



METHANISATION AGRICOLE ET UTILISATION DE CULTURES ENERGETIQUES EN CODIGESTION

Avantages/inconvénients et optimisation

Rapport final

Décembre 2009

Cette étude a été réalisée pour le compte de l'ADEME par : Oréade-Brèche en partenariat avec l'APESA

Coordination technique : Guillaume Bastide, Service Prévention et Gestion des Déchets,
Direction Consommation Durable et Déchets, ADEME Angers

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

SOMMAIRE	3
LISTE DES SIGLES	5
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES	7
RESUME	8
1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	11
2. INVENTAIRE BIBLIOGRAPHIQUE DES CULTURES UTILISABLES EN METHANISATION ET DE LEUR INTERET	13
2.1 OBJECTIFS ET METHODE	13
2.2 APERÇU DES CULTURES UTILISABLES.....	13
2.2.1 Les cultures dérobées et les couverts environnementaux	13
2.2.2 Les cultures à double fin (alimentaire et énergétique) appelées dans la suite cultures énergétiques conventionnelles	14
2.2.3 Les nouvelles cultures dédiées à la production de biogaz	18
2.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CULTURES UTILISABLES EN CO-DIGESTION SUR LE PLAN TECHNIQUE DE LA PRODUCTION DE BIOGAZ	18
2.3.1 Principes généraux de la production de biogaz.....	18
2.3.2 Choix de la culture pour la production de méthane	20
2.3.3 Facteurs influençant la production de biogaz	25
2.4 LES AVANTAGES / INCONVENIENTS DES CULTURES UTILISABLES EN CO-DIGESTION SUR LE PLAN AGRONOMIQUE	31
2.4.1 Aperçu synthétique des caractéristiques agronomiques de différentes cultures	31
2.4.2 Questions agronomiques liées à l'application de la réglementation.....	33
2.5 LES AVANTAGES / INCONVENIENTS DES CULTURES UTILISABLES EN CO-DIGESTION SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL PAR GRANDE FAMILLE DE CULTURES	34
3. RESULTATS DES SIMULATIONS : ECONOMIQUES, ENERGETIQUES, EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE, ENVIRONNEMENTAUX, CONCURRENCE AVEC L'ALIMENTAIRE	44
3.1 PRINCIPE RETENU POUR LES SIMULATIONS DE PRODUCTION DE BIOMASSE VEGETALE DESTINEE A LA METHANISATION.....	44
3.2 SELECTION DES CULTURES ET DES PARAMETRES DE SIMULATIONS	44
3.3 METHODE	48
3.3.1 Méthode et indicateurs utilisés pour les bilans économique, énergétique, d'émissions de gaz à effet de serre, environnemental et l'analyse de la concurrence avec l'alimentaire	48
3.3.2 Méthode utilisée pour comparer les résultats des simulations en incluant tous les aspects : analyse multicritères	53
3.4 RESULTATS DES SIMULATIONS DE PRODUCTION DE BIOMASSE VEGETALE DESTINEE A LA METHANISATION	54
3.4.1 Résultats des simulations énergétique et économique (Phase 3)	54
3.4.2 Résultats de l'analyse multicritères des simulations incluant le point de vue environnemental et la notion de concurrence avec l'alimentaire (Phases 4 et 5).....	59

3.5	SYNTHESE DES SIMULATIONS	70
3.5.1	<i>Bilan des scénarios types étudiés</i>	70
3.5.2	<i>Limites de l'exercice et pistes d'amélioration</i>	70
4.	CONCLUSION	73
	ANNEXE 1 : LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	75
	ANNEXE 2 : LISTE DES COUVERTS ENVIRONNEMENTAUX PRECONISES DANS LE CADRE DES BCAE.....	78
	ANNEXE 3 : NOTICE EXPLICATIVE SUR LE FONCTIONNEMENT DU TABLEUR DE SIMULATIONS	79
	ANNEXE 4 : TABLEUR DE CALCUL	90
	ANNEXE 5 : FICHES SYNTHESES DES SIMULATIONS	91
	ANNEXE 6 : BCAE ET POTENTIEL DE PRODUCTION DE BIOMASSE.....	128

Liste des sigles

BCAE : Bonnes conditions agricoles et environnementales

CE : Culture énergétique

CETIOM : Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains

CIPAN : Culture Intermédiaire piège à nitrate

COMIFER : Comité Français d'Etudes et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

COP : Céréales, oléagineux, protéagineux

CORPEN : Comité d'ORientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENVironnement

DDAF : Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt

FNR : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Agence allemande pour le développement des énergies renouvelables

GES : Gaz à effet de serre

Ha : Hectare

kWh : kilo watt heure

INRA : Institut National de Recherches Agronomiques

MAP : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

MWh : Méga watt heure

PAC : Politique agricole commune

PP : Prairie permanente

PT : Prairie temporaire

Qx : Quintaux

R(CE) : Règlement européen

RG : Ray-grass

RGI : Ray-grass italien

SAU : Surface agricole utile

SCEES : Service Central des Enquêtes et Études Statistiques

STH : Superficie toujours en herbe

t/ha : Tonnes par hectare

ZAC : Zones d'action complémentaire (Directive Nitrate) ; elles correspondent à des bassins versants ou parties de bassin versant en amont des prises d'eau superficielles destinée à la consommation humaines en situation de dépassement pour le paramètre nitrate.

Liste des tableaux

Tableau 1 : potentiels méthanogènes des différentes cultures inventoriées. (en $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgMO}$)	22
Tableau 2 : exemples de l'influence du stade de maturité sur le potentiel méthanogène de différentes cultures.....	27
Tableau 3 : Eléments sur les caractéristiques agronomiques de différentes cultures	32
Tableau 4 : Base de données cultures	47
Tableau 5 : Postes considérés pour établir la dépense d'énergie liée à l'utilisation d'intrants	50
Tableau 6 : Postes considérés pour établir la dépense d'énergie liée à l'utilisation d'intrants	51
Tableau 7 : Indicateurs proposés pour le bilan environnemental de la culture.....	52
Tableau 8 : performances énergétiques des cultures utilisées pour chaque scénario	55
Tableau 9 : Coûts de production des cultures utilisées pour chaque scénario, totaux, rapportés à l'hectare et rapportés à la tonne de matière sèche produite	56
Tableau 10 : Analyses additionnelles sur les coûts de production de la biomasse	56
Tableau 11 : Coûts de production de l'énergie primaire issue des cultures utilisées pour chaque scénario	58
Tableau 12 : Niveau de pression environnementale des scénarii étudiés	60
Tableau 13 : Correspondance entre notes de bilan environnemental et performance environnementale	61
Tableau 14 : Niveau de pression sur la ressource alimentaire des scénarii étudiés	62
Tableau 15 : Classement des scénarii en l'absence de pondération, tous critères pris en compte	63
Tableau 16 : Scores totaux des scénarii selon les performances prioritaires (score maximal = 90)	64
Tableau 17 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect énergétique dans la pondération	65
Tableau 18 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect économique dans la pondération	66
Tableau 19 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect « émissions de GES » dans la pondération.....	67
Tableau 20 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect environnemental dans la pondération	68
Tableau 21 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect compétition avec l'alimentaire dans la pondération.....	69
Tableau 22 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect compétition avec l'alimentaire dans la pondération.....	70
Tableau 23 : Correspondance entre efficacité énergétique et note de performance énergétique	85
Tableau 24 : Correspondance entre résultats économiques et performance économique....	85
Tableau 25 : Correspondance entre résultats économiques et performance économique....	86
Tableau 26 : Notes de performance environnementale	86
Tableau 27 : Correspondance entre notes de bilan environnemental et performance environnementale	87

Liste des figures

Figure 1 : Voie de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies (Marcato, 2007)	19
Figure 2 : Schéma de principe de l'évolution de la matière organique au cours du procédé de méthanisation. Avec sol : matière organique soluble ; cel : cellulose ; hem : hémicellulose ; lign : lignine.	20
Figure 3 : Schéma simplifié de la chaîne de production de méthane à partir de culture énergétique	21
Figure 4 : Potentiels méthanogènes de différentes cultures végétales	23
Figure 5 : Potentiels méthanogènes de différents sous-produits organiques	24
Figure 6 : rendements en biomasse et en méthane de différentes variétés de maïs (d'après Amon, 2007b).	26
Figure 7 : influence de la variété du maïs et du stade de récolte sur la production de méthane ramenée à l'hectare (Amon, 2007b).	28
Figure 8 : influence de l'ensilage sur la production de méthane (Lehtomäki, 2006).	29
Figure 9 : effet de différents prétraitements sur le potentiel méthanogène d'un ray grass (d'après Lehtomäki, 2004)	30
Figure 10 : Relation entre la quantité d'énergie produite à l'hectare et le coût d'accessibilité de l'énergie	59
Figure 11 : Classement des scénarii en l'absence de pondération, tous critères pris en compte	63
Figure 12 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère énergétique	65
Figure 13 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère économique	66
Figure 14 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère émissions de GES	67
Figure 15 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère environnemental (hors GES)	68
Figure 16 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère concurrence avec l'alimentaire	69
Figure 17 : Résultats des simulations avec une pondération nuancée	70
Figure 18 : Schéma simplifié de fonctionnement des fichiers de simulation	80

Résumé

Avec l'intérêt croissant des pouvoirs publics accordé à la méthanisation agricole, on assiste à une augmentation des projets d'unité de méthanisation à la ferme – 83 projets ont été soumis au Ministère de l'agriculture dans le cadre du Plan Performance énergétique 2009 -, dont une part significative prévoient l'utilisation de cultures en co-digestion. Dans d'autres pays, en particulier en Allemagne, l'utilisation de cultures en co-digestion est largement répandue dans les unités de méthanisation à la ferme. Ce développement n'est pas sans soulever des interrogations, notamment du point de vue environnemental (car la principale culture utilisée est du maïs ensilage produit de façon intensive), et du point de vue de la compétition sur la sole entre cultures énergétiques et alimentaires. Afin d'alimenter les réflexions autour de la stratégie française de développement de la méthanisation agricole, dans une perspective de développement durable, et plus concrètement d'apporter aux acteurs de la filière (Chambres d'agriculture, agriculteurs, bureaux d'études) des éléments pour évaluer les projets en cours en France, il paraît important d'analyser les avantages et inconvénients de l'utilisation de cultures énergétiques en co-digestion tant d'un point de vue énergétique qu'économique, environnemental, d'émissions de gaz à effet de serre et de concurrence avec l'alimentaire. C'est cette démarche globalisante qui constitue l'un des apports majeurs de l'étude.

La méthode utilisée s'est appuyée sur :

- une analyse de la littérature scientifique pour identifier les avantages et les inconvénients des cultures utilisables en méthanisation. Un état de l'art des connaissances actuelles sur la filière a été réalisé. Ce travail a abouti entre autres à la construction d'une base de données « Cultures » qui regroupe, pour de nombreuses cultures, les informations suivantes : matière sèche, matière organique, rendements (mini et maxi), potentiel méthane et calcul de la productivité en méthane à l'hectare,
- la réalisation de simulations des résultats de l'utilisation de différentes cultures sélectionnées – considérées au sein d'une succession culturale – en co-digestion avec un substrat lisier + déchets, et la comparaison de ces résultats entre eux et avec ceux d'un scénario contrefactuel, à base lisier + déchets (sans culture). Les cultures/rotations étudiées dans les simulations peuvent être distinguées en trois grandes catégories : les couverts environnementaux – bandes enherbées et prairie temporaire, des cultures dérobées – trèfle incarnat et avoine diploïde, et des cultures conventionnelles ou dédiées à la production d'énergie – maïs fourrage, sorgho grain, blé, triticales et sorgho biomasse. Le mode de stockage considéré a été, pour toutes les plantes, l'ensilage de plante entière,
- une analyse multicritères prenant en compte l'ensemble des résultats des simulations en termes énergétique, économique, d'émissions de gaz à effet de serre, environnemental et de concurrence avec l'alimentaire, avec différentes pondérations selon l'importance relative accordée à l'un ou l'autre des critères.

Les principales limites de l'étude sont liées aux données utilisées pour paramétrer les simulations, en particulier concernant les itinéraires techniques culturaux (difficulté de construire des itinéraires techniques « moyens » face à la diversité des itinéraires réalisés pour une même culture en France, absence de données sur des itinéraires adaptés à la filière). De plus, l'étude intervient sans doute un peu trop tôt par rapport au développement de cultures en co-digestion d'où un manque de données de terrain, et même par rapport aux avancées de la recherche sur cette thématique (résultats d'expérimentation disponibles souvent limités aux cultures dites conventionnelles). Néanmoins, dans le tableur qui a été construit pour la réalisation des simulations il est possible de modifier ces données d'entrée. De plus, malgré ces limites, le travail réalisé fait ressortir les avantages et inconvénients des cultures/rotations étudiées pour la méthanisation.

Les résultats des simulations démontrent l'intérêt, d'un point de vue général, d'utiliser des couverts environnementaux – bandes enherbées ou prairies –, des cultures dérobées et du sorgho en co-digestion. Mis à part la concurrence avec l'alimentaire, l'utilisation de biomasse des prairies en co-digestion donne des résultats particulièrement intéressants sur tous les plans (énergétique, économique, émissions de gaz à effet de serre et environnemental). De même, l'utilisation de sorgho ressort comme très performante comparée aux autres cultures : très avantageuse sur les plans énergétiques et économiques, en particulier pour le sorgho biomasse en raison de sa très forte productivité de biomasse à l'hectare, l'utilisation de sorgho, dans le cadre d'une rotation sorgho/blé (donc avec couvert hivernal) est aussi intéressante sur le plan

environnemental car le sorgho est peu exigeant en eau et sa culture utilise relativement peu d'engrais et de pesticides. L'utilisation de bandes enherbées (en première année) et de cultures dérobées n'est pas très performante sur le plan économique (et énergétique pour le trèfle incarnat en dérobé) mais ce type de biomasse reste relativement intéressant à utiliser en méthanisation, en particulier parce que ces couverts ont des effets positifs sur l'environnement et leur utilisation en méthanisation n'entraîne pas de compétition avec l'alimentaire. Concernant les bandes enherbées, il faut de plus souligner que le potentiel de production de biomasse qui leur est associé est faible, à cause du rendement et surtout à cause des faibles surfaces concernées. En revanche, les cultures classiques (maïs, blé, triticales) ont des résultats médiocres. Contrairement à ce qui était attendu, l'ajout d'une culture intermédiaire avec le maïs en monoculture ne permet pas d'améliorer significativement le bilan énergétique ni économique de la simulation, car l'interculture entre deux maïs se situe en hiver et le rendement de la culture intercalaire est donc faible. En revanche, d'un point de vue environnemental l'introduction d'une culture intermédiaire améliore de façon significative les résultats de la simulation. Globalement, tous critères confondus, il est donc quand même plus intéressant d'utiliser une culture intermédiaire avec du maïs plutôt que du maïs seul. La comparaison maïs irrigué/sec montre que l'irrigation pénalise fortement la performance énergétique de la simulation et dans une moindre mesure la performance environnementale mais est avantageuse d'un point de vue économique car permet un gain de productivité de biomasse.

Au-delà des calculs et des résultats, la valeur ajoutée de cette étude porte principalement sur la diffusion des connaissances actuelles sur l'utilisation de cultures en co-digestion et sur la démarche adoptée – intégration des points de vues énergétique, économique, environnemental (y compris d'émissions de gaz à effet de serre) et de compétition avec la production alimentaire. Le tableur qui a été construit pour cette étude peut ainsi assez facilement évoluer vers un véritable outil d'aide à la décision sur les choix d'espèces ou d'itinéraires techniques à adopter pour optimiser l'utilisation de cultures en co-digestion. Il serait intéressant de réaliser des simulations avec des itinéraires techniques innovants, afin de faire progresser la réflexion sur l'utilisation de cultures en co-digestion. Par exemple on pourrait envisager de simuler les résultats de l'utilisation de :

- variétés de maïs ou de sorgho à cycle court derrière une céréale immature,
- de cultures dérobées dans un itinéraire optimisé pour la production de biomasse,
- couverts végétaux à fort rendement biomasse utilisés en TCS ou semis-direct

Les réflexions sur l'utilisation « intelligente » de cultures végétales en codigestion agricole n'en sont qu'à leurs prémices ; dans la mesure où l'on ne souhaite pas reproduire le modèle de l'Europe du nord (Allemand en particulier). L'absence de données spécifiques sur des scénarios de production végétale à destination de la méthanisation montre la nécessité de mettre en place un programme d'actions d'envergure nationale. Le regroupement d'acteurs serait bénéfique dans la mesure où cette thématique demande des compétences multiples qui n'existent pas au sein d'un seul organisme. Cela permettrait également un partage des données à l'échelle nationale pour aller plus vite, plus loin et plus efficacement dans l'obtention d'itinéraires les plus adaptés à la filière tant techniquement qu'économiquement. Ce genre de programme permettrait également d'approfondir les connaissances sur l'intérêt d'une espèce végétale et l'influence du stade de maturité sur l'expression de son potentiel méthanogène.

Ainsi, il est indispensable de considérer que l'utilisation de culture énergétique en méthanisation est à l'interface de l'ingénierie agronomique du végétal, du machinisme et des technologies agricoles ainsi que du génie des procédés lié à la codigestion.



1. Introduction : contexte et objectifs de l'étude

Au regard des enjeux de production d'énergie renouvelable, de valorisation des déchets fermentescibles et dans un contexte agricole en pleine évolution (recherche de ressources complémentaires à l'activité principale), la méthanisation agricole connaît un nouvel essor au niveau national. Les substrats utilisés sont essentiellement des lisiers, des fumiers, des déchets agroalimentaires, des déchets d'abattoirs, des boues de STEP et des cultures énergétiques.

La méthanisation agricole a connu un fort développement dans certains pays européens – en particulier en Allemagne – sous l'impulsion d'une politique incitative, souvent au travers d'un prix d'achat de l'électricité élevé. L'Allemagne se distingue notamment par un développement important d'unités individuelles agricoles utilisant des cultures énergétiques – en co-digestion et même en mono-substrat dans les exploitations sans atelier d'élevage – qui a été fortement encouragé par l'attribution d'un bonus d'aide spécifique pour l'utilisation de cultures énergétiques.

En France, où l'on compte actuellement une dizaine d'installations en service, la méthanisation à la ferme pourrait suivre le développement constaté dans les pays de l'Europe du Nord, le tarif d'achat de l'électricité produite à partir de biogaz constituant un facteur d'encouragement. Le Ministère de l'Agriculture annonce 83 projets de méthanisation agricole retenus dans le cadre du Plan Performance Energétique des exploitations agricoles (appel à projets de méthanisation agricole lancé par le Ministère de l'Agriculture en 2009), dont une part significative utilise des cultures en co-digestion, dans des proportions de l'ordre de 20 % de la production d'énergie totale. Les raisons de ce choix pour l'utilisation de cultures en co-digestion reposent essentiellement sur une sécurisation de l'approvisionnement (en termes de qualité et d'autonomie) et sur une augmentation de la productivité énergétique de l'installation (amélioration du rendement volumique : $\text{Nm}^3 \text{ biogaz} / \text{m}^3 \text{ digesteur} / \text{jour}$). Le développement de l'utilisation des cultures énergétiques pour la méthanisation en France est donc amorcé mais n'est pas amené à suivre le modèle de développement allemand mettant l'accent sur les cultures énergétiques dédiées (en remplacement de cultures alimentaires) et qui a de ce fait subi de plein fouet l'augmentation du prix des céréales et du maïs pour l'alimentaire en 2007.

Face à ce développement, l'ADEME et l'ensemble des acteurs de la filière méthanisation agricole doivent disposer d'éléments pertinents pour analyser l'intérêt de l'utilisation de cultures en co-digestion, en termes :

- technique. Les récentes avancées technologiques permettent de mieux appréhender la méthanisation de nombreux effluents, mais des questions restent cependant en suspens sur les procédés fonctionnant en mélange (codigestion), sur les systèmes discontinus fonctionnant essentiellement sur fumiers non pompables, et sur l'intérêt et le niveau d'incorporation de cultures végétales ;
- économique. Le bilan global d'exploitation d'une installation doit ainsi intégrer l'ensemble des charges inhérentes à la mise en œuvre et la conduite de l'unité, ainsi que les recettes et économies indirectes liées à la valorisation des sous-produits (biogaz et digestat) ; dans le cas de l'introduction de cultures énergétiques les coûts liés à la production et au stockage doivent être intégrés ;
- environnemental. L'objectif est alors de comparer le procédé mis en œuvre à une situation de référence en considérant toutes les composantes de l'analyse environnementale (production et consommation d'énergie, émissions de GES, approche sociétale...) et en y intégrant l'impact environnemental et énergétique des itinéraires techniques de production des cultures énergétiques.

L'utilisation de cultures énergétiques en méthanisation suscite de nombreuses interrogations liées à différents aspects : modalités d'utilisation en co-digestion (quelle culture, quelle production de biogaz, quel taux de charge dans un digesteur...), bilan environnemental (impacts sur le milieu, consommations énergétiques liées à l'itinéraire technique, bilan des émanations de gaz à effet de serre (GES) tout au long de la filière, etc.), concurrence éventuelle avec les cultures alimentaires (conflit d'usage, ampleur du marché, impact sur la sécurité alimentaire, etc.).

Dans le contexte de développement français, l'ADEME a souhaité approfondir l'étude des avantages, inconvénients des différentes cultures utilisées et disposer d'information sur les optimisations envisageables pour l'utilisation de cultures énergétiques dédiées à la méthanisation.

L'étude a pour objectifs de répondre à cinq grandes questions :

- Quels sont les avantages et les inconvénients de l'utilisation de cultures énergétiques associées à d'autres substrats pour la méthanisation ?

- Jusqu'à quelle proportion est-il intéressant d'introduire des cultures énergétiques ?
- Quel est le bilan environnemental (conséquences sur le milieu) des cultures utilisables en méthanisation ?
- Vers quelles cultures se tourner afin d'optimiser la rentabilité de l'unité de méthanisation et de minimiser les effets négatifs sur l'environnement ?
- Existera-t-il un conflit d'usage de ces cultures avec les cultures alimentaires et de quelle ampleur, pouvant déstabiliser l'équilibre économique de la filière ?

La méthode utilisée pour répondre aux questions énumérées ci-dessus comprend cinq phases qui ont structuré l'étude :

- Phase 1 – Inventaire des cultures utilisables en méthanisation et de leur mode d'utilisation et constitution d'une "liste courte" de cultures qui seront ensuite étudiées de façon plus approfondie dans la phase 3,
- Phase 2 – Analyse comparative des effets environnementaux des cultures utilisables en méthanisation,
- Phase 3 – Simulations de l'utilisation de différentes cultures (celles de la "liste courte" de la phase 1) et analyse de leurs résultats :
 - o Résultats quantitatifs économiques, énergétiques, d'émissions de GES,
 - o Résultats qualitatifs sur le bilan environnemental de la production des cultures méthanisées,
 - o Analyse multicritères des résultats des simulations prenant en compte le bilan environnemental de la production des cultures et la concurrence avec les cultures alimentaires.

2. Inventaire bibliographique des cultures utilisables en méthanisation et de leur intérêt

2.1 Objectifs et méthode

Cette première analyse vise :

-) à identifier les cultures utilisables en co-digestion,
- à mettre en évidence leurs avantages et leurs inconvénients pour la méthanisation
- et à choisir une liste courte de cultures qui seront étudiées de façon plus approfondie au travers des simulations et à expliciter ce choix.

Il s'agit d'une synthèse bibliographique basée sur les résultats de travaux scientifiques¹, en particulier français, allemands et autrichiens, portant sur l'utilisation des cultures énergétiques en co-digestion. Cette synthèse se veut la plus exhaustive possible. Elle comprend deux parties distinctes :

- la première partie porte sur les différentes cultures utilisables en méthanisation, celles faisant l'objet d'expérimentation/travaux de recherche, et celles utilisées en pratique. Sur la base de ces études, une synthèse des avantages et inconvénients de l'utilisation de l'ensemble des cultures en co-digestion a été élaborée. La littérature apporte des résultats sur les aspects techniques et énergétiques principalement, pas ou peu sur les aspects économiques et environnementaux. Ces aspects seront étudiés au travers de simulations
- la seconde partie est une synthèse bibliographique des impacts environnementaux de chaque culture ou plutôt groupes de cultures car pour une plus grande clarté et concision de l'analyse, les cultures, qui regroupent finalement l'ensemble des cultures arables, ont été regroupées au sein de différentes catégories.

L'analyse bibliographique seule ne permet pas de faire de bilan économique de l'utilisation des cultures étudiées, ni de bilan énergétique, environnemental ou d'émissions de GES complet. Ceci suppose en effet de disposer de données techniques détaillées, en particulier sur l'itinéraire technique de production des cultures. C'est pourquoi, des simulations ont été réalisées, basées sur les résultats de la bibliographie (voir § 3).

2.2 Aperçu des cultures utilisables

En fait, la plupart des cultures peuvent être utilisées en méthanisation, excepté les cultures ligneuses, avec des avantages et des inconvénients divers (cf. § 2.3).

Par rapport aux thématiques prises en compte, les cultures peuvent être classées en trois catégories : cultures dérobées et couverts dits environnementaux, cultures "conventionnelles" à double fin – alimentaire et énergétique, et cultures dédiées à la production de biogaz.

2.2.1 Les cultures dérobées et les couverts environnementaux

Les cultures dérobées sont des cultures pratiquées dans l'intervalle de deux cultures principales (on parle aussi de cultures intercalaires), pendant l'été ou l'hiver, et pour laquelle on utilise des plantes à court cycle de végétation. Les couverts environnementaux contiennent les prairies, les bandes enherbées, les plantes de couverture de sol en hiver, etc. L'utilisation de ce type de couvert en co-digestion apparaît comme avantageuse :

1. sur le plan économique : elle peut permettre aux agriculteurs de valoriser les couverts environnementaux liés au respect des bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE)² et/ou aux exigences liées à l'application de la Directive nitrates³,

¹ Les références bibliographiques mobilisées sont listées à la fin du rapport.

² Ces BCAE ont été introduites dans le cadre de la conditionnalité des aides du régime de paiement unique de la politique agricole commune de l'Union européenne : pour activer leurs droits à paiement unique, les agriculteurs doivent respecter des conditions environnementales dont les BCAE.

³ L'application de la Directive se traduit par la délimitation de zones vulnérables aux nitrates et la définition de programmes d'action contre les nitrates (règles sur les apports de fertilisants azotés), complétés par des actions renforcées dans certaines zones : les zones d'action complémentaire (ZAC) et les zones d'excédents structurels (ZES).

2. sur le plan environnemental,
3. et sur le plan de la compétition avec l'alimentaire, ces couverts peuvent ne pas concurrencer la sole destinée à l'alimentation (excepté pour les prairies).

Au sein de ce type de culture, on trouve dans la littérature sur la méthanisation des espèces telles que la luzerne, le ray-grass, le trèfle (prairies et bandes enherbées), le ray-grass italien, l'avoine d'hybride, la phacélie, le trèfle d'Alexandrie, la moutarde, le radis oléagineux, la féverole (cultures intermédiaires), etc.

Dans le cadre de la conditionnalité des aides du régime de paiement unique, les agriculteurs doivent respecter les Bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE). Les obligations induites par les BCAE sont susceptibles de générer de la biomasse, *a priori* mobilisable pour la méthanisation. En 2006, les surfaces ayant reçu un paiement au titre du RPU étaient de 24 265 000 ha (DG agri-D, Commission Européenne), la SAU étant de 29 500 000 ha (agreste, chiffres de 2007). La plupart des terres agricoles sont donc contraintes par les BCAE. Parmi les BCAE, on trouve notamment (pour plus de détails, voir en annexe) :

- BCAE 1 : Mise en place d'une superficie minimale en couvert environnemental : les agriculteurs concernés (soit la plupart des agriculteurs français) doivent disposer d'une surface en couvert environnemental d'au moins 3 % de la superficie des céréales, oléo-protéagineux [...] aidée (MAP). Une liste d'espèces préconisées est publiée dans les Départements par arrêté préfectoral. Ces surfaces en couvert peuvent être fauchées. En revanche, elles ne peuvent être ni fertilisées ni traitées avec des pesticides.
- BCAE 2 : Non-brûlage des résidus de culture : cette exigence consiste à ne pas brûler les pailles et les résidus des cultures afin de préserver la matière organique des sols et d'éviter leur appauvrissement. La valorisation de ces résidus en méthanisation est *a priori* autorisée, sauf dans les exploitations en monoculture dans lesquelles les résidus doivent être broyés et incorporés au sol (MAP, 2009).
- BCAE 3 : Diversité des assolements : cette BCAE stipule entre autres que les exploitants pratiquant la monoculture doivent établir une couverture totale des sols en période hivernale. Cette obligation peut être satisfaite soit par l'implantation d'une culture d'hiver, soit par l'implantation d'une culture intermédiaire entre deux implantations successives de monocultures. Soulignons que dans les zones d'action complémentaire définies dans le cadre de la Directive Nitrates toutes les exploitations sont concernées par l'obligation d'implanter une couverture automnale et hivernale.
- BCAE 5 : Entretien minimal des terres ; elle indique entre autres que les surfaces toujours en herbe doivent être ou pâturées ou fauchées au moins une fois par an (avec preuve du produit de la vente ou pratique assimilée). La biomasse fauchée pourrait être valorisée en méthanisation.
- BCAE 6 : Maintien des pâturages permanents. La méthanisation de la biomasse herbagère peut constituer un débouché supplémentaire pour les prairies permanentes, dont le maintien est obligatoire.

Les types de cultures ou couverts qui peuvent être liés à ces BCAE sont principalement : les prairies (herbe/cultures fourragères), les couverts environnementaux, notamment les bandes enherbées et les cultures dérobées.

2.2.2 Les cultures à double fin (alimentaire et énergétique) appelées dans la suite cultures énergétiques conventionnelles

L'utilisation de ces cultures à des fins énergétiques pose des questions de compétition directe par rapport à l'alimentation. De plus, leur production soulève des problèmes environnementaux liés notamment à l'utilisation d'intrants chimiques ou au travail intensif du sol.

Au sein de ce type de culture, on trouve notamment dans la bibliographie le maïs (ensilage surtout), le sorgho (grain et fourrage), des céréales à paille en ensilage de plante entière ou uniquement les pailles (blé, orge, triticales, seigle, etc.), des plantes industrielles (betterave à sucre et pomme de terre), des oléo-protéagineux (tournesol, colza, pois, féverole).

Dans les ZAC, les agriculteurs ont l'obligation de mettre en place une couverture végétale en hiver (pendant la période de risque de lessivage) sous forme de cultures intercalaires par exemple et de maintenir des bandes enherbées le long des cours d'eau. Les modalités d'application de ces mesures sont précisées au niveau départemental.

Exemples de rotations culturales classiques

En pratique, les cultures annuelles et pluriannuelles sont produites dans le cadre de successions ou rotations culturales⁴. Or, tant d'un point de vue agronomique qu'environnemental il est important d'étudier des cultures au sein des successions culturales dans lesquelles elles s'insèrent (les monocultures ayant des inconvénients agronomiques et environnementaux largement démontrés). Les prairies permanentes et les bandes enherbées ne s'insèrent pas dans des rotations. Les cultures dérobées représentent un cas particulier de cultures qui sont justement utilisées pour diversifier les rotations. Elles sont donc intégrées dans de nombreuses rotations. Dans cette partie, nous avons cherché à caractériser les rotations les plus courantes dans lesquelles s'insèrent les autres cultures précédemment évoquées à partir d'éléments bibliographiques. Pour identifier les rotations dominantes nous avons utilisé l'enquête « Pratiques culturales » de 2006 (Agreste).

❖ Rotations avec maïs ensilage

Quand il est destiné à l'ensilage pour être utilisé comme fourrage, notamment dans les régions laitières (Bretagne, Basse-Normandie), le maïs n'est quasiment jamais cultivé de façon ininterrompue sur les mêmes parcelles. Mais il peut être implanté deux années de suite. Ainsi, d'après l'enquête Agreste sur les pratiques culturales 2006, en Bretagne 30 % des parcelles de maïs sont suivies par une autre culture de maïs, 41 % en Basse-Normandie, autre département laitier (le maïs-ensilage y est cultivé en moyenne 2 ans sur 3). En Bretagne, près de la moitié des surfaces de maïs sont précédées par un engrais vert (Agreste 2006). Ce taux particulièrement élevé comparé aux autres régions s'expliquent par les mesures prises contre les problèmes d'excédents structuels en Bretagne (la région est classée en zone vulnérable au titre de la Directive nitrates).

Maïs /Maïs

année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1				Maïs ensilage								
2				Maïs ensilage								

Maïs /Maïs + CIPAN (culture intermédiaire piège à nitrates)

année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1				Maïs ensilage						CIPAN		
2	CIPAN			Maïs ensilage								

Dans ces régions, le maïs-ensilage est aussi souvent cultivé en rotation avec du blé. Le blé est le principal précédent du maïs (42 % des surfaces de maïs-fourrage sont précédées d'un blé en Basse-Normandie et 38 % en Bretagne) et inversement, le maïs est le principal précédent du blé (47 % des surfaces en blé sont précédées d'un maïs blé en Basse-Normandie et 52 % en Bretagne).

Maïs /Blé

année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1				Maïs ensilage						Blé d'hiver		
2	Blé d'hiver ou blé de printemps semé en avril							Sol nu / Culture intermédiaire				

Dans cette rotation, le blé peut être remplacé par du triticale.

Par ailleurs, le maïs peut être précédé d'une prairie temporaire, en particulier dans les zones vulnérables aux nitrates. Dans les Pays de Loire, 29 % des surfaces en maïs sont précédées d'une prairie dans les zones vulnérables, et cette part représente 15 % en Bretagne.

Prairie temporaire/Maïs

année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	Prairie temporaire											
2	Prairie temporaire											
3				Maïs ensilage								

Régions concernées : Régions d'élevage laitier (Bretagne, Basse-Normandie, Pays de la Loire) qui concentrent la moitié de la superficie française de maïs fourrage.

⁴ Une rotation culturale est un « cas particulier de succession culturale correspondant à une alternance de cultures se suivant régulièrement, dans un ordre toujours identique, sur une parcelle »

❖ *Rotations avec sorgho*

Le sorgho est une culture d'été comme le maïs. Elle constitue de fait une alternative au maïs dans les rotations, surtout en cas de sécheresse. Le sorgho est une plante annuelle en C4 comme le maïs. Elle a des besoins en eau limités et une forte capacité d'extraction de l'eau du sol et des éléments minéraux qui lui permet de mieux résister à la sécheresse que le maïs (fiche ADEME, sorgho biomasse). Les sorghos s'adaptent à tous les types de sols, même si des sols profonds sont préférables, surtout en l'absence d'irrigation. Ils nécessitent des apports d'engrais limités. Les sorghos ont un fort potentiel de production de biomasse (10 à 15 tonnes de matière sèche en interculture, et 15 à 25 tonnes en cultures principales).

Une rotation type pour le sorgho peut donc être sorgho/blé.

❖ *Rotations céréalières*

La principale céréale cultivée en France est le blé. Il existe deux types principaux de blé : le blé tendre, qui est le plus développé, et le blé dur, cultivé dans les régions méridionales. Ces cultures ont des itinéraires techniques très proches l'un de l'autre (Larousse, 2002) ; dans les régions où il est cultivé, le blé dur se substitue très souvent au blé tendre. Les dates de semis du blé d'hiver vont d'octobre à début décembre, il existe aussi des variétés de printemps. Le blé est considéré comme une culture favorisant le développement des adventices. Il prend donc place dans une rotation après une culture dite nettoyante telle que le maïs, le tournesol, les plantes sarclées, les légumineuses fourragères.

D'après l'enquête pratiques agricoles 2006 d'Agreste, le blé est souvent précédé par un blé (34 % dans le Centre), un colza (34 % dans le Centre). D'après le CETIOM et Arvalis (2008), le colza est souvent, dans les zones céréalières, la première tête de rotation.

L'une des rotations caractéristiques de la plaine céréalière du bassin parisien est la rotation Colza/Blé/Orge. Dans le bassin parisien, la succession culturale Pois/Blé est aussi assez répandue.

Colza /Blé/Orge

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1								Colza				
2	Colza									Blé d'hiver		
3	Blé d'hiver									Orge d'hiver		
4	Orge d'hiver											

Pois/Blé/Blé

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1			Pois					Sol nu	Sol nu	Blé d'hiver		
2	Blé d'hiver									Blé ou Autre culture d'hiver		

Régions concernées : Très répandu nationalement ; Bassin parisien

Dans les régions plus méridionales de la culture du blé – Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, il est souvent associé au tournesol.

Blé/Tournesol

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	Blé tendre ou dur							Sol nu ou culture intermédiaire				
2					Tournesol					Blé		

Régions concernées : Sud-ouest de la France : Aquitaine, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées

En alternative au blé, on peut trouver le triticale. Le triticale est une céréale hybride entre le blé et le seigle. Il talle plus rapidement que le blé, et l'épiaison a lieu plus tôt. La phase de maturité physiologique est cependant plus longue que celle du blé. La valeur énergétique du triticale est semblable à celle du blé. L'itinéraire technique du triticale se rapproche de celui du blé ou de l'orge, mais il s'agit d'une plante plus rustique permettant a priori une économie d'intrants.

Une rotation type pour le triticale peut donc être Maïs/Triticale.

Régions concernées : La culture de triticales s'est d'abord étendue dans le Massif Central puis a gagné la Bretagne et les Pays de la Loire (INRA, Clermont Ferrand, *Histoire d'une nouvelle espèce créée par l'Homme*).

❖ *Prairies temporaires*

Les prairies, surtout si elles sont de longue durée, sont des très bons précédents pour les grandes cultures (Larousse, 2002). Les prairies temporaires, notamment semées avec du Ray-grass italien sont souvent utilisées dans les rotations avec du maïs ensilage (cf. § précédent sur les rotations avec maïs ensilage).

Régions concernées : Bretagne, Pays de la Loire

❖ *Betterave à sucre*

Les betteraves à sucre sont souvent utilisées comme tête de rotation avant une céréale à paille (blé, orge). Ainsi, dans le bassin parisien où les betteraves sont principalement cultivées, la rotation betteraves/blé/orge est une rotation classique.

Régions concernées : Nord Bassin parisien

❖ *Pommes de terre*

Comme les betteraves à sucre, les pommes de terre constituent souvent des têtes de rotation céréalière. Dans la principale région de production des pommes de terre, la Picardie, l'une des successions les plus courantes est Pommes de terre/Blé.

Régions concernées : Nord Bassin parisien

2.2.3 *Les nouvelles cultures dédiées à la production de biogaz*

Ces cultures ne sont pas destinées à l'alimentation, mais à la production d'énergie, elles ont donc en théorie des rendements de biogaz particulièrement intéressants. Elles peuvent cependant être en concurrence sur la sole par rapport aux cultures alimentaires et poser également des questions environnementales particulières. Enfin les cultures dédiées sont encore peu connues et maîtrisées par les agriculteurs.

Au sein de ce type de cultures, on trouve dans la littérature le sorgho biomasse, le switchgrass, des variétés de maïs très tardives, le miscanthus, la canne de provence.

❖ *Exemple : le Switchgrass*

Le Switchgrass ou Panic érigé (*Panicum virgatum*) est une plante herbacée (Graminées) pérenne (jusqu'à 15 ans). Le switchgrass est utilisé pour la conservation des sols ainsi que comme fourrage. Depuis peu, il est également utilisé pour son potentiel de biomasse pour la fabrication d'éthanol, de fibre, d'électricité et de production de chaleur.

Cette graminée vivace de climat chaud produit une grande quantité de tiges de haute taille (Chambre d'agriculture de l'Eure, note technique cultures, 2007) : ses rhizomes ainsi que son système racinaire vont à plus 2 m de profondeur et ces tiges érigées peuvent atteindre 2,5 m. Le potentiel de rendement de la plante est de 10 à 20 T.MS/ha. La pousse peut être très rapide, 75 % de la biomasse peut être formée au milieu de l'été, avant la floraison. Le cycle de cette plante est le même que celui du Miscanthus. Le semis du Switchgrass se fait à partir du 10 mai (Chambre d'Agriculture Champagne Ardennes, projet Lidéa, Novembre 2007). La récolte se fait une fois par an à partir de la deuxième année de culture, soit en vert à l'automne, soit après une période de froid (en hiver ou sortie d'hiver). Le potentiel de production est atteint entre la deuxième et la troisième année en sols légers (sableux), et entre la troisième et quatrième année en sols plus lourds (argileux).

2.3 Avantages et inconvénients des cultures utilisables en co-digestion sur le plan technique de la production de biogaz

2.3.1 *Principes généraux de la production de biogaz*

Afin d'appréhender la faisabilité d'utiliser des cultures végétales en méthanisation, il est nécessaire de connaître les principes généraux de la méthanisation.

La digestion anaérobie – ou méthanisation - est un processus biologique de dégradation de la matière organique en un mélange gazeux de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) appelé biogaz. Le biogaz produit peut-être récupéré, stocké et valorisé pour la production d'énergie (chaleur, électricité, cogénération, carburant, injection réseau).

La digestion anaérobie se déroule généralement à des pH voisins de la neutralité (6,5 à 8,5) et à des potentiels d'oxydoréduction très bas (-300 à -400mV). La gamme des températures peut varier de 10 à 65°C ; on parle de bactéries thermophiles (45 à 65°C), mésophiles (25 à 45°C), psychrophiles (10 à 25°C).

La digestion anaérobie se déroule en trois étapes principales qui sont présentées par la suivante.

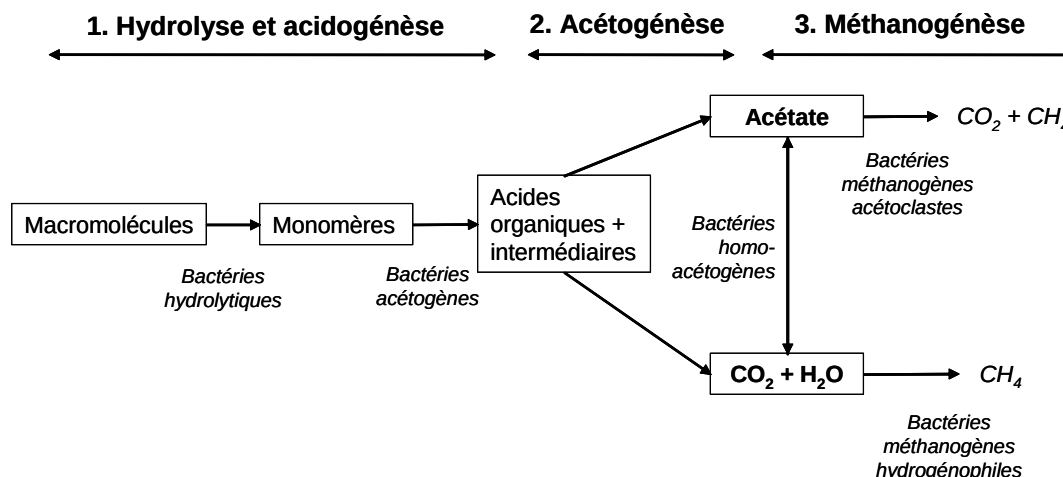


Figure 1 : Voie de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies (Marcato, 2007)

Au cours de l'hydrolyse et de l'acidogénèse, la matière organique est hydrolysée en monomères et transformée par les bactéries dites acidogènes en acides gras volatils ou AGV (acétate, propionate, butyrate...), en alcool, en acides organiques, en hydrogène et en gaz carbonique.

Ces molécules sont ensuite transformées en acide acétique, en hydrogène et gaz carbonique, c'est l'acétogénèse. Au cours de l'ultime étape de méthanogénèse, l'acétate issu des étapes précédentes conduit à la production de biogaz, constitué de CO₂ et CH₄. C'est la voie majoritaire de production de méthane dans un digesteur.

Il existe également une production de biogaz par conversion simple du gaz de fermentation (CO₂ et H₂) en méthane. Cette conversion a un double rôle : en éliminant l'hydrogène gazeux, elle régule la production d'AGV, et elle contrôle la vitesse de catabolisme des acides propionique et butyrique. Ces bactéries sont des bactéries anaérobies strictes, très sensibles aux polluants toxiques et aux traces d'oxygène. De plus, elles sont les plus lentes du système, et ce sont donc elles qui régulent la vitesse globale de la digestion. En cas de dysfonctionnement du procédé (surcharge, variation de température ou de pH), la réponse se traduit par une accumulation des acides gras volatils dans le milieu et une inhibition de la méthanogénèse.

D'une manière générale la digestion anaérobie est stable lorsque l'installation de méthanisation est correctement dimensionnée. L'accumulation de deux types d'intermédiaires peut poser des problèmes sur la stabilité de la réaction globale : l'accumulation de l'hydrogène ou celle des AGV. Ces accumulations sont liées aux flux des métabolites. L'accumulation des AGV peut entraîner des baisses de pH qui peuvent inhiber la fermentation globale. L'accumulation d'hydrogène peut inhiber l'acétogénèse et la méthanisation sur acétate ce qui conduit ensuite à une accumulation d'AGV.

La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur va dépendre de plusieurs paramètres, parmi les principaux nous retiendrons :

- Le type de matière organique (particulaire ou soluble)
- La teneur en matière sèche (solide ou liquide)
- La maîtrise de la technicité (système extensif ou intensif)

Le traitement anaérobie est particulièrement bien adapté aux effluents chargés et à ceux qui contiennent une forte proportion de carbone par rapport à l'azote et phosphore. Dans certains cas il est nécessaire de rajouter des compléments nutritionnels pour faire face aux carences ou à la non biodisponibilité d'éléments indispensables à l'activité microbienne (notamment les oligoéléments).

Ainsi la technologie anaérobie va s'adapter aux caractéristiques de l'effluent à traiter et aux conditions d'exploitation. Elle est d'une grande diversité mais dans le cas de la méthanisation de biomasse végétale les principaux aspects technologiques sont les suivants :

- Infiniment mélangé, piston, discontinu : le réacteur infiniment mélangé est l'une des premières technologies utilisées pour le traitement des effluents de faible siccité (type lisiers). L'unité comprend généralement une ou plusieurs cuves constituant autant de digesteur avec récupération de biogaz.

Les substrats sont introduits par une pompe (effluents liquides de type lisier) ou par une trémie à convoyeur (biomasse végétale). A l'intérieur du digesteur, les différents substrats sont mélangés généralement par un moyen mécanique (hélice motorisée). Dans un digesteur piston l'effluent est introduit à une extrémité du réacteur et est soutiré par l'extrémité opposée. Le temps de séjour hydraulique peut ainsi être correctement contrôlé ; on trouve souvent ce genre de réacteur pour le traitement d'effluents à forte teneur en matière sèche. Citons enfin le digesteur discontinu fonctionnant essentiellement sur des effluents solides de type fumier.

- Mono, bi étagée : en mono étagé toutes les réactions biologiques se font dans un même réacteur ; les systèmes à deux étapes comprennent un réacteur d'hydrolyse et d'acidogénèse suivis d'un réacteur d'acétogénèse et de méthanogénèse.

2.3.2 Choix de la culture pour la production de méthane

2.3.2.1 Considérations générales

Le choix d'une culture pour produire de l'énergie va être déterminé par le potentiel méthanogène (exprimé en $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgMO}$) et le rendement en biomasse (exprimé tMS/ha).

La plupart des cultures agricoles conventionnelles peuvent être utilisées en méthanisation. Cela présente notamment l'avantage de ne pas demander des itinéraires techniques spécifiques, ni du matériel adapté (semoir, machine de récolte). Les moyens habituels de stockage et de conservation des fourrages peuvent également convenir (voie sèche ou voie humide).

La production de méthane est liée à la capacité des microorganismes anaérobies à transformer le carbone contenu dans la matière organique du végétal. Ainsi le premier niveau d'appréciation de l'intérêt d'une culture pour produire de l'énergie consiste à évaluer son potentiel méthanogène. Le potentiel méthanogène est exprimé en volume de méthane produit par unité de masse de matière organique afin de permettre une comparaison entre les différentes espèces de végétaux. La figure suivante présente le principe de production de méthane à partir d'un échantillon de biomasse.

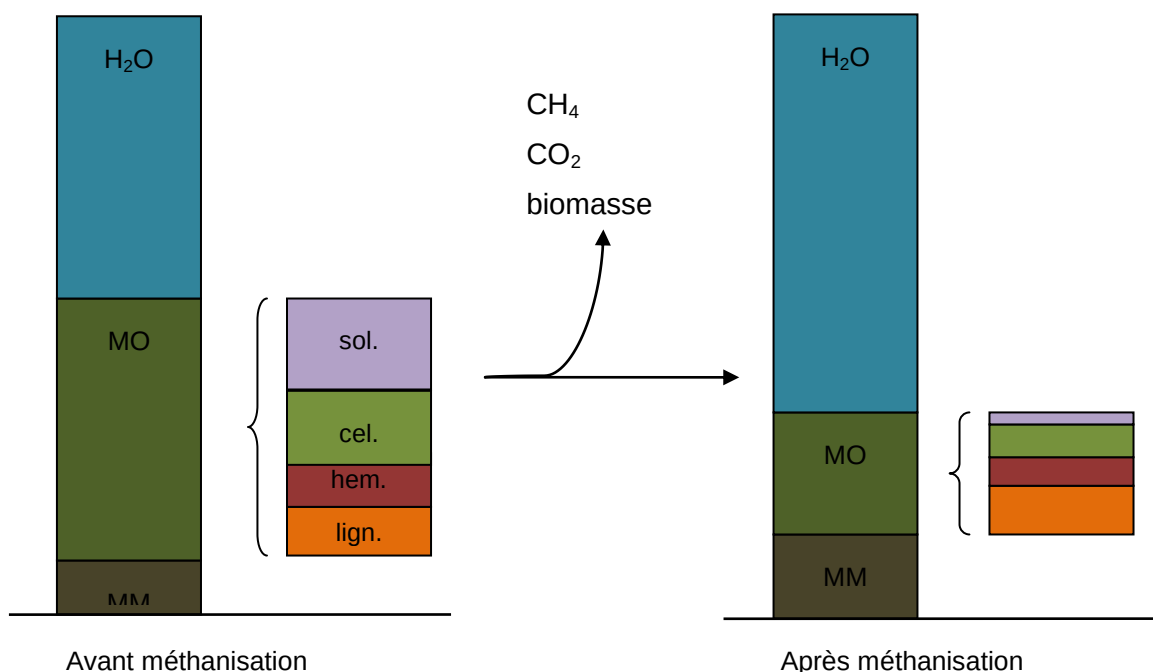


Figure 2 : Schéma de principe de l'évolution de la matière organique au cours du procédé de méthanisation. Avec sol : matière organique soluble ; cel : cellulose ; hem : hémicellulose ; lign : lignine.

Ainsi la méthanisation provoque une perte de matière organique, principalement du carbone issu des compartiments matière organique soluble et cellulose. La composition biochimique de la matière organique joue un rôle primordial dans la biodégradabilité du végétal et donc dans la production potentiel de méthane.

La figure suivante montre le schéma simplifié de la chaîne de production de méthane à partir de cultures énergétiques.

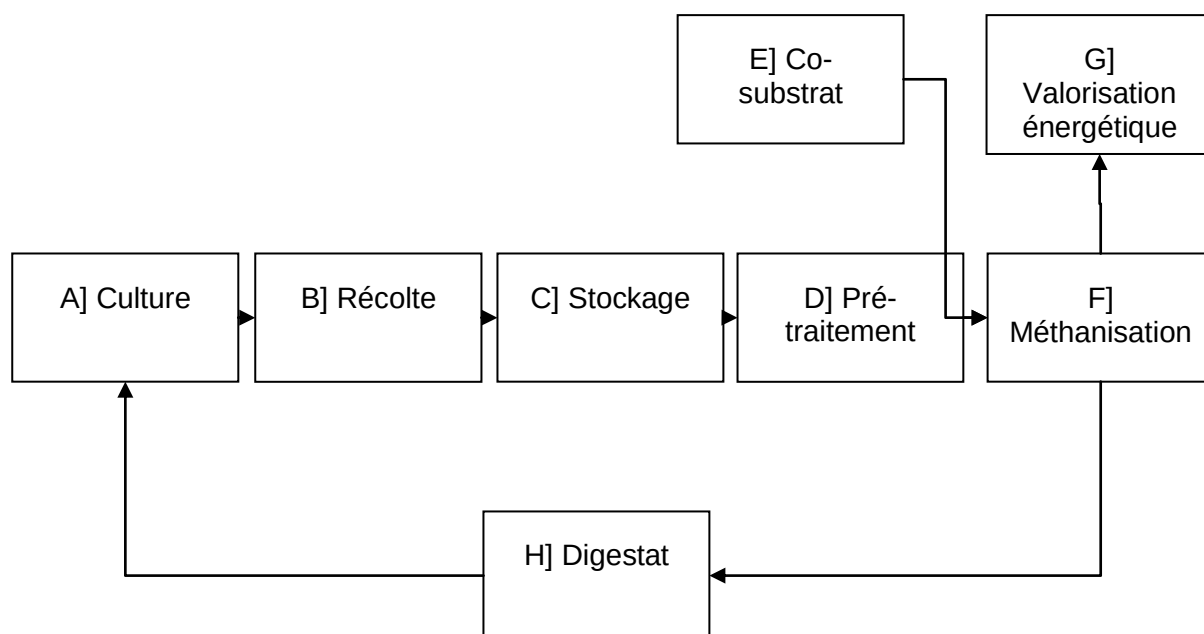


Figure 3 : Schéma simplifié de la chaîne de production de méthane à partir de culture énergétique

Cette figure montre les différentes étapes en amont du procédé de méthanisation qui vont impactées sur le niveau de production de méthane et donc sur la quantité d'énergie disponible pour une valorisation. Pour chacune de ces étapes différents aspects sont à considérer :

- A] : espèce végétale, variété, itinéraire technique, conditions pédoclimatiques...
- B] : stade de récolte, mode de récolte, broyage...
- C] : durée de stockage, mode de stockage/conservation...
- D] : prétraitement éventuel du végétal...
- E] : nature du ou des cosubstrat(s)...
- F] : conduite du méthaniseur...

Signalons que la méthanisation va conduire à la production d'un résidu de fermentation que l'on nomme digestat. Ce dernier contient la grande majorité des éléments fertilisants apportés par les différents coproduits. Sa valorisation sur les cultures énergétiques dédiées permet d'améliorer le bilan de fertilisation. Ces aspects seront pris en compte pour les simulations dans la suite de l'étude ; notamment l'azote.

2.3.2.2 Potentiels méthanogènes des cultures

Le potentiel méthanogène d'une culture détermine la production de méthane que l'on peut attendre lors d'un traitement par méthanisation. Il s'exprime en volume de méthane ramené à la masse de matière organique du végétal considéré ; l'unité la plus utilisée est le $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{kgMO}$ avec Nm^3 pour normal mètre cube (conditions standards de température et de pression) et MO pour matière organique.

Le tableau suivant synthétise les valeurs de potentiels méthanogènes de différentes cultures issus de l'analyse des données bibliographiques inventoriées. La littérature scientifique concernant l'utilisation de cultures énergétiques est relativement récente et liée en particulier à l'essor de l'utilisation de maïs en méthanisation notamment en Allemagne. Les données disponibles pour les autres cultures sont réduites. Signalons l'existence d'importants programmes de recherche et développement relativement récents notamment en Allemagne et en Autriche.

Tableau 1 : potentiels méthanogènes des différentes cultures inventoriées. (en Nm³CH₄/kgMO)

Type de culture énergétique	échantillon	moyenne	min	max	médiane
maïs	24	345	225	422	340
mais frais	20	351	225	422	361
ensilage maïs	4	318	289	330	326
sorgho	3	331	270	372	352
sorgho grain	1	372	372	372	372
sorgho biomasse	2	311	270	352	311
céréales	7	311	223	384	343
blé	3	324	245	384	343
orge	1	356	356	356	356
triticale	1	223	223	223	223
seigle	2	313	275	350	313
oléagineux	2	318	300	336	318
tournesol	1	300	300	300	300
colza	1	336	336	336	336
fourrages	27	311	230	409	300
trèfle	3	330	269	370	350
trèfle ensilé	1	352	352	352	352
luzerne	1	340	340	340	340
sorgho fourrager	1	295	295	295	295
ray grass	1	390	390	390	390
ray grass ensilé	1	409	409	409	409
prairie	3	312	242	390	304
prairie 1ère coupe	6	247	153	362	239
prairie 2ième coupe	5	230	128	392	192
prairie 3ième coupe	3	250	190	317	243
prairie ensilage	2	272	260	284	272
paille/résidus cultures	6	256	173	353	243
paille colza	1	240	240	240	240
paille avoine	2	262	203	320	262
canne maïs	1	173	173	173	173
paille blé	1	245	245	245	245
fane de betterave	1	353	353	353	353
autres cultures					
miscantus	2	201	200	202	201
canne de provence	1	170	170	170	170

Source : propre élaboration à partir de la littérature scientifique

Ces données sont utilisées dans le Tableau 4 lequel présente des données complémentaires sur la production de méthane par tonne de matière brute et sur les rendements à l'hectare des cultures.

En effet l'intérêt d'une culture végétale en méthanisation va être déterminé d'une part sur la base de son potentiel méthanogène et d'autre part sur les rendements en biomasse à l'hectare de cette culture. Ainsi une culture avec un très fort potentiel méthanogène nécessitera un rendement en biomasse par hectare moindre qu'une culture à faible potentiel.

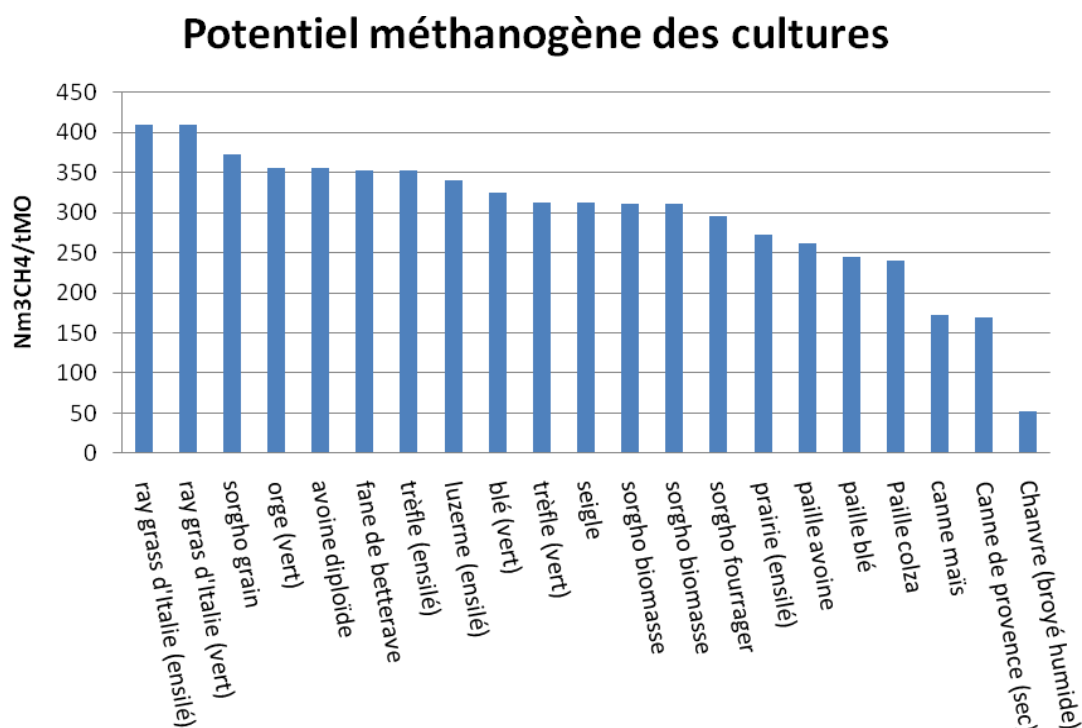


Figure 4 : Potentiels méthanogènes de différentes cultures végétales

Le graphe suivant représente les potentiels méthanogènes des différentes cultures. Il permet une comparaison des potentiels des cultures avec ceux d'une série de potentiels de sous-produits habituels utilisés comme matière première dans les unités de méthanisation.

Potentiel méthanogène de sous-produits organiques

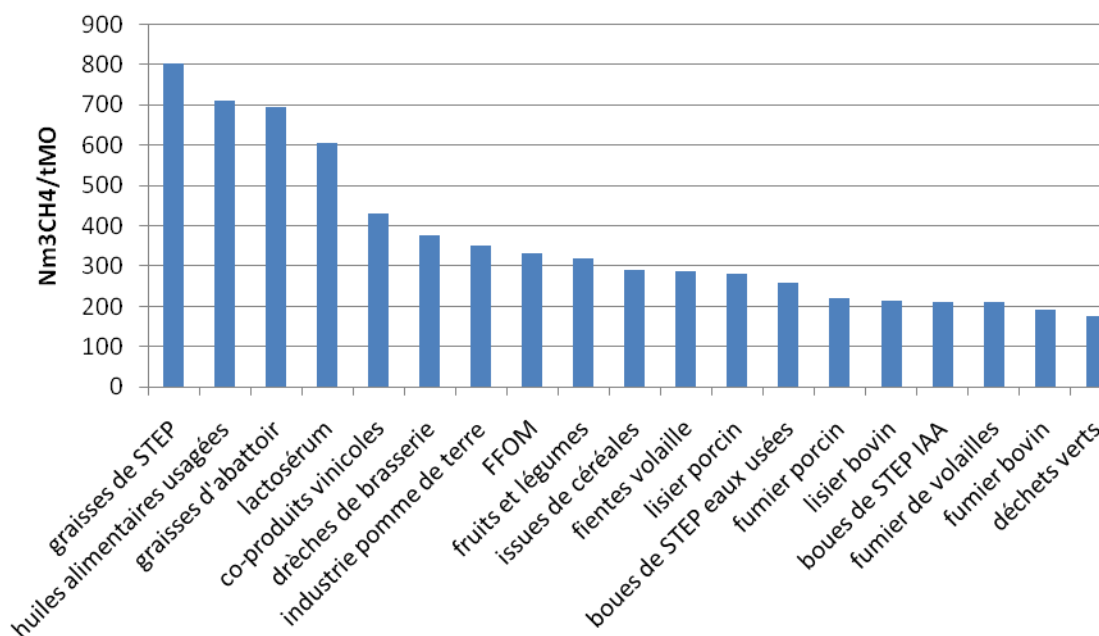


Figure 5 : Potentiels méthanogènes de différents sous-produits organiques

Le maïs présente le potentiel méthanogène le plus élevé des cultures végétales étudiées. On constate des écarts importants dans les valeurs données dans la littérature avec des valeurs qui vont du simple au double. Le maïs est la culture énergétique qui a le plus grand nombre de publications.

Le sorgho est une espèce intéressante pour la production de méthane ; la valeur médiane des données trouvées est même supérieure à celle du maïs. Son utilisation en méthanisation semble être encore limitée malgré les avantages cultureux (fort tonnage de matière sèche à l'hectare) et environnementaux (faibles intrants, pas d'irrigation) qu'elle présente.

Les céréales à paille présentent également des potentiels méthanogènes élevés. On note une valeur faible pour le triticale qui pourrait s'expliquer par la forte proportion de paille ligneuse lors de la récolte plante entière ; valeur à rapprocher de celles de la paille d'avoine et de blé.

Les oléagineux comme le tournesol et colza sont rarement cités dans la bibliographie. Ils présentent cependant des potentiels méthanogènes intéressants.

L'ensemble des plantes fourragères signalées permettent une production de méthane intéressante. On peut noter des variations non négligeables des potentiels entre les différentes coupes de fourrage.

Pour les résidus de culture et autres cultures, on peut observer que le potentiel méthanogène diminue avec le caractère fibreux de la plante. Nous discuterons de ce point dans la suite du rapport.

Ces différentes données serviront à l'élaboration des simulations de scénarios de codigestion lors des phases suivantes de l'étude. Ils permettront notamment de calculer les rendements de production en méthane à l'hectare des différentes cultures en tenant compte de la production de biomasse.

2.3.2.3 Critères de choix

Dans un premier temps sans regarder les considérations environnementales et économiques, le choix d'une culture énergétique en méthanisation va se porter sur la valeur de son potentiel méthanogène. Plus il est élevé, plus la production énergétique attendue ramenée à la matière organique traitée sera importante.

Ce choix sera à compléter avec des notions d'itinéraires techniques. En effet le choix d'un type de culture sera influencé par les conditions pédoclimatiques. On tiendra compte notamment des rendements en matière sèche à l'hectare attendu. Plus la productivité en matière sèche par hectare sera importante, plus la quantité récoltée de matière végétale susceptible de produire du méthane sera élevée. Signalons que dans le cas d'un stockage en voie humide (ensilage) la siccité de la récolte se situe habituellement aux alentours de 30 à 35 % de matière sèche ; ainsi à humidité quasiment identique entre les différentes cultures on peut également raisonner en matière brute produite à l'hectare.

Enfin le choix d'une culture rentrera dans un raisonnement pluriannuel d'assolement. Ainsi les publications disponibles montrent qu'au-delà de la recherche de rotations culturales permettant de minimiser l'impact sur l'environnement, le critère principal de choix pour la production de méthane reste la productivité en matière sèche de l'hectare cultivé (Scholwin, 2006 ; Boehmel, 2007 ; Amon, 2007 ; Lehtomaki, 2008).

2.3.3 Facteurs influençant la production de biogaz

2.3.3.1 La composition biochimique

La production de méthane à partir d'une culture agricole va être influencée par sa composition biochimique. Cette dernière est liée à l'espèce végétale considérée mais aussi au stade de développement de la plante. Au cours de son cycle végétatif les constituants de la plante vont évoluer. Les cellules végétales se distinguent par l'élaboration d'une paroi externe relativement rigide. Au cours de la croissance du végétal cette paroi se structure progressivement en mettant notamment en place des molécules de plus en plus ramifiées et peu hydratées. C'est ainsi qu'il y a élaboration de macromolécules telles que : hémicelluloses, celluloses cristallines, lignines...

Ainsi plus une plante « vieillit », plus ses tissus élaborent des éléments biochimiques complexes et difficilement biodégradables. C'est le cas notamment de la lignine ou de la cellulose cristalline. De même plus une plante est riche en composés « lignifiés » plus elle sera difficilement biodégradable en condition d'anaérobiose.

Le choix d'une espèce végétale pour la production de biogaz devra donc tenir compte de la teneur en lignine. A priori les plantes très lignifiées ne sont pas intéressantes en termes de production de méthane (chanvre, lin, miscanthus...).

La connaissance de la composition chimique du végétal peut permettre de prévoir la production de méthane potentielle. En effet il existe une corrélation entre la teneur en lignine d'un végétal et son potentiel méthanogène. Dès lors on peut pour réaliser des simulations en premier ordre de grandeur, s'appuyer sur des méthodes d'approximation de la biodégradabilité et de la production de méthane.

Ainsi Chandler (1980) a montré qu'il existe une corrélation entre la teneur en lignine d'un substrat et son niveau de biodégradabilité anaérobie : $\text{Fraction biodégradable} = -0,028 \times \text{teneur en lignine} + 0,83$.

Dans l'étude expérimentale sur la codigestion associant des cultures énergétiques (Solagro, 1997), les auteurs proposent de s'appuyer sur les données mises au point par les instituts de recherche et concernant les coefficients de digestibilité des végétaux destinés à l'alimentation animale (Inra, 1988). L'hypothèse suppose que les mécanismes de digestion de la matière organique contenue dans les aliments chez les ruminants sont proches de ceux qui permettent la dégradation de la matière organique dans un digesteur. Selon cette hypothèse, on peut assimiler en premier niveau d'approche la digestibilité d'un aliment et sa biodégradabilité potentielle dans un réacteur de méthanisation. Dès lors dans le cas d'un végétal, à partir de la connaissance de la fraction digestible, on peut calculer le rendement théorique en méthane à partir de la relation suivante : $Bo = MO \times MOd \times 500$ avec Bo : production de méthane en Nl/kgMO , MO : matière organique en kg/kgMS et dMO (ou MOd) : coefficient de digestibilité donné par les tables d'alimentation des ruminants.

Signalons que des modèles plus perfectionnés sont en cours de mise au point par des organismes de recherche notamment en Autriche ; modèle MEVM pour Methane Energy Value Model (Amon, 2007a).

2.3.3.2 La variété

L'utilisation de cultures agricoles dédiées en méthanisation est relativement récente et très spécifique au pays du nord de l'Europe (Allemagne, Autriche).

A notre connaissance, il n'y a pas eu pour l'instant de sélection variétale spécifique pour la production de biogaz (du même niveau que la sélection de tournesol oléique)⁵.

Certains semenciers proposent des variétés spécifiques biogaz essentiellement en maïs (maïs biomasse ou maïs énergie) mais aussi en sorgho grain sucrier (ou sorgho biomasse). De la lecture des documentations commerciales il s'agit la plupart du temps de variétés à très fort potentiel de matière sèche à l'hectare. Il n'y a pas eu de sélection particulière liée à une biodégradabilité anaérobie accrue et/ou un potentiel méthanogène plus élevé.

Plusieurs publications montrent que pour le maïs il existe une relation directe entre la production de méthane et la variété (Amon, 2007 ; Cornell, 2008). La figure suivante présente les rendements en biomasse et la production en méthane ramenée à l'hectare pour différentes variétés de maïs (Amon, 2007b).

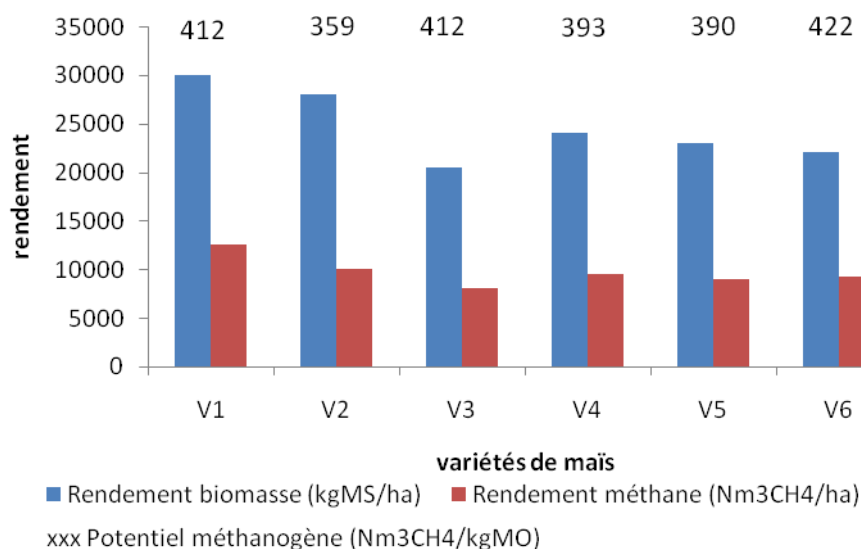


Figure 6 : rendements en biomasse et en méthane de différentes variétés de maïs (d'après Amon, 2007b).

Cette figure montre un potentiel méthanogène du maïs qui varie entre 390 et 422 Nm³CH₄/kgMO en fonction de la variété de maïs testée. Il y a bien une différence d'accessibilité de la matière organique à la biodégradation anaérobie en fonction de la variété de maïs et donc certainement en fonction de la nature biochimique de la matière organique contenue dans le végétal. Le deuxième paramètre à prendre en compte est le rendement en biomasse de la variété exprimé en kgMS/ha. C'est le couplage de ces deux paramètres qui détermine le rendement en méthane et donc le rendement énergétique de la variété de maïs. Ce rendement énergétique varie dans des proportions non négligeables puisque nous pouvons constater des variations de $\pm 33\%$.

Des contacts ont été pris auprès de semenciers pour connaître leur positionnement sur les variétés préconisées en méthanisation. Force est de constater qu'il n'y a pas d'étude ciblée (ou du moins d'étude disponible). Le raisonnement de préconisation est basé sur des bases agronomiques (intégration d'une culture dans une rotation en fonction des conditions pédoclimatiques) et sur des performances de production de matière sèche à l'hectare. Le choix des espèces proposées en méthanisation repose principalement sur des variétés à forte production de biomasse.

2.3.3.3 Le stade de récolte

Le choix du stade de récolte d'une culture est directement lié à l'utilisation aval. Le stade de récolte va influencer le niveau de biodégradabilité et le niveau de production de biogaz. Dès lors le choix du stade de récolte est important pour permettre d'obtenir le rendement énergétique optimal de la culture.

⁵ Signalons que certaines espèces sont enregistrées au catalogue comme variété « biomasse énergie » avec des caractéristiques qui peuvent répondre aux besoins de la méthanisation sans pour autant avoir été sélectionné spécifiquement sur un critère production de biogaz. Böhmel 2007 : 1^{ère} variété de tournesol pour l'énergie agréée.

Le tableau suivant montre l'influence du stade de maturité de la culture sur l'expression de son potentiel méthanogène.

Tableau 2 : exemples de l'influence du stade de maturité sur le potentiel méthanogène de différentes cultures

Culture	Stade végétal (plante ou grain)	Potentiel méthanogène (Nm ³ CH ₄ /kgMO)	Références
Trèfle	Végétatif	380	Pouech, 1998
	Bourgeonnant	550	
	Floraison	560	
Ray Gras	Végétatif	420	
	Bourgeonnant	620	
	Floraison	630	
Blé	Floraison	420	Heiermann, 2002
	Laiteux	390	
	Pâteux	380	
Orge	Floraison	440	
	Laiteux	500	
	Pâteux	350	
Seigle	Floraison	370	
	Laiteux	410	
	Pâteux	280	
Triticale	Floraison	530	Amon, 2007b
	Laiteux	460	
	Pâteux	340	
Maïs	Laiteux	334	
	Pâteux	283	
	Vitreux	280	

Les situations sont contrastées. Pour des cultures fourragères comme le trèfle ou le ray gras, le potentiel méthanogène semble se maintenir au stade habituel de récolte. Notons qu'habituellement ces plantes fourragères sont récoltées pour l'alimentation des animaux avant le stade floraison. Des essais de production à des stades de maturité plus tardive montreraient certainement une baisse de ce potentiel.

Pour les céréales à pailles le potentiel de production de méthane a tendance à fortement diminuer avec l'avancement du stade de maturité du végétal. Le blé perd 10 % de la production entre le stade floraison et le stade pâteux alors que le triticales présente une baisse de plus de 30 % du potentiel.

Au niveau du maïs nous constatons les mêmes tendances avec une baisse du potentiel méthanogène de l'ordre de 15 %.

Le choix du stade de maturité est à nuancer avec la productivité de méthane ramenée à l'hectare. C'est en effet le rendement de culture qui va ensuite fixer l'intérêt d'un stade de culture par rapport à un autre en fonction du tonnage de matière sèche potentiellement accessible. Pour une même espèce végétale, la variété peut jouer un rôle non négligeable dans cette production. Ainsi Amon (2007b) montre dans le cas du maïs, l'influence à la fois du stade de maturité et de la variété utilisée.

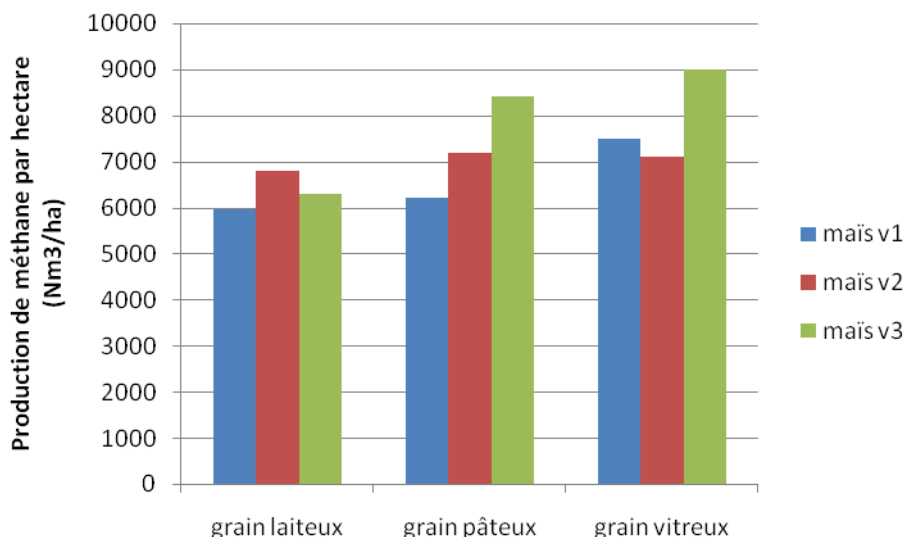


Figure 7 : influence de la variété du maïs et du stade de récolte sur la production de méthane ramenée à l'hectare (Amon, 2007b).

Ainsi pour la variété de maïs v1, on constate peu de différence dans la production entre les stades grain laiteux et grain pâteux ; il faut attendre le stade ultime de maturité pour obtenir la plus grande production de méthane ramenée à l'hectare. Pour la variété v2, le maximum de production est atteint au stade grain pâteux alors que pour la variété v3, la production augmente avec l'évolution de la maturité du végétal.

2.3.3.4 Le mode de stockage

L'utilisation de cultures énergétiques pour la production de méthane et d'énergie, demande le stockage du substrat. En effet la conduite d'une unité de méthanisation est généralement basée sur un fonctionnement continu et le plus constant possible tout au long d'une année calendaire. La production de biomasse à partir d'une culture agricole est dans la plupart du temps liée à une récolte annualisée (sauf dans le cas de l'utilisation de fourrages où plusieurs coupes peuvent intervenir tout long de la période annuelle de croissance du végétal). Dès lors l'utilisation d'une culture énergétique pour alimenter un digesteur va demander la mise en place d'une capacité de stockage. Les modalités de stockage doivent permettre de limiter les pertes en matière organique et notamment la fraction carbonée.

La plupart du temps le mode de stockage envisagé est la voie humide par ensilage. Comme pour le stockage des fourrages humides à destination de l'alimentation animale, cela demande un broyage et tassage du végétal pour permettre des conditions d'anaérobiose afin que les fermentations puissent se réaliser.

Durant l'ensilage, les formes solubles carbonées sont transformées en acides (majoritairement en acides lactique et acétique). Le milieu n'étant pas tamponné, il y a rapidement une baisse du pH (en dessous de pH 4) ce qui arrête l'évolution fermentaire et permet la conservation du produit. Cette technique de conservation des fourrages est utilisée en agriculture depuis des décennies. C'est cette méthode qui est utilisée pour stocker les substrats végétaux avant méthanisation.

La voie sèche (qui est l'autre mode de stockage habituel en agriculture) présente deux inconvénients pour la méthanisation, la perte généralement plus importante en carbone du substrat et l'obtention d'un produit sec qu'il faudra humidifier ou mélanger à d'autres produits très humides pour permettre la biodégradation anaérobie.

La plupart des auteurs s'accordent pour dire que l'ensilage ne provoque pas de pertes importantes pouvant impacter sur le potentiel méthanogène de la culture (Lehtomäki, 2006).

La figure suivante présente des résultats issus de la bibliographie et comparant les potentiels méthanogènes de végétaux frais et ensilés.

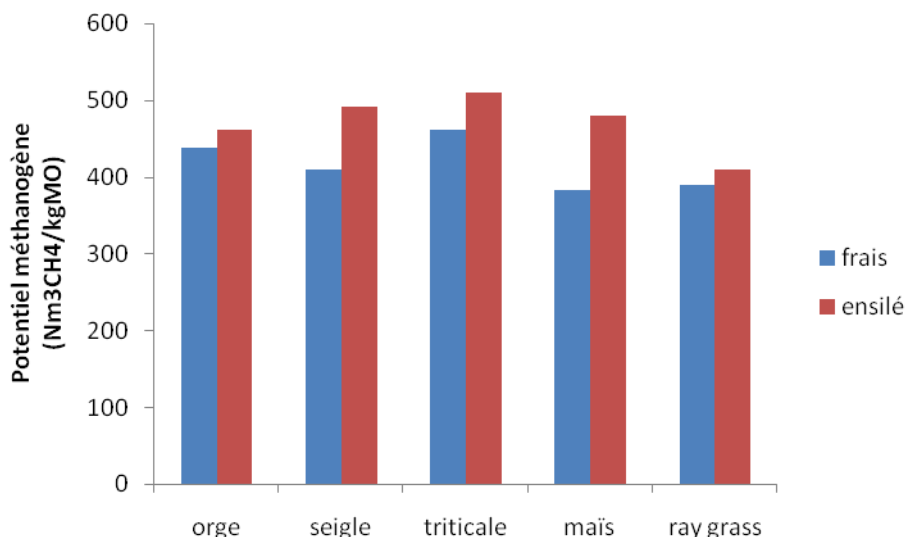


Figure 8 : influence de l'ensilage sur la production de méthane (Lehtomäki, 2006).

On constate pour les produits ensilés des potentiels méthanogènes plus élevés. Cela est dû à une accessibilité accrue de la matière organique liée aux actions d'hydrolyses qui se sont déroulées au cours de l'ensilage. L'ensilage peut être considéré comme un prétraitement de la biomasse dans la mesure où cela consiste en une fermentation partielle de la matière organique. Les acides organiques produits (acides acétique, lactique, propionique...) sont des intermédiaires de fermentation qui seront transformés dans le digesteur en biogaz par la microflore méthanogène. La gestion de l'introduction de l'ensilage dans le digesteur reste cependant à bien maîtriser afin de ne pas provoquer d'acidogénèse.

2.3.3.5 Le prétraitement de la biomasse

Le prétraitement de la biomasse végétale a pour objectif d'améliorer l'accessibilité des bactéries à la matière organique.

Le broyage du végétal constitue le prétraitement physique le plus important. Il est généralement pratiqué au moment de la récolte de la culture pour son ensilage. L'action principale du broyage est l'augmentation de la surface de végétal accessible aux bactéries. Cela joue à deux niveaux : l'augmentation du potentiel méthanogène et l'amélioration de la vitesse de dégradation. Les auteurs s'accordent pour considérer qu'un broyage de l'ordre de 10 à 20mm correspond à un optimum en termes de production de méthane (Chynoweth, 1993; Lehtomäki, 2006). Ainsi le moyen utilisé au moment de la récolte va déterminer le comportement du végétal au cours de la fermentation. Il s'agira de privilégier le broyage le plus fin possible du végétal sans pour autant entraîner de pertes importantes. Le broyage est systématiquement pratiqué lors de l'ensilage d'une culture.

Par ailleurs comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent, l'ensilage peut être considéré comme une technique de prétraitement. Dans la mesure où il permet un début de fermentation des composés carbonés, l'ensilage va améliorer d'une part l'accessibilité des bactéries à la matière organique et d'autre part la vitesse de biodégradation et de production de biogaz.

A notre connaissance il n'y a pas sur les installations existantes de codigestion de prétraitement spécifique dédié à la biomasse végétale. Cependant il existe plusieurs techniques de prétraitement de la biomasse végétale qui pourraient s'appliquer dans le cas de la méthanisation. La plupart de ces techniques sont étudiées dans le cadre de l'augmentation des rendements biologiques de production d'éthanol (biocarburant de deuxième génération). Il s'agit notamment d'un traitement à la vapeur, de l'utilisation d'enzymes cellulolytiques et de prétraitement alcalin. La figure suivante montre l'effet de ces prétraitements sur le potentiel méthanogène d'un Ray Grass (d'après Lehtomäki, 2004).

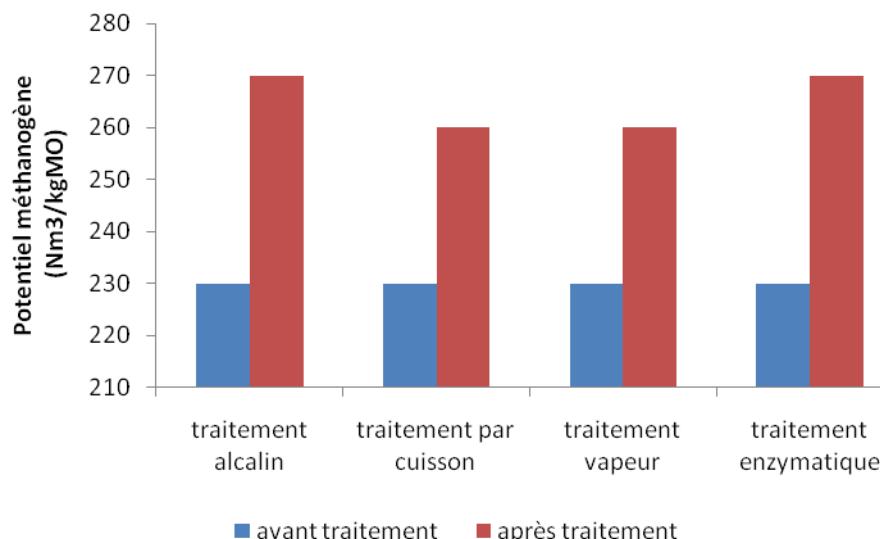


Figure 9 : effet de différents prétraitements sur le potentiel méthanogène d'un ray grass (d'après Lehtomäki, 2004)

2.3.3.6 La technologie de fermentation

Les cultures énergétiques peuvent être utilisées en méthanisation seules ou en co-digestion. La première situation ne fait pas partie du cadre de cette étude. Dans le secteur agricole la plupart du temps les cultures énergétiques sont ajoutées aux effluents d'élevage de l'exploitation pour un fonctionnement de type co-digestion. D'autres coproduits peuvent venir compléter le mix énergétique (sous-produits agroalimentaires, graisses, déchets verts...).

Les effluents d'élevage de type lisiers ont des teneurs en matière sèche faibles (en général inférieures à 6-8 %) ; de ce fait la technologie de digesteur la plus employée est de type infiniment mélangée. Ce sont les rendements de production de méthane obtenus avec ce type de technologie que nous retiendrons dans le cadre de cette étude. Plusieurs publications relatent les performances de la codigestion d'effluents d'élevage et de cultures énergétiques (Lehtomäki, 2007 ; Amon, 2007 ; Cornell, 2008 ; Effenberger, 2008).

Les principaux avantages de l'utilisation de cultures énergétiques en codigestion avec des effluents d'élevage résident dans l'apport par les lisiers d'éléments nutritifs ainsi qu'une capacité tampon utile au fonctionnement du digesteur (neutralisation des acides organiques intrinsèques à l'ensilage ou bien produit au cours de la biodégradation anaérobie).

L'apport de matière végétale riche en carbone permet de rééquilibrer le ratio C/N et de limiter ainsi les inhibitions liées à l'ammoniaque ; ceci est particulièrement sensible lors de la méthanisation de lisiers de porcs.

Les principaux inconvénients ou éléments limitant liés à l'utilisation de cultures énergétiques résultent généralement dans la durée nécessaire à la production de méthane à partir de cette matière première. En effet les auteurs s'accordent sur des temps de séjour longs dans le cas de la méthanisation de culture énergétiques ; avec des temps de séjour supérieurs à 40-45 jours. Ceci entraîne des charges organiques volumiques relativement faibles et ne dépassant pas 2 à 2,5 kg MO/m³.j. Dès lors le dimensionnement des cuves de méthanisation doit être important et largement surdimensionné pour le traitement uniquement de lisiers.

Les retours d'expériences de quelques années sur les unités de méthanisation fonctionnant avec des cultures énergétiques montrent qu'il faut prendre certaines précautions pour l'utilisation de cultures énergétiques ; notamment éviter les surcharges organiques sources provoquant l'acidification du milieu fermentaire (L. De Baere, 2008) et veiller à l'apport d'oligoéléments indispensables au fonctionnement de l'écosystème méthanogène (Lebuhn, 2008).

2.4 Les avantages / inconvénients des cultures utilisables en co-digestion sur le plan agronomique

Il s'agit d'une part de comparer les avantages et inconvénients des différentes cultures en termes agronomiques, en particulier leurs rendements en matière sèche par hectare. D'autre part, il s'agit de répondre à certaines questions relatives aux itinéraires techniques culturaux, des cultures intermédiaires et des couverts végétaux en particulier, encadrés par la réglementation.

2.4.1 *Aperçu synthétique des caractéristiques agronomiques de différentes cultures*

Le tableau suivant donne des éléments de comparaison de différentes cultures sur le plan agronomique.

Tableau 3 : Eléments sur les caractéristiques agronomiques de différentes cultures

	Adaptation au milieu	Exigence en engrais	Exigence en produits phyto sanitaires	Exigence en eau	Production de matière sèche à l'hectare	Notes
Maïs	+	+++	++	+++	+++	
Sorgho grain	++	+	++	+	+++	Exigeant en chaleur mais plus résistant à la sécheresse que le maïs
Blé, Orge	+++	++	+++	+	++	Image de plante nourricière : frein à l'utilisation
Triticale	+++	++	+	+	++	Plus résistant aux maladies que le blé
Seigle	++	+	+	+	++	Rustique Très peu cultivé en France
Avoine	++	+	+	+	+ à ++	Peu cultivé en France
Colza	+++	+++	+++	+	+	Diversification des rotations
Tournesol	++	+	+	+	++	Rustique, résistant à la sécheresse, Diversification des rotations
Pois	++	0	++	+	+	Diversification des rotations, Amélioration de la fertilité des sols
Luzerne	++	0	+	+	++ à +++	Diversification des rotations, Amélioration de la structure et fertilité des sols
Betterave	+	++	+++	+	+ (fane) ++ (fane et tubercules)	Diversification des rotations Forte marge brute et concurrence avec l'éthanol : frein à l'utilisation des tubercules
Pomme de terre	++	++	+++	++	+ (fane) ++ (fane et tubercules)	Diversification des rotations Forte marge brute : frein à l'utilisation des tubercules
Prairies temporaires – Herbe	+++	+	+	+	++	Amélioration des sols
Cultures dérobées	+++	+ ou 0, interdit dans ZAC	+	+	+	Maintien d'un couvert, Diversification des rotations, parfois obligation
Bandes enherbées	+++	interdit	interdit	+	+	
Canne de provence	+ (exigeante en chaleur)	++	+ (au début), 0 ensuite	+	+++ (après 3 ans)	Pas de données fiables, Encore expérimentale Pérenne
Miscanthus	++	0 la première année puis + à ++	+ (au début), 0 ensuite	++	+++ (après 3 ans)	Très peu développée en France, quasi-expérimentale Pérenne
Switchgrass	+++	0 la première année puis +	+ (au début)	+	+++ (après 3 ans)	encore à l'état d'expérimentation. Potentiellement plus performante que Miscanthus en conditions chaudes et sèches

Source : fiches ADEME/ITCF, Guibout F. (Grignon Energie Positive) et propre estimation (Oréade-Brèche)

2.4.2 Questions agronomiques liées à l'application de la réglementation

2.4.2.1 Réglementation relative aux couverts environnementaux : BCAE et Directive nitrates

Nous avons vu dans le § 2.2.1 que les BCAE et les mesures d'application de la Directive nitrates, en particulier dans les zones d'actions complémentaires, comprennent des obligations de mise en place de cultures intercalaires et de couverts environnementaux tels que les bandes enherbées. La biomasse produite par ces couverts peut être intéressante à valoriser en co-digestion. Néanmoins, l'implantation et l'entretien de ces couverts est encadré par des règles qu'il convient de rappeler brièvement.

❖ *Conditions d'implantation et d'entretien/exploitation des couverts environnementaux dans le cadre des BCAE*

Comme expliqué dans l'encadré du § 2.2.1 et dans l'annexe 6, l'implantation des couverts environnementaux doit respecter la liste des couverts autorisés dans l'arrêté ministériel du 31 juillet 2006 ou les arrêtés préfectoraux le cas échéant et s'effectuer préférentiellement en bordure de cours d'eau.

Pour l'ensemble des couverts – prairies permanentes, prairies temporaire, gel environnemental, bandes enherbées, haies –, il y a possibilité de fauche une grande partie de l'année, excepté dans une période de 40 jours consécutifs située entre le 1er mars et le 15 juillet déterminée par arrêté préfectoral (MAP, 2009).

Parmi les espèces préconisées pour la mise en place d'un couvert environnemental (cf. annexe I) sont citées des espèces herbagères (ensilage et fraîche), des graminées (le Ray-grass anglais et hybride), des légumineuses (la luzerne).

Ces surfaces en couverts environnementaux peuvent être fauchées et la biomasse récoltée peut ainsi être utilisée en méthanisation. En revanche, l'emploi de fertilisants, organiques et minéraux, et de produits phytosanitaires est interdit (MAP, 2009). En particulier, l'épandage du digestat ne sera donc pas possible sur ces surfaces.

❖ *Mesures relatives aux zones d'action complémentaires issues de la Directive nitrates*

Dans le cadre de l'application de la Directive nitrates, dans les zones d'actions complémentaires (ZAC) les obligations suivantes ont été définies, entre autres :

- obligation de couverture des sols pendant les périodes présentant des risques de lessivage : implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), gestion des repousses et des résidus de récolte,
- maintien de bandes enherbées le long des cours d'eau.

Ces couverts peuvent être fauchés. En revanche, l'apport de fertilisants, sous forme minérale et organique, est interdit.

2.4.2.2 Epandage des digestats et réglementation

Caractéristiques du digestat

Le digestat est le sous-produit de la méthanisation. Le processus de digestion anaérobie conserve les éléments qui n'entrent pas dans la composition du biogaz, dont l'azote. Ainsi, les différents bilans de masse disponibles sur les unités de méthanisation en fonctionnement montrent un maintien de la valeur azotée dans l'effluent méthanisé. De plus, il y a une minéralisation importante de l'azote, proportionnelle au taux de biodégradation du carbone⁶. Cette minéralisation permet d'envisager une meilleure utilisation de l'azote dans un plan de fertilisation de cultures, si tant est qu'une technique d'épandage appropriée est utilisée (pendillard, enfouisseur) afin de réduire les risques de volatilisation de l'ammoniac. Lorsque l'apport est effectué au moment des besoins de la plante, le digestat permet de garantir l'apport d'azote minéral ; c'est un moyen d'optimiser la gestion des flux organiques en agriculture (déjections animales, boues...). Le digestat est alors à considérer comme un engrais azoté organique. Pour les autres éléments minéraux il y a également conservation au cours de la méthanisation. Le phosphore et potassium vont se retrouver majoritairement dans la phase solide du digestat.

⁶ En raison de milieu réducteur de la méthanisation, l'azote minéral est exclusivement sous forme ammonium (NH₄⁺).

Le digestat présente donc une valeur fertilisante élevée mais son épandage peut présenter des risques importants de volatilisation de l'azote qu'il contient (sous forme d'ammoniac) d'où la nécessité d'utiliser des méthodes d'épandage appropriées (Pouech, 2008).

Réglementation

Réglementairement, le digestat peut être considéré soit comme un déchet (effluent d'élevage), soit comme un produit destiné à être mis sur le marché après homologation (Pouech, 2007).

Epandu en l'état, le digestat est considéré comme déchet et est donc soumis à un plan d'épandage défini au niveau des Directions départementales de l'agriculture et de la forêt (DDAF), au même titre que les effluents d'élevage. La réglementation de l'épandage du digestat varie en fonction des départements, du règlement sanitaire départemental, des arrêtés préfectoraux en vigueur, des décrets d'application départementaux de la Directive nitrates.

Dans les zones d'action complémentaires définies dans le cadre de l'application de la Directive nitrates, l'apport d'azote, sous quelque forme que ce soit, est interdit sur les couverts hivernaux (cultures intercalaires) et les bandes enherbées obligatoires. Plus largement, dans l'ensemble des zones vulnérables aux nitrates, les programmes d'action incluent une limite d'apport d'effluents d'élevage : 170 kg d'azote par hectare épandable depuis le 20/12/2002 (MEEDDM).

Seuls les digestats compostés peuvent entrer dans la composition d'amendements organiques normalisés (norme « amendement organique » NF U 44-051 ou norme « composts à base de boues » NF U 44-095). Dans ce cas, le digestat devient un produit organique épandable sans contraintes.

2.5 Les avantages / inconvénients des cultures utilisables en co-digestion sur le plan environnemental par grande famille de cultures

Il s'agit dans cette partie de discuter des effets environnementaux des cultures méthanisables à un niveau général, nous rentrerons dans des détails plus techniques lors des simulations dans la deuxième partie de l'étude pour un nombre restreint de cultures (cf. § 3).

Les équipes de recherche travaillant sur la production de biogaz à partir de cultures énergétiques ont jusqu'à présent axé leurs recherches sur l'optimisation des rendements en méthane des cultures et/ou des rotations par le choix des espèces cultivées, des pratiques culturales, de la partie de la plante utilisée, des modes de stockage (utilisation en frais, ensilage, etc.).

Certains chercheurs se sont cependant penchés sur les aspects écologiques et le développement de rotations de cultures énergétiques durables, en particulier en Allemagne et en Autriche. On peut citer parmi eux :

- l'équipe du ZALF Müncheberg (centre de recherche sur les paysages agricoles) en Allemagne au sein du projet EVA 1 sur le Développement et comparaison de systèmes de cultures pour la production agricole de cultures énergétiques dans diverses situations géographiques en Allemagne. Projet conduit par le TLL Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Agence pour l'agriculture du Land Thüringen) et co-financé par la FNR et le Ministère fédéral de l'agriculture (BMELV). Le rapport final du projet EVA 1 sera bientôt disponible, il devait être terminé le 28/02/09. Une suite de ce projet est en cours : le projet EVA II.
- l'équipe de l'Institut für Landtechnik de l'Université de Vienne (Thomas Amon) avec différents projets :
 - le projet "Optimisation de la production de méthane à partir de cultures énergétiques avec le modèle de valeur énergétique du méthane (methane energy value model)" conduit entre 2004 et 2006,
 - le projet "Production de biogaz à partir d'orge d'hiver, de blé d'hiver, de seigle d'hiver, de triticale d'hiver et de maïs" mené entre 2005 et 2006,
 - le projet "Optimisation de la production de biogaz à partir des espèces de cultures énergétiques suivantes: maïs, sorgho, betterave à sucre et seigle sur des zones sèches, en cours (2008-2012) Ce projet est cofinancé par l'agence autrichienne de soutien à la recherche.

Tous les résultats de ces projets ne sont pas disponibles. Nous avons pour l'instant essentiellement utilisé les premiers résultats du projet EVA 1.

Malgré tout, partant du constat que les cultures étudiées correspondent à l'ensemble des cultures arables, annuelles et pluriannuelles et aux prairies (les cultures permanentes étant exclues), nous sommes en mesure de présenter ci-dessous des éléments généraux sur les effets environnementaux de ces cultures à

partir de la bibliographie. Ces effets dépendent certes des espèces cultivées, et ce sont les effets différenciés des cultures qui nous intéressent plus particulièrement dans cette étude, cependant ils dépendent aussi des pratiques culturales et des systèmes de culture. Nous proposons donc d'aborder l'analyse bibliographique générale des effets environnementaux des cultures selon deux approches : l'une axée sur les pratiques culturales, et l'autre sur les espèces cultivées regroupées par type de culture.

2.5.1.1 Eléments de base sur les effets environnementaux des pratiques culturales

Les résultats de l'analyse bibliographique présentés ci-dessous sont des éléments généraux, qui ne reflètent pas la variabilité des situations agro-environnementales en France, les études étant souvent de portée locale. De plus, certaines études ont été réalisées dans des pays étrangers. Les impacts de l'agriculture sur l'environnement varient en effet sensiblement selon le contexte environnemental local. Par exemple, la capacité d'assimilation des écosystèmes est variable, et certains milieux, comme les zones humides, sont plus sensibles que d'autres aux niveaux d'intrants.

❖ *Impacts de l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires*

Les intrants agricoles, engrais et produits phytosanitaires, constituent des sources de pollution majeures et essentiellement diffuses. L'apport d'engrais peut générer un excès d'éléments nutritifs dans le milieu (sol ou eau), perturbant ainsi l'équilibre des écosystèmes : le phénomène le plus décrit lié à cette pollution est l'eutrophisation des eaux. L'apport de produits phytosanitaires, destiné à détruire les êtres vivants qui nuisent au développement des cultures : adventices, animaux et champignons, a par définition des impacts négatifs directs sur la biodiversité. Mais ils peuvent aussi avoir des impacts indirects ; ainsi, les émissions de pesticides dans l'air, dans les sols et dans les eaux sont susceptibles de dégrader la qualité de ces milieux, ce qui peut perturber les écosystèmes liés à ces milieux.

Les principaux impacts mis en évidence dans la bibliographie sont les suivants :

- un excès d'éléments nutritifs dans les milieux sols et eau lié à la fertilisation, qui peut conduire à une eutrophisation des milieux aquatiques et à un déséquilibre des écosystèmes affectant ainsi la biodiversité (les espèces eutrophes étant privilégiées au détriment des autres).
- des émissions dans le sol et dans l'air de gaz responsables d'une acidification de ces milieux : dioxyde de soufre, oxydes d'azote et ammoniac, qui se forment à partir des éléments azotés et soufrés notamment apportés dans les engrais.
- une contamination des sols et des eaux souterraines par les nitrates (phénomène de lessivage), et de l'air par l'émission d'ammoniac, gaz très acidifiant, et de protoxyde d'azote, gaz à effet de serre.
- une contamination des milieux, eau, sol et air et une dégradation des écosystèmes par les pesticides. Les matières actives de ces produits sont plus ou moins toxiques pour les êtres vivants, végétaux ou animaux engendrant ainsi une destruction de certaines populations, dans ou à proximité des champs, ou une intoxication affectant la santé de nombreuses espèces, dont l'Homme (effets cancérigènes). Les effets des produits phytosanitaires sont complexes (en raison notamment de la diversité des matières actives et du manque de connaissances sur leur devenir dans le milieu) et difficiles quantifiables.
- une dégradation de la structure des sols : l'apport d'intrants agit de plusieurs façons sur ce phénomène, d'une part en réduisant l'activité de la faune et microfaune du sol, d'autre part en favorisant une acidification des sols et une dégradation de leur structure. Cette dégradation de l'état structural du sol peut à son tour augmenter le risque d'érosion des sols.

(Sources : Boatman et al., 1999 ; Aubertot et al., 2005 ; Hoogeveen et al., 2001 dans EEA, 2006 ; EEA, 2005 ; Aviron et al., 2003 ; Pfiffner et Luka, 2003 ; Branciforti et Muller, 2003 ; Giupponi, 2000 ; Moreno et al., 1996 ; Poux, 2000 ; CORPEN, 2006)

❖ *Impacts du drainage et de l'irrigation*

L'irrigation des cultures peut exercer une pression sur les ressources hydriques (Hoogeveen et al., 2004). Or, une diminution de ces ressources peut faire baisser les niveaux des cours d'eau et des eaux souterraines, ce qui peut nuire aux écosystèmes hydriques et riverains (EEA, 2006). Par ailleurs, le drainage de marais et de terres humides à des fins agricoles, qui remonte au 19ème siècle, a pu et peut causer la disparition de certains habitats en bouleversant leur équilibre hydrique.

L'analyse d'études scientifiques sur les impacts du drainage à des fins de mise en culture et de l'irrigation met en évidence des impacts significatifs sur les ressources quantitatives en eau bien sûr, souterraines et/ou superficielles, mais aussi sur la qualité des sols et des eaux (risques accrus de pollution, d'acidification, de salinisation et d'érosion), et sur la biodiversité (dégradation de la qualité des milieux, modification voire disparition d'habitats). (Sources : Baldock et al., 2000 ; Boatman et al., 1999 ; Poux, 2000). De plus, l'irrigation consomme de l'énergie (pompage).

❖ *Impacts des pratiques de travail du sol*

Les pratiques liées au travail du sol, du labour aux techniques culturales simplifiées (TCS), voire à l'absence de travail du sol (semis direct), sont de première importance dans les systèmes de production. Elles peuvent avoir des impacts sur la qualité des sols, structurale notamment mais aussi biologique (impacts sur la faune et microfaune du sol), et sur le risque d'érosion des sols. De plus, le sol étant un compartiment de stockage de carbone et d'autres éléments comme l'azote, le travail du sol peut influencer sur les émissions de dioxyde de carbone et de composés azotés (ammoniac par exemple).

Il ressort de la revue bibliographique que les pratiques de travail du sol ont des effets variables sur l'environnement. Sous certaines conditions, les TCS ou l'absence de travail du sol ont des effets positifs sur la réduction du ruissellement, du risque d'érosion, faune du sol, sur la réduction et sur le stockage du carbone dans le sol. Plusieurs études mettent aussi en évidence l'influence d'autres facteurs sur le risque d'érosion notamment, la présence d'un couvert végétal. (Sources : Labreuche et al. (coord.), 2007 ; de Ploey, 1989 ; Boatman et al., 1999 ; Commission européenne DG-Agri, 2000)

❖ *Impacts de la mécanisation*

La mécanisation des activités agricoles, via le passage fréquent d'engins agricoles dans les champs, peut entraîner un tassement du sol susceptible notamment d'accroître le ruissellement et le risque d'érosion. De plus, les activités agricoles mécanisées peuvent être dangereuses pour les espèces vivant sur les terres agricoles (ex : destruction de nids). Par ailleurs, pour faciliter le passage des engins agricoles les agriculteurs ont pu enlever de leurs terres certains éléments fixes du paysage (ex : haies, talus, bords de champ, etc.). Or, ces éléments ont souvent de nombreux effets positifs sur l'environnement. (Sources : Le Bissonnais et al., 2002 ; Boatman et al., 1999 ; Richard (coord.), 2007)

❖ *Agriculture et éléments fixes du paysage*

Les infrastructures écologiques, ou éléments fixes du paysage (haies, bords de champ, chemins, fossés, talus, mares, etc.), peuvent avoir de nombreux impacts environnementaux positifs. Ils participent à la diversification des paysages agricoles et des habitats des espaces agricoles et peuvent constituer un refuge pour les espèces vivant sur ces terres. La revue bibliographique réalisée fait ressortir :

- un impact paysager fort, mais peu renseigné par la bibliographie,
- une diversification des habitats sur les terres agricoles, voire la présence de refuges pour les espèces vivant sur les terres agricoles (plus ou moins protégées des émissions de pesticides par exemple), qui permettent un maintien ou une amélioration de la biodiversité dans les espaces agricoles, surtout lorsque les éléments fixes du paysage forment des corridors écologiques,
- une amélioration de la qualité des sols et une réduction du risque d'érosion des sols,
- une réduction du transfert des polluants (nitrates et pesticides) vers les eaux souterraines grâce à une amélioration de l'infiltration, et vers les eaux superficielles par une réduction du ruissellement (les pesticides étant majoritairement entraînés par ruissellement). (Sources : Fournier, 1998 ; Aviron et al., 2003 ; Montanarella, 1999 ; Walter et al., 2003 ; Baudry et Laurent, 1993)

Un paragraphe spécifique est dédié aux bandes enherbées dans le chapitre suivant.

❖ *Impacts des rotations*

La diversité des rotations culturales s'avère être sur les plans à la fois agronomiques et environnementaux très favorable en améliorant entre autres, la structure et la qualité des sols et la biodiversité. La simplification des rotations a été un changement global majeur de l'agriculture ces dernières décennies, avec même un développement de zones de monoculture (par exemple le maïs dans les Landes) qui peut conduire à une perte de diversité des habitats agricoles, des variétés de cultures et des races animales, à une utilisation accrue de pesticides et surtout à une moindre couverture du sol, très négative d'un point de vue environnemental (Pointereau et Bisault, 2006 ; Scholwin et al., 2006).

La couverture du sol par des cultures, particulièrement pendant l'hiver, est en effet très importante pour limiter le risque d'érosion des sols et le lessivage des nitrates (Poux, 2000 ; Boatman et al., 1999 ; COMIFER, 2002). A l'inverse, la diversification des rotations avec notamment l'introduction d'oléagineux, comme le colza ou le tournesol, et de protéagineux dans les rotations de grandes cultures, peut avoir des effets environnementaux positifs, qui sont principalement liés à "l'effet précédent" favorable aux cultures suivantes : réduction de l'utilisation produits phytosanitaires et d'engrais, amélioration de la qualité des sols, accroissement de la biodiversité, et diversification des paysages (Carrouée et al., 2002 ; CETIOM).

L'intérêt écologique des systèmes de rotation à deux cultures dans l'année (qui permettent une diversification des rotations et utilisent significativement moins de produits phytosanitaires chimiques) est mis en avant par les scientifiques intervenant dans le projet allemand EVA I sur le développement de rotations de cultures énergétiques (Strauss (coord.), 2008).

Dans ce même projet EVA I, des chercheurs du ZALF (centre scientifique allemand) ont étudié les effets des cultures énergétiques et systèmes de culture associés sur les adventices, les carabes, les araignées et les insectes butineurs ont été étudiés dans trois régions (Bundesländer). Conformément aux connaissances sur la biodiversité dans les systèmes agricoles, il ressort des expérimentations que la diversité des espèces pour tous les organismes augmente quand les systèmes de culture combinent des espèces avec des périodes de culture et des structures de végétation variées. Les chercheurs ont étudié le nombre de variétés des quatre groupes d'organismes étudiés selon le nombre d'espèces cultivées dans la rotation au sein de quatre groupes de cultures : céréales et colza d'hiver, céréales de printemps et mélanges, cultures de printemps dicotylédones avec aspect florent (Légumineuses), maïs / sorgho, cultures arables pluriannuelles (fourrages). L'effet des rotations sur la diversité des espèces est plus important si elles incluent différents groupes de cultures. Ainsi, parmi les rotations expérimentées celles pour lesquelles on observe la diversité des espèces la plus élevée sont celles qui incluent au moins trois groupes de cultures différents. L'abondance des populations en revanche apparaît peu influencée par la diversité des cultures, elle est plutôt liée à chaque culture.

Dans l'étude de Scholwin et al. (2006) sur le bilan environnemental de la valorisation du biogaz issu de matières premières renouvelables à partir d'une analyse de cycle de vie, les chercheurs ont choisi d'étudier dans le cas de la méthanisation de cultures seules une rotation diversifiée (maïs-ensilage/orge d'hiver avec culture intercalaire de trèfle et de graminées/mélange de trèfle et graminées). Deux raisons majeures de ce choix sont avancées par Scholwin et al. : d'une part la rotation est applicable à la majeure partie du territoire allemand et d'autre part elle garantit la présence d'une couverture végétale tout au long de l'année ce qui permet une exploitation maximale de la période de végétation et une réduction des impacts négatifs sur l'environnement. Les auteurs mettent en avant l'effet de l'alternance des cultures sur la réduction de la pression pathogène et parasitaire et la diminution consécutive du recours aux pesticides. Les auteurs ne souhaitent pas étudier le cas d'une monoculture de maïs, qui existe en pratique, en raison de ses conséquences négatives en termes de risque pathogène et parasitaire et de bilan humique.

Des éléments spécifiques aux cultures intermédiaires sont présentés dans le chapitre suivant.

L'analyse bibliographique met en évidence, entre autres, les effets environnementaux négatifs d'une utilisation intensive d'intrants chimiques (lessivage des nitrates, perte de biodiversité, contamination des cours d'eau, etc.), d'une mécanisation intensive (tassement du sol) et de la monoculture. La littérature démontre en revanche les effets positifs des rotations (moindre utilisation d'intrants chimiques, amélioration de la qualité des sols, de la biodiversité, etc.) et des éléments fixes du paysage (biodiversité et paysage).

2.5.1.2 Effets environnementaux des différents groupes de cultures

Les cultures arables ont des caractéristiques propres qui leur confèrent des impacts potentiels sur l'environnement différents : période et longueur du cycle cultural, exigences de la culture en eau, en engrais, sensibilité aux maladies (qui induit un usage plus ou moins important de pesticides), diversité génétique au sein de la plante, fonction écologique (refuge, source de nourriture). Certaines ont ainsi des impacts environnementaux plus négatifs a priori que d'autres : c'est le cas en particulier du maïs, (et dans une moindre mesure du colza) qui est une culture très exigeante en eau, engrais et produits phytosanitaires (herbicides notamment) et qui laisse les sols nus en hiver dans la plupart des systèmes de culture européens.

❖ *Maïs et sorgho*

Le maïs et le sorgho sont deux cultures d'été, qui cultivées en monoculture laissant les sols nus en hiver ce qui augmente le risque d'érosion des sols et de lessivage des nitrates (Böhmel, 2007 ; Poux, 2000 ; Agrocampus-CEVA, 2006 ; Boatmann et al., 1999).

Xavier Poux (2000) a évalué l'impact environnemental de la culture de maïs en Europe. Les résultats de l'étude montrent que plusieurs caractéristiques de la culture de maïs grain sont associées à des risques environnementaux forts (à nuancer selon les systèmes de culture) :

- la culture du maïs laisse les sols nus en hiver (la récolte est souvent trop tardive pour planter une culture d'hiver après un maïs) : cela est d'autant plus problématique que les successions maïs-maïs sont fréquentes et se situent souvent sur des terrains hydromorphes particulièrement sensibles sur le plan environnemental,
- la culture de maïs est fortement irriguée d'où une pression importante sur les ressources en eau ; de plus, l'irrigation s'accompagne souvent d'une utilisation accrue d'engrais et de pesticides d'où des risques de pollution de l'eau,
- les pratiques de fertilisation azotée sont souvent excédentaires,
- les pratiques de protection de la culture préventives et systématiques contre les insectes et les adventices, avec utilisation de produits à forts coefficients d'entraînement dans les eaux et dans les airs sont fréquentes.

La culture de maïs ensilage, utilisé en co-digestion, est toutefois moins intensive que la culture de maïs-grain avec notamment une pression phytosanitaire moindre. Malgré cela, les impacts environnementaux du maïs-fourrage sont très négatifs comparés à ceux des systèmes herbagers au détriment desquels il se développe :

- le remplacement de prairies naturelles et semi-naturelles par le maïs ensilage entraîne une destruction d'habitats difficilement réversible qui affecte la faune et la flore. Par rapport aux prairies cultivées, les effets sur la biodiversité sont toutefois moins nets ;
- la mécanisation liée à la culture de maïs peut s'accompagner d'une réduction des infrastructures écologiques ;
- le retournement des prairies peut libérer de fortes quantités d'azote dans le milieu et supprimer l'effet "tampon" des prairies dans l'écoulement des eaux ;
- le retournement des prairies peut conduire à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre en particulier parce qu'il correspond à un destockage rapide de carbone ;
- de façon plus globale, la culture de maïs est plus polluante que les prairies naturelles, mais aussi que les prairies cultivées du fait des sols nus en hiver et des apports de produits phytosanitaires.

En termes d'impact sur la biodiversité, on peut supposer que la culture de maïs utilisant beaucoup de pesticides a des impacts négatifs sur la biodiversité. Cependant, Poux souligne que de nombreuses études sur la biodiversité considèrent les cultures arables dans leur ensemble sans que le maïs ne ressorte (par exemple MATE, 1998). Il n'est donc pas acquis que la culture de maïs soit en elle-même plus dommageable pour la biodiversité que les autres cultures arables.

(Source : Poux, X., 2000, Evaluation de l'impact environnemental de la culture de maïs en Europe.)

Peu d'études ont été identifiées sur l'impact environnemental du sorgho en France ou en Europe, où il s'agit d'une culture peu développée encore. On peut cependant dire que sorgho est une plante qui résiste mieux à la sécheresse que le maïs (Strauss (coord.), 2008 ; Agrice, 1998 pour l'ADEME et l'ITCF) et a de faibles besoins en azote (Chambre d'agriculture de la Charente, non daté ; Agrice, 1998). Il pourrait donc avoir des impacts environnementaux moindres que le maïs.

❖ *Oléagineux : colza et tournesol*

Le colza et le tournesol sont en général placés en tête de rotation devant une céréale (Guilleman et de Tourdonnet, 2003). Il s'agit de deux espèces très différentes en premier lieu par rapport à la longueur de leur cycle cultural, le colza étant généralement cultivé sur un cycle très long (planté en août et récolté en juillet)⁷ permettant une couverture de sol en hiver tandis que le tournesol est une culture d'été, avec un semis en avril et une récolte en septembre (Prolea-CETIOM).

Le principal inconvénient du tournesol d'un point de vue environnemental est lié à la longue durée d'interculture, pendant la période hivernale notamment, qui précède son implantation car le précédent du tournesol est en général un blé : sans culture intermédiaire, les risques de ruissellement, d'érosion des sols et de lessivage des nitrates vers les nappes phréatiques sont donc importants. En revanche, le sol est rarement nu l'hiver suivant le tournesol. D'autre part, le tournesol est une culture rustique, peu exigeante en eau en raison de ses besoins modérés (420mm d'eau en moyenne) et des performances élevées de son appareil racinaire pivotant qui exploite les ressources hydriques disponibles dans chaque horizon du sol jusqu'à 2m (sans obstacle). C'est aussi une culture peu exigeante en azote grâce à son enracinement profond et dont la fertilisation azotée peut être facilement raisonnée. De plus, les traitements phytosanitaires nécessaires sont relativement modérés.

Par ailleurs, le tournesol peut être favorable à la biodiversité. Le genre *Helianthus*, auquel il appartient possède de très nombreuses espèces sauvages apparentées, qui constituent une grande source de diversité génétique. De plus, le tournesol est une plante mellifère majeure ; en outre, pendant la phase végétative ses feuilles abritent une faune très diversifiée, composée d'insectes ravageurs et d'auxiliaires participant à leur régulation. Le tournesol est un refuge pour des espèces dont l'essentiel du cycle de développement se fait sur d'autres plantes. La plante est particulièrement appréciée des oiseaux en automne, car elle offre une réserve de nourriture disponible à une époque où les autres sources se raréfient. Elle a aussi un effet positif sur le paysage au moment de la floraison (Source : CETIOM, AMSOL-Prolea).

A l'inverse du tournesol, le cycle long du colza (10 à 11 mois) constitue le principal avantage de la culture d'un point de vue environnemental car il assure une couverture du sol sur presque toute l'année et en particulier pendant la période hivernale (PROLEA et AMSOL, juillet 2001). De plus, s'il est semé suffisamment tôt, le colza peut mobiliser des quantités importantes d'azote à l'automne et durant l'hiver (jusqu'à plus de 100 unités d'azote à la fin de l'automne), ce qui peut contribuer à limiter pertes de nitrates par lessivage (CETIOM). Ainsi, Toniolo et Mosca (2001, in DEIAgra, 2006) montrent que le colza d'hiver peut absorber 20 à 30 % plus d'azote que le blé, en raison de cette forte capacité de mobilisation des nitrates présents dans le sol. Le maintien des repousses de colza en été, même pendant une période courte, présente les mêmes intérêts : éviter la pollution des nappes phréatiques et réduire significativement les risques de lessivage hivernal de la culture suivante. De ce fait, le colza est parfois cultivé pour sa capacité à valoriser les effluents d'élevages hors-sol (source : Yara). Outre ses impacts positifs liés à la couverture du sol en hiver, la culture de colza peut avoir des effets positifs sur la structure des sols grâce à son système racinaire pivotant capable de s'enfoncer profondément (remontée en surface des éléments minéraux comme les nitrates, macroporosités, etc.). De plus, sa récolte se réalisant en période estivale, le risque de tassement des sols est amoindri (sols secs). La culture de colza d'hiver utilise aussi relativement peu d'eau, elle est bien adaptée aux sols à réserve en eau faible à moyenne) en raison de la précocité de son cycle végétatif qui lui permet de mettre en place son rendement avant la période estivale et de son système racinaire performant. Le colza de printemps est lui plus exigeant en eau. Dans des régions plus sèches, cette culture est susceptible d'entraîner une forte consommation d'eau. (CETIOM ; Prolea et AMSOL)

Les impacts environnementaux négatifs de la culture de colza sont principalement liés à l'utilisation importantes de pesticides (herbicides et insecticides surtout mais aussi fongicides). Le colza (très exigeant en azote) souffre notamment de la concurrence des mauvaises herbes, en particulier des graminées, qui consomment beaucoup d'azote d'où la nécessité des traitements herbicides (CETIOM). En France, le développement de la culture du colza a notamment entraîné un usage accru de la trifluraline, principal herbicide de cette culture (Malterre et Schiavon, 1997). Cette molécule active présente des profils toxicologiques très défavorables, que cela soit pour l'homme ou pour l'environnement : elle est classée Xi et N (Dangereux pour l'Environnement) et signalée comme étant spécialement dangereuse pour les poissons (Guide ACTA 2004). Les phrases de risque R50/53 déclarent qu'elle est "*Très toxique pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique*".

⁷ Il existe également des variétés fourragères, à croissance rapide, utilisées en culture dérobée pour l'affouragement en vert, le pâturage ou l'ensilage; ou pouvant servir d'engrais vert. Les surfaces en colza fourrager sont néanmoins faibles (environ 50 000 hectares en France en 1995). Source : INAP-G Département AGER (Guilleman et de Tourdonnet), 2003

(Phyt'Eauvergne, 2004). Les résultats des expérimentations menées par Malterre montrent cependant que les risques de contamination des eaux par la trifluraline sont faibles. En revanche, le tébutame et le métazachlore, deux autres herbicides du colza sont entraînés par les eaux de drainage et de ruissellement.

❖ *Céréales à paille*

Les effets environnementaux des céréales à paille sont très variés selon les systèmes de culture et la conduite de la culture (monoculture, mise en place de rotations diversifiées à deux récoltes dans l'année par exemple, irrigation, usage d'engrais et pesticides, etc.). Néanmoins on peut distinguer des espèces plus rustiques que d'autres (par exemple le seigle ou le triticale par rapport au blé ou à l'orge) qui permettent de limiter l'utilisation d'eau, d'engrais et/ou de pesticides, des céréales de printemps versus des céréales d'hiver, des espèces pures versus des mélanges d'espèces.

Ainsi, d'après l'INRA, la résistance du triticale vis-à-vis des maladies (du feuillage notamment) permet une utilisation moindre de fongicides et en fait une culture plus respectueuse de l'environnement (un seul fongicide bien positionné suffit généralement) que l'orge ou le blé.

Par ailleurs, les céréales de printemps et les céréales d'hiver n'entrent en général pas dans les mêmes types de systèmes de culture. Les céréales de printemps sont généralement cultivées au sein de rotations plus longues et plus diversifiées avec les avantages environnementaux que cela comporte. Les avantages du système à deux cultures récoltées par an ont été mis en avant dans le projet EVA I (Strauss (coord.) 2008).

Dans ce même projet les chercheurs mettent aussi en avant les effets positifs de la culture d'espèces mélangées sur l'environnement. Le mélange de variétés (céréales, protéagineux, oléagineux) devrait en effet limiter la propagation des ravageurs et autres agents pathogènes et en tirant parti des différentes capacités d'adaptation des espèces aux conditions environnementales. Pour les céréales aussi, les mélanges de variétés pourraient avoir des effets positifs sur l'environnement en limitant le développement des maladies foliaires ce qui permettrait de réduire l'usage de pesticides. Le dernier Dossier de l'environnement de l'INRA n° 30 (Vallavieille-Pope et al. 2006) est en partie consacré aux associations de variétés. Il présente différents cas pratiques d'associations de variétés : d'orge de printemps au Danemark et en Allemagne de l'Est à l'époque du rideau de fer, de céréales en Pologne, etc. En Pologne, où 22 % des céréales cultivées sont des mélanges de variétés, seules les semences sont traitées avec des fongicides, il n'y a pas de traitement en cours de végétation. En Allemagne, la culture de variétés associées d'orge de printemps imposée par le gouvernement communiste avait permis de faire régresser l'incidence de l'oïdium de 50 % à moins de 10 % ce qui a permis une réduction massive de l'utilisation de fongicides. Depuis la réunification et le retour de la culture monovariétale, l'utilisation de fongicides s'est à nouveau accrue. En France, certains agriculteurs utilisent des associations de variétés de blé mais cela reste marginal. L'INRA a par ailleurs expérimenté des associations de variétés de blé sur un réseau de parcelles dans un système de culture de protection intégrée, visant à réduire les intrants de 30 % par rapport aux pratiques intensives (Meynard et al., 2003 dans Vallavieille-Pope et al. 2006), avec en particulier un seul traitement fongicide sur la majorité des parcelles (au total 28 essais d'associations variétales et des 4 cultures monovariétales correspondantes, soit 250 ha ont été suivis au cours de trois années dans une dizaine d'exploitation). Les résultats ont montré que l'association variétale est plus efficace que la moyenne des quatre cultures monovariétales correspondantes (Belhaj Fraj, 2003 dans Vallavieille-Pope et al. 2006) sur la sévérité des principales maladies (et également le rendement et la qualité de la récolte).

❖ *Protéagineux*

Dans leur étude sur les effets environnementaux de l'introduction de protéagineux dans les rotations de grandes cultures, Carrouée et al. (2002) ont étudié l'impact des protéagineux sur l'eutrophisation des eaux (liée à un surplus d'éléments nutritifs, en particulier l'azote et le phosphate, dans l'eau) et aboutissent aux résultats suivants. Les protéagineux, en particulier les protéagineux de printemps, du fait de leur cycle court calé sur le printemps, ont a priori un impact négatif sur les risques de pertes en azote et en phosphates si le sol est nu durant l'interculture, ce qui est fréquemment le cas en pratique dans les systèmes de culture en France. Cependant, il est relativement aisé de maintenir un couvert végétal hivernal dans les rotations intégrant des protéagineux, soit en laissant les repousses de la culture précédente jusqu'à l'entrée de l'hiver avant un protéagineux de printemps, soit en mettant en place une culture intermédiaire, par exemple de la moutarde après du pois.

Carrouée et al. (2002) ont comparé les reliquats entrée hiver et donc les risques de fuite en nitrates après différentes cultures dans le bassin parisien, en France. Il en ressort que les risques de pertes en nitrates, en l'absence de cultures intermédiaires piège à nitrates (CIPAN), sont en moyenne semblables après du pois,

du maïs, du colza et de la pomme de terre et plus élevés pour ces cultures que pour la betterave ou des céréales à paille.

D'après l'étude de Carrouée et al., les protéagineux en tant que tels ont peu d'impact sur la teneur en matière organique, l'état structural et la conservation des sols. En revanche, l'introduction de protéagineux dans les rotations a, a priori, un impact positif sur la réduction de l'acidification des sols, car ils devraient permettre de réduire les émissions d'oxydes de soufre, d'ammoniac et d'oxydes d'azote responsables de l'acidification. Mais Carrouée et al. restent prudents dans l'attente d'autres résultats d'études scientifiques.

Les protéagineux en général, et le pois en particulier, consomment relativement peu d'eau. Ceci s'explique par leur cycle végétatif court et calé sur la période du printemps et par leur fort indice de récolte (forte proportion de graines par rapport à la biomasse totale de la culture). Par exemple, dans le sud de la France la quantité d'eau totale consommée par un pois s'établit en moyenne à 300 L/m² contre 450 pour un soja et 500 pour un maïs lorsque l'eau n'est pas limitante. De plus, la période de forts besoins en eau des protéagineux se situant en mai-juin, les quantités d'eau apportées dans les systèmes irrigués sont beaucoup plus faibles que pour les cultures d'été comme le maïs ou le soja : en moyenne 60 l/m² dans les secteurs irrigués en France.

Carrouée et al. (2002) notent par ailleurs un aspect visuel intéressant du lupin avec ses inflorescences bleues visibles, et le cas de la féverole, une des rares cultures de plein champ à dégager un parfum agréable.

❖ *Cultures industrielles : betteraves à sucre et pommes de terre*

La betterave à sucre et la pomme de terre sont cultivées en tête de rotation, ce sont de bons précédents culturaux qui retournent une partie de la matière organique constituée via les fanes. Ces deux cultures diversifient les rotations, céréalières en particulier, et constituent des "break crops", des cultures nettoyantes qui créent une rupture du cycle des parasites, maladies et mauvaises herbes et limite l'utilisation des produits phytosanitaires sur les cultures suivantes, en particulier dans les successions très centrées sur le blé, réduisant ainsi les impacts environnementaux des cultures (cf. les avantages environnementaux des rotations § 2.5.1.1.).

D'après Renwick (2005) et Boatman et al. (1999), les principales problématiques environnementales liées aux cultures de betteraves et de pommes de terre sont l'érosion des sols par l'arrachage mécanique lors de la récolte (érosion hydrique et éolienne), la compaction des sols liée à la mécanisation (de la récolte en particulier), l'application d'engrais et de produits phytosanitaires. Concernant les problèmes d'érosion des sols, le développement significatif des cultures intermédiaires (plus de la moitié des surfaces en betteraves sont précédées par une culture intermédiaire en 2006 d'après l'enquête sur les pratiques culturales). En termes de fertilisation, les apports d'engrais sur la betterave sont relativement faibles comparés à d'autres cultures conventionnelles. La culture de betteraves est très sensible aux adventices et nécessite une protection phytosanitaire importante (source : Institut technique de la betterave). De même, la pomme de terre est l'une des cultures qui nécessitent le plus de pesticides (fongicides en particulier). Concernant la consommation en eau, la betterave a des besoins en eau modérés tandis que la pomme de terre a des besoins en eau plus élevés.

❖ *Prairies permanentes/temporaires*

Plusieurs études scientifiques ont mis en évidence les effets positifs des prairies sur l'érosion des sols et le ruissellement (Fullen, 1998 ; Souchère et al. 2003 ; Chisci et Boschi, 1988) surtout pour les prairies permanentes et les prairies temporaires de longue durée (Jankauskas et Jankauskiene, 2003). La littérature indique aussi des effets positifs des prairies sur la qualité de l'eau (Andersen, Primdahl et Solvang, 1998), en particulier les prairies extensives où peu de traitements (fertilisation et protection phytosanitaire) sont appliqués. Les prairies peuvent aussi avoir un effet positif sur la biodiversité (Branciforti et Muller 2003, Cole et al. 2002) et le paysage (Hanley N., Whitby M., Simpson I., 1999).

❖ *Bandes enherbées*

De nombreuses études existent sur les effets environnementaux des bandes enherbées, et montrent qu'elles constituent dans certaines conditions des pratiques efficaces notamment pour limiter le ruissellement et l'entraînement des particules de sol (érosion hydrique) et des produits phytosanitaires. Au Royaume Uni, plusieurs études ont mis en évidence une limitation du ruissellement et du transfert de pesticides par les dispositifs enherbés (Patty, Real et Gril, 1997 ; Parsons et al., 1991).

Une étude néerlandaise (van Dijk et al., 1996) sur des sols loessiques en pente dans le Sud du Limburg a démontré l'efficacité des bandes enherbées pour filtrer les sédiments du ruissellement si le flux d'eau n'est pas trop puissant. Les auteurs décrivent les concentrations de sédiments dans l'efflux comme une fonction des concentrations de l'afflux et de la largeur des bandes. En France, une étude expérimentale sur l'influence de bandes enherbées implantées à l'aval d'une parcelle de blé (Lecomte, 1999) montre que sous pluies naturelles une bande enherbée de 6 m permet de réduire les pertes par ruissellement de deux produits phytosanitaires, l'Isoproturon et de pour le Diflufenicanil (respectivement de 76 et 60 % la première année et de 97 et 95 % la deuxième année) avec des variations selon les événements pluvieux. De plus, les analyses de sol prélevé révèlent que les résidus d'IPU et de DFF piégés au cours de quatre campagnes d'étude (Patty, 1997) sont fortement dégradés au sein de la bande enherbée. Un projet d'ARVALIS a testé l'effet des bandes enherbées de largeurs différentes le long de cultures alternant Maïs/Blé ou Pois/Blé sur le ruissellement et les flux de produits phytosanitaires. Les résultats montrent qu'une bande enherbée de 6m de largeur est efficace sur les flux de produits sanitaires interceptés (réduction de 87 % pour les bandes de 6 m), les concentrations en produits (71 %) et sur les volumes d'eau ruisselée (62 %). Des études complémentaires (Vidon P, 1997) ont montré que les bandes enherbées étaient un milieu particulièrement favorable à la rétention et à la dégradation des matières actives (efficacité trois fois supérieure de l'horizon superficiel par rapport à la capacité du même horizon situé en amont). Ce projet souligne également les limites des systèmes de bandes enherbées qui ne traitent que les flux de matière transportés par le ruissellement. Par exemple en situation topographique plane ou à faible pente, où l'essentiel des flux hydriques est vertical, les bandes enherbées n'ont que très peu d'effets. Par contre, installées sur des sols imperméables et/ou de forte pente, elles jouent pleinement leur rôle. La continuité du réseau de bandes enherbées est également un paramètre très important.

Dans le bassin versant céréalier d'Auradé, dans le Gers, France, une étude (Bourgouin et Konlein, 1996) a comparé sur de nombreuses années, les concentrations en matières actives amont et aval des eaux de ruissellement des parcelles avec différents dispositifs de bandes enherbées (de différentes largeurs, sur différentes pentes). Sur l'ensemble des épisodes pluvieux entre 1994 et 1995, 18 cas montrent une différence de concentration amont-aval supérieure à 0,50 µg/L. Les concentrations en amont sont 17 fois sur 18 supérieures à celles mesurées en aval, ce qui démontre le rôle des bandes enherbées situées en aval des parcelles dans la limitation des transferts des produits phytosanitaires suite au ruissellement superficiel. De plus, l'étude montre que les molécules interceptées par la bande enherbée ne s'accumulent pas dans le sol mais sont rapidement dégradées.

❖ *Cultures dérobées*

Au-delà des impacts liés à la diversification des rotations qu'elle entraîne, la mise en place de cultures intermédiaires, et tout particulièrement des CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrates) a un intérêt démontré en premier lieu pour limiter le lessivage des nitrates (Besnard et al., 2000 ; Comifer, 2002 ; Briffon et Aubrion, 1998 ; Koller, rapport final du projet ITADA 1996-1999) et le risque d'érosion des sols (Kwaad, Van der Zijp et Van Dijk 1998, LFL 2004 ; Chambers et al. 1992 dans Boatman et al. 1999).

Les résultats des expérimentations du projet allemand EVA I (Strauss, 2008) montrent qu'en termes de bilan humique, la mise en place de cultures intermédiaires est favorable. Elle réduit l'effet de dégradation de l'humus par les cultures principales mais ne suffit pas à compenser l'effet d'appauvrissement de certaines cultures étudiées - maïs et sorgho du Soudan. Par ailleurs, les expérimentations montrent que les bilans humiques des cinq rotations étudiées sur l'ensemble de l'Allemagne sont négatifs, excepté avec épandage des digestats qui permet d'avoir des bilans positifs, quoique variables selon les rendements, les précipitations et la qualité des sols (Ackerzahl). Le retour des digestats dans la rotation apparaît donc intéressant pour le bilan humique. Cependant, le digestat contient une proportion d'azote organique lié dont on ne peut pas prévoir quand il va être minéralisé et qui peut contribuer aux pertes d'azote par lessivage ou volatilisation. Les chercheurs conseillent donc de mettre en place des cultures intermédiaires pour capter l'azote provenant du digestat après minéralisation.

La mise en place de cultures intermédiaires peut aussi avoir des impacts positifs sur la biodiversité et sur la qualité de l'air (Greenotec, non daté et OCDE, 2002).

❖ *Cultures pluriannuelles (herbacées) et pérennes (ligneuses)*

Les cultures pluriannuelles et pérennes constituent un couvert végétal tout au long de l'année et permettent ainsi de lutter efficacement contre l'érosion des sols.

L'analyse met en évidence l'intérêt des rotations et des cultures dérobées sur le plan environnemental, en particulier par le maintien d'un couvert végétal (surtout en hiver) qui permet, entre autres, de limiter le ruissellement et l'érosion des sols et réduire le risque de lessivage des nitrates et la présence des bandes enherbées qui ont pour effet de limiter le ruissellement et l'entraînement des particules de sol (érosion hydrique) et des produits phytosanitaires.

Le travail d'inventaire des cultures utilisables en co-digestion et d'analyse de leurs avantages/inconvénients sur le plan technique et environnemental présenté ci-dessus constitue d'une part un résultat de l'étude et d'autre part un travail préalable à la réalisation des simulations de bilans économique, énergétique, de GES et environnemental. Il a contribué à arrêter une liste de cultures étudiées dans les simulations.

3. Résultats des simulations : économiques, énergétiques, émissions de gaz à effet de serre, environnementaux, concurrence avec l'alimentaire

3.1 Principe retenu pour les simulations de production de biomasse végétale destinée à la méthanisation

Dans chaque simulation, la culture étudiée a été considérée dans le cadre d'une succession de deux cycles de production végétale. Ainsi la simulation ne se rapporte pas à une culture en général mais à la culture dans le cycle considéré. Il peut s'agir d'une simulation dans le cadre d'une monoculture (exemple : maïs/maïs) ou bien dans le cadre d'une rotation culturale (par exemple : sorgho/blé).

Normalement, ce principe que nous avons retenu pour les simulations permet de prendre en compte l'influence de la rotation, laquelle peut être largement significative, sur les itinéraires techniques de production et les rendements.

Cela peut influencer en particulier sur le bilan environnemental mais également sur la performance énergétique et économique dans la mesure où selon le système de production considéré les rendements de biomasse peuvent être profondément modifiés. Donnons quelques exemples en illustration.

La mise en place d'une culture intermédiaire va fortement dépendre de la rotation dans laquelle elle se situe. Derrière un blé, les conditions d'obtention de biomasse vont être très fortement tributaires de la qualité d'implantation de la culture (salissures, structure du sol...) et des conditions climatiques (eau, chaleur). Ainsi si on destine une culture en dérobée à la méthanisation, on va être tributaire de ces facteurs. Il se peut qu'une année de chaleur le rendement en biomasse soit très faible (<2 tMS/ha) avec un potentiel méthane dégradé du fait des stress supportés par la plante.

Sur le même principe, derrière un maïs il faudra choisir une culture intercalaire parfaitement adaptée au sol et au climat (attention aux espèces gélives). Le risque étant de limiter la récolte de biomasse au printemps en raison de conditions hivernales difficiles ou d'incapacité à récolte dans les champs (sol non ressuyés).

De même l'itinéraire d'implantation d'une culture va dépendre du précédent réalisé. Ce dernier influence directement le coût d'implantation et le rendement possible de la culture. Cette méthode permet de s'approcher le plus précisément possible du système d'exploitation et de production agricole.

Ainsi toutes les simulations réalisées permettent de prendre en compte le type de système cultural et les rotations éventuelles. L'outil tableur est suffisamment détaillé pour que l'opérateur puisse renseigner le plus précisément possible le scénario de production.

Notons que dans le cadre de notre travail, il n'a pas été facile de disposer de données suffisamment précises sur les itinéraires techniques de production. Nous avons en effet constaté un manque de données accessibles et partagées par le monde agricole. Nous avons cependant retenu des ITK les plus proches possibles des scénarios simulés. La sensibilité permise par l'outil de simulation n'a pu certainement pas être exploité suffisamment afin de mesurer des influences liées au schéma de production de cultures végétales.

Signalons que de multiples contacts ont été pris dans le cadre de cette étude avec les principales structures d'étude et d'appui technique aux productions végétales agricoles (réseau des chambres d'agriculture à l'échelle départementale et régionale, ARVALIS – Institut du végétal, unités de recherche INRA...). Malgré nos relances et notre volonté de transparence sur les données collectées, nous n'avons pas eu de réponse favorable à notre demande. Dès lors on peut penser que soit les données techniques n'existent pas, soit elles sont gardées par les structures dont l'objet est de produire et diffuser de la donnée technique. Partant de ce constat nous avons cependant élaboré un outil de calcul qui prend en compte les différents postes de l'itinéraire technique d'implantation d'une culture ; ainsi un opérateur disposant de données spécifique à l'implantation d'une culture donnée dans un contexte pédoclimatique particulier pourra réaliser une simulation adaptée.

3.2 Sélection des cultures et des paramètres de simulations

Parmi l'ensemble des cultures identifiées dans la bibliographie et auxquelles on se réfère dans la première partie, nous proposons de retenir les cultures les plus pertinentes pour en faire des analyses plus détaillées dans les phases 2 à 5.

Pour faire ce choix de cultures, nous avons pris en compte :

- la volonté de l'ADEME de mettre en avant les bandes enherbées, les cultures dérobées et les prairies,
- l'intérêt des cultures pour la méthanisation (avantages/inconvénients) d'après la bibliographie. La bibliographie collectée pour construire la première partie montre que certaines cultures ont peu d'intérêt pour la production de biogaz (soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons économiques),
- la disponibilité de données, sur les techniques culturales et surtout sur le potentiel méthanogène des cultures.

A partir de l'inventaire réalisé et des orientations souhaitées par l'ADEME, nous avons retenu un nombre limité de cultures et de rotation que l'on peut classer en trois grandes catégories :

- Les couverts environnementaux

Les simulations ont porté sur les bandes enherbées et les prairies comme exemples de couverts environnementaux. Ces éléments jouent un rôle important d'un point de vue bilan environnemental. Pour les bandes enherbées, nous avons choisi d'effectuer une simulation avec du Ray-grass italien pur, bien que les mélanges graminées-légumineuses soient souvent conseillés, par souci de cohérence avec les données disponibles sur les rendements agronomiques et énergétiques (se référant à une seule espèce). Sur le plan de la production de matière première, on peut parler de « biomasse fatale » dans la mesure où la culture est en place et n'a pas pour vocation à être récoltée (juste coupée pour les bandes enherbées et habituellement pâturée dans le cas des prairies). Ainsi on peut considérer que de l'herbe récupérée en bord de route peut rentrer dans cette catégorie.

- Les cultures dérobées :

Pour les cultures dérobées, étant donné la diversité des cultures possibles, plusieurs simulations ont été réalisées. Un des principaux critères de sélection de ces cultures a été la disponibilité de données relatives aux résultats expérimentaux de la méthanisation de ces cultures et aux rendements agronomiques. Les espèces suivantes ont été retenues : Trèfle incarnat et Avoine diploïde. Une nouvelle fois, les associations peuvent être préconisées mais dans le cadre de cette étude, seules des cultures pures ont été considérées.

- Les cultures « conventionnelles » :

Pour les cultures dites conventionnelles, l'objectif étant de les comparer, les simulations s'appliquent à l'utilisation en co-digestion d'une seule espèce. Les cultures sélectionnées sont le maïs fourrage, le sorgho grain, le sorgho biomasse, le blé et le triticale. Maïs et sorgho pourront être comparés deux à deux car ils peuvent se substituer notamment dans les régions les plus sèches où le sorgho peut être mieux adapté (meilleure résistance à la sécheresse). De même pour le blé et le triticale qui peuvent aussi se substituer, le triticale étant une culture plus rustique que le blé. Pour le maïs, plusieurs cas ont été considérés à titre d'exemple : maïs cultivé en sec versus maïs irrigué (dans les deux cas en succession maïs/maïs) pour analyser l'impact de l'irrigation, et succession maïs/maïs sans culture dérobée (Ray-grass italien) versus maïs/maïs avec RGI pour analyser l'impact de l'utilisation d'une culture dérobée avec le maïs. Ces deux comparaisons nous paraissent intéressantes à étudier, en particulier sur le maïs qui demande beaucoup d'eau et est une culture de printemps qui en succession monoculturelle laisse donc le sol nu en période hivernale. Il faut noter que pour comparer maïs sec et irrigué, seul le paramètre irrigation a été modifié pour faciliter la comparaison mais dans la réalité, les apports d'azote sont souvent plus importants en systèmes irrigués.

Il est important de préciser que le choix des cultures a aussi reposé sur la possibilité de récupérer des données sur les itinéraires techniques mais aussi sur les potentiels de production de méthane. Sur ce dernier point signalons qu'il y a dans la littérature beaucoup de données relatives aux cultures dites conventionnelles et particulier sur le maïs puisque c'est la culture dominante des installations de méthanisation de l'Europe du Nord. Quelques articles relatent des essais de potentiel méthane selon différents itinéraires techniques agricoles et selon les conditions pédoclimatiques. Ces données restent relativement confidentielles et difficilement exploitables dans le cadre de notre étude.

Par ailleurs il est également important de signaler que nous n'avons pas trouvé de données sur le potentiel méthane des différentes espèces préconisées généralement en culture dérobées.

Il existe des initiatives sur le territoire national pour recueillir les premières données mais elles ne sont pas à l'heure actuelle ni disponibles, ni exploitables pour notre étude. Il y a un manque de données sur l'intérêt des cultures dérobées en production de biogaz.

Enfin étant donné que les cultures dédiées à la production de biogaz sont encore au stade expérimental, il a été décidé de ne regarder que le cas du sorgho biomasse dans les simulations (sachant que cette plante peut aussi entrer dans d'autres voies biomasse-énergie).

A partir des données disponibles dans la littérature, nous avons élaboré une base de données cultures qui regroupe les informations nécessaires pour la réalisation des différentes simulations. Cette base regroupe les informations suivantes : matière sèche, matière organique, rendements (mini et maxi), potentiel méthane et calcul de la productivité en méthane à l'hectare. Le tableau suivant présente cette base de données.

Pour l'ensemble des cultures introduites en méthanisation, le mode de stockage qui a été retenu est l'ensilage de plante entière. Cette technique de conservation est largement utilisée sur les unités de méthanisation en Allemagne pour conserver le maïs avant introduction dans les digesteurs. L'ensilage permet une pré-hydrolyse de la matière végétale avec production d'acides (notamment lactique et acétique) qui abaissent le pH du milieu pour permettre un arrêt de la dégradation de la matière organique. Ce produit peut ensuite être utilisé tout au long de l'année pour alimenter un digesteur. Des essais ont montré que la conservation par ensilage n'entraînait pas une perte du potentiel méthane (dans la mesure où l'ensilage est réalisé dans les règles de l'art). Dans le cadre de cette étude il nous semble que la technique d'ensilage est la plus appropriée pour le stockage et l'utilisation étalée de la culture en alimentation quotidienne de l'unité de méthanisation.

Tableau 4 : Base de données cultures

culture	MS	MO		N	RENDEMENT		POTENTIEL METHANE		PRODUCTIVITE METHANE		Catégorie
		%MB	%MS		MIN tMS/ha	MAX tMS/ha	Nm3CH4/tMO	Nm3CH4/tMB	MIN Nm3CH4/ha	MAX Nm3CH4/ha	
fane de betterave	13.0%	8.8%	68.0%	1.4	4	8	353	31.2	960	1920	autres matières premières végétales
trèfle (ensilé)	18.6%	16.6%	89.0%	2.3	6	8	352	58.3	1880	2506	prairies
prairie (ensilé)	21.0%	19.3%	92.0%	1.5	4	6	272	52.6	1001	1501	prairies
ray grass d'Italie (ensilé)	24.1%	21.9%	91.0%	1.3	6	8	409	89.7	2233	2978	prairies
ray gras d'Italie (vert)	24.0%	21.8%	91.0%	0.8	6	8	409	89.3	2233	2978	cultures intercalaires & couverts végétaux
sorgho grain	27.0%	25.4%	94.0%	3.2	9	11	372	94.4	3147	3846	sorgho
sorgho fourrager	28.0%	26.3%	94.0%	1.0	11	14	295	77.6	3050	3882	sorgho
maïs ensilage	30.0%	25.2%	84.0%	1.3	12	18	318	80.1	3203	4804	maïs
sorgho biomasse	30.1%	28.6%	95.0%	2.0	22	29	311	88.9	6500	8568	sorgho
luzerne (ensilé)	33.0%	29.0%	88.0%	4.4	11	16	340	98.7	3291	4787	prairies
trèfle (vert)	18.0%	16.0%	89.0%	2.5	6	8	313	50.1	1669	2225	cultures intercalaires & couverts végétaux
blé (vert)	37.0%	34.4%	93.0%	4.2	12	16	324	111.5	3616	4821	céréales à paille
orge (vert)	38.0%	35.3%	93.0%	1.1	9	13	356	125.8	2980	4304	céréales à paille
avoine diploïde	38.1%	35.4%	93.0%	4.0	10	14	356	126.1	3311	4635	cultures intercalaires & couverts végétaux
seigle	42.0%	39.9%	95.0%	7.6	8	10	313	124.7	2375	2969	céréales à paille
canne maïs	52.0%	47.3%	91.0%	0.03	6	9	173	81.9	945	1417	autres matières premières végétales
paille avoine	88.0%	80.1%	91.0%	0.03	6	8	262	209.4	1428	1904	autres matières premières végétales
paille blé	88.1%	81.1%	92.0%	0.03	8	10	245	198.6	1803	2254	autres matières premières végétales
triticale	87.0%	85.1%	97.8%	8.8	8	16	223	189.7	1745	3490	céréales à paille
Moha	nc	nc	nc	nc	3	6	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Trèfle incarnat	18.0%	1.0%	89.0%	nc	3.5	5.5	350	3.5	68	107	cultures intercalaires & couverts végétaux
Fénu grec fourrager	nc	nc	nc	nc	1.5	2.5	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Vesce	nc	nc	nc	nc	3	5	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Pois fourrager	nc	nc	nc	nc	3	5	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Moutarde blanche	nc	nc	nc	nc	2	4	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Colza fourrager	nc	nc	nc	nc	2	3	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Sarrasin	nc	nc	nc	nc	2	4	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Phacelie	nc	nc	nc	nc	2	4	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Nyger	nc	nc	nc	nc	2	5	nc	nc	nc	nc	cultures intercalaires & couverts végétaux
Paille colza	nc	nc	nc	nc	nc	nc	240	nc	nc	nc	autres matières premières végétales
Miscantus	45.0%	41.0%	91.0%	nc	15	20	201	82.3	2744	3658	autres matières premières végétales
Chanvre (broyé humide)	22.0%	18.9%	86.0%	nc	nc	nc	52	9.8	nc	nc	autres matières premières végétales
Canne de provence (sec)	97.9%	89.5%	91.4%	nc	20	25	169	151.2	3089	3862	autres matières premières végétales

sources : Caussade Semences, Ademe, ITCF, INRA

3.3 Méthode

3.3.1 *Méthode et indicateurs utilisés pour les bilans économique, énergétique, d'émissions de gaz à effet de serre, environnemental et l'analyse de la concurrence avec l'alimentaire*

3.3.1.1 Principe général et hypothèses retenues

Les hypothèses retenues pour la réalisation des différentes simulations concernent les aspects suivants :

- Un scénario de référence qui concerne la codigestion des résidus fermentescibles issus de l'exploitation agricole (effluents d'élevages notamment) et des déchets exogènes (de type agroalimentaire). Le scénario de référence concerne une exploitation agricole de type bovin lait.
- La surface agricole utilisée pour la production/récolte de biomasse végétale est identique pour tous les scénarios et de 20ha, excepté pour le scénario bande enherbées pour lequel une surface de 2ha a été considérée car cela n'avait pas de sens de simuler l'utilisation de 20ha de bande enherbée au niveau d'une exploitation.

De façon générale, les bilans ont été établis toujours par rapport à la situation de référence. Les bilans ne prennent en compte que l'incorporation des cultures en tant que co-substrats, et en particulier ils ne prennent pas en compte les résultats économiques/énergétiques/environnementaux de l'atelier d'élevage qui produit le lisier /fumier servant de base à l'activité de méthanisation.

3.3.1.2 Principaux indicateurs et méthode de mesure du bilan économique de la co-digestion de la culture

Les indicateurs économiques prennent en compte :

- les coûts de production agricole,
- les coûts de stockage,
- les coûts de transport,
- les coûts de méthanisation.

Les coûts de production agricole

Les coûts de production des cultures ont été analysés par hectare. Ils sont désagrégés ainsi :

1. *Coûts des intrants ou consommations intermédiaires*

Les coûts des intrants sont des coûts spécifiques à chaque culture. Ils ont été collectés sous la forme de coûts par hectare. Les principaux intrants ont été pris en compte :

- a. Semences,
- b. Engrais,
 - Azote (N)
 - Phosphore (P_2O_5)
 - Potasse (K_2O)
- c. Produits phytosanitaires,
- d. Eau,
- e. Autres (bâches pour la confection des silos couloirs).

2. Coût d'utilisation du matériel

Afin d'avoir une structure des coûts identiques pour chaque simulation, des opérations culturales types ont été prises en compte et des coûts moyens estimés ont été affecté à l'utilisation du matériel pour chacune de ces opérations. Ces coûts comprennent les coûts variables (carburants, lubrifiants, etc.) et les coûts fixes (amortissements), mais ne comprennent pas les coûts de main d'œuvre.

Les opérations culturales considérées sont les suivantes :

- a. Déchaumage,
- b. Labour,
- c. Roulage : les coûts du roulage pour l'herbe (prairie, bandes enherbées) et pour les autres cultures ont été distingués,
- d. Travail du sol superficiel,
- e. Semis (hors semis direct) : les coûts du semis pour l'herbe, les cultures dérobées et les autres cultures ont été distingués,
- f. Traitements phytosanitaires,
- g. Epandage d'engrais,
- h. Récolte et ensilage : les coûts de récolte et ensilage pour l'herbe et les autres cultures ont été distingués,
- i. Tassage du silo,
- j. Amortissement du silo.

3. Coût de la main d'œuvre avec un coût horaire estimé à 20 EUR/heure (source : BCMA et Fédération régionale Cuma Ouest).

Les coûts de transport

Les coûts de transport du champ vers le lieu de stockage sont compris dans les coûts de récolte. En revanche, le coût de transport des produits ensilés du lieu de stockage vers l'unité de méthanisation a été pris en compte séparément. A défaut d'autre valeur, nous avons estimé ce coût à partir du barème des frais kilométriques à 0,5 EUR/km.

3.3.1.3 Principaux indicateurs et méthode de mesure du bilan énergétique de la production de la culture en vue d'une utilisation en codigestion

A partir de l'itinéraire technique de la rotation culturale considérée, on s'est attaché à établir la dépense énergétique liée à la production de la biomasse destinée à la méthanisation. Le principe retenu n'est pas d'établir une analyse poussée du système de production mais de pouvoir élaborer des données liées à différents itinéraires de production. Ce bilan énergétique établi pour chaque production végétale n'est donc pertinent que dans une comparaison de scénarios entre eux.

Le bilan permet de calculer la dépense d'énergie fossile liée à la production de biomasse destinée à la méthanisation. Le module de calcul comprend deux postes : les intrants consommés dans la rotation et l'utilisation du matériel.

Le tableau suivant présente les données utilisées pour le calcul de la dépense énergétique liée à l'utilisation d'intrants.

Tableau 5 : Postes considérés pour établir la dépense d'énergie liée à l'utilisation d'intrants

Postes considérés	Unité	Contenu énergétique (en MJ/kg ou MJ/l)
Semences	Kg de semences	8
Fertilisation azotée	Kg d'unité fertilisante (UF)	52,62
Fertilisation phosphate	Kg d'unité fertilisante (UF)	15,55
Fertilisation potasse	Kg d'unité fertilisante (UF)	12,1
Traitements phytosanitaires	Kg de matière active	306
Irrigation	M ³ d'eau	0,014
Utilisation de plastique	Kg	92

Ces valeurs sont issues des bases de données disponibles avec les outils PLANETE et BILAN CARBONE.

Pour les travaux liés à l'installation, l'entretien et la récolte, la consommation énergétique est calculée à partir d'une donnée de consommation d'énergie fossile à l'hectare selon le type de travail. Les données sont exprimées en MJ/ha :

Déchaumage	610,5
Labour	1 424,5
Roulage	244,2
Travail du sol superficiel	407
Semis	325,6
Traitements phytosanitaires	203,5
Epandage d'engrais	162,8
Récolte (ensileuse)	4 860

Pour le transport le bilan tient compte de la distance parcourue (avec aller et retour) et du tonnage transporté pour apporter la récolte à l'installation de méthanisation. Nous avons retenu la valeur de 3,2 MJ/km.t issue des bases de données de l'outil PLANETE.

Enfin nous avons tenu compte de la confection du silo de stockage de la culture en prenant en calculant le nombre d'heure nécessaire et en affectant une consommation énergétique de 325,6 MJ/h (calculée à partir d'une consommation moyenne de gasoil d'un engin agricole de type tracteur (75CH) muni d'une fourche frontale ou chargeur télescopique (100CH).

Dans la feuille de calcul, le bilan des dépenses d'énergie fossile se réalise automatiquement à partir des données de l'itinéraire technique renseignées par l'utilisateur de l'outil de simulation.

Le bilan des dépenses d'énergie liées à la production de la matière première permet d'appréhender deux aspects :

- Le coût énergétique de la production de la culture : on peut ainsi appréhender la notion de dépense énergétique pour la production d'une tonne de matière sèche.
- L'efficacité énergétique (EE) qui permet d'appréhender la notion d'intérêt énergétique des différentes cultures par rapport à la dépense énergétique nécessaire pour les produire/ l'efficacité énergétique est calculée à partir du ratio suivant :

$$EE = \frac{\text{Energie primaire disponible issue de la méthanisation de la biomasse}}{\text{Energie fossile utilisée pour la production de biomasse}^1}$$

Signalons que plus ce rapport est élevé plus l'intérêt de la culture pour la production d'énergie en méthanisation est élevé ; il s'agit bien de disposer d'un indicateur d'efficacité énergétique.

¹ : *il s'agit de l'énergie fossile de l'itinéraire de production jusqu'au stockage de la culture sous forme d'ensilage. L'énergie fossile liée au fonctionnement de l'unité de méthanisation n'est pas prise en compte dans ce calcul. Ce choix s'explique en raison des nombreuses technologies disponibles et de la dimension des unités. Ce rapport pourra être calculé sur des cas réels de station ; il sera inévitablement inférieur aux valeurs calculées dans cette étude.*

3.3.1.4 Principaux indicateurs et méthode de mesure du bilan des émissions de gaz à effet de serre de la culture destinée à la co-digestion

De la même manière que pour établir un bilan énergétique, nous nous sommes attachés à réaliser un bilan simplifié des émissions de gaz à effet de serre. Dans cette partie l'objectif est d'établir un bilan simplifié dans un objectif de comparaison des différentes rotations retenues. A partir du renseignement de l'itinéraire technique de la rotation considérée, les différents postes d'émissions de GES sont pris en compte.

Selon le même principe que pour le calcul des dépenses d'énergie fossile, on établit les émissions de GES en considérant l'utilisation des intrants d'une part et l'utilisation des matériels d'autre part.

Le tableau suivant présente les données utilisées pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation d'intrants.

Tableau 6 : Postes considérés pour établir la dépense d'énergie liée à l'utilisation d'intrants

Postes considérés	Unité	Emissions (en kg equ. C/kg)
Semences	Kg de semences	0,23
Fertilisation azotée	Kg d'unité fertilisante (UF)	1,26
Fertilisation phosphate	Kg d'unité fertilisante (UF)	0,74
Fertilisation potasse	Kg d'unité fertilisante (UF)	0,19
Traitements phytosanitaires	Kg de matière active	2,5

Ces valeurs sont issues des bases de données disponibles avec l'outil BILAN CARBONE.

Pour les travaux liés à l'installation, l'entretien, la récolte, le transport et la confection du stockage (ensilage), les estimations d'émissions de GES sont basées sur la consommation de carburant liée à ces travaux. La valeur d'émission retenue correspond à celle du gasoil soit 0,803 kg eq.C/l.

Le bilan simplifié des émissions de GES permet d'appréhender un indicateur représentant les émissions nettes pour chaque culture. Cet indicateur est calculé en retranchant les émissions de GES évitées par la valorisation énergétique de la part de biogaz produit par la culture dans l'unité de méthanisation. L'estimation de ces émissions de GES évitées se base sur le mode calcul retenu dans le logiciel DIGES. On convient ainsi que le biogaz est valorisé en cogénération avec production d'électricité et valorisation d'une partie de la chaleur. Les coefficients utilisés pour effectuer ces calculs sont les suivants : 22,5 % de l'énergie primaire produite sont valorisés en électricité et 37,5 % de l'énergie primaire sont valorisés en chaleur.

3.3.1.5 Principaux indicateurs et méthode de mesure des effets environnementaux des cultures

L'objectif de cette phase est d'identifier les principaux effets environnementaux des cultures retenues dans la liste courte, mais également d'en faire une comparaison afin de tenter d'établir une classification de ces cultures au regard des différents paramètres environnementaux : surtout eau (qualité et quantité), sol et biodiversité.

La définition des indicateurs s'est appuyée sur des travaux précédemment menés par Oréade-Brèche sur les relations agriculture-environnement (évaluation de l'impact environnemental des mesures de la PAC relatives aux cultures arables : Alliance environnement, 2007 ; évaluation des mesures agro-environnementales en Europe, 2005). L'analyse des effets de l'agriculture réalisée dans ces deux études est construite à partir d'une analyse bibliographique (qui a permis de référencer de nombreuses études scientifiques sur le sujet) et d'études de cas. Il ressort notamment que :

- l'agriculture peut avoir des impacts sur la biodiversité et les habitats, la qualité des sols et le risque d'érosion, la qualité de l'eau, les ressources quantitatives en eau, la qualité de l'air, le climat (consommation d'énergie fossile, émission de gaz à effet de serre GES), et le paysage. Il s'agit donc de prendre en compte l'ensemble de ces composantes de l'environnement ;
- l'impact environnemental d'une culture dépend des itinéraires techniques utilisés, du système de culture et même du système de production, dans lequel elle s'inscrit ;
- les impacts environnementaux des cultures doivent être étudiés selon différentes échelles spatiales pour être considérés dans leur ensemble : la parcelle, l'exploitation et la région agricole ou le territoire ;
- les impacts environnementaux des cultures peuvent difficilement être mesurés à l'aide des indicateurs d'impact (p. ex. quantité de nitrates dans l'eau apportés par l'agriculture) mais plutôt à l'aide d'indicateurs de pression (p. ex. quantité d'azote apporté par l'agriculture).

D'autres travaux ont aussi été pris en compte, notamment pour les indicateurs relatifs au risque de lessivage des nitrates : celui des experts du groupe "Azote" du Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement (Corpen) (Cariolle et al., 2006), et celui des experts du groupe "Interculture" du Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée (association Comifer, Cattin et al., 2002).

Tableau 7 : Indicateurs proposés pour le bilan environnemental de la culture

Indicateurs	Modalités	Source	Echelle Score
Indicateurs Culture			
Apport en azote minéral	en kgN/ha/an	Paramètres itinéraire technique	0 à 3
Utilisation de l'irrigation	Oui Non	Paramètres itinéraire technique	0 à 3
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Paramètres itinéraire technique	0 à 3
Indicateurs Rotation			
Existence d'un couvert végétal en hiver	Oui Non		-1 ou 3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles/pluri-annuelles/pérennes		-1 ou 0
Nombre de cultures différentes dans les rotations <i>uniquement pour les cultures annuelles</i>	Nombre		0 ou 3

Note sur l'échelle de score : (-1) correspond à un impact potentiel positif (bénéfique pour l'environnement), (0) à une pression nulle et (3) à une pression négative forte (impact potentiel très négatif pour l'environnement).

Les scores relatifs à chaque indicateur peuvent être pondérés de 1 à 3 selon l'importance accordée à chaque indicateur (en relation avec les sensibilités régionales par exemple). Dans toutes les simulations réalisées, les mêmes coefficients de pondération ont été utilisés :

- 2 pour les trois indicateurs culture,
- 3 pour l'indicateur rotation "Existence d'un couvert végétal en hiver",
- 1 pour l'indicateur rotation "Nombre de cultures différentes".

3.3.1.6 Principaux indicateurs d'analyse de la concurrence avec l'alimentaire

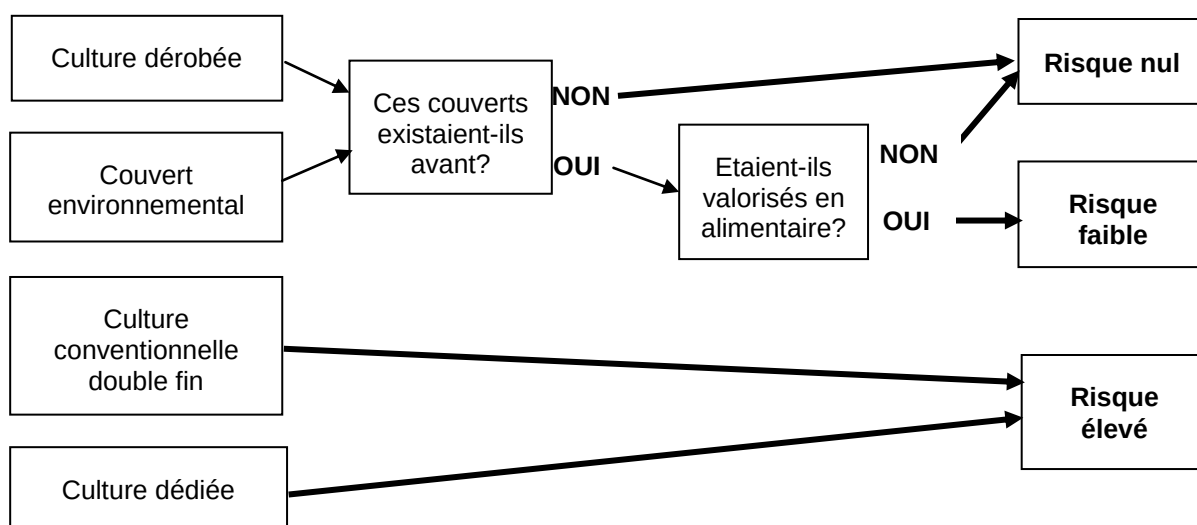
Les cultures utilisées en co-digestion peuvent rentrer en concurrence avec la ressource alimentaire (pour l'alimentation humaine ou animale, les deux étant ici considérées) en réduisant la quantité alimentaire disponible de plusieurs manières :

- utilisation de cultures dédiées à la production de biogaz, qui, dans la sole, peuvent prendre la place de cultures alimentaires,
- utilisation en méthanisation de cultures double fin qui étaient auparavant destinées à l'alimentation humaine ou animale,
- utilisation en méthanisation de résidus de culture pouvant être utilisés pour l'alimentation animale.

A l'inverse, certaines cultures ou des produits de couverts végétaux peuvent ne pas entrer en compétition avec la production alimentaire :

- les cultures dérobées mises en place sur des sols habituellement nus,
- les produits de fauche de couverts végétaux "environnementaux" tels que les bandes enherbées et les prairies qui n'étaient pas valorisés en alimentation animale,
- les résidus de cultures non utilisés pour l'élevage.

On peut synthétiser ce raisonnement dans le schéma suivant :



3.3.2 Méthode utilisée pour comparer les résultats des simulations en incluant tous les aspects : analyse multicritères

L'objectif est de compléter l'analyse précédente, en incorporant à la réflexion les effets de ces filières sur l'environnement et sur la sécurité alimentaire mondiale (effets liés à la concurrence pour la terre entre cultures énergétiques et alimentaires).

La méthode utilisée s'appuie sur une analyse multicritères qui permet de comparer la performance des simulations en intégrant plusieurs aspects qui constituent les critères de l'analyse. Les différents aspects étudiés sont : la performance énergétique, la performance en termes d'émissions de GES, la performance économique, la performance environnementale, et la performance en termes de concurrence avec la production alimentaire. L'analyse multicritères est souvent utilisée comme outil d'aide à la décision car elle permet justement d'intégrer une diversité d'opinions ou de critères, afin de formuler un jugement et d'orienter un choix de décision.

Le principe consiste à attribuer une note à chaque critère et à sommer le tout, en le multipliant le cas échéant par une note de pondération. La notation des différents critères se fait à partir de résultats quantitatifs mais aussi qualitatifs (par exemple pour la performance en termes de compétition avec l'alimentaire). Bien qu'arbitraire, cette notation permet de prendre en compte différents aspects qui ne sont pas comparables (autrement dit « *d'additionner des torchons avec des serviettes* »). Comme c'est généralement le cas, un système de pondération a été utilisé permettant de mettre en avant certains critères/aspects par rapport à d'autres dans le classement des simulations.

Ainsi nous avons comparé les scores totaux des simulations, intégrant tous les critères/aspects dans les cas suivants :

- pas de pondération / pondération identique pour tous les critères,
- pondération mettant en avant la performance énergétique – note de pondération égale à 5 contre 1 pour les quatre autres aspects/critères,
- pondération mettant en avant la performance en termes d'émissions de GES – note de pondération égale à 5 contre 1 pour les quatre autres aspects/critères,
- pondération mettant en avant la performance économique – note de pondération égale à 5 contre 1 pour les quatre autres aspects/critères,
- pondération mettant en avant la performance environnementale – note de pondération égale à 5 contre 1 pour les quatre autres aspects/critères,
- pondération mettant en avant la performance en termes de compétition avec l'alimentaire – note de pondération égale à 5 contre 1 pour les quatre autres aspects/critères,
- pondération tournée vers la réalité, avec un poids équivalent accordé aux critères énergétiques et économiques (note de 4), ainsi qu'au groupe environnement/GES. concurrence avec l'alimentaire (note de 5 pour ce groupe répartie en 3 pour l'environnement, et 1 pour les émissions de GES et la concurrence avec l'alimentaire)

3.4 Résultats des simulations de production de biomasse végétale destinée à la méthanisation

3.4.1 Résultats des simulations énergétique et économique (Phase 3)

3.4.1.1 Résultats des simulations énergétiques

Pour chaque simulation, les comparaisons de performances énergétiques se font entre le scénario de référence (c'est-à-dire le cas où seuls les effluents agricoles et les déchets exogènes sont méthanisés) et le scénario où la biomasse végétale (culture) est ajoutée comme substrat supplémentaire à l'unité de méthanisation (en mélange avec les autres substrats du scénario de référence). Ainsi, la performance liée à l'utilisation de culture est calculée en faisant la soustraction Performance énergétique du scénario avec culture – Performance énergétique du scénario de référence.

Sur cette base nous avons calculé les indicateurs suivants pour chaque scénario :

- L'énergie primaire attendue à partir de la méthanisation de la culture (exprimée en MWh). La quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures est calculée par la différence entre la quantité d'énergie primaire produite dans le scénario considéré (avec culture) moins la quantité d'énergie primaire produite dans le scénario de référence (même substrats mais sans culture).
- L'efficacité énergétique qui représente le rapport entre l'énergie disponible (primaire) et l'énergie fossile consommée pour produire, récolter et stocker la culture.
- La part d'énergie produite par la culture par rapport à l'énergie produite par le scénario de référence. Cet indicateur permet de montrer l'importance que joue la culture dans la production d'énergie et donc dans l'équilibre économique de l'installation.

Le tableau suivant présente les résultats des différentes simulations effectuées.

Tableau 8 : performances énergétiques des cultures utilisées pour chaque scénario

	Scénario	Energie primaire (MWh)	Efficacité énergétique	part culture / prod d'énergie
1	Bandes enherbées – Ray-grass italien	29,6	7,1	1,0 %
2	Trèfle incarnat en dérobé	185,8	4,5	6,5 %
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	329,1	5,6	11,6 %
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	554,9	10,6	19,5 %
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	764,7	9,9	26,9 %
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	1 292,2	14,5	45,5 %
7	Blé en rotation Colza/Blé	718,8	5,4	25,3 %
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	433,6	4,8	15,3 %
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	636,7	6,6	22,4 %
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	955,1	4,7	33,6 %
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	1 001,8	6,1	35,3 %

en gras = cultures qui sont utilisées en co-digestion

Rappelons que la production d'énergie d'une culture dépend principalement de deux paramètres : le tonnage de matière sèche récolté et le potentiel méthanogène de la culture considérée.

Du point de vue de la production d'énergie primaire, on constate que le sorgho biomasse présente la meilleure performance de production suivi par les scénarios maïs+culture intermédiaire et maïs irrigué. Notons que pour le sorgho biomasse la performance énergétique est obtenue en considérant une forte production de matière sèche à l'hectare (22 à 29 tMS/ha) et un potentiel méthane élevé (311 Nm³/tMO) issu de données bibliographiques). L'utilisation d'une culture intermédiaire permet d'obtenir une quantité d'énergie supérieure au scénario irrigation, ce qui est très intéressant d'un point de vue environnemental (suppression de l'irrigation et meilleure protection des sols). Vient ensuite le sorgho grain presque à égalité avec le blé. Pour ces deux cultures on peut mettre en avant le bon potentiel méthane lié notamment à la méthanisation de l'amidon présent en quantité importante dans ce type de culture (voir les valeurs dans le tableau n°4). Le maïs non irrigué se positionne avec une valeur moyenne dans la fourchette de nos simulations. Notons que l'efficacité énergétique du maïs non irrigué est meilleure que les deux autres modalités techniques de production (irrigué et culture dérobée). L'utilisation de fourrage comme le cas d'un RGI montre des performances moyennes liées essentiellement à des productions de biomasse plus faibles. Notons la faible valeur pour le triticale liée essentiellement à un potentiel méthane faible. Cela est en accord avec les caractéristiques de cette plante pour laquelle la part de tiges est très importante sur la biomasse végétale totale. Cette fraction est riche en composés lignocellulosiques faiblement biodégradables en méthanisation. Les cultures dérobées présentent des valeurs faibles ; ces systèmes sont pénalisés par la faiblesse des rendements de production de biomasse. Il est certain que nous manquons à ce niveau de données et d'essais sur les rendements optimisés de production de biomasse ; sachant que ces systèmes n'ont pas été étudiés pour cela mais pour permettre une couverture végétale du sol afin principalement de limiter les phénomènes d'érosion⁸. Ainsi le choix de l'implantation d'une culture intermédiaire doit se faire dans un premier temps selon une démarche agronomique liée à la connaissance des conditions pédoclimatiques d'implantation (choix de l'espèce en fonction des conditions pédoclimatiques et de la période d'implantation). Les bandes enherbées entraînent une production d'énergie limitée.

⁸ Signalons cependant les travaux réalisés dans le cadre d'objectifs d'enrichissement du taux de matière organique des sols où l'une des stratégies consiste à utiliser des couvertures végétales à fort potentiel de biomasse. Cette dernière est ensuite enfouie dans les premières strates du sol pour permettre une intégration au « pool humique » du sol. Ce type d'itinéraire technique est souvent couplé à des techniques de travail du sol « simplifié » ou TCS. Des exemples de choix d'espèces pourraient s'appliquer dans un schéma de méthanisation de la biomasse récoltée. Des essais de terrain afin de valider techniquement et économiquement ces schémas restent nécessaires ainsi que la détermination des potentiels méthanogènes réels des biomasses récoltées. On pourra dans un premier temps se rapprocher de données sur les techniques sans labour et le semi direct ; données issues le plus souvent de groupes d'agriculteurs novateurs.

Par contre l'efficacité énergétique est intéressante dans un schéma de production raisonnée et de protection de l'environnement.

3.4.1.2 Résultats des bilans économiques

Coûts de production de la biomasse issue des cultures (EUR/t MS)

Il est intéressant d'analyser des résultats économiques, plus liés à la production des cultures, en particulier le coût de production de la tonne de matière sèche, ainsi que les coûts de production totaux des différentes cultures étudiées et les coûts de production rapportés à l'hectare qui peuvent constituer des facteurs d'explication des coûts de production de la biomasse.

Tableau 9 : Coûts de production des cultures utilisées pour chaque scénario, totaux, rapportés à l'hectare et rapportés à la tonne de matière sèche produite

		Coûts EUR/t MS	Coûts EUR	Coûts EUR/ha	Valorisation digestat, EUR
1	Bandes enherbées – Ray-grass italien	126	1 011	506	41
2	Trèfle incarnat en dérobé	143	8 585	429	n.c.
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	96	9 645	482	997
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	72	10 805	540	770
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	60	13 185	659	2 477
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	32	14 065	703	2 777
7	Blé en rotation Colza/Blé	88	21 217	1 061	2 570
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	82	16 425	821	1 922
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	86	20 681	1 034	1 003
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	67	24 043	1 202	1 505
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	86	30 006	1 500	1 530

en gras = cultures qui sont utilisées en co-digestion

Tableau 10 : Analyses additionnelles sur les coûts de production de la biomasse

	Coûts EUR/t MS	Coûts EUR	Coûts EUR/ha
Maïs non irrigué en rotation Maïs/Maïs - année sèche	127	20 361	1018
Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé - année sèche	72	13 025	620

en gras = cultures qui sont utilisées en co-digestion

D'un point de vue coût de production de la biomasse utilisable, le sorgho biomasse apparaît comme la culture la plus avantageuse (32 EUR/t MS), devant le sorgho grain (60 EUR/t MS) et le maïs irrigué (67 EUR/t MS). Cela s'explique à la fois par des coûts de production relativement faibles (650-700 EUR/ha) et par des rendements de biomasse très élevés (11 t MS/ha pour le sorgho grain, 22 t MS pour le sorgho biomasse). Pour le maïs irrigué en revanche ce sont uniquement les rendements élevés (18 t MS/ha) qui permettent d'avoir des coûts à la tonne de MS relativement bas. En effet, les coûts de production à l'hectare du maïs irrigué sont très hauts (1 200 EUR/ha) – c'est la culture la plus coûteuse parmi celles étudiées.

La comparaison des simulations 9 et 10 montre que l'irrigation permet d'abaisser les coûts de production à la tonne de matière sèche (-20 EUR/t MS), malgré des coûts à l'hectare plus élevés (+200 EUR/ha), car elle permet d'augmenter de façon significative le rendement de biomasse à l'hectare. En année sèche le maïs non irrigué est encore plus pénalisé avec des coûts proches de 130 EUR/t MS. On peut ajouter qu'en année sèche, la production de sorgho est encore plus avantageuse d'un point de vue économique par rapport au maïs non irrigué qu'en année "normale" (-55 EUR/t MS contre -20 EUR/t MS respectivement) car le sorgho résiste mieux à la sécheresse.

La comparaison des simulations 9 et 11 montre que l'utilisation d'une culture intermédiaire en co-digestion avec du maïs ne change pas les résultats sur les coûts de production de la biomasse : les scénarii maïs seul et maïs + culture intermédiaire (RGI) ont les mêmes niveaux de coûts par tonne de matière sèche.

La comparaison blé / tritcale (simulations 7 et 8) donne l'avantage au tritcale en raison de ses moindres coûts de production à l'hectare (800 vs. 1 000 EUR/ha pour le blé).

Concernant la biomasse produite par les couverts environnementaux, excepté pour les prairies temporaires, les résultats économiques sont relativement médiocres malgré des coûts de production à l'hectare faibles (entre 430 et 500 EUR/ha). Ils sont pénalisés par les faibles niveaux des rendements de matière sèche à l'hectare. C'est particulièrement vrai pour les bandes enherbées et le trèfle incarnat en dérobé (coûts de production respectivement égaux à 126 et 143 EUR/ t MS, et rendements égaux à 4 et 3 t MS/ha), l'avoine diploïde ayant des résultats légèrement meilleurs (coût à 96 EUR/ t MS et rendement de 5 t MS/ha). Pour les bandes enherbées, on peut cependant préciser que les coûts de production à l'hectare sont surestimés car ils incluent, avec les coûts de récolte, les coûts d'implantation qui ne doivent être imputés que la première année (et les bandes enherbées restent en place plusieurs années de suite). En revanche, les prairies ont des coûts de production relativement intéressants (72 EUR/ t MS), inférieurs à ceux du tritcale par exemple.

L'analyse montre l'importance du facteur rendement de biomasse à l'hectare dans la variation des coûts de production de la biomasse (coûts à la tonne de matière sèche). Ainsi, les cultures qui ont les rendements les plus élevés sont souvent celles qui ont les coûts de production à la tonne de MS les plus bas : sorgho biomasse (coûts voisins de 30 EUR/ t MS), sorgho grain et maïs irrigué en tête. A l'inverse, les couverts environnementaux sont pénalisés par leurs faibles niveaux de productivité de biomasse à l'hectare (coûts $\geq$ 100 EUR/ t MS), à l'exception des prairies temporaires. Néanmoins, certaines cultures sont pénalisées par des coûts de production à l'hectare trop élevés par rapport au rendement dégagé : c'est le cas du blé, du tritcale et du maïs fourrage non irrigué. L'ajout d'une culture intermédiaire avec le maïs ne permet pas de gagner suffisamment en productivité pour abaisser les coûts de production de la biomasse méthanisée.

Coûts de production de l'énergie primaire (EUR/MWh)

Les coûts de production peuvent également être ramenés à la quantité d'énergie susceptible d'être produite en méthanisation. Dans le cadre de cette étude nous nous limitons à l'énergie primaire produite sans considérer le mode de valorisation possible en aval. En effet selon le mode de valorisation choisi, les rendements de valorisation de l'énergie primaire vont être très différents d'une technologie à une autre.

Le tableau suivant présente le coût de production de l'énergie primaire pour les différents scénarios simulés.

Tableau 11 : Coûts de production de l'énergie primaire issue des cultures utilisées pour chaque scénario

		coût énergie primaire (EUR/MWh)	Energie primaire (MWh)	Efficacité énergétique	Energie produite/ha (MWh/ha)
1	Bandes enherbées – Ray-grass italien	34,2	29,6	7,1	14,8
2	Trèfle incarnat en dérobé	46,2	185,8	4,5	9,3
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	29,3	329,1	5,6	16,5
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	19,5	554,9	10,6	27,7
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	17,2	764,7	9,9	38,2
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	10,9	1 292,2	14,5	64,6
7	Blé en rotation Colza/Blé	29,5	718,8	5,4	35,9
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	37,9	433,6	4,8	21,7
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	32,5	636,7	6,6	31,8
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	25,2	955,1	4,7	47,8
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	30	1 001,8	6,1	50,1

Le sorgho biomasse présente le coût de production de l'énergie primaire le plus intéressant ; il s'élève à 1,09 cts EUR/kWh, soit environ 3 cts EUR du kWh électrique produit. Rappelons qu'il s'agira bien d'un coût lié à l'approvisionnement en matière première et qui sera à supporter par l'installation de méthanisation.

Le sorgho grain arrive en deuxième position. Ceci montre bien l'intérêt de culture qui associe à la fois un itinéraire technique économiquement raisonnable et une production de biomasse à l'hectare importante.

Notons que l'utilisation de fourrages prairiaux sont également compétitifs par rapport aux autres scénarios de production.

Les autres scénarios présentent des coûts de production de l'énergie primaire supérieur à 25 EUR/MWh ; ce qui représente un coût d'accessibilité au kWh électrique supérieur à 7 ctsEUR/kWhelec, compromettant ainsi l'intérêt économique tant que le tarif d'achat de l'électricité issue du biogaz n'est pas davantage valorisé.

Signalons que les scénarios utilisant des cultures dérobées ou bien la récupération de biomasse de bandes enherbées affichent des coûts de production de l'énergie primaire élevée. Ainsi, l'utilisation de biomasse récoltée sur des bandes enherbées entraîne un coût de la matière première qui s'élève à 9,8 ctsEUR/kWhelec. Vu ce niveau de coût de la matière première, il est difficilement envisageable de faire fonctionner une unité de méthanisation sur d'importants tonnages de culture végétale. Il peut s'agir plutôt d'apport limité tant en quantité que le temps pour palier éventuellement à une perte de co-substrat exogène. L'utilisation de culture énergétique apparaît donc bien comme une sécurisation temporaire de l'approvisionnement en cas de modification du gisement en co-substrats initialement disponibles.

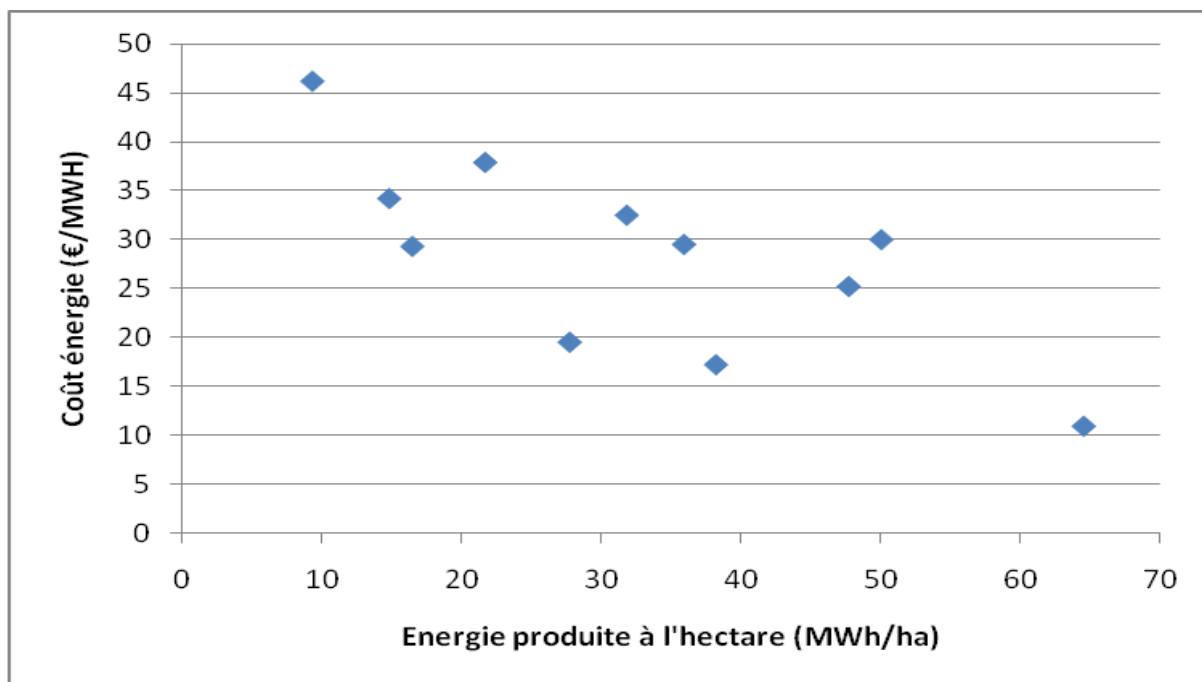


Figure 10 : Relation entre la quantité d'énergie produite à l'hectare et le coût d'accessibilité de l'énergie

La figure précédente montre la relation entre la production d'énergie ramenée à l'hectare et le coût d'accessibilité de l'énergie. On constate une tendance plutôt linéaire entre ces deux paramètres : plus une culture va produire de l'énergie par unité de surface plus le coût d'accès à cette énergie sera bas. Rappelons que la quantité d'énergie produite par unité de surface agricole est une combinaison entre le potentiel méthanogène de la culture et son rendement de production de biomasse.

3.4.2 Résultats de l'analyse multicritères des simulations incluant le point de vue environnemental et la notion de concurrence avec l'alimentaire (Phases 4 et 5)

3.4.2.1 Résultats des bilans environnementaux

Il est difficile, pour ne pas dire impossible, de quantifier les pressions (et encore moins les impacts) environnementales de la production de cultures. Les bilans environnementaux de la production des cultures utilisées en co-digestion sont de fait essentiellement qualitatifs. Néanmoins, dans le but de comparer les cultures (ou plutôt les rotations) entre elles d'une part, et d'intégrer le point de vue environnemental dans le jugement global de la performance des différentes simulations, des notes de bilan environnemental ont été attribuées aux différentes rotations étudiées. Chaque note de bilan est la somme des scores de six indicateurs, pondérés selon l'importance accordée à l'indicateur (de 1 à 3). Rappelons que sur les six indicateurs, trois sont relatifs à la (les) culture(s) dans l'itinéraire technique considéré, et trois sont relatifs à la rotation dans laquelle la (les) culture(s) s'inscrit (-vent). Les indicateurs utilisés sont présentés dans le § 3.3.1.5. Le système de notation des indicateurs est explicité dans la Notice d'explication des simulations, § Description de l'onglet "Bilan environnemental". Avec la pondération utilisée, les notes minimale et maximale de bilan environnemental sont respectivement (-5) et (46).

Les résultats de cette analyse, qui, rappelons le, ne signifient rien en valeur absolue mais permet de comparer les scénarii, sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Niveau de pression environnementale des scenarii étudiés

		Pression environnementale	
		Note (de -5 à 46 avec la pondération utilisée)	Niveau correspondant
1	Bandes enherbées – Ray-grass italien	-5	Neutre à positif
2	Trèfle incarnat en dérobé	-3	Neutre à positif
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	1	Faiblement négatif
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	-1	Neutre à positif
5	Sorgho en rotation Sorgho/Blé	4	Faiblement négatif
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	4	Faiblement négatif
7	Blé en rotation Colza/Blé	12	Négatif
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	10	Négatif
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	25	Très négatif
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	27	Très négatif
11	Maïs fourrage en rotation Maïs/Maïs avec culture intermédiaire fertilisée	11	Négatif

On peut remarquer que même la rotation la plus impactante (maïs irrigué en monoculture) n'atteint pas la note maximale. Cela s'explique par le fait que seul le premier maïs de la rotation maïs/maïs est utilisé en co-digestion, la pression environnementale liée au maïs suivant n'est donc pas comptabilisée dans le bilan du scénario co-digestion.

D'un point de vue environnemental, les scénarii les plus intéressants sont, comme supposé, ceux qui utilisent la production de biomasse des bandes enherbées, des prairies et des cultures dérobées. Leurs effets positifs sur l'environnement sont décrits dans le § 2.5.1.2. Pour les prairies et les cultures dérobées, on peut signaler que les scenarii sans fertilisation sont évidemment plus favorables (comparaison avoine diploïde avec et sans fertilisation et comparaison prairie temporaire fertilisée/bande enherbée).

Concernant les cultures conventionnelles, les résultats montrent que :

- les rotations les plus défavorables sont celles qui n'ont pas de couvert végétal en hiver : la comparaison des rotations sorgho/blé et maïs non irrigué/maïs est ainsi nettement favorable au sorgho/blé ; cela s'explique aussi par la moindre utilisation d'intrants chimiques (engrais et surtout produits phytosanitaires) sur la culture de sorgho que sur le maïs,
- la culture de sorgho a moins d'impact sur l'environnement que celle de maïs, d'une part parce qu'elle utilise moins d'intrants chimiques (cf. ci-dessus) et d'autre part parce qu'elle est généralement non irriguée. Concernant les apports d'azote, il est utile de rappeler que le niveau choisi pour le maïs est relativement faible comparé à certaines pratiques (78 unités d'azote /ha, alors que certains maïsiculteurs peuvent en apporter plus de 150 unités/ha),
- la culture de maïs irrigué est plus défavorable que la culture de maïs sec : de plus, dans les simulations réalisées nous n'avons pas pris en compte le fait que l'irrigation est souvent associée à des apports d'éléments fertilisants (azotés en particulier) plus élevés d'où un risque de lessivage de nitrates plus important,
- la mise en place d'une culture dérobée (ray-grass italien dans l'exemple) dans une succession maïs/maïs permet de réduire fortement l'impact de la rotation sur l'environnement. Les principaux effets découlent de la couverture du sol en hiver qui limite les phénomènes d'érosion du sol, hydrique et éolienne, de lessivage des nitrates vers les eaux souterraines, de transfert de résidus de produits phytosanitaires et/ou d'éléments minéraux dans les eaux superficielles, et contribue à maintenir la fertilité des sols en fixant les éléments minéraux disponibles en partie pour la culture suivante. Dans les zones d'action complémentaire de la Directive nitrates, le ray-grass en dérobé permet de répondre à l'obligation de couverture du sol en hiver (pendant la période de lessivage). De plus, cela n'apparaît pas dans la simulation mais on peut ajouter qu'une culture dérobée peut aider à la gestion des adventices et se traduire sur le maïs suivant par une moindre utilisation d'herbicides (si tant est que la culture est détruite de façon mécanique ou par le gel),

- les rotations à base de blé ou de triticales ont des effets négatifs sur l'environnement, mais moins forts que la rotation maïs/maïs car ce sont des cultures d'hiver. Le triticales est moins néfaste que le blé car sa culture utilise moins d'intrants chimiques (engrais et surtout produits phytosanitaires).

Pour l'analyse multicritères, les notes issues des bilans environnementaux ont été traduites en notes de performance environnementale, allant de 1 à 10 (1 étant la note de performance la plus faible et 10 la plus élevée).

Tableau 13 : Correspondance entre notes de bilan environnemental et performance environnementale

Classes de notes de bilan environnemental	Performance environnementale
< -3	10
de -3 à 0 (inclus)	9
de 1 à 3 (inclus)	8
de 4 à 6 (inclus)	7
de 7 à 9 (inclus)	6
de 10 à 11 (inclus)	5
de 12 à 14 (inclus)	4
de 15 à 20 (inclus)	3
de 21 à 25 (inclus)	2
> 25	1

3.4.2.2 Résultats relatifs à la concurrence avec la production alimentaire

Il y a quelque temps (2007-2008), la presse mondiale a fait état des effets désastreux de la crise alimentaire dans certains pays. Le déséquilibre entre l'offre et la demande a provoqué pour la première fois depuis des décennies une hausse spectaculaire du prix des matières premières, mettant en difficultés les populations les plus vulnérables. Parmi les différents facteurs avancés comme cause de ce déséquilibre, le développement des biocarburants dans les pays développés, a souvent été cité. A tort ou à raison, peu importe à ce stade, l'important étant pour l'ADEME à l'issue de cette étude de disposer des éléments permettant d'apprécier cet impact potentiel.

Outre la question de l'alimentation humaine, dans le modèle d'exploitation polyculture-élevage choisi, la problématique de la concurrence entre production énergétique et production pour l'alimentation animale est importante à prendre en considération. Il ne s'agit pas d'aboutir à un système déséquilibré, où la mise en place d'une unité de méthanisation engendrerait une dépendance forte de l'exploitation aux approvisionnements en fourrages extérieurs.

La concurrence entre production énergétique (pour la méthanisation) et production alimentaire – humaine et animale – est donc un critère de performance des scénarii étudié. L'analyse de cette concurrence est qualitative.

Pour les cultures dites conventionnelles et les cultures énergétiques dédiées, la compétition avec l'alimentaire est maximale. Les scénarii utilisant ces cultures en co-digestion sont donc peu performants sur ce plan. Leur performance, quoique faible, n'est cependant pas nulle car l'on considère qu'une partie seulement de la sole de l'exploitation est engagée dans le processus de méthanisation (SAU de l'exploitation supérieure aux 20 ha utilisés pour la méthanisation). De même, pour les prairies on considère que la compétition avec la production alimentaire est maximale car elles sont généralement utilisées pour l'alimentation animale d'autant plus qu'on se place dans un modèle d'exploitation polyculture-élevage. A l'inverse le scénario utilisant les produits de fauche des bandes enherbées est très performant sur le plan "éthique" car les bandes enherbées sont très rarement valorisées en général, y compris en alimentation (animale). Les scénarii à base de cultures dérobées se placent entre les deux, avec un risque de concurrence avec l'alimentaire faible à modéré.

Pour intégrer cet aspect dans le bilan global, nous avons construit le système de notation suivant (voir détails dans Notice d'explication des simulations).

Tableau 14 : Niveau de pression sur la ressource alimentaire des scénarii étudiés

		Concurrence avec l'alimentaire	
		Note (de 1 à 10)	Niveau correspondant
1	Bandes enherbées – Ray-grass italien	10	Concurrence négligeable
2	Trèfle incarnat en dérobé	7	Faible concurrence
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	7	Faible concurrence
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	2	Très forte concurrence
5	Sorgho en rotation Sorgho/Blé	2	Très forte concurrence
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	2	Très forte concurrence
7	Blé en rotation Colza/Blé	2	Très forte concurrence
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	2	Très forte concurrence
9	Maïs non irrigué en rotation Maïs/Maïs	2	Forte concurrence
10	Maïs irrigué en rotation Maïs/Maïs	2	Forte concurrence
11	Maïs en rotation Maïs/Maïs avec culture intermédiaire	4	Très forte concurrence

3.4.2.3 Résultats de l'analyse multicritères

❖ *Sans pondération, ou avec une pondération identique pour tous les aspects*

En l'absence de pondération, les scénarii les plus performants, tous aspects confondus, sont ceux qui utilisent des couverts environnementaux : bandes enherbées (ray-grass d'Italie) en tête devant la prairie temporaire (ray-grass d'Italie). Les cultures dérobées (avoine diploïde d'abord, trèfle incarnat ensuite) se situent juste derrière les scénarii utilisant du sorgho : le scénario sorgho biomasse (en rotation sorgho/blé) a la même note de performance que le scénario « prairie temporaire », le sorgho grain est légèrement en dessous (même rotation considérée).

Concernant les scénarii utilisant des cultures plus classiques, ils ont des performances globales faibles (≤ 20 points sur 50) et proches les uns des autres. Les scénarii utilisant du maïs fourrage non irrigué en monoculture avec et sans culture intermédiaire devancent le scénario triticales, maïs fourrage irrigué en monoculture et blé. On constate que, contrairement à ce qui était attendu, l'ajout d'une culture intermédiaire avec le maïs en monoculture ne permet pas d'améliorer significativement le bilan global de la simulation, tous critères confondus.

Finalement, si l'on considère les trois grands groupes de produits végétaux étudiés (i) bandes enherbées et prairie temporaire, (ii) cultures dérobées et (iii) cultures conventionnelles ou énergétiques dédiées, il ressort, tous critères confondus, que :

- le scénario basé sur l'utilisation de bandes enherbées est le plus performant, juste devant le scénario « prairie temporaire »,
- les scénarii basés sur l'utilisation de cultures dérobées sont eux aussi très performants,
- les scénarii basés sur l'utilisation de cultures conventionnelles ou énergétiques dédiées sont dans l'ensemble peu performants (maïs, blé, triticales) sauf ceux utilisant du sorgho (sorgho biomasse en particulier) qui ont des niveaux de performance globale similaires à ceux d'une prairie ou de cultures dérobées.

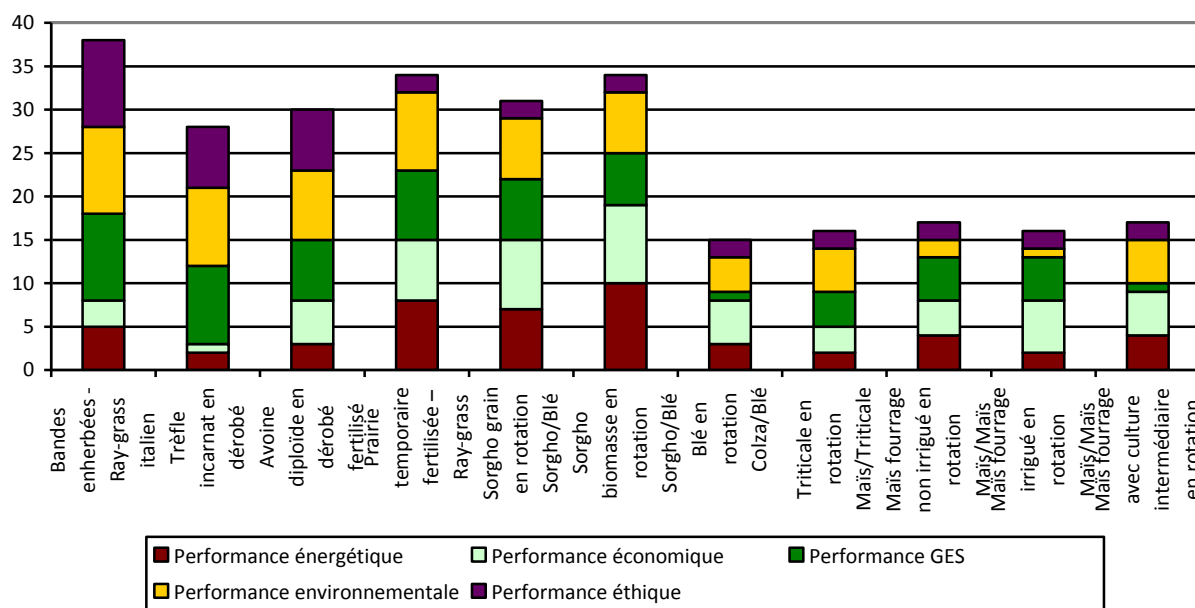


Figure 11 : Classement des scénarii en l'absence de pondération, tous critères pris en compte

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 15 : Classement des scénarii en l'absence de pondération, tous critères pris en compte

N°	Simulations	Performance énergétique	Performance économique	Performance GES	Performance environnementale	Performance éthique	TOTAL /50
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	5	3	10	10	10	38
2	Trèfle incarnat en dérobé	2	1	9	9	7	28
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	3	5	7	8	7	30
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	8	7	8	9	2	34
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	7	8	7	7	2	31
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	10	9	6	7	2	34
7	Blé en rotation Colza/Blé	3	5	1	4	2	15
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	2	3	4	5	2	16
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	4	4	5	2	2	17
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	2	6	5	1	2	16
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	4	5	1	5	2	17

❖ Avec pondération mettant en avant l'un des cinq aspects considérés

Comme décrit dans le §3.3.2, nous avons calculé le score des simulations avec cinq barèmes de pondération mettant chacun en avant un des cinq aspects considérés (énergétique, émissions de GES, économique, environnemental et compétition avec l'alimentaire). Les résultats sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Scores totaux des scénarii selon les performances prioritaires (score maximal = 90)

N°	Simulations	Priorité à la performance énergétique	Priorité à la performance économique	Priorité à la performance GES	Priorité à la performance environnementale	Priorité à la performance éthique
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	58	50	78	78	78
2	Trèfle incarnat en dérobé	36	32	64	64	56
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	42	50	58	62	58
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	66	62	66	70	42
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	59	63	59	59	39
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	74	70	58	62	42
7	Blé en rotation Colza/Blé	27	35	19	31	23
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	24	28	32	36	24
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	33	33	37	25	25
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	24	40	36	20	24
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	33	37	21	37	25

Classement des scénarii si la priorité est donnée à la performance énergétique

Si l'on accorde plus d'importance à la performance énergétique, on retrouve le sorgho biomasse en tête des simulations du fait de sa forte production de biomasse et du potentiel méthane élevé. Juste derrière se place le scénario « Prairie » puis à quasi égalité les scénarii « sorgho grain » et « bandes enherbées ». Les scénarii utilisant des cultures dérobées sont un peu moins performants. Ceci est lié au fait que la production de biomasse à partir de ces couverts reste faible même si elle utilise peu d'énergie. Les scénarii « maïs non irrigué » se positionnent en milieu de classement. L'introduction d'une culture dérobée n'apporte pas d'avantage par rapport à l'aspect énergétique. Les scénarii à base « blé » et « triticale » se positionnent en bas de classement. Signalons que pour le triticale la faible performance est liée notamment à un potentiel méthane faible. Avec cette pondération, le scénario le moins performant est celui qui utilise du maïs irrigué, dont la production est très consommatrice d'énergie.

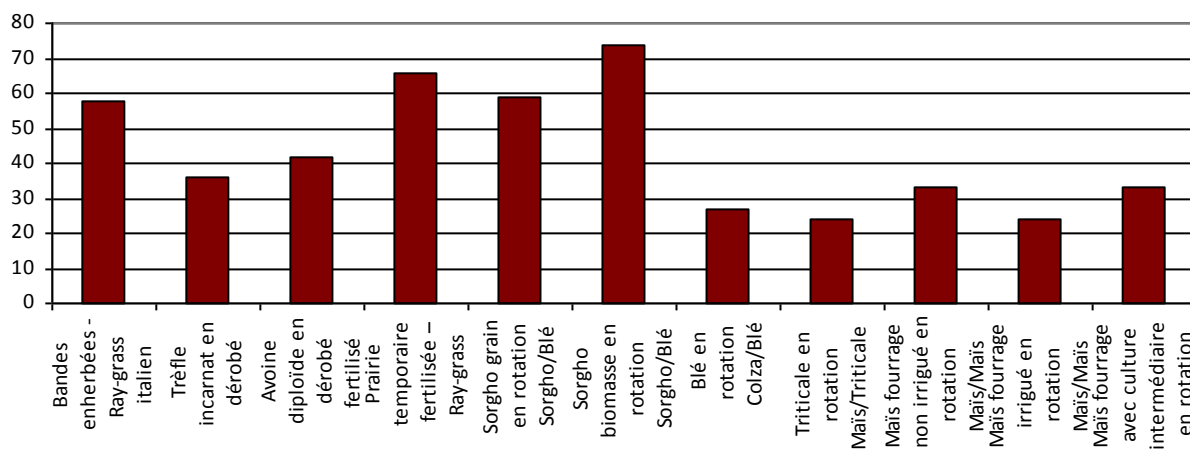


Figure 12 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère énergétique

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, lorsque l'on considère la performance énergétique comme le critère le plus important ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 17 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect énergétique dans la pondération

N°	Simulations	TOTAL /90
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	74
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	66
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	59
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	58
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	42
2	Trèfle incarnat en dérobé	36
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	33
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	33
7	Blé en rotation Colza/Blé	27
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	24
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	24

Classement des scénarii si la priorité est donnée à la performance économique

Si l'on accorde une importance particulière à la performance économique, l'utilisation de sorgho biomasse est de loin le scénario le plus performant avec les scénarii « sorgho grain » et « prairie temporaire (un peu) fertilisée ». Ceci est lié d'une part aux coûts de production relativement faibles du sorgho et d'une prairie temporaire et d'autre part à la haute performance énergétique de la biomasse produite par ces couverts (voir § précédent). En seconde position, les scénarii basés sur l'utilisation de biomasse de bandes enherbées et d'avoine diploïde fertilisée ont aussi une performance élevée, principalement en raison de leurs faibles coûts de production à l'hectare et de leur bonne performance énergétique.

La plus grande considération apportée au résultat économique fait remonter le maïs irrigué dans le classement. Malgré des coûts de production très élevés, le maïs irrigué a une forte productivité de biomasse et un rendement en méthane important. Avec cette pondération, le scénario utilisant du maïs non irrigué avec une culture intermédiaire est plus performante que le scénario avec maïs sans culture intermédiaire. Le scénario à base de blé se situe entre les deux. L'accent mis sur les résultats économiques a fait baisser la performance relative des scénarii « trèfle incarnat en dérobé » et « triticale ». Ces deux scénarii sont principalement pénalisés par leurs faibles performances énergétiques.

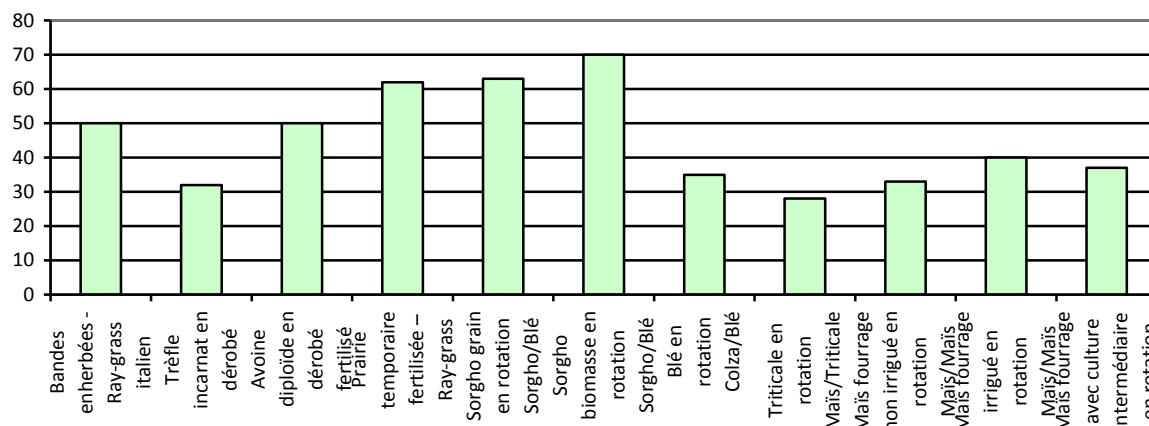


Figure 13 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère économique

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, lorsque l'on considère la performance économique comme le critère le plus important ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect économique dans la pondération

N°	Simulations	TOTAL /90
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	70
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	63
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	62
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	50
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	50
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	40
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	37
7	Blé en rotation Colza/Blé	35
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	33
2	Trèfle incarnat en dérobé	32
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	28

Classement des scénarii si la priorité est donnée à la performance en termes d'émissions de GES

Si l'on considère comme prépondérante la performance en termes d'émissions de GES, le scénario « bandes enherbées » sort premier avec un total de point largement supérieur. Se positionnent ensuite les scénarii « prairies » et « cultures dérobées ». On constate le bon positionnement du sorgho grain. Le sorgho biomasse vient en 6^{ième} position, il est pénalisé dans ce cadre de pondération en raison des tonnages importants de biomasse qu'il génère et qui entraîne *de facto* des émissions plus importantes de GES en raison notamment des opérations de récolte et transport.

Dans le groupe des cultures classiques, le classement est modifié. Les scénarii utilisant du maïs sans culture intermédiaire apparaissent relativement plus performants que si l'on met en avant l'aspect énergétique. Le scénario à base de maïs irrigué (sans culture intermédiaire) est plus performant que le scénario à base triticales. Le scénario à base de maïs fourrage non irrigué (sans culture intermédiaire) est pénalisé. Avec cette pondération, le scénario le moins performant est celui qui utilise du blé dans une rotation colza/blé.

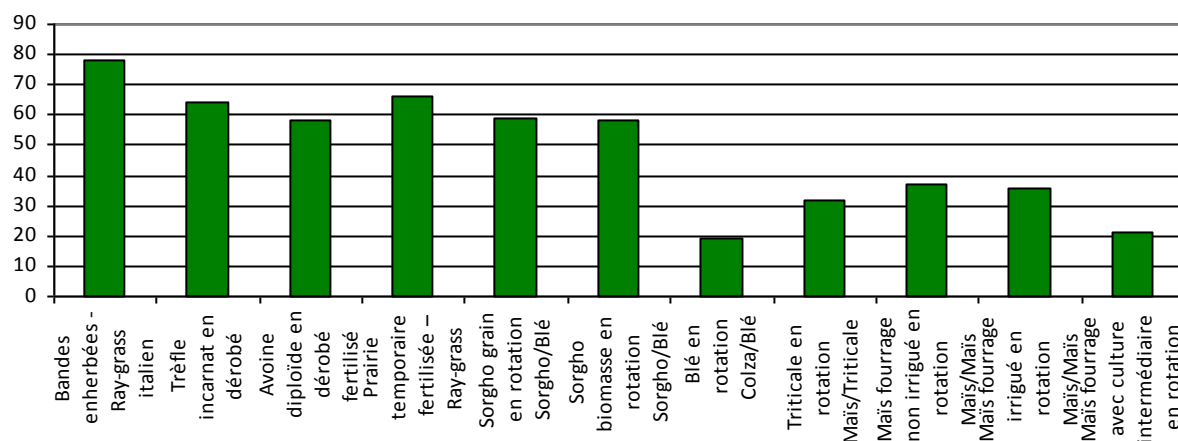


Figure 14 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère émissions de GES

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, lorsque l'on considère la performance en termes d'émissions de GES comme le critère le plus important ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 19 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect « émissions de GES » dans la pondération

N°	Simulations	TOTAL /90
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	78
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	66
2	Trèfle incarnat en dérobé	64
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	59
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	58
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	58
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	37
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	36
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	32
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	21
7	Blé en rotation Colza/Blé	19

Classement des scénarii si la priorité est donnée à la performance environnementale

Si l'on donne une plus grande importance aux aspects environnementaux, le scénario utilisant des bandes enherbées reste le plus performant, comme dans la situation sans pondération, devant l'utilisation de la prairie temporaire. Ces deux scénarii, qui utilisent des couverts, dominent le classement si l'on met l'accent sur l'environnement. L'utilisation de cultures dérobées - trèfle incarnat et avoine diploïde – est aussi très performante.

Concernant les scénarii « cultures », les plus performants avec la pondération « environnementale » sont de loin l'utilisation de sorgho biomasse et de sorgho grain. Les scénarii utilisant des cultures plus classiques, conventionnelles, sont moins intéressants. Parmi eux, à quasi égalité, les plus performants dans ce cas de figure sont celui utilisant du triticale, culture assez rustique, et celui utilisant du maïs fourrage avec une culture intermédiaire. L'analyse fait ainsi ressortir l'intérêt de ce scénario « maïs + culture intermédiaire » d'un point de vue environnemental par rapport à l'utilisation de maïs seul en monoculture, qui est la moins performante avec cette pondération.

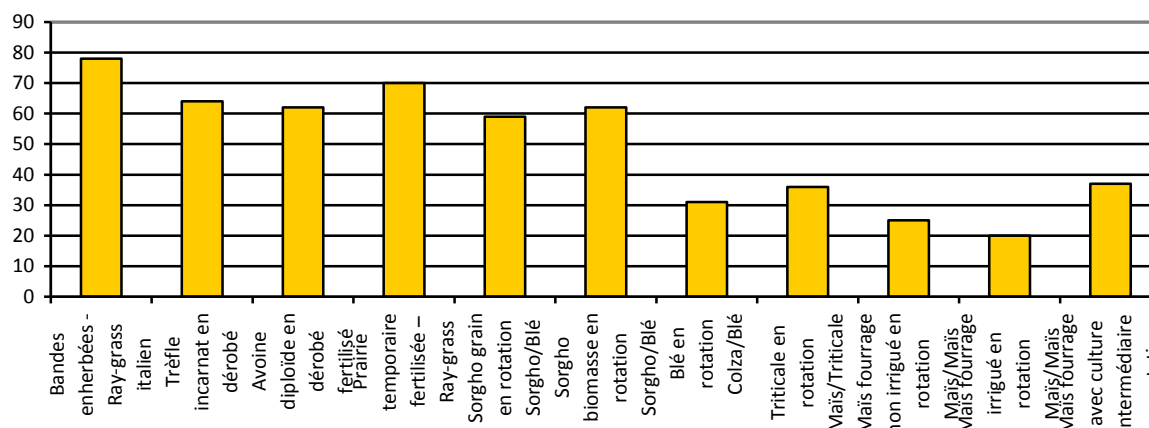


Figure 15 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère environnemental (hors GES)

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, lorsque l'on considère la performance environnementale comme le critère le plus important ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 20 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect environnemental dans la pondération

N°	Simulations	TOTAL /90
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	78
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	70
2	Trèfle incarnat en dérobé	64
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	62
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	62
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	59
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	37
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	36
7	Blé en rotation Colza/Blé	31
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	25
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	20

Classement des scénarii si la priorité est donnée à la performance en termes de compétition avec l'alimentaire

Avec l'accent mis sur le critère « compétition avec l'alimentaire », le scénario utilisant des bandes enherbées est de loin le plus performant, devant ceux utilisant des cultures dérobées. Viennent ensuite les scénarii « prairies », « sorgho biomasse », et « sorgho grain » qui malgré la forte compétition qu'ils génèrent avec la production alimentaire, restent dans le milieu du classement en raison de leur grande performance énergétique, économique et environnementale. Les autres simulations, utilisant du maïs, du triticale et du blé, ont des résultats médiocres car leurs résultats sur les différents aspects étudiés ne compensent pas autant la faible performance « éthique ». L'utilisation d'une culture intermédiaire avec du maïs ne permet pas un gain de performance significatif.

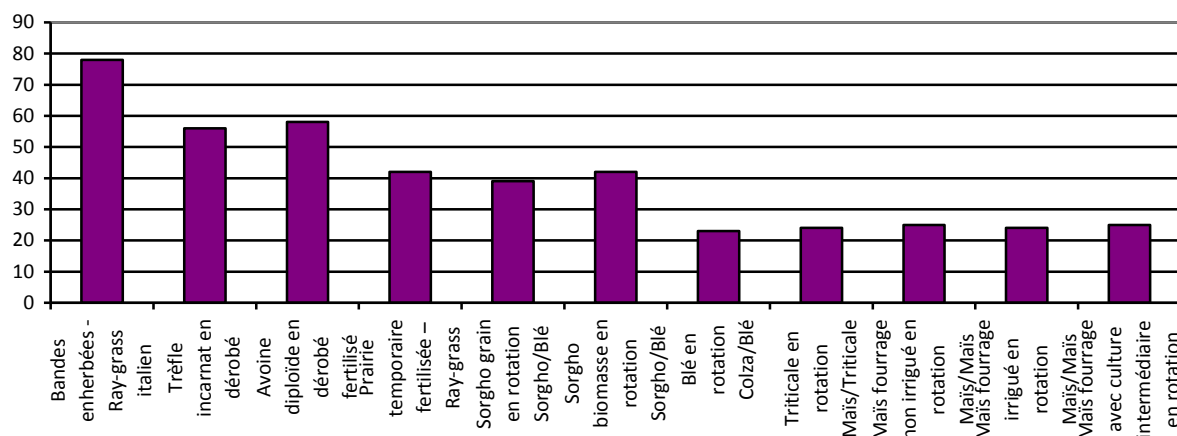


Figure 16 : Résultats des simulations avec une pondération accentuant le critère concurrence avec l'alimentaire

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, lorsque l'on considère la limitation de la concurrence avec l'alimentaire comme le critère le plus important ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 21 : Classement des scénarii en privilégiant l'aspect compétition avec l'alimentaire dans la pondération

N°	Simulations	TOTAL /90
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	78
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	58
2	Trèfle incarnat en dérobé	56
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	42
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	42
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	39
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	25
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	25
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	24
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	24
7	Blé en rotation Colza/Blé	23

❖ Avec une pondération reflétant un ordre d'importance des critères proche de la réalité (priorité à l'énergétique et l'économique (note de 4 chacun), en accordant un poids équivalent au pôle de critères « durables » (note de 5 en tout) : environnement (3), GES (1) et concurrence avec l'alimentaire (1)

Avec une pondération nuancée mettant en avant les aspects énergétiques et économiques tout en conférant un poids significatif aux critères de « durabilité », en particulier l'environnement, le scénario le plus performant est celui utilisant du sorgho biomasse (en rotation sorgho/blé), devant l'utilisation de biomasse de prairie temporaire (ray-grass italien un peu fertilisé) et de sorgho grain. L'utilisation de bandes enherbées donne aussi de bons résultats globalement, ainsi que, dans une moindre mesure l'utilisation de cultures dérobées, en particulier d'avoine diploïde fertilisé. Les scénarii utilisant du blé, du triticale et du maïs arrivent en dernière position. On peut noter malgré tout que le scénario « maïs+RGI en dérobé » a de meilleurs résultats que le scénario maïs seul (dans une succession maïs/maïs). C'est surtout lié à l'effet environnemental positif de l'implantation d'une culture intermédiaire hivernale.

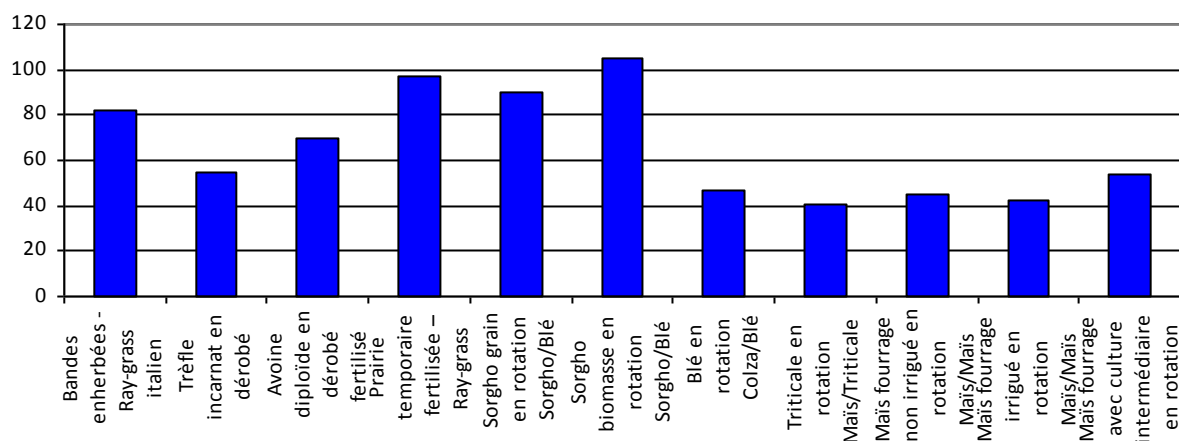


Figure 17 : Résultats des simulations avec une pondération nuancée

La figure ci-dessus illustre les performances des différents scénarii étudiés, avec une pondération plus nuancée qui donne la prépondérance aux critères énergétiques et économiques sans pour autant négliger les aspects environnementaux ; les données associées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 22 : Classement des scénarii avec pondération nuancée

N°	Simulations	TOTAL /130
6	Sorgho biomasse en rotation Sorgho/Blé	105
4	Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	97
5	Sorgho grain en rotation Sorgho/Blé	90
1	Bandes enherbées - Ray-grass italien	82
3	Avoine diploïde en dérobé fertilisé	70
2	Trèfle incarnat en dérobé	55
11	Maïs fourrage avec culture intermédiaire en rotation Maïs/Maïs	54
7	Blé en rotation Colza/Blé	47
9	Maïs fourrage non irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	45
10	Maïs fourrage irrigué en rotation Maïs/Maïs sans culture intermédiaire	42
8	Triticale en rotation Maïs/Triticale	41

3.5 Synthèse des simulations

3.5.1 Bilan des scénarios types étudiés

Les bilans des différentes simulations sont donnés en annexe. Ils regroupent pour chaque itinéraire simulés les bilans des différentes investigations.

3.5.2 Limites de l'exercice et pistes d'amélioration

L'utilisation de cultures végétales en méthanisation est une problématique récente dans le contexte national. En Europe du Nord (notamment Allemagne et Autriche) la production de cultures agricoles à destination de la méthanisation est largement pratiquée et encouragée par des aides publiques spécifiques. Les espèces utilisées restent très limitées avec le maïs plante entière largement majoritaire et le sorgho (grain et biomasse) selon les régions.

Ainsi il n'existe pas de références issues de pratiques de terrain sur l'utilisation de différentes cultures en liaison avec les avantages/inconvénients agronomique et environnementaux. Cela est particulièrement vrai pour les cultures dérobées, pour lesquelles il est même difficile de trouver des données d'expérimentation sur leur potentiel méthanogène.

D'où l'identification des besoins suivants en recherche/expérimentation :

- études sur l'intérêt des cultures dérobées pour la production de biogaz,
- plus largement études sur l'utilisation de systèmes de cultures « alternatifs » pour la production de biogaz : développement d'itinéraires à bas niveau d'intrants pour l'utilisation en méthanisation, expérimentations sur des espèces ou variétés plus rustiques, allongement des rotations, cultures associées, etc. Plusieurs projets de recherche en Autriche (Amon et al.) et en Allemagne (projet EVA en particulier) sont orientés vers ces problématiques.

Les données disponibles, que ce soit sur le potentiel méthanogène des cultures ou sur leurs rendements en biomasse et leurs itinéraires techniques, se limitent trop souvent aux cultures dites conventionnelles.

4. Conclusion

Le principal apport de cette étude est l'éclairage complet qu'elle fournit sur les résultats de l'utilisation de cultures en co-digestion, intégrant l'ensemble des critères à considérer dans le choix des projets de méthanisation agricole : performance énergétique, économique, environnementale, en termes d'émissions de gaz à effet de serre et en termes de concurrence avec la production alimentaire. Elle permet ainsi de disposer d'éléments complets sur les intérêts comparatifs des cultures étudiées pour faire des choix stratégiques raisonnés dans un objectif de développement durable. Dans cette perspective, un autre aspect important de l'étude est d'avoir considéré les différentes cultures au sein de successions culturales (aspect particulièrement important pour le bilan environnemental).

L'étude comprend trois principales étapes de travail :

- une première phase d'identification des cultures utilisables et de leurs avantages et inconvénients pour la production de biogaz, à partir des études scientifiques disponibles et de résultats d'expérimentation. Ce travail a notamment abouti à la construction d'une base de données « Cultures » qui regroupe, pour de nombreuses cultures, les informations suivantes : matière sèche, matière organique, rendements (mini et maxi), potentiel méthane et calcul de la productivité en méthane à l'hectare,
- une deuxième phase de simulation des résultats (énergétiques, économiques, d'émissions de GES, environnementaux et de concurrence avec l'alimentaire) de l'utilisation de plusieurs cultures, considérées dans une rotation, par rapport à un scénario contrefactuel utilisant un substrat constitué de lisier et de déchets. Les simulations ont été réalisées à partir d'un tableur Excel, comprenant les paramètres de simulation, les bases de données « Cultures » et une base de données « Coûts de production des cultures » (coûts des intrants, coûts d'utilisation du matériel agricole, coût de transport et coût de la main d'œuvre). Parmi les plantes étudiées, on distingue en fait des couverts environnementaux – bandes enherbées et prairies, des cultures dérobées – trèfle incarnat et avoine diploïde, et des cultures conventionnelles ou dédiées la production d'énergie – maïs fourrage, sorgho grain, blé, triticales et sorgho biomasse. Le mode de stockage considéré a été, pour toutes les plantes, l'ensilage de plante entière.
- une troisième phase de synthèse des résultats utilisant l'outil d'analyse multicritères.

Les principales limites de l'étude sont liées aux données utilisées pour paramétrer les simulations, en particulier concernant les itinéraires techniques culturaux (difficulté de construire des itinéraires techniques « moyens » face à la diversité des itinéraires réalisés pour une même culture en France, difficulté d'accès à certaines données). De plus, l'étude intervient sans doute un peu trop tôt par rapport au développement de l'utilisation de cultures en co-digestion d'où un manque de données de terrain et même par rapport aux avancées de la recherche sur cette thématique (résultats d'expérimentation disponibles souvent limités aux cultures dites conventionnelles). Néanmoins le tableur qui a été construit permet justement de modifier ces données d'entrée. Une fois rendu complètement opérationnel, il pourrait être utilisé pour faire des analyses plus fines sur l'utilisation de systèmes de culture plus innovants.

Les résultats des simulations démontrent l'intérêt, d'un point de vue général, d'utiliser des couverts environnementaux – bandes enherbées ou prairies –, des cultures dérobées et du sorgho en co-digestion. Mis à part la concurrence avec l'alimentaire, l'utilisation de biomasse des prairies en co-digestion donne des résultats particulièrement intéressants sur tous les plans (énergétique, économique, émissions de gaz à effet de serre et environnemental). De même, l'utilisation de sorgho ressort comme très performante comparée aux autres cultures : très avantageuse sur les plans énergétiques et économiques, en particulier pour le sorgho biomasse en raison de sa très forte productivité de biomasse à l'hectare, l'utilisation de sorgho, dans le cadre d'une rotation sorgho/blé (donc avec couvert hivernal) est aussi intéressante sur le plan environnemental car le sorgho est peu exigeant en eau et sa culture utilise relativement peu d'engrais et de pesticides. L'utilisation de bandes enherbées (en première année) et de cultures dérobées n'est pas très performante sur le plan économique (et énergétique pour le trèfle incarnat en dérobé) mais ce type de biomasse reste relativement intéressant à utiliser en méthanisation, en particulier parce que ces couverts ont des effets positifs sur l'environnement et leur utilisation en méthanisation n'entraîne pas de compétition avec l'alimentaire. Concernant les bandes enherbées, il faut de plus souligner que le potentiel de production de biomasse qui leur est associé est faible, à cause du rendement et surtout à cause des faibles surfaces concernées. En revanche, les cultures classiques (maïs, blé, triticales) ont des résultats médiocres.

Contrairement à ce qui était attendu, l'ajout d'une culture intermédiaire avec le maïs en monoculture ne permet pas d'améliorer significativement le bilan énergétique ni économique de la simulation, car l'interculture entre deux maïs se situe en hiver et le rendement de la culture intercalaire est donc faible. En revanche, d'un point de vue environnemental l'introduction d'une culture intermédiaire améliore de façon significative les résultats de la simulation. Globalement, tous critères confondus, il est donc quand même plus intéressant d'utiliser une culture intermédiaire avec du maïs plutôt que du maïs seul. La comparaison maïs irrigué/sec montre que l'irrigation pénalise fortement la performance énergétique de la simulation et dans une moindre mesure la performance environnementale mais est avantageuse d'un point de vue économique car permet un gain de productivité de biomasse.

Au-delà des calculs et des résultats, la valeur ajoutée de cette étude porte principalement sur la diffusion des connaissances actuelles sur l'utilisation de cultures en co-digestion et sur la démarche adoptée – intégration des points de vues énergétique, économique, environnemental (y compris d'émissions de gaz à effet de serre) et de compétition avec la production alimentaire. Le tableur qui a été construit pour cette étude peut ainsi assez facilement évoluer vers un véritable outil d'aide à la décision sur les choix d'espèces ou d'itinéraires techniques à adopter pour optimiser l'utilisation de cultures en co-digestion. Il serait intéressant de réaliser des simulations avec des itinéraires techniques innovants, afin de faire progresser la réflexion sur l'utilisation de cultures en co-digestion. Par exemple on pourrait envisager de simuler les résultats de l'utilisation de :

- variétés de maïs ou de sorgho à cycle court derrière une céréale immature,
- cultures dérobées dans un itinéraire optimisé pour la production de biomasse,
- couverts végétaux à fort rendement biomasse utilisés en TCS ou semis-direct

Les réflexions sur l'utilisation « intelligente » de cultures végétales en codigestion agricole n'en sont qu'à leurs prémices ; dans la mesure où l'on ne souhaite pas reproduire le modèle de l'Europe du nord (Allemand en particulier). L'absence de données spécifiques sur des scénarios de production végétale à destination de la méthanisation montre la nécessité de mettre en place un programme d'actions d'envergure nationale. Le regroupement d'acteurs serait bénéfique dans la mesure où cette thématique demande des compétences multiples qui n'existent pas au sein d'un seul organisme. Cela permettrait également un partage des données à l'échelle nationale pour aller plus vite, plus loin et plus efficacement dans l'obtention d'itinéraires les plus adaptés à la filière tant techniquement qu'économiquement. Ce genre de programme permettrait également d'approfondir les connaissances sur l'intérêt d'une espèce végétale et l'influence du stade de maturité sur l'expression de son potentiel méthanogène.

Ainsi il est indispensable de considérer que l'utilisation de culture énergétique en méthanisation est à l'interface de l'ingénierie agronomique du végétal, du machinisme et des technologies agricoles ainsi que du génie des procédés lié à la codigestion.

Annexe 1 : Liste des références bibliographiques

- Agrice. *Sorghos*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 8 p.
- Agrice. *Triticale plante entière*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 4 p.
- Agrice. *Résidus de cultures : Paille de céréales*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 6 p.
- Agrice. *Blé plante entière*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 4 p.
- Agrice. *dactyle*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 4 p.
- Agrice. *fétuque*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 5 p.
- Agrice. *luzerne*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 6 p.
- Agrice. *miscanthus sinensis*. s.l. : ADEME, ITCF, 1998, 8 p.
- Alliance environnement. *Evaluation de l'impact sur l'environnement des OCM et des mesures de soutien direct relatives aux cultures arables : Rapport final, annexe environnement*. s.l. : s.n., 2007, 58 p.
- Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, Machmuller A, Hopfner-Sixt K, Bodiroza V, Hrbek R, Friedel J, Potsch E, Wagentristl H, Schreiner M, Zollitsch W. «Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations». In : *Bioresource Technology*. s.l. : Elsevier, 2006. pp. 3204-3212.
- Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, Zollitsch W. «Agriculture, Ecosystems and Environment Biogas production from maize and dairy cattle manure» : Influence of biomass composition on the methane yield. In : *Agriculture, Ecosystems and Environment*. s.l. : Elsevier, 2006. pp. 173-182.
- Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Zollitsch W., Pötsch E., Mayer K. *Biogas production from maize and clover grass estimated with the methane energy value system*. s.l. : Department of Sustainable Agricultural Systems, Division of Agricultural Engineering, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 4 p.
- Amon T., Machmüller A., Kryvoruchko V., Milovanovic D., Hrbek R., Eder M.W., Stürmer B. *Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark : Endbericht Forschungsprojekt Nr. 1421 BMLFUW*. s.l. : Universität für Bodenkultur Wien, 2007, FA13B-80.26-1/04-G2, 104 p.
- Amon, T. (coord.). *Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem*. Wien, Österreich : Universität für Bodenkultur, Wien, 2006, 201 p.
- APESA. *Méthanisation et production de biogaz ; Etat de l'art*. s.l. : s.n., 2007, 1, 37 p.
- Bensmann M. «End of the boom». *new energy*, 2007, 3 p.
- Boatman N., Stoate C, Gooch R., Carvalho C.R., Borralho R., de Snoo G., Eden P. *The environmental impacts of arable crop production in the EU : practical options for improvement*. Bruxelles : Allerton research and educational trust en collaboration avec Eurinco Ltd, ERENA et Leiden University, pour la Commission européenne DG Environnement, 1999, 179 p.
- Böhmel C. «Energiepflanzen für die Biogaserzeugung». In : *Energie aus Biomasse*. s.l. : Springer Verlag, 2008.
- Böhmel C, Claupein W. «High quality production of energy maize (*Zea mays* L.) in crop rotation systems – biomass and methane yields and environmental impacts». *European Journal of Agronomy*, 2007, pp. 65-88.
- Carrouée B. (coord.). *Effets environnementaux des protéagineux dans les rotations de grandes cultures : Synthèse des éléments bibliographiques disponibles*. s.l. : UNIP, 2002, 33 p.
- Cattin G., Guichard L., Jannot P., Justes E., Laurent F., Machet J-M. *Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles : Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture*. s.l. : Comité français d'études et de développement de la fertilisation raisonnée (Comifer), 2002, 41 p.
- Chambre d'agriculture de Charente. *Maïs Biomasse*. s.l. : s.n., 2 p.
- Chambre d'agriculture de Charente. *Sorgho Biomasse*. s.l. : s.n., 2 p.
- Charru M., Couturier C., Labeyrie P., Lhermitte M., Floderer M. *Bilans énergétique, économique, écologique des filières méthane-carburant issu de la biomasse agricole*. s.l. : Solagro, 263 p.
- Collectif. *La méthanisation à la ferme*. s.l. : Ademe, Trame, Aile, Solagro, 2006, 16 p.

Couturier C. *Note pour les comités opérationnels 10 (Energies renouvelables) et 15 (agriculture)*. s.l. : Solagro/Comité de liaison des énergies renouvelables (CLER), 14 p.

Cozannet H. «Coûts d'implantation des couverts végétaux». *Anjou Cultures*, 2006, (111), 2 p.

De Vallavieille-Pope C., Belhaj Fraj M., Mille B., et Meynard J.M. «Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies». *Dossier de l'environnement de l'INRA*, 2006, (30), pp 101-109.

EDEN (Energie-Développement-Environnement). *Manuel de mise en place d'une installation agricole de méthanisation : Version préliminaire*. s.l. : s.n., 2008, 66 p.

European Environment Agency. *Integration of environment into EU agriculture policy : The IRENA indicator based-assessment report*. Copenhagen : EEA, 2006. 60p.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). *Biogas Basisdaten Deutschland*. s.l. : s.n., 2008, 7 p.

Féménias A., Bouvier M., Balny P., Jaujay J. *Évaluation des conditions de développement d'une filière de méthanisation « à la ferme » des effluents d'élevage*. s.l. : IGE, CGAAER, 2008, 67 p.

Heiermann M., Plöchl M. *Crops – a big potential for biogas production*. Potsdam : s.n., 5 p.

IFIP Institut technique du porc. «Exploitations porcines : croissance et spécialisation» : La Synthèse. *Baromètre Porc*, 2007, (367), 1 p.

Ilari, E. «L'élevage de porcs en France : pas de modèle unique mais une diversité de systèmes». *Techniporc*, 2004, 27 (6), pp. 19-28.

Kompetenzzentrum Hessenrohstoffe (HERO) e.V. *Biogasanlagen*. s.l. : s.n., 2008, 2 p.

Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S. (coord.). *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France : Impacts des TCSL sur le ruissellement et l'érosion*. s.l. : ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOMIFVV, 2007, 400 p.

Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M. (ed.). *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies : Expertise scientifique collective, synthèse du rapport*. France : INRA, 2008, 38 p.

Leterme P., Ballu S., Ferchaud F. (coord.). *Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins-versants: synthèse des références applicables au contexte breton*. s.l. : Agrocampus - CEVA (centre d'étude et de valorisation des algues), 2006, 132 p.

Maendy F. *Energiepflanzen zur Erzeugung von Biogas - eine Übersicht*. Straubing : s.n., 2007, 8 p.

Ott M. *Biogas in Germany*. Bangkok : German Biogas Association, 2006, 44 p.

Pellmeyer J. *Biogas im Einklang der Ökologie und Ökonomie*. s.l. : Fachverband Biogas e.V., 48 p.

Pointereau P., Bisault L. *La monoculture et ses dangers pour l'environnement*. s.l. : Solagro / Agreste, 2006, 4 p.

Pouech P., Fruteau H., Bewa H. *Agricultural crops for biogas production on anaerobic digestion plants*. s.l. : Solagro, Steinmuller Valorga, Ademe, 1998, 3 p.

Pouech P., Roesh L., Fruteau H., Charru M. *Methane Production From Various Agricultural Crops*. Harrogate (UK) : Solagro, Steinmuller Valorga, 1997, 4 p.

Pouech, P. *Principales caractéristiques des digestats*. In : Journée technique nationale du 7 octobre 2008 organisée par l'ADEME : « Réussir un projet de méthanisation associant des déchets ménagers agricoles et industriels. Les points clés. », Paris, 07/10/2008, 6 p.

Pouech, P. *Intérêt des digestats et possibilités de valorisation*. In : Ateliers d'échange sur les aspects techniques et réglementaires de la méthanisation de la biomasse, Pau, 23/10/2007,

Prochnow A., Heiermann M., Drenckhan A., Schelle H. «Seasonal Pattern of Biomethanisation of Grass from Landscape management». *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, 2005, VII, 17 p.

Schattauer A., Weiland P. «Beschreibung ausgewählter Substrate». In : *Handreichung: Biogasgewinnung und -nutzung*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2006. 11 p.

Schumacher B., Böhmel C., Oechsner H., Jungbluth T., Claupein W. *Crop rotation systems for biogas production*. s.l. : University of Hohenheim (State Institute of Farm Machinery and Farm Structures, Institute for Crop Production and Grassland Research, Institute for Agricultural Engineering), 2006, 18 p.

Stinner P.-W., Deuker A. *Biogaserzeugung: Erweiterung pflanzenbaulicher Möglichkeiten*. s.l. : Universität Giessen, 2006, 6 p.

Strauss C. (coord.). *Standortangepasste Anbau-systeme für Energiepflanzen : Erste Ergebnisse des Verbundprojektes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands*. s.l. : Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 2008, 84 p.

Vetter A. (coord.). *Ergebnisstand 2007 zum Verbundprojekt: Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands*. s.l. : s.n., 2008, 28 p.

Vullioud P. «Assolement et rotation des grandes cultures» : Rotation des cultures en terres assolées. *Revue suisse agricole*, 37 (4), 3 p.

Annexe 2 : Liste des couverts environnementaux préconisés dans le cadre des BCAA

En bord de cours d'eau		En dehors des cours d'eau		
Hors zones vulnérables	En zones vulnérables	Objectif : favoriser les auxiliaires de culture et la biodiversité	Objectif : érosion	Objectif : phytosanitaires et nitrates
Il est recommandé de mélanger les espèces figurant ci-dessous				
Une ou plusieurs espèces listées prédominantes	Une ou plusieurs espèces listées prédominantes	Plusieurs espèces listées prédominantes dont une graminée prairiale et une légumineuse	Une ou plusieurs espèces listées prédominantes	Plusieurs espèces listées prédominantes, dont 2 graminées fourragères
Luzerne (L) Dactyle (G) Fétuque des prés (G) Fétuque élevée (G) Fétuque rouge (G)- (A) Fléole des prés (G) Lotier corniculé (L) Minette (L) - (A) Ray Grass anglais (G) Ray-grass hybride (G) Sainfoin (L) Trèfle blanc (L)	Luzerne (L) Dactyle (G) Fétuque des prés (G) Fétuque élevée (G) Fétuque rouge (G)- (A) Fléole des prés (G) Ray-grass anglais (G) Ray-grass hybride (G)	Luzerne (L) Dactyle (G) Fétuque des prés (G) Fétuque élevée (G) Fétuque rouge (G) - (A) Fléole des prés (G) Lotier corniculé (L) Ray-grass anglais (G) Ray-grass hybride (G) Sainfoin (L) Trèfle blanc (L) Trèfle de perse (L) - (A) Vesce commune (L) - (A) Vesce velue (L) - (A) Serradelle (L) - (A) Méillot (L) - (A) Couverts des MAE (0402, 1401, 1403) biodiversité, cynégétiques ou fleuries Couverts de gel environnement faune sauvage	Luzerne (L) Dactyle (G) Fétuque des prés (G) Fétuque élevée (G) Fétuque rouge (G)- (A) Fléole des prés (G) Lotier corniculé (L) Ray-grass anglais (G) Ray-grass hybride (G) Trèfle blanc (L) Brome cathartique (G) Brome sitchensis (G)	Luzerne (L) Dactyle (G) Fétuque des prés (G) Fétuque élevée (G) Fétuque rouge (G)- (A) Fléole des prés (G) Ray-grass anglais (G) Ray-grass hybride (G) Trèfle blanc (L) Brome cathartique (G) Brome sitchensis (G) Pâturin (G)
Couvert implanté de manière pérenne ou, à défaut, couvert présent la plus grande partie de l'année : période d'implantation et de travail du sol limité au 15 février – 1 ^{er} mai, du 1 ^{er} septembre au 15 octobre pour les espèces biodiversités				
A titre exceptionnel	Fétuque ovine (G) - (A) Trèfle de perse (L) - (A) Trèfle violet (L) - (A) Gesse commune (L) - (A) Trèfle incarnat (L) - (A) Trèfle d'Alexandrie (L) - (A) Pâturin (G)	Fétuque ovine (G) - (A) Pâturin (G)		
Recommandations de pratiques d'entretien et de localisations	Implanter des espèces couvrantes et étouffantes pour éviter la venue d'espèces indésirables			
	Eviter de déplacer chaque année les bandes enherbées			
		Ne pas semer d'espèces allochtones. Pas de broyage ou de fauche du 1 ^{er} mai au 15 juillet et si possible après la floraison.		Exporter le produit de la fauche
		Privilégier des formes de bandes		
		Coupure de grande parcelle	Thalweg	Le long des fossés et cours d'eau intermittents
		Logique de maillage : en bordure d'éléments fixes du paysage (haies, bosquets, etc.)	Lieux de démarrage d'érosion	Le long des fonds de thalwegs, bêtoures, bords de points d'eau, Zones d'alimentation des captages
		Objectif paysager : le long des chemins et des routes	Le long des fossés	Dans les zones d'infiltration préférentielle

Source : Annexe 1 de l'arrêté du 31 juillet 2006 du Ministère de l'agriculture

Annexe 3 : Notice explicative sur le fonctionnement du tableur de simulations

Présentation de l'outil de simulation et de son fonctionnement

Afin de déterminer l'intérêt économique et énergétique de l'utilisation de cultures énergétiques en co-digestion, un outil de simulation a été construit avec un tableur. A partir de données d'entrée sur la ou les culture(s) considérée(s), les surfaces engagées, l'itinéraire technique et le rendement à l'hectare des cultures, la principale rotation culturale, le tableur permet de simuler les résultats énergétiques, économiques et environnementaux de l'utilisation de ces cultures en co-digestion avec des effluents d'élevage et des déchets.

L'outil a été conçu pour comparer les résultats des différentes simulations (avec différentes cultures) à une situation de référence dans laquelle le méthaniseur fonctionne uniquement avec des effluents d'élevage et des déchets. Ce n'est donc pas tant la valeur absolue des résultats obtenus qui est intéressante que leur valeur relative par rapport à ceux de la situation de référence, et par rapport à ceux d'autres simulations (utilisant d'autres cultures).

Les résultats des simulations sont présentés sous la forme de nombreux indicateurs : de bilan énergétique, économique et environnemental, quantitatifs (énergie, économie, gaz à effet de serre) et qualitatifs (environnement). In fine ces indicateurs font l'objet d'une analyse multicritères permettant de comparer les résultats des différents scénarii entre eux en "additionnant" indicateurs quantitatifs et qualitatifs et en prenant aussi en compte la compétition avec l'alimentaire. L'analyse multicritères aboutit ainsi à une notation, qui évidemment est réductrice et peut être remise en cause mais qui permet de comparer les résultats des différentes simulations. Insistons encore une fois sur le fait qu'il ne s'agit pas ici d'établir le bilan énergétique/économique/ environnemental des scénarii dans l'absolu mais de comparer les bilans des scénarii.

Au stade actuel, l'outil n'est pas encore complètement opérationnel pour un utilisateur extérieur car tous les calculs ne se font pas automatiquement à partir des paramètres de saisie. Néanmoins, le tableur réalisé est une base avancée pour la création d'un véritable outil d'aide à la décision. Dans le cadre de la présente étude, il a été construit pour simuler les performances de différents scénarii d'utilisation de cultures en co-digestion, à la fois sur les plans énergétique, économique, d'émissions de GES, environnemental et sur le plan de la concurrence avec la production alimentaire.

1. Description et notice d'utilisation des fichiers

Chaque fichier est relatif à une simulation de rotations de cultures et l'utilisation d'une certaine quantité dans un scénario de codigestion. Les fichiers ont tous la même structure et une grande partie des calculs de bilan énergétique, économique et environnemental se fait automatiquement à partir des données d'entrée (onglets Paramètres-Simul_Général et Paramètres-Simul_ITK). Les résultats de ces bilans sont utilisés in fine dans une analyse multicritères permettant d'avoir un jugement global sur le scénario.

1.1. Principe de fonctionnement

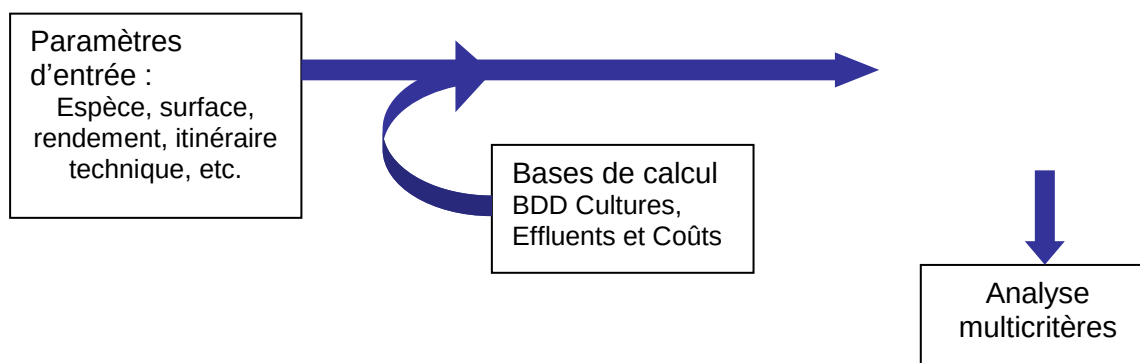


Figure 18 : Schéma simplifié de fonctionnement des fichiers de simulation

A côté de ce bilan quantitatif, un bilan environnemental qualitatif s'effectue sur la base des itinéraires techniques des cultures intervenant dans la simulation et de la rotation considérée.

Le fichier est alimenté par trois types de données :

- des données d'entrée ou paramètres de simulation renseignées par l'utilisateur de l'outil : cases roses ,
- des données pré-remplies à partir de la bibliographie ou de données de suivi de groupes d'agriculteurs (des Chambres d'agriculture) ou encore de données de l'enquête Pratiques culturales d'Agreste (2006) : cases vertes ,
- des données pré-remplies à dire d'expert par manque de données techniques ou bibliographiques : nous avons préféré identifié ce type de données auprès des utilisateurs, elles sont indiquées par des cases bleu turquoise.

1.2. Description du contenu de chaque onglet

❖ L'onglet "Paramètres-Simul_Général"

Il contient les données de base de la simulation choisie par l'utilisateur sur le fonctionnement du scénario de méthanisation choisi. C'est à ce niveau que l'opérateur va choisir :

- La nature et la part d'effluents d'élevages,
- les co-produits fermentescibles entrants dans le méthaniseur,
- la nature et la part de cultures énergétiques.

C'est à partir de ces options que seront calculées dans le tableur de calcul les performances du méthaniseur dans le scénario de référence (effluents d'élevage+coproduits) et dans la situation avec culture énergétique : scénario de référence + cultures.

Signalons qu'un bilan matière est calculé automatiquement ainsi qu'un pré-dimensionnement du digesteur.

❖ L'onglet "Paramètres-Simul_ITK"

Il contient les données de base sur l'itinéraire technique de la (des) culture(s) méthanisées dans chaque simulation. Dans la perspective de l'utilisation du tableur par des tiers, cet onglet pourra être rempli par l'utilisateur dans le cadre donné. En effet, comme pour les autres onglets, la structure et les variables utilisées dans l'onglet Paramètres_ITK doivent être rigoureusement les mêmes pour toutes les simulations. Nous avons donc retracé les grandes lignes qui constituent généralement un itinéraire technique dans le but qu'elles puissent s'appliquer à toutes les cultures (cadre commun).

Cependant, étant donné la variété des cultures étudiées et la variété des itinéraires techniques pratiqués, il est évident que ce travail de construction d'un cadre de commun a ses limites et que pour une culture donnée, les paramètres retenus ne sont pas forcément pertinents. De plus, il s'agissait aussi de présenter des paramètres relativement simples destinés à être utilisés par la suite pour réaliser les bilans de l'utilisation des cultures en co-digestion.

Les valeurs des paramètres ont été pré-remplies, dans la mesure du possible, à partir de données de suivi d'exploitations des Chambres d'agriculture (Cf. § □ sur les sources des données) ou bien à partir des résultats de l'enquête d'Agreste sur les pratiques culturales en 2006. La source des données est précisée pour chaque paramètre, dans la mesure du possible. Parfois, faute de donnée nous avons fait des estimations à partir des informations disponibles (données techniques, bibliographie).

On peut insister sur le fait que les valeurs présentées n'ont pas vocation à être considérées comme des valeurs de référence car il existe une grande variété d'itinéraires techniques, dépendant des conditions pédo-climatiques, des choix de agriculteurs, etc.

Concernant l'azote par exemple, pour une même culture, les apports peuvent varier fortement (p.ex. pour le maïs fourrage, d'après l'enquête Pratiques culturales d'Agreste, les apports moyens d'azote minéral varient entre 60 et 150 kgN/ha selon les régions, et ce sont des moyennes). De plus, il est important de noter que dans les itinéraires techniques les apports d'azote indiqués sont uniquement relatifs aux apports d'azote minéral, et proviennent dans la mesure du possible des résultats de l'enquête Pratiques culturales d'Agreste pour l'ensemble des régions enquêtées. Pour le maïs ensilage en particulier cela ne rend pas compte des apports totaux d'azote car une fumure organique est très couramment pratiquée. Afin de ne pas augmenter artificiellement les coûts de production liés à la fertilisation, il a été décidé de ne pas compter l'azote organique dans les apports d'azote. En revanche, l'épandage de fumier a été pris en compte dans les coûts liés à la mécanisation.

❖ *L'onglet Bilan_Production-culture*

Il regroupe les données des différents paramètres des ITK lorsque qu'une rotation est étudiée.

❖ *L'onglet "Coûts_cultures-utilisées"*

Il permet le calcul poste par poste des coûts de production et de récolte/stockage de la (ou les) culture(s) entrant dans la simulation.

❖ *L'onglet "Bilan Energie – GES"*

Dans cet onglet il s'agit d'effectuer un bilan simplifié à la fois de la consommation énergétique nécessaire à la production de la culture et d'autre part des émissions de gaz à effet de serre.

Pour cela l'onglet comprend deux modules de calcul séparés qui s'alimentent à partir des caractéristiques et des données de l'itinéraire culture considéré (onglet Bilan_Production-culture).

Pour l'estimation des dépenses énergétiques, les données de références sont issues de la bibliographie ou sont des estimations à dire d'experts.

Pour l'estimation des émissions de GES, les données de références (FE : facteur d'émission) sont issues de la bibliographie scientifique et notamment des données ADEME - Bilan Carbone®.

Ainsi pour le bilan simplifié énergie sont pris en compte :

- Pour les intrants : les quantités (en unité de masse) de différents intrants (engrais, pesticides, eau...)
- Pour les travaux : le nombre d'heure d'utilisation du matériel agricole lié à l'action (labour, semis, récolte...)
- Pour le transport : la distance du transport des matières végétales à l'installation de méthanisation ; exprimée en km (sur la base d'un transport tracteur+remorque). La distance de transport est choisie par l'opérateur dans l'onglet « Paramètres-Simul_Général ».
- Pour le stockage : la durée de confection du silo d'ensilage est prise en compte et permet d'évaluer la consommation en carburant d'un tracteur pour sa réalisation.

Pour le bilan simplifié de calcul des émissions de GES sont pris en compte :

- Pour les intrants, les travaux, le transport et le stockage : les mêmes éléments que pour le bilan énergétique.

❖ L'onglet "Bilan scenario"

Cet onglet permet de comparer un scénario de méthanisation avec et sans l'utilisation de culture végétale.

La démarche proposée vise à pouvoir évaluer l'impact de l'utilisation d'une culture sur les performances théoriques de la production de biogaz d'une installation fonctionnant en codigestion sur une base d'effluents d'élevage et de coproduits fermentescibles exogènes à l'exploitation agricole. Notre approche s'arrête avant la valorisation énergétique et se limite à la production d'énergie primaire associée à la production de biogaz. Il ne tient pas compte du procédé de méthanisation ni des différentes valorisations possibles du biogaz. L'un des objectifs de ce travail est de répondre à cette question : comment optimiser la production d'énergie (et la rentabilité des installations) en faisant varier le mélange cultures énergétiques/autres substrats tout en minimisant l'impact sur le milieu ?

Ainsi l'onglet est divisé en deux parties : un bilan du scénario sans culture et un bilan du scénario avec culture. Rappelons qu'à ce niveau nous considérons que les conditions de fonctionnement de l'installation de méthanisation sont assurées dans les deux situations.

Chaque bilan de scénario comprend un bilan matière (entrée/sortie sur matière sèche, matière organique et azote) et un bilan énergie. Ce dernier propose trois indicateurs :

- La production de méthane permise par le scénario étudié (quantité de méthane produit par an)
- La productivité du mélange (la quantité de méthane produite par tonne de mélange entrant dans l'installation ; cette valeur reflète la performance du mélange utilisé en termes de production de méthane et donc d'énergie potentiellement disponible pour une valorisation).
- L'énergie primaire : c'est la quantité d'énergie théoriquement valorisable contenu dans le biogaz produit tout au long de l'année.

Notons que ces indicateurs sont intéressants dans une comparaison entre les deux modalités de scénarios (avec/sans culture végétale).

Un troisième volet permet d'identifier plus spécifiquement la part que représente l'introduction de la culture énergétique et propose plusieurs volets avec des indicateurs qui permettront d'effectuer des comparaisons :

- Aspect énergie : quantité et part d'énergie produite par la culture ; calcul d'un indicateur d'efficacité énergétique = énergie primaire issue de la culture/énergie fossile consommée pour disposer de la culture
- Aspect environnement : quantité de GES émis pour disposer de la culture ; quantité de GES évitée par la substitution d'énergie dans un scénario cogénération (en supposant l'utilisation de la totalité de l'énergie produite liée à la culture) ; calcul d'un indicateur d'émissions nettes = quantité de GES émis pour produire la culture/quantité de GES évitée par la substitution d'énergie.
- Aspect économique : _coût de production de la matière première (issue de l'analyse ITK) et coût de revient de l'énergie primaire (ce coût est calculé sans tenir compte du mode de valorisation de l'énergie biogaz).

❖ L'onglet "Bilan environnemental"

La feuille Bilan environnemental est construite de la façon suivante : une table par culture avec des indicateurs relatifs à l'itinéraire technique utilisé, une table d'indicateurs pour la rotation considérée et une table récapitulative. L'idée dans ce bilan est de noter la "performance environnementale" (hors émissions de GES) des cultures dans la rotation considérée. Il s'agit d'une notation qualitative, arbitraire, mais basée sur des indicateurs objectifs.

Détail de la notation

Légende

Echelle des scores : 0 = pression nulle
 1 = pression faible
 2 = pression moyenne
 3 = pression forte

Pour les rotations, un score négatif (-1) a été ajouté, signifiant que l'impact des cultures peut être diminué si de bonnes pratiques de rotation culturale sont mises en place : mise en place d'un couvert végétal en hiver et diversité des espèces cultivées.

Pondération :

Nous avons introduit dans ce bilan la possibilité de pondérer les scores des différents indicateurs. La pondération tient compte :

- de la surface concernée (les impacts d'une fertilisation excessive sur l'environnement sont d'autant plus forts que la surface concernée est importante)
- de la sensibilité du territoire liée à chaque indicateur. Par exemple, le lessivage, le ruissellement, l'érosion hydrique des sols étant des risques majeurs sur l'ensemble du territoire, on met une note de pondération de 3 pour l'indicateur Présence d'un couvert végétal en hiver.

Score total :

	Fort impact global sur l'environnement : score supérieur à 20
	Impact global modéré sur l'environnement : score compris entre 5 et 20
	Faible impact global sur l'environnement voire effet positif : score inférieur à 5

Indicateurs cultures

a) Apport en azote minéral en unités d'azote (UN) ou kgN/ha/an :

- si les apports sont nuls, la note de l'indicateur est de 0,
- s'ils sont inférieurs à 50 unités d'azote (UN)/ha/an, la note de l'indicateur est de 1,
- s'ils sont compris entre 50 et 150 UN/ha/an, la note de l'indicateur est de 2,
- s'ils sont supérieurs à 150 UN/ha/an, la note de l'indicateur est de 3.

b) Utilisation de l'irrigation (Oui/Non) :

- si la culture est irriguée, la note de l'indicateur est de 1 (à pondérer selon la sensibilité régionale notamment),
- si la culture n'est pas irriguée, la note de l'indicateur est de 0.

c) Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type :

- s'il n'y a pas de traitement phytosanitaire, la note de l'indicateur est de 0,
- s'il y a un passage avec un ou plusieurs traitements, la note de l'indicateur est de 1,
- s'il y a deux ou trois passages, la note de l'indicateur est de 2,
- s'il y a plus de trois passages, la note de l'indicateur est de 3.

Indicateurs rotation

a) Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non) :

- si la rotation permet un couvert végétal en hiver, la note de l'indicateur est de -1,
- si la rotation laisse le sol nu en hiver, la note de l'indicateur est de 3.

Cet indicateur nous paraît essentiel ; une pondération maximale (3) lui a été affectée.

b) Cultures annuelles, pluriannuelles ou pérennes :

- si la culture considérée est pluriannuelle ou pérenne, elle a, a priori, un effet positif sur la structure et la qualité des sols, donc la note de l'indicateur est de -1.
- si la culture est annuelle, la note de l'indicateur est nulle.

c) Nombre de cultures différentes dans la succession – pour les cultures annuelles uniquement (si les cultures sont pluriannuelles ou pérennes, la note de l'indicateur est automatiquement nulle) :

- si la succession comprend deux espèces différentes, la note de l'indicateur est de 0,
- si une seule espèce est cultivée successivement, la note de l'indicateur est de 3.

Répetons que les "bornes" proposées pour la notation et les notes elles-mêmes sont arbitraires, elles découlent de dires d'experts et peuvent tout à fait être remises en question. Ce qu'on cherche à faire ici, c'est bien d'établir des indicateurs communs permettant de comparer les cultures entre elles.

❖ *L'onglet "Analyse multi-critères"*

Afin de comparer les performances des différents scénarii simulés en prenant en compte leurs performances énergétique, économique, environnementale, par rapport aux émissions de GES et à la concurrence avec l'alimentaire, une analyse multicritères a été réalisée pour chaque simulation. Les performances des scénarii dans les différents domaines, qui constituent les différents critères, sont notées de 1 à 10 (1 peu performant et 10 très performant). La note correspondant à chaque critère peut être pondérée selon l'importance que l'on accorde à chaque type de performance : par exemple, pour donner du poids au critère environnemental dans le choix des scénarii, on peut affecter à la performance environnementale une note de pondération élevée par rapport aux autres critères.

❖ L'onglet "BD Cultures"

Cet onglet regroupe les informations utiles aux simulations de méthanisation pour chaque culture. Les différents paramètres pris en compte sont les suivants :

- Composition en matière sèche et matière organique : permet de calculer les rendements de production de biogaz. Ces valeurs sont issues soit de la bibliographie, soit à dire d'experts.
- Teneur en azote : permet d'effectuer un bilan azoté de la culture.
- Rendement de production de biomasse : exprimé en tonne de matière sèche par hectare. Une fourchette min et max est proposée. Ces données sont issues de la littérature spécialisée, de données de suivi des réseaux des Chambres d'Agriculture et des Instituts Techniques. Etant donné le large éventail des conditions pédoclimatiques que l'on peut rencontrer sur le territoire national, ces informations peuvent être complétées et/ou modifiées par l'opérateur.
→ Signalons que des informations sont absentes par manque de données disponibles.
- Potentiel méthane : représente la production maximale possible par une culture donnée. Il est exprimé en norme mètre cube de méthane produit soit par tonne de matière organique, soit par tonne de produit brut.
- Productivité méthane : résulte du calcul de la quantité de méthane issue d'un hectare de culture.

Les cultures sont regroupées en quatre grandes catégories :

- Culture conventionnelle : culture végétale utilisée habituellement pour l'alimentation humaine ou animale.
- Culture intercalaire ou couverts végétaux : il s'agit d'espèces préconisées en interculture dans un objectif initial environnemental (limitation des lessivages et de l'érosion, maintien d'un couvert végétal...). Généralement ces cultures ne sont pas récoltées ; les rendements en matière sèche sont donnés à dire d'experts.
- Autres matières premières végétales : ces lignes regroupent d'autres sources potentielles de matière végétale utilisable en méthanisation.

Cette base de données cultures est alimentée par des valeurs issues de la bibliographie scientifique et technique.

❖ L'onglet "BD Effluents"

Cet onglet regroupe des données sur les effluents susceptibles d'être utilisés en méthanisation agricole. Ces valeurs sont issues de la bibliographie scientifique et technique. Il s'agit pas dans cet outil de regrouper une base de données exhaustive sur les effluents mais de disposer des informations utiles pour effectuer les simulations de codigestion afin notamment d'évaluer la part d'énergie supplémentaire apportée par une culture végétale par rapport à un scénario de mix organique. Les paramètres renseignés concernent :

- La composition biochimique en matière sèche, matière organique et azote afin de pouvoir faire un bilan matière simplifié.
- Le potentiel de production de méthane afin d'effectuer le bilan de production d'énergie primaire théorique.

Cette base de données peut être complétée avec d'autres substrats selon le scénario étudié.

❖ *L'onglet "Base calcul coûts"*

Cet onglet regroupe les données nécessaires aux calculs des coûts de production des différentes cultures simulées.

2. Détail de la notation des performances dans les différents domaines étudiés :

2.1. Performance énergétique

La performance énergétique est évaluée par le ratio entre l'énergie primaire issue de la méthanisation de la culture et l'énergie totale dépensée pour produire cette même culture. Plus ce ratio est élevé plus l'efficacité de la culture est intéressante.

Tableau 23 : Correspondance entre efficacité énergétique et note de performance énergétique

Classes – efficacité énergétique	Note de performance énergétique
>12	10
[11-12[	9
[10-11[	8
[9-10[	7
[8-9[	6
[7-8[	5
[6-7[	4
[5-6[	3
[4-5[	2
<4	1

1.1. Performance économique

Les résultats économiques se présentent sous la forme de deux indicateurs principaux : coût de revient de l'énergie produite (EUR/MWh) et coût de production de la biomasse (EUR/tMS). La performance économique a été calculée à partir du coût de revient de l'énergie primaire car il s'agit du résultat le plus important pour le bilan économique de l'utilisation de cultures en co-digestion.

Tableau 24 : Correspondance entre résultats économiques et performance économique

Classes – coût du MWh	Note de performance économique
< 30	10
[30-40[	9
[40-60[	8
[60-80[	7
[80-100[	6
[100-120[	5
[120-140[	4
[140-160[	3
[160-180[	2
>= 180	1

1.2. Performance en termes d'émissions de GES

Les émissions nettes correspondent à la différence entre les émissions de gaz à effet de serre émises lors de la production de la culture et la quantité de GES évités par la substitution d'énergie. Le calcul des GES évités par la substitution d'énergie est basé sur un scénario de valorisation du biogaz par cogénération (électricité et chaleur). La modalité du calcul est comparable à celle utilisée dans le logiciel DIGES.

Tableau 25 : Correspondance entre résultats économiques et performance économique

Classes – émissions nettes GES	Note de performance
<1500	10
[1500-2500[	9
[2500-3500[	8
[3500-4500[	7
[4500-5500[	6
[5500-6500[	5
[6500-7500[	4
[7500-8500[	3
[8500-9500[	2
>9500	1

1.3. Performance environnementale

Le bilan environnemental établit déjà un barème, il note la pression environnementale, positive (notes <0) et négative (notes >0). Il s'agit de traduire cette note de pression environnementale en note de performance environnementale en prenant comme borne de performance maximale (10) la note de pression minimale (-5) et comme borne minimale (0) la note de pression maximale constatée (27). Si on le souhaite on peut automatiser cette correspondance entre pression et performance environnementale en définissant 10 classes de performance à partir du barème de pression (allant de -5 à 46 avec la pondération utilisée). Cela ne nous a pas paru souhaitable pour l'exercice demandé car cela ne permet pas d'introduire un jugement d'expert dans la notation de la performance.

La notation de performance utilisée est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 26 : Notes de performance environnementale

	Note (de -5 à 46)	Niveau correspondant	Performance (de 1 à 10)
Bandes enherbées – Ray-grass italien	-5	Neutre à positif	10
Prairie temporaire fertilisée – Ray-grass italien	-1	Neutre à positif	9
Trèfle incarnat en dérobé	-3	Neutre à positif	9
Avoine diploïde en dérobé non fertilisé (en ZAC Directive nitrate par exemple)	-3	Neutre à positif	9
Avoine diploïde en dérobé fertilisé	1	Faiblement négatif	8
Triticale en rotation Maïs/Triticale	10	Négatif	5
Blé en rotation Colza/Blé	12	Négatif	5
Sorgho en rotation Sorgho/Blé	4	Faiblement négatif	7
Maïs en rotation Maïs/Maïs avec culture intermédiaire non fertilisée (en ZAC Directive nitrate par exemple)	12	Négatif	5
Maïs en rotation Maïs/Maïs avec culture intermédiaire fertilisée	14	Négatif	5
Maïs non irrigué en rotation Maïs/Maïs	25	Très négatif	2
Maïs irrigué en rotation Maïs/Maïs	27	Très négatif	1

Tableau 27 : Correspondance entre notes de bilan environnemental et performance environnementale

Classes de notes de bilan environnemental	Performance
< -3	10
de -3 à 0 (inclus)	9
de 1 à 3 (inclus)	8
de 4 à 6 (inclus)	7
de 7 à 9 (inclus)	6
de 10 à 11 (inclus)	5
de 12 à 14 (inclus)	4
de 15 à 20 (inclus)	3
de 21 à 25 (inclus)	2
> 25	1

1.4. Performance "éthique" (concurrence avec l'alimentaire)

Pour les cultures dites conventionnelles, la compétition avec l'alimentaire est maximale donc les scénarii utilisant ces cultures en co-digestion sont peu performants sur ce plan, et pas du tout pour les scénarii n'utilisant que des cultures conventionnelles. A l'inverse le scénario utilisant les produits de fauche des bandes enherbées est très performant sur le plan "éthique" car les bandes enherbées sont très rarement valorisées en général, y compris en alimentation (animale). Les scénarii à base de cultures dérobées se placent entre les deux, avec un risque de concurrence avec l'alimentaire faible à modéré. Nous avons donc utilisé le système de notation suivant :

- Scénario Bandes enherbées : 10,
- Scénarii Cultures dérobées seules : 7,
- Scénario Culture conventionnelle + culture dérobée : 4,
- Scénarii Culture conventionnelle et prairie : 2 (nous considérons que l'agriculteur a plus de 20 ha et continue malgré tout de produire pour l'alimentaire).

2. Glossaire / Table des abréviations

- CIPAN : Culture intermédiaire piège à nitrates
- EUR : Euros
- FE : Facteur d'émission de gaz à effet de serre ; exprimé en tonne équivalent CO₂.
- ha : hectares
- km : kilomètre
- m³ : mètre cube
- MB : Matière brute
- MJ : Méga Joule = 1000000 Joules
- MS : Matière sèche
- MWh : Méga wattheures = 1000 kWh
- Nm³ : normo mètre cube (volume de gaz ramené aux conditions normales de température et de pression ; 0°C ; 1atm)
- t : tonnes
- t éq. CO₂ : tonne équivalent CO₂
- UN : unités d'azote représentant un apport organique ou minéral équivalent à un kg d'azote par hectare.

- UTA : unité de travail annuel. Unité de mesure de la quantité de travail humain fourni sur chaque exploitation agricole. Elle équivaut au travail d'une personne travaillant à temps plein pendant une année.

3. Sources des données utilisées

- Sur les itinéraires techniques et les coûts de production

Source	Types de données (variables)	Cultures
Données disponibles		
Réseaux d'élevage Rosace Lait Centre et Allier: Chambres d'agriculture du Centre, CAIAC et Institut de l'élevage, 15 sept. 2008 :	Coûts de production totaux (intrants, mécanisation, stockage) et rendement MS	Maïs-fourrage ensilé
	Coûts de production totaux (intrants, mécanisation, stockage) et rendement MS des coupes	Prairie temporaire ensilée + foin + pâture 2 coupes : la 1 ^{ère} est ensilée et la 2 ^{ème} utilisée pour faire du foin, le reste est pâturé
	Coûts de production totaux (intrants, mécanisation, stockage) et rendement en grain	Céréales à paille (récolte grain)
Chambre d'agriculture de Loire- Atlantique (E. Merot)	Charges opérationnelles, mécanisation et rendement en grain	Maïs grain
	Charges opérationnelles, mécanisation et rendement en grain et en paille	Blé, Triticale (grain)
	Charges opérationnelles, charges fixes affectables non désagrégées (récolte exclue) et rendement MS	Prairies pâturées
	Charges opérationnelles, mécanisation et rendement en grain	Colza Tournesol
Chambre d'agriculture de l'Indre (M. Féret, J-P Nicolet)	Marges brutes – charges opérationnelles et rendement (enquête réalisée auprès d'agriculteurs céréaliers de groupes de développement pour la récolte 2008)	Colza, Blé et Orge d'hiver
Chambre d'agriculture de Bretagne (JM Seuret, P. Cadoret)	Charges opérationnelles (consommations intermédiaires et travaux par tiers)	Maïs-fourrage
		Herbe
Chambre d'agriculture de Loire- Atlantique (JC Huchon)		Ray-grass italien en dérobé
Chambres d'agricultures de Rhône-Alpes	Coûts d'implantation et de destruction (pas de coûts de récolte)	Couvert végétal en interculture
Caussade semences	Dose de semis et rendements de nombreuses cultures dérobées	Différentes variétés
Chambre d'agriculture du Tarn	Coûts variables spécifiques et marges brutes de cultures d'été, 2008	Maïs irrigué, Tournesol sec, Sorgho sec et irrigué et Soja sec et irrigué
Chambre d'agriculture de Maine-et-Loire	Coûts d'implantation de couverts végétaux	Différentes variétés
Chambre d'agriculture de Haute-Garonne	Marges brutes 2007, coûts variables spécifiques et doses d'engrais /ha	Cultures d'été : Maïs grain irrigué, Tournesol, Sorgho irrigué, Soja irrigué ; Cultures d'hiver : Blé dur en sec et irrigué, Blé

Source	Types de données (variables)	Cultures
		tendre, Colza, Orge, Pois en sec et irrigué, Blé tendre de qualité, Féverole, Triticale, Orge de brasserie, Avoine
Chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées	Marges brutes et quelques données désagrégées issues d'enquêtes auprès d'agriculteurs sur les principales grandes cultures pratiquées en Midi Pyrénées	Tournesol, Blé tendre, Blé de force, Blé dur, Colza, Maïs irrigué, Soja irrigué

- Sur les aspects méthanisation, bilan énergétique et GES

Potentiels méthane : données issues d'articles scientifiques (voir biblio et rapport).

Composition biochimique des cultures : tables d'alimentation des bovins, ovins, caprins de l'INRA (1988).

Bilan énergétique : Référentiel pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole, méthode PLANETE (ENESAD/ADEME).

Facteurs d'émissions de GES : méthode Bilan Carbone de l'ADEME.

Annexe 4 : Tableur de calcul

L'annexe est séparée du rapport, elle se présente sous la forme de fichiers Excel avec un fichier par simulation.

Annexe 5 : Fiches synthèses des simulations

Tableau des simulations rotations cultures

Catégories	Cultures utilisées en co-digestion (sous forme d'ensilage de plante entière)	Type de rotation	N° simulation
Bandes enherbées	RGI	pluriannuel	1
Cultures dérobées	Trèfle incarnat	nombreuses rotations	2
	Avoine diploïde	nombreuses rotations	3
Prairie	RGI	nombreuses rotations	4
Sorgho	Sorgho grain	Sorgho/blé	5
	Sorgho biomasse	Sorgho/blé	6
Céréales	Blé	Colza/Blé	7
	Triticale	Maïs/Triticale	8
Maïs	Maïs non irrigué	Maïs/Maïs sans culture dérobée	9
	Maïs irrigué	Maïs/Maïs sans culture dérobée	10
	Maïs+culture dérobée	Maïs/Maïs avec culture dérobée	11

COUVERTS ENVIRONNEMENTAUX

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 1	
type rotation		bandes enherbées	
culture en méthanisation		RGI	
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3 / tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
ray grass d'Italie (ensilé)	tMB	33	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	4633	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4633	4171
matière sèche	t	1185	723
matière organique	t	941	479
azote	t	24.9	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	288815	
productivité	m3 / tMB	62.3	
énergie primaire	MWh	2871	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	29.6	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	1.0%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	4	
efficacité énergétique		7.1	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	177	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	1.0	
émissions nettes	t éq.C	175.6	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	126.4	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	41.0	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	34.2	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)*simulation n°* **1****Culture considérée :** ray grass d'Italie (ensilé)

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	0	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	0	Fichier Itinéraire technique	0	3	0
Total					0

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Ray-grass d'Italie

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1, 0, 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	pluriannuelles	Fichier Itinéraire technique	-1	2	-2
Nombre de cultures différentes dans la rotation	1	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-5
Somme des indicateurs culture					0

SCORE GLOBAL**-5**

Echelle score :

- 0 = pression nulle
- 1 = pression faible
- 2 = pression moyenne
- 3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement
Impact global modéré sur l'environnement
Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***1**

type rotation

bandes enherbées

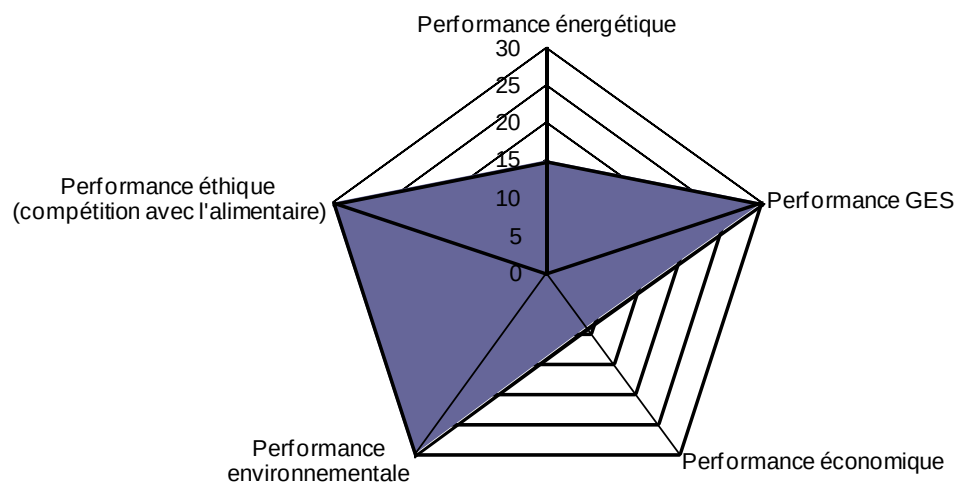
culture en méthanisation

RGI

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	5	3	15
Performance GES	10	3	30
Performance économique	3	3	9
Performance environnementale	10	3	30
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	10	3	30
TOTAL			114

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 4	
type rotation	Prairie		
culture en méthanisation	RGI		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
ray grass d'Italie (ensilé)	tMB	622	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5222	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5222	4676
matière sèche	t	1327	781
matière organique	t	1071	524
azote	t	25.6	24.3
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	341666	
productivité	m3/tMB	65.4	
énergie primaire	MWh	3396	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	554.9	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	19.5%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	52	
efficacité énergétique		10.6	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	2319	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	18.1	
émissions nettes	t éq.C	2300.6	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	72.0	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	769.5	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	19.5	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)simulation n° **4**

Culture considérée : ray grass d'Italie (ensilé)

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	80	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	0	Fichier Itinéraire technique	0	3	0
Total					4

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Ray-grass d'Italie/Ray-grass d'Italie

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1, 0, 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	pluriannuelles	Fichier Itinéraire technique	-1	2	-2
Nombre de cultures différentes dans la rotation	1	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-5
Somme des indicateurs culture					4

SCORE GLOBAL**-1**

Echelle score :

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Légende:

Score :

Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

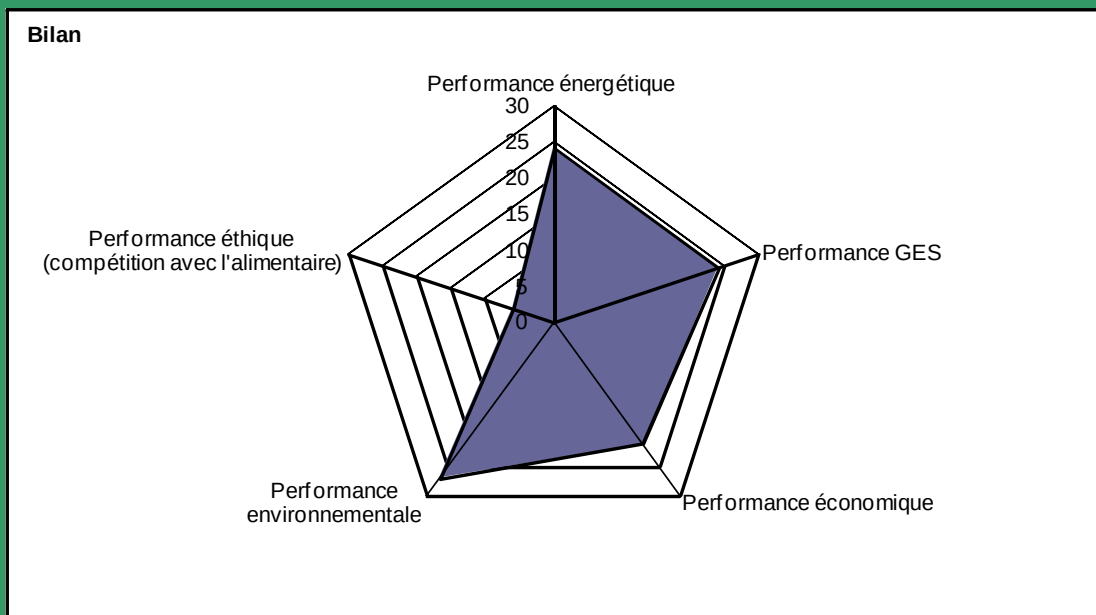
Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***4**type rotation
culture en méthanisationPrairie
RGI

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	8	3	24
Performance GES	8	3	24
Performance économique	7	3	21
Performance environnementale	9	3	27
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			102

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant



CULTURES DEROBEEES

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 2	
type rotation		Cultures dérobées	
culture en méthanisation		Trèfle incarnat	
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
Trèfle incarnat	tMB	333	
	0	tMB	0
	0	tMB	0
	0	tMB	0
TOTAL	tMB	4933	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4933	4446
matière sèche	t	1237	750
matière organique	t	987	500
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	304528	
productivité	m3/tMB	61.7	
énergie primaire	MWh	3027	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	185.8	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	6.5%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	42	
efficacité énergétique		4.5	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	1766	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	6.1	
émissions nettes	t éq.C	1760.0	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	143.1	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	0.0	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	46.2	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)simulation n° **2**

Culture considérée : Trèfle incarnat

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	0	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	0	Fichier Itinéraire technique	0	3	0
Total					0

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : /Trèfle incarnat/

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1, 0, 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					0

SCORE GLOBAL**-3**

Echelle score :

Légende:

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***2**

type rotation

Cultures dérobées

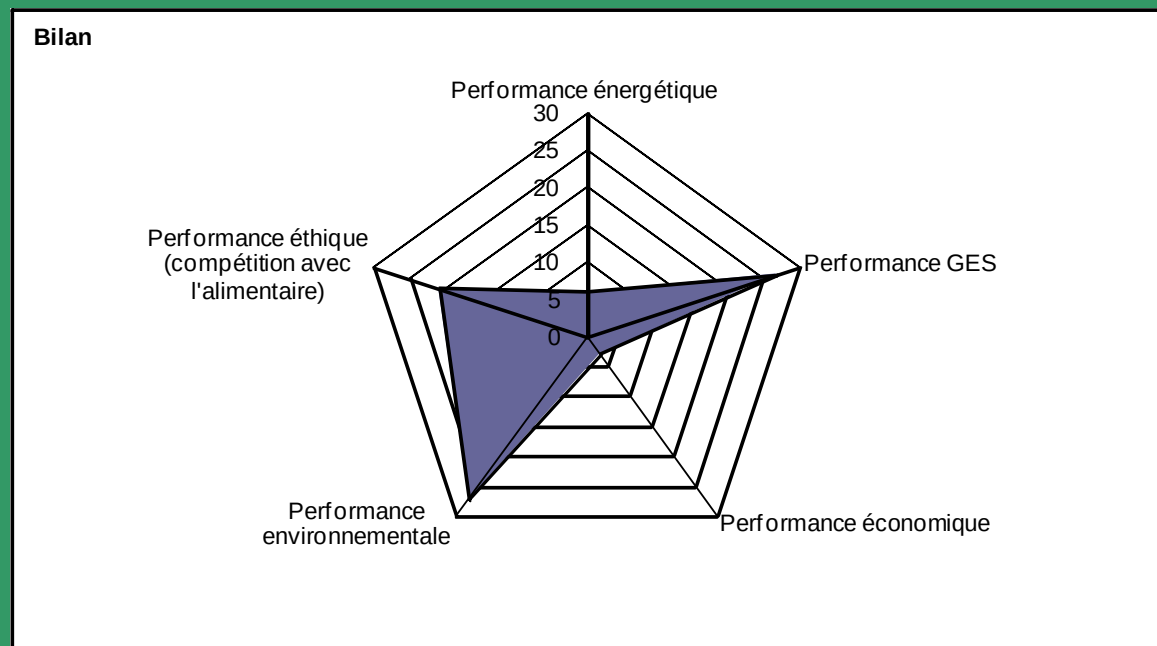
culture en méthanisation

Trèfle incarnat

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	2	3	6
Performance GES	9	3	27
Performance économique	1	3	3
Performance environnementale	9	3	27
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	7	3	21
TOTAL			84

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant



BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 3	
type rotation		cultures dérobées	
culture en méthanisation		avoine diploïde	
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
avoine diploïde	tMB	262	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	4862	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4862	4352
matière sèche	t	1277	767
matière organique	t	1027	517
azote	t	25.9	24.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	318946	
productivité	m3/tMB	65.6	
énergie primaire	MWh	3170	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	329.1	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	11.6%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	59	
efficacité énergétique		5.6	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	3338	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	10.7	
émissions nettes	t éq.C	3327.1	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	96.5	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	997.4	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	29.3	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)*simulation n°* **3****Culture considérée :** avoine diploïde

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	60	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	0	Fichier Itinéraire technique	0	3	0
Total					4

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : /Avoine diploïde/

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1, 0, 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					4

SCORE GLOBAL**1**

Echelle score :

Légende:

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION**simulation n° 3**

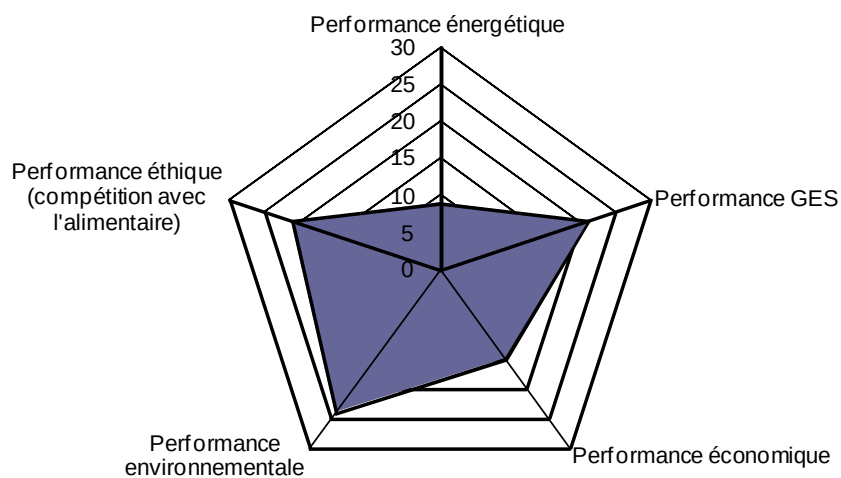
type rotation
culture en méthanisation

cultures dérobées
avoine diploïde

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	3	3	9
Performance GES	7	3	21
Performance économique	5	3	15
Performance environnementale	8	3	24
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	7	3	21
TOTAL			90

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

CULTURES

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 5	
type rotation	Sorgho/blé		
culture en méthanisation	sorgho grain		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
sorgho grain	tMB	815	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5415	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5415	4834
matière sèche	t	1397	817
matière organique	t	1141	560
azote	t	27.4	26.0
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	362768	
productivité	m3/tMB	67.0	
énergie primaire	MWh	3606	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	764.7	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	26.9%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	78	
efficacité énergétique		9.9	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	4229	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	24.9	
émissions nettes	t éq.C	4204.3	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	59.9	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	2477.0	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	17.2	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)

simulation n°

5

Culture considérée : sorgho grain

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	60	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	1	Fichier Itinéraire technique	1	3	3
Total					7

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Sorgho grain/Blé

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					7

SCORE GLOBAL**4**

Echelle score :

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement



Impact global modéré sur l'environnement



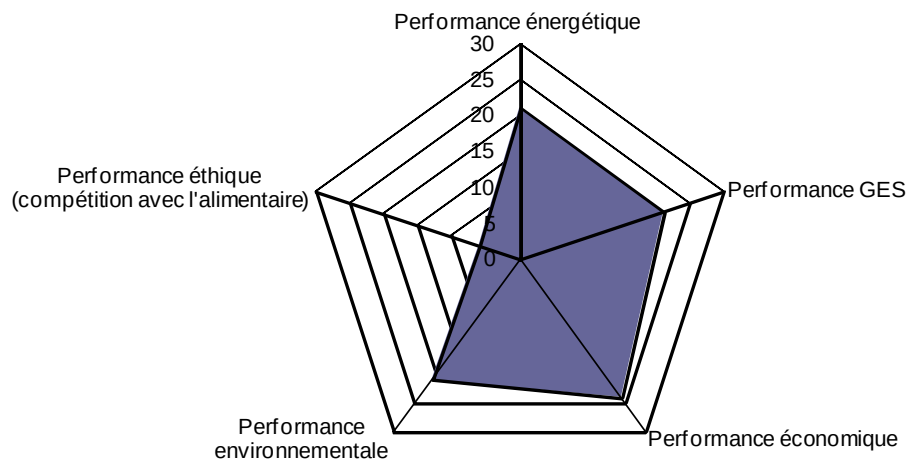
Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***5**type rotation
culture en méthanisationSorgho/blé
sorgho grain

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	7	3	21
Performance GES	7	3	21
Performance économique	8	3	24
Performance environnementale	7	3	21
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			93

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n°		6
type rotation	Sorgho biomasse	Blé		
culture en méthanisation	Sorgho biomasse			
SCENARIO REFERENCE (sans culture)				
Matière première entrant en méthanisation				
lisier bovin	tMB	2500		
fumier bovin	tMB	900		
graisses d'abattoir	tMB	400		
issues de céréales	tMB	800		
TOTAL	tMB	4600		
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie	
matière brute	t	4600	4143	
matière sèche	t	1177	720	
matière organique	t	934	477	
azote	t	24.8	23.6	
Bilan énergie de l'unité de méthanisation				
production méthane	m3	285838		
productivité	m3 / tMB	62.1		
énergie primaire	MWh	2841		
SCENARIO AVEC CULTURE				
Matière première entrant en méthanisation				
lisier bovin	tMB	2500		
fumier bovin	tMB	900		
graisses d'abattoir	tMB	400		
issues de céréales	tMB	800		
sorgho biomasse	tMB	1462		
	0	tMB	0	
	0	tMB	0	
	0	tMB	0	
TOTAL	tMB	6062		
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie	
matière brute	t	6062	5396	
matière sèche	t	1617	952	
matière organique	t	1352	687	
azote	t	27.7	26.3	
Bilan énergie de l'unité de méthanisation				
production méthane	m3	415836		
productivité	m3 / tMB	68.6		
énergie primaire	MWh	4133		
PERFORMANCES CULTURES				
Aspect énergie				
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	1292.2		
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	45.5%		
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	89		
efficacité énergétique		14.5		
Aspect GES				
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	4533		
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	42.1		
émissions nettes	t éq.C	4491.4		
Aspect économique				
coût de production de la matière première	€/tMS	32.0		
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	2777.4		
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	10.9		

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)*simulation n°* **6****Culture considérée** sorgho biomasse

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	60	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	1	Fichier Itinéraire technique	1	3	3
Total					7

Culture considérée :

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Sorgho biomasse/Blé

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (-1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					7

SCORE GLOBAL **4****Echelle score :**

- 0 = pression nulle
- 1 = pression faible
- 2 = pression moyenne
- 3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***6**

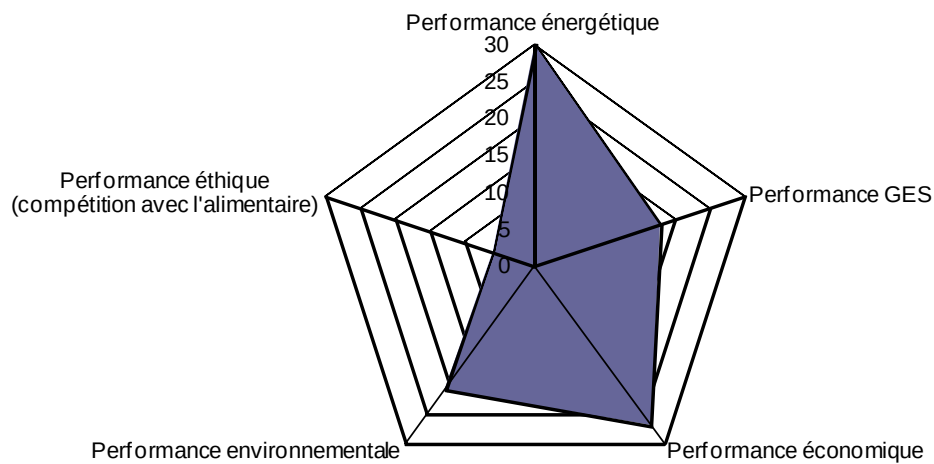
type rotation
culture en méthanisation

sorgho biomasse/blé
sorgho biomasse

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	10	3	30
Performance GES	6	3	18
Performance économique	9	3	27
Performance environnementale	7	3	21
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			102

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 7	
type rotation	colza / blé		
culture en méthanisation	blé		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
blé (vert)	tMB	649	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5249	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5249	4676
matière sèche	t	1417	844
matière organique	t	1157	584
azote	t	27.5	26.1
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	358155	
productivité	m3/tMB	68.2	
énergie primaire	MWh	3560	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	718.8	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	25.3%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	132	
efficacité énergétique		5.4	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	9077	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	23.4	
émissions nettes	t éq.C	9053.6	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	88.4	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	2569.6	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	29.5	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)simulation n° **7**

Culture considérée : blé (vert)

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	165	Fichier Itinéraire technique	3	2	6
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	6	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Total					15

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Colza/Blé

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					15

SCORE GLOBAL **12**

Echelle score :

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation***7**

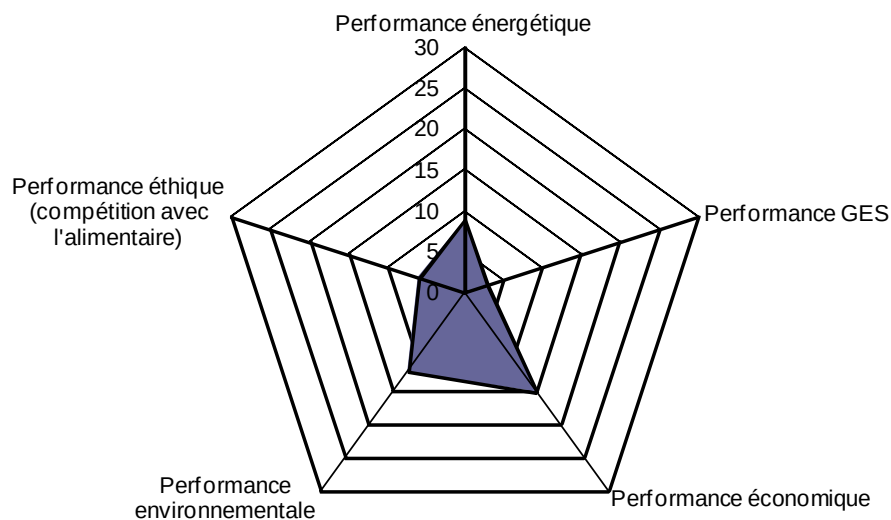
type rotation
culture en méthanisation

colza / blé
blé

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	3	3	9
Performance GES	1	3	3
Performance économique	5	3	15
Performance environnementale	4	3	12
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			45

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 8	
type rotation	maïs/triticales		
culture en méthanisation	triticale		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
triticale	tMB	230	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	4830	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4830	4303
matière sèche	t	1377	850
matière organique	t	1130	602
azote	t	26.8	25.5
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	329457	
productivité	m3/tMB	68.2	
énergie primaire	MWh	3275	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	433.6	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	15.3%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	90	
efficacité énergétique		4.8	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	5901	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	14.1	
émissions nettes	t éq.C	5886.4	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	82.1	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	1921.8	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	37.9	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)simulation n° **8**Culture considérée : **triticale**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	90	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	3	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Total					13

Culture considérée : **0**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : **Maïs/Triticale**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					13

SCORE GLOBAL **10**

Echelle score :

Légende:

0 = pression nulle

1 = pression faible

2 = pression moyenne

3 = pression forte

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***8**

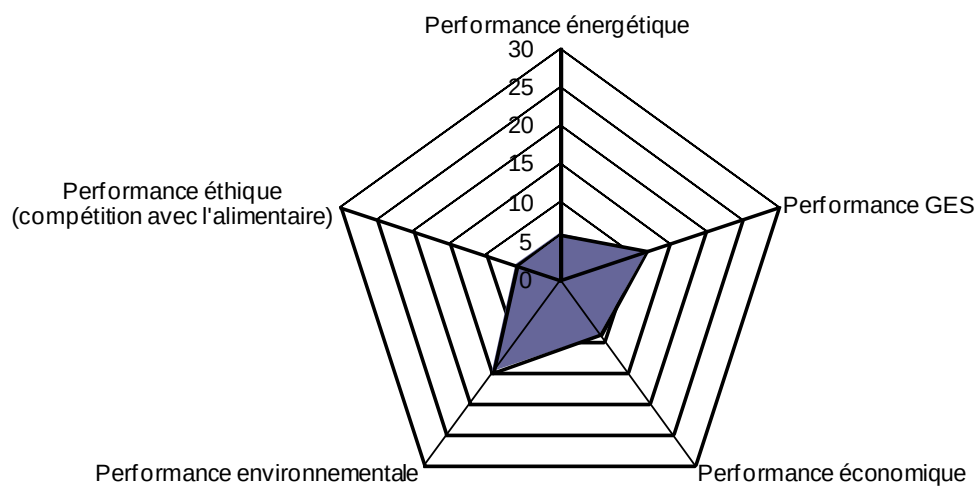
type rotation
culture en méthanisation

maïs/triticales
triticale

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	2	3	6
Performance GES	4	3	12
Performance économique	3	3	9
Performance environnementale	5	3	15
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			48

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 9	
type rotation	maïs / maïs		
culture en méthanisation	maïs fourrage (non irrigué)		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
maïs ensilage	tMB	800	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5400	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5400	4840
matière sèche	t	1417	857
matière organique	t	1136	576
azote	t	25.9	24.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	349896	
productivité	m3/tMB	64.8	
énergie primaire	MWh	3478	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	636.7	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	22.4%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	96	
efficacité énergétique		6.6	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	5874	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	20.8	
émissions nettes	t éq.C	5853.5	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	86.2	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	1003.2	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	32.5	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)

simulation n°

9Culture considérée : **maïs ensilage**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	78	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	2	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Total					13

Culture considérée : **0**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : **Maïs/Maïs**

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Non	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	1	Fichier Itinéraire technique	3	1	3
Total					12
Somme des indicateurs culture					13

SCORE GLOBAL**25**

Echelle score :

Légende:

- 0 = pression nulle
 1 = pression faible
 2 = pression moyenne
 3 = pression forte

Score :



Fort impact global sur l'environnement
 Impact global modéré sur l'environnement
 Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***9**

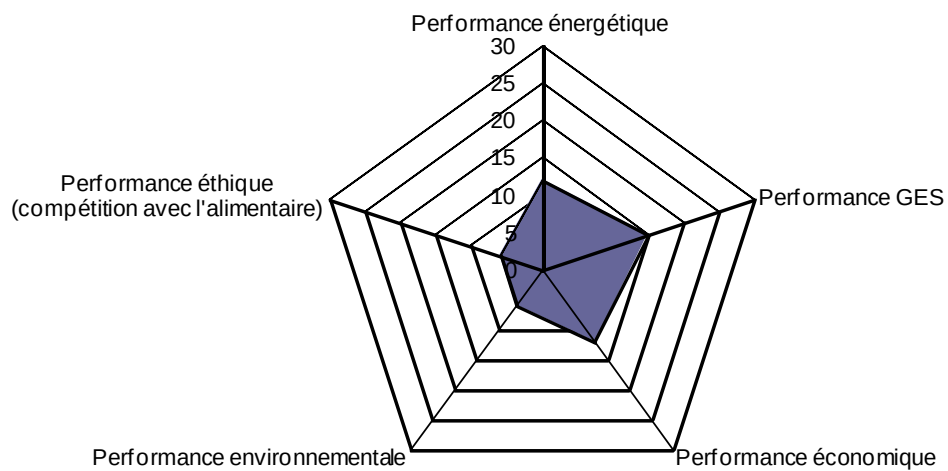
type rotation
culture en méthanisation

maïs/maïs
maïs fourrage (non irrigué)

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	4	3	12
Performance GES	5	3	15
Performance économique	4	3	12
Performance environnementale	2	3	6
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			51

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO		simulation n° 10	
type rotation	maïs / maïs		
culture en méthanisation	maïs fourrage irrigué		
SCENARIO REFERENCE (sans culture)			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	
SCENARIO AVEC CULTURE			
Matière première entrant en méthanisation			
lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
maïs ensilage	tMB	1200	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5800	
Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5800	5189
matière sèche	t	1537	926
matière organique	t	1236	625
azote	t	26.4	25.1
Bilan énergie de l'unité de méthanisation			
production méthane	m3	381926	
productivité	m3/tMB	65.8	
énergie primaire	MWh	3796	
PERFORMANCES CULTURES			
Aspect énergie			
quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	955.1	
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	33.6%	
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	205	
efficacité énergétique		4.7	
Aspect GES			
quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	6063	
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	31.1	
émissions nettes	t éq.C	6032.0	
Aspect économique			
coût de production de la matière première	€/tMS	66.8	
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	1504.8	
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	25.2	

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)*simulation n°* **10****Culture considérée :** maïs ensilage

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	78	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Oui	Fichier Itinéraire technique	1	2	2
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	2	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Total					15

Culture considérée : 0

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Utilisation de l'irrigation		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type		Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					0

Rotation considérée : Maïs/Maïs

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Non	Fichier Itinéraire technique	3	3	9
Cultures annuelles/pluriannuelles/pérennes	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	1	Fichier Itinéraire technique	3	1	3
Total					12
Somme des indicateurs culture					15

SCORE GLOBAL**27**

Echelle score :

- 0 = pression nulle
- 1 = pression faible
- 2 = pression moyenne
- 3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***10**

type rotation

maïs/maïs

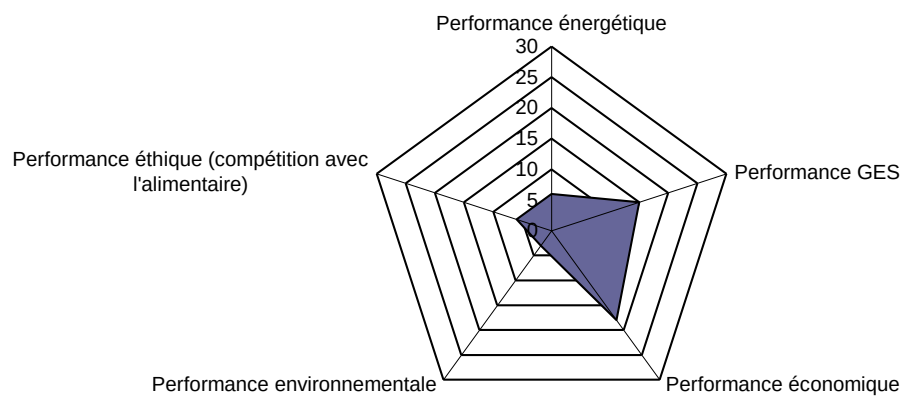
culture en méthanisation

maïs fourrage irrigué

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	2	3	6
Performance GES	5	3	15
Performance économique	6	3	18
Performance environnementale	1	3	3
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			48

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

BILAN SIMPLIFIE SCENARIO**simulation n° 11**

type rotation	maïs/culture dérobée/maïs
culture en méthanisation	maïs ensilage + culture dérobée

SCENARIO REFERENCE (sans culture)**Matière première entrant en méthanisation**

lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
TOTAL	tMB	4600	

Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	4600	4143
matière sèche	t	1177	720
matière organique	t	934	477
azote	t	24.8	23.6

Bilan énergie de l'unité de méthanisation

production méthane	m3	285838	
productivité	m3/tMB	62.1	
énergie primaire	MWh	2841	

SCENARIO AVEC CULTURE**Matière première entrant en méthanisation**

lisier bovin	tMB	2500	
fumier bovin	tMB	900	
graisses d'abattoir	tMB	400	
issues de céréales	tMB	800	
maïs ensilage	tMB	933	
ray grass d'Italie (ensilé)	tMB	290	
	0 tMB	0	
	0 tMB	0	
TOTAL	tMB	5824	

Bilan matière de l'unité de méthanisation		entree	sortie
matière brute	t	5824	5205
matière sèche	t	1527	909
matière organique	t	1233	614
azote	t	26.4	25.1

Bilan énergie de l'unité de méthanisation

production méthane	m3	386626	
productivité	m3/tMB	66.4	
énergie primaire	MWh	3843	

PERFORMANCES CULTURES**Aspect énergie**

quantité d'énergie primaire disponible liée aux cultures	MWh	1001.8
part des cultures dans la production d'énergie du scénario	%	35.3%
quantité d'énergie fossile utilisée pour la production de culture	MWh	164
efficacité énergétique		6.1

Aspect GES

quantité de GES émis pour la production de la culture	t éq.C	9827
quantité de GES évités par la substitution d'énergie	t éq.C	32.7
émissions nettes	t éq.C	9794.8

Aspect économique

coût de production de la matière première	€/tMS	85.7
economie en engrais azotés liée à la restitution du digestat	€	1529.5
coût de revient de l'énergie primaire	€/MWh	30.0

BILAN ENVIRONNEMENTAL (HORS ENERGIE ET GES)*simulation n°* **11****Culture considérée :** maïs ensilage

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	78	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	2	Fichier Itinéraire technique	3	2	6
Total					10

Culture considérée : ray grass d'Italie (ensilé)

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (0 A 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Indicateurs généraux sur la culture					
Apport en azote minéral en kgN/ha/an	80	Fichier Itinéraire technique	2	2	4
Utilisation de l'irrigation	Non	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de passages avec au moins un traitement phytosanitaire par type	0	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Total					4

Rotation considérée : Maïs/Ray-grass italien/Maïs

INDICATEURS	VALEUR	SOURCE	ECHELLE SCORE (1 OU 3)	PONDERATION (1 A 3)	SCORE
Rotation					
Existence d'un couvert végétal en hiver (Oui/Non)	Oui	Fichier Itinéraire technique	-1	3	-3
Cultures annuelles/pluriannuelles	annuelles	Fichier Itinéraire technique	0	2	0
Nombre de cultures différentes dans la rotation	2	Fichier Itinéraire technique	0	1	0
Total					-3
Somme des indicateurs culture					14

SCORE GLOBAL**11**

Echelle score :

- 0 = pression nulle
- 1 = pression faible
- 2 = pression moyenne
- 3 = pression forte

Légende:

Score :



Fort impact global sur l'environnement

Impact global modéré sur l'environnement

Faible impact global sur l'environnement

JUGEMENT DU BILAN DE LA SIMULATION*simulation n°***11**

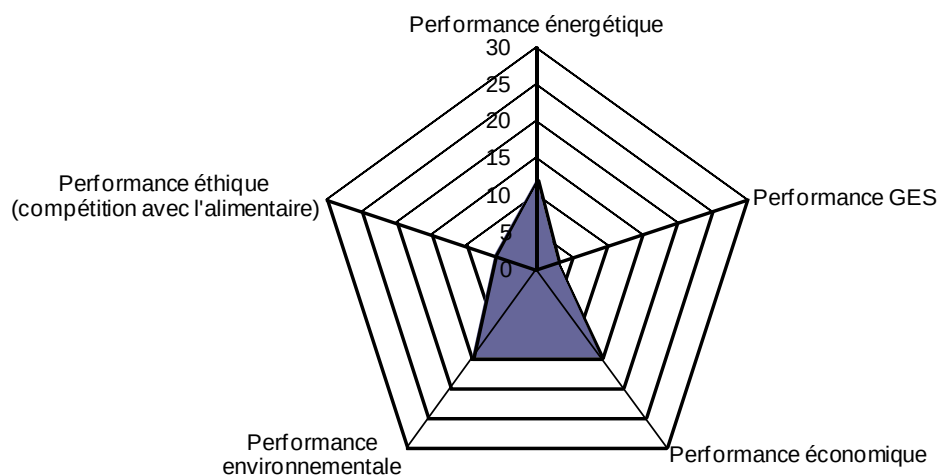
type rotation
culture en méthanisation

maïs/culture dérobée/maïs
maïs ensilage + culture dérobée

	Score (1 à 10)	Pondération (1 à 5)	Résultat
Performance énergétique	4	3	12
Performance GES	1	3	3
Performance économique	5	3	15
Performance environnementale	5	3	15
Performance éthique (compétition avec l'alimentaire)	2	3	6
TOTAL			51

Légende :

Score: 1 = peu performant et 10 = très performant

Bilan

Annexe 6 : BCAE et potentiel de production de biomasse

Les BCAE constituent des conditions que les agriculteurs doivent respecter s'ils veulent obtenir des aides au titre du régime de paiement unique (principe de conditionnalité). Les obligations induites génèrent de la biomasse qui serait *a priori* mobilisable pour la méthanisation. En 2006, les surfaces ayant reçu un paiement au titre du RPU étaient de 24 265 000 ha (DG agri-D, Commission Européenne), la SAU étant de 29 500 000 ha (agreste, chiffres de 2007). La plupart des terres agricoles sont donc contraintes par les BCAE.

En Europe, les exploitations agricoles souhaitant disposer des aides communautaires au titre du Régime de Paiement unique doivent satisfaire les BCAE. Au niveau français⁹, le livre VI du code rural français concerne la *production et marchés*, le Chapitre V les *Régimes de soutien direct dans le cadre de la politique agricole commune*. Le code rural développe à un premier niveau les BCAE appliquées sur le territoire français. La circulaire de *Mise en œuvre de la conditionnalité pour le paiement des aides directes au titre de l'année 2005* (circulaire du MAP du 26 mai 2005), et plus récemment les fiches BCAE concernant la *Conditionnalité 2009* (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009), déclinent les BCAE en 6 points :

- BCAE 1 : Mise en place d'une superficie minimale en couvert environnemental
- BCAE 2 : Non-brûlage des résidus de culture
- BCAE 3 : Diversité des assolements
- BCAE 4 : Prélèvements à l'irrigation en système de grandes cultures
- BCAE 5 : Entretien minimal des terres
- BCAE 6 : Maintien des pâturages permanents

Même si l'ensemble des BCAE impactera le potentiel de biomasse disponible de ce groupe de productions végétales, on ne détaillera que les BCAE susceptibles d'intervenir dans le cadre de l'étude, à savoir les BCAE 1, 2, 3, 5 et 6, qui peuvent directement générer de la biomasse mobilisable pour la méthanisation. Les types de cultures ou couverts qui peuvent être liés à ces BCAE sont principalement : les prairies (herbe/cultures fourragères), les couverts environnementaux, notamment les bandes enherbées et les cultures dérobées.

- BCAE de type 1 : Mise en place d'une superficie minimale en couvert environnemental

Les agriculteurs (à l'exception des petits producteurs (art.107.7 du R(CE) 1782/2003) demandeurs d'aides soumises à la conditionnalité et qui implantent certaines cultures¹⁰ doivent disposer d'une surface d'au moins 3 % de la superficie des céréales, oléo-protéagineux [...] aidées en couvert environnemental (MAP). D'après Agreste, les superficies aidées de COP s'élèvent en 2005 à 13 932 000 ha (Bisault L, 2007). La superficie potentielle en couvert environnemental s'élèverait donc au moins, à l'échelle française, à 418 000 ha en 2005.

Ces surfaces en couvert environnemental (SCE) ne font pas l'objet d'une mention spécifique dans la demande d'aide unique (déclarations de surfaces) : elles peuvent être déclarées comme *prairies permanentes, estives, landes et parcours, prairies temporaires, gel, fleurs, ou encore dans les catégories hors culture ou usage non-agricole notamment pour les haies ne répondant pas aux normes locales* (MAP, 2009). Les possibilités d'exploitation des SCE dépendent directement de ces déclarations de surface.

Les surfaces en gel ne doivent pas être utilisées à des fins lucratives, sauf pour les exploitations qui sont en totalité convertie à l'agriculture biologique, et pour les parcelles cultivées à des fins de production d'énergie, de biocombustible ou de biogaz. Il convient de noter que le gel obligatoire a été supprimé définitivement en 2009.

Pour l'ensemble de ces statuts, il y a possibilité de fauche sur une grande partie de l'année. Cependant, les SCE *doivent être présentes toute l'année, soit avec un couvert environnemental (obligatoire du 1^{er} mai au 31 août de l'année en cours (MAP, 2005), soit en l'attente de recevoir un couvert lorsqu'elles entrent dans le système de rotation des cultures de l'exploitation*. Par ailleurs, le broyage et le fauchage des parcelles de jachère sont interdits sur une période de 40 jours consécutifs entre le 1^{er} mars et le 15 juillet (MAP, 2009).

⁹ L'annexe IV du R(CE) 1782/2003 précise que les États membres définissent, au niveau national ou régional, des exigences minimales pour les bonnes conditions agricoles et environnementales sur la base du cadre fixé à l'annexe IV du règlement communautaire.

¹⁰ Des céréales, des oléagineux, des protéagineux, du lin, du chanvre, des betteraves sucrières, de la chicorée à inuline, des pommes de terre féculières, des légumineuses à grain, des fourrages déshydratés, des semences fourragères, des semences pouvant bénéficier d'une aide couplée, du tabac, des tomates destinées à la transformation, des cultures industrielles annuelles (MAP, 2009)

En France, l'application du règlement communautaire s'est fait suite à l'arrêté du 31 juillet 2006 (*pris pour l'application des articles D.615-46 et D.615-48 du code rural et relatif aux règles de couvert environnemental et d'assolement*, J.O. n°177 du 2 août 2006, p.11475, texte n°26). Ce texte présente en annexe une liste des couverts environnementaux préconisés selon la zone considérée (zone vulnérable/présence de cours d'eau, objectif poursuivi par l'agriculteur). Les couverts environnementaux autorisés peuvent être modifiés par des arrêtés préfectoraux¹¹. Ils prennent préférentiellement la forme de bandes enherbées le long des cours d'eau¹².

Parmi les espèces préconisées pour la mise en place d'un couvert environnemental (cf. annexe I) sont citées des espèces herbagères (ensilage et fraîche), des graminées (le Ray-grass anglais et hybride), des légumineuses (la luzerne).

Une des spécificités des couverts environnementaux est que l'utilisation de pesticides (herbicides comme fongicides) et d'engrais, minéraux et organiques, sont interdits sur ces surfaces à tout moment de l'année (MAP, 2005).

▪ BCAE de type 2 : Non-brûlage des résidus de culture :

La circulaire de la *mise en œuvre de la conditionnalité pour le paiement des aides directes au titre de l'année 2005* (MAP, 2005) explicite que *cette exigence consiste à ne pas brûler les pailles et les résidus des cultures afin de préserver la matière organique des sols et d'éviter leur appauvrissement*. Cette mesure s'applique à tous les exploitants agricoles demandeurs d'aides et concerne la totalité de leurs surfaces en céréales, oléagineux et protéagineux. Au-delà des bénéfices pour les sols, il pourrait être intéressant de valoriser ces résidus de cultures via la méthanisation. Toutes les cultures ne peuvent cependant pas être valorisées : les exploitations en monoculture doivent assurer une gestion des résidus de récolte. Les résidus doivent être broyés et incorporés au sol (MAP, 2009).

La valorisation des résidus de culture par la méthanisation semble donc possible dans certains cas, à condition de ne pas nuire à l'objectif de maintien de la fertilité des sols et donc dans certains cas au moins d'épandre le digestat.

▪ BCAE de type 3 : Diversité des assolements

Le Règ. (CE) 1728/2003 mentionne la possibilité de fixer des normes en matière de rotation des cultures, le cas échéant (Annexe I du Règ. (CE) 1782/2003).

D'après le code rural, *les agriculteurs qui demandent des aides sont tenus d'assurer une diversité des cultures sur la superficie agricole utile de leur exploitation* (art. D615-48 du code rural).

L'article 4 de l'arrêté du 31 juillet 2006 précise que *la SAU doit compter au moins deux des familles de cultures de l'annexe II du même arrêté, deux d'entre elles devant représenter au moins 5 % de la sole cultivée, soit au moins trois de ces cultures, trois d'entre elles devant représenter au moins 5 % de la sole cultivée*. A partir de 2009, on ne parle plus de famille de cultures et il est devenu obligatoire d'implanter trois cultures différentes, représentant chacune au moins 5 % de la sole cultivée (MAP, 2009).

Les exploitants pratiquant la monoculture doivent établir une couverture totale des sols en période hivernale. Cette obligation peut être satisfaite *soit par l'implantation d'une culture d'hiver, soit par l'implantation d'une culture intermédiaire entre deux implantations successives de monocultures sous la forme de colza fourrager, de phacélie, de moutarde, de navette et, pour les monocultures de maïs, en sus des couvertures précédentes, de seigle, d'orge, d'avoine et de triticale*. Ce couvert végétal doit être implanté au plus tard le 1^{er} novembre et rester en place jusqu'au 1^{er} mars (arrêté du 31 juillet 2006 et MAP, 2009).

Remarque : L'implantation d'une couverture automnale et hivernale est obligatoire pour tous les îlots culturels situés en zone d'action complémentaire (ZAC, définie par l'art.4 du décret 2001-34 du 10 janvier 2001).

¹¹ L'examen d'arrêtés préfectoraux de Meurthe et Moselle, du Nord pas de Calais, de l'Indre et Loire, et de l'Eure et Loire n'a montré que de légères variations de la liste des cultures autorisées par rapport à la liste nationale des couverts préconisés.

Dans la déclaration des surfaces, elles peuvent entrer dans les surfaces en gel, les surfaces de prairies (temporaires ou permanentes), ou encore les surfaces hors culture (comme les friches)

¹² Si les 3% ne sont pas atteints avec les parties le long des cours d'eau, les couverts environnementaux sont implantés sur d'autres parcelles de l'exploitation. Dans ce cas, il est conseillé de privilégier les zones sensibles (ruptures de pente, captages d'eau, zones d'infiltration préférentielle, le long des éléments fixes du paysage comme les haies, bosquets, mares, murets, fossés, ...). Il est également possible - mais pas obligatoire - de compléter la bande enherbée en bordure de cours d'eau au-delà des 6 ou 10 m réglementaires.

▪ BCAE de type 5 : Entretien minimal des terres

Cette BCAE vise à maintenir les terres de l'exploitation agricole (cultivée ou non) dans un bon état agronomique et sanitaire afin d'éviter la détérioration de leur potentiel productif. Cette exigence concerne les terres en production aidées (COP, autre culture aidée, fruits à coque,...) et les surfaces en herbe (prairie permanentes et estives, prairies temporaires).

Les cultures COP, lin, chanvre et riz doivent être entièrement ensemencées et être entretenues jusqu'au stade de la floraison dans des conditions de croissance normales et conformément aux normes locales (Règlement (CE) n° 1973/2004). Ces surfaces doivent présenter une densité de semis minimum et être entretenues dans des conditions permettant la floraison. Il peut exister des normes fixées par arrêté préfectoral, qui peuvent concerner, selon le département considéré, la densité de semis minimal, des contraintes culturales (interdiction, selon les départements, de sols nus, labour, utilisation de repousses de l'année précédente, taux de chargement, montée à graine d'adventices...).

Le deuxième groupe de cultures, regroupant les surfaces en herbe, doivent vérifier une des obligations suivantes :

- critère de chargement minimal
- obligation de pâture
- obligation d'une fauche par an, avec preuve du produit de la vente ou pratique assimilée

Ainsi, si une surface n'est pas pâturée, il existe une obligation de fauche. Il semble que ce soit principalement les surfaces en herbe qui soient donc susceptibles de produire de la biomasse de type herbagère, qui, d'après la littérature scientifique, a un bon rendement méthanogène.

BCAE de type 6 : Maintien des pâturages permanents

D'après le R(CE) 796/2004 de la Commission du 21 avril 2004, sont considérées comme « pâturage permanent » toutes terres consacrées à la production d'herbe et d'autres plantes fourragères herbacées qui ne font pas partie du système de rotation des cultures depuis 5 ans et plus. On utilise indifféremment le terme de « prairie permanente ». Le R(CE) 1782/2003 précise que les BCAE doivent viser la protection des pâturages permanents. L'Etat membre doit veiller au maintien national d'une surface en prairies (au niveau de son ratio historique de référence).

Dans le cas où les prairies sont déclarées comme un couvert environnemental, les pratiques de l'agriculteur sont contraintes par les BCAE de type 1. Les terres en pâturage permanent sont néanmoins soumises à l'entretien minimal des terres (BCAE 5), elles doivent donc être fauchées ou pâturées.