economics* 126, p. 152-162. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2016.03.024.

Magrini, Marie-Benoît, Pierre Triboulet et Laurent Bedoussac (2013). « Pratiques agricoles innovantes et logistique des coopératives agricoles. Une étude ex-ante sur l'acceptabilité de cultures associées blé dur-légumineuses ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 338, p. 25-45. DOI : 10.4000/economierurale.4145.

Mahoney, James et Kathleen Thelen (2009). « A Theory of Gradual Institutional Change ». en. In : *Explaining Institutional Change*. Sous la dir. de James Mahoney et Kathleen Thelen. Cambridge University Press. ISBN : 978-0-511-80641-4.

Malerba, Franco (2002). « Sectoral systems of innovation and production ». In : *Research policy* 31.2, p. 247-264. DOI : 10.1016/S0048-7333(01)00139-1.

– (2004). *Sectoral systems of innovation : concepts, issues and analyses of six major sectors in Europe*. Cambridge University Press. ISBN : 978-1-139-45416-2.

Markard, Jochen et Bernhard Truffer (2008). « Technological innovation systems and the multi-level perspective : Towards an integrated framework ». In : *Research policy* 37.4, p. 596-615. DOI : 10.1016/j.respol.2008.01.004.

Marquet, Clément (2019). « Binaire béton : Quand les infrastructures numériques aménagent la ville ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay (ComUE).

Martin, Arnaud (avr. 2019). *L'agriculture veut combler son retard digital*. fr. Section : Dossiers. URL : https://www.lecho.be/dossier/pme-wallonie/l-agriculture-veut-combler-son-retard-digital/10110760.html (visité le 20/09/2021).

Martin, Ben (2012). « The evolution of science policy and innovation studies ». In : *Research policy* 41.7, p. 1219-1239. DOI : 10.1016/j.respol.2012.03.012.

Martin, Théo, Pierre Gasselin, Nathalie Hostiou, Gilles Feron, Lucette Laurens et François Purseigle (2021). « Robots and Transformations of Work on Farms : A Systematic Review ». In : *The 2nd International Symposium on Work in Agriculture*.

Mayer-Schönberger, Viktor et Kenneth Cukier (2013). *Big data : A revolution that will transform how we live, work, and think*. Houghton Mifflin Harcourt.

Mazaud, Caroline (2017). « «À chacun son métier», les agriculteurs face à l'offre numérique ». In : *Sociologies pratiques* 1, p. 39-47. DOI : 10.3917/sopr.034.0039.

Mazoyer, Marcel et Laurence Roudart (2017). *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Média Diffusion. ISBN : 978-2-02-136058-5.

Mazzucato, Mariana (2011). « The entrepreneurial state ». In : *Soundings* 49.49, p. 131-142. DOI : 10.3898/136266211798411183.

Ménard, Claude (2007). « Cooperatives : hierarchies or hybrids ? » In : *Vertical markets and cooperative hierarchies*. Springer, p. 1-18. ISBN : 978-1-4020-5543-0.

Mesnel, Blandine (2017). « Les agriculteurs face à la paperasse ». In : *Gouvernement et action publique* 6.1, p. 33-60. DOI : 10.3917/gap.171.0033.

– (2018). « Socialiser à la biodiversité à travers la néo-libéralisation de la PAC ?. Les limites bureaucratiques de la conditionnalité et du paiement vert du point de vue des agriculteurs ». In : *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* 9.3. DOI : 10.4000/developpementdurable.12715.

Meyer, Dorothée et Philippe Jeanneaux (2012). *Institutionnalisation de l'agriculture biologique française*. Rapp. tech. 2012-04. Services environnementaux et usages de l'espace rural, p. 55.

Meynard, Jean-Marc, Marie-Hélène Jeuffroy, Marianne Le Bail, Amélie Lefèvre, Marie-Benoît Magrini et Camille Michon (2017). « Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems ». In : *Agricultural systems* 157, p. 330-339. DOI : 10.1016/j.agsy.2016.08.002.

Micelotta, Evelyn, Michael Lounsbury et Royston Greenwood (2017). « Pathways of institutional change : An integrative review and research agenda ». In : *Journal of Management* 43.6, p. 1885-1910. DOI : 10.1177/0149206317699522.

Michels, Marius, Wilm Fecke, Jan-Henning Feil, Oliver Musshoff, Johanna Pigisch et Saskia Krone (2020). « Smartphone adoption and use in agriculture : empirical evidence from Germany ». In : *Precision Agriculture* 21.2, p. 403-425. DOI : 10.1007/s11119-019-09675-5.

Microsoft (sept. 2021). *Nourrir 10 milliards d'individus en 2050 : le grand pari de l'IoT agricole*. fr-FR. URL : https://experiences.microsoft.fr/articles/iot/nourrir-10-milliards-dindividu-en-2050-le-grand-pari-de-liot-agricole/ (visité le 07/09/2021).

Migliorini, Paola, Paolo Bàrberi, Stéphane Bellon, Tommaso Gaifami, Vassilis D Gkisakis, Alain Peeters et Alexander Wezel (2020). « Controversial topics in agroecology : A European perspective ». In : *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 47.3, p. 159-173. DOI : 10.7764/ijanr.v47i3.2265.

Miles, Matthew B et A Michael Huberman (1994). *Qualitative data analysis : An expanded sourcebook*. sage. ISBN : 978-0-8039-5540-0.

Millerand, Florence (2008). « Usages des NTIC : les approches de la diffusion, de l'innovation et de l'appropriation (1ère partie) ». In : *Commposite* 2.1, p. 1-19.

Ministère de l'agriculture (mars 2022). *La French AgriTech à l'honneur au SIA : De nouveaux engagements et annonces pour le numérique et l'innovation dans le monde agricole*. Rapp. tech. Paris.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2016a). *alim'agri : La révolution numérique | Alim'agri*. URL : http://agriculture.gouv.fr/alimagri-la-revolution-numerique (visité le 09/11/2018).

– (déc. 2016b). *Infographie - Les chiffres clés de l'agriculture connectée*. fr. URL : https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-chiffres-cles-de-lagriculture-connectee (visité le 28/07/2021).

– (2018a). *Grand plan d'investissement : la gamme de financements du volet agricole*. fr. URL : https://agriculture.gouv.fr/gpi (visité le 22/09/2021).

– (2018b). *Une délégation ministérielle pour développer le numérique et la donnée*. fr. URL : https://agriculture.gouv.fr/une-delegation-ministerielle-pour-developper-le-numerique-et-la-donnee (visité le 11/08/2021).

Ministère de la transition écologique et Ministère de l'économie (fév. 2021). *Numérique & Environnement - Faisons converger les transitions*. Feuille de route. Paris, p. 34. URL : https://www.gouvernement.fr/numerique-et-environnement-la-feuille-de-route-du-gouvernement.

Montalban, Matthieu, Vincent Frigant et Bernard Jullien (2019). « Platform economy as a new form of capitalism : a Régulationist research programme ». In : *Cambridge Journal of Economics* 43.4, p. 805-824. DOI : 10.1093/cje/bez017.

Moreiro, Leslie (2017). « Appropriation de technologies et développement durable : l'exemple de la viticulture de précision ». In : *Innovations* 3, p. 97-122. DOI : 10.3917/inno.054.0097.

Morel, Kevin, Eva Revoyron, Magali San Cristobal et Philippe Baret (2020). « Innovating within or outside dominant food systems ? Different challenges for contrasting crop diversification strategies in Europe ». In : *PloS one* 15.3, e0229910. DOI : 10.1371/journal.pone.0229910.

Morgan, Kevin, Terry Marsden et Jonathan Murdoch (2008). *Worlds of food : Place, power, and provenance in the food chain*. Oxford University Press on Demand. ISBN : 978-0-19-954228-4.

Morgan, Kevin et Jonathan Murdoch (2000). « Organic vs. conventional agriculture : knowledge, power and innovation in the food chain ». In : *Geoforum* 31.2, p. 159-173.

Mormont, Marc (2013). « Écologisation : entre sciences, conventions et pratiques ». In : *Natures Sciences Sociétés* 21.2, p. 159-160. DOI : 10.1051/nss/2013102.

Moschitz, Heidrun et Matthias Stolze (2018). « How can we make sense of smart technologies for sustainable agriculture ?-A discussion paper ». In : *13th European IFSA Symposium. Book of Abstracts*.

Muller, Adrian, Christian Schader, Nadia El-Hage Scialabba, Judith Brüggemann, Anne Isensee, Karl-Heinz Erb, Pete Smith, Peter Klocke, Florian Leiber, Matthias Stolze et al. (2017). « Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture ». In : *Nature communications* 8.1, p. 1-13. DOI : 10.1038/s41467-017-01410-w.

Mundler, Patrick, Pierre Labarthe et Catherine Laurent (2006). « Les disparités d'accès au conseil. Le cas de la région Rhône-Alpes ». In : *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires* 291, p. 26-41. DOI : 10.4000/economierurale.590.

Mzoughi, Naoufel et Claude Napoléone (2013). « Introduction. L'écologisation, une voie pour reconditionner les modèles agricoles et dépasser leur simple évolution incrémentale ». In : *Natures Sciences Sociétés* 21.2, p. 161-165. DOI : 10.1051/nss/2013092.

Nelson, Richard et Katherine Nelson (2002). « Technology, institutions, and innovation systems ». In : *Research policy* 31.2, p. 265-272. DOI : 10.1016/S0048-7333(01)00140-8.

Nelson, Richard et Sidney G Winter (1982). *An evolutionary theory of economic change*. Belknap Press/Harvard University Press.

Newton, Joanna E, Ruth Nettle et Jennie E Pryce (2020). « Farming smarter with big data : Insights from the case of Australia's national dairy herd milk recording scheme ». In : *Agricultural Systems* 181, p. 102811. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102811.

Nguyen, Geneviève, Julien Brailly et François Purseigle (jan. 2020). « Strategic outsourcing and precision agriculture : towards a silent reorganization of agricultural production in France ? » en. In : *AgEcon Search*. San Diego. DOI : 10.22004/ag.econ.296670.

Nguyen, Geneviève et François Purseigle (2012). « Les exploitations agricoles à l'épreuve de la firme. L'exemple de la Camargue ». In : *Études rurales* 190, p. 99-118. DOI : 10.4000/etudesrurales.9695.

North, Douglass C (1991). « Institutions ». In : *Journal of economic perspectives* 5.1, p. 97-112. DOI : 10.1257/jep.5.1.97.

Observatoire de l'agriculture numérique (2022). *Observatoire des Usages de l'agriculture numérique – Une action soutenue par la Chaire AgroTIC et l'Institut Convergences #DigitAg*. URL : https://agrotic.org/observatoire/ (visité le 14/02/2020).

OECD (1997). *Principes directeurs proposés pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation technologique : Manuel d'Oslo*. en. Paris : Organisation for Economic Co-operation et Development. URL : https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/principes-directeurs-proposes-pour-le-recueil-et-l-interpretation-des-donnees-sur-l-innovation-technologique_9789264292260-fr (visité le 01/02/2022).

Ollivier, Guillaume et Stéphane Bellon (2013). « Dynamiques paradigmatiques des agricultures écologisées dans les communautés scientifiques internationales ». In : *Natures Sciences Sociétés* 21.2, p. 166-181. DOI : 10.1051/nss/2013093.

Ollivier, Guillaume, Danièle Magda, Armelle Mazé, Gaël Plumecocq et Claire Lamine (2018). « Agroecological transitions : What can sustainability transition frameworks teach us ? An ontological and empirical analysis ». In : *Ecology and Society* 23.2, 18-p. DOI : 10.5751/ES-09952-230205.

Ortmann, Gerald F et Robert P King (2007). « Agricultural cooperatives I : History, theory and problems ». In : *Agrekon* 46.1, p. 40-68. DOI : 10.1080/03031853.2007.9523760.

Oui, Jeanne (2021a). « Commodifying a "Good" Weather Data : Commercial Meteorology, Low-cost Stations, and the Global Scientific Infrastructure ». In : *Science, Technology, & Human Values* 47, p. 29-52. DOI : 10.1177/0162243921995889.

– (2021b). « La précision au secours des pollutions : des technologies numériques pour écologiser le productivisme agricole ». Thèse de doct. Paris, EHESS. URL : http://www.theses.fr/s201097.

Pavitt, Keith (1984). « Sectoral patterns of technical change : towards a taxonomy and a theory ». In : *Research policy* 13.6, p. 343-373. DOI : 10.1016/0048-7333(84)90018-0.

Pearson, Simon, David May, Georgios Leontidis, Mark Swainson, Steve Brewer, Luc Bidaut, Jeremy G Frey, Gerard Parr, Roger Maull et Andrea Zisman (2019). « Are Distributed Ledger Technologies the panacea for food traceability ? » In : *Global food security* 20, p. 145-149. DOI : 10.1016/j.gfs.2019.02.002.

Peirce, Charles Sanders (1974). *Collected papers of charles sanders peirce*. T. 5. Harvard University Press.

Perez, Carlota (1983). « Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems ». In : *Futures* 15.5, p. 357-375. DOI : 10.1016/0016-3287(83)90050-2.

Perez, Carlota (2010). « Technological revolutions and techno-economic paradigms ». In : *Cambridge journal of economics* 34.1, p. 185-202. DOI : 10.1093/cje/bep051.

Phillips, Tom, Laurens Klerkx, Marie McEntee et al. (2018). « An investigation of social media's roles in knowledge exchange by farmers ». In : *Proceedings of the European IFSA Symposium, Chania, Greece*, p. 1-5.

PIA4 (nov. 2021). *Programme d'investissements d'avenir 4 - Deux stratégies d'accélération au service de la 3e révolution agricole et de l'alimentation santé*. Rapp. tech.

Pierson, Paul (2000). « Increasing returns, path dependence, and the study of politics ». In : *American political science review* 94.2, p. 251-267. DOI : 10.2307/2586011.

Piet, Laurent et Bruno Hérault (2021). « Qu'est-ce que le «revenu agricole», comment en analyser les déterminants et que dit-il de la position sociale des agriculteurs ? Éléments de réponse à partir de travaux de recherche récents ». In : *Economie rurale* 378.4, p. 9-18.

Pigford, Ashlee-Ann E, Gordon M Hickey et Laurens Klerkx (2018). « Beyond agricultural innovation systems ? Exploring an agricultural innovation ecosystems approach for niche design and development in sustainability transitions ». In : *Agricultural systems* 164, p. 116-121. DOI : 10.1016/j.agsy.2018.04.007.

Pillaud, Hervé (2015). *Agronumericus : Internet est dans le pré*. Editions France Agricole. ISBN : 978-2-85557-415-8.

Piot-Lepetit, Isabelle (2019). « Quel devenir pour les start-ups proposant des services numériques dans une vision globale ? Exemples de fusions/acquisitions dans le secteur des intrants et machines agricoles ». In : *Numérique et intégration des agriculteurs dans les chaînes de valeur : Existant et devenir en amont et à l'aval*. DigitAg.

Piriou, Solenne (2002). « L'institutionnalisation de l'agriculture biologique (1980-2000) ». Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. DOI : tel-00910272.

Pitron, Guillaume (2018). *La guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique*. Éditions Les liens qui libèrent.

Plein champ (avr. 2022). « Top départ pour la 3ème révolution agricole ». In : URL : https://www.pleinchamp.com/actualite/top-depart-pour-la-3eme-revolution-agricole (visité le 22/04/2022).

Plumecocq, Gaël, Thomas Debril, Michel Duru, Marie-Benoît Magrini, Jean Pierre Sarthou et Olivier Therond (2018). « The plurality of values in sustainable agriculture models ». In : *Ecology and Society* 23.1. DOI : 10.2307/26799066.

Plumecocq, Gaël, Jean-Pierre Del Corso et Charilaos Kephaliacos (2015). « Chapitre 2. Quel rôle pour les coopératives dans la mise en œuvre de mesures agroenvironnementales ? » In : *Conseil privé en agriculture*. Éducagri éditions, p. 31-51.

Potier, Nicolas (2020). *Transition écologique : vers un levier numérique ?* fr-FR. https://www.tactis.fr/transition-ecologique/. Accessed : 2021-09-23. URL : https://www.tactis.fr/transition-ecologique/ (visité le 23/09/2021).

Prause, Louisa (2021). « Digital Agriculture and Labor : A Few Challenges for Social Sustainability ». In : *Sustainability* 13.11, p. 5980. DOI : 10.3390/su13115980.

Prause, Louisa, Sarah Hackfort et Margit Lindgren (2020). « Digitalization and the third food regime ». In : *Agriculture and human values*, p. 1-15. DOI : 10.1007/s10460-020-10161-2.

Regan, Áine (2019). « 'Smart farming'in Ireland : A risk perception study with key governance actors ». In : *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 90, p. 100292. DOI : 10.1016/j.njas.2019.02.003.

Reinert, Magalie (jan. 2022). « L'agriculture numérique ou la fin des paysans ». fr. In : *Reporterre, le quotidien de l'écologie*.

Rémy, Jacques (1987). « La crise de professionnalisation en agriculture : les enjeux de la lutte pour le contrôle du titre d'agriculteur ». In : *Sociologie du travail*, p. 415-441.

Rénier, Louis, Aurélie Cardona, Frédéric Goulet et Guillaume Ollivier (2022). « La proximité à distance ». In : *Reseaux* 231.1, p. 225-257.

Réseau Action Climat (2020). *L'agriculture de précision : un modèle aux antipodes de la transition écologique et sociale*. Rapp. tech. Réseau Action Climat France, p. 5. URL : https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2020/09/notes-rac-agriculture-de-precision.pdf.

Réseau Rural Français (mars 2018). *L'impact des usages du numérique sur le développement rural : constats et questionnements*. Etude thématique. FEADER, p. 15.

Richardson, Lizzie et David Bissell (2019). « Geographies of digital skill ». In : *Geoforum* 99, p. 278-286. DOI : 10.1016/j.geoforum.2017.09.014.

Rijswijk, Kelly, Laurens Klerkx et James A Turner (2019). « Digitalisation in the New Zealand Agricultural Knowledge and Innovation System : Initial understandings and emerging organisational responses to digital agriculture ». In : *NJAS-Wageningen journal of life sciences* 90, p. 100313. DOI : 10.1016/j.njas.2019.100313.

Rikap, Cecilia (2021). *Capitalism, power and innovation : Intellectual monopoly capitalism uncovered*. Routledge. ISBN : 978-0-367-35763-4.

Rikap, Cecilia et Bengt-Åke Lundvall (2020). « Big tech, knowledge predation and the implications for development ». In : *Innovation and Development*, p. 1-28. DOI : 10.1080/2157930X.2020.1855825.

Ringsberg, Henrik (2014). « Perspectives on food traceability : a systematic literature review ». In : *Supply Chain Management : An International Journal*. DOI : 10.1108/SCM-01-2014-0026.

Rip, Arie, René Kemp et al. (1998). « Technological change ». In : *Human choice and climate change* 2.2, p. 327-399.

Rogers, Everett M (2010). *Diffusion of innovations*. Simon et Schuster. ISBN : 978-1-4516-0247-0.

Rolandi, Silvia, Gianluca Brunori, Manlio Bacco et Ivano Scotti (2021). « The digitalization of agriculture and rural areas : Towards a taxonomy of the impacts ». In : *Sustainability* 13.9, p. 5172. DOI : 10.3390/su13095172.

Rose, David, Carol Morris, Matt Lobley, Michael Winter, William J Sutherland et Lynn V Dicks (2018). « Exploring the spatialities of technological and user re-scripting : the case of decision support tools in UK agriculture ». In : *Geoforum* 89, p. 11-18. DOI : 10.1016/j.geoforum.2017.12.006.

Rose, David, Rebecca Wheeler, Michael Winter, Matt Lobley et Charlotte-Anne Chivers (2021). « Agriculture 4.0 : Making it work for people, production, and the planet ». In : *Land Use Policy* 100, p. 104933. DOI : 10.1016/j.landusepol.2020.104933.

Rotz, Sarah, Emily Duncan, Matthew Small, Janos Botschner, Rozita Dara, Ian Mosby, Mark Reed et Evan DG Fraser (2019). « The politics of digital agricultural technologies : a preliminary review ». In : *Sociologia Ruralis* 59.2, p. 203-229. DOI : 10.1111/soru.12233.

Rotz, Sarah, Evan Gravely, Ian Mosby, Emily Duncan, Elizabeth Finnis, Mervyn Horgan, Joseph LeBlanc, Ralph Martin, Hannah Tait Neufeld, Andrew Nixon et al. (2019). « Automated pastures and the digital divide : How agricultural technologies are shaping labour and rural communities ». In : *Journal of Rural Studies* 68, p. 112-122. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2019.01.023.

Ryan, Mark (2020). « Agricultural big data analytics and the ethics of power ». In : *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 33.1, p. 49-69. DOI : 10.1007/s10806-019-09812-0.

Saïsset, Louis-Antoine (2021). *Tensions of agricultural co-op democratic governance. A case study in south of France*. Post-Print. HAL.

Salançon, André (2009). « Innovation informationnelle et changements organisationnels : l'exemple de la traçabilité agroalimentaire informatisée. » In : *Études de communication. langages, information, médiations* 33, p. 153-169. DOI : 10.4000/edc.1118.

Scherer, Frederic M (1983). « The propensity to patent ». In : *international Journal of industrial organization* 1.1, p. 107-128. DOI : 10.1016/0167-7187(83)90026-7.

Schimmelpfennig, David (2016). *Farm profits and adoption of precision agriculture*. Rapp. tech. DOI : 10.22004/AG.ECON.249773.

Schmookler, Jacob (1966). *Invention and economic growth*. Harvard University Press. ISBN : 9780674432833.

Schnebelin, Éléonore (2021). « Which digital uses for which ecologisation of agriculture ? The example of cereal farms in South-West France ». In : *European Association for Evolutionary Political Economy (EAEPE), 33rd conference*.

– (2022). « Linking the diversity of ecologisation models to farmers' digital use profiles ». In : *Ecological Economics* 196, p. 1-11. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2022.107422.

Schnebelin, Éléonore, Pierre Labarthe et Jean-Marc Touzard (2021). « How digitalisation interacts with ecologisation ? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System ». In : *Journal of Rural Studies* 86, p. 599-610. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.07.023.

Schnebelin, Éléonore, Jean-Marc Touzard, Pierre Labarthe et Isabelle Macaine (soumis). « Les coopératives face aux enjeux d'écologisation et de numérisation dans l'agriculture : l'exemple des caves coopératives en Occitanie ». In : *RECMA*.

Scholz, Trebor (2012). *Digital labor : The internet as playground and factory*. Routledge. ISBN : 978-1-136-50670-3.

Schumpeter, Joseph Alois (1935). *Théorie de l'évolution économique*. T. 1911. Dalloz Paris.

Schutter, Olivier De et Gaëtan Vanloqueren (2011). « The New Green Revolution : How Twenty-First-Century Science Can Feed the World ». en. In : *Solutions* 2.4, p. 11.

Séjeau, Wilfrid (2004). « René Dumont agronome ». In : *Ruralia. Sciences sociales et mondes ruraux contemporains* 15.

Serrano, Eric, Audrey Petit, Christophe Gaviglio, Laure Gontier, Thierry Dufourcq, Romain Cogo, Thierry Massol, Jean Mora, X Rafenne et Barbara Cichosz (2019). « Ecoviti Sud-Ouest : Performances de systèmes viticoles innovants à faible niveau d'intrants phytopharmaceutiques sur le bassin de production Sud-Ouest. » In : *Innovations Agronomiques* 76, p. 254-272.

Servolin, Claude (1989). *L'agriculture moderne*. Ed. du Seuil. ISBN : 2-02-010525-X.

Shang, Linmei, Thomas Heckelei, Maria K Gerullis, Jan Börner et Sebastian Rasch (2021). « Adoption and diffusion of digital farming technologies-integrating farm-level evidence and system interaction ». In : *Agricultural Systems* 190, p. 103074. DOI : 10.1016/j.agsy.2021.103074.

Shepherd, Mark, James A Turner, Bruce Small et David Wheeler (2020). « Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the 'digital agriculture'revolution ». In : *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100.14, p. 5083-5092. DOI : 10.1002/jsfa.9346.

Shove, Elizabeth et Gordon Walker (2007). « CAUTION ! Transitions ahead : politics, practice, and sustainable transition management ». In : *Environment and planning A* 39.4, p. 763-770. DOI : 10.1068/a39310.

Skaalsveen, Kamilla, Julie Ingram et Julie Urquhart (2020). « The role of farmers' social networks in the implementation of no-till farming practices ». In : *Agricultural Systems* 181, p. 1-14. DOI : 10.1016/j.agsy.2020.102824.

Solow, Robert M (1956). « A contribution to the theory of economic growth ». In : *The quarterly journal of economics* 70.1, p. 65-94. DOI : 10.2307/1884513.

Sonka, Steven T (2020). « Digital Technologies, Big Data, and Agricultural Innovation ». In : *The Innovation Revolution in Agriculture : A Roadmap to Value Creation*. Sous la dir. d'Hugo Campos. Springer International Publishing, p. 207-226. ISBN : 978-3-030-50990-3.

Sonnino, Roberta et Terry Marsden (2006). « Beyond the divide : rethinking relationships between alternative and conventional food networks in Europe ». In : *Journal of economic geography* 6.2, p. 181-199. DOI : 10.1093/jeg/lbi006.

Spaargaren, Gert et Arthur PJ Mol (1992). « Sociology, environment, and modernity : Ecological modernization as a theory of social change ». In : *Society & natural resources* 5.4, p. 323-344. DOI : 10.1080/08941929209380797.

Spielman, David J et Regina Birner (2008). *How innovative is your agriculture ? : Using innovation indicators and benchmarks to strengthen national agricultural innovation systems*. World Bank Washington, DC.

Spielman, David J, Kristin Davis, Martha Negash et Gezahegn Ayele (2011). « Rural innovation systems and networks : findings from a study of Ethiopian smallholders ». In : *Agriculture and human values* 28.2, p. 195-212. DOI : 10.1007/s10460-010-9273-y.

Spielman, David J, Javier Ekboir et Kristin Davis (2009). « The art and science of innovation systems inquiry : Applications to Sub-Saharan African agriculture ». In : *Technology in society* 31.4, p. 399-405. DOI : 10.1016/j.techsoc.2009.10.004.

Srnicek, Nick (2017). *Platform capitalism*. John Wiley & Sons. ISBN : 978-2-89596-746-0.

Stassart, Pierre, Philippe Baret, Jean-Claude Grégoire, Thierry Hance, Marc Mormont, Dirk Reheul, Didier Stilmant, Gaëtan Vanloqueren, Marjolein Visser et al. (2012). « L'agroécologie : trajectoire et potentiel. Pour une transition vers des systèmes alimentaires durables ». In : *Agroécologie, entre pratiques et sciences sociales*, p. 27-51.

Stassart, Pierre et D Jamar (2009). « Agriculture Biologique et verrouillage des systèmes de connaissances. Conventionalisation des filières agroalimentaire bio ». In : *Innovations Agronomiques (2009)* 4, p. 313-328. DOI : 10.5380/dma.v25i0.25726.

Stephan, Annegret, Tobias S Schmidt, Catharina R Bening et Volker H Hoffmann (2017). « The sectoral configuration of technological innovation systems : Patterns of knowledge development and diffusion in the lithium-ion battery technology in Japan ». In : *Research Policy* 46.4, p. 709-723. DOI : 10.1016/j.respol.2017.01.009.

Steyaert, Patrick, Marc Barbier, Marianne Cerf, Alix Levain et Allison Marie Loconto (2016). *Role of intermediation in the management of complex sociotechnical transitions*.

Stone, Glenn Davis (2022). « Surveillance agriculture and peasant autonomy ». In : *Journal of Agrarian Change*, p. 1-24. DOI : 10.1111/joac.12470.

Sulecki, James C (juill. 2018). *Association Seeks Definitive Definition of "Precision Agriculture" — What's Your Vote ?* en-US. URL : https://www.precisionag.com/market-watch/association-seeks-definitive-definition-of-precision-agriculture-whats-your-vote/ (visité le 06/07/2021).

Sutherland, Lee-Ann (2015). « New Entrants into Farming : Lessons to Foster Innovation and Entrepreneurship ». In : *EIP-AGRI Focus Group, Brussels*.

Sutherland, Lee-Ann, Pierre Labarthe, Boelie Elzen et Anda Adamsone Fiskovica (2018). *AgriLink's multi-level conceptual framework*. en. Rapp. tech., p. 205. URL : https://www6.inrae.fr/agrilink/content/download/3606/35459/version/1/file/AgriLink.Conceptualrameworkull+sion+eport.pdf.

Sutherland, Lee-Ann, Livia Madureira, Violeta Dirimanova, Malgorzata Bogusz, Jozef Kania, Krystyna Vinohradnik, Rachel Creaney, Dominic Duckett, Timothy Koehnen et Andrea Knierim (2017). « New knowledge networks of small-scale farmers in Europe's periphery ». In : *Land Use Policy* 63, p. 428-439. DOI : 10.1016/j.landusepol.2017.01.028.

Sutherland, Lee-Ann, Livia Madureira, Boelie Elzen, Christina Noble, Noemie Bechtet, Leanne Townsend, Eleni Zarokosta et Pierre Triboulet (A paraître). « What Can We Learn from Droppers and Non-adopters About the Role of Advice in Agricultural Innovation ? » In : *EuroChoices*.

Tardieu, Vincent (2017). *Agriculture connectée. Arnaque ou remède ?* Belin. Essais. Paris : Humensis. ISBN : 978-2-7011-9598-8.

Temri, Leila et al. (2014). *Stratégies d'entreprises et systèmes sectoriels d'innovation*. Rapp. tech.

Tenner, Edward (1997). *Why things bite back : Technology and the revenge of unintended consequences*. Vintage.

Terranova, Tiziana (2000). « Free labor : Producing culture for the digital economy ». In : *Social text* 18.2, p. 33-58.

Terre-net Média (2021). *Étude Agrinautes 2020 Réseau 4G, OAD, e-commerce : 5 infos sur la pratique numérique des agriculteurs*. URL : https://www.terre-

net.fr/actualite-agricole/economie-social/article/les-cinq-informations-a-retenir-de-l-usage-du-numerique-chez-les-agriculteurs-202-176145.html (visité le 13/08/2021).

Théret, Bruno (2000). « Institutions et institutionnalismes : vers une convergence des conceptions de l'institution ? » In : *Innovations institutionnelles et territoires*, p. 25-68.

Therond, Olivier, Michel Duru, Jean Roger-Estrade et Guy Richard (2017). « A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review ». In : *Agronomy for sustainable development* 37.3, p. 1-24. DOI : 10.1007/s13593-017-0429-7.

Torre, André et Corinne Tanguy (2014). « Les systèmes territoriaux d'innovation : fondements et prolongements actuels ». In : *Principes d'économie de l'innovation, Bruxelles, Peter Lang, coll.«Business and Innovation*, p. 514.

Torrez, Christian, Noah Miller, Steven Ramsey et Terry Griffin (2016). « Factors Influencing the Adoption of Precision Agriculture Technologies by Kansas Farmers ». In : *Kansas State University Department Of Agricultural Economics Extension Publication December*.

Touzard, Jean-Marc (2010). « Ancrage territorial et construction de règles dans des coopératives viticoles du Midi ». In : *Le temps des SYAL : Techniques, vivres et territoires*. Sous la dir. de José Muchnik et Christine de Sainte Marie. Editions Quae. ISBN : 978-2-7592-0500-4.

– (2011). « Les caves coopératives dans la transformation du vignoble languedocien ». In : *Etudes Héraultaises, hors série*, p. 101-111.

– (2014). « Les approches sectorielles de l'innovation ». In : *Principes d'économie de l'innovation, Bruxelles, Peter Lang*, p. 235-245.

– (2018). « L'innovation agricole et agroalimentaire au XXIe siècle : maintien, effacement ou renouvellement de ses spécificités ? » In : *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*. Editions Quae, p. 39-56.

Touzard, Jean-Marc et al. (2021). « À propos de : Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires : un nouveau paradigme du développement territorial ? » In : *Systèmes Alimentaires - Food Systems* 6, p. 321-325.

Touzard, Jean-Marc, Alfredo Coelho et Hervé Hannin (2008). « Les coopératives vinicoles : une analyse comparée à l'échelle internationale ». In : *Bulletin de l'OIV* 81.929-931, p. 381-404.

Touzard, Jean-Marc et Jean-François Draperi (2003). *Les coopératives entre territoires et mondialisation : les entretiens de Maraussan 14 et 15 décembre 2001*. 2. L'Harmattan.

Touzard, Jean-Marc et Stéphane Fournier (2014). « La complexité des systèmes alimentaires : un atout pour la sécurité alimentaire ? » In : *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement* 14.1. DOI : 10.4000/vertigo.14840.

Touzard, Jean-Marc, C Gaullier et F Jarrige (2001). « Qualité du vin et transformation des règles de rémunération dans les coopératives du Languedoc ». In : *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 32, p. 19-36.

Touzard, Jean-Marc et Pierre Labarthe (2016). « Regulation theory and transformation of agriculture : a literature review ». In : *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs* 20, non-paginé. DOI : 10.4000/regulation.12094.

Touzard, Jean-Marc, Ludovic Temple, Guy Faure et Bernard Triomphe (2014). « Systèmes d'innovation et communautés de connaissances dans le secteur agricole et agroalimentaire ». In : *Innovations* 1, p. 13-38. DOI : 10.3917/inno.043.0013.

Trouvé, Aurélie (2007). « Le rôle des Régions européennes dans la redéfinition des politiques agricoles ». Thèse de doct. Université de Bourgogne.

– (2009). « Les régions, porteuses de nouveaux compromis pour l'agriculture ? » In : *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs* 5. DOI : 10.4000/regulation.7550.

Tsing, Anna Lowenhaupt (août 2017). *Le champignon de la fin du monde : Sur la possibilité de vie dans les ruines du capitalisme*. fr. La Découverte. ISBN : 978-2-35925-139-5.

UIT-T (juin 2012). *Présentation générale de l'internet de objets*. fr. Rapp. tech. Genève : Union International des Télécommunications, p. 24. URL : https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11559&lang=fr (visité le 18/01/2022).

Vaden, Tere (2004). « Digital nominalism. Notes on the ethics of information society in view of the ontology of the digital ». In : *Ethics and Information Technology* 6.4, p. 223-231. DOI : 10.1007/s10676-005-0350-7.

Valceschini, Egizio (2006). *Valorisation Economique de la Tracabilite : les Strategies de Qualite Dans L'agroalimentaire*. Ed. Techniques Ingénieur.

Valceschini, Egizio et François Nicolas (1995). « Agro-alimentaire : Une économie de la qualité ». In : *Agro-alimentaire*, p. 1-436.

Valiorgue, Bertrand, Émilie Bourlier Bargues et Xavier Hollandts (2020). « Quelles évolutions de la raison d'être des coopératives agricoles françaises ? Regard historique sur un construit social ». In : *RECMA* 4, p. 23-38.

Van der Ploeg, Jan Douwe (1994). « Styles of farming : an introductory note on concepts and methodology. » In : *Endogenous regional development in Europe*, p. 7-31.

– (2018). « Differentiation : old controversies, new insights ». In : *The Journal of Peasant Studies* 45.3, p. 489-524. DOI : 10.1080/03066150.2017.1337748.

Van der Ploeg, Jan Douwe, Dominique Barjolle, Janneke Bruil, Gianluca Brunori, Livia Madureira, Joost Dessein, Zbigniew Drąg, Andrea Fink-Kessler, Pierre Gasselin, Manuel Gonzalez de Molina et al. (2019). « The economic potential of agroecology : Empirical evidence from Europe ». In : *Journal of Rural Studies* 71, p. 46-61. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2019.09.003.

Van Es, Harold et Joshua Woodard (2017). « Innovation in agriculture and food systems in the digital age ». In : *The global innovation index*, p. 97-104.

Van Hulst, Freddy, Rowan Ellis, Katrin Prager et Joshua Msika (2020). « Using co-constructed mental models to understand stakeholder perspectives on agro-ecology ». In : *International Journal of Agricultural Sustainability* 18.2, p. 172-195. DOI : 10.1080/14735903.2020.1743553.

Van Lente, Harro, Wouter PC Boon et Laurens Klerkx (2020). « Positioning of systemic intermediaries in sustainability transitions : Between storylines and speech acts ». In : *Environmental innovation and societal transitions* 36, p. 485-497. DOI : 10.1016/j.eist.2020.02.006.

Vanloqueren, Gaëtan et Philippe Baret (2008). « Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially ? A Belgian

agricultural 'lock-in'case study ». In : *Ecological economics* 66.2-3, p. 436-446. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2007.10.007.

– (2009). « How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations ». In : *Research policy* 38.6, p. 971-983. DOI : 10.1016/j.respol.2009.02.008.

Verdouw, Cor, Sjaak Wolfert, Bedir Tekinerdogan et al. (2016). « Internet of Things in agriculture ». In : *CAB Reviews : Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 11.35, p. 1-12. DOI : 10.1079/PAVSNNR201611035.

Visser, Oane, Sarah Ruth Sippel et Louis Thiemann (2021). « Imprecision farming ? Examining the (in) accuracy and risks of digital agriculture ». In : *Journal of Rural Studies* 86, p. 623-632. DOI : 10.1016/j.jrurstud.2021.07.024.

Von Hippel, Eric (2006). *Democratizing innovation*. the MIT Press. ISBN : 978-0-262-00274-5.

Walliser, Bernard (1989). « Théorie des jeux et genèse des institutions ». In : *Recherches Économiques de Louvain/Louvain Economic Review* 55.4, p. 339-364. DOI : 10.1017/S0770451800029705.

Walter, Achim, Robert Finger, Robert Huber et Nina Buchmann (2017). « Opinion : Smart farming is key to developing sustainable agriculture ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114.24, p. 6148-6150. DOI : 10.1073/pnas.1707462114.

Wang, Ya-na, Lifu Jin et Hanping Mao (2019). « Farmer cooperatives' intention to adopt agricultural information technology—Mediating effects of attitude ». In : *Information Systems Frontiers* 21.3, p. 565-580. DOI : 10.1007/s10796-019-09909-x.

Warren, Martyn (2004). « Farmers online : drivers and impediments in adoption of Internet in UK agricultural businesses ». In : *Journal of Small Business and Enterprise Development*. DOI : 10.1108/14626000410551627.

– (2007). « The digital vicious cycle : Links between social disadvantage and digital exclusion in rural areas ». In : *Telecommunications Policy* 31.6-7, p. 374-388. DOI : 10.1016/j.telpol.2007.04.001.

Watkins, Daphne et Deborah Gioia (2015). *Mixed methods research*. Pocket Guide to Social Work Research Methods. ISBN : 978-0-19-974745-0.

Weller, Jean-Marc (2006). « II faut sauver l'agriculteur Poulard de la télédétection : le souci du public à l'épreuve du travail administratif ». In : *Politiques et management public* 24.3, p. 109-122. DOI : 10.3406/pomap.2006.2336.

Wenger, Etienne et al. (1998). « Communities of practice : Learning as a social system ». In : *Systems thinker* 9.5, p. 2-3.

Wezel, Alexander, Stéphane Bellon, Thierry Doré, Charles Francis, Dominique Vallod et Christophe David (2009). « Agroecology as a science, a movement and a practice. A review ». In : *Agronomy for sustainable development* 29.4, p. 503-515. DOI : 10.1051/agro/2009004.

Wilkinson, John et David Goodman (2018). « Food regime analysis : a reassessment ». In : *Ecology, Capitalism and the New Agricultural Economy*. Routledge, p. 142-162.

Williams, Robin et David Edge (1996). « The social shaping of technology ». In : *Research policy* 25.6, p. 865-899. DOI : 10.1016/0048-7333(96)00885-2.

Wittman, Hannah, Dana James et Zia Mehrabi (2020). « Advancing food sovereignty through farmer-driven digital agroecology ». In : *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 47.3, p. 235-248. DOI : 10.7764/ijanr.v47i3.2299.

Wolf, Steven A et Frederick Buttel (1996). « The political economy of precision farming ». In : *American Journal of Agricultural Economics* 78.5, p. 1269-1274. DOI : 10.2307/1243505.

Wolf, Steven A et Peter J Nowak (1995). « Development of information intensive agrichemical management services in Wisconsin ». In : *Environmental Management* 19.3, p. 371-382. DOI : 10.1007/BF02471979.

Wolf, Steven A et Spencer D Wood (1997). « Precision Farming : Environmental Legitimation, Commodification of Information, and Industrial Coordination 1 ». In : *Rural sociology* 62.2, p. 180-206. DOI : 10.1111/j.1549-0831.1997.tb00650.x.

Wolfert, Sjaak, Lan Ge, Cor Verdouw et Marc-Jeroen Bogaardt (2017). « Big data in smart farming–a review ». In : *Agricultural systems* 153, p. 69-80. DOI : 10.1016/j.agsy.2017.01.023.

Yang, Huan, Laurens Klerkx et Cees Leeuwis (2014). « Functions and limitations of farmer cooperatives as innovation intermediaries : Findings from China ». In : *Agricultural Systems* 127, p. 115-125. DOI : 10.1016/j.agsy.2014.02.005.

Zhang, Naiqian, Maohua Wang et Ning Wang (2002). « Precision agriculture — A worldwide overview ». In : *Computers and electronics in agriculture* 36.2-3, p. 113-132. DOI : 10.1016/S0168-1699(02)00096-0.

Zuboff, Shoshana (2019). « Surveillance capitalism and the challenge of collective action ». In : *New labor forum* 28.1, p. 10-29. DOI : 10.1177/1095796018819461.

ANNEXES

1 Questionnaires agriculteurs

Bonjour,

Tout d'abord, merci d'avoir accepté de répondre à ce questionnaire. Nous réalisons des enquêtes auprès d'agriculteurs dans le cadre d'une thèse réalisée au sein de l'INRAE, institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Cette thèse a pour objectif d'analyser les usages que font les agriculteurs des outils numériques quels qu'ils soient et de les mettre en lien avec les pratiques agronomiques.

Conformément au règlement européen de protection des données (RGPD), vous devez signer un consentement pour que nous puissions utiliser ces données. Ces données seront stockées pendant maximum 10 ans à l'INRAE et ne seront utilisées que dans le cadre du projet de recherche expliqué ci-dessus. A tout moment, vous pouvez nous contacter pour une rectification ou un effacement de ces données. De même, vous avez un droit de retrait du consentement à tout moment.

Ces données seront anonymisées et analysées, et pourront faire l'objet de publications scientifiques.

Organisme : INRAE

Délégué à la protection des données de l'INRAE : cil-dpo@inrae.fr

Chercheur à contacter : Jean-Marc Touzard jean-marc.touzard@inrae.fr

J'atteste ainsi avoir pris connaissance des informations sur le projet de recherche et je suis conscient que ma participation est entièrement volontaire : OUI NON

J'accepte que l'ensemble des informations collectées dans le cadre de cette enquête soient publiées dans un ouvrage ou publication scientifique mais avec occultation de mes nom et prénom :

OUI NON

J'accepte que mes données personnelles collectées via cette enquête puissent faire d'un projet ultérieur permettant d'affiner ou consolider les pistes de recherche issues du présent projet (à l'exclusion de toute exploitation à des fins commerciales), dans les mêmes conditions de confidentialité et de sécurité.
OUI NON

J'accepte que mes propos soient enregistrés sur un support audio et exploités par les UMR Agir et Innovation. Pour l'analyse, mes propos seront retranscrits sur support papier. A l'issue de la retranscription, les enregistrements sonores seront détruits

OUI NON

J'ai noté que je pouvais retirer mon/mes consentement(s) à tout moment en recontactant le responsable du projet mentionné ci-dessous.

Fait en deux exemplaires originaux, dont un remis en main propre au volontaire.

Date :

Nom, prénom du responsable du projet :

SCHNEBELIN Eléonore

Adresse postale ou adresse mèl :

eleonore.schnebelin@inrae.fr

Signature :

Nom, prénom du volontaire :

Adresse postale ou adresse mèl :

Signature :

1

Présentation générale de l'exploitation et de l'enquêté

1. Nom de l'enquêté : ……..
2. Nom de l'exploitation : ……..
3. Adresse : ……..
4. Fonction de la personne enquêtée :

Chef d'exploitation □

Propriétaire-gérant (ou associé si société) □

Co-gérant □

Chef de culture □

Directeur/directeur adjoint □

Autre, préciser : ……..

- **L'exploitation**

5. Statut juridique : GAEC □ – EARL □ – Individuelle □ – SARL □ - SCEA □ - Autre □ : ……..
6. Date de création ou de reprise de l'exploitation : …….

   Date d'installation : …….
7. Reprise familiale : Oui/Non
8. Surface agricole utile (SAU) en hectare : ……
9. Main-d'œuvre

   Nombre d'UTA : ……..

   Associé.e.s : …….. MO familiale : …….. MO salariée : ……..
10. Type d'agriculture : Bio □ – Mixte □ …….. Ha – HVE niveau ……. □ - Autre :

    Si bio, depuis l'installation □ ou conversion □ : date : ……
11. Irrigation : Terres irrigables : ……. % Terres irriguées : …….. %
12. Quelles sont vos productions ?

Préciser si réalisée sous un cahier des charges spécifique (bio, AOP, Agriconfiance etc .) ou sous contrat

Cultures	**Surface (Ha)**	**Rendement moyen**	**Irrigation**	**Cahier des charges/contrat**

Prairies temporaires				
Prairies permanentes				
Jachères				

Types d'animaux	**Effectif**	**Nb animaux vendus/an (en moyenne)**	**Nb litres de lait vendu/an en moyenne**	**Autres/précisions**

13. Comment commercialisez-vous vos cultures ? Indiquez la part approximative de votre production pour chacun :

□ Coopérative ……% □ Négoce ……% □ Vente directe…….% □ Marchés agricoles……%

□ Auto-consommation ……% Semenciers □ …… %

……

14. Comment commercialisez-vous vos autres productions ?

……

15. Avez-vous des capacités de stockage sur l'exploitation ? Oui □ Non □
Et de triage ? Oui □ Non □

- **L'enquêté**

16. Sexe : F□ H□

17. Année de naissance : ……..

18. Quel est votre parcours professionnel ?

18a. Formation(s) :

CAP/BEP/BPA/certificat d'études □

Bac/brevet professionnel □

Bac+2/ BTS/BTSA □

Bac+3/Licence/License professionnelle □

Bac+5/Ingénieur □

Autre □, préciser :……

18b. Formations des associés : …….

18c. Activités professionnelles avant l'installation : ……
……

19. Êtes-vous issus du milieu agricole : Oui / Non
20. Avez-vous d'autres ateliers sur l'exploitation : production d'énergie □ transformation □, vente □, gîte □, ferme pédagogique □, autre □ :……
21. Avez-vous une autre activité professionnelle ? Oui/Non - Laquelle ?.....
22. Dans combien d'années pensez-vous arrêter le travail sur votre exploitation ?.....
23. Avez-vous un projet de reprise de l'exploitation ? ……..
24. Avez-vous des enfants ? Si oui combien : …….

25. Pour vous, qu'est-ce que l'agriculture numérique en 2 mots ?

……

Utilisation du numérique

26. Outils numériques génériques :

Avez-vous …. :	**Les utilisez-vous dans un but professionnel ?**
Accès à internet sur l'exploitation ? Oui / Non	Oui / Non
Un ordinateur ? Oui / Non	Oui / Non
Un smartphone ? Oui / Non	Oui / Non
Une tablette ? Oui / Non	Oui / Non

27. Comment est le réseau internet sur votre exploitation (siège + parcellaire) ?

Nul □ – Mauvais □ – Moyen □ – Bon □ – Très bon□

28. Avant de voir quels usages vous avez du numérique, pourriez-vous auto-évaluer vos compétences en vous donnant une note de 1 à 5 pour chaque catégorie ci-dessous :
    1. *Mener une recherche et une veille d'information* : aller chercher de l'information technique ou économique sur internet ? Aller chercher une information réglementaire ? …….
    2. *Gérer des données* : stocker et organiser vos différents documents professionnels sur votre ordinateur ? …….
    3. *Traiter des données* : faire un tableur type excel et faire des calculs simples dessus ?.....
    4. *Développer des documents textuels et adapter les documents à leur finalité* : rédiger un document sur l'ordinateur, remplir un formulaire ?.....
    5. *Développer des documents multimédias* : faire une vidéo, une affiche, une présentation ?.....
    6. *Interagir* : interagir avec d'autres personnes vie une messagerie électronique, un système de visio-conférence etc ? ……
    7. *Partager et publier* : partager ou publier des informations sur des réseaux sociaux ou des forums ? ……
    8. *Collaborer* : partager un document avec un collègue, travailler à plusieurs via internet ? ……
    9. *S'insérer dans le monde numérique* : maîtriser les enjeux et stratégies de la présence en ligne, connaître ses limites et potentialités, connaître les risques (E-réputation, vie privée/vie pro/vie citoyenne etc.) ? ……
    10. *Sécuriser l'environnement numérique* : sécuriser les équipements, les communications pour se prémunir contre les attaques, pièges, incidents ? ……
    11. *Protéger les données personnelles et la vie privée* : maîtriser ses traces et gérer ses données ? ……
    12. *Résoudre des problèmes techniques :* Résoudre des problèmes informatiques simples, installer et mettre à jour un logiciel ? ……
    13. *Programmer* : créer un site internet ? Programmer ? ……
    14. *Faire de l'électronique* : bricoler du petit matériel électronique……
    15. *Construire un environnement numérique* : installer, configurer, enrichir du matériel numérique, des outils, des services pour qu'ils soient adaptés aux activités menées ? ……

- **Inventaire des technologies numériques utilisées dans un but professionnel :**

Nous allons maintenant faire un inventaire des technologies numériques utilisées. Nous avons classé les potentielles technologies en 5 catégories.

- Production végétale
- Gestion de l'exploitation
- Information
- Communication, collaboration
- Valorisation de la production

Indiquez s'il y a des technologies que vous avez utilisées mais que vous avez arrêtés d'utiliser

29. Pour la **production végétale**, quelles technologies numériques sont utilisées sur l'exploitation ? (Exemples : Ordinateur embarqué, guidage automatique, technologies à taux variables, drones, cartographie satellite, stations météo, objets connectés, GPS RTK, applications smartphones, logiciels, sites internet…)

Fonctions concernées : gestion de l'eau, gestion de la santé des plantes, gestion des adventices, gestion de la fertilité, gestion des cultures (semis, récolte...), gestion de la qualité et des rendements…

⇨ Remplir fiches technologies

GPS □ : Type RTK □ - Autre □ - ……

Guidage simple □ _ _ _ _ ……

Guidage automatique □ _ _ _ _ ……

Coupure de tronçons □ _ _ _ _ ……

Carte de modulation □ _ _ _ _ ……

Modulation intrants □ - Type d'intrants concernés : Semence □ - Azote □ - Phyto □ - Autre : ……

Contrôleur de rendement □ _ _ _ _ ……

Station météo □……

Tensiomètres connectés □ _ _ _ _ ……

Télégonflage □ _ _ _ _ ……..

OAD □ : Précisez : ……

……

Y a-t-il des technologies numériques que vous avez utilisées mais que vous avez arrêtés d'utiliser ? (type, raison)

	Vous en avez ?	Durée de renouvellement
Tracteur		
Moissonneuse	Prop – Location - CUMA	
Epandeur	Prop – Location - CUMA	
Pulvérisateur	Prop – Location - CUMA	
Semoir	Prop – Location - CUMA	

30. Pour la **gestion de l'exploitation** (hors commercialisation), quelles technologies numériques sont utilisées sur l'exploitation ? (*Exemples : Logiciels de comptabilité, services bancaire, site de financement participatif, gestion du parcellaire, administratif, logistique, gestion environnementale*)

Fonctions concernées : Gestion financière et économique, gestion réglementaire/normes/cahier des charges, gestion technique/expérimentation, gestion logistique, gestion environnementale, sécurité, gestion des risques, autre

Logiciel de comptabilité □

Logiciel de gestion □

Qui fait les PPF et avec quel outil ? ……..

Qui fait les déclarations PAC ? ……

Réalisez-vous des analyses économiques de votre ferme (autre que bilan comptable) ? □ Avec quel outil ?.....

31. Pour avoir de **l'information**, pour la **communication** et la **valorisation** quelles technologies numériques utilisez-vous ? (Précisez les sites internet, applications, logiciels, extranet, formation en ligne…)

Information technique

Fréquence d'utilisation d'internet pour avoir de l'**information technique**

jamais □ - rarement □ - de temps en temps □ - souvent □ - très souvent □

Sites internet, forums, applications :

Réseaux sociaux : Youtube □ - Facebook □ - Twitter □ - Consultation ou Participation

Avez-vous changé vos pratiques agronomiques à l'aide de ces sources d'informations ? Comment ?

……
……
……
……
……

Que pensez-vous de ces sources d'information ?

……
……
……

Autres sources d'information :

Météo □

Prix □ : ……..

Agro-équipement (location, prêt matériel agricole, réparation etc.)

Produits et services (vente ou achat à des collègues de fourrage, de fumier etc., proposition services de triage, de stockage, etc.), intrants (vente ou achat de semences, de produits phyto etc.), main-d'œuvre, autre

Vente/communication/marketing

Autres technologies numériques utilisées sur l'exploitation : Applications smartphones etc.

Sous-traitance

32. Est-ce que vous avez une ETA (entreprise de travaux agricoles) ? Oui/Non

Surface concernée …….. Ha

Interventions : ……

Est-ce que vous utilisez du numérique spécialement pour ça ?

……
……

Pour quelle(s) raison(s) est-ce que vos clients font appel à une ETA : ……

……

33. Faites-vous appel à des ETA pour des opérations culturales ? Oui/Non

Interventions : ……

Pour quelle(s) raison(s) : ……

Est-ce qu'ils utilisent du numérique ? .....

……
……

34. Est-ce que vous faites faire des opérations culturales par d'autres organisations ? Oui/non

Si oui : CUMA □, autre □ : ……

Pour quelle(s) tâche(s) ? .....

Est-ce qu'ils utilisent du numérique ? .....

……
……

Activité agricole et commercialisation

35. Quelles sont les rotations les plus courantes sur votre exploitation ?

……
……
……

36. Quelles sont vos pratiques en termes de travail du sol : Indiquez le %age des surfaces

Labour partout □

Labour partiel □ ……..%

Travail profond sans retournement □ ……..%

Travail superficiel (<15cm) □ ……..%

Pas de travail du sol □ ……%

Rques :

……
……

37. Faites-vous des cultures associées ? Si oui, surface concernée …… Ha

……

38. Faites-vous des couverts végétaux ? Si oui, surface concernée …… Ha

……

39. Quelles sont vos stratégies pour gérer la fertilité de vos sols (à classer) :

Si vous avez des stratégies différentes selon partie en bio/partie en conventionnel, préciser :

Stratégie 1 …… Stratégie 2 : ……

	Stratégie 1	Stratégie 2
Apport d'engrais minéral		
Apport d'engrais organique		
Couverts végétaux		
Rotations		
Autre (précisez)		

40. Quelles sont vos stratégies pour gérer la santé des plantes (à classer) :

Si vous avez des stratégies différentes selon partie en bio/partie en conventionnel, préciser :

Stratégie 1 …… Stratégie 2 : ……

	Stratégie 1	Stratégie 2
Apport de produits de synthèse		
Apports produits autorisés en AB		
Apports produits de biocontrôle		
Variétés résistantes		
Rotations		
Autre (précisez)		

41. Quelles sont vos stratégies pour gérer les adventices (à classer) ?

Si vous avez des stratégies différentes selon partie en bio/partie en conventionnel, préciser :

Stratégie 1 …… Stratégie 2 : …….

	Stratégie 1	Stratégie 2
Désherbage chimique		
Désherbage mécanique		
Rotations		
Couverts végétaux		
Autre (précisez)		

Remarques variétés

……..

42. MAEC mises en œuvre sur l'exploitation :

Nom de la MAEC	**Surface concernée (Ha)**	**Date de début**

43. Surfaces d'intérêt écologiques : …… %

44. Si vous êtes en bio/HVE/agriculture de conservation, pourquoi ?

……
……

Economie

45. Quelle est l'évolution de votre chiffre-d'affaires sur ces 5 dernières années

En baisse □ – Stable □ – En hausse □

46. Quel est votre EBE moyen (sur 3 ans) ? ……..
47. Quelles sont vos annuités moyennes (sur 3 ans) ? ……
48. Selon vous, comment est la santé économique de votre exploitation entre 1: mauvaise et 5 : bonne : ……

49. Quels sont vos coûts de production estimés par hectare ?

En blé : ……

50. Quelle est votre marge brute par hectare ?

En blé : ……

51. Quelles sont vos charges annuelles ?

En engrais : ……..

En phyto : ……..

En carburant : ……..

Relations avec les acteurs du système d'innovation

52. Est-ce que vous prenez des stagiaires/apprentis régulièrement ? Oui/Non

Nombre moyen/an : ……

Si oui, quel est leur niveau d'études ? .....

53. Est-ce que vous participez à des salons agricoles ? Oui/Non

SI oui lesquels ? .....

En tant que visiteur □, en tant qu'exposant □

54. Est-ce que vous êtes abonnés à un journal agricole ? Oui/Non

Lesquels ? .....

55. Êtes-vous suivi par un/des conseillers ? Pour chacun : A quelle fréquence viennent-ils ? Sur quels aspects vous conseillent-ils (agronomiques, agroéquipement, stratégique…) ?

Organisation	Précisez	Fréquence	Type de conseil
Chambre d'agriculture	- -		
Coopérative(s)	- - -		
Centre de gestion/ compta	- -		
Autres : Concessionnaires Fournisseurs Acheteurs	- - -		

56. Est-ce que vous faites partie d'organisations agricoles ? (Chambre d'agriculture, CUMA, Coopérative, GIEE, CETA…) –

Chambre d'agriculture □ …….

GIEE □ : …….

CETA □ …….

GDA □ …….

GAB □ …….

CUMA □ …….

Institut technique □ ……..

Syndicat □

Autres groupes de discussion avec des agriculteurs ?
……

A quelle fréquence participez-vous à des réunions entre agriculteurs dans ces groupes ?

57. Est-ce que vous participez à des projets de recherche ?

Observatoire de la biodiversité □

INRA □…….

Autre □……

58. Réalisez-vous des essais sur votre exploitation ?

Non □

Oui □ : par qui êtes-vous accompagnés ? ……

Coopérative

59. Avec quelle(s) coopérative(s) travaillez-vous ? Pour quoi faire ? Achat intrants – Vente de la production – Conseil – Autres

Êtes-vous adhérent à ces coopératives ?

Coopératives	Adhérent	Pour quoi faire

60. Avez-vous des responsabilités dans ces coopératives ?

Non □

Oui □ : Lesquelles ? ……

Autre

61. Quelles sources d'information privilégiez-vous pour vos pratiques agronomiques ?

……

62. Quelles sources d'information privilégiez -vous pour avoir des conseils stratégiques (type investissement dans le matériel etc.) ?

……

Avis sur le numérique en agriculture

63. Quels avantages voyez-vous à l'utilisation du numérique dans votre exploitation ?

……
……
……
……
……
……
……
……

64. Quels inconvénients ?

……
……
……
……
……
……
……
……

65. Selon vous, quels sont les potentiels du numérique pour l'agriculture ?

……
……
……
……
……
……
……
……

66. Selon vous, quels sont les risques ?

……
……
……
……
……
……
……
……

67. Ressentez-vous des besoins en formation sur ce type de technologies ?

……
……
……
……
……
……

68. Si vous n'utilisez pas/peu le numérique, pour quelles raisons ?

……
……
……
……
……
……

69. Souhaitez-vous aborder quelque chose sur le thème du numérique en agriculture ?

……
……
……
……
……
……
……
……

70. Mail : ……@.....

71. Téléphone : □□□□□□□□□□

72. Acceptez-vous d'être recontactés pour approfondir certains aspects de cette enquête ?

Oui / Non

Pourriez-vous m'indiquer des agriculteurs que je pourrais aller voir dans le cadre de mon étude ?

FICHE TECHNOLOGIE N°……

1. Nom et fournisseur :……
2. Fonction(s) : ……

   ……

3. Depuis combien de temps avez-vous cette technologie ?

……

4. Pourquoi avez-vous commencer à l'utiliser ?

……
……
……

5. Comment avez-vous connu cette technologie ?

……
……
……

6. Décrivez le fonctionnement

……
……
……
……
……
……

7. Qui les utilise ou avec qui les utilisez-vous (vous, salariés, associés, conseiller, tractoriste…) ?

……
……

8. Comment avez-vous appris à l'utiliser ?

……
……
……

9. A quelle fréquence l'utilisez-vous ?

……
……

10. Est-elle facile d'usage ? Faites-vous face à des difficultés pour l'utiliser ?

……
……
……
……

2 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour la Production (TNP)

TABLE .1 – Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour la Production (TNP)

	Modalité	Effectif	Part %	NumProd _non	NumProd _moyen	NumProd _intens
Effectifs		**98**	**100%**	**39% (n=37)**	**32% (n=31)**	**29% (n=28)**
Utilise GPS	0	39	40%	97%	3%	4%
	1	59	60%	3%	97%	96%
Utilise autoguidage	0	55	56%	97%	37%	27%
	1	43	44%	3%	63%	73%
Utilise technologies de coupure de tronçons	0	60	61%	100%	57%	15%
	1	38	39%	0%	43%	85%
A une station météo connectée	0	67	68%	97%	63%	35%
	1	31	32%	3%	37%	65%
Utilise des cartes de modulation	0	66	67%	100%	90%	0%
	1	32	33%	0%	10%	100%
Fait de la modulation d'engrais	0	72	73%	100%	100%	8%
	1	26	27%	0%	0%	92%
Fait de la modulation de semence	0	92	94%	100%	100%	77%
	1	6	6%	0%	0%	23%
A des tensiomètres connectés	0	83	85%	97%	73%	81%
	1	14	14%	3%	27%	19%
Contrôleur de rendement	0	79	81%	100%	83%	54%
	1	18	18%	0%	17%	46%
Utilise des OAD pour les traitements	0	87	89%	95%	80%	88%
	1	11	11%	5%	20%	12%
A des technologies d'irrigation connectée	0	83	85%	100%	70%	85%
	1	15	15%	0%	30%	15%
Utilise logiciel de gestion	0	34	35%	71%	13%	12%
	1	62	63%	29%	87%	88%

3 Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour l'Information et la Communication (TNC)

TABLE .2 – Description du profil d'usage des Technologies Numériques pour l'Information et la Communication (TNC)

Pour aller chercher de l'info technique	**Modalité**	**Effectif**	**Part %**	**NumInfo _non**	**NumInfo _sites**	**NumInfo _Reseaux**
Effectifs		**98**	**100%**	**23% (n=22)**	**41% (n=39)**	**36% (n=35)**
Utilise internet *0 : Jamais, rarement ou de temps en temps* *1 : Souvent ou très souvent*	0	34	35%	64%	44%	9%
	1	63	64%	36%	56%	91%
Utilise réseaux sociaux	0	45	46%	73%	74%	0%
	1	52	53%	27%	26%	100%
Utilise facebook	0	74	76%	95%	97%	37%
	1	24	24%	5%	3%	63%
Utilise youtube	0	74	76%	100%	100%	31%
	1	24	24%	0%	0%	69%
Utilise sites spécialisés	0	19	19%	68%	0%	11%
	1	79	81%	32%	100%	89%
Utilise sites instituts techniques	0	69	70%	100%	64%	60%
	1	29	30%	0%	36%	40%
Consulte presse agricole en ligne	0	81	83%	55%	100%	80%
	1	17	17%	45%	0%	20%

4 Annexe de l'article Ecological Economics

Table des matières

Appendix A : used variables 1
List of variables 1
Skills 3
Variable AgroEco_input 5
Variable AgroEco_biodiv 6
Variable AgroEco_soil 6
Appendix B: Results from Catdes analysis on digital use profiles 7
Tests for Digital Technology Production clusters 7
Group 1 8
Group 2 11
Group 3 13
Tests for Digital Technology for Information and Communication clusters 16
Group 1 17
Group 2 19
Group 3 22

Appendix A: used variables

List of variables

Dimension	Variables	Nom	Modalities and distribution Quanti: mean (sd) Quali: percentage
Structural characteristics	Utilised Agricultural Land	Farm_Area	162 (113)
	Turn-over	Turnover	Decreasing (26%) Stable (36%) Increasing (34%)
	Opinion on farm's economic health	Eco_opinion	Negative (22%) Neutral (41%) Positive (37%)
	Has breeding	Breeding	0: no (70%) 1: yes (30%)
	Has an outsourcing activity	Outsourcing_activity	0: no (74%) 1: yes (26%)
	Outsources	Outsourcing	0: no (34%) 1: yes (66%)
	Standard Gross Production	Farm_SGP	243157 (193842)
	Total workforce	Farm_work	1,9 (1,1)
	Salaried workforce	Farm_employee	0,3 (0,7)
	Annuities (annual payment)	Annuity	33918 (44401)
	Gross Operating Surplus	Farm_GOS	55452 (36143)

Individual characteristics	Age	age	44 (11)
	Skills*	Skills	1: highly skilled (n=45) 2: intermediately skilled (n=37) 3: low skilled (n=16)
	Background *Bac+2 means the individual has studied two years after the French Baccalaureate*	Background	<Bac2 (32%) Bac+2 (43%) >Bac2 (26%)
	Sex	Sex	H (91%) F (9%)
	Has children	Children	0: no (32%) 1: yes (68%)
	Has another profession	DoubleActivity	0: no (84%) 1: yes (16%)
	Installation date	Farm_inst	2003 (11)
Socioeconomic environment	Trading with cooperative	Sale_Coop	0: no (33%) 1: yes (61%)
	Gets advice from cooperative	Advice_Coop	0: no (43%) 1: yes (57%)
	Trading with trade company	Sale_TradeComp	0: no (67%) 1: yes (31%)
	Does direct Selling	Direct_Selling	0: no (74%) 1: yes (26%)
	Gets advice from chamber of Agriculture	Advice_Chamber	0: no (71%) 1: yes (27%)
	Regularly goes to agricultural shows	Agricul_Show	0: no (37%) 1: yes (63%)
	Has trading contracts	Contracts	0: no (49%) 1: yes (49%)
	Grow seed cultures	Seed	0: no (62%) 1: yes (38%)
	Trading with seed companies	Sale_Seed	0: no (81%) 1: yes (16%)
	Part of an Organic Farmers' Group	GAB	0: no (92%) 1: yes (8%)
	Part of a CETA = Farmers' group to exchange knowledge	CETA	0: no (78%) 1: yes (22%)
	Part of a Development Agricultural Group	GDA	0: no (95%) 1: yes (5%)
	Part of a CUMA = Farmers' group to exchange machinery	CUMA	0: no (58%) 1: yes (42%)
	Part of a farmers' group within the Chamber of Agriculture	Chamber_Agri	0: no (85%) 1: yes (15%)
	Part of an Economic and Environmental Interest Grouping	EEIG	0: no (79%) 1: yes (21%)
	Part of a farmers' group within a technical institut	TechInstitute	0: no (94%) 1: yes (6%)
	Part of a farmers' group in conservation farming	NoTill_group	0: no (94%) 1: yes (6%)
	Part of a farmers' professional Union	Farmers_Union	0: no (76%) 1: yes (24%)
Agronomic practices	Inputs strategy*	AgroEco_input	1: conventional strategy (n=48)

			2: Integrated strategy (n=18) 3: Organic strategy (n=32)
	Cultivated biodiversity*	AgroEco_biodiv	1: more meadows (n=13) 2: more cereals (n=55) 3: more diversity (n=15) 4: more legumes(n=15)
	Soil strategy*	AgroEco_soil	1 : more till (n=23) 2 : travail profond sans retournement (n=21) 3 : travail simplifié (n=42) 4 : no travail du sol (n=12)
	Has irrigation	Irrigation	0 : no (36%) 1 : yes (63%)
	Type of certification on crops	Cultur_type	Organic: crops are certified organic (29%) Mixt: part of the crops is certified organic (13%) Conv: crops are not certified organic (59%)
	Grows mixed crops	MixedCrop	0: no (64%) 1: yes (35%)
	Uses biocontrol products	Biocontrol	0: no (75%) 1: yes (25%)
	Uses pesticides allowed in organic specifications	Org_CropProtection	0: no (85%) 1: yes (15%)
	Irrigated part	Irrig_part	22,5 (24,3)
	Cost of fertiliser per ha	Ferti_charges	111,3 (86,4)
	Cost of pesticides per ha	Pesticides_charges	73,9 (78,9)
	Cost of fuel per ha	Fuel_charges	78,3 (43,3)
	Soft wheat yield (mean)	SoftWheat_Y	53,4 (18,5)
	Durum wheat yield (mean)	DurumWheat_Y	55,5 (13,0)
	Irrigated Maize yield (mean)	IrrigMaize_Y	100,1 (27,7)
	Meadow (%)	Meadow_part	8,7 (16,2)
	Cover Crop (%)	CoverCrop_part	23,4 (27,3)
	Legume (%)	Leg_part	14,9 (16,8)
	Cereals (%)	GrainCrop_part	47,3 (19,4)
	Ploughing (%)	Ploughing	27,0 (31,4)
	Shallow cultivation (%)	ShallowCultivation	31,3 (34,6)
	Deep Cultivation (%)	DeepCultivation	28,0 (35,1)
	No till (%)	NoTill_part	11,6 (27,8)

* *A complete description of this variable is detailed below*

Skills

This variable has been constructed with a hierarchical cluster analysis, from fifteen other variables. Each of those fifteen variables was a self-assessment of a digital skill, scored on a Likert's scale between 1 and 5 (Jamieson, 2004). The skills are described below and are inspired by the French digital skill assessment available here : https://pix.fr/ and adapted to the farming sector.

Digital skills description

1. Conducting research and monitoring information: looking for technical or economic information on the Internet? Looking for regulatory information?
2. Managing data: storing and organising your various professional documents on your computer?

3. Processing data: making an Excel-type spreadsheet and doing simple calculations on it?
4. Developing text documents and adapting documents to their purpose: writing a document on the computer, filling in a form?
5. Developing multimedia documents: making a video, a poster, a presentation?
6. Interacting: interacting with other people via e-mail, video-conferencing?
7. Sharing and publishing: sharing or publishing information on social networks or forums?
8. Collaborate: share a document with a colleague, work with others via the internet?
9. Entering the digital world: mastering the challenges and strategies of online presence, knowing the limits and potential, knowing the risks (E-reputation, private life/professional life/citizen life, etc.)?
10. Securing the digital environment: securing equipment and communications to protect against attacks, traps and incidents?
11. Protecting personal data and privacy: controlling one's tracks and managing one's data?
12. Solving technical problems: solving simple computer problems, installing and updating software?
13. Coding: creating a website? Coding?
14. Doing electronics: tinkering with small electronic equipment?
15. Building a digital environment: installing, configuring, enriching digital material, tools, services so that they are adapted to the activities carried out?

<u>Clusters description</u>

- Cluster 1 (n=45) includes farmers with the most digital skills
- Cluster 2 (n=37) includes farmers who are familiar with office suites, basic communication tools with internet. They have difficulties in fixing basic problems with computers and feel uncompfortable with security and multimedia issues.
- Cluster 3 (n=16) includes farmers who face difficulties with digital technologies

	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Global population	
	median	1st-3rd qu	median	1st-3rd qu	median	1st-3rd qu	median	1st-3rd qu
Comp 1	5	(5-5)	4	(4-5)	4,5	(3-5)	5	(4-5)
Comp 2	5	(4-5)	3	(2-4)	1	(1-2,25)	4	(2,25-5)
Comp 3	5	(5-5)	4	(2-4)	1	(1-1)	4	(2-5)
Comp 4	5	(5-5)	4	(4-4)	2,5	(1-4)	5	(4-5)
Comp 5	4	(4-5)	2	(2-5)	1	(1-3)	3	(1-4)
Comp 6	5	(5-5)	4	(3-4)	1	(1-2,25)	4,75	(3,125-5)
Comp 7	5	(5-5)	3	(1-4)	1	(1-1,25)	4	(1-5)
Comp 8	5	(4-5)	4	(3-4)	1	(1-1)	4	(2-5)
Comp 9	4	(4-5)	3	(2-4)	1	(1-2,25)	3,5	(2-4)
Comp 10	4	(3-5)	2	(1-3)	1	(1-1)	2	(1-4)
Comp 11	4	(3-5)	2	(1-3)	1	(1-1,25)	3	(2-4)
Comp 12	5	(4-5)	3	(2-4)	1	(1-3)	4	(2-5)
Comp 13	1	(1-3)	1	(1-1)	1	(1-1)	1	(1-1,875)
Comp 14	2	(1-3)	1	(1-2)	1	(1-1)	1	(1-2,375)
Comp 15	4	(3-5)	2	(1-3)	1	(1-2)	3	(1-3,5)

Variable AgroEco_input

This variable has been constructed with a hierarchical cluster analysis, from eleven binary variables, describing their use or not of certain types of inputs:

1. Ferti_minb: Use of mineral fertilizers
2. Ferti_orgb: Use of organic fertilizers
3. Ferti_rotb: Use of crop rotation to manage fertilization
4. Sante_phytob: Use of conventional pesticides
5. Org_CropProtection: Use of organic pesticides
6. Biocontrol: Use of biocontrol
7. Sante_varietb: Use of resistant varieties to manage plant health
8. Sante_rotb: Use of crop rotation to manage plant health
9. Adv_chimib: Use of chemical herbicide
10. Adv_mecab: Use of mechanical techniques to manage weeds
11. Adv_rotb: Use of crop rotation to manage weeds

- Cluster input 1 (n=48): conventional strategy
- Cluster input 2 (n=18): integrated strategy
- Cluster input 3 (n=32): organic strategy

	Modality	Total N	Total %	Cluster 1 N=48	Cluster 2 N=18	Cluster 3 N=32
Use of mineral fertilizers	0	43	44%	21%	6%	100%
	1	55	56%	79%	94%	0%
Use of organic fertilizers	0	43	44%	46%	39%	44%
	1	55	56%	54%	61%	56%
Use of crop rotation to manage fertilization	0	48	49%	81%	17%	19%
	1	50	51%	19%	83%	81%
Use of conventional pesticides	0	41	42%	13%	22%	97%
	1	57	58%	88%	78%	3%
Use of organic pesticides	0	83	85%	90%	72%	84%
	1	15	15%	10%	28%	16%
Use of biocontrol	0	73	74%	65%	61%	97%
	1	25	26%	35%	39%	3%
Use of resistant varieties to manage plant health	0	44	45%	73%	6%	25%
	1	54	55%	27%	94%	75%
Use of crop rotation to manage plant health	0	53	54%	83%	11%	34%
	1	45	46%	17%	89%	66%
Use of chemical herbicide	0	35	36%	6%	11%	94%
	1	63	64%	94%	89%	6%
Use of mechanical techniques to manage weeds	0	27	28%	35%	28%	16%
	1	71	72%	65%	72%	84%
Use of crop rotation to manage weeds	0	44	45%	71%	11%	25%
	1	54	55%	29%	89%	75%

Clusters description through other variables:

	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3		Global		Anova	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	f-value	p-value
Pesticides (€/ha)	130,33	65,99	93,20	44,81	17,93	58,52	73,91	78,89	26,17	4,2763E-09
Fertilizers (€/ha)	152,64	84,79	136,40	58,32	58,12	69,61	111,29	86,39	12,55	2,297E-05
Cover crops (%)	23	27,15	20	13,88	27	33,54	24	27	0,31	0,73608729
Legume (%)	10,17	11,02	9,64	9,38	25,32	22,47	14,85	16,80	10,17	0,00010194

Variable AgroEco_biodiv

This variable has been constructed with a hierarchical cluster analysis, from 6 quantitative variables, describing agrobiodiversity

- Cluster biodiv 1 (n=13): more meadows than others, and less crop
- Cluster biodiv 2 (n=55): a larger part of area is cultivated with cereals
- Cluster biodiv 3 (n=15): a greater diversity in terms of cultivated plants
- Cluster biodiv 4 (n=15): a larger part of area is cultivated with legumes

	Cluster 1 (n=13)		Cluster 2 (n=55)		Cluster 3 (n=15)		Cluster 4 (n=15)		Global		Anova	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	f-value	p-value
Leg_part	9,03	10,68	10,98	11,60	16,48	8,03	46,75	18,17	17,18	17,90	34,94	4,6E-15
GrainCrop_part	33,33	17,57	56,67	17,84	46,33	12,36	28,12	6,99	47,44	19,47	16,82	8,9E-09
Meadow_part	45,61	13,37	2,45	4,86	4,35	6,19	2,66	6,26	9	16	141,67	2,3E-34
Number of cereals	2,54	1,05	2,75	0,78	4,13	1,36	1,73	0,70	2,78	1,13	17,89	2,9E-09
Number of legume crops	0,69	0,75	1,02	0,80	2,47	1,41	2,80	1,32	1,47	1,26	20,20	3,5E-10
Number of oilseed crops	0,69	0,75	0,84	0,46	2,33	1,11	1,07	0,70	1,08	0,86	21,19	1,4E-10
MixedCrop_part	8,82	14,94	3,17	14,04	4,80	7,88	7,40	13,60	4,82	13,33	0,86	0,46692
CoverCrop_part	10,89	11,98	27,08	29,52	26,29	31,97	19,45	21,21	23,80	27,49	1,30	0,28078

Variable AgroEco_soil

This variable has been constructed with a hierarchical cluster analysis, from 5 quantitative variables, describing soil management

- AgroEco_soil 1 (n=23): mostly ploughing
- AgroEco_soil 2 (n=21): mostly deep cultivation
- AgroEco_soil 3 (n=42): mostly shallow cultivation
- AgroEco_soil 4 (n=12): mostly no till, and more cover crop than the average

	AgroEco_soil 1 n=23		AgroEco_soil 2 n=21		AgroEco_soil 3 n=42		AgroEco_soil 4 n=12		Global	
	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
Ploughing (%)	73,57	21,41	7,00	11,61	15,88	17,81	7,25	13,30	17,00	31,43
Deep Cultivation (%)	20,00	22,91	86,48	15,82	11,55	17,29	4,17	14,43	5,00	35,74
Shallow Cultivation (%)	5	11,57	4	8,27	67	21,86	7,58	16,04	14	35
No till (%)	1,00	4,80	2,95	7,74	2,05	7,86	80,67	21,31	0,00	27,71
Cover crop (%)	13,20	18,79	18,64	20,34	25,25	28,74	47,12	34,70	13,33	27,49

Appendix B: Results from Catdes analysis on digital use profiles

Chi2 and Student tests indicate whether the percentages or means are significantly different in each group. If the test is significant, the variable is useful to describe the groups and the statistical independence between this variable and the clusters is rejected. The column Cla/Mod indicates how many individuals are in this cluster, among individuals who have the written variable modality. The column Mod/Cla indicates how many individuals in this cluster have this modality. This value can be compared with the one indicated in the column 'Global'. That last indicates how many individuals have this modality in the global population of the sample.

Tests for Digital Technology Production clusters

Clust_DTP			
Group	1	2	3
Name of the group	No DTP	Average DTP	Intensive DTP
Total population	37	31	28
Percentage	38,54%	32,29%	29,17%

Chi2 test (cluster DTP)		
Variables	p.value	df
Outsourcing_activity	4,72E-06	2
Irrigation	0,00013695	4
Agricul_Show	0,00029786	2
Cultur_type	0,00038992	4
AgroEco_input	0,00097161	4
Seed	0,00189486	2
Sale_TradeComp	0,00513432	4
Direct_Selling	0,00893033	2
Breeding	0,02694229	2
Advice_Coop	0,02744203	2
MixedCrop	0,03312162	4
Contracts	0,04588731	4
Sale_Coop	0,04822599	4
Turnover	0,05114804	6
GAB	0,0578739	2
Background	0,06595921	4
Sale_Seed	0,06741821	4
Biocontrol	0,09695989	2
AgroEco_biodiv	0,1127339	6
Agri_CETA	0,1156567	2
Pers_forma_bis	0,13672555	12
GDA	0,14592434	2
CUMA	0,1672711	2
Sex	0,17727953	2
Children	0,23691531	2
Skills	0,23896865	4
Eco_opinion	0,25441976	6

Student Test (cluster DTP)		
Variables	Eta2	P-value
Farm_Area	0,29639176	7,96E-08
Irrig_part	0,24615405	2,26E-06
Ferti_charges	0,25793926	3,93E-05
SoftWheat_Y	0,17899717	0,00037479
Farm_SGP	0,13353656	0,00127464
DurumWheat_Y	0,35478594	0,00139816
Pesticides_charges	0,15226862	0,00429065
Meadow_part	0,09625415	0,0095089
DeepCultivation	0,09063875	0,01325892
Farm_employee	0,07496158	0,02669497
Annuity	0,08735053	0,03398194
Farm_work	0,06870992	0,03651333
ShallowCultivation	0,04413579	0,12824106
age	0,04111462	0,14195524
Leg_part	0,03759874	0,17824943
GrainCrop_part	0,03133856	0,23486948
Farm_GOS	0,03317391	0,40900775
Farm_inst	0,01400356	0,51904342
NoTill_part	0,01229496	0,56255885
IrrigMaize_Y	0,03380829	0,66185013
Fuel_charges	0,00945555	0,72052968
CoverCrop_part	0,00536952	0,78907387
Ploughing	0,00231318	0,89790838

AgroEco_soil	0,27077823	6
Chamber_Agri	0,30868332	2
Advice_Chamber	0,34157259	4
Org_CropProtection	0,46157036	2
EEIG	0,46397155	2
TechInstitute	0,48330971	2
DoubleActivity	0,53737861	2
NoTill_group	0,60368437	2
Outsourcing	0,82549376	2
Farmers_Union	0,97448442	2

NB : Lines in the tables separate the following significance levels : 1%, 5% et 10%

Group 1

Cluster DTP Group 1 No-DTP - 37 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p.value	v.test
Outsourcing_activity=no	50,70	97,30	73,96	1,15E-05	4,388
Irrigation=0	65,71	62,16	36,46	4,81E-05	4,065
AgroEco_input=3	65,63	56,76	33,33	0,00016669	3,765
Agricul_Show=0	61,11	59,46	37,50	0,0005715	3,445
Seed=0	51,67	83,78	62,50	0,00060162	3,431
Cultur_type=Bio	64,29	48,65	29,17	0,00124643	3,228
Direct_Selling=1	64,00	43,24	26,04	0,00327451	2,941
AgroEco_biodiv=1	76,92	27,03	13,54	0,00358628	2,912
Contracts=no	53,19	67,57	48,96	0,00441512	2,847
Sale_TradeComp=0	48,44	83,78	66,67	0,00480013	2,820
Sale_Seed=0	44,87	94,59	81,25	0,00693816	2,700
Breeding=yes	58,62	45,95	30,21	0,00987962	2,580
Advice_Coop=no	53,66	59,46	42,71	0,01004585	2,574
MixedCrop=yes	54,55	48,65	34,38	0,02324143	2,269
CETA=0	44,00	89,19	78,13	0,03894411	2,065
Skills=3	62,50	27,03	16,67	0,03955533	2,058
GAB=1	75,00	16,22	8,33	0,03974168	2,056
Sale_Coop=0	53,13	45,95	33,33	0,0434929	2,019
AgroEco_soil=3	50,00	56,76	43,75	0,04647146	1,991
Eco_opinion=NA	100,00	8,11	3,13	0,0543813	1,924
GDA=0	40,66	100,00	94,79	0,08190532	1,740
Sex=F	66,67	16,22	9,38	0,08916946	1,700
Background= >Bac2	52,00	35,14	26,04	0,11960632	1,556
Biocontrol=0	43,06	83,78	75,00	0,12207331	1,546
Advice_Chamber=NA	100,00	5,41	2,08	0,14605263	1,454
CUMA=0	44,64	67,57	58,33	0,1540042	1,426
Turnover=Increasing	48,48	43,24	34,38	0,15809889	1,411
Pers_forma_bis=Pas le bac	75,00	8,11	4,17	0,17776253	1,348
travail_nob=1	66,67	10,81	6,25	0,18239439	1,333
Pers_forma_bis=Bac+5	53,85	18,92	13,54	0,2451488	1,162

TechInstitute=0	40,00	97,30	93,75	0,29701929	1,043
Advice_Chamber=yes	46,15	32,43	27,08	0,36290629	0,910
Pers_forma_bis=autre	100,00	2,70	1,04	0,38541667	0,868
MixedCrop=NA	100,00	2,70	1,04	0,38541667	0,868
EEIG=0	40,79	83,78	79,17	0,3953734	0,850
Pers_forma_bis=Bac+3	50,00	16,22	12,50	0,40399528	0,835
Chamber_Agri=0	40,24	89,19	85,42	0,43109619	0,787
Org_CropProtection=0	40,24	89,19	85,42	0,43109619	0,787
DoubleActivity=1	46,67	18,92	15,63	0,4952186	0,682
Pers_forma_bis=BPREA	50,00	8,11	6,25	0,57676211	0,558
Outsourcing=no	40,63	35,14	33,33	0,76883154	0,294
Contracts=NA	50,00	2,70	2,08	0,77083333	0,291
Children=1	39,39	70,27	68,75	0,80881007	0,242
AgroEco_soil=4	41,67	13,51	12,50	0,80973825	0,241
NoTill_group=0	38,89	94,59	93,75	0,82379896	0,223
Eco_opinion=neutral	40,00	37,84	36,46	0,82508623	0,221
Eco_opinion=positive	39,47	40,54	39,58	0,87962907	0,151
AgroEco_biodiv=4	40,00	16,22	15,63	0,89304986	0,134
Turnover=NA	40,00	5,41	5,21	0,93097602	0,087
Farmers_Union=1	39,13	24,32	23,96	0,94137707	0,074
Background=<Bac2	38,71	32,43	32,29	0,97727386	0,028
Farmers_Union=0	38,36	75,68	76,04	0,94137707	-0,074
Sale_Seed=NA	33,33	2,70	3,13	0,8981313	-0,128
NoTill_group=1	33,33	5,41	6,25	0,82379896	-0,223
Children=0	36,67	29,73	31,25	0,80881007	-0,242
Outsourcing=yes	37,50	64,86	66,67	0,76883154	-0,294
Skills=2	36,11	35,14	37,50	0,71401756	-0,366
AgroEco_biodiv=3	33,33	13,51	15,63	0,67428519	-0,420
Irrigation=NA	0,00	0,00	1,04	0,61458333	-0,504
Turnover=Decreasing	33,33	21,62	25,00	0,56094517	-0,581
DoubleActivity=0	37,04	81,08	84,38	0,4952186	-0,682
Sale_Coop=NA	20,00	2,70	5,21	0,43931035	-0,773
Chamber_Agri=1	28,57	10,81	14,58	0,43109619	-0,787
Org_CropProtection=1	28,57	10,81	14,58	0,43109619	-0,787
EEIG=1	30,00	16,22	20,83	0,3953734	-0,850
AgroEco_soil=1	30,43	18,92	23,96	0,3752244	-0,887
Turnover=Stable	32,35	29,73	35,42	0,36826024	-0,900
Cultur_type=Mixte	25,00	8,11	12,50	0,32700876	-0,980
TechInstitute=1	16,67	2,70	6,25	0,29701929	-1,043
Sale_TradeComp=NA	0,00	0,00	3,13	0,2275266	-1,207
Skills=1	31,82	37,84	45,83	0,22272119	-1,219
Eco_opinion=negative	25,00	13,51	20,83	0,17192086	-1,366
CUMA=1	30,00	32,43	41,67	0,1540042	-1,426
Background=Bac+2	30,00	32,43	41,67	0,1540042	-1,426
Advice_Chamber=no	33,82	62,16	70,83	0,15058404	-1,437
Biocontrol=1	25,00	16,22	25,00	0,12207331	-1,546
Sale_Coop=1	32,20	51,35	61,46	0,11582902	-1,573
Sex=H	35,63	83,78	90,63	0,08916946	-1,700

AgroEco_soil=2	21,05	10,81	19,79	0,08477436	-1,724
GDA=1	0,00	0,00	5,21	0,08190532	-1,740
AgroEco_biodiv=2	30,19	43,24	55,21	0,06762776	-1,827
AgroEco_input=2	17,65	8,11	17,71	0,0529906	-1,935
GAB=0	35,23	83,78	91,67	0,03974168	-2,056
Agri_CETA=1	19,05	10,81	21,88	0,03894411	-2,065
AgroEco_input=1	27,66	35,14	48,96	0,03497501	-2,109
Cultur_type=Conv	28,57	43,24	58,33	0,02016028	-2,323
Sale_TradeComp=1	20,69	16,22	30,21	0,01855711	-2,354
MixedCrop=no	29,03	48,65	64,58	0,01177867	-2,519
Advice_Coop=yes	27,27	40,54	57,29	0,01004585	-2,574
Breeding=no	29,85	54,05	69,79	0,00987962	-2,580
Sale_Seed=1	6,67	2,70	15,63	0,00437133	-2,850
Direct_Selling=0	29,58	56,76	73,96	0,00327451	-2,941
Contracts=yes	23,40	29,73	48,96	0,00319081	-2,949
Seed=1	16,67	16,22	37,50	0,00060162	-3,431
Agricul_Show=1	25,00	40,54	62,50	0,0005715	-3,445
Irrigation=1	23,33	37,84	62,50	0,00010565	-3,877
Outsourcing_activity=yes	4,00	2,70	26,04	1,15E-05	-4,388

Cluster DTP						
Group 1 No-DTP - 37 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Meadow_part	3,055	15,13	8,71	21,01	16,22	0,00225076
IrrigMaize_Y	2,647	106,67	97,66	11,06	26,26	0,00811788
ShallowCultivation	1,908	39,86	31,32	38,54	34,56	0,05633265
age	1,231	45,95	44,24	10,25	10,70	0,21815864
NoTill_part	0,787	14,41	11,57	32,51	27,77	0,43118946
Leg_part	0,601	18,58	17,19	18,01	17,89	0,54784605
CoverCrop_part	0,560	25,36	23,38	30,98	27,28	0,57549053
Farm_inst	0,323	2003,32	2002,86	11,58	10,98	0,74650898
Ploughing	0,276	28,08	26,96	32,44	31,40	0,78257308
Farm_GOS	-0,195	54227,15	55146,52	37937,31	36301,16	0,84501577
Fuel_charges	-0,600	74,95	78,32	51,71	43,31	0,54818659
GrainCrop_part	-1,715	42,96	47,27	18,46	19,39	0,08625797
Farm_work	-1,741	1,66	1,90	0,78	1,06	0,08160219
Farm_employee	-2,239	0,13	0,33	0,45	0,68	0,02513478
Annuity	-2,744	20541,94	36214,29	20199,04	44088,57	0,00607415
DeepCultivation	-2,879	14,89	27,98	29,22	35,09	0,00398934
Pesticides_charges	-3,074	42,72	73,91	63,77	78,32	0,002112
Farm_SGP	-3,345	158207,44	242458,80	179246,54	194390,14	0,00082184
SoftWheat_Y	-3,627	44,44	53,13	19,02	18,50	0,00028696
Ferti_charges	-4,206	64,55	111,29	65,56	85,78	2,60E-05
Irrig_part	-4,207	9,22	22,48	14,23	24,34	2,59E-05
Farm_Area	-4,631	94,35	162,50	65,56	113,57	3,63E-06
DurumWheat_Y	-6,815	42,90	54,23	16,23	12,83	9,39E-12

Group 2

Cluster DTP Group 2 Average DTP - 31 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p,value	v,test
Irrigation=1	46,67	90,32	62,50	6,11E-05	4,009
Turnover=Stable	50,00	54,84	35,42	0,00780572	2,660
Sale_TradeComp=NA	100,00	9,68	3,13	0,03145997	2,151
Sale_TradeComp=1	48,28	45,16	30,21	0,0338461	2,122
Direct_Selling=0	38,03	87,10	73,96	0,04309791	2,023
Background= <Bac2	45,16	45,16	32,29	0,0718034	1,800
CUMA=1	42,50	54,84	41,67	0,0781431	1,762
Cultur_type=Conv	39,29	70,97	58,33	0,08811586	1,705
Contracts=yes	40,43	61,29	48,96	0,10239624	1,633
AgroEco_soil=2	47,37	29,03	19,79	0,13418471	1,498
Chamber_Agri=1	50,00	22,58	14,58	0,1477246	1,448
Children=1	36,36	77,42	68,75	0,21575224	1,238
AgroEco_input=1	38,30	58,06	48,96	0,22844162	1,204
Agri_CETA=1	42,86	29,03	21,88	0,25875199	1,129
Breeding=no	35,82	77,42	69,79	0,27323877	1,096
DoubleActivity=0	34,57	90,32	84,38	0,28722111	1,064
Seed=1	38,89	45,16	37,50	0,2965018	1,044
Advice_Coop=yes	36,36	64,52	57,29	0,33489561	0,964
Advice_Chamber=no	35,29	77,42	70,83	0,34128049	0,952
NoTill_group=1	50,00	9,68	6,25	0,37840206	0,881
TechInstitute=1	50,00	9,68	6,25	0,37840206	0,881
AgroEco_biodiv=2	35,85	61,29	55,21	0,41982864	0,807
Eco_opinion=negative	40,00	25,81	20,83	0,42055776	0,805
Skills=1	36,36	51,61	45,83	0,44317234	0,767
Eco_opinion=positive	36,84	45,16	39,58	0,45036516	0,755
AgroEco_soil=4	41,67	16,13	12,50	0,47385336	0,716
Sale_Seed=1	40,00	19,35	15,63	0,49884499	0,676
AgroEco_biodiv=3	40,00	19,35	15,63	0,49884499	0,676
Sex=H	33,33	93,55	90,63	0,54035973	0,612
Skills=2	36,11	41,94	37,50	0,54321626	0,608
Outsourcing=yes	34,38	70,97	66,67	0,55189678	0,595
Contracts=NA	50,00	3,23	2,08	0,64583333	0,460
Sale_Coop=1	33,90	64,52	61,46	0,68230528	0,409
GAB=0	32,95	93,55	91,67	0,69129981	0,397
Turnover=NA	40,00	6,45	5,21	0,71069672	0,371
GDA=1	40,00	6,45	5,21	0,71069672	0,371
Biocontrol=0	33,33	77,42	75,00	0,72374596	0,353
Org_CropProtection=0	32,93	87,10	85,42	0,77582925	0,285
Agricul_Show=1	33,33	64,52	62,50	0,78829578	0,269
EEIG=0	32,89	80,65	79,17	0,82525181	0,221
Farmers_Union=0	32,88	77,42	76,04	0,84391761	0,197
MixedCrop=yes	33,33	35,48	34,38	0,87174329	0,161
AgroEco_biodiv=4	33,33	16,13	15,63	0,91128111	0,111

Sale_Seed=NA	33,33	3,23	3,13	0,93729003	0,079
Outsourcing_activity=no	32,39	74,19	73,96	0,98249105	0,022
MixedCrop=no	32,26	64,52	64,58	0,98669717	-0,017
Outsourcing_activity=yes	32,00	25,81	26,04	0,98249105	-0,022
Farmers_Union=1	30,43	22,58	23,96	0,84391761	-0,197
AgroEco_soil=1	30,43	22,58	23,96	0,84391761	-0,197
EEIG=1	30,00	19,35	20,83	0,82525181	-0,221
AgroEco_input=2	29,41	16,13	17,71	0,80309945	-0,249
Agricul_Show=0	30,56	35,48	37,50	0,78829578	-0,269
Org_CropProtection=1	28,57	12,90	14,58	0,77582925	-0,285
Biocontrol=1	29,17	22,58	25,00	0,72374596	-0,353
GDA=0	31,87	93,55	94,79	0,71069672	-0,371
GAB=1	25,00	6,45	8,33	0,69129981	-0,397
Irrigation=NA	0,00	0,00	1,04	0,67708333	-0,416
MixedCrop=NA	0,00	0,00	1,04	0,67708333	-0,416
Cultur_type=Bio	28,57	25,81	29,17	0,6335018	-0,477
Outsourcing=no	28,13	29,03	33,33	0,55189678	-0,595
Sex=F	22,22	6,45	9,38	0,54035973	-0,612
Sale_Seed=0	30,77	77,42	81,25	0,51613705	-0,649
Advice_Chamber=yes	26,92	22,58	27,08	0,510841	-0,658
Advice_Chamber=NA	0,00	0,00	2,08	0,45614035	-0,745
Background=Bac+2	27,50	35,48	41,67	0,40853174	-0,826
NoTill_group=0	31,11	90,32	93,75	0,37840206	-0,881
TechInstitute=0	31,11	90,32	93,75	0,37840206	-0,881
Advice_Coop=no	26,83	35,48	42,71	0,33489561	-0,964
Background= >Bac2	24,00	19,35	26,04	0,3173103	-1,000
Eco_opinion=neutral	25,71	29,03	36,46	0,30867476	-1,018
Eco_opinion=NA	0,00	0,00	3,13	0,30571109	-1,024
Seed=0	28,33	54,84	62,50	0,2965018	-1,044
AgroEco_input=3	25,00	25,81	33,33	0,29223286	-1,053
DoubleActivity=1	20,00	9,68	15,63	0,28722111	-1,064
Breeding=yes	24,14	22,58	30,21	0,27323877	-1,096
Agri_CETA=0	29,33	70,97	78,13	0,25875199	-1,129
Turnover=Increasing	24,24	25,81	34,38	0,23266825	-1,194
Children=0	23,33	22,58	31,25	0,21575224	-1,238
Pers_forma_bis=Pas le bac	0,00	0,00	4,17	0,20380739	-1,271
Chamber_Agri=0	29,27	77,42	85,42	0,1477246	-1,448
Sale_Coop=0	21,88	22,58	33,33	0,12899639	-1,518
AgroEco_soil=3	23,81	32,26	43,75	0,12412902	-1,538
CUMA=0	25,00	45,16	58,33	0,0781431	-1,762
Contracts=no	23,40	35,48	48,96	0,07376117	-1,788
Skills=3	12,50	6,45	16,67	0,0641974	-1,851
Turnover=Decreasing	16,67	12,90	25,00	0,05997591	-1,881
Cultur_type=Mixte	8,33	3,23	12,50	0,0573148	-1,901
Direct_Selling=1	16,00	12,90	26,04	0,04309791	-2,023
AgroEco_biodiv=1	7,69	3,23	13,54	0,0390713	-2,063
Sale_TradeComp=0	21,88	45,16	66,67	0,0028805	-2,980
Irrigation=0	8,57	9,68	36,46	0,00010472	-3,879

Group 2 Average DTP - 31 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Irrig_part	4,254	37,86	22,48	23,22	24,3350608	2,10E-05
DurumWheat_Y	4,116	62,07	54,23	6,52	12,8281715	3,86E-05
Ferti_charges	3,121	151,06	111,29	95,09	85,778091	0,00180189
Annuity	1,970	49119,23	36214,29	62761,77	44088,5729	0,04881245
Pesticides_charges	1,804	94,91	73,91	87,29	78,3175865	0,07117051
DeepCultivation	1,784	37,28	27,98	37,54	35,0856031	0,07448276
Leg_part	1,221	20,44	17,19	20,12	17,8949043	0,22189887
GrainCrop_part	1,144	50,56	47,27	22,38	19,3939724	0,25253075
Farm_SGP	0,806	265734,70	242458,80	190563,63	194390,142	0,42026092
age	0,621	45,23	44,24	11,08	10,6953502	0,53481171
Farm_Area	0,364	168,65	162,50	65,01	113,567558	0,7155547
SoftWheat_Y	0,356	54,11	53,13	16,89	18,5048161	0,7218725
NoTill_part	0,189	12,35	11,57	25,17	27,774293	0,84970191
CoverCrop_part	0,059	23,62	23,38	23,42	27,2826535	0,95288969
Farm_employee	0,009	0,33	0,33	0,57	0,67990418	0,99243544
Fuel_charges	-0,114	77,59	78,32	25,13	43,3111671	0,90895422
Ploughing	-0,468	24,77	26,96	33,71	31,4022679	0,63966163
Farm_work	-0,613	1,80	1,90	1,01	1,06425865	0,54007228
IrrigMaize_Y	-0,736	94,79	97,66	25,39	26,2640475	0,46145787
Farm_inst	-1,104	2001,06	2002,86	11,41	10,9778373	0,26971573
Farm_GOS	-1,260	48352,94	55146,52	26678,79	36301,157	0,2077809
ShallowCultivation	-1,647	22,86	31,32	26,78	34,5623743	0,09955084
Meadow_part	-1,835	4,29	8,71	7,74	16,2202626	0,06644281

Group 3

Cluster DTP Group 3 Intensive DTP - 28 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p,value	v,test
Outsourcing_activity=yes	64,00	57,14	26,04	2,45E-05	4,219
Agricul_Show=1	41,67	89,29	62,50	0,00035476	3,572
MixedCrop=no	38,71	85,71	64,58	0,00496881	2,809
Cultur_type=Mixte	66,67	28,57	12,50	0,0052608	2,791
Seed=1	44,44	57,14	37,50	0,01355977	2,469
Turnover=Decreasing	50,00	42,86	25,00	0,01393957	2,459
Background=Bac+2	42,50	60,71	41,67	0,0180986	2,364
AgroEco_input=2	52,94	32,14	17,71	0,02627977	2,222
Sale_Seed=1	53,33	28,57	15,63	0,03697502	2,086
Biocontrol=1	45,83	39,29	25,00	0,04823423	1,975
GAB=0	31,82	100,00	91,67	0,05574625	1,913
Advice_Coop=yes	36,36	71,43	57,29	0,07714347	1,768
Breeding=no	34,33	82,14	69,79	0,09448396	1,672
Children=0	40,00	42,86	31,25	0,12874971	1,519
Contracts=yes	36,17	60,71	48,96	0,14872426	1,444

GDA=1	60,00	10,71	5,21	0,17086377	1,369
Sale_Coop=1	33,90	71,43	61,46	0,20769516	1,260
Sex=H	31,03	96,43	90,63	0,23565461	1,186
AgroEco_soil=1	39,13	32,14	23,96	0,24551384	1,161
Org_CropProtection=1	42,86	21,43	14,58	0,24775322	1,156
EEIG=1	40,00	28,57	20,83	0,25020642	1,150
Direct_Selling=0	32,39	82,14	73,96	0,25380529	1,141
AgroEco_biodiv=2	33,96	64,29	55,21	0,2625824	1,120
Irrigation=NA	100,00	3,57	1,04	0,29166667	1,054
AgroEco_input=1	34,04	57,14	48,96	0,31537243	1,004
Agri_CETA=1	38,10	28,57	21,88	0,32523099	0,984
Eco_opinion=neutral	34,29	42,86	36,46	0,41443912	0,816
Cultur_type=Conv	32,14	64,29	58,33	0,46114915	0,737
Chamber_Agri=0	30,49	89,29	85,42	0,52364515	0,638
Eco_opinion=negative	35,00	25,00	20,83	0,52670938	0,633
NoTill_group=0	30,00	96,43	93,75	0,55097698	0,596
Advice_Chamber=no	30,88	75,00	70,83	0,58300904	0,549
Skills=1	31,82	50,00	45,83	0,60730966	0,514
DoubleActivity=1	33,33	17,86	15,63	0,69610847	0,391
Outsourcing=no	31,25	35,71	33,33	0,75079374	0,318
CUMA=0	30,36	60,71	58,33	0,77112208	0,291
Sale_TradeComp=1	31,03	32,14	30,21	0,78838124	0,268
AgroEco_soil=2	31,58	21,43	19,79	0,78871607	0,268
TechInstitute=1	33,33	7,14	6,25	0,80211702	0,251
Irrigation=1	30,00	64,29	62,50	0,82728289	0,218
Sale_Seed=NA	33,33	3,57	3,13	0,85207167	0,186
Farmers_Union=1	30,43	25,00	23,96	0,86883682	0,165
Sale_TradeComp=0	29,69	67,86	66,67	0,88555308	0,144
Farmers_Union=0	28,77	75,00	76,04	0,86883682	-0,165
AgroEco_biodiv=4	26,67	14,29	15,63	0,84550064	-0,195
AgroEco_biodiv=3	26,67	14,29	15,63	0,84550064	-0,195
Skills=2	27,78	35,71	37,50	0,82728289	-0,218
TechInstitute=0	28,89	92,86	93,75	0,80211702	-0,251
Advice_Chamber=yes	26,92	25,00	27,08	0,78633192	-0,271
Turnover=Increasing	27,27	32,14	34,38	0,78101736	-0,278
CUMA=1	27,50	39,29	41,67	0,77112208	-0,291
Outsourcing=yes	28,13	64,29	66,67	0,75079374	-0,318
Skills=3	25,00	14,29	16,67	0,71811877	-0,361
Turnover=NA	20,00	3,57	5,21	0,71413831	-0,366
MixedCrop=NA	0,00	0,00	1,04	0,70833333	-0,374
DoubleActivity=0	28,40	82,14	84,38	0,69610847	-0,391
Irrigation=0	25,71	32,14	36,46	0,58771596	-0,542
AgroEco_soil=3	26,19	39,29	43,75	0,58344698	-0,548
NoTill_group=1	16,67	3,57	6,25	0,55097698	-0,596
Sale_Coop=0	25,00	28,57	33,33	0,54171434	-0,610
Background= >Bac2	24,00	21,43	26,04	0,52913436	-0,629
Chamber_Agri=1	21,43	10,71	14,58	0,52364515	-0,638
Contracts=NA	0,00	0,00	2,08	0,4995614	-0,675

Advice_Chamber=NA	0,00	0,00	2,08	0,4995614	-0,675
Eco_opinion=positive	23,68	32,14	39,58	0,35193149	-0,931
Eco_opinion=NA	0,00	0,00	3,13	0,35075588	-0,933
Sale_TradeComp=NA	0,00	0,00	3,13	0,35075588	-0,933
AgroEco_soil=4	16,67	7,14	12,50	0,33669002	-0,961
Agri_CETA=0	26,67	71,43	78,13	0,32523099	-0,984
AgroEco_biodiv=1	15,38	7,14	13,54	0,26014456	-1,126
Direct_Selling=1	20,00	17,86	26,04	0,25380529	-1,141
EEIG=0	26,32	71,43	79,17	0,25020642	-1,150
Org_CropProtection=0	26,83	78,57	85,42	0,24775322	-1,156
Sex=F	11,11	3,57	9,38	0,23565461	-1,186
Contracts=no	23,40	39,29	48,96	0,23499581	-1,188
GDA=0	27,47	89,29	94,79	0,17086377	-1,369
Sale_Coop=NA	0,00	0,00	5,21	0,17054049	-1,370
Children=1	24,24	57,14	68,75	0,12874971	-1,519
Breeding=yes	17,24	17,86	30,21	0,09448396	-1,672
Advice_Coop=no	19,51	28,57	42,71	0,07714347	-1,768
Turnover=Stable	17,65	21,43	35,42	0,06891002	-1,819
GAB=1	0,00	0,00	8,33	0,05574625	-1,913
Background= <Bac2	16,13	17,86	32,29	0,05373408	-1,929
Biocontrol=0	23,61	60,71	75,00	0,04823423	-1,975
Sale_Seed=0	24,36	67,86	81,25	0,04266231	-2,027
Seed=0	20,00	42,86	62,50	0,01355977	-2,469
MixedCrop=yes	12,12	14,29	34,38	0,00723425	-2,686
AgroEco_input=3	9,38	10,71	33,33	0,00201471	-3,088
Cultur_type=Bio	7,14	7,14	29,17	0,0015674	-3,162
Agricul_Show=0	8,33	10,71	37,50	0,00035476	-3,572
Outsourcing_activity=no	16,90	42,86	73,96	2,45E-05	-4,219

Cluster DTP						
Description du Group 3 NumProd_intens - 28 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Farm_Area	4,584	245,74	162,50	144,06	113,57	4,56E-06
SoftWheat_Y	3,546	63,63	53,13	13,00	18,50	0,00039063
Pesticides_charges	3,133	113,14	73,91	65,60	78,32	0,00173192
Ferti_charges	3,034	152,89	111,29	57,36	85,78	0,00241682
Farm_SGP	2,753	328021,22	242458,80	172031,02	194390,14	0,00590645
Farm_work	2,495	2,32	1,90	1,30	1,06	0,01259548
Farm_employee	2,388	0,59	0,33	0,92	0,68	0,01693881
Farm_GOS	2,015	66839,33	55146,52	41218,84	36301,16	0,04394844
DurumWheat_Y	1,778	57,88	54,23	5,99	12,83	0,07532843
DeepCultivation	1,366	35,64	27,98	34,21	35,09	0,17187007
Annuity	1,066	43730,00	36214,29	32814,40	44088,57	0,28634223
Fuel_charges	1,016	85,36	78,32	42,35	43,31	0,30962013
Farm_inst	0,789	2004,25	2002,86	9,28	10,98	0,42992832
GrainCrop_part	0,648	49,28	47,27	15,76	19,39	0,51692687
Ploughing	0,186	27,89	26,96	26,91	31,40	0,85234304

Irrig_part	0,134	23,00	22,48	25,97	24,34	0,89372405
ShallowCultivation	-0,458	28,79	31,32	33,58	34,56	0,64662878
IrrigMaize_Y	-0,470	95,69	97,66	34,30	26,26	0,63837522
CoverCrop_part	-0,674	20,44	23,38	25,80	27,28	0,50020384
NoTill_part	-1,038	6,96	11,57	22,68	27,77	0,29936138
Meadow_part	-1,295	5,36	8,71	13,14	16,22	0,1954646
Leg_part	-1,802	12,04	17,19	13,68	17,89	0,07160027
age	-1,957	40,89	44,24	10,06	10,70	0,0503365

Tests for Digital Technology for Information and Communication clusters

Cluster DTC			
Group	1	2	3
Group nom	No_DTC	Website DTC	Network DTC
Total population	22	39	35
Percentage	22,92%	40,63%	36,46%

Chi2 test (Cluster DTC)		
Variables	p.value	df
Seed	0,00619252	2
Sale_Seed	0,01198486	4
Skills	0,01525052	4
Agri_CETA	0,0369033	2
Farmers_Union	0,04208899	2
Irrigation	0,08807303	4
Children	0,09192993	2
Background	0,10438153	4
AgroEco_soil	0,13746769	6
NoTill_group	0,16416976	2
EEIG	0,18545509	2
Advice_Coop	0,20712475	2
Contracts	0,20725712	4
GAB	0,21974561	2
DoubleActivity	0,26598491	2
Eco_opinion	0,34546762	6
MixedCrop	0,41203163	4
Cultur_type	0,41887058	4
Advice_Chamber	0,42604627	4
CUMA	0,45602393	2
Sale_Coop	0,46100437	4
Org_CropProtection	0,53787743	2
AgroEco_biodiv	0,57230263	6
Agricul_Show	0,5843793	2
Chamber_Agri	0,60685229	2
Outsourcing_activity	0,61453408	2
TechInstitute	0,63798378	2
Breeding	0,64861822	2

Student Test (Cluster DTC)		
Variables	Eta2	P-value
age	0,090	0,01220116
Farm_inst	0,077	0,02438451
Leg_part	0,063	0,0550706
NoTill_part	0,054	0,07556118
Irrig_part	0,052	0,08388311
Pesticides_charges	0,068	0,10267098
Ploughing	0,045	0,11667332
DurumWheat_Y	0,063	0,39147774
Annuity	0,022	0,43974277
SoftWheat_Y	0,020	0,45007621
GrainCrop_part	0,017	0,45870042
CoverCrop_part	0,012	0,58954601
IrrigMaize_Y	0,036	0,61843004
Farm_Area	0,010	0,62534438
Meadow_part	0,010	0,63159571
Farm_SGP	0,009	0,66889684
Farm_work	0,008	0,69714985
DeepCultivation	0,007	0,71015934
ShallowCultivation	0,007	0,72467095
Farm_GOS	0,009	0,78191229
Ferti_charges	0,005	0,85779467
Fuel_charges	0,004	0,85918071
Farm_employee	0,002	0,89378525

Outsourcing	0,65658423	2	
Turnover	0,72154451	6	
GDA	0,79109314	2	
Sale_TradeComp	0,80327977	4	
AgroEco_input	0,88826966	4	
Direct_Selling	0,89484669	2	
Biocontrol	0,92911155	2	
Sex	0,9683359	2	

Group 1

Cluster DTC Group 1 No-DTC - 22 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p,value	v,test
AgroEco_soil=1	43,48	45,45	23,96	0,01221623	2,506
Agri_CETA=0	28,38	95,45	77,08	0,01522853	2,427
Skills=3	43,75	31,82	16,67	0,04611869	1,994
Seed=1	34,29	54,55	36,46	0,05378726	1,929
Sale_Seed=1	42,86	27,27	14,58	0,07833084	1,760
Advice_Coop=yes	29,63	72,73	56,25	0,08150772	1,742
GAB=0	25,00	100,00	91,67	0,11366033	1,582
MixedCrop=no	27,87	77,27	63,54	0,13455539	1,496
Sale_Seed=NA	66,67	9,09	3,13	0,14119541	1,471
Cultur_type=Conv	28,07	72,73	59,38	0,15536095	1,421
EEIG=0	25,97	90,91	80,21	0,15897468	1,409
AgroEco_biodiv=2	28,30	68,18	55,21	0,17392543	1,360
Background=Bac+2	30,00	54,55	41,67	0,17647683	1,352
Sale_Coop=1	27,12	72,73	61,46	0,22808977	1,205
Children=0	31,03	40,91	30,21	0,23094012	1,198
CUMA=0	27,27	68,18	57,29	0,25247965	1,144
NoTill_group=0	24,18	100,00	94,79	0,2635421	1,118
Eco_opinion=neutral	28,57	45,45	36,46	0,33270802	0,969
Background= <Bac2	29,03	40,91	32,29	0,33997257	0,954
Contracts=yes	27,08	59,09	50,00	0,3455772	0,943
Sale_Coop=NA	40,00	9,09	5,21	0,39965785	0,842
DoubleActivity=1	31,25	22,73	16,67	0,40266822	0,837
Breeding=no	25,37	77,27	69,79	0,40374017	0,835
Outsourcing_activity=yes	29,17	31,82	25,00	0,4137732	0,817
Sale_TradeComp=0	25,40	72,73	65,63	0,4430038	0,767
Contracts=NA	50,00	4,55	2,08	0,45833333	0,742
Advice_Chamber=no	25,00	77,27	70,83	0,47102997	0,721
Turnover=Increasing	27,27	40,91	34,38	0,47299632	0,718
AgroEco_input=2	29,41	22,73	17,71	0,49252429	0,686
Turnover=Stable	26,47	40,91	35,42	0,54748088	0,602
Agricul_Show=1	25,00	68,18	62,50	0,54847304	0,600
Farmers_Union=1	27,27	27,27	22,92	0,58303827	0,549
Chamber_Agri=1	28,57	18,18	14,58	0,58819115	0,541
Irrigation=0	25,71	40,91	36,46	0,62643702	0,487

Eco_opinion=NA	33,33	4,55	3,13	0,67672172	0,417
AgroEco_biodiv=4	26,67	18,18	15,63	0,6987258	0,387
Direct_Selling=0	23,94	77,27	73,96	0,71247337	0,369
Biocontrol=1	25,00	27,27	25,00	0,77143285	0,291
Org_CropProtection=0	23,46	86,36	84,38	0,80921173	0,241
GDA=1	25,00	4,55	4,17	0,87795759	0,154
Outsourcing=yes	23,44	68,18	66,67	0,8794467	0,152
AgroEco_input=1	23,40	50,00	48,96	0,91342193	0,109
TechInstitute=0	23,08	95,45	94,79	0,94122177	0,074
Sex=H	22,99	90,91	90,63	0,99741414	0,003
Sex=F	22,22	9,09	9,38	0,99741414	-0,003
Turnover=NA	20,00	4,55	5,21	0,94122177	-0,074
TechInstitute=1	20,00	4,55	5,21	0,94122177	-0,074
Outsourcing=no	21,88	31,82	33,33	0,8794467	-0,152
GDA=0	22,83	95,45	95,83	0,87795759	-0,154
Org_CropProtection=1	20,00	13,64	15,63	0,80921173	-0,241
Biocontrol=0	22,22	72,73	75,00	0,77143285	-0,291
Irrigation=NA	0,00	0,00	1,04	0,77083333	-0,291
MixedCrop=NA	0,00	0,00	1,04	0,77083333	-0,291
AgroEco_soil=2	20,00	18,18	20,83	0,75886771	-0,307
Advice_Chamber=yes	20,00	22,73	26,04	0,71247337	-0,369
Direct_Selling=1	20,00	22,73	26,04	0,71247337	-0,369
Irrigation=1	21,67	59,09	62,50	0,7090752	-0,373
Sale_TradeComp=1	20,00	27,27	31,25	0,66810952	-0,429
Eco_opinion=positive	20,51	36,36	40,63	0,65808568	-0,443
Skills=1	20,45	40,91	45,83	0,61057364	-0,509
Chamber_Agri=0	21,95	81,82	85,42	0,58819115	-0,541
Farmers_Union=0	21,62	72,73	77,08	0,58303827	-0,549
Agricul_Show=0	19,44	31,82	37,50	0,54847304	-0,600
AgroEco_biodiv=1	15,38	9,09	13,54	0,5302826	-0,628
AgroEco_input=3	18,75	27,27	33,33	0,51216203	-0,655
AgroEco_soil=3	19,51	36,36	42,71	0,50874293	-0,661
Cultur_type=Bio	17,86	22,73	29,17	0,47102997	-0,721
Sale_TradeComp=NA	0,00	0,00	3,13	0,45369541	-0,749
Advice_Chamber=NA	0,00	0,00	3,13	0,45369541	-0,749
Eco_opinion=negative	15,79	13,64	19,79	0,43784624	-0,776
Outsourcing_activity=no	20,83	68,18	75,00	0,4137732	-0,817
Breeding=yes	17,24	22,73	30,21	0,40374017	-0,835
DoubleActivity=0	21,25	77,27	83,33	0,40266822	-0,837
Cultur_type=Mixte	9,09	4,55	11,46	0,27401071	-1,094
Skills=2	16,67	27,27	37,50	0,27273196	-1,097
NoTill_group=1	0,00	0,00	5,21	0,2635421	-1,118
CUMA=1	17,07	31,82	42,71	0,25247965	-1,144
Children=1	19,40	59,09	69,79	0,23094012	-1,198
Contracts=no	17,39	36,36	47,92	0,22938731	-1,202
Turnover=Decreasing	12,50	13,64	25,00	0,16918855	-1,375
MixedCrop=yes	14,71	22,73	35,42	0,16504707	-1,388
EEIG=1	10,53	9,09	19,79	0,15897468	-1,409

GAB=1	0,00	0,00	8,33	0,11366033	-1,582
AgroEco_biodiv=3	6,67	4,55	15,63	0,10457556	-1,623
Sale_Coop=0	12,50	18,18	33,33	0,08933465	-1,699
Advice_Coop=no	14,29	27,27	43,75	0,08150772	-1,742
Seed=0	16,39	45,45	63,54	0,05378726	-1,929
AgroEco_soil=4	0,00	0,00	12,50	0,03512913	-2,107
Sale_Seed=0	17,72	63,64	82,29	0,01698929	-2,387
Agri_CETA=1	4,55	4,55	22,92	0,01522853	-2,427
Background= >Bac2	4,00	4,55	26,04	0,00606292	-2,744

Cluster DTC Group 1 No-DTC - 22 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Pesticides_charges	2,037	96,23	69,49	78,47	69,79	0,04166585
Ploughing	1,875	37,95	26,85	36,58	31,46	0,06075794
GrainCrop_part	1,200	51,97	47,56	26,00	19,52	0,23022989
Farm_Area	0,822	174,41	157,55	122,57	109,06	0,41130944
Farm_SGP	0,724	256857,58	232415,91	206245,09	179347,64	0,46890801
DeepCultivation	0,680	33,29	28,77	33,96	35,35	0,4968062
Fuel_charges	0,614	81,86	76,89	65,62	42,99	0,53952249
Ferti_charges	0,491	114,95	107,52	85,94	80,35	0,62329348
SoftWheat_Y	0,431	54,50	53,01	17,36	18,35	0,66643285
age	0,370	44,91	44,16	13,37	10,81	0,71120542
Irrig_part	0,340	24,50	22,91	30,05	24,80	0,73359864
Farm_GOS	0,156	56783,33	55722,89	26666,30	36083,66	0,87588923
Annuity	-0,320	31546,67	33590,91	40488,71	33970,47	0,74911452
Farm_employee	-0,475	0,25	0,31	0,42	0,66	0,63490929
Farm_work	-0,486	1,75	1,84	0,72	0,98	0,62680185
IrrigMaize_Y	-0,570	97,14	100,06	30,46	27,23	0,56880784
ShallowCultivation	-0,576	26,71	30,45	33,52	34,45	0,56474057
Meadow_part	-0,964	5,86	8,81	14,32	16,28	0,33522052
CoverCrop_part	-1,048	18,36	23,79	22,81	27,49	0,29453686
Leg_part	-1,466	12,56	17,49	15,84	17,86	0,14252648
Farm_inst	-1,775	1999,41	2003,11	13,62	11,09	0,07581672
DurumWheat_Y	-1,953	49,70	54,52	15,70	13,10	0,05077267
NoTill_part	-2,225	0,23	11,86	1,04	27,80	0,0260941

Group 2

Cluster DTC Group 2 Website DTC - 39 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p,value	v,test
Sale_Seed=0	48,10	97,44	82,29	0,00081421	3,348
Seed=0	52,46	82,05	63,54	0,0018389	3,115
Skills=2	58,33	53,85	37,50	0,00745142	2,676
Farmers_Union=0	47,30	89,74	77,08	0,0146725	2,440
Contracts=no	52,17	61,54	47,92	0,03003032	2,170

Children=1	47,76	82,05	69,79	0,03214634	2,143
Irrigation=0	54,29	48,72	36,46	0,04392446	2,015
Agri_CETA=1	59,09	33,33	22,92	0,05227836	1,941
Background= >Bac2	56,00	35,90	26,04	0,07769155	1,764
NoTill_group=1	80,00	10,26	5,21	0,09554046	1,667
AgroEco_soil=4	58,33	17,95	12,50	0,20432604	1,269
GAB=1	62,50	12,82	8,33	0,21973751	1,227
Cultur_type=Bio	50,00	35,90	29,17	0,24264988	1,168
Advice_Chamber=no	44,12	76,92	70,83	0,2896084	1,059
Org_CropProtection=1	53,33	20,51	15,63	0,29469511	1,048
AgroEco_biodiv=3	53,33	20,51	15,63	0,29469511	1,048
AgroEco_biodiv=1	53,85	17,95	13,54	0,31806029	0,998
Agricul_Show=0	47,22	43,59	37,50	0,31899056	0,997
Chamber_Agri=0	42,68	89,74	85,42	0,34178822	0,951
Eco_opinion=positive	46,15	46,15	40,63	0,37205123	0,893
Sale_Coop=0	46,88	38,46	33,33	0,38892133	0,862
Outsourcing=no	46,88	38,46	33,33	0,38892133	0,862
AgroEco_input=3	46,88	38,46	33,33	0,38892133	0,862
TechInstitute=1	60,00	7,69	5,21	0,41086882	0,822
Outsourcing_activity=no	43,06	79,49	75,00	0,41607461	0,813
DoubleActivity=1	50,00	20,51	16,67	0,41903849	0,808
Eco_opinion=NA	66,67	5,13	3,13	0,42353723	0,800
Sale_TradeComp=NA	66,67	5,13	3,13	0,42353723	0,800
Advice_Coop=no	45,24	48,72	43,75	0,42694757	0,794
Turnover=Decreasing	45,83	28,21	25,00	0,55723621	0,587
GDA=0	41,30	97,44	95,83	0,5813315	0,551
MixedCrop=yes	44,12	38,46	35,42	0,61260064	0,506
Direct_Selling=1	44,00	28,21	26,04	0,6938602	0,394
Sale_TradeComp=1	43,33	33,33	31,25	0,71946023	0,359
EEIG=0	41,56	82,05	80,21	0,72365692	0,354
Biocontrol=0	41,67	76,92	75,00	0,73163929	0,343
Turnover=Increasing	42,42	35,90	34,38	0,797058	0,257
Sex=F	44,44	10,26	9,38	0,80731234	0,244
CUMA=1	41,46	43,59	42,71	0,88635514	0,143
AgroEco_soil=3	41,46	43,59	42,71	0,88635514	0,143
Breeding=yes	41,38	30,77	30,21	0,91906781	0,102
Sale_Coop=NA	40,00	5,13	5,21	0,9957887	-0,005
AgroEco_biodiv=4	40,00	15,38	15,63	0,96801039	-0,040
AgroEco_soil=2	40,00	20,51	20,83	0,95765366	-0,053
Eco_opinion=neutral	40,00	35,90	36,46	0,92930225	-0,089
Breeding=no	40,30	69,23	69,79	0,91906781	-0,102
CUMA=0	40,00	56,41	57,29	0,88635514	-0,143
Advice_Chamber=NA	33,33	2,56	3,13	0,84521277	-0,195
Sex=H	40,23	89,74	90,63	0,80731234	-0,244
Cultur_type=Mixte	36,36	10,26	11,46	0,78262829	-0,276
MixedCrop=no	39,34	61,54	63,54	0,73964817	-0,332
Turnover=Stable	38,24	33,33	35,42	0,73300683	-0,341
Biocontrol=1	37,50	23,08	25,00	0,73163929	-0,343

EEIG=1	36,84	17,95	19,79	0,72365692	-0,354
Direct_Selling=0	39,44	71,79	73,96	0,6938602	-0,394
AgroEco_input=1	38,30	46,15	48,96	0,65671676	-0,444
AgroEco_input=2	35,29	15,38	17,71	0,64088684	-0,466
Background=Bac+2	37,50	38,46	41,67	0,60765638	-0,513
Irrigation=NA	0,00	0,00	1,04	0,59375	-0,533
MixedCrop=NA	0,00	0,00	1,04	0,59375	-0,533
GDA=1	25,00	2,56	4,17	0,5813315	-0,551
Sale_TradeComp=0	38,10	61,54	65,63	0,49481134	-0,683
Advice_Coop=yes	37,04	51,28	56,25	0,42694757	-0,794
Skills=3	31,25	12,82	16,67	0,42366364	-0,800
DoubleActivity=0	38,75	79,49	83,33	0,41903849	-0,808
Outsourcing_activity=yes	33,33	20,51	25,00	0,41607461	-0,813
TechInstitute=0	39,56	92,31	94,79	0,41086882	-0,822
Sale_Coop=1	37,29	56,41	61,46	0,41079558	-0,822
Turnover=NA	20,00	2,56	5,21	0,3890383	-0,861
Outsourcing=yes	37,50	61,54	66,67	0,38892133	-0,862
Cultur_type=Conv	36,84	53,85	59,38	0,37205123	-0,893
Contracts=NA	0,00	0,00	2,08	0,35	-0,935
Chamber_Agri=1	28,57	10,26	14,58	0,34178822	-0,951
Advice_Chamber=yes	32,00	20,51	26,04	0,32073937	-0,993
Agricul_Show=1	36,67	56,41	62,50	0,31899056	-0,997
Org_CropProtection=0	38,27	79,49	84,38	0,29469511	-1,048
AgroEco_soil=1	30,43	17,95	23,96	0,26679969	-1,110
Background= <Bac2	32,26	25,64	32,29	0,25992871	-1,127
GAB=0	38,64	87,18	91,67	0,21973751	-1,227
Sale_Seed=NA	0,00	0,00	3,13	0,20478723	-1,268
Eco_opinion=negative	26,32	12,82	19,79	0,1665072	-1,384
AgroEco_biodiv=2	33,96	46,15	55,21	0,14862127	-1,444
NoTill_group=0	38,46	89,74	94,79	0,09554046	-1,667
Irrigation=1	33,33	51,28	62,50	0,06670054	-1,834
Contracts=yes	31,25	38,46	50,00	0,06646263	-1,835
Agri_CETA=0	35,14	66,67	77,08	0,05227836	-1,941
Skills=1	29,55	33,33	45,83	0,04555078	-2,000
Children=0	24,14	17,95	30,21	0,03214634	-2,143
Farmers_Union=1	18,18	10,26	22,92	0,0146725	-2,440
Sale_Seed=1	7,14	2,56	14,58	0,00463329	-2,831
Seed=1	20,00	17,95	36,46	0,0018389	-3,115

Cluster DTC Group 2 Website DTC - 39 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
age	2,428	47,41	44,16	9,47	10,81	0,01519487
Leg_part	2,426	22,87	17,49	20,56	17,86	0,0152605
IrrigMaize_Y	2,285	107,78	100,06	22,12	27,23	0,02232762
DurumWheat_Y	1,657	57,21	54,52	11,74	13,10	0,09751649
NoTill_part	1,385	16,64	11,86	35,27	27,80	0,16596066

Meadow_part	0,458	9,73	8,81	17,04	16,28	0,64696415
CoverCrop_part	0,319	24,87	23,79	31,50	27,49	0,7499837
Farm_employee	0,268	0,33	0,31	0,60	0,66	0,78852501
Ploughing	-0,061	26,62	26,85	29,79	31,46	0,95120311
GrainCrop_part	-0,245	46,97	47,56	15,56	19,52	0,80660254
ShallowCultivation	-0,267	29,31	30,45	34,21	34,45	0,78978311
Farm_work	-0,410	1,79	1,84	0,87	0,98	0,68152279
Fuel_charges	-0,519	74,13	76,89	31,63	42,99	0,60386699
Ferti_charges	-0,641	101,13	107,52	87,54	80,35	0,5212223
DeepCultivation	-0,748	25,49	28,77	36,91	35,35	0,45456484
Farm_SGP	-0,810	214394,05	232415,91	196657,14	179347,64	0,41785915
Farm_Area	-0,842	146,16	157,55	114,22	109,06	0,39967604
Farm_GOS	-0,898	51705,78	55722,89	35094,90	36083,66	0,36942403
Farm_inst	-1,015	2001,72	2003,11	9,83	11,09	0,31000679
Annuity	-1,067	29097,06	33590,91	32986,70	33970,47	0,28618334
SoftWheat_Y	-1,384	49,86	53,01	19,87	18,35	0,16646339
Irrig_part	-2,099	16,46	22,91	19,86	24,80	0,03581627
Pesticides_charges	-2,332	49,30	69,49	54,12	69,79	0,01970266

Group 3

Cluster DTC Group 3 Network DTC - 35 farms					
Variables	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	p,value	v,test
Skills=1	50,00	62,86	45,83	0,01286745	2,487
Irrigation=1	45,00	77,14	62,50	0,02615261	2,224
Eco_opinion=negative	57,89	31,43	19,79	0,03832507	2,071
Farmers_Union=1	54,55	34,29	22,92	0,05378726	1,929
DoubleActivity=0	40,00	91,43	83,33	0,1134153	1,583
EEIG=1	52,63	28,57	19,79	0,1169029	1,568
Seed=1	45,71	45,71	36,46	0,16432691	1,391
Advice_Chamber=yes	48,00	34,29	26,04	0,17719969	1,349
Cultur_type=Mixte	54,55	17,14	11,46	0,21148591	1,249
Children=0	44,83	37,14	30,21	0,27533397	1,091
Sale_Seed=1	50,00	20,00	14,58	0,27632558	1,089
Contracts=yes	41,67	57,14	50,00	0,29975408	1,037
Turnover=NA	60,00	8,57	5,21	0,31108098	1,013
Advice_Chamber=NA	66,67	5,71	3,13	0,3456397	0,943
Irrigation=NA	100,00	2,86	1,04	0,36458333	0,907
MixedCrop=NA	100,00	2,86	1,04	0,36458333	0,907
CUMA=1	41,46	48,57	42,71	0,38960315	0,860
Org_CropProtection=0	38,27	88,57	84,38	0,41452162	0,816
Outsourcing=yes	39,06	71,43	66,67	0,46688941	0,728
Advice_Coop=no	40,48	48,57	43,75	0,48024797	0,706
MixedCrop=yes	41,18	40,00	35,42	0,48609251	0,697
NoTill_group=0	37,36	97,14	94,79	0,49347535	0,685
TechInstitute=0	37,36	97,14	94,79	0,49347535	0,685
Breeding=yes	41,38	34,29	30,21	0,51835799	0,646

Turnover=Decreasing	41,67	28,57	25,00	0,5483697	0,600
Sale_Coop=0	40,63	37,14	33,33	0,55614456	0,589
Chamber_Agri=1	42,86	17,14	14,58	0,59867253	0,526
GDA=1	50,00	5,71	4,17	0,59966405	0,525
Agricul_Show=1	38,33	65,71	62,50	0,63335168	0,477
AgroEco_soil=3	39,02	45,71	42,71	0,65807559	0,443
Background= >Bac2	40,00	28,57	26,04	0,67225409	0,423
AgroEco_soil=4	41,67	14,29	12,50	0,69198648	0,396
AgroEco_soil=2	40,00	22,86	20,83	0,71294263	0,368
AgroEco_input=1	38,30	51,43	48,96	0,7198863	0,359
Contracts=NA	50,00	2,86	2,08	0,72916667	0,346
Background= <Bac2	38,71	34,29	32,29	0,75330114	0,314
AgroEco_biodiv=3	40,00	17,14	15,63	0,7553865	0,312
AgroEco_biodiv=2	37,74	57,14	55,21	0,77932354	0,280
Sex=H	36,78	91,43	90,63	0,86645566	0,168
Outsourcing_activity=yes	37,50	25,71	25,00	0,89752406	0,129
Biocontrol=1	37,50	25,71	25,00	0,89752406	0,129
GAB=1	37,50	8,57	8,33	0,93333419	0,084
Direct_Selling=0	36,62	74,29	73,96	0,964995	0,044
Sale_TradeComp=1	36,67	31,43	31,25	0,97198301	0,035
Sale_TradeComp=0	36,51	65,71	65,63	0,99391524	0,008
Agri_CETA=0	36,49	77,14	77,08	0,99891945	0,001
Agri_CETA=1	36,36	22,86	22,92	0,99891945	-0,001
Direct_Selling=1	36,00	25,71	26,04	0,964995	-0,044
Sale_Seed=NA	33,33	2,86	3,13	0,95205767	-0,060
Sale_TradeComp=NA	33,33	2,86	3,13	0,95205767	-0,060
GAB=0	36,36	91,43	91,67	0,93333419	-0,084
AgroEco_input=2	35,29	17,14	17,71	0,92771614	-0,091
Outsourcing_activity=no	36,11	74,29	75,00	0,89752406	-0,129
Biocontrol=0	36,11	74,29	75,00	0,89752406	-0,129
Turnover=Stable	35,29	34,29	35,42	0,8684329	-0,166
Sex=F	33,33	8,57	9,38	0,86645566	-0,168
Sale_Coop=1	35,59	60,00	61,46	0,82508623	-0,221
AgroEco_biodiv=4	33,33	14,29	15,63	0,80565197	-0,246
AgroEco_input=3	34,38	31,43	33,33	0,77476657	-0,286
Cultur_type=Conv	35,09	57,14	59,38	0,73964817	-0,332
AgroEco_biodiv=1	30,77	11,43	13,54	0,67413935	-0,420
Agricul_Show=0	33,33	34,29	37,50	0,63335168	-0,477
Eco_opinion=positive	33,33	37,14	40,63	0,60928123	-0,511
GDA=0	35,87	94,29	95,83	0,59966405	-0,525
Chamber_Agri=0	35,37	82,86	85,42	0,59867253	-0,526
Cultur_type=Bio	32,14	25,71	29,17	0,58771596	-0,542
Breeding=no	34,33	65,71	69,79	0,51835799	-0,646
Background=Bac+2	32,50	37,14	41,67	0,50710882	-0,663
Sale_Coop=NA	20,00	2,86	5,21	0,49347535	-0,685
NoTill_group=1	20,00	2,86	5,21	0,49347535	-0,685
TechInstitute=1	20,00	2,86	5,21	0,49347535	-0,685
Advice_Coop=yes	33,33	51,43	56,25	0,48024797	-0,706

Outsourcing=no	31,25	28,57	33,33	0,46688941	-0,728
Eco_opinion=neutral	31,43	31,43	36,46	0,4505883	-0,754
Org_CropProtection=1	26,67	11,43	15,63	0,41452162	-0,816
CUMA=0	32,73	51,43	57,29	0,38960315	-0,860
Turnover=Increasing	30,30	28,57	34,38	0,37718487	-0,883
MixedCrop=no	32,79	57,14	63,54	0,33523072	-0,964
Sale_Seed=0	34,18	77,14	82,29	0,33440574	-0,965
Skills=3	25,00	11,43	16,67	0,31604226	-1,003
Children=1	32,84	62,86	69,79	0,27533397	-1,091
Eco_opinion=NA	0,00	0,00	3,13	0,2518897	-1,146
Contracts=no	30,43	40,00	47,92	0,24979909	-1,151
AgroEco_soil=1	26,09	17,14	23,96	0,2484577	-1,154
Seed=0	31,15	54,29	63,54	0,16432691	-1,391
EEIG=0	32,47	71,43	80,21	0,1169029	-1,568
DoubleActivity=1	18,75	8,57	16,67	0,1134153	-1,583
Advice_Chamber=no	30,88	60,00	70,83	0,0867718	-1,713
Skills=2	25,00	25,71	37,50	0,07503472	-1,780
Farmers_Union=0	31,08	65,71	77,08	0,05378726	-1,929
Irrigation=0	20,00	20,00	36,46	0,01150902	-2,527

Cluster DTC Group 3 Network DTC - 35 farms						
Variables	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Farm_inst	2,586	2007,00	2003,11	9,34	11,09	0,0097004
Irrig_part	1,899	29,29	22,91	24,32	24,80	0,05757954
Annuity	1,424	40142,86	33590,91	30071,30	33970,47	0,15445609
SoftWheat_Y	0,959	55,39	53,01	16,73	18,35	0,33776502
DurumWheat_Y	0,893	56,10	54,52	10,16	13,10	0,37194767
Farm_work	0,843	1,95	1,84	1,20	0,98	0,39903202
ShallowCultivation	0,774	34,06	30,45	34,95	34,45	0,43886509
Farm_GOS	0,741	59344,18	55722,89	40833,10	36083,66	0,45872963
CoverCrop_part	0,582	25,95	23,79	24,88	27,49	0,56065502
NoTill_part	0,529	13,86	11,86	24,86	27,80	0,59666241
Meadow_part	0,398	9,68	8,81	16,37	16,28	0,69099737
Pesticides_charges	0,394	73,21	69,49	71,83	69,79	0,69345915
DeepCultivation	0,202	29,74	28,77	33,97	35,35	0,83955769
Ferti_charges	0,201	109,71	107,52	68,69	80,35	0,84079253
Farm_SGP	0,194	237134,06	232415,91	132794,66	179347,64	0,84599877
Farm_Area	0,142	159,65	157,55	91,19	109,06	0,88712439
Farm_employee	0,141	0,32	0,31	0,82	0,66	0,88792086
Fuel_charges	0,018	77,00	76,89	37,07	42,99	0,98573288
GrainCrop_part	-0,853	45,31	47,56	18,04	19,52	0,39365108
IrrigMaize_Y	-1,022	96,29	100,06	27,48	27,23	0,30666996
Leg_part	-1,133	14,75	17,49	13,84	17,86	0,25726991
Ploughing	-1,575	20,14	26,85	27,60	31,46	0,11523771
age	-2,801	40,06	44,16	8,90	10,81	0,00510187

5 Précisions sur les usages de certaines technologies numériques

Je précise ici les détails d'usages de quatre technologies, au cœur des enjeux de digitalisation, mais aussi présentées comme favorables à l'écologisation de l'agriculture.

Les différents chapitres précédents ont montré que i) une technologie n'est pas qu'un objet matériel mais implique des changements dans les connaissances, les pratiques, l'organisation ; ii) il existe une diversité d'attentes, de risques perçus, de pratiques autour du numérique ; iii) l'usage du numérique dépend de facteurs institutionnels, sociaux et économiques et iv) les objets techniques subissent des destins différenciés, au-delà d'une simple construction sociale. De ce fait, derrière l'utilisation d'une même technologie, se rassemblent une diversité de motivations, de types d'usage, de changements, de réarrangements, d'apprentissages etc. Par ailleurs, les usages construisent de nouvelles manières de faire et de penser, qui participent à faire évoluer les institutions de la société.

Je présente ici quatre technologies : La première, le logiciel de gestion parcellaire, est la technologie numérique la plus répandue dans mon échantillon, elle existe depuis longtemps donc les utilisateurs ont déjà construit des routines d'utilisation, et elle est centrale dans le processus de digitalisation, car elle sert souvent d'interface à d'autres services numériques. La deuxième, le guidage, est également une technologie répandue et assez ancienne, qui a connu un fort succès dans les exploitations françaises. La troisième, la modulation, est une technologie caractéristique de ce qui est appelé « agriculture de précision », promue pour ses potentiels bénéfices économiques et environnementaux, mais dont les usages en France stagnent, voire diminuent. La quatrième est internet, dont l'usage pour s'informer est présenté comme ayant un fort potentiel pour la transition agroécologique. Pour plus de détail, des « fiches technologies », visibles en Annexe X dans le rapport, présentent les objectifs qu'avaient les agriculteurs en adoptant cette technologie, la date d'adoption médiane, comment ils en ont eu connaissance, qui leur fournit la technologie, qui sont les utilisateurs, comment ils l'utilisent, quel est son coût, comment elle joue sur leurs pratiques et leur organisation, et quels avantages et inconvénients sont vus pour leur usage.

Le logiciel de gestion parcellaire

Le logiciel de gestion répond avant tout à une logique réglementaire et administrative, puisque les agriculteurs ont l'obligation de tracer leurs apports de produits phytosanitaires et d'engrais, et qu'il peut être utilisé pour faire les plans de fumure ou pour transférer des données lors de la télédéclaration PAC. Le logiciel permet de réaliser ses enregistrements, mais permet aussi d'accéder à de l'information réglementaire, puisque le logiciel va indiquer si une intervention est interdite (dose trop élevée ou date non autorisée par exemple). Il sert aussi d'outil d'analyse économique, ou d'outil d'analyse technique. Ainsi, des agriculteurs s'en servent pour faire des analyses de leur historique, seuls, avec d'autres agriculteurs ou avec des conseillers. De ce fait, l'utilisation du logiciel de gestion parcellaire a amené des changements de pratiques pour 12% des agriculteurs, et 37% déclarent avoir une meilleure gestion agronomique. Les agriculteurs qui utilisent le logiciel de gestion parcellaire ont une surface et un PBS significativement plus élevés,

et sont significativement plus nombreux à avoir une ETA et à ne pas être en agriculture biologique.

Le guidage
Le guidage GPS répond essentiellement à une logique d'efficacité (précision, gain de temps, économies d'intrants) et de confort de travail. Il sert aussi à avoir une trace du travail réalisé (organisation mais aussi contrôle du travail salarié). Dans cette logique, l'usage du guidage en lui-même est peu associé à des changements de pratiques. Cependant, certains ont pu mettre en place de nouvelles pratiques : semis direct sous couvert, utilisation d'un strip-till, binage. Le guidage est parfois associé à un changement dans le travail : travail plus long, travail de nuit, surveillance du travail.

La modulation
La modulation est essentiellement adoptée dans un objectif d'économie d'intrants et d'optimisation des rendements. Le service de cartographie pour la modulation est fourni, dans le trois quart des cas, par les coopératives ou négoces, et utilisé pour les cultures de blé, d'orge de colza ou de maïs. Certains agriculteurs mentionnent avoir augmenté les surfaces dans ces cultures afin de rentabiliser l'investissement. Les changements associés sont essentiellement liés à la pratique de fertilisation : fréquence et dates d'application, baisse ou augmentation des doses, et à son organisation : anticipation de la fertilisation et ajustement des commandes. Les optimisations d'intrants et de rendements restent dans les avantages perçus, mais sont remises en question par une partie des utilisateurs. Les agriculteurs y voient des avantages également pour augmenter le taux de protéines de leur culture (et donc la valorisation), et pour justifier auprès de la réglementation leur apport d'engrais (et le dépassement du seuil réglementaire).

Internet et information
Internet est largement utilisé par les agriculteurs pour aller chercher de l'information technique, souvent ou très souvent par 65% d'entre eux. Ils consultent essentiellement des sites spécialisés (81%), notamment les sites des instituts techniques, et des sites spécialisés sur l'agriculture biologique ou sur l'agriculture de conservation, mais également les réseaux sociaux (53%) : Facebook, YouTube ou des forums spécialisés.

Au-delà de servir à une veille globale, 45% déclarent avoir déjà effectué des changements dans leurs pratiques grâce à internet, dont la moitié sur les couverts végétaux et 12% par rapport à l'agriculture biologique. Internet permet aux agriculteurs d'aller chercher de l'information à laquelle ils n'ont pas forcément accès dans leur réseau de proximité, notamment l'information sur les couverts végétaux, l'agriculture de conservation ou encore l'agriculture biologique. Cependant les agriculteurs y voient des inconvénients : notamment la fiabilité de l'information ainsi que le fait que l'information ne soit pas adaptée à leur contexte. Les agriculteurs soulignent également qu'il est difficile de s'orienter du fait d'un foisonnement d'information. Par ailleurs, plusieurs mentionnent le problème de protection des données. Les échanges en présentiel avec leurs collègues, leurs techniciens ou les formations sont alors mentionnés comme indispensables et complémentaires.

6 Compte-rendu agriculteurs



DigitAg
INRAE

INRAE

Usages du numérique en agriculture

Enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie

Usages du numérique en agriculture

Enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie

Eléonore Schnebelin[1], Clara Valiente[2], Jean-Marc Touzard[2], Pierre Labarthe[3]

[1] UMR Innovation, DigitAg, INRAE Montpellier, Institut Agro, Montpellier, France
[2] UMR Innovation, INRAE, Univ. Montpellier, Montpellier, France
[3] UMR AGIR, Univ. Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France

Date de publication : 2022

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004

Résumé

Le document est une contribution aux réflexions sur le numérique dans les filières agricoles. Il présente les résultats d'une enquête sur les usages du numérique, réalisée auprès de 98 agriculteurs et agricultrices ayant des grandes cultures en région Occitanie. Le document décrit l'échantillon enquêté, montrant une utilisation répandue des outils numériques. Une présentation plus détaillée des usages des technologies de guidage, de modulation, de logiciel de gestion parcellaire et d'internet précisent les enjeux autour de ces usages. La construction de profils d'usage permet ensuite de voir comment les technologies numériques sont utilisées de manière combinées dans les exploitations, et peuvent être liées à des facteurs économiques, individuels, agronomiques et relationnels. Le document finit par la présentation des avantages, inconvénients, opportunités et risques cités par les enquêtés.

Summary

The document is a contribution to the debate on digital technology in the agricultural sector. It presents the results of a survey on the use of digital tools, carried out with 98 crop farmers in the Occitanie region. The document describes the sample surveyed and shows a widespread use of digital tools. A more detailed description of the use of guidance technologies, modulation, farm management software and the internet shows the issues surrounding these uses. A construction of use profiles then shows how digital technologies are used in combination by farmers, and how they are linked to various economic, individual, agronomic and relational variables. The document ends with a presentation of the advantages, drawbacks, opportunities and risks cited by the farmers.

Photo de couverture : Clara Valiente

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Introduction

Ce document restitue l'enquête réalisée dans le cadre de la thèse d'Eléonore Schnebelin, soutenue par le département ACT de l'INRAE et l'Institut de Convergence DigitAg[1]. Il est destiné aux agriculteurs et agricultrices enquêtés, ainsi qu'aux organisations agricoles intéressées. L'objectif de cette enquête est de contribuer à la connaissance et l'analyse du développement du numérique dans les exploitations agricoles françaises. Le numérique en agriculture est souvent mentionné comme une innovation qui permet de répondre à de nombreux enjeux auxquels font face les agriculteurs : accroître les performances économiques, limiter les impacts sur l'environnement, améliorer les conditions de travail, mieux gérer les risques, assurer la traçabilité et la communication, favoriser les échanges de connaissances… Ces arguments sont portés à la fois par des entreprises qui fournissent des services basés sur le numérique, mais aussi par les institutions publiques ou des organisations agricoles. Cependant, le développement concret du numérique, les types de technologies adoptées, leurs usages réels dans les exploitations et les avis des agriculteurs sur le sujet restent peu connus.

Pour mieux connaitre le développement du numérique dans les exploitations agricoles, nous avons choisi de réaliser une enquête en région Occitanie, dans les exploitations en grande culture où ces technologies sont déjà bien utilisées. 98 entretiens ont ainsi été conduits entre novembre 2019 et mars 2020 par Eléonore Schnebelin et/ou Clara Valiente, à partir d'un premier échantillon d'exploitations couvrant une diversité de tailles, de certifications et d'orientations productives. Ces entretiens comprenaient cinq parties : la première permettait d'avoir une vue d'ensemble de l'exploitation ; la deuxième était consacrée aux usages des technologies numériques par les exploitants ; la troisième revenait sur les pratiques agronomiques de l'exploitant(e) ; la quatrième portait sur les aspects plus économiques et sur les réseaux de l'exploitant(e) (de conseil, de commercialisation). La dernière partie abordait des perceptions plus générales autour du numérique en agriculture.

Dans un premier temps, nous décrivons l'échantillon d'exploitations enquêtées. La portée de l'échantillon donne à voir une représentation de la réalité des exploitations en grandes cultures des Midi-Pyrénées. L'échantillon est légèrement biaisé, avec des exploitations un peu plus grandes et plus en agriculture biologique que la moyenne. Cependant, la taille et la diversité de l'échantillon, à la fois en termes d'usage du numérique et de pratiques agricoles, permet d'avoir une information riche et significative. Nous détaillons ensuite les usages du numérique, de manière globale, puis technologie par technologie. Enfin, nous indiquons les différents profils d'usage qui se dégagent chez les agriculteurs et nous verrons quels types d'agriculteurs sont représentés parmi les types d'usage.

A. Description de l'échantillon

Le tableau 1 récapitule les principales variables descriptives de la structure des exploitations enquêtées. Dans l'échantillon, les exploitations font en moyenne 162 Ha, pour environ 2 personnes qui y travaillent. Elles sont donc plus grandes que la moyenne régionale. Les enquêtés étaient à 90% des hommes et avaient en moyenne 44 ans.

[1] « Le développement du numérique dans les trajectoires d'écologisation de l'agriculture en France », thèse en économie, encadrée par Jean-Marc Touzard (UMR Innovation Montpellier) et Pierre Labarthe (UMR AGIR Toulouse)

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

	Moyenne de l'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne régionale (Agreste, 2016)
Surface Agricole Utile (SAU) en Ha	162.1	9.5	570	60 Ha
Production Brute Standard (PBS) en €	243157	5559	1053895	58070 € (COP, 2016)
Excédent Brut d'Exploitation (EBE) en € (58 réponses)	55452	9572	180000	
Main-d'œuvre totale	1.9	1	6	1.4 (2016, toute OTEX) 0.88 (2016, COP)
Âge	44.1	24	67	53 ans (2016, toute OTEX)

Tableau 1 : Variables descriptives de l'échantillon

La Figure 1 montre la répartition géographique des exploitations enquêtées. Les enquêtes ont été réalisées principalement dans le bassin céréalier d'Occitanie : en majorité dans le Gers (32), en Haute-Garonne (22), dans le Tarn (17) et dans l'Aude (15).

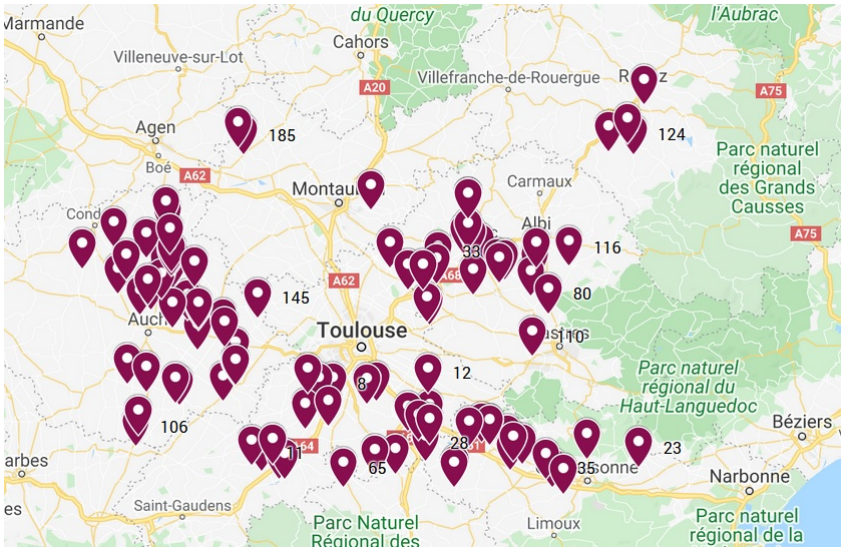


Figure 1 : Localisation des exploitations enquêtées

Environ 29% des exploitations enquêtées avaient leurs cultures en agriculture biologique, et 12% en mixte (biologique + conventionnel)[2]. Par ailleurs 6 exploitations étaient certifiées HVE en 2020.

Les principales cultures présentes dans les exploitations enquêtées sont le blé tendre et le blé dur, le tournesol, le maïs et le soja. 30% des exploitations avaient un atelier d'élevage, 22% un atelier de transformation, 26% de vente directe et 24% de production énergétique. La commercialisation se fait essentiellement en coopérative ou en négoce. Par ailleurs 25% des enquêtés avaient des activités de prestation de travaux agricole (ETA), et 66% ont recours à une ETA pour certaines tâches agricoles.

Une description plus détaillée de l'échantillon est disponible en Annexe.

[2] *Exploitations mixtes* : les exploitations mixtes ont une partie de leur surface en agriculture biologique (AB), une autre en agriculture conventionnelle. Réglementairement, cela est possible sous certaines conditions. D'une part il faut que les surfaces en AB soient toujours les mêmes. D'autre part il faut que les cultures soient différentes et distinguables entre celles qui sont certifiées bio et les autres. Une autre possibilité pour être mixte est d'avoir plusieurs structures juridiques, une certifiée bio et l'autre non.

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

B. Usages du numérique

Dans une première partie, nous indiquons les taux d'adoption de technologies dans notre échantillon. Ensuite, nous détaillons les informations indiquées lors des enquêtes pour 3 technologies : le logiciel de gestion parcellaire, le guidage et la modulation d'intrants.

B 1. Panorama de l'usage des technologies numériques et d'internet

Usage de technologies	Total %
Utilise un GPS	60%
Utilise l'autoguidage	44%
Utilise des technologies de coupure de tronçons	39%
A une station météo connectée	32%
Utilise des cartes de modulation	33%
Fait de la modulation d'azote	27%
Fait de la modulation de semence	6%
A des tensiomètres connectés	14%
Contrôleur de rendement	18%
Utilise des OAD pour les traitements	11%
A des technologies d'irrigation connectée	15%
Utilise un logiciel de gestion	63%

Fréquence d'utilisation d'internet pour info technique	Total %
Jamais	3,1
Rarement	16,5
De temps en temps	15,5
Souvent	41,2
Très souvent	23,7

Information technique sur internet	
Utilise réseaux sociaux	53%
Utilise Facebook	24%
Utilise YouTube	24%
Utilise Twitter	5%
Utilise forums	10%
Utilise sites spécialisés	81%
Utilise sites instituts techniques	30%
Consulte presse agricole en ligne	17%
Utilise sites sur agriculture biologique	12%
Utilise sites sur agriculture de conservation	12%

Type d'usage	
Participe aux échanges techniques sur les réseaux	19%
A changé ses pratiques grâce à internet	45%
Dont changement de pratiques sur les couverts	51%
Dont changement de pratiques sur le bio	12%

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

B 2. Usage du logiciel de gestion parcellaire

Description générique de la technologie

Le logiciel de gestion parcellaire est un logiciel conçu pour piloter une ou des exploitations(s) agricole(s). À partir d'une cartographie de l'exploitation, il est conçu pour pouvoir tracer ses interventions sur chacune des parcelles (travail du sol, apport d'intrants, récolte etc.). Le logiciel peut également être utilisé par un conseiller agricole qui va enregistrer ses conseils directement dans le logiciel. Il peut également servir d'interface à d'autres services numériques.

Processus d'adoption

Objectifs (N=56)[3]

Les objectifs cités par les enquêtés sont :

- La traçabilité, l'enregistrement des pratiques pour des raisons réglementaires, pour les éventuels contrôle, par obligation (77%)
- Pour faire des analyses économiques (29%)
- Pour des analyses des pratiques et la gestion parcellaire (21%)
- Pour la gestion de l'ETA (7%)
- Pour les contrats et cahiers des charges (7%)
- Pour faire les déclarations PAC (5%)
- Pour la gestion des stocks (5%)
- Pour vérifier le travail réalisé par les salariés

On voit donc que les objectifs sont principalement liés à la réglementation, notamment pour la traçabilité réglementaire des traitements, et la conformité (le logiciel alerte dès qu'un produit n'est pas autorisé, que la dose indiquée ou la date n'est pas réglementaire).

Date d'adoption médiane (N=57) : 2013

50 % des agriculteurs enquêtés ont commencé à utiliser le logiciel de gestion avant 2013.

Découverte de la technologie (N=46)

Les agriculteurs ont connu cette technologie de différentes manières. Les principales sources citées sont :

- La coopérative ou le négoce (33%)
- La chambre d'agriculture (15%)
- Les pairs (voisins, amis, clients…) : 11%
- Le centre de gestion : 9%
- Isagri : 9%
- Par la formation ou des expériences professionnelles antérieures : 7%
- Par la presse (4%), des salons agricoles ou la publicité (4%), un CETA (4%)

Fournisseurs (N=32)

Le principal fournisseur est Isagri (41%). Ensuite viennent les coopératives et négoces (28%) et les chambres d'agriculture.

[3] N = X indique le nombre de réponses complètes que l'on a eu sur cette question

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Usage de la technologie

Taux d'utilisation

Dans notre échantillon, 65% des agriculteurs utilisent un logiciel de gestion parcellaire

Utilisateurs (N=45)

L'essentiel des enquêtés (82%) utilisent eux-mêmes cette technologie et/ou leur(s) associé(es) (13%). Dans quelques cas, ce sont aussi les salariés et la main-d'œuvre agricole.

Description des utilisateurs

	Non-utilisateurs	Utilisateurs	Test de différence
SAU	103	193	***
PBS	164087	285162	***
EBE	53907	56265	
Âge	46	43	
Part avec ETA	8.82	34.38	***
Part en bio	52.94	15.62	***

*** Indique que la différence entre non-utilisateurs et utilisateurs est significative

Fonctions (N=62)

La première fonction citée est la **traçabilité réglementaire** pour les traitements phytosanitaires. Le logiciel sert aussi à 34% des agriculteurs pour faire leur plan de fumure (réglementation sur la fertilisation). Un quart des agriculteurs utilise le logiciel pour la **gestion économique** de leur exploitation : calcul des marges, des coûts etc. Plusieurs affirment ne pas faire cette gestion économique avec leur logiciel car cela est trop long et trop compliqué. Par ailleurs, le logiciel est également utilisé pour une **gestion technique** (34%) : organisation des assolements, garder un historique des itinéraires techniques, etc. Dans ce cas, 19% des agriculteurs l'utilisent avec leur technicien, pour enregistrer leurs préconisations notamment. 13% mentionnent une utilisation **administrative** pour la PAC. Les agriculteurs mentionnent également d'autres fonctions moins fréquentes : la **gestion des stocks**, la gestion des **contrats** ou **cahiers des charges** (HVE, GlobalGAP…), la gestion des **clients** dans le cadre de leur ETA, la gestion du **temps de travail** ou encore la **certification bio.**

Prix

La médiane de prix d'abonnement annuel est de 370€. Les prix peuvent varier selon les options souscrites.

Liens avec les pratiques

La grande majorité des agriculteurs (87%) déclarent que l'usage du logiciel de gestion n'a amené aucun changement dans leurs pratiques agronomiques. 12% ont changé leurs pratiques grâce au logiciel, que ce soit par une diminution des doses appliquées, un changement de produit ou un changement d'itinéraire technique. Ces changements interviennent suite à des analyses de leur historique, seuls, avec d'autres agriculteurs ou avec des techniciens.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Lien avec l'organisation

De même, beaucoup d'agriculteurs (87 %) déclarent ne pas avoir eu de changement majeur dans leur organisation du fait de l'utilisation du logiciel. D'ailleurs, beaucoup continuent à faire leur traçabilité sur papier avant de la rentrer dans le logiciel. Seulement 11% déclarent des changements pour la gestion économique de leur exploitation.

Avantages et inconvénients

Parmi les avantages cités, on retrouve ceux qui faisaient partis des objectifs principaux à utiliser le logiciel de gestion :

- La traçabilité, l'enregistrement des pratiques pour des raisons réglementaires, pour les éventuels contrôles, par obligation (61%)
- Les analyses économiques (25%)
- Une amélioration de la gestion agronomique (37%, contre 21% dans les objectifs initiaux)

On retrouve aussi d'autres avantages :

- Gain de temps et confort (16%)
- Avoir un historique, une mémoire des données de l'exploitation (33%)

Les inconvénients cités sont essentiellement :

- Le temps et la complexité (39%)
- Le coût (13%)

Des problèmes liés à la dépendance au réseau internet sont également mentionnés.

B 3. Usage du guidage

Description générique de la technologie

L'utilisation d'un système de géolocalisation sur les machines agricoles permet de guider ou d'automatiser la conduite. Il existe plusieurs catégories de précision, de 20cm à 2cm. La précision à 2 cm est basée sur le système RTK, qui nécessite un abonnement payant

Processus d'adoption

Objectifs N=57

Les objectifs cités par les enquêtés sont :

- Le confort, la réduction de la fatigue et de la pénibilité (cité par 32% des agriculteurs)
- La précision, l'optimisation, éviter les recroisements (32%)
- La gestion de la fertilisation (18%), des semis et plantation (14%), et de la pulvérisation (12%)
- Faciliter, simplifier le travail (16%)
- Le gain de temps (14%)
- Faire des économies d'intrant (14%)
- Eviter le jalonnage (11%)
- Pour l'agriculture biologique (9%)
- Ou encore pour travailler de nuit (7%), faire du désherbage (7%) etc.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

On voit donc que les objectifs sont principalement liés au travail : confort, simplicité, gagner du temps, éviter certaines tâches. Ils sont également liés aux techniques agricoles (fertilisation, semis, optimisation etc.). Les économies visées par l'utilisation du guidage ne ressortent pas en majorité dans les discours.

Date d'adoption médiane (N=59) : 2013

50 % des agriculteurs enquêtés ont commencé à utiliser le guidage avant 2013.

Découverte de la technologie (N=51)

Les agriculteurs ont connu cette technologie de différentes manières. Les principales sources citées sont :

- Les pairs (voisins, amis, clients…) : 27%
- Les concessionnaires et entreprises d'agroéquipement : 24%
- Les revues agricoles, la presse : 22%
- Les salons agricoles : 16%
- Internet : 10%
- Isagri : 8%
- Leur formation ou un stage : 8%

Fournisseurs

Les fournisseurs sont essentiellement des entreprises de l'agro-équipement. On trouve aussi des acteurs dédiés au numérique en agriculture (Isagri, Trimble), ou spécialisés sur le GPS (Innov GPS). Dans notre échantillon, 1 agriculteur a bricolé lui-même cette technologie.

Usage de la technologie

Taux d'utilisation

Dans notre échantillon, 61% des agriculteurs utilisent une technologie de guidage, 44% utilisent le guidage automatique. 25,5% ont la technologie RTK

Utilisateurs (N=49)

L'essentiel des enquêtés utilisent eux-mêmes cette technologie, régulièrement utilisée également par les salariés, les associés et la main-d'œuvre familiale. Quand la personne interrogée ne s'occupe pas de la conduite des tracteurs, c'est le tractoriste qui utilise cette technologie.

Description des utilisateurs

	Non-utilisateurs	Utilisateurs	Test de différence
SAU	95	205	***
PBS	164731	292826	***
EBE	52993	57747	
Âge	46	43	
Part avec ETA	2,63	40,00	***
Part en bio	47,37	16,67	***

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Fonctions (N=59)

Une grande partie des agriculteurs (39%) utilisent le guidage pour toute opération culturale nécessitant le tracteur. Ainsi les agriculteurs vont soit avoir plusieurs GPS sur leurs différents tracteurs, soit utiliser en priorité leur tracteur équipé, les autres tracteurs devenant alors secondaires, ou utilisés pour les tâches autres. Les autres agriculteurs mentionnent 1 ou plusieurs tâches spécifiques pour lesquelles ils utilisent le guidage :

- Les semis et plantations (29%)
- La fertilisation (27%) et la pulvérisation (27%)
- Le travail du sol (15%)
- Le désherbage, le binage (15%)
- La moisson, la récolte ou la fauche (8,5%)

Prix

La médiane de prix d'achat (ou de surcoût lié à l'intégration du guidage) est de 10750€ pour ceux sans RTK et de 15000€ pour ceux avec la technologie RTK. Pour ces derniers, s'ajoute un abonnement annuel médian de 600€. L'investissement initial varie beaucoup selon le nombre de machines agricoles équipées.

Liens avec les pratiques

La plupart des agriculteurs déclare n'avoir rien changé dans leur pratique avec l'utilisation du guidage. Les principaux changements sont liés aux techniques d'agriculture de conservation, de semis direct sous couvert, d'utilisation d'un strip-till (12%), ou alors des changements concernant le binage (7%) et la fertilisation (3%). Des changements peuvent être liés à l'utilisation d'autres technologies qui s'associent au guidage (modulation par exemple) et ne sont pas évoqués ici. 5% indiquent également l'agriculture biologique dans leurs changements.

Concernant l'AB et les pratiques de conservation du sol, la dynamique est à double-sens. Le guidage a pu jouer dans la mise en œuvre de ces pratiques, ou inversement ces pratiques ont pu influencer le choix d'utiliser cette technologie.

Lien avec l'organisation

La plupart des agriculteurs affirment que l'usage du guidage n'a rien changé dans leur organisation. Certains déclarent en revanche travailler plus longtemps, travailler de nuit (8,5%). Travailler plus de surfaces, ou changer l'organisation au niveau de la main-d'œuvre est aussi mentionné. Certains soulignent également des changements dans l'utilisation du matériel agricole, par exemple n'utiliser qu'un seul tracteur.

Lors des discussions plus générales sur le numérique en agriculture, beaucoup affirment qu'ils ne pourraient pas revenir en arrière sur le GPS, notamment parce -qu'ils se sont habitués au confort de la conduite avec le GPS.

Avantages et inconvénients

Parmi les avantages cités, on retrouve ceux qui faisaient partis des objectifs principaux à utiliser le guidage

- Le confort, la réduction de la fatigue et de la pénibilité (cité par 59% des agriculteurs)
- La précision, l'optimisation, éviter les recroisements (45%)

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

On retrouve aussi des objectifs qui étaient moins cités mais qui ressortent largement

- Gain de temps et augmentation du débit de chantier (68%)
- Faire des économies (de gasoil, d'intrants etc.) (41%), la question du carburant étant celle qui ressort le plus (25% des agriculteurs)

On retrouve ensuite un ensemble d'autres avantages dont

- Avoir un travail professionnel, droit, régulier (12%)
- Surveiller et régler l'outil (16%)
- Moins tasser le sol, limiter les passages (11%)

Ou en moindre proportion, moins user le matériel (4%), récupérer des données et faire de la traçabilité (5%), travailler de nuit (5%) etc.

Les inconvénients cités sont essentiellement :

- Le coût (32%)
- Les bugs et pertes de signal (37%)
- Les difficultés à l'utiliser, la nécessité de se former et de former les salariés (12%)
- La dépendance (12%)
- Le temps pour utiliser cette technologie (8,5%)
- La mauvaise précision (3%)

L'obsolescence de ces technologies, ainsi que l'utilisation des données sont également mentionnées.

B 4. Usage de la modulation

Description générique de la technologie

Les cartes de modulation sont des cartes établies pour caractériser les hétérogénéités intra-parcellaires, à partir d'analyses de sol ou de végétation. Les doses recommandées de fertilisation, ou de semences, sont ajustées à ces hétérogénéités.

Ces cartes peuvent être utilisées avec un épandeur ou semoir adapté à la modulation. Dans ce cas, l'épandeur ou le semoir ajuste la dose d'engrais ou de semis appliquée au fur et à mesure de l'avancement, afin d'adapter la dose à la zone selon les données issues de la carte de modulation.

Processus d'adoption

Objectifs (n=34)

Les objectifs cités par les enquêtés sont :

- Economiser, diminuer les intrants (cité par 32% des agriculteurs)
- Optimiser les rendements, les potentiels des parcelles (29%)
- « Mettre la bonne dose, au bon endroit, au bon moment » (15%)
- Corriger l'hétérogénéité des parcelles (12%)
- Pour l'environnement (9%)
- Pour la qualité (9%)
- Pour la réglementation, les cahiers des charges (9%)
- Pour les clients (6%)
- Pour essayer (6%)

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

On voit donc que les objectifs sont principalement liés à l'optimisation des intrants et des rendements

Quand on demande les objectifs visés en début d'utilisation de cette technologie, 15% des utilisateurs disent qu'ils avaient déjà l'équipement nécessaire.

Date d'adoption médiane (n=41) : 2016

50 % des agriculteurs enquêtés ont commencé à utiliser la modulation avant 2016.

Découverte de la technologie (n=33)

Les agriculteurs ont connu cette technologie de différentes manières. Les principales sources citées sont :

- Les coopératives ou négoce : 73%
- Les revues agricoles, la presse : 12%
- Internet : 9%
- Les Cuma ou Ceta : 6%
- Les instituts techniques : 6%
- Les pairs (voisins, amis, clients…) : 3%
- Les semenciers : 3%

Fournisseurs (n=24)

Les fournisseurs des cartes de modulations sont essentiellement les coopératives et négoces (75%). Ils peuvent également être des semenciers (12%), ou plus rarement une chambre d'agriculture ou un Ceta.

Usage de la technologie

Taux d'utilisation

Dans notre échantillon, 34% des agriculteurs utilisent des cartes de modulation et 27,5% font de la modulation d'engrais avec.

Utilisateurs (N=28)

Les personnes qui utilisent la technologie de modulation sont avant tout les exploitants (86%), mais aussi les salariés (21%), les associés ou la main-d'œuvre familiale.

Description des utilisateurs de la modulation

	Non-utilisateurs	Utilisateurs	Test de différence
SAU	136	231	***
PBS	219305	305876	**
EBE	51896	70643	**
Âge	45	41	*
Part avec ETA	14,08	55,56	***
Part en bio	36,62	7,41	***

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Fonctions

La modulation d'engrais est utilisée principalement pour les cultures de blé, orge, colza et maïs. On remarque qu'il y a une grande diversité d'usage de la modulation.

Les cartes sont obtenues essentiellement par photo-satellites. Une minorité (3) se fabriquent eux-mêmes leurs cartes, à partir de cartes de leur logiciel de gestion parcellaire, de leurs connaissances des parcelles. Par ailleurs, certains agriculteurs utilisent un service de modulation basé sur des analyses de sol (Be Api).

18% des utilisateurs font la modulation à la main, n'ayant pas le matériel approprié pour une modulation automatique. D'autres réalisent cette modulation automatiquement, après une saisie initiale de leur carte. D'autres encore ajustent la modulation, en fonction de leurs connaissances, de leurs observations et de leurs objectifs, par exemple, pour corriger des erreurs liées à une prise en compte de la biomasse des adventices.

Certains utilisateurs modulent tous les apports alors que d'autres uniquement le dernier apport. Pour les premiers apports, les agriculteurs augmentent généralement les doses sur les zones à faible potentiel, afin d'homogénéiser la parcelle. Pour le dernier apport, ils augmentent les doses sur les zones à haut potentiel afin de maximiser le rendement et le taux de protéine.

Prix

Les coûts varient selon le type de carte et de modulation. Pour de la modulation d'engrais basique, la médiane du coût par hectare et par an est de 9€. Certains ont un abonnement annuel fixe et un prix par hectare plus faible (1,5€/ha). Pour des cartes réalisées avec des analyses de sol, le prix varie autour de 100-150€/ha mais ces cartes sont valables sur plusieurs années.

Par ailleurs, l'utilisation de la modulation automatique nécessite une console et un distributeur adaptés. Cet équipement induit des surcoûts de matériel pouvant aller de quelques milliers d'euros à plusieurs dizaines de milliers d'euros, en fonction de l'équipement de base et de la technologie choisie.

Liens avec les pratiques

La plupart des agriculteurs déclare n'avoir rien changé dans leurs pratiques, mise à part la gestion de la fertilisation. La modulation a pu amener à baisser ou augmenter les doses, à changer le nombre de passages et les dates d'application. Des agriculteurs mentionnent avoir augmenté les surfaces dans la culture concernée par la technologie, afin de rentabiliser l'investissement.

Lien avec l'organisation

Les impacts sur l'organisation sont la gestion des stocks d'engrais. Connaissant à l'avance avec précision les doses à apporter, les utilisateurs peuvent adapter les commandes d'engrais. Certains affirment être plus sereins. La modulation nécessite toutefois plus d'anticipation afin de commander les cartes pour qu'elles soient disponibles le jour nécessaire. Cela peut poser des soucis lors d'une météo nuageuse qui peut empêcher l'établissement des cartes.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Avantages et inconvénients

Parmi les avantages cités, on retrouve ceux qui faisaient partis des objectifs principaux pour utiliser la modulation (N=34)

- Les économies (cité par 32% des agriculteurs) mais peu sont capables de préciser les économies réalisées
- Optimiser les rendements (21%)

On retrouve aussi des objectifs qui étaient moins cités mais qui ressortent largement

- La qualité, les taux de protéines (24%)
- Justifier la dose, répondre à la réglementation (18%)

D'autres avantages sont aussi mentionnés

- La facilité (18%)
- Gérer les commandes (9%)

Quelques-uns n'y voient aucun avantage

Les inconvénients cités sont essentiellement :

- Le coût (19%)
- Le temps pour utiliser cette technologie (19%)
- L'absence d'effet, d'économie, de gain (19%)
- La nécessité d'anticiper (16%)
- Les bugs et pertes de signal (9%)
- La disponibilité des cartes au moment nécessaire (12,5%)
- Les erreurs (12,5%) et problèmes d'adéquation au terrain (6%)

On remarque globalement qu'il y a beaucoup d'insatisfaction sur cette technologie ou que les utilisateurs pensent optimiser sans être capable de préciser les gains ou économies réalisés.

B 5. Usage d'internet

Dans notre échantillon, 65% des agriculteurs déclarent utiliser internet comme source d'information technique souvent ou très souvent, 15% de temps en temps et 20% jamais ou rarement.

Pour aller chercher cette information technique, 81% vont sur des sites spécialisés, notamment les sites des instituts techniques (30% des agriculteurs enquêtés), les sites spécialisés sur l'agriculture biologique (12%) ou sur l'agriculture de conservation (12%). 53% vont sur les réseaux sociaux, principalement Facebook (24%) et YouTube (24%) ou des forums spécialisés (10%).

45% déclarent avoir déjà effectué des changements dans leurs pratiques grâce à internet. La moitié des changements concernaient les couverts végétaux et 12% des changements par rapport à l'agriculture biologique.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Description des utilisateurs

	Jamais, rarement ou de temps en temps	Souvent ou très souvent	
SAU	145	208	**
PBS	224089	278426	Pas significatif
EBE	55552	55210	
Âge	44	43	Pas significatif
Date d'installation	2002	2007	*
Part des surfaces en non travail du sol	9%	21%	*

Avantages et inconvénients

Internet permet aux agriculteurs d'aller chercher de l'information à laquelle ils n'ont pas forcément accès dans leur réseau de proximité, notamment l'information sur les couverts végétaux, l'agriculture de conservation ou encore l'agriculture biologique.

35% des agriculteurs signalent des inconvénients liés à l'information technique sur internet. Parmi les problèmes mentionnés, on retrouve essentiellement la fiabilité de l'information ainsi que le fait que l'information ne soit pas adaptée à leur contexte. Les agriculteurs soulignent également qu'il est difficile de s'orienter du fait d'un foisonnement d'information. Par ailleurs, plusieurs mentionnent le problème de protection des données.

Par ailleurs les échanges en présentiel avec leurs collègues, leurs techniciens ou les formations sont mentionnés comme indispensables et complémentaires.

C. Profils d'usage et types d'exploitation

À partir des données d'usage du numérique, nous avons construit des profils types d'usages du numérique en considérant deux grandes catégories de technologies : les technologies numériques de production, et les technologies numériques d'information. Nous avons obtenu trois profils types pour chacune de ces catégories de technologie. Nous avons ensuite regardé les différences entre ces profils en termes de structure d'exploitation, de pratiques agronomiques, de réseaux de conseil et de commercialisation. Cela permet de voir quelles caractéristiques d'exploitation sont associées aux profils d'usage du numérique.

Les *technologies numériques de production* (TNP) regroupent des technologies qui ont pour fonction de modifier directement les processus de production. Elles comprennent notamment les technologies d'agriculture de précision. Ces technologies, basées sur le guidage satellite, la cartographie parcellaire, les capteurs etc. peuvent avoir divers impacts : des impacts sur la gestion des intrants tels que les fertilisants, les pesticides, les semences ; sur les outputs, tels que les rendements ou la qualité de la production ; sur la mise en œuvre de certaines pratiques, telles que le travail du sol ou l'assolement ; sur la nature, l'organisation et la pénibilité du travail ; ou encore sur la productivité.

Les *technologies numériques d'information et de communication* (TNC) regroupent les technologies utilisées pour accéder à de l'information, communiquer avec des pairs, des conseillers ou des consommateurs. Elles comprennent notamment l'usage de sites spécialisés en agriculture et de réseaux sociaux tels que YouTube ou Facebook.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

C 1. Technologies numériques pour la production (TNP)

Nous avons construit 3 profils d'usage des TNP à partir de 12 variables indiquant si les technologies suivantes étaient utilisées ou non : guidage, autoguidage, coupure de tronçon, station météo connectée, carte de modulation, modulation d'engrais, modulation de semence, tensiomètre connecté, carte de rendement, OAD pour les traitements, technologie d'irrigation connectée et logiciel de gestion parcellaire.

Profil 1 TNP_non

Le premier profil, appelé ici TNP_non, regroupe 39% de l'échantillon. Dans ce groupe, la plupart des agriculteurs n'ont pas de technologies numériques pour la production. Un peu moins d'un tiers d'entre eux ont cependant un logiciel de gestion parcellaire.

Dans ce profil, les exploitations ayant des ETA sont sous-représentées, tout comme celles cultivant des semences ou ayant des contrats de commercialisation. Les exploitations en bio, en statut individuel, en vente directe ou ayant de l'élevage sont par contre surreprésentées. Les exploitations de ce groupe ont une plus faible dimension économique que la moyenne, les variables de surface, PBS, annuités, main-d'œuvre (mais pas l'EBE) ainsi que les charges en intrants par hectare et les rendements sont significativement plus faibles.

Profil 2 TNP_moyen

Le deuxième profil, nommé TNP_moyen, rassemble 32% des individus de l'échantillon. Il regroupe celles et ceux ayant un usage de quelques technologies numériques pour la production, mais n'ayant pas le pack global d'agriculture de précision. Ainsi, quasiment tous utilisent les technologies de guidage (97%) ou d'autoguidage (63%), et une grande majorité (87%) ont un logiciel de gestion parcellaire ; mais aucun ne fait de modulation d'intrant. Par ailleurs, entre 20 et 40% utilisent des technologies de coupure de tronçon, des outils d'aide à la décision pour leurs traitements, des stations météo, tensiomètres connectés ou technologies d'irrigation connectées.

Les exploitations présentes dans ce profil ressemblent globalement à la moyenne de l'échantillon, mais se distinguent par plus d'irrigation, plus de main-d'œuvre salariée, plus de charges en engrais par hectare, moins de vente directe. Les exploitations bio de ce groupe (N=8) ont un EBE, une PBS, des annuités, une surface et des parts irriguées plus élevées, et plus de commercialisation en coopérative.

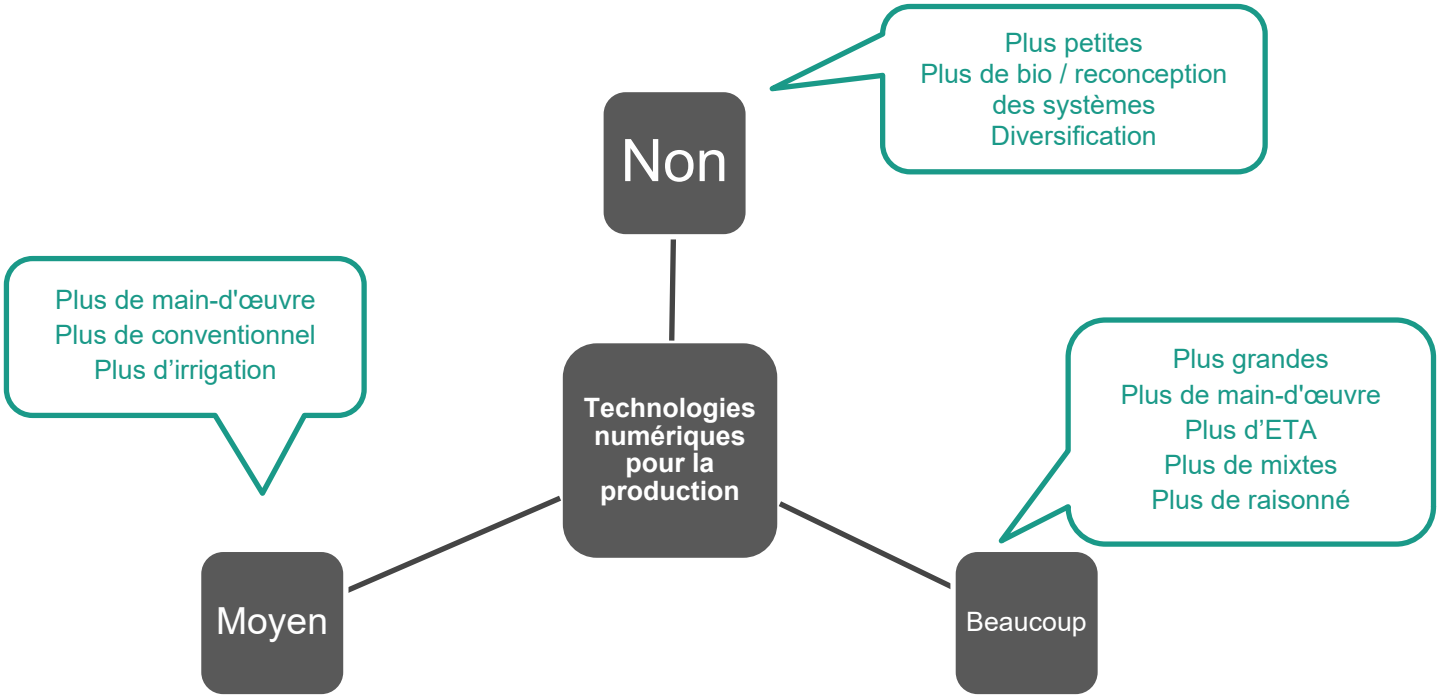
Profil 3 TNP_intense

Le troisième profil, TNP_intense, regroupe 29% de l'échantillon et se caractérise par un usage intensif de technologies numériques pour la production. On retrouve chez beaucoup le pack d'agriculture de précision : guidage (96%), modulation d'engrais (92%), station météo connectée (65%), contrôleur de rendement (46%). Ils sont 23% à faire de la modulation de semence.

Dans ce profil, sont surreprésentées les exploitations ayant des ETA, les mixtes (bio et conventionnel), celles cultivant des semences, et celles ayant une stratégie 'raisonnée'. Ce groupe se distingue par des moyennes plus élevées sur les variables SAU, PBS, main-d'œuvre totale et main-d'œuvre salariée, EBE, charges en phyto et en engrais et rendements en blé tendre. On retrouve moins de certification bio et de cultures associées.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37



Les TNP s'inscrivent dans des modèles structurels d'agrandissement et d'externalisation

Une dimension économique importante ressort comme un des principaux facteurs explicatifs de l'usage des TNP : cela facilite l'accès à ces technologies mais offre aussi des avantages supplémentaires à l'utilisation de ces outils, qui deviennent parfois indispensables pour gérer le travail : organiser la main-d'œuvre, savoir ce qui a été fait sur quelle parcelle, standardiser, gérer la logistique et la traçabilité.

De plus, ces technologies facilitent en retour la croissance de la dimension économique, comme le décrit Baptiste.

> « *Je sais pas si j'ai gagné du temps en fait. Parce-que dès que tu gagnes du temps t'as le temps de faire autre chose et d'en faire plus. C'est un cycle. […] Mon arrière-grand-père il avait 16ha. Mon grand-père en avait 200. Mon père 400-450. Maintenant on fait 8 ou 900.* »
> Baptiste (TNP_intense)

Les agriculteurs, qui ont des entreprises de prestation et des TNP peuvent être mobilisés par les autres agriculteurs pour effectuer certaines tâches sans avoir à investir dans ces technologies. Dans chacun des 3 groupes, entre 50 et 60% des agriculteurs ont recours à des prestataires qui utilisent du numérique (notamment le guidage).

Par ailleurs, des acteurs économiques tels que les coopératives, entreprises de négoce ou de semences peuvent favoriser l'usage de ces TNP en incitant ou imposant l'usage de ces technologies, via des contrats, pour standardiser et mieux contrôler leur approvisionnement.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Les TNP s'associent à des trajectoires d'efficience et d'optimisation ?

Ces technologies sont basées sur une logique d'optimisation des intrants, ce qui en limite l'intérêt pour les agriculteurs ayant d'autres stratégies, par exemple de reconception plus radicale de leur système en bio, comme l'illustre le témoignage ci-dessous :

> « *Les autres agriculteurs qui ont le GPS […] ils économisent du gasoil, de la semence, des engrais, des désherbants. Parce qu'ils passent juste ce qu'il faut. Donc eux ça leur fait peut-être une économie qui leur permet de payer le truc. Mais moi je vais juste faire une économie de gasoil, et une économie de temps aussi.* » Thomas (TNP_non)

Par ailleurs, une grande partie des agriculteurs bio disent que les TNP ne sont pas adaptées voire en contradiction avec leur système de production. Certains agriculteurs qui passent en bio ont arrêté d'utiliser le logiciel de gestion parcellaire ou des OAD qui ne leur étaient plus utiles.

Dans le groupe TNP_non, la PBS est plus faible mais l'EBE ne l'est pas. Cela peut signifier que certaines trajectoires d'écologisation cherchent d'autres segments d'optimisation de leur valeur ajoutée que celle proposée par l'agriculture de précision. Cela peut être par la transformation et/ou la vente directe, par l'optimisation de services écosystémiques etc.

L'usage des TNP s'associe avec des stratégies basées sur l'optimisation, l'efficience et la productivité. Les raisons évoquées pour s'équiper sont essentiellement l'ergonomie, le confort, le gain de temps, la productivité.

Cependant, ces effets sont discutés par certains utilisateurs, notamment pour la technologie de modulation. Ils témoignent que la modulation ne leur fait pas faire d'économies, et même peuvent abandonner cette technologie, et « reviennent en arrière ».

Certains usages des TNP amènent des changements importants dans les pratiques

Les résultats montrent que les choix en termes de pratiques agronomiques interagissent avec les choix en termes d'outils.

La mise en place de techniques d'agriculture de conservation des sols a amené des agriculteurs vers l'usage de TNP, spécialement l'autoguidage de précision (RTK), comme en témoigne Louis :

> « *C'est parce qu'on a changé les pratiques agronomiques qu'on en est venu au RTK. Comme on travaille beaucoup en couverts végétal nous, […] quand on sème du maïs dans des féveroles qui sont un peu hautes, c'est bien d'avoir le guidage. »* Louis (TNP_moyen)

Par ailleurs, les agriculteurs mixtes sont surreprésentés dans le profil TNP_intense. On observe des agriculteurs qui ont utilisé les TNP pour aller vers la mise en place du bio, comme en témoignent Baptiste :

> « *J'aurai pas le guidage en bio j'y serai peut-être pas passé, c'est clair et net. Parce-qu'on a de la puissance, on a de la largeur. Donc on a des outils larges. Là on est en bio, on reprend tous les champs en 8,20m avec guidage, c'est top quoi.* » Baptiste (TNP_intense)

Dans le cas de Louis, un changement des pratiques a amené l'usage de TNP. Inversement, pour Baptiste, l'usage des TNP a participé à la mise en place de nouvelles pratiques agronomiques.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Cette surreprésentation des agriculteurs mixtes est à mettre en perspective avec le fait que ces agriculteurs ont une plus grande surface et souvent des ETA. Ils s'inscrivent dans un modèle plus 'industriel'.

C 2. Technologies numériques pour l'information et la communication

Pour les TNC, nous avons pris 7 variables indiquant la fréquence d'usage d'internet pour aller chercher de l'information technique, l'usage ou non des réseaux sociaux, de Facebook, de YouTube, de sites agronomiques spécialisés, de sites des instituts techniques agricoles et de sites de la presse agricole pour aller chercher de l'information technique.

Profil TNC_non

Le premier profil, TNC_non se définit par une moindre utilisation d'internet pour l'information. Deux tiers n'utilisent internet que jamais, rarement ou de temps en temps pour aller chercher de l'information technique. Les trois quarts n'utilisent pas les réseaux sociaux et ne consultent pas de sites spécialisés. La quasi-totalité n'utilise pas YouTube, ni les sites des instituts techniques. En revanche, 45% consultent la presse agricole.

Ce profil se caractérise par moins d'individus ayant fait des études au-delà de Bac+2 ou appartenant à un groupe d'échange technique (CETA), mais plus d'individus conseillés en coopérative ou maîtrisant le moins l'outil informatique. Les exploitations ont des charges en phyto par hectare plus élevées que la moyenne, moins de non travail du sol et plus de labour.

Profil TNC_sites

Le deuxième profil, TNC_sites se définit par un usage de sites spécialisés pour aller chercher de l'information. Ils n'utilisent pas Facebook, pas YouTube, pas la presse agricole en ligne mais tous vont sur des sites spécialisés, notamment les sites des instituts techniques (36%).

Ce profil se distingue par moins d'agriculteurs cultivant des semences mais plus en non travail du sol ou en techniques culturales simplifiées. Ils ont en moyenne des parts en légumineuses plus élevées, des charges en phyto plus basses et des rendements en maïs irrigué et en blé dur plus élevés. Les individus sont plus vieux que la moyenne, ils sont plus nombreux à être dans le groupe de ceux qui ont une maîtrise intermédiaire de l'outil informatique et moins à faire partie d'un syndicat.

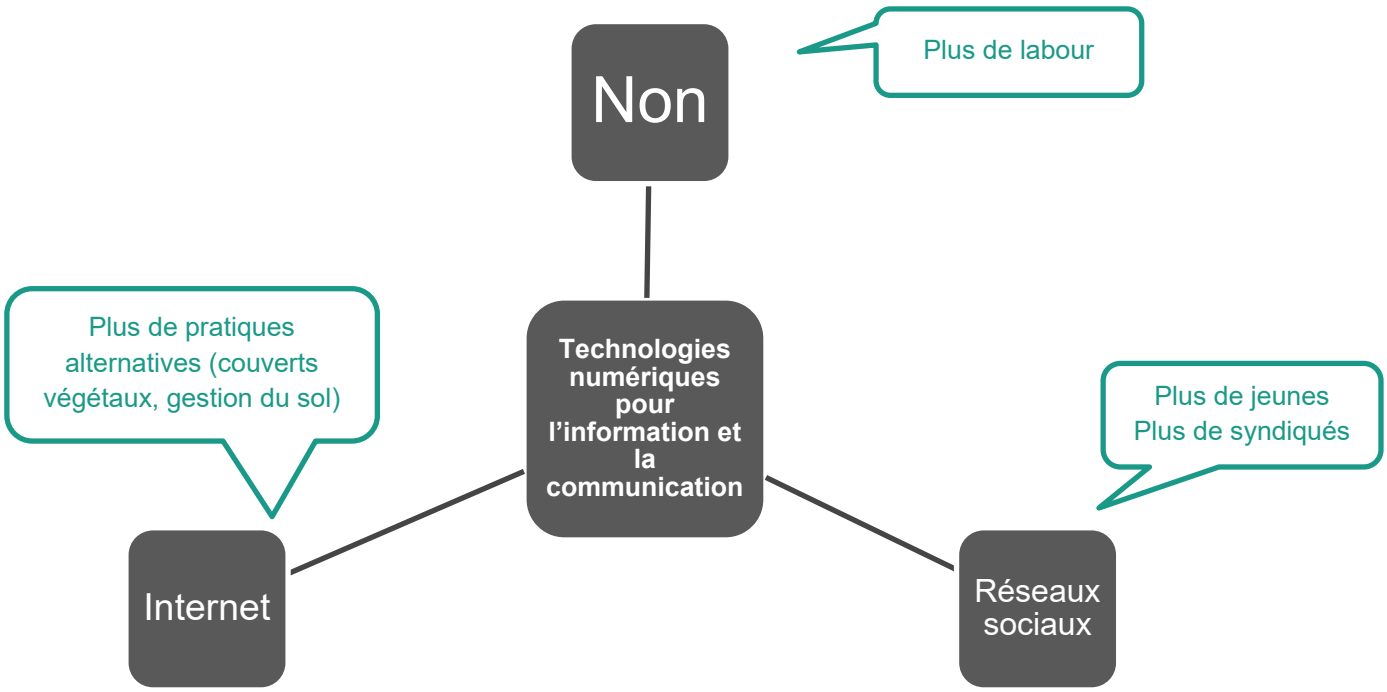
Profil TNC_reseaux

Le troisième, TNC_reseaux, se distingue par un usage des réseaux sociaux dans un but professionnel (100%), notamment Facebook et YouTube. Ils utilisent internet souvent à très souvent pour 91% d'entre eux. Ils consultent également des sites spécialisés (89%).

Ce profil se distingue par plus d'EARL, plus d'exploitations avec de l'irrigation. Ils sont installés plus récemment que la moyenne et sont plus jeunes. Ils sont plus nombreux à être dans le groupe de ceux qui maitrisent le mieux l'outil informatique et de ceux qui émettent un avis négatif sur la santé économique de leur exploitation.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37



L'usage des TNC ont des liens à l'insertion dans un environnement socio-économique, mais surtout à des caractéristiques individuelles

L'environnement socio-économique est lié à l'usage des TNC, avec, selon les acteurs, des corrélations ou des oppositions. L'appartenance à une coopérative ou le conseil via les semenciers est liée négativement avec l'usage des TNC. L'appartenance à un CETA ou des groupes d'agriculteurs y est liée positivement. L'appartenance à un syndicat est liée positivement à l'usage des réseaux sociaux.

Dans ce qui distingue les profils, on retrouve plutôt des variables qui renvoient aux caractéristiques individuelles : la formation, l'âge, les compétences mais aussi les préférences individuelles.

Internet permet l'accès à de nouvelles informations sur des nouvelles pratiques plus radicales, mais avec des limites

Dans les discours, internet apparaît comme source d'information pour faire face à des situations inhabituelles, ou pour avoir des connaissances non disponibles dans l'entourage professionnel local. C'est également une source d'inspiration pour essayer de nouvelles pratiques, et un moyen de veille agronomique. Cela va de l'ajustement des pratiques (pour faire face à de nouvelles conditions liées au changement climatique par exemple), jusqu'à la recherche d'information sur des changements plus radicaux dans les pratiques, comme en témoigne Baptiste :

> « *La coopérative était un peu en retard sur ça, donc je suis pas mal allé voir ce qu'il se faisait. Aussi […] je me faisais mes petits mélanges [de couverts].* » Baptiste (TNC_reseaux)

Se rajoute parfois la notion d'échange, de participation, d'être soi-même source de connaissances

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Cependant les problèmes de fiabilité ou de pertinence de l'information par rapport aux conditions pédoclimatiques locales sont souvent mentionnés, comme ci-dessous :

> « *Bah c'est plus des expériences mais après ce qui marche chez les uns ne marchera pas forcément ici.* » Corentin

Le lien avec les pratiques agronomiques semble être à double sens. L'utilisation d'internet fait découvrir des nouvelles pratiques. Et la volonté de mettre en place des nouvelles pratiques incite à aller chercher de l'information sur internet. Pour les couverts et l'agriculture de conservation, internet ressort comme une source d'information majeure, palliant à un manque d'information dans les organisations agricoles traditionnelles. Il apparaît que ces TNC permettent de combiner les sources d'information plutôt que de se substituer aux échanges directs.

D. Discussion autour du numérique en agriculture

Cette section présente des données issues de discussions plus ouvertes avec les enquêtés, menées en fin d'entretien. L'idée était de discuter des enjeux plus globaux autour du développement du numérique. Les quatre parties ci-dessous indiquent, de manière simplifiée, les avantages, inconvénients, opportunités et risques perçus par les agriculteurs et mentionnés de manière spontanée lors des entretiens.

D 1. Avantages cités

17% des agriculteurs et agricultrices ne citent aucun avantage lié au numérique en agriculture.

Les avantages qui ressortent les plus fréquemment sont le gain de temps (33%), l'accès à de l'information ou la communication (26%) et la simplicité (23%). Ensuite on a la traçabilité et l'aspect réglementaire (19%), le confort et la praticité (19%), la précision et la technicité (16%), les économies (10%), la vente, la production (rendement ou qualité) ou encore l'analyse et la compréhension de leur système.

D 2. Inconvénients cités

16% des agriculteurs et agricultrices ne citent aucun inconvénient lié au numérique en agriculture.

L'inconvénient le plus cité est le coût des équipements numérique (41%). Les enquêtés mentionnent le temps consacré à l'utilisation du numérique (21%), les problèmes de bugs, de pannes, de compatibilité (19%) et les soucis pour réparer ces outils (11%). Se former et être compétent est également régulièrement mentionné (17%), ainsi que les possibilité d'appropriation des données personnelles, de surveillance (10%). Cette évolution est vue comme allant trop vite et les outils sont vite obsolescents, et est parfois vue comme obligatoire. De plus certains mentionnent le fait que cela nuise au relationnel, au dialogue. Le numérique est parfois vu comme non adapté aux tailles des exploitations, aux conditions locales, ou au bio.

D 3. Potentiels cités

16% ne mentionnent aucun potentiel lié au développement du numérique dans le secteur agricole.

Lors des discussions avec les agriculteurs sur les potentiels du numérique pour l'agriculture, plusieurs positions très différentes sont ressorties. Pour certains, le numérique « est l'avenir et offrira des

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

possibilités infinies à l'agriculture ». Pour ceux-là, le numérique va permettre une meilleure rentabilité des exploitations, de meilleures conditions de travail et un meilleur respect de l'environnement. Au contraire d'autres ne voient aucun potentiel, trouvant que « l'évolution dans ce domaine est déjà allée trop loin ». Pour beaucoup, le numérique pourrait avoir des potentiels pour l'agriculture mais avec des limites. Moduler ou économiser des intrants est régulièrement mentionné comme un des potentiels, à la fois économique et environnemental. Les conditions de travail, par exemple le confort de travail ou la suppression ou simplification de tâches répétitives, sont un des aspects les plus mentionnés également. Beaucoup évoquent le gain de temps lié au numérique mais disent que ce temps est utilisé ailleurs ou que le confort de travail lié au numérique permet de travailler plus longtemps. Avoir accès à de l'information est également très souvent mentionné.

Par ailleurs certains indiquent aussi que le numérique permet de donner une bonne image de l'agriculture à la société, de mieux analyser le fonctionnement de leur système et de progresser en termes agronomique. Quelques-uns mentionnent la robotique comme pouvant apporter des bénéfices à l'agriculture.

D 4. Risques cités

Seulement 7% des enquêtés ne mentionnent pas de risque lié au numérique en agriculture.

Les agriculteurs, qu'ils utilisent ou non du numérique, perçoivent de nombreux risques au développement du numérique. Le premier est celui lié aux données, mentionné par 1/3 des enquêtés : les données pourraient être piratées ou bien appropriées par les entreprises du numérique. Ainsi, ils sont nombreux (17%) à citer des risques de surveillance, de contrôle. De plus, plusieurs critiquent les risques de dépendance que le numérique amène : dépendance aux technologies numériques mais aussi au réseau, à l'industrie agricole ou à leur coopérative. Les agriculteurs évoquent les risques liés au fait qu'ils ne vont plus être en capacité de réparer le matériel, trop complexe avec le numérique, et que les technologies numériques seraient vite obsolescentes ou abîmées au contact de la poussière, l'humidité etc. Par ailleurs, certains voient des risques liés à la perte de savoir-faire, de sens du terrain et de l'observation, notamment pour ne pas appliquer des conseils sans prise de recul personnel. En termes d'évolution du secteur, certains craignent que cela accentue l'agrandissement et la concentration des exploitations, nuise à l'emploi agricole, et exclue une partie de la population agricole (qui n'ont pas les compétences, ou sur des zones moins productives et donc ne pouvant pas se permettre d'investir dans ce type de technologies). En effet, le coût des technologies et l'endettement/ le surinvestissement est vu comme un risque majeur. Certains indiquent des risques de perte de relationnel (notamment avec les conseillers). D'autres évoquent aussi les risques sur l'environnement, liés à l'énergie nécessaire pour le fonctionnement du numérique ainsi qu'aux métaux utilisés pour la construction de ces technologies. Les discours des agriculteurs donnent également à voir des risques de perte de sens, de changement de métier : cela pourrait les rendre simple « exécutants », ou les faire encore plus travailler au bureau. Concernant les réseaux sociaux, les risques d'agribashing, de diffusion de données sont régulièrement mentionnés.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Conclusion

Cette enquête auprès d'une centaine d'agriculteurs et agricultrices cultivant des céréales, oléagineux ou protéagineux en Occitanie, met en lumière la diversité des usages du numérique, la complexité des enjeux que ces transformations soulèvent, et donne à voir les perceptions des enquêtés sur ces transformations.

Ces enquêtes montrent que le développement du numérique dans l'agriculture n'est pas un phénomène linéaire et homogène. Plusieurs trajectoires de digitalisation sont mises en œuvre, en fonction des modèles de production, des conditions socio-économiques, des objectifs et des perceptions des agriculteurs. L'utilisation de technologies numériques soulève des enjeux techniques, économiques et environnementaux que doivent arbitrer les agriculteurs à l'échelle de leurs exploitations. Les enquêtes indiquent également que la digitalisation des exploitations n'est pas que le résultat de choix individuels. Elle dépend aussi de la réglementation, des fournisseurs et des acheteurs, qui peuvent inciter voire contraindre l'utilisation de certaines technologies numériques. Les problématiques et risques liés au numérique soulevés dans l'enquête sont nombreux, donnant à voir une digitalisation moins simple et idéale que dans certaines représentations commerciales ou institutionnelles.

Ce travail invite à prendre en compte les usages et les perceptions des agriculteurs et agricultrices dans les réflexions et politiques publiques qui impactent le développement du numérique dans le secteur agricole. Les données issues de cette enquête soulignent la nécessité de penser la diversité et l'hétérogénéité des modèles d'exploitations agricoles, dans ces politiques publiques, ainsi que d'y intégrer des objectifs sociaux et environnementaux. En outre, ce travail appelle à approfondir les travaux de recherche sur le développement du numérique agricole dans d'autres territoires, d'autres filières, mais aussi en diversifiant les approches, notamment pour étudier les transformations à différentes étapes dans les exploitations, pour réfléchir aux enjeux à plus long terme, et pour développer des travaux en collaboration avec des agriculteurs et agricultrices.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Annexe

Description complémentaire de l'échantillon

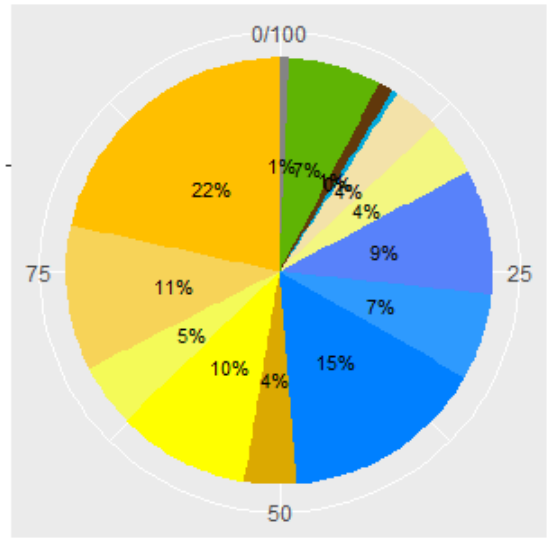
Certifications

Environ 29% des exploitations enquêtées avaient leurs cultures en agriculture biologique, et 12% en mixte. Ce que j'appelle ici les exploitations mixtes sont des exploitations agricoles ayant une partie de leur surface en agriculture biologique, une partie en agriculture conventionnelle.

Par ailleurs 6 exploitations étaient certifiées HVE en 2020.

Assolement

L'assolement total des exploitations enquêtées est visible Figure 2. Les principales cultures présentes dans les exploitations enquêtées sont le blé tendre et le blé dur, le tournesol, le maïs et le soja. On peut noter que l'assolement moyen diffère selon que les exploitations soient en conventionnel, en bio ou en mixte. En moyenne, 15% des surfaces sont irriguées, 17% sont cultivées avec des légumineuses, 12% des surfaces n'ont pas eu de travail du sol dans l'année et 31% un travail superficiel. 35% des exploitations ont des cultures associées, 78% font des couverts végétaux sur au moins une partie de leurs surfaces, 6% ont toute leur exploitation en non travail du sol.

Assolement total des enquêtés	Légende
	
Assolement total exploitations conventionnelles	Assolement total exploitations biologiques

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

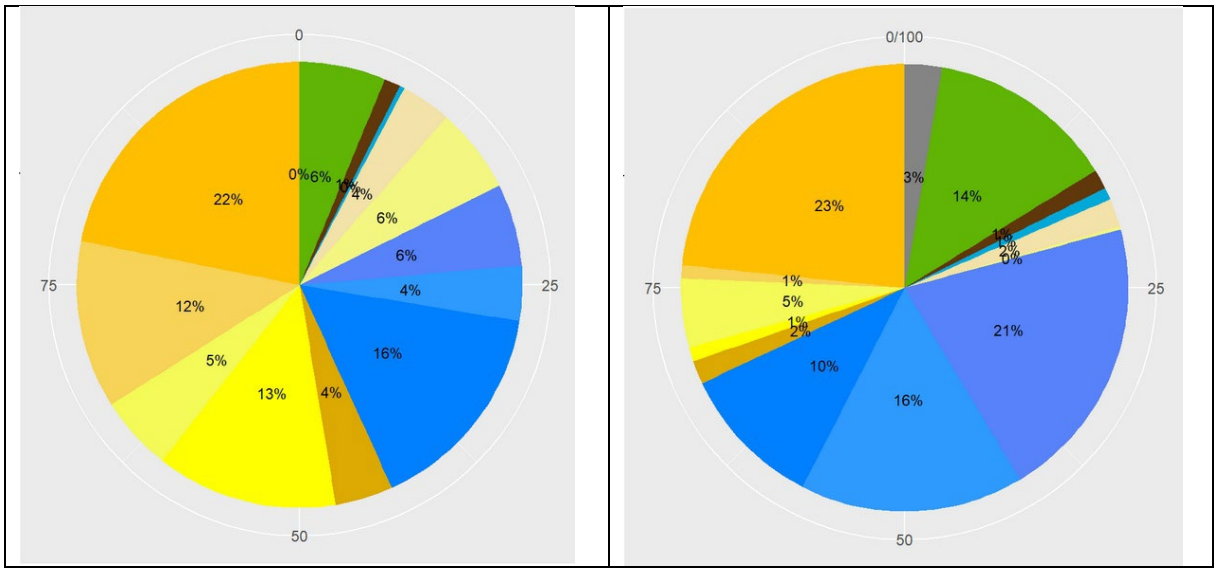


Figure 2 : Assolement des exploitations enquêtées

Autres productions

30% des exploitations avaient un atelier d'élevage : bovins viande (12%), bovins lait (6%), volailles (10%), ovins (3%) ou porcs (1%)

Par ailleurs, d'autres ateliers sont parfois présents sur les exploitations. La transformation (22%) et la vente directe (26%) notamment, ainsi que la production énergétique (24%).

Parcours des enquêtés

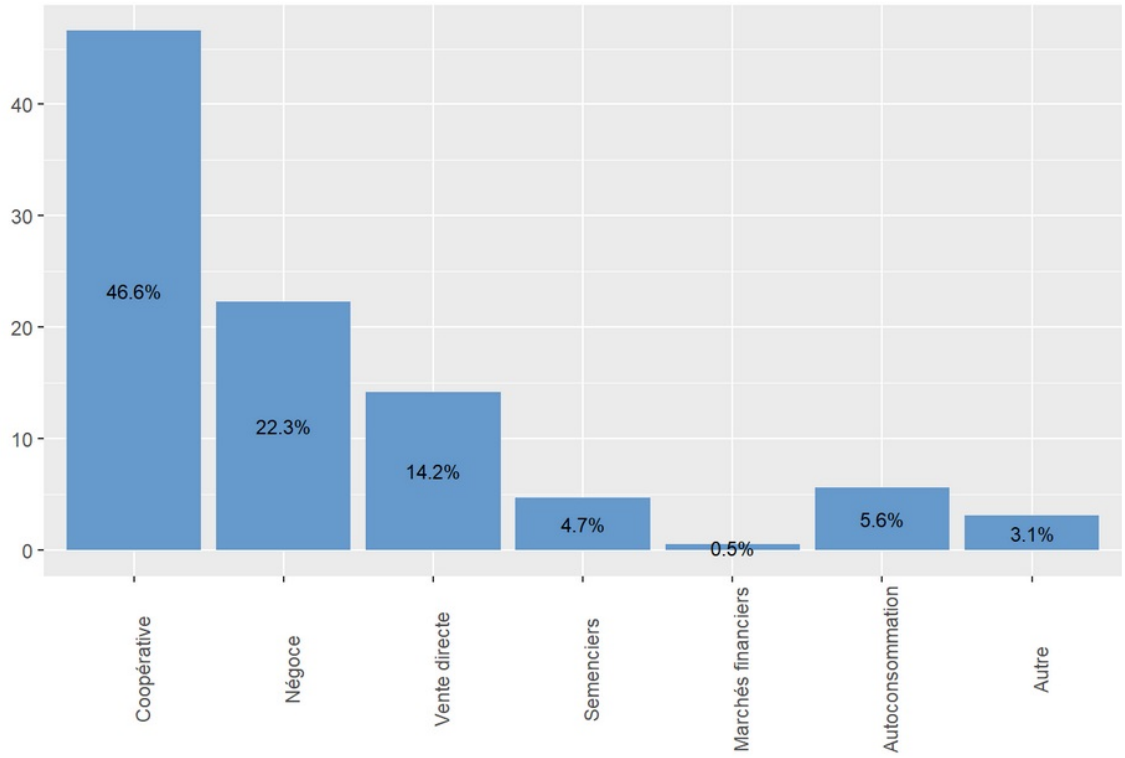
La majorité des enquêtés ont un Bac+2 (43%), essentiellement des BTS agricoles. 20% ont un bac, 12% un bac+3, 13% un Bac+5. Les autres ont des formations professionnelles ou pas de formation spécifique. 39 ont exercé un autre métier dans le domaine de l'agriculture avant de s'installer, et 23 un métier hors du domaine de l'agriculture. 19% sont actuellement double-actifs, c'est-à-dire qu'ils exercent une autre profession en parallèle.

Par ailleurs 25% des enquêtés avaient une entreprise de travaux agricole (ETA), et 66% ont recours à une ETA pour certaines tâches agricoles.

Conseil et commercialisation

La commercialisation se fait essentiellement en coopérative ou en négoce

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37



Le conseil vient principalement des coopératives (57% des agriculteurs), de chambres d'agriculture (27%), de CETA (14%), de négoces (12%), des entreprises de l'aval (10%), de conseillers indépendants (7%) ou des instituts techniques (5%).

Plusieurs agriculteurs font partie de groupes de travail entre agriculteurs : CUMA (43%), Syndicat (23%), CETA (22%) chambre d'agriculture (14%), GIEE (21%), GDA (5%), GAB (8%), Institut Technique (7%) ou encore groupe sur les TCS (6%).

Par ailleurs, 70% sont abonnés à des journaux agricoles et 63% vont à des salons agricoles.

CC BY NC SA

DOI : https://doi.org/10.17180/PAET-HP37

Centre Occitanie
2 place Pierre Viala
34060 Montpellier

Rejoignez-nous sur :

Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

7 Compte-rendu agriculteurs - Synthèse

Usages du numérique en agriculture

Enquête auprès de 98 exploitations ayant des grandes cultures en région Occitanie - Synthèse

Eléonore Schnebelin, Clara Valiente, Jean-Marc Touzard, Pierre Labarthe - 2022

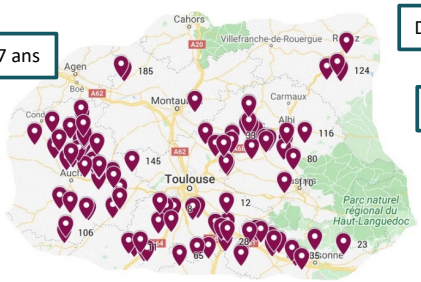
Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004

Présentation de l'échantillon

98 agriculteurs de 24 à 67 ans

29% des exploitations en bio, 12% en mixte bio/conventionnel

25% ont une ETA [1]



De 9 à 570Ha (162 en moyenne)

De 1 à 6 personnes qui y travaillent

Cultures principales : blé, tournesol, maïs, soja

Usage de technologies numériques dans l'échantillon

Logiciel de gestion parcellaire 63% - GPS 60% - Autoguidage 44% - Coupures de tronçons 39% - Station météo connectée 32% - Cartes de modulation 33% - Modulation d'azote 27% - Modulation de semence 6% - Tensiomètres connectés 14% - Contrôleur de rendement 18% - OAD pour les traitements 11% - Irrigation connectée 15%

Information technique sur internet : Souvent ou très souvent 65 % - Facebook 24% - YouTube 24% - Twitter 5% - Forums agricole 10% - Sites instituts techniques 30% - Presse agricole en ligne 17% - Sites AB 12% - Sites agriculture de conservation 12% => *45% ont changé leurs pratiques grâce à ça (en majorité changements sur les couverts végétaux, ou sur l'agriculture biologique)*

Profils d'usage du numérique

Technologies numériques pour la production (TNP)

Technologies considérées : guidage, autoguidage, coupure de tronçon, station météo connectée, carte de modulation, modulation d'engrais, modulation de semence, tensiomètre connecté, carte de rendement, OAD pour les traitements, technologie d'irrigation connectée et logiciel de gestion parcellaire.

[1] ETA = Entreprise de Travaux Agricoles

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

Les résultats indiquent 3 profils d'usage :

- TNP-Non (39%) : n'utilisent pas de TNP, sauf parfois un logiciel de gestion parcellaire. Les exploitations sont plus petites (en termes de SAU, de PBS, d'annuité et de main-d'œuvre). Il y a plus d'exploitations en bion avec de la vente directe ou avec un atelier d'élevage.
- TNP-Moyen (32%) : utilisent quelques TNP, notamment le guidage GPS, le logiciel de gestion parcellaire et parfois la coupure de tronçon, des OAD, des stations météo ou de l'irrigation connectée. Les exploitations correspondent à peu près à la moyenne de l'échantillon, avec un peu plus d'exploitations en conventionnel, plus de salariés et plus d'annuités.
- TNP-Intensif (29%) : utilisent beaucoup de TNP : guidage, modulation d'intrants, moniteur de rendement, station météo connectée. Les exploitations sont plus grandes que la moyenne (en termes de SAU, PBS, annuités et main-d'œuvre salariée), font plus de culture de semence, ont plus d'ETA, sont plus conseillées en coopérative

L'usage des TNP semble lié à la dimension économique et à la sous-traitance dans les exploitations agricoles. Une grande dimension économique facilite l'accès à ces technologies et ces technologies facilitent en retour la croissance de la dimension économique. Elles offrent des avantages supplémentaires aux grandes exploitations ou aux exploitations qui font de la sous-traitance dans d'autres exploitations : organiser la main-d'œuvre, savoir ce qui a été fait sur quelle parcelle, standardiser, gérer la logistique et la traçabilité.

Des acteurs économiques tels que les coopératives, négoces et semenciers peuvent favoriser voire imposer l'usage de ces TNP qui répondent à leurs besoins de standardisation et de contrôle de leur approvisionnement.

L'usage des TNP répond principalement à une logique d'optimisation des intrants : ils sont moins intéressant économiquement si peu d'intrants sont utilisés dans les fermes. Cependant, l'efficacité des technologies de modulation est questionnée par plusieurs agriculteurs qui l'utilisent. Ces technologies servent essentiellement à justifier des pratiques par rapport à la réglementation.

Parfois, les TNP sont utilisées pour des changements de pratiques plus importants. Par exemple la mise en place de semis sous couvert vivant. Ou la mise en place d'agriculture biologique dans de grandes exploitations.

Technologies numériques pour l'information et la communication (TNC)

Variables considérées : fréquence d'usage d'internet pour aller chercher de l'information technique, l'usage ou non des réseaux sociaux, de Facebook, de YouTube, de sites agronomiques spécialisés, de sites des instituts techniques agricoles et de sites de la presse agricole pour aller chercher de l'information technique.

On obtient 3 profils

- TNC_non (23%) : moindre utilisation d'internet pour l'information, sauf la presse agricole en ligne. Ce profil se caractérise par plus d'individus conseillés en coopérative ou maîtrisant le moins l'outil informatique. Les exploitations ont des charges en phyto par hectare plus élevées que la moyenne, moins de non travail du sol et plus de labour.
- TNC_sites (41%) : usage de sites spécialisés pour aller chercher de l'information, notamment les sites des instituts techniques (36%). Ce profil se distingue par moins d'agriculteurs cultivant

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

des semences mais plus en non travail du sol ou en techniques culturales simplifiées. Ils ont en moyenne des parts en légumineuses plus élevées, des charges en phyto plus basses et des rendements en maïs irrigué et en blé dur plus élevés. Les individus sont plus vieux que la moyenne, ils sont plus nombreux à être dans le groupe de ceux qui ont une maîtrise intermédiaire de l'outil informatique.

- TNC_reseaux (37%) : usage des réseaux sociaux dans un but professionnel, notamment Facebook et YouTube, et consultent des sites spécialisés. Les agriculteurs de ce groupe son plus jeunes, maitrisent mieux l'outil informatique et font plus partie de syndicats

L'usage des TNC semble plutôt lié à des caractéristiques individuelles : âge et maitrise de l'outil numérique. Il est aussi lié à l'environnement socio-économique puisque les agriculteurs conseillés par les coopératives ou les semenciers utilisent moins les TNC, alors que ceux faisant partie de groupes d'échanges entre agriculteurs les utilisent plus. Les informations via internet semblent complémentaires de celles dans les réseaux d'agriculteurs (information plus nombreuse et variée sur internet, information plus précise et adaptée aux conditions locales dans les réseaux d'agriculteurs locaux). Parfois, l'information sur internet est mobilisée par défaut, parce-que les agriculteurs n'ont pas accès à ces informations dans leur réseau classique de conseil. Mais l'information sur internet a des limites : problèmes de confiance, de pertinence, manque d'information sur les échecs etc.

Discussion autour du numérique en agriculture

Avantages cités

Les avantages qui ressortent les plus fréquemment sont le gain de temps (33%), l'accès à de l'information ou la communication (26%) et la simplicité (23%). Ensuite on a la traçabilité et l'aspect réglementaire (19%), le confort et la praticité (19%), la précision et la technicité (16%), les économies (10%), la vente (6%), la production (rendement ou qualité) (5%) ou encore l'analyse et la compréhension de leur système (8%).

Inconvénients cités

L'inconvénient le plus cité est le coût des équipements numérique (41%). Les enquêtés mentionnent le temps consacré à l'utilisation du numérique (21%), les problèmes de bugs, de pannes, de compatibilité (19%) et les soucis pour réparer ces outils (11%). Se former et être compétent est également régulièrement mentionné (17%), ainsi que les possibilité d'appropriation des données personnelles, de surveillance (10%). Cette évolution est parfois vue comme allant trop vite et les outils sont vite obsolescents, et est parfois vue comme obligatoire. De plus certains mentionnent le fait que cela nuise au relationnel, au dialogue. Le numérique est parfois vu comme non adapté aux tailles des exploitations, aux conditions locales ou au bio.

Potentiels cités

Lors des discussions avec les agriculteurs sur les potentiels du numérique pour l'agriculture, plusieurs positions très différentes sont ressorties. Pour certains, le numérique est l'avenir et offrira des possibilités infinies à l'agriculture. Pour ceux-là, le numérique va permettre une meilleure rentabilité des exploitations, de meilleures conditions de travail et un meilleur respect de l'environnement. Au contraire d'autres ne voient aucun potentiel, trouvant que l'évolution dans ce domaine est déjà allée trop loin. Pour beaucoup, le numérique pourrait avoir des potentiels pour l'agriculture mais avec des limites. Moduler ou économiser des intrants est régulièrement mentionné comme un des potentiels,

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

à la fois économique et environnemental. Les conditions de travail, par exemple le confort de travail ou la suppression ou simplification de tâches répétitives, sont un des aspects les plus mentionnés également. Beaucoup évoquent le gain de temps lié au numérique mais disent que ce temps est utilisé ailleurs ou que le confort de travail lié au numérique permet de travailler plus longtemps. Avoir accès à de l'information est également très souvent mentionné. Par ailleurs certains mentionnent les potentiels pour donner une bonne image de l'agriculture à la société, de mieux analyser le fonctionnement de leur système et de progresser en termes agronomique. Quelques-uns mentionnent la robotique comme pouvant apporter des bénéfices à l'agriculture.

Risques cités

Les agriculteurs, qu'ils utilisent ou non du numérique, perçoivent de nombreux risques au développement du numérique. Le premier est celui lié aux données, mentionné par 1/3 des enquêtés : les données pourraient être piratées ou bien appropriées par les entreprises du numérique. Ainsi, ils sont nombreux (17%) à citer des risques de surveillance, de contrôle. De plus, plusieurs mentionnent les risques de dépendance que ça amène : dépendance aux technologies numériques mais aussi au réseau, à l'industrie agricole, à leur coopérative. Les agriculteurs évoquent les risques liés au fait qu'ils ne vont plus être en capacité de réparer le matériel, trop complexe avec le numérique, et que les technologies numériques seraient vite obsolescentes ou abîmées au contact de la poussière, l'humidité etc. Par ailleurs, certains mentionnent les risques liés à la perte de savoir-faire, de sens du terrain et de l'observation, notamment pour ne pas appliquer des conseils sans prise de recul personnel. En termes d'évolution du secteur, certains craignent que cela accentue l'agrandissement et la concentration des exploitations, nuise à l'emploi agricole, et exclue une partie de la population agricole (qui n'ont pas les compétences, ou sur des zones moins productives et donc ne pouvant pas se permettre d'investir dans ce type de technologies). En effet, le coût des technologies et l'endettement/ le surinvestissement est vu comme un risque majeur. Certains mentionnent des risques de perte de relationnel (notamment avec les conseillers). D'autres évoquent aussi les risques sur l'environnement, liés à l'énergie nécessaire pour le fonctionnement du numérique ainsi qu'aux métaux utilisés pour la construction de ces technologies. On peut aussi voir des risques de perte de sens, de changement de métier : cela pourrait les rendre simple « exécutants », ou les faire encore plus travailler au bureau. Concernant les réseaux sociaux, les risques d'agribashing, de diffusion de données sont régulièrement mentionnés.

Conclusion

Cette enquête met en lumière la diversité des usages du numérique, la complexité des enjeux que ces transformations soulèvent, et donne à voir les perceptions des enquêtés sur ces transformations. Le développement du numérique dans l'agriculture n'est pas un phénomène linéaire et homogène. Plusieurs trajectoires de digitalisation sont mises en œuvre, en fonction des modèles de production, des objectifs et des perceptions des agriculteurs, mais aussi de la réglementation, des fournisseurs et des acheteurs, qui peuvent inciter voire contraindre l'utilisation de certaines technologies numériques. L'utilisation de technologies numériques soulève des enjeux techniques, économiques et environnementaux qui doivent être arbitrés à l'échelle des exploitations. Ce travail invite à prendre en compte les usages et les perceptions des agriculteurs et agricultrices dans les réflexions et politiques publiques qui impactent le développement du numérique dans le secteur agricole, et souligne la nécessité de penser la diversité et l'hétérogénéité des modèles d'exploitations agricoles, dans ces politiques publiques, ainsi que d'y intégrer des objectifs sociaux et environnementaux.

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

Fiche technologie : Logiciel de gestion

Le logiciel de gestion parcellaire est un logiciel conçu pour piloter une ou des exploitations(s) agricole(s). À partir d'une cartographie de l'exploitation, il est conçu pour pouvoir tracer ses interventions sur chacune des parcelles (travail du sol, apport d'intrants, récolte etc.). Le logiciel peut également être utilisé par un conseiller agricole qui va enregistrer ses conseils directement dans le logiciel. Il peut également servir d'interface à d'autres services numériques.

Dans notre échantillon, **65%** des agriculteurs utilisent un logiciel de gestion parcellaire.

Technologie adoptée en moyenne en **2013**, connue via la coopérative, le négoce, la chambre d'agriculture, les voisins, les comptables ou via Isagri directement. Le principal fournisseur est Isagri : 41%. Ensuite viennent les coopératives et négoces (28%) et les chambres d'agriculture. La médiane de prix d'abonnement annuel est de **370€**. Les prix peuvent varier selon les options souscrites.

Fonctions : La première fonction citée est la **traçabilité réglementaire** pour les traitements phytosanitaires. Le logiciel sert à 34% des agriculteurs à faire leur plan de fumure (réglementation sur la fertilisation). Un quart des agriculteurs utilise le logiciel pour la gestion économique de leur exploitation : calcul des marges, des coûts etc. Plusieurs affirment ne pas faire cette gestion économique avec leur logiciel car cela est trop long et trop compliqué. Par ailleurs, le logiciel est également utilisé pour une gestion technique (34%) : organisation des assolements, garder un historique des itinéraires techniques, etc. 19% des agriculteurs l'utilisent avec leur technicien : pour enregistrer leurs préconisations notamment. 13% mentionnent une utilisation pour la PAC. Des agriculteurs mentionnent d'autres fonctions moins fréquentes : la gestion des stocks, la gestion des contrats ou cahiers des charges (HVE, GlobalGAP…), la gestion des clients dans le cadre de leur ETA, la gestion du temps de travail et le contrôle du travail des salariés ou encore la certification bio.

Liens avec les pratiques : La majorité des agriculteurs (87%) déclarent que l'usage du logiciel de gestion n'a amené aucun changement dans leurs pratiques agronomiques. 12% ont changé leurs pratiques grâce au logiciel, que ce soit par une diminution des doses appliquées, un changement de produit ou un changement d'itinéraire technique. Ces changements interviennent suite à des analyses de leur historique, seuls, avec d'autres agriculteurs ou avec des techniciens.

Lien avec l'organisation : De même, 87% des agriculteurs déclarent ne pas avoir eu de changement dans leur organisation. D'ailleurs, beaucoup continuent à faire leur traçabilité sur papier avant de la rentrer dans le logiciel. Seulement 11% déclarent des changements, vers une meilleure gestion économique de leur exploitation.

Avantages cités : La traçabilité, l'enregistrement des pratiques pour des raisons réglementaires, pour les éventuels contrôles, par obligation (61%) ; Les analyses économiques (25%) ; La gestion agronomique qui ressort plus franchement (37%) ; Gain de temps et confort (16%) ; Avoir un historique, une mémoire des données de l'exploitation (33%)

Inconvénients cités : Le temps et la complexité (39%) ; Le coût (13%) ; Dépendance au réseau internet

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

Fiche technologie : Guidage

Utilisation d'un système de géolocalisation sur les machines agricoles, pour guider ou automatiser la conduite. Il existe plusieurs catégories de précision, de 20cm à 2cm. La précision à 2 cm est basée sur le système RTK, qui nécessite un abonnement payant.

Dans notre échantillon, **61%** des agriculteurs utilisent une technologie de guidage, 44% utilisent le guidage automatique. 25,5% ont la technologie RTK

Technologie adoptée en moyenne en **2013**, connue via les pairs, les concessionnaires, la presse agricole, les salons ou internet. La médiane de prix d'achat (ou de surcoût) est de **10750€** pour ceux sans RTK et de 15000€ pour ceux avec la technologie RTK. Pour ces derniers, s'ajoute un abonnement annuel médian de 600€. L'investissement initial varie beaucoup selon le nombre de machines agricoles équipées. Les fournisseurs sont essentiellement des entreprises de l'agro-équipement. On trouve aussi des acteurs dédiés au numérique en agriculture (Isagri, Trimble), ou spécialisés sur le GPS (Innov GPS). Dans notre échantillon, 1 agriculteur a bricolé lui-même cette technologie.

Fonctions : Une grande partie des agriculteurs (39%) utilisent le guidage pour **toute opération culturale** nécessitant le tracteur. Ainsi les agriculteurs vont soit avoir plusieurs GPS sur leurs différents tracteurs, soit utiliser en priorité leur tracteur équipé, les autres tracteurs devenant alors secondaires, ou utilisés pour les tâches autres. Les autres agriculteurs mentionnent 1 ou plusieurs tâches spécifiques pour lesquelles ils utilisent le guidage : les semis et plantations (29%), la fertilisation (27%) et la pulvérisation (27%), le travail du sol (15%), le désherbage, le binage (15%), la moisson, la récolte ou la fauche (8,5%).

Liens avec les pratiques : La plupart des agriculteurs déclare n'avoir rien changé dans leur pratique avec l'utilisation du guidage. Les principaux changements sont liés avec les techniques d'agriculture de conservation, de semis direct sous couvert, d'utilisation d'un strip-till. Ou alors des changements concernant le binage et la fertilisation. D'autres changements peuvent être liés à l'utilisation d'autres technologies qui s'associent au guidage (modulation par exemple).

Lien avec l'organisation : La plupart des agriculteurs affirment que l'usage du guidage n'a rien changé dans leur organisation. Certains déclarent en revanche travailler plus longtemps, travailler de nuit (8,5%). Travailler plus de surfaces, ou changer l'organisation au niveau de la main-d'œuvre est également mentionné. Certains soulignent également des changements dans l'utilisation du matériel agricole, par exemple n'utiliser qu'un seul tracteur.

Avantages cités : Le confort, la réduction de la fatigue et de la pénibilité (cité par 59% des agriculteurs) ; La précision, l'optimisation, éviter les recroisements (45%) ; Gain de temps et augmentation du débit de chantier (68%) ; Faire des économies (de gasoil, d'intrants etc.) (41%), la question du carburant étant celle qui ressort le plus (25%) ; Avoir un travail professionnel, droit, régulier (12%) ; surveiller et régler l'outil (16%) ; Moins tasser le sol, limiter les passages (11%) ; moins user le matériel , récupérer des données et faire de la traçabilité, travailler de nuit

Inconvénients cités : Le coût (32%) ; Les bugs et pertes de signal (37%) ; Les difficultés à l'utiliser, la nécessité de se former et de former les salariés (12%) ; La dépendance (12%) ; Le temps pour utiliser cette technologie (8,5%) ; La mauvaise précision (3%) ; L'obsolescence ; L'appropriation des données

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

Fiche technologie : Modulation

Les cartes de modulation sont des cartes établies pour caractériser les hétérogénéités intra-parcellaires, à partir d'analyses de sol ou de végétation, et recommander les doses de fertilisation ou de semences. Ces cartes peuvent être utilisées avec un épandeur ou semoir adapté à la modulation, qui ajuste la dose d'intrant au fur et à mesure selon les recommandations de la carte.

Dans notre échantillon, **34%** des agriculteurs utilisent des cartes de modulation et 27,5% font de la modulation automatique d'engrais avec.

Technologie adoptée en moyenne en **2016**. Les coûts varient selon le type de carte : 9€/ha/an en moyenne pour de la modulation d'engrais basique, 100-150€/ha pour des cartes réalisées avec des analyses de sol (valables sur plusieurs années). L'équipement adapté (console et distributeur) induit des surcoûts de matériel (de quelques milliers d'euros à plusieurs dizaines de milliers d'euros). Les cartes sont fournies essentiellement par les coopératives et négoces (75%), parfois des semenciers (12%), ou plus rarement une chambre d'agriculture ou un Ceta.

Fonctions : La modulation d'engrais est utilisée principalement pour les cultures de blé, orge, colza et maïs. Les cartes sont obtenues par des photo-satellites, ou parfois par analyses de sol et une minorité (3) se fabriquent eux-mêmes leurs cartes, à partir de cartes de leur logiciel de gestion parcellaire et de leurs connaissances des parcelles. Une partie fait la modulation à la main, n'ayant pas le matériel approprié pour faire la modulation automatique. Certains ajustent la modulation automatique en fonction de leurs connaissances/observations/objectifs et peuvent corriger des erreurs (prise en compte de la biomasse des adventices par exemple). Certains modulent tous les apports alors que d'autres modulent uniquement le dernier apport. Pour les premiers apports, les agriculteurs augmentent les doses sur les zones à faible potentiel, afin d'homogénéiser la parcelle. Pour le dernier apport, les agriculteurs augmentent les doses sur les zones à haut potentiel afin de maximiser le rendement et le taux de protéine.

Liens avec les pratiques : La plupart des agriculteurs déclare n'avoir rien changé dans leur pratique mise à part la gestion de la fertilisation : baisse ou augmentation des doses, modification du nombre de passages et des dates d'application. Des agriculteurs mentionnent avoir augmenté les surfaces dans la culture concernée par la technologie, afin de rentabiliser l'investissement.

Lien avec l'organisation : Les impacts sur l'organisation cités sont la gestion des stocks d'engrais : certains adaptent les commandes d'engrais en fonction des doses recommandées ; et l'anticipation, afin de commander les cartes à temps. Cela peut poser des soucis lors de météo nuageuses qui empêchent l'établissement des cartes.

Avantages cités : Les économies d'engrais (32%), mais peu sont capables d'estimer les économies réalisées ; l'optimisation des rendements (21%) ; la qualité de la production (24%) ; la justification réglementaire de la dose apportée (18%), la facilité (18%), la gestion des commandes.

Inconvénients cités : Le coût (19%) ; Le temps à consacrer (19%) ; L'absence d'effet, de gain ou d'économie (19%) ; La nécessité d'anticiper (16%) ; La disponibilité des cartes au moment nécessaire (13%) ; Les erreurs (13%) ; Les problèmes d'adéquation au terrain

https://doi.org/10.17180/a9ar-nm04

8 Grille d'entretien pour les caves coopératives

Présentation générale de la coopérative

1. Nom de l'enquêté : ……...
2. Nom de la coopérative : ……...
3. Adresse : ……
4. Fonction de la personne enquêtée : ……
5. Formation de la personne enquêtée : ……
6. Bref historique de la coopérative et de son organisation actuelle : (fondation, fusions, changements importants dans les pratiques, dans les produits, dans les adhérents, dans les partenaires… Organisation, filiales)

7. Nombre de viticulteurs-coopérateur : …… Dont Bio : …… Dont mixte : ……
8. Quel est votre mode de gouvernance, comment les décisions d'orientation de la cave sont-elles prises (par vote, atelier préparatoire ou participatif …) ?

9. Combien de fois les adhérents sont-ils réunis par an ?

10. Volume de vin commercialisé et surfaces concernées

	Total	Sans IG	IGP d'Oc	Autre IGP	AOP	Bio	Autre …….	
Volume commercialisé (hL)								
Surface (Ha)								

11. Quelle est le chiffre-d'affaire global de la coopérative ? ……

12. Combien y a-t-il de sites de vinification ? ……

13. Est-ce que la coopérative est engagée dans une démarche qualité ? Non □ Oui □ - Laquelle :

Agriconfiance □ - HVE niveau …… □ - Autre ……

14. Circuits de commercialisation : %age vrac…… %age conditionné…….

Circuit	% volume total – Précisez en vrac ou en bouteille
Export	
GMS / centrales d'achat	
Cavistes	
Vente directe	
Négoce	
Autre : préciser ……	

15. Est-ce que la coopérative est engagée dans des projets liés à la transition agroécologique ? Si oui, décrivez-les et indiquez vos partenaires.

Activités liées au numérique dans la coopérative

16. Pour vous, qu'est-ce que le numérique au sens large ?

17. Avez-vous mis en place des outils numériques à l'échelle de la coopérative ? (Relation aux adhérents, conseil, formation, gestion des apports, gestion de l'irrigation, traçabilité, vinification…)
    Décrivez-les et expliquez le processus de mise en place

18. Est-ce que vous proposez des services numériques à vos coopérateurs ? (Gestion des vendanges, gestion de l'irrigation, traçabilité, gestion des traitements, de la fertilisation…) Si oui, lesquels ? Décrivez-les et décrivez pourquoi et comment ils ont été mis en place.

    ➔ Emergence, justification, acteurs concernés, financement, connaissances, financement, problèmes etc.
    ➔ Comment accompagnez-vous l'usage du numérique auprès de vos adhérents (information, formation individuelle ou collective) ?

19. Est-ce que la coopérative est engagée dans d'autres projets liés au numérique ?

20. Comment le numérique transforme votre activité de coopérative viticole ?

Usage du numérique par les viticulteurs

21. Est-ce que vous connaissez les usages du numérique par les viticulteurs ? Comment voyez-vous ces usages ?

22. Quelles conséquences voyez-vous pour les exploitations agricoles ?

23. Pensez-vous que ces technologies peuvent contribuer à la transition agroécologique ? Peuvent aider à passer en viticulture raisonnée ou biologique ?

24. Selon, qu'est-ce qui incite au développement du numérique en viticulture ? Quels sont les freins ?

25. Selon, quels sont les opportunités et les risques au développement du numérique en viticulture ?

26. Souhaitez-vous aborder autre chose sur le thème du numérique en viticulture ?

27. Est-ce que la coopérative a mis en place des choses pour s'adapter à la crise du Covid ? Avez-vous développé davantage le numérique afin de répondre aux commandes à l'échelle du territoire (drive, réseaux sociaux…)

	Ecologisation	Digitalisation
Domaines d'action	**Réduction des intrants** : optimisation (ajustement des doses, dates ou modes d'application), substitution (biocontrôle, confusion sexuelle, désherbage mécanique…) ou reconception (lutte intégrée…) **Gestion des sols :** travail du sol, enherbement, amendement ; impacte santé des végétaux, nutrition, stockage du carbone **Infrastructures paysagères** : haies, arbres, murets etc. comme réservoirs de biodiversité, fourniture de services écosystémiques **Réduction des gaz à effet de serre** : diminution travail du sol, diminution passages d'engins	**Gestion du vignoble** des adhérents : services météo, OAD pour les traitements (prédiction des risques maladie), gestion de l'irrigation, robotique (prototype) **Organisation des vendanges et sélection parcellaire :** télédétection parcellaire (sélection des parcelles, décision dates de vendange) ; outils logistiques numériques (planification, organisation) **Gestion de la traçabilité** : collecte et organisation de l'information ; gestion de la traçabilité des flux (de matière et économiques) ; respect de cahiers des charges et contrats ; lien entre les différentes étapes : production, vinification, fournisseurs, acheteurs, ODG, administration **Communication interne/externe**. : information et partage de connaissances techniques, logistiques, réglementaires ; organisation interne (WhatsApp, SMS, intranet, Email, visioconférence) ; communication auprès de fournisseurs, clients, consommateurs
Motivations	Image, communication, réponses aux demandes du négoce, de la grande distribution, des importateurs ou consommateurs. Cohabitation avec riverains, réponse/anticipation des politiques publiques, valorisation économique (divergences sur ce sujet)	Gestion administrative et réglementaire Gestion logistique Nouveaux enjeux de conseil : changement climatique, engagement environnemental, évolution réglementaire, changement dans l'offre de conseil
Collaborations	Chambres d'agriculture et GIEE, Coop de France, agence de l'eau, département, ICV, INRAE, associations environnementales ou industries agroalimentaires (Perrier Nestlé pour la protection des sources), associations ou organisme de certification	Prestation d'acteurs du numérique : ID System, ICS, Smag, Ginco Partenariats avec les chambres d'agriculture, l'IFV, Coop de France, entreprises fournisseuses d'intrant, coopératives d'approvisionnement (pour les OAD), ICV
Perceptions des viticulteurs	HVE vu comme exigence de la cave, mis en place largement, sans changement important dans les pratiques Développement de la fertilisation organique, du désherbage mécanique (incite à s'équiper d'intercep), des couverts végétaux Majorité des viticulteurs satisfaits des efforts de la coopérative dans ce domaine Débats (ou conflits) sur stratégie à adopter : bio ou non, certification, confusion sexuelle… Hétérogénéités dans les pratiques : certains poussés par la coop, d'autres ralentis	Développement du numérique essentiellement géré par la coopérative, parfois associé à une utilisation par les viticulteurs (OAD, traçabilité) Numérique vu comme manière d'alléger certaines tâches et faciliter le fonctionnement de la coopérative ; mais aussi associé à la complexification de la législation, à la superposition de démarches plutôt que la substitution, vu comme obligatoire, parfois des volontés de s'en émanciper Information interne très appréciée ; information sur internet → sur les techniques : peu mobilisée ; sur le matériel agricole : très mobilisée. Technologies de précision (guidage, modulation) perçues comme peu adaptées à leurs exploitations (trop petites, pentues et morcelées) Attentes envers les coopératives : améliorer le partage d'information en interne, utiliser des outils d'aide à la décision à l'échelle de la coopérative, utiliser les outils de communication pour la commercialisation, et prendre en charge la gestion des outils de traçabilité

Rôle de la coopérative comme intermédiaire	**Interface marchande** : différenciation lors de la collecte et vente, recherche de marchés pour valoriser les démarches, rôle technique et commercial pour mettre en relation l'écologisation et le marché. **Promotion des pratiques** : construction d'une image et identité de la coopérative **Formation**, relai d'information, intermédiaires avec organisations agricoles et politiques publiques, accompagnement administratif et suivi technique (notamment pour HVE) **Recherche et Développement**	**Diffusion** : intermédiaire fournisseurs/adhérents, veille technologique **Test**, expérimentation et diffusion d'information (OAD ou prototypes de robots) **Achat** collectif **Conseil**, accompagnement, formation, visite
Rôle de la coopérative dans la coordination	Assurer la coexistence entre différentes voies d'écologisation des pratiques, ou promouvoir une voie d'écologisation, tout en évitant le départ d'adhérents Mise en place de règles de paiement du raisin Mise en place de la traçabilité associée aux cahiers des charges	Communication interne : construction d'une unité au sein de l'organisation Communication externe : construction d'une identité aux yeux des clients Coordination technique : complexification traçabilité avec certifications Formation, choix d'investissements

10 Article de la revue Cahiers du développement coopératif

Les caves-coopératives dans le processus de numérisation de l'agriculture
Éléonore Schnebelin et Jean-Marc Touzard - 2022

Introduction

L'agriculture est aujourd'hui marquée par le développement du numérique avec de nombreux débats sur les avantages, inconvénients, risques et opportunités de ces innovations. Les coopératives agricoles participent à ce processus en accompagnant l'utilisation d'outils numériques chez leurs adhérents ou en intégrant ces technologies dans les activités de collecte, transformation ou commercialisation. Mais quel est le rôle exact des coopératives dans ce processus ? Comment gèrent-elles les changements ou tensions induits par ces technologies, notamment dans leurs liens aux adhérents ? Ces questions ont été soulevées dans le cadre d'un travail de thèse sur les liens entre le développement du numérique et les enjeux environnementaux de l'agriculture , à travers une série d'enquêtes réalisées auprès d'organisations agricoles, d'agriculteurs céréaliers et de viticulteurs . Nous voulons ici approfondir cette question pour les coopératives viticoles, confrontées à des enjeux d'innovation et de communication sur des marchés de qualité où environnement, lien au terroir et traçabilité sont prégnants. L'article se focalise sur les caves coopératives d'Occitanie, dont huit ont été enquêtées de manière approfondie en 2020 (40 entretiens avec salariés et adhérents), en choisissant des situations représentatives de leur diversité de taille, de localisation et d'orientation productive (vins AOP ou IGP, Bio ou conventionnels). Nous présentons les domaines du numérique dans lesquels les caves coopératives s'engagent, le type de d'actions qu'elles mettent en place et le rôle qu'elles jouent dans la numérisation de l'activité, en précisant les problématiques auxquelles elles font face.

Les domaines de numérisation des activités dans les caves coopératives

À l'échelle des caves coopératives et de leurs adhérents, quatre domaines de numérisation ont été identifiés, avec des niveaux différents de développement :

i) Gestion du vignoble

Ce domaine correspond au développement du numérique utilisé à l'échelle des pratiques viticoles et de la production de raisin des adhérents. Les technologies numériques incluent les services météo, le recours (encore limité) à des outils d'aide à la décision (OAD) pour les traitements (prédiction des risques maladie), la gestion de l'irrigation, ou encore la robotique (encore à l'état de prototype). Les OAD correspondent à l'utilisation de données, modèles, applications web ou smartphone, pour prédire des situations (risque maladie, risque ravageurs, stress hydrique, besoins en fertilisation etc.) et aider à prendre des décisions agronomiques. Ces OAD peuvent être directement fournis par un prestataire de stations météo ou de sondes, des instituts techniques (IFV), des entreprises de l'agrochimie ou encore des coopératives d'approvisionnement en intrants.

ii) Organisation des vendanges et sélection parcellaire

L'organisation des vendanges est un autre domaine de développement du numérique dans les caves coopératives, avec des enjeux et outils spécifiques.

Des services de télédétection parcellaire ont par exemple été développés afin d'estimer la vigueur des vignes sur les parcelles et le niveau de maturité des raisins, permettant de sélectionner les parcelles à l'échelle de la coopérative et de déterminer les dates de vendange. Des outils logistiques numériques sont aussi utilisés pour planifier les vendanges et s'organiser avec les adhérents, gérer les apports de raisin au quai et les premières étapes de vinification, plus complexes à organiser avec l'élargissement des gammes de vin. Les outils d'organisation des vendanges et de sélection parcellaire visent avant tout à faciliter le travail des salariés de la coopérative lors de ce moment intensif en travail et stratégique pour élaborer des vins de qualité.

iii) Gestion de la traçabilité

Le numérique est également utilisé pour gérer la traçabilité des flux qui concourent à la production et commercialisation du vin de la coopérative. Cette collecte et organisation de l'information est utilisée pour garantir le respect de cahiers des charges (notamment HVE) ou de contrats vrac (négoce export ou marques). Elle fait plus largement le lien entre d'une part, la structure de vinification et commercialisation et, d'autre part, les adhérents (gestion des comptes adhérents), mais aussi les autres parties-prenantes de l'organisation : fournisseurs, acheteurs, ODG et administration (gestion des achats et comptes client, suivi des stocks et signes officiels de qualité). Les caves coopératives sont ainsi engagées dans la mise en œuvre d'une traçabilité numérique sur l'ensemble des flux de matières et flux économiques.

iv) Communication interne/externe

Enfin, le numérique se développe fortement pour la communication interne et externe de la coopérative. En interne, il s'agit surtout d'informer et partager des connaissances sur les techniques viticoles, la logistique, la réglementation, la vie interne de la coopérative avec des moments clés comme la période de vendange. Les supports sont variables : groupe WhatsApp, SMS, intranet, Email, visioconférence. Certains de ces outils ne sont pas encore généralisés (y compris pour l'organisation des conseil d'administration par exemple) mais ils deviennent essentiels pour coordonner les relations aux adhérents, les activités de vinification ou commerciales, et la gestion de la coopérative, surtout lorsque celle-ci est implantée sur plusieurs sites. La communication externe s'organise autour des réseaux de fournisseurs et de clients, mais elle s'étend aussi de plus en plus vers les consommateurs via des sites web et réseaux sociaux.

Le développement du numérique dans ces quatre domaines est vu par les dirigeants et adhérents des coopératives comme une réponse à la complexification administrative et logistique. Ce processus est accentué par la segmentation accrue de la gamme des vins, les réglementations environnementales, les normes privées et les contraintes à l'export, et plus généralement des marchés plus exigeants sur la traçabilité. Il répond aussi à des besoins logistiques liés à l'extension spatiale des caves coopératives, devenues souvent multi-sites. En outre, les technologies numériques permettent de répondre à de nouveaux enjeux de conseil, qui se renouvelle avec le changement climatique, l'engagement environnemental ou l'évolution réglementaire, ou dont l'offre « classique » se restreint aussi dans certaines régions.

Rôle et positionnement de la coopérative

Dans ces quatre domaines de numérisation des activités viti-vinicoles, les coopératives ont engagé des actions qui leur permettent de réaffirmer, avec plus ou moins d'intensité et d'autonomie, plusieurs fonctions importantes.

Un rôle d'intermédiaire, de mutualisation et de formation pour les adhérents

Les outils numériques pour le vignoble sont généralement proposés, testés ou même achetés par la coopérative pour ses adhérents. La coopérative joue alors un rôle d'intermédiaire entre les fournisseurs de technologies et les adhérents, avec une implication plus ou moins importante, qui, selon nos enquêtes, tend à se renforcer. Elle peut ainsi exercer une veille technologique, favoriser le partage d'information sur les options existantes et la mise en relation. Elle peut également intervenir directement dans des investissements liés, et revendre le service aux adhérents ou prendre plus directement en charge le coût de ces investissements. Par exemple, des stations météo connectées ont été achetées par plusieurs coopératives et installées sur ses terrains. Ces stations captent des données météo (pluviométrie, hygrométrie, vitesse du vent…) qui remontent dans une application commune et peuvent servir aux viticulteurs et techniciens de la coopérative. Au-delà d'un investissement collectif, la coopérative devient ainsi une échelle de collecte et de rassemblement de données, pour une information et un conseil qui vise à intégrer des données sur le contexte local. Les données peuvent être utilisées directement ou intégrées dans des outils d'aide à la décision, impliquant généralement une collecte, analyse utilisation de l'information à l'échelle du fournisseur. Plusieurs coopératives utilisent ainsi des sondes qui fournissent des données sur l'état hydrique du vignoble et alimentent des OAD diffusés à l'échelle nationale. Ces OAD répondent à un besoin de repositionnement des caves coopératives dans le conseil agricole. En effet, du fait de la séparation vente-conseil qui limite le conseil par les structures d'approvisionnement en intrants, de la mise en place des certifications (qui nécessitent des accompagnements techniques ainsi que des audits internes), et parfois aussi du fait de « pénurie » de techniciens dans d'autres structures, certaines caves coopératives cherchent à se doter de nouvelles compétences en conseil technique.

La coopérative peut aussi jouer un rôle essentiel dans le conseil et l'accompagnement des adhérents, qui ne sont pas forcément formés pour ces technologies. Des séquences de « formation », des rencontres ou visites chez certains adhérents sont ainsi organisées selon les besoins et compétences déjà acquises par les techniciens de la coopérative ou par certains adhérents eux-mêmes. Dans certains cas il s'agit clairement d'une « démonstration » suscitée par un fournisseur ou un partenaire de la cave coopérative, mais parfois c'est aussi la volonté de faire un point plus général « en interne » pour prendre plus de recul au regard de ces sollicitations externes.

La coopérative peut aussi être plus formellement le lieu de test ou d'expérimentation de nouvelles technologies numériques. Des coopératives veulent tester par exemple des OAD mais font face à des difficultés dans leur capacité d'évaluation de ces technologies. Des caves coopératives testent aussi des prototypes de technologies telles que les robots de désherbage ou des robots de taille. À cette étape, elles travaillent directement avec les concepteurs des technologies : entreprises privées, institut technique ou de recherche. Plu-

sieurs ont aussi intégré le « living lab » Occitanum qui au-delà d'un espace partagé d'expérimentation de l'usage du numérique en Occitanie, offre des perspectives de collaborations et d'image innovante que soulignent plusieurs directeurs de coopératives.

Un nouveau rôle de communication et d'affirmation d'une identité professionnelle

Les outils de communication numérique sont utilisés par l'ensemble des coopératives, à la fois dans l'organisation interne et dans la communication externe. Pour la communication interne, les coopératives qui se limitent à des alertes ou échanges ponctuels via SMS, Mail ou WhatsApp, voient le risque de se faire « marginalisées » dans les flux d'information et conseil, au profit d'autres réseaux et organisations, utilisées (ou non) par différents groupes d'adhérents. Le renforcement des liens et des contenus, apparaît alors non seulement comme la réponse à un besoin technique d'échange d'information, mais aussi comme une condition pour maintenir et renouveler l'organisation, renforcer l'appartenance des viticulteurs à leur organisation, marquer son identité dans un monde plus virtuel. Comme dans d'autres entreprises, la période de confinement de 2020 a accéléré cette évolution, avec des risques de « fracture numérique interne » auxquels étaient sensibles les directeurs enquêtés.

Pour la communication externe, les caves coopératives ont quasiment toutes investi le numérique, à la fois via les sites internet et les réseaux sociaux. Elles sont pour cela à la fois poussées par les demandes d'information et d'achat des consommateurs sur les vins, portées par la volonté d'affichage des viticulteurs, notamment les plus jeunes, et appuyées par de nombreux prestataires de service. Avant tout externalisé au début, ce travail de construction d'une communication externe est de plus en plus réalisé en collaboration avec les adhérents, notamment sur les réseaux sociaux, en y intégrant leurs photos, leurs témoignages, etc. Plusieurs coopératives enquêtées sont très actives sur ce plan en présentant des vidéos personnalisées faites avec leurs adhérents. Cette communication est aussi demandée par les viticulteurs qui font face à des critiques sociales et notamment des difficultés avec le voisinage. À travers le numérique c'est aussi l'identité professionnelle des viticulteurs en coopératives qui se joue, dans un secteur ou la communication et promotion des vins, des producteurs de leurs entreprises (domaines, coopératives) est au cœur de la création de valeur.

Une opportunité pour réaffirmer un rôle de coordination technique

Au-delà d'un (nouveau) rôle d'intermédiaire ou de communication induit (subi ou construit) à travers le développement du numérique, les caves coopératives peuvent aussi réaffirmer dans ce processus un rôle de coordination technique. La traçabilité au sein de la cave coopérative s'étend et se complexifie, appelant à combiner différents logiciels de traçabilité : pour les vignes, pour la partie cave, auxquels se rajoutent parfois des modules spécifiques ou des logiciels propres à certaines certifications spécifiques (VDD, HVE). Les coopératives font alors face à des problèmes de compatibilité entre logiciels, de simplification de procédures, d'intégration de l'information pour leur propre pilotage stratégique, et là aussi de formation des salariés et adhérents.

La mise en place par la coopérative de ces nouveaux systèmes d'information, avec souvent des appuis externes, appelle en effet à un accompagnement des viticulteurs vers l'utilisation de ces logiciels, à travers leur formation,

voire la prise en charge directe d'actions pour les adhérents qui n'ont pas les compétences. Plusieurs coopératives ont pris intégralement en charge le coût de ces logiciels afin que le collectif finance ceux « qui avancent le plus », d'autres ont proposé des formations favorisant l'accès au numérique pour éviter des exclusions trop marquées. Cet accompagnement est d'autant plus nécessaire que, d'après les dirigeants interrogés, les viticulteurs sont souvent découragés face aux difficultés, aux contraintes et aux modifications de leur métier, liées à la croissance du nombre de démarches en ligne ces dernières années. Les caves coopératives témoignent toutes que ce coût est élevé pour leur structure, avec souvent un sociétariat marqué par des adhérents âgés et peu ou pas formés aux usages du numérique, même si un nombre croissant de membres, souvent liés au conseil d'administration, est activement engagé dans la « transition numérique ». Certaines coopératives ont bénéficié d'aides européennes pour s'équiper ou d'aides à la formation, mais l'enjeu majeur est de développer au niveau des salariés et d'adhérents un réseau de compétences permettant de soutenir ce nouveau rôle de coordination technique, incluant les outils numériques.

Tensions et perspectives

Les entretiens avec les directeurs ou salariés des coopératives et avec les viticulteurs adhérents font alors ressortir une série de tensions qu'il faut gérer dans ce développement du numérique.

Quel modèle économique ?

Une première tension concerne le modèle économique lié au développement du numérique.

Premièrement, pour une technologie numérique à destination des adhérents, la coopérative avec son rôle « d'intermédiaire » peut opter pour la transmission aux adhérents d'une offre commerciale (avantageuse), ou choisir de prendre en charge collectivement l'investissement ou le coût d'un service. La première option peut limiter l'usage de ces technologies par les viticulteurs et en exclure certains, mais elle leur laisse plus le choix entre investir ou non dans la technologie concernée. L'investissement collectif peut à l'inverse permettre un plus large accès à ces technologies dans un secteur et des territoires les exploitations viticoles sont relativement petites. Des options mixtes sont aussi envisagées, la coopérative assurant un service minimum ou stratégique (traitements par exemple) pour tous, laissant la possibilité de services payant plus élaborés ou moins stratégiques.

Deuxièmement, pour de nombreuses technologies, la coopérative doit arbitrer entre un développement en interne ou le recours à une prestation externe. La première option offre une meilleure maitrise et peut limiter le coût ou la dépendance à des organisations extérieures, mais elle suppose des compétences spécifiques et du temps disponible. La seconde a le mérite d'une mise en œuvre souvent plus rapide, rassurante, adaptée aux actualisations technologiques, mais elle est aussi associée dans presque tous les entretiens à un risque de dépendance et « d'appropriation d'information » ou de coûts plus élevés. Plusieurs coopératives choisissent de recourir à des technologies de manière ponctuelle afin de limiter les investissements (par exemple utiliser un service de télédétection seulement une année de temps en temps plutôt que tous les ans).

Quelle place pour les viticulteurs et viticultrices ?

Une autre tension concerne la place des adhérents dans ce processus.

Premièrement, la coopérative doit articuler des besoins et exigences différentes des viticulteurs. Certains sont très demandeurs d'OAD ou de nouveaux outils de communication, alors que d'autres cherchent au contraire à s'écarter du numérique, qu'ils jugent difficile à utiliser ou simplement trop présent à leur goût. La coopérative doit alors trouver un équilibre pour accompagner les viticulteurs qui expriment des besoins, veulent se former ou même expérimenter de nouveaux outils numériques... tout en évitant d'imposer un changement de métier non voulu par d'autres. La coopérative se retrouve de fait à la croisée de positions, attentes et usages contrastés des viticulteurs adhérents mais aussi de ses salariés ou partenaires commerciaux.

Deuxièmement, la coopérative apparaît comme un intermédiaire pertinent pour associer les technologies numériques avec les connaissances et les pratiques des viticulteurs. Ces technologies sont construites de manières génériques et n'incluent pas les pratiques et savoirs locaux. De ce fait, elles peuvent ne pas être considérées comme pertinentes par les viticulteurs. La coopérative peut proposer certains outils comme un support à la discussion plutôt que comme une source directe de recommandations. Les informations fournies par l'outil viennent alors compléter les connaissances des techniciens et des viticulteurs, et être mieux adaptées aux situations locales et aux objectifs de chacun (selon les risques acceptés ou non par exemple). Le numérique devient alors un outil d'apprentissage collectif.

Quelles implications pour le travail ?

Le développement du numérique est souvent aussi présenté comme un moyen de gagner du temps ou d'améliorer l'organisation du travail, par une meilleure gestion de l'information ou les liens à des processus automatisés (sans parler des mécanismes de guidage ou des robots peu développés en viticulture en Occitanie). Mais les viticulteurs et salariés des coopératives enquêtées soulignent au contraire, pour certains outils numériques, du temps de travail supplémentaire, souvent sous-estimé. Premièrement, le travail lié à la mise en œuvre de l'outil vient parfois s'additionner plutôt que se substituer à des tâches existantes. Par exemple, la traçabilité numérique des pratiques viticoles est parfois faite dans un second temps, après une traçabilité réalisée sur papier. Deuxièmement, s'ajoute du temps de travail, parfois non anticipé, pour la formation et l'accompagnement, la gestion de la maintenance ou encore l'alimentation régulière en contenu pour les outils de communication.

Quelle pertinence et mise en compatibilité ?

Finalement, une des questions cruciales reste le choix de recourir ou non à un outil numérique, et le choix entre différents outils a priori équivalents. Premièrement, les dirigeants et adhérents des coopératives enquêtées s'accordent pour partir d'une évaluation des besoins réels de la coopérative et de ses adhérents (ce qui n'a pas toujours été le cas), pour décider de la pertinence ou non d'utiliser telle technologie numérique, en prenant en compte la diversité des besoins des adhérents, le modèle économique souhaité, ainsi que les impacts possibles sur le travail. Deuxièmement, les coopératives doivent faire des choix entre différentes technologies disponibles, dont les évaluations sont limitées, à l'échelle de la coopérative, mais aussi souvent dans les supports

techniques existants, pas toujours neutres ou manquant de recul (conseillers, presse professionnelle…). Le besoin de mutualiser les connaissances disponibles pour évaluer ces outils ressort comme une priorité, à développer à d'autres échelles que la coopérative (chambres d'agriculture et instituts techniques, fédérations de coopératives ou médias professionnels…) et dans des échanges entre dirigeants ou adhérents de différentes coopératives.

Pour l'ensemble des responsables et adhérents des caves coopératives étudiées, le développement du numérique est en cours et semble même s'accélérer. L'enjeu est de conserver par la formation et le conseil une maitrise minimale sur ce processus et de mieux coordonner à l'échelle de la coopérative les différents domaines de ce développement, à la fois au vignoble, dans la gestion des vendanges, pour gérer la traçabilité et pour la communication interne et externe. Il s'agit d'avoir une stratégie numérique, au regard d'une stratégie plus globale de la coopérative face aux évolutions des marchés, des questions de durabilité, des réglementations, des structures d'exploitations, des besoins et modes de vie des viticulteurs… Le levier numérique n'est qu'un levier parmi d'autres et doit être pensé en combinaison avec les autres leviers d'action et avec les objectifs des caves coopératives : satisfaire les aspirations et besoins économiques et sociaux des viticulteurs adhérents, en développant de manière démocratique des outils collectifs de production et des connaissances partagées.

11 Article complémentaire

Agriculture numérique : une promesse au service d'un nouvel esprit du productivisme ?

Théo MARTIN*, géographie, INRAE, UMR Innovation, Montpellier, France

Éléonore SCHNEBELIN, économie, INRAE, UMR Innovation, Montpellier, France

theo.martin@inrae.fr

48000 signes espaces compris

Résumé

Depuis la fin des années 2010, l'agriculture numérique connait un essor important caractérisé par la création d'entreprises, de dispositifs de recherche mais également la mise à l'agenda des politiques publiques. Face à des adoptions encore balbutiantes, ses promoteurs construisent et diffusent une promesse qui facilite l'attraction de ressources financières et institutionnelles. Cette promesse technoscientifique se caractérise par la mobilisation d'un argumentaire productiviste mais fournit également une réponse aux critiques de ce dernier. De plus, ses promoteurs ancrent l'agriculture numérique dans une diversité de modèles agricoles et alimentaires (agroécologie, circuits courts, compétitivité etc.), ce qui facilite la captation des ressources et la légitimité du modèle. L'agriculture numérique s'inscrit donc dans une promesse qui renouvelle l'esprit du productivisme.

Digital farming: a promise for a new spirit of productivism?

Abstract

Since the end of the 2010s, digital agriculture has experienced significant development, characterized by the creation of new businesses and research projects, as well as its add on the public policy agenda. Faced with still incipient adoptions, its promoters are making and spreading a promise that facilitates the attraction of financial and institutional resources. This techno-scientific promise is characterized by the mobilization of a productivist argument, but also provides a response to its critics. Three arguments provide a response to the criticisms of productivism: i. disintermediation and participation of farmers and consumers; ii. consideration of sustainable development; and iii. accommodation of a diversity of agricultural and food models. Moreover, its promoters anchor digital agriculture to a diversity of farming and food models (agro ecology, local food chains, competitiveness, etc.). We thus propose to understand digital agriculture as a promise that renews the spirit of

productivism. This renewal is marked by both an integration of the criticisms and an integration to the contemporary agro-food system, characterized by a diversity of farming and food models.

Mots clés

Agriculture numérique, promesse technoscientifique, productivisme, France, innovation

Keywords

Digital agriculture, technoscientific promise, productivism, France, innovation

Des innovations numériques en agriculture à l'agriculture numérique

Numérique, robotique et génétique seraient-elles les nouvelles mamelles de la France (Ducros, 2021) ? C'est en tout cas ce que laissent penser les annonces du président de la République Française qui souhaite « accélérer la révolution agricole et agroalimentaire » dans le cadre du plan d'investissement France 2030 (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021). Espoir d'une transformation radicale, cette "révolution numérique" projette l'image d'une agriculture connectée, faisant appel aux capteurs, robots, drones ou encore intelligences artificielles au service d'une production qui résoudrait les problèmes d'un secteur en crise de durabilité. Une certaine diversité sémantique gravite autour de ces innovations : agriculture 4.0, révolution numérique de l'agriculture, agriculture connectée, digital farming, AgTech voire la réactualisation de l'agriculture de précision. Parmi ces concepts, celui d'agriculture numérique semble, en France, structurant et structuré d'une diversité d'acteurs faisant de ces innovations leur objet de travail. De l'utilisation d'internet à des fins administratives par les agriculteurs (Laborde, 2012) aux robots et tracteurs autonomes (Reddy *et al.*, 2016), il est difficile de cerner la temporalité et la diversité d'innovations et d'implications de cette agriculture numérique. À écouter ses promoteurs, elle englobe à la fois des objets (drones, robots, capteurs etc.), des systèmes techniques (IA, maching learning, big data etc.), des processus (digitalisation, datafication, etc.) ou encore des concepts (économie circulaire, réseaux intelligents, financement participatif etc.). Tout comme les biotechnologies dans les années 1970, les nanotechnologies dans les années 1990 ou encore la biologie synthétique dans les années 2000, l'agriculture numérique apparaît donc comme un terme parapluie (Joly, 2015) dont le large spectre facilite l'attraction des ressources. Ce large spectre d'innovations est présenté comme vecteur d'une transformation radicale de l'agriculture à même de répondre aux enjeux contemporains : durabilité, transformations du travail, changements climatiques etc. Pourtant, plusieurs de ces innovations proposées par l'agriculture numérique restent faiblement déployées (drones et robots notamment) (Agro Smart Campus, 2019). D'autres, dont le déploiement est incontestable, servent de parangon au secteur alors même que leurs effets sur l'agriculture restent contrastés ou peu étudiés. C'est

notamment le cas du robot de traite dont l'amplitude et la variété des transformations du travail rendent discutables les effets annoncés par les tenants d'une robotisation du travail agricole (Martin *et al.*, 2020). Pourtant, des rapports sur l'agriculture numérique louant ses vertus sont publiés, des formations préparent agriculteurs et ingénieurs à cette nouvelle agriculture, des start-up de l'AgTech sont créées, des capital-risque et des fonds publics financent cette agriculture numérique et des évènements, des associations et des dispositifs en font leur objet. Ainsi, malgré toute l'incertitude autour de ces innovations techniques, cette agriculture numérique mobilise des ressources et reconfigure les pratiques, les discours, les institutions et les rapports de force. Les promoteurs de l'agriculture numérique construisent donc une promesse dont la réalisation est d'autant plus probable que la croyance en cette promesse est forte (Joly *et al.*, 2015). Ainsi, nous proposons ici de comprendre l'agriculture numérique non pas dans sa dimension technologique ni même dans ses usages mais comme une promesse technoscientifique (Joly, 2015). Après avoir caractérisé les acteurs, la mise en scène et les régularités discursives de cette promesse, nous tenterons de montrer en quoi elle renouvelle l'esprit du productivisme c'est-à-dire les arguments et dispositifs mis en place pour fabriquer de l'adhésion aux principes d'une agriculture productiviste (Fouilleux et Goulet, 2012).

L'agriculture numérique : une analyse par la promesse technoscientifique

Comment attirer les investisseurs, mobiliser les acteurs publics et trouver l'adhésion de la société à des innovations dont les effets ne peuvent qu'être supposés ? C'est en réponse à cette tension que les anticipations et projections prennent place dans le développement technoscientifique (Joly *et al.*, 2015). Depuis l'ère industrielle, les innovations sont plus le résultat de stratégies délibérées que de découvertes fortuites, ce qui fait des anticipations une composante essentielle de ce régime d'innovation (Borup *et al.*, 2006). Les promesses occupent une place si centrale dans les systèmes d'innovations contemporains que P.B Joly parle de régime de l'économie des promesses technoscientifiques comme le modèle dominant de conception, de promotion et de gouvernance de l'innovation (Joly, 2010). La promesse d'un monde meilleur permis par un « miracle technologique toujours recommencé » foisonne dans l'espace public et médiatique (Compagnon et Saint-Martin, 2019). Intelligences artificielles, robots, nanotechnologies, biologie de synthèse sont autant de miracles annonçant un futur technicisé inévitable mais souhaitable. Occupant l'espace public et social, ces promesses façonnent nos croyances, construisent notre adhésion et affectent notre esprit critique envers ces innovations. En légitimant ses dernières, la promesse permet également de mobiliser des ressources (financières, politiques, symboliques etc.). Ainsi, elle se construit en même temps qu'elle construit les représentations, les discours, les institutions et les dispositifs. Le rôle des promesses

technoscientifiques a été largement étudiée dans le cas des biotechnologies, des nanotechnologies ou encore de la biologie de synthèse (Brown et Michael, 2003, Jones, 2008, Joly, 2010, Flocco et Guyonvarch, 2019). Hormis l'exemple emblématique des OGM (Joly, 2010), l'innovation dans les systèmes agricoles et alimentaires est plus rarement examinée sous ce prisme (Fournier et Lepiller, 2019). Pourtant, la centralité de l'anticipation dans les discours des promoteurs de l'agriculture numérique laisse peu de doute quant à la force structurante de la promesse. C'est pourquoi nous souhaitons ici décrire et caractériser l'agriculture numérique comme une promesse technoscientifique dont la particularité est de réhabiliter le productivisme agricole tout en intégrant ses critiques. Notre démonstration s'appuie sur une observation participante de longue durée, des entretiens ainsi qu'une analyse documentaire réalisés au cours de deux thèses doctorales sur l'agriculture numérique. Ces thèses ayant été cofinancées par l'Institut Convergences Agriculture Numérique (DigitAg), les auteurs ont pu collecter des données expérientielles grâce à une participation observante (Bastien, 2007) au sein des évènements de l'agriculture numérique (journées des doctorants, formations, séminaires, salons du machinisme et de la robotique agricole etc.). Des entretiens ouverts et semi-directifs ont été réalisés avec des chercheurs, ingénieurs, conseillers, agriculteurs, industriels, commerciaux et membres d'organisations professionnelles. Enfin, une veille scientifique, médiatique et institutionnelle a été menée pendant deux ans (2020 et 2021). A partir de cette veille, différents acteurs de l'agriculture numérique ont été identifiés. Certains en parlent avec circonspection, d'autres de manière critique mais beaucoup partagent les éléments d'un discours articulé autour d'une vision prometteuse de ces innovations. Ce sont ces acteurs, leurs dispositifs et éléments discursifs qui ont retenu notre attention et font l'objet de cet article. Nous avons sélectionné 27 documents qui mettent en avant la promesse de l'agriculture numérique (page web, article de presse, blogs, documents institutionnels et scientifiques etc.) de manière à couvrir la diversité des acteurs. L'analyse de ces documents a été réalisée en utilisant le logiciel Nvivo® et a consisté en un codage à la fois déductif et inductif (démarche abductive; Timmermans et Tavory, 2012). Le codage déductif a permis d'identifier les différentes dimensions de la promesse : la situation problématique, l'horizon à atteindre et la solution technoscientifique proposée. Puis, suivant les principes de la *grounded theory* (Corbin et Strauss, 2007), nous avons réalisé un encodage inductif faisant ressortir au fil de l'eau les éléments propres à cette promesse.

La fabrique de la promesse

La construction d'une solution technoscientifique

Avec le développement de logiciels de gestion ou de comptabilité, le numérique arrive en agriculture dans les années 1980 (Savalle et Lacaille, 2018). Les outils numériques se déploient plus

largement et de manière plus diversifiée avec le développement de l'agriculture de précision dans les années 1990 (Oui, 2021). Mais c'est à partir des années 2010 que l'agriculture numérique se structure et s'institutionnalise en lien avec la multiplication de documents institutionnels, d'événements sur le sujet et la densification d'activités de recherche, d'entreprises, d'organisations agricoles ou publiques portant sur le numérique en agriculture (Figure 1).

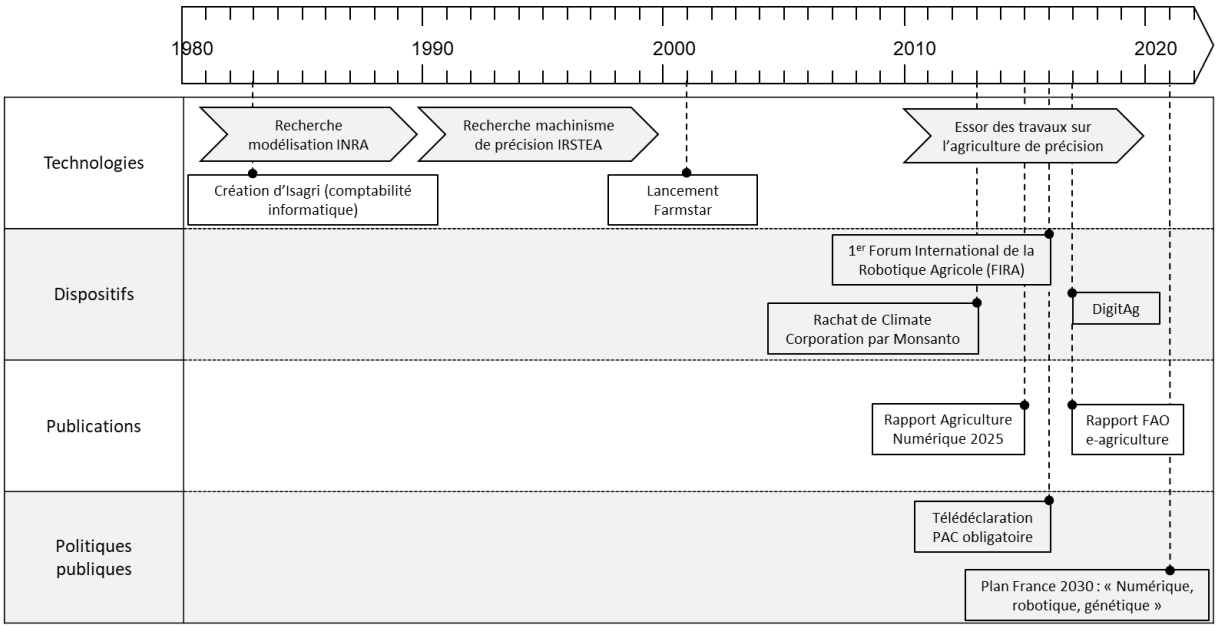


Figure 1: Les grandes dates de l'agriculture numérique française

Les enjeux environnementaux et alimentaires, les conditions de travail et la réussite économique sont autant de domaines représentant pour les promoteurs de l'agriculture numérique des situations problématiques (Figure 2). Résoudre ces problèmes permettrait d'atteindre trois grands objectifs. Le premier est de produire « plus et mieux », grâce à une agriculture performante d'un point de vue économique (meilleur revenu, coût de production etc.), environnemental (moins de pollution, meilleur pour la santé etc.), et social (meilleures conditions de travail, filières plus transparentes, coopération etc.). Le deuxième objectif est de construire un secteur économique, celui de l'« AgTech » français rayonnant à l'international. Le troisième renvoie à une agriculture plus collaborative (partage de connaissances, données ouvertes) et à des agriculteurs plus autonomes. Pour atteindre ces horizons, la solution identifiée est une agriculture numérique basée sur le « Big Data », l'« Intelligence Artificielle », les « données ouvertes » etc. À en croire ses promoteurs, l'agriculture numériques serait donc un moyen inévitable pour atteindre cet horizon à tel point que l'agriculture numérique devient dans certains discours une fin en soi.

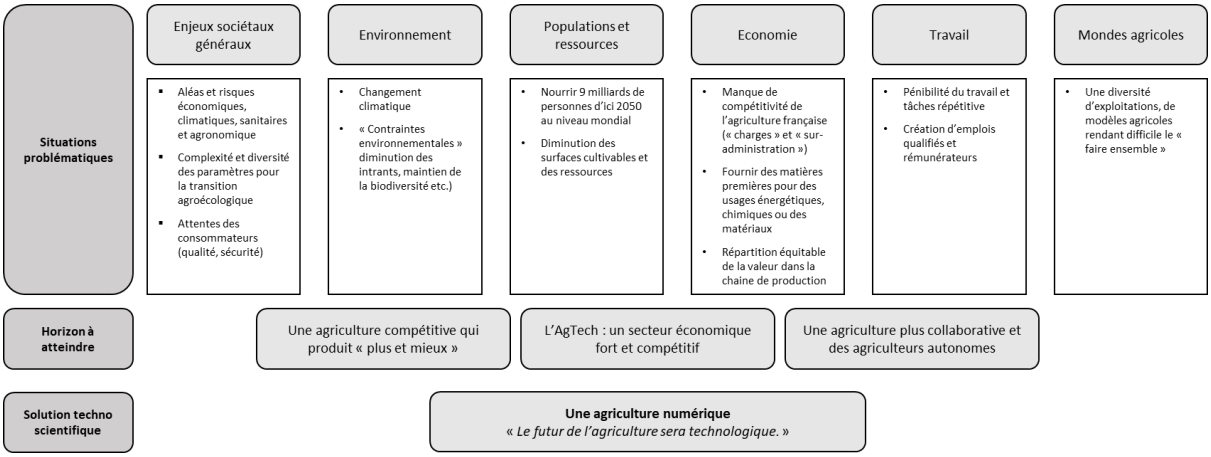


Figure 2: Construction discursive de la promesse de l'agriculture numérique

Les acteurs et dispositifs de l'agriculture numérique

Participatif, collaboratif, horizontal et décentralisé sont autant d'adjectifs souvent associés aux nouvelles formes de production et d'échange de l'information à l'ère du numérique (Rebillard, 2007). Pourtant, l'idéal décentralisé et démocratique du numérique a fait place à des rapports de force dont l'une des résultantes est un oligopole bien connu : les GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft) (Smyrnaios, 2016). Ces « géants du numériques » montrent un intérêt croissant pour le secteur agricole (Lerbourg, 2021). Par exemple, Microsoft a développé le service Azure Farmbeats pour agréger et analyser des données agricoles, Google s'est lancé dans la robotique agricole avec le projet Mineral, alors qu'Amazon s'étend vers la commercialisation de produits alimentaires en ligne mais aussi avec ses magasins Amazon Fresh, dans lesquels tous les produits sont tracés via la technologie de blockchain. Face à eux, les acteurs traditionnels du monde agricole se lancent aussi dans cette numérisation de l'agriculture. InVivo, premier groupe coopératif français a ainsi lancé en 2019 une plateforme de vente en ligne destinée aux agriculteurs : aladin.farm. Le groupe la présente comme « la seule alternative française au e-commerce jusqu'alors proposé aux agriculteurs » et formule ainsi une alternative aux deux leaders du e-commerce que sont Amazon et Alibaba (Communiqué de presse - Aladin.farm, 2020). Mais bien souvent, les investissements dans l'agriculture numérique se font à travers des produits et dispositifs réunissant des acteurs traditionnels de l'agriculture (Instituts techniques, organisations professionnelles agricoles, agro-industries, recherche agricole etc.) et les grandes firmes du numérique (Microsoft, IBM, Orange). La plateforme numérique YARA est ainsi développée avec IBM, et InVivo s'est associé avec Microsoft dans le cadre du projet Innovation IA. La technologie Farmstar est quant à elle issue de partenariats entre Arvalis, l'Inra et Airbus (Labarthe, 2012). Ces dispositifs de coordination entre firmes du numérique et acteurs agricoles permettent la mise en commun de ressources complémentaires et le développement d'une complémentarité entre

acteurs privés et publics (ibid). D'un côté les acteurs agricoles publics et privés apportent la connaissance et les réseaux d'un secteur dont les logiques économiques et les agencements institutionnels sont singuliers (Touzard, 2018). De l'autre côté, les acteurs du numérique apportent la connaissance de cette nouvelle économie de la donnée, de ses infrastructures, technologies et marchés.

Cette caractérisation rapide des acteurs de l'agriculture numérique illustre la tension qui traverse la promesse de l'agriculture numérique : la tension entre une transformation radicale et la nécessaire crédibilité qui implique des formes de régularité et de continuité (Joly, 2015).

Mise en scène de la promesse et mobilisation de ressources

Les dispositifs de mise en scène de cette promesse de l'agriculture numérique sont essentiels pour construire l'adhésion du public. Les démonstrations publiques de technologie ou *démos* constituent une forme de cette mise en scène communément mobilisée par les promesses technoscientifiques (Rosental, 2019). À l'image de ses acteurs - nouveaux ou traditionnels - l'agriculture numérique trouve en France des espaces de démonstration, aussi bien dans les évènements agricoles traditionnels tels que le salon international du machinisme agricole (SIMA), que dans des espaces nouveaux fournissant une visibilité différenciée pour une transformation qui se veut révolutionnaire. C'est le cas, par exemple, du forum international de la robotique agricole (FIRA) qui se tient chaque année depuis 2016 à Toulouse. L'agriculture numérique sait également créer des lieux et des modalités de mise en scène qui lui sont spécifiques et adaptés aux singularités de l'activité agricole. En effet, les scènes privilégiées pour fournir une crédibilité à ces innovations sont inévitablement la parcelle et l'exploitation agricole. Ainsi, la promesse de l'agriculture numérique peut s'appuyer sur un ensemble de dispositifs en situation réelle que sont les fermes expérimentales dédiées aux outils numériques. Ces lieux constituent également une interface de choix pour mettre en relation start-up, établissements d'enseignement, institutions de recherche et agriculteurs et participent ainsi à la coordination des acteurs. Le Mas Numérique fournit un exemple intéressant de site de démonstration des technologies numériques destinées à la viticulture et un outil de formation pour les étudiants et les professionnels (Crestey et Tisseyre, 2019). Installé au Domaine du Chapitre de l'école d'agronomie de Montpellier (Institut Agro), le Mas Numérique a pour vocation de « participer à la formation des futurs ingénieurs agronomes et techniciens agricoles en proposant une vision éclairée de l'environnement numérique existant » (Le Mas Numérique, 2017). Il peut ainsi être vu à travers un usage double au service de la promesse : un lieu de construction de l'adhésion par la démo et un lieu de construction d'une légitimité scientifique par la formation des experts et acteurs du développement agricole.

Révolution ou renouvellement de l'esprit du productivisme ?

L'analyse de l'agriculture numérique sous le prisme des promesses technoscientifiques donne à voir une certaine continuité avec les justifications actuelles et passées du productivisme agricole. Nous tentons ici d'analyser cette promesse en identifiant les concordances argumentatives avec le productivisme agricole. Nous essayons également de distinguer ce qui représente une rupture ou plutôt un renouvellement du discours productiviste. Nous proposons ainsi une contribution à la caractérisation de ce que Fouilleux et Goulet (2012) ont nommé *le nouvel esprit du productivisme*. Le nouvel esprit du productivisme est un prisme d'analyse des évolutions discursives et des dispositifs que ces auteurs avancent pour décrire l'évolution du productivisme vu comme « *un ensemble de procédés techniques, de dispositifs organisationnels et de croyances engageant des acteurs autour de l'exigence d'accroissement et d'intensification de la production* » (2012). Il s'inscrivent ainsi dans le cadre proposé par Boltanski et Chiapello (1999) pour expliquer la manière dont le capitalisme se nourrit de la critique et l'intègre pour produire de l'adhésion et sa justification. Ces auteurs définissent ainsi le nouvel esprit du capitalisme comme « un ensemble de croyances associé à l'ordre capitaliste, qui contribue à justifier cet ordre et à soutenir, en les légitimant, les modes d'action et les dispositions qui sont cohérents avec lui » (1999, p. 46). Selon la même mécanique, le productivisme agricole aurait su s'adapter aux critiques environnementales et sociales. Fouilleux et Goulet (ibid) illustrent ce renouvellement à travers deux exemples que sont le semis direct et les dispositifs de certification « multi-stakeholders ». Selon eux, l'esprit du productivisme met désormais en avant l'inclusion et la participation des acteurs (agriculteurs, ONG, industriels etc.) dans la recherche de solutions. Cette adaptation s'incarne à travers un ensemble d'éléments discursifs mais également par la mise en place de dispositifs (notamment des tables rondes, rencontres et rassemblements).

De la continuité de l'esprit du productivisme agricole

Fouilleux et Goulet identifient trois principales dimensions dans ce qu'ils appellent l'esprit initial du productivisme : « la croyance dans les bienfaits du progrès scientifique et technique ; la certitude que l'agriculture est une affaire de professionnels et de spécialistes ; et celle que sa première mission est de nourrir la population mondiale tout en générant des profits pour les acteurs du secteur. » (Fouilleux et Goulet, 2012). Avec l'agriculture numérique, le progrès scientifique et technique est vu comme une réponse à la plupart des injonctions de transformation de l'agriculture (environnement, changement climatique, travail des agriculteurs etc.). Si le déploiement de l'agromachinisme, des engrais, des pesticides et des semences « améliorées » permettait de produire plus et ainsi d'atteindre l'autosuffisance alimentaire au sortir de la seconde guerre mondiale, les robots, capteurs, drones, smartphone et autres technologies du numérique nous permettraient toujours de produire plus mais

également « mieux ». L'adage « nourrir l'humanité » est ainsi fortement repris par les acteurs de l'agriculture numérique comme impératif indéniable justifiant une augmentation de la production et donc le recours à ces technologies. Cet argument fondateur du productivisme, le mythe de la crise alimentaire (Latham, 2021) s'hybride avec les enjeux d'un développement durable comme registre de justification et d'extension de la logique productiviste (Lejeune et Villalba, 2015). Et si les innovations numériques sont affichées comme un moyen d'améliorer la compétitivité des fermes françaises, l'agriculture numérique offre également l'opportunité d'un « renouveau industriel de la France » (Bournigal *et al.*, 2015). Cette opportunité économique est souvent présentée comme un impératif sous peine d'être laissé sur le banc de la compétition internationale. Le mythe du retard de la France est une constante de l'esprit du productivisme : retard par rapport à d'autres pays, retard par rapport aux autres secteurs économiques, il alimente le registre de justification de cette promesse aujourd'hui comme hier (Servolin, 1989). Après-guerre, c'était le modèle danois (ibid) ou américain (Flamant, 2010). Aujourd'hui, l'agriculture française serait en retard sur les Etats-Unis ou ses voisins européens (Suisse, Suède, Pays-Bas, Allemagne). C'est ce que laisse penser le rapport de l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle sur l'Indice mondial de l'innovation ayant pour thème « L'innovation pour nourrir le monde » (OMPI, 2017). Le site de veille technologique de l'industrie s'en inquiète : "La France, mauvaise élève ?" (Fontaine, 2017). Mais surtout, l'agriculture doit rattraper son retard sur les autres secteurs, elle doit combler le fossé technologique qui la sépare du reste de l'économie : "retard considérable" (Scheid, 2020), "La technologie change le monde et l'agriculture rattrape son retard" (Scheid, 2020), "L'agriculture veut combler son retard digital" (Martin, 2019). Le recours à l'argument du retard technologique et économique positionne l'agriculture dans une trajectoire dont l'évolution est unidirectionnelle et inévitable qui contribue à une naturalisation du progrès technologique. La rhétorique de la crise de l'agriculture est un autre élément de justification du productivisme mis en place avec la modernisation agricole du XXème siècle. Cette crise perpétuelle à laquelle l'agriculture française semble confrontée depuis la fin du XIXème constitue le « problème à résoudre » de cette promesse. Crise de durabilité aujourd'hui, crise paysanne hier, Servolin (1989) rappelait la constance du mécontentement dans les discours sur l'agriculture française : *La Terre qui meurt* de R.Bazin (1899), *Le Drame agricole* de H.Queuille (1923), *La tragédie paysanne* de M.Braibant (1937), *Orages sur les moissons* de S. Sailly-Laisné (1941), *La Révolte paysanne* de J. Meynaud (1963) œuvres auxquelles on pourrait rajouter les ouvrages actuels suivants : *Le livre noir de l'agriculture: Comment on assassine nos paysans, notre santé et l'environnement* d'I. Saporta (2011*), Reprendre la terre aux machines* (Atelier paysan, 2021) ou encore *Lettre à un paysan sur le vaste merdier qu'est devenue l'agriculture* par F. Nicolino (2015). Dans le cas de l'agriculture numérique, le registre de la crise est avant tout celui d'une agriculture française peu compétitive, une crise de la place de la France dans la compétition internationale : « Soyons clairs : l'agriculture française souffre d'un manque de compétitivité ! La

situation est grave et il est urgent d'exploiter tous les leviers qui peuvent donner un nouveau souffle économique à notre agriculture. » (Bernede *et al.*, 2017).

Que ce soit la croyance dans les bienfaits du progrès technique et scientifique, le recours à la menace d'une crise alimentaire, l'impératif économique de la compétition internationale ou la situation de crise, le productivisme agricole trouve dans l'agriculture numérique le vecteur de ses arguments et principes. Les promoteurs de l'agriculture numérique énoncent cependant des éléments discursifs et des dispositifs inédits au regard de cet esprit du productivisme agricole. Il opère ainsi un renouvellement de cet esprit qu'il convient de caractériser.

Renouvellement de l'esprit du productivisme

D'après M.Prével (2008), l'agriculture productiviste se caractériserait non seulement par la volonté d'augmenter les volumes produits mais également par l'absence d'un souci pour les conséquences de ses pratiques. Si l'on adhère à cette définition, il semblerait que le productivisme évolue, qu'il se préoccupe des conséquences de ses pratiques et use de ces préoccupations pour renouveler sa justification. Sans prétendre à l'exhaustivité, trois arguments occupent une place centrale dans le renouvellement de cet esprit du productivisme : i. la désintermédiation et la participation des agriculteurs et des consommateurs ; ii. la prise en compte du développement durable ; et iii. la compatibilité avec une diversité de modèles agricoles et alimentaires.

La rhétorique participative contribue à la légitimation des projets d'extension du productivisme comme cela a déjà été mis en évidence dans le cas du développement durable des villes (Lejeune et Villalba, 2015) ou de certains modèles agricoles et alimentaires (Fouilleux et Goulet, 2012). Cette mise en avant de la participation des acteurs est également fortement présente dans la promesse de l'agriculture numérique. La facilitation des partages entre agriculteurs et la transparence des relations entre producteurs et consommateurs sont les deux principales désintermédiations proposées par les promoteurs d'une agriculture numérique. Toujours dans un souci d'accommodement entre une proposition disruptive et un réalisme passant par l'ancrage à l'existant, les discours sur l'agriculture numérique soulignent les dimensions collectives de l'agriculture tout en proposant de les étendre et de les transformer. Les technologies numériques viendraient ainsi amplifier la mise en relation et le partage déjà fortement présents chez les agriculteurs : « Ce que va permettre le numérique, à travers les plateformes, c'est de démultiplier les opportunités pour « faire ensemble » dans une profession qui a déjà la capacité à collaborer » (Bernede *et al.*, 2017) ; « le numérique et ses données collectées à grande échelle […] accélère les collaborations, les partages de données, de savoirs, de matériels » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016). L'agriculteur est positionné comme un acteur central des transformations annoncées, les technologies n'étant là que pour « appuyer »,

« accompagner », « informer », « plus d'efficacité » voir contribuer « à l'indépendance intellectuelle de l'exploitant ». Cette désintermédiation mobilise également les injonctions des consommateurs à plus de transparence sur la manière dont leur alimentation est produite. Le consommateur est d'ailleurs un des six points de la « révolution du big data » présentée par le magazine du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt : « Consommateur : la chaîne alimentaire devient transparente. Cette traçabilité rapproche le producteur du consommateur et facilite leurs échanges. » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016). La promesse d'une agriculture numérique opère ainsi un habile rapprochement entre des principes et valeurs de la culture du numérique et ceux du monde agricole. La transparence et la désintermédiation sont en effet des principes pionniers qui imprègnent la culture du numérique (Rebillard, 2007). Ils sont mobilisés et adaptés au contexte de l'agriculture française par la mise en exergue de ses dimensions collectives telles que le coopérativisme ou encore les réseaux d'échanges de connaissances.

Depuis les années 1990, l'intégration de certaines composantes du développement durable permet au productivisme de retrouver une légitimité et d'asseoir sa position dominante alors que les implications des critiques les plus radicales sont ignorées (Beus et Dunlap, 1990). La légitimation environnementale, qui caractérise le régime agri-alimentaire contemporain, trouve dans le numérique une manière de quantifier, rationnaliser, objectiver l'environnement, au service d'un « productivisme écologisé » (Wolf et Wood, 1997, Oui, 2021). L'agriculture numérique permettrait ainsi de « maitriser l'empreinte environnementale » pour faire face aux « contraintes environnementales », voire même de « contribuer au projet agroécologique ». Au-delà de la composante environnementale, les promoteurs de l'agriculture numérique proposent de s'attaquer au pilier social de la durabilité, dimension souvent délaissée du développement durable (Dumont et Baret, 2017, Gosetti, 2017). Les technologies numériques permettraient notamment « d'accroître le confort », de « limiter la pénibilité » et « d'avoir une vie sociale ». La promotion des volets environnementaux et sociaux s'ajoute à celle du volet économique de l'esprit initial du productivisme.

Chaque promesse techno-scientifique s'inscrit dans un contexte historique particulier. Celle de l'agriculture numérique se développe dans un paysage marqué par une grande diversité de modèles agricoles et alimentaires (Gasselin *et al.*, 2021). Les promoteurs de l'agriculture numérique sont ainsi tiraillés entre l'énonciation d'un nouveau modèle (Bournigal, 2016) et la nécessaire prise en compte d'une diversité de modèles déjà en place. D'après le rapport ministériel, l'agriculture numérique constitue bien un nouveau modèle : « Oui, nous changerons de modèle agricole, à l'image des bouleversements à l'œuvre dans notre vie quotidienne, et l'« uberisation» des secteurs économiques : l'apparition de nouveaux services, la désintermédiation des systèmes, l'essor de la robotique heurtent profondément l'ordre établi et bouleversent la chaîne des valeurs. » (Ministère de

l'agriculture et de l'alimentation, 2016). À cette rupture annoncée s'articule un ancrage aux modèles existants notamment à ceux qui, de par leur institutionnalisation, permettent d'accroitre la légitimation de la promesse et l'attraction des ressources. C'est le cas de l'agroécologie dont l'agriculture numérique se fait une de ses boîtes à outils.

Le contexte actuel d'éclatement des modèles vient donc renforcer l'impératif contradictoire radicalité/crédibilité de la promesse. Cela donne lieu à des déclinaisons de cette macro-promesse qu'est l'agriculture numérique. Alors que les transformations réalisées lors de la modernisation agricole du XXème se sont clairement fondées sur un modèle unique (Lyautey *et al.*, 2021), à la fois sur le plan structurel (exploitation de taille moyenne), social (exploitation familiale) et fonctionnel (spécialisé et moto-mécanisé), les déclinaisons de la macro-promesse laissent entrevoir une agriculture numérique « plurielle » : aussi bien agroécologique que compétitive, aussi bien reterritorialisée qu'intégrée aux marchés mondiaux. De même, la collaboration cohabite avec la compétition entre agriculteurs, ces derniers étant différenciés en « pionniers » ou « retardataires »[1]. Le robot fournit un bon exemple des déclinaisons possibles de la macro-promesse de l'agriculture numérique. Au FIRA, se côtoient des start-ups proposant des cobots (robot collaboratif) et visant de petites exploitations familiales et des start-ups présentant des robots dont la substitution du travail humain et la baisse du coût du travail pour de grandes exploitations dépendantes du travail salarié constituent une part de l'argumentaire de vente.

L'agriculture numérique est également perçue comme un modèle par ceux qui en formalisent la critique. Ces critiques sont relativement récentes et émergentes et plutôt cantonnées à des espaces sociaux et médiatiques spécifiques aux questions agricoles (Aspexit, 2021, Reinert, 2022). Il est intéressant de constater que cette agriculture numérique ne fait pas l'objet d'une contestation aussi forte que les plantes génétiquement modifiées, une innovation qui partage avec les nanotechnologies ou la biologie synthétique un rapport très substantiel au vivant et de fait, une mise en débat plus appuyée. Les critiques de l'agriculture numérique sont d'ailleurs souvent inscrites dans une lecture plus globale sur le rôle de l'amont et du machinisme agricole en particulier dans les évolutions agricoles de la seconde moitié du XXème siècle (InPACT, 2016, L'Atelier Paysan, 2021). D'ailleurs, la promotion de l'agriculture numérique à travers ses outils ou ses technologies évite les enjeux politiques et paradigmatiques associés à l'énonciation d'un modèle. La promotion de certaines technologies au service de plusieurs modèles est plus souvent présente dans la promesse que l'énonciation d'un modèle de l'agriculture numérique. En d'autres termes, la promotion de l'agriculture numérique passe

[1] Cette typologie des « adoptants » renvoie à la courbe de Rogers (2010) décrivant la dynamique d'adoption en fonction du profil des individus.

plus par la mise en avant d'une diversité d'innovations que par l'unicité d'un modèle. Conjuguer cette agriculture numérique avec une diversité de modèles est, pour ses promoteurs, un moyen de capter plus de ressources. Le rattachement à des alternatives instituées et légitimées telles que l'agroécologie ou les circuits courts facilite l'accès aux ressources associées tout en contribuant à la légitimation de cette promesse.

Un modèle d'innovation et un modèle agricole et alimentaire

En résumé, l'agriculture numérique s'inscrit dans un régime des promesses technoscientifiques. Sa promesse a la particularité de renouveler l'esprit du productivisme agricole à travers l'intégration des critiques à son encontre (sociales et environnementales) tout en proposant une hybridation avec une diversité de modèles agricoles et alimentaires qui caractérise le régime agri-alimentaire contemporain. L'habile mélange entre « disruption » et ancrage au régime agri-alimentaire contemporain rend la promesse d'autant plus souhaitable et réalisable. Cependant, et contrairement à cette vocation plurielle qu'elle annonce, l'agriculture numérique promeut bien un modèle d'innovation (linéaire), et un modèle agricole et alimentaire (productiviste). Joly et Calon (2015) identifient deux manières de « concevoir et promouvoir » l'innovation technique dans la période contemporaine : le régime des promesses technoscientifiques et le régime des expérimentations collectives. En s'inscrivant dans le premier régime, l'agriculture numérique participe à la réhabilitation d'un modèle linéaire de l'innovation. L'usage de la typologie de Rogers par ses promoteurs en est une illustration, l'agriculteur est un « adoptant », tantôt « pionnier », tantôt « retardataire ». Le modèle d'innovation proposé repose également sur la croyance que les sciences et techniques issues de partenariats entre recherche et industries constituent la solution aux problèmes rencontrés par la société. D'autres auteurs voient dans l'agriculture numérique la possibilité d'une innovation pour des expérimentations collectives (Lacoste *et al.*, 2022) et exposent la complémentarité entre ces deux régimes d'innovation (Bellon-Maurel et Huyghe, 2016). Cependant, l'hégémonie du régime des promesses technoscientifiques donne lieu à des rapports de force qu'une approche par les complémentarités ne saurait restituer. Le travail de plaidoyer de l'Atelier Paysan - association porteuse d'un projet d'innovation par l'expérimentation collective - contre cette agriculture numérique, illustre bien cette conflictualité entre les deux régimes (InPACT, 2016, L'Atelier Paysan, 2021). L'attraction des ressources financières, institutionnelles et symboliques par la première se fait au détriment du développement de la seconde. De plus, en réactualisant ses justifications, l'agriculture numérique fait du productivisme agricole un modèle à promouvoir. C'est ce que suggère notre analyse ainsi que d'autre travaux sur la question (Oui, 2021, Schnebelin, 2022).

Références

Agro Smart Campus, 2019. *Robotique agricole : une chance et un défi*. (en ligne: https://agrosmartcampus.fr/videos/robotique-agricole-une-chance-et-un-defit/).

Aspexit, 2021. *Agriculture & numérique : prenons-nous vraiment la bonne direction ?* (en ligne: https://www.aspexit.com/agriculture-numerique-prenons-nous-vraiment-la-bonne-direction/?utm_medium=social&utm_source=linkedin#Lanalyse_du_discours_et_la_fuite_en_avant_du_numerique).

Bastien, S., 2007. Observation participante ou participation observante? {Usages} et justifications de la notion de participation observante en sciences sociales, *Recherches Qualitatives –*, 27, 1, 127-140. (en ligne: http://www.recherche-qualitative.qc.ca/Revue.html).

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C., 2016. L'innovation technologique dans l'agriculture, *Géoéconomie*, 80, 3, 159. doi: 10.3917/geoec.080.0159.

Bernede, L., Hebrard, J.-P., Seiller, M., 2017. *#CoFarming - Le faire ensemble en réseau*, *2017*. (en ligne: https://cofarming.info/wp-content/uploads/2021/04/LivreBlanc_FormatA4-BD.pdf).

Beus, C. E., Dunlap, R. E., 1990. Conventional versus Alternative Agriculture: The Paradigmatic Roots of the Debate, *Rural Sociology*, 55, 4, 590-616. doi: 10.1111/j.1549-0831.1990.tb00699.x.

Boltanski, L., Chiapello, E., 1999. *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris, Gallimard.

Borup, M., Brown, N., Konrad, K., Van Lente, H., 2006. The sociology of expectations in science and technology, *Technology Analysis and Strategic Management*, 18, 3-4, 285-298. doi: 10.1080/09537320600777002.

Bournigal, J.-M., 2016. Big {Data} : « {Oui}, nous changeons de modèle agricole ! » (en ligne: https://agriculture.gouv.fr/big-data-oui-nous-changeons-de-modele-agricole).

Bournigal, J.-M., Houllier, F., Lecouvey, P., Pringuet, P., 2015. *Agriculture {Innovation} 2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive \& respectueuse de l'environnement*. (en ligne: https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf).

Brown, N., Michael, M., 2003. A sociology of expectations: Retrospecting prospects and prospecting retrospects, *Technology Analysis and Strategic Management*, 15, 1, 3-18. doi: 10.1080/0953732032000046024.

Communiqué de presse - Aladin.farm, 2020. *Avec aladin® , InVivo et ses coopératives écrivent le futur de l'agriculture*.

Compagnon, D., Saint-Martin, A., 2019. La technique : promesse, mirage et fatalité, *Socio*, 12, 7-25. doi: 10.4000/socio.4401.

Corbin, J., Strauss, A., 2007. *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*, SAGE Publications. doi: 10.1177/1350507600314007.

Crestey, T., Tisseyre, B., 2019. Comment construire une exploitation en agriculture numérique : retour d'expérience du {Mas} numérique dans le {Sud} de la {France}, *Sciences Eaux \& Territoires*, Numéro 29, 3, 52. doi: 10.3917/set.029.0052.

Ducros, E., 2021. *Numérique, robotique, génétique: les nouvelles mamelles de la France agricole*. (en ligne: https://www.lopinion.fr/economie/numerique-robotique-genetique-les-nouvelles-mamelles-de-la-france-agricole).

Dumont, A. M., Baret, P. V., 2017. Why working conditions are a key issue of sustainability in agriculture? A comparison between agroecological, organic and conventional vegetable systems, *Journal of Rural Studies*, Elsevier Ltd, 56, 53-64. doi: 10.1016/j.jrurstud.2017.07.007.

Flamant, J., 2010. *Une brève histoire des transformations de l'agriculture au 20è siècle*, *Mission Agrobiosciences*.

Flocco, G., Guyonvarch, M., 2019. À quoi rêve la biologie de synthèse ?, *Socio*, 12, 49-72. doi: 10.4000/socio.4477.

Fontaine, S., 2017. Indice mondial de l'innovation 2017 : la {France} en retard sur l'agriculture numérique ? (en ligne: https://www.industrie-techno.com/article/indice-mondial-de-l-innovation-2017-la-france-en-retard-sur-l-agriculture-numerique.50218).

Fouilleux, É., Goulet, F., 2012. Firmes et developpement durable: Le nouvel esprit du productivisme, *Etudes Rurales*, 190, 2, 131-146. doi: 10.4000/etudesrurales.9708.

Fournier, T., Lepiller, O., 2019. Se nourrir de promesses, *Socio*, 1, 12, 73-95. doi: 10.4000/socio.4529.

Gasselin, P., Lardon, S., Cerdan, C., Loudiyi, S., Sautier, D., 2021. *Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires*, Versailles, Quae. doi: 10.35690/978-2-7592-3243-7.

Gosetti, G., 2017. Sustainable agriculture and quality of working life: Analytical perspectives and confirmation from research, *Sustainability (Switzerland)*, 9, 10. doi: 10.3390/su9101749.

InPACT, P., 2016. *Innovation techniciste et course à l'endettement en agriculture : Pas d'agroécologie sans souveraineté technologique*. (en ligne: https://www.latelierpaysan.org/IMG/pdf/plaidoyer_inpact_-_version_courte_04.01.17.pdf).

Joly, P.-B., 2010. On the economics of techno-scientific promises, in, *Débordements : Mélanges offerts à Michel Callon*, Paris, Presses des Mines, p. 203-221. doi: https://doi.org/10.4000/books.pressesmines.747.

Joly, P.-B., 2015. Le régime des promesses technoscientifiques, in, *Pourquoi tant de promesses*, Paris, Hermann, p. 31-48. doi: https://www.researchgate.net/publication/297622208_Le_regime_des_promesses_technoscientifique.

Joly, P. P., Rip, A., Callon, M., 2015. Réinventer l'innovation?, *inovatiO n°1 : Innovation? une problématique pluridisciplinaire*, 1.

Jones, R., 2008. The economy of promises, *Nature Nanotechnology*, 3, 2, 65-66. doi: 10.1038/nnano.2008.14.

L'Atelier Paysan, 2021. *Reprendre la terre aux machines - Manifeste pour une autonomie paysanne et alimentaire*. Seuil, Paris, Editions du Seuil.

Labarthe, P., 2012. Public-Private Innovation Network in Knowledge Intensive Services: Co-production or Technological Lock-in? FARMSTAR, a Case Study in Advisory Services for Farmers BT - Case Studies in Service Innovation, in Macaulay, L. A., Miles, I., Wilby, J., Tan, Y. L., Zhao, L., et Theodoulidis, B. (Éd.), New York, NY, Springer New York, p. 49-52. doi: 10.1007/978-1-4614-1972-3_8.

Laborde, A., 2012. *TIC et Agriculture : Appropriation des dispositifs numériques et mutations des organisations agricoles*. Harmattan, *Recherches Aquitaines sur les Usages pour le Développement des dIspositifs Numériques*. Harmattan.

Lacoste, M., Cook, S., McNee, M., Gale, D., Ingram, J., Bellon-Maurel, V., MacMillan, T., Sylvester-Bradley, R., Kindred, D., Bramley, R., Tremblay, N., Longchamps, L., Thompson, L., Ruiz, J., García, F. O., Maxwell, B., Griffin, T., Oberthür, T., Huyghe, C., Zhang, W., McNamara, J., Hall, A., 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture, *Nature*

Food, 3, 1, 11-18. doi: 10.1038/s43016-021-00424-4.

Latham, J., 2021. The myth of a food crisis, in, *Rethinking Food and Agriculture*, Elsevier, p. 93-111. doi: 10.1016/B978-0-12-816410-5.00005-0.

Lejeune, C., Villalba, B., 2015. La justification durable comme extension du productivisme, in, *Sociologie des approches critiques du développement et de la ville durables*, Paris, Petra, p. 255-285.

Lerbourg, J., 2021. *Les grands enjeux de l'agriculture numérique : équipements, modèles agricoles, big data*, *Centre d'études et de prospective - Analyse*.

Lyautey, M., Humbert, L., Bonneuil, C., 2021. *Histoire des modernisations agricoles au XXe siècle*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.

Martin, A., 2019. L'agriculture veut combler son retard digital, *L'Echo*. (en ligne: https://www.lecho.be/dossier/pme-wallonie/l-agriculture-veut-combler-son-retard-digital/10110760.html).

Martin, T., Gasselin, P., Hostiou, N., Feron, G., Laurens, L., Purseigle, F., 2020. Robots and Transformations of Work on Farms: A Systematic Review, in, *2nd International Symposium on Work in Agriculture*, Clermont-Ferrand, p. 1-15. doi: http://dx.doi.org/10.15454/2dwm-x990.

Le Mas Numérique, 2017. *Le Mas numérique – La synergie du numérique pour la viticulture*. (en ligne: https://lemasnumerique.agrotic.org/).

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016. alim'agri : {La} révolution numérique {\textbar} {Alim}'agri. (en ligne: http://agriculture.gouv.fr/alimagri-la-revolution-numerique).

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021. *France 2030, objectif 6 : accélérer la révolution agricole et agroalimentaire*. (en ligne: https://agriculture.gouv.fr/france-2030-objectif-6-accelerer-la-revolution-agricole-et-agroalimentaire).

OMPI, 2017. Indice mondial de l'innovation 2017 : la {Suisse}, la {Suède}, les {Pays} {Bas}, les États-{Unis} d'{Amérique} et le {Royaume}-{Uni} en tête du classement annuel. (en ligne: https://www.wipo.int/pressroom/fr/articles/2017/article_0006.html).

Oui, J., 2021. *La précision au secours des pollutions - des technologies numériques pour écologiser le productivisme agricole*, École des Hautes Études en Sciences Sociales.

Prével, M., 2008. Le productivisme agricole - Socioanthropologie de l'industrialisation des campagnes françaises, *Études rurales*, 181, 115-132. doi: 10.4000/etudesrurales.8675.

Rebillard, F., 2007. *Le Web 2.0 en perspective: une analyse socio-économique de l'internet*, Paris, L'Harmattan.

Reddy, N. V., Reddy, A. V. V. V., Pranavadithya, S., Kumar, J. J., 2016. A critical review on agricultural robots, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7, 4, 183-188.

Reinert, M., 2022. *L'agriculture numérique ou la fin des paysans*. (en ligne: https://reporterre.net/L-agriculture-numerique-ou-la-fin-des-paysans).

Rogers, E. M., 2010. *Diffusion of Innovations, 4th Edition*, Simon and Schuster. (en ligne: https://books.google.fr/books?id=v1ii4QsB7jIC).

ABSTRACT

Digitalisation is promoted by both private and public actors as a way of contributing to the ecologisation of agriculture. However, the actual effects of digital technology on the ecologisation of farming practices is a matter of both scientific controversy and political debate. One side of the debate concerns the capacity of these technologies to integrate and influence the different models of agricultural ecologisation, such as organic or optimisation of conventional farming. The objective of this thesis is to investigate how digitalisation interacts with the French Agricultural Innovation System (AIS), its paradigms and finally with ecologisation trajectories. To do so, I propose an institutional economic and multi-level analysis of innovation system. I use a methodology that combines quantitative and qualitative analysis. A first step focuses on the Agricultural Innovation System. Based on interviews with a diversity of actors of the agricultural sector (research, advisory organisation, professional unions, cooperatives...), I demonstrate that depending on their ecologisation paradigm, actors do not perceive the same potential and risks and enact digitalisation differently. It could lead digital technologies only being appropriate for conventional farming that currently dominates the French AIS. A second step focuses on digital uses by farmers. Based on 98 interviews with field crop farmers in Occitanie I construct use profiles for two types of technologies - production digital technologies on the one hand (guidance, variable rate technology...), and information and communication technologies on the other (websites, social networks...). Current digital use mostly supports weak or symbolic ecologisation, tied with the industrialization of farms, that is characterised by expansion, specialization, the growing of outsourcing activities and salaried workforce as well as a deeper value-chain integration. The effects of digitalisation are more ambiguous with regard to the standardization of practices and the dynamics of knowledge in the farming sector, with new forms of knowledge exchanges between farmers that can be coupled with stronger ecologisation trajectories. A third step considers the interactions between the innovation system and individual uses, focusing on farmers' cooperatives in the wine sector. The objective is to characterize how cooperative articulate digitalization and ecologisation and are transformed by those processes. Our results show that even though these organisations are central to the these processes, they nevertheless experience difficulties in articulating them due to objectives, partnerships and public policies that are not necessarily consistent. These cooperatives do, however, have room of manoeuvre to reassert their role and allow winegrowers to play a counter-power in the digitalisation process. This thesis highlights that, depending on the paradigms and agricultural models to which the actors belong, they do not have the same perceptions and uses of digital technology. Digitalisation does not appear to be the result of so-called 'pioneering' behaviour, but depends on the diversity of models and paradigms, in interaction with a socio-economic system that proposes, encourages or even imposes these technologies. Current digitalisation presents several forms of opposition to the strong ecologisation of agriculture, whether in terms of techniques, objectives, reasoning, temporal dynamics or political and social issues. However, hybridisations of digitalization and ecologisation seem possible in the case of industrial forms of ecologisation. A deeper contribution of digitalisation to ecologisation would imply rethinking its technical, economic and political models.

Key words : ecologisation trajectories, digitalisation, innovation system, digital technology uses, agroecological transition, institutional economics

RÉSUMÉ

Le développement du numérique est mis en avant comme solution aux enjeux économiques et environnementaux de l'agriculture, alors que ses effets font l'objet de controverses. Celles-ci questionnent notamment la capacité de ces technologies à intégrer et influencer les différentes voies d'écologisation de l'agriculture. L'objectif de cette thèse est de montrer comment la digitalisation interagit avec le système d'innovation agricole français, ses paradigmes et les trajectoires d'écologisation de l'agriculture. Pour ce faire, je propose une approche en économie institutionnelle et multi-niveaux des systèmes d'innovation, basée sur un travail empirique important, ainsi qu'une méthodologie associant analyses quantitatives et qualitatives. Une première partie de la thèse se concentre sur l'échelle du système d'innovation agricole. À partir d'entretiens semi-directifs avec des acteurs du secteur (recherche, conseil, syndicats, coopératives…), je montre que les attentes et risques perçus, ainsi que les stratégies de digitalisation, sont différents selon que les acteurs se rattachent à l'agriculture biologique ou conventionnelle. Ces différences sont toutefois peu perçues par les acteurs du numérique, suggérant un risque que les technologies soient développées selon le seul référentiel de l'agriculture conventionnelle. Une deuxième partie se focalise sur les usages du numérique par les agriculteurs dans leurs exploitations. À partir de 98 entretiens avec des agriculteurs en grandes cultures en Occitanie, je construis des profils d'usage pour deux types de technologies numériques : celles pour la production (guidage, modulation etc.) et celles pour l'information et la communication (réseaux sociaux, sites internet etc.). Dans l'ensemble, les usages du numérique dans les exploitations accompagnent plutôt des stratégies d'écologisation faible, ou symbolique, associées à une trajectoire d'industrialisation, caractérisée par la spécialisation, la concentration, le recours croissant au salariat et à la sous-traitance et l'intégration dans les chaînes de valeur agrialimentaires. Les effets sont plus paradoxaux en ce qui concerne la standardisation des pratiques et les dynamiques autour des connaissances dans le secteur, avec des dynamiques nouvelles d'échanges de connaissances entre pairs qui peuvent s'associer à des trajectoires d'écologisation plus fortes. Une troisième partie questionne les interactions entre le système d'innovation et les usages individuels, en se focalisant sur un acteur intermédiaire : les caves coopératives dans le secteur viticole. Nos résultats montrent que ces organisations, centrales dans les processus d'écologisation et de digitalisation, éprouvent des difficultés pour les articuler du fait d'objectifs, de partenaires et de politiques publiques qui ne sont pas forcément en cohérence. Ces coopératives ont toutefois des marges de manœuvre pour réaffirmer leur rôle et permettre aux viticulteurs de jouer un contre-pouvoir dans la trajectoire de digitalisation. Ce travail de thèse met en évidence que selon les paradigmes et les modèles agricoles auxquels les acteurs se rattachent, les perceptions et les usages du numérique sont différents. La digitalisation n'apparaît pas comme la résultante de comportements dits « pionniers » mais dépend de la diversité des modèles et paradigmes, en interaction avec un système socioéconomique qui propose, incite, voire impose ces technologies. La digitalisation actuelle montre plusieurs formes d'oppositions vis-à-vis de l'écologisation forte de l'agriculture, que ce soit en terme techniques, d'objectif, de raisonnement, de dynamique temporelle mais aussi d'enjeux politiques et sociaux. Des hybridations semblent toutefois possibles dans le cas de formes d'écologisation industrielle, mais aussi à travers une transformation plus globale de la digitalisation elle-même en repensant ses modèles techniques, économiques et politiques.

Mots clés : trajectoires d'écologisation, digitalisation, système d'innovation, usages du numérique, transition agroécologique, économie institutionnelle