

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO – MONTPELLIER SUPAGRO

En Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA (Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau)
– ED 584- Université de Montpellier

Unité Mixte de Recherches Systèmes d'Élevage Méditerranéens Et Tropicaux (UMR
SELMET) (UMR 112/868 Cirad Inrae SupAgro)

La contribution de l'élevage dans les émissions de gaz à effet de serre des terroirs agro-sylvo-pastoraux de la Haute Casamance au Sénégal

Présentée et soutenue par
Séga NDAO

Le 16 novembre 2020

Sous la direction de Charles-Henri MOULIN

Devant le jury composé de

| | |
|---|-----------------------|
| M. Ayao Ogbloindjo MISSOHOU, Professeur titulaire, EISMV, UCAD Dakar | Rapporteur, Président |
| M. Harry ARCHIMEDE, Directeur de Recherche, URZ, INRAE Gualdeloupe | Rapporteur |
| M. Eliel GONZALEZ-GARCIA, Directeur de Recherche, INRAE Montpellier | Examineur |
| Mme. Maguy EUGENE, Ingénieur de Recherche, UMRH, INRAE Auvergne-Rhône-Alpes | Examinatrice |
| M. Charles-Henri MOULIN, Professeur-associé, Institut Agro, Montpellier SupAgro | Directeur de thèse |



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

l'institut Agro
agriculture • alimentation • environnement



Il faut avoir une parfaite conscience de ses propres limites, surtout si on veut les élargir

ANTONIO GRAMSCI

Résumé

En Afrique de l'Ouest (AO), les facteurs d'émissions (FE) recommandés par défaut du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sont couramment utilisés pour estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'agriculture. L'utilisation de FE adaptés au contexte local de production est cependant essentielle pour argumenter autour des questions environnementales et répondre aux enjeux d'atténuation du changement climatique. Dans la région d'AO, les systèmes intégrés agriculture-élevage sont dominants et de nombreuses ressources, notamment fourragères sont gérées collectivement. L'objectif de la thèse était d'apporter une meilleure compréhension des émissions de GES liées aux systèmes de production agro-sylvo-pastoraux (SPASP) dans la région de la Haute Casamance au Sénégal. Le terroir villageois a été considéré comme échelle pertinente d'analyse. A ce titre, le terroir villageois de *Saré Yoro Bana* (12°49'N : 14°53'O) a servi de terrain d'étude. Pour évaluer les émissions de GES du terroir, les principales activités agricoles ont été inventoriées. La méthode de niveau 2 (Tier 2) du GIEC a été utilisée pour calculer les FE contextualisés de méthane entérique pour les bovins et les petits ruminants. Aussi, les pratiques actuelles de gestions des déjections animales ont été prises en compte dans les estimations. Avec notre approche qui considère la variation des quantités ingérées, la digestibilité de la ration et les périodes de sous-alimentation des animaux, les valeurs moyennes de FE développés sont respectivement, pour les vaches en lactation (VL) et les autres bovins (AB), de 30,7 CH₄/tête/an et 15,1 kg CH₄/tête/an. Ces FE sont bien inférieurs à ceux proposés par défaut pour la région d'AO (respectivement 46 CH₄/tête/an et 31 CH₄/tête/an pour les VL et AB). Pour les petits ruminants, nos résultats indiquent également une surestimation des valeurs de FE pour les ovins (2,3 CH₄/tête/an contre 5 CH₄/tête/an) et les caprins (2,0 CH₄/tête/an contre 5 CH₄/tête/an). Les émissions totales de GES (sans intégration du stockage de carbone) étaient respectivement, par hectare et par habitant de 2,0 t Eq-CO₂ et 2,6 t Eq-CO₂. La fermentation entérique des animaux (65 %), les feux de savanes (13 %) et le dépôt direct des déjections animales sur les parcours (10 %) sont les postes qui contribuent le plus aux émissions totales du terroir. Exprimées en kilogramme de produits animaux, les intensités d'émission (IE) du lait et de la viande de bovins sont respectivement de 4,9 kg Eq-CO₂/kg de lait et de 18,5 Eq-CO₂/kg de poids vif. L'IE était de 12,0 Eq-CO₂/kg de poids vif pour les petits ruminants. L'impact des activités de productions végétales était de 11,8 Eq-CO₂/kg de grain produit.

Ces terroirs agro-sylvo-pastoraux sont aussi le lieu de stockage de carbone, notamment dans les espaces de parcours arborés. Il conviendrait d'évaluer ce flux de stockage pour voir si ces terroirs sont des sources ou des puits de carbone. Des pistes d'atténuation, considérant les postes-clés d'émission de GES, ont été discutées, comme l'introduction de fourrages cultivés et de pratiques de gestion des déjections animales qui favorisent un recyclage efficient des nutriments et du carbone dans le terroir. Des travaux similaires doivent être reproduits à des échelles nationales pour réduire les incertitudes dans les inventaires nationaux de GES. En effet, cette approche favorise l'obtention de données d'activité et des FE représentatifs de la réalité des SPASP étudiés.

Mots clés : émission de GES, incertitude, système agrosylvopastoraux, saisonnalité, terroir villageois, Sénégal

Abstract

In West Africa (WA), the default emission factors (EF) recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) are commonly used to estimate greenhouse gas emissions (GHG) from agriculture. However, the use of adapted EF to the local production context is important to discuss environmental matters and react to climate change mitigation issues. In the WA region, integrated crop-livestock systems are dominant and many resources (especially feedstuff) are managed collectively. The objective of the thesis was to provide a better understanding of GHG emissions linked to agro-sylvo-pastoral production systems (SPASP) in the Haute Casamance region, Senegal. The village was considered as a relevant scale of investigation. As such, the Saré Yoro Bana territory (12 ° 49'N: 14 ° 53'W) served as a case study. To assess the territory's GHG emissions, the principal agricultural activities were inventoried. The IPCC Tier 2 method was expended to calculate the contextualized EFs of enteric methane for cattle and small ruminants. Also, existing management practices of animal waste were taken into account in the estimates. Through our approach which considers the variation of the intake, the feed digestibility, the stages of undernourishment, the average values of EF developed are respectively, for lactating cows (VL) and other cattle (AB), 30.7 CH₄/head/year and 15.1 kg CH₄/head/year. These developed EFs are much lower than the default EFs proposed for the WA region (e.g., respectively 46 CH₄/head/year and 31 CH₄/head/year for VL and AB). For small ruminants, our results show an overestimation of EF values for sheep (2.3 CH₄/head/year against 5 CH₄/head/year) and goats (2.0 CH₄/head/year against 5 CH₄ /head/year). Total GHG emissions (without carbon storage) were, respectively, per hectare and per capita 2.0 t CO₂eq and 2.6 t CO₂eq. The enteric fermentation of animals (65%), burning savannah (13%) and the direct deposition of animal waste on the rangelands (10%) are the most contributor to total territory emissions. Expressed in kilograms of animal products, the emission intensities (EI) of milk and meat are respectively 4.9 kg CO₂eq/kg of milk and 18.5 CO₂eq/kg live weight. The EI was 12.0 CO₂eq/kg live weight for small ruminants. The impact of crop production activities was 11.8 CO₂eq/kg of grain produced.

In addition, these agro-sylvo-pastoral ecosystems are the place of carbon storage, in particular in the areas of wooded areas. So, the storage flow should be evaluated to see if these territories are sources or sinks of carbon. Mitigation options, considering the key GHG emission were discussed (e.g., introduction of cultivated forage, animal waste management practices). These options promote efficient recycling of nutrients and carbon in the soil. Similar work should be replicated at national scales to reduce uncertainties. Indeed, this approach will allow to achieve activity data and EF, hence to capture the authenticity of the studied SPASP.

Keywords: GHG emissions, uncertainty, agro-silvo-pastoral system, seasonality, territory, Senegal

A ma mère,

A mon père,

A mes grands-parents,

A mon épouse et mes enfants,

A mes frères et sœurs,

A mes amis et proches.

REMERCIEMENTS

In memoriam de François BOCQUIER, professeur en sciences animales et ancien directeur du département MPRS (Montpellier SupAgro). Pr François BOCQUIER a dirigé les deux premières années de cette thèse avec la rigueur qu'on lui connaissait. C'est avec une immense tristesse que j'ai appris le décès de ce confident et grand ami. Où que tu sois François, saches que tes conseils judicieux resteront une véritable source de motivation pour moi. Je te serai toujours reconnaissant de n'avoir jamais douter de ma capacité à faire une thèse.

Ces quelques lignes qui ne suscitent pas l'orgueil sont le très faible témoignage de ma reconnaissance.

A mon directeur de thèse, Pr Charles-Henri MOULIN. Il m'a marqué par la pertinence de ses idées et sa rigueur scientifique. Pr Moulin a su reprendre la direction de cette thèse à temps et m'a laissé la liberté d'entreprendre. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et de ma profonde gratitude.

Au Directeur Générale de l'ISRA, Dr Alioune FALL, à travers lui le Directeur Scientifique, Dr El Hadji TRAORE.

A mon unité d'accueil, l'UMR SELMET. Je remercie particulièrement le Directeur, Dr Alexandre ICKOWICZ.

Aux Chercheurs de l'UMR SELMET.

A papi Philippe LECOMTE. Son humilité et son esprit de partage est rare.

A Dr Jonathan VAYSSIERES pour son temps précieux qu'il m'a consacré durant mes séjours à Dakar.

A Dr Magali JUVEN pour les moments partagés autour de ma thèse.

A Dr Jean-Baptiste MENASSOL pour ses conseils et les scripts qu'il a mis à ma disposition.

A mes collègues du Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, particulièrement ceux du service zootechnie. Je citerai nommément Ansoumana DIOKOU et Mouhamadou A. DIANDY pour les appuis techniques.

Au Dr Mamadou DIOP pour sa disponibilité et son appui scientifique. Les données d'élevages qu'il a voulues partager avoir moi ont beaucoup participer à l'originalité de cette thèse

Au Dr Mouhamadou Moustapha SISSOKHO pour sa disponibilité et ses encouragements.

Au Dr Abdou FALL pour les notes d'orientations et le temps qu'il a consacré pour participer à mes comités de suivis individuels.

Au Dr Cheikh SALL pour les nombreuses informations qu'il a partagé avec moi.

A Dr Paulo SALGADO pour son aide précieux sur la partie pratiques de gestion des fumiers dans les exploitations familiales. Ses conseils m'ont beaucoup servi.

Aux groupements d'éleveurs des localités de Kolda et de Vélingara. Mes séjours dans les villages ont toujours été agréables.

A M. Jean-Luc BOSIO et Madame Madeleine AIDI du SIRL de Montpellier SupAgro pour l'assistance administrative. Je n'oublie pas Marie-Jo, Corine, Martine, Marie-France.

A tous ceux qui, de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail.

PREAMBULE

Les frais d'inscription à Montpellier SupAgro et la bourse de subsistance durant les séjours (17 mois) en France ont été financés par le **Programme de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest et du Centre** (PPAAO ou *WAAPP, West Africa Agricultural Productivity Program*).

D'autres dispositifs de financements ont facilité nos travaux de recherche. Le **Norman E. Borlaug International Agricultural Science and Technology Fellowship Program** a permis de séjourner (4 mois) à Ohio State University/Ohio Agriculture Research Development Center. Aussi, un appui financier a été accordé par la France, à travers le programme **MAKE OUR PLANET GREAT AGAIN**.

La thèse a été menée au sein de l'**Unité Mixte de Recherche Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux** (UMR SELMET), qui regroupe des chercheurs du CIRAD, de l'INRA et des enseignants-chercheurs de SupAgro. L'UMR SELMET s'intéresse aux agroécosystèmes d'élevages en milieux chauds, favorables ou difficiles. Elle a pour ambition de contribuer à l'accompagnement de l'évolution de l'élevage pour promouvoir des systèmes d'élevage plus productifs et plus respectueux de l'environnement.

Durant les séjours en France, le doctorant a été accueilli au département Milieux, Productions, Ressources et Systèmes (MPRS) du Centre International d'Études Supérieures en Sciences Agronomiques (Montpellier SupAgro).

LISTE DES ARTICLES ET COMMUNICATIONS REALISES

PUBLICATIONS DANS DES REVUES A FACTEUR D'IMPACT :

¹ **Ndao, S.**, Moulin, C. H., Traoré, E. H., Diop, M., & Bocquier, F. (2019). Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa is far lower than previous estimates. *Tropical animal health and production*. 51 : 919-928.

Ndao, S., Traoré, E. H., Ickowicz, A., Moulin, C. H. (2020). Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal. *animal*. *Tropical animal health and production*. DOI: 10.1007/s11250-020-02280-z.

Ndao, S., Moulin, C-H. (2020). Towards an accurate estimate of enteric methane emission factors for West African native cattle using the Tier 2 model (submitted to *animal* 24 February 2020).

RAPPORT TECHNIQUE :

² **Ndao, S.**, Traoré, E. H., and Diop, M. (2018). Inventory practice: Sensitivity analysis to prioritize improvements in Senegal. In Wilkes. A., van Dijk, S. Tier 2 inventory approaches in the livestock sector: a collection of agricultural greenhouse gas inventory practices.

COMMUNICATIONS DANS DES CONGRES A COMITE DE SELECTION :

³ **Ndao, S.**, Vayssières, J., Ickowicz, A., Traoré, E. H., Moulin, C.-H., Lecomte, P., Bocquier, F. (2018). Evaluation of the enteric methane emission factor for cattle in the subhumid zone of Senegal. 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores 2018. 9(3), pp. 1-500. Clermont-Ferrand: Advances in ABS.

¹ <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1775-4>

² <https://www.agmrv.org/knowledge-portal/case-studies/inventory-practice-sensitivity-analysis-to-prioritize-improvements-in-senegal/>.

³ <https://doi.org/10.1017/S2040470018000146>

Ndao, S., Ickowicz, A., Lecomte, P., Traoré, E. H., Diop, M., Sissokho, M. M., Bocquier, F. (2018). Evaluation des sources d'incertitudes associées au développement de facteurs d'émission de méthane entérique : Cas des races bovines locales du Sénégal. 1^{ière} Edition Journées Scientifiques de l'ISRA, 5-9 février 2018, Dakar, Sénégal.

Ndao, S., Salgado, P., Gueye, M., Ly, M. O., & Sissokho, M. M. (2018). Étude des pratiques de gestion des fumiers par les agroéleveurs de la zone de Vélingara, Kolda. 1^{ère} Edition Journées Scientifiques de l'ISRA, 5-9 février 2018, Dakar, Sénégal.

⁴**Ndao, S.**, Bocquier, F., Moulin, C. H., Lecomte, P., Manlay, R. J., Traore, E. H., & Vayssières, J. (2016). Facteur de variation du bilan gaz à effet de serre d'un terroir agrosylvopastoral de la zone subhumide du Sénégal. In *Proceedings of the French symposium Rencontres recherches ruminants*. 7-8 December, Paris, France.

⁵P. Lecomte, V. Decruyenaere, M. Eugene, B. Bois, **S. Ndao**, A. Ickowicz (2016) F-NIRS approach of the seasonal profile of CH₄ emission of dairy herds in an agro silvo pastoral-ecosystem of sub-Saharan Africa (Kolda, Senegal). 6th Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference (GGAA2016), 14-18 February 2016, Melbourne, Australia.

PARTICIPATION A DES REUNIONS SCIENTIFIQUES

Atelier regional des pays francophones d'Afrique, préparatoire à la reunion stratégique du groupe d'experts d'appui au groupe africain des négociateurs sous la CCNUCC, Abidjan, Cote d'Ivoire, 8-12 mars 2020. African Group of Negotiators Expert Support (AGNES), Food and Agriculture Organization of the United nations (FAO), International Development Research Centre (IDRC), Commission des Forêts d'Afrique Centrale (COMIFAC).

⁷th Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference (⁶GGAA2019). Foz Do Iguaçu, Brazil, 4-8 August 2019. Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), Agricultural Research Institute (INIA Chile), National Agricultural Technology Institute (INTA Argentina), University of Sao Paulo (USP) and Sao Paulo State University (UNESP).

Annual meeting of the Livestock Research Group: National Expert meeting. Foz Do Iguaçu, Brazil, 9-10 August 2019. Global Research Alliance, Livestock Research Group (⁷GRA/LRG).

⁸Regional awareness-raising workshop on low emissions livestock: supporting policy through science in west/central Africa. Dakar, Senegal, 26-28 March 2019. Global

⁴ http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/Texte_11_affiche_Environnement_S-Ndao.pdf

⁵ <http://agritrop.cirad.fr/579857/>

⁶ <http://www.ggaa2019.org>

⁷ <https://globalresearchalliance.org/e/2019-livestock-research-group-meeting/>

Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the World Bank.

Guidance for addressing gaps in information and uncertainty in activity data for livestock greenhouse gas emissions: International experts' workshop. Den Haag/Netherlands, 17-18 July 2018. Global Research Alliance, Livestock Research Group (⁹GRA/LRG).

Annual meeting of the Livestock Research Group: National Expert meeting. Ho Chi Minh City, Viet Nam, 14-16 May 2018. Global Research Alliance, Livestock Research Group (¹⁰GRA/LRG).

¹¹ Global Methane Forum 2018: The premier event on international methane mitigation. Toronto, Ontario, Canada, 16-20 April 2018. Global Methane Initiative, the Climate & Clean Air Coalition (CCAC), and the Government of Canada.

Development and Application of Management Technique for Non-ruminant Livestock. Jeonju, Republic of Korea, 19-28 November 2017. Korea-Africa Food and Agriculture Cooperation Initiative (KAFACI).

⁸ <https://www.isra.sn/regional-awareness-raising-workshop-on-low-emissions-livestock-supporting-policy-through-science-in-west-central-africa/>

⁹ <https://globalresearchalliance.org/research/livestock/>

¹⁰ <https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2018/06/ho-chi-minh-vietnam-lrg-meeting-report-may-2018.pdf>

¹¹ <https://www.globalmethane.org/gmf2018/index.html>

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| Remerciements | v |
| <i>Préambule</i> | vii |
| Liste des articles et communications réalisés..... | viii |
| Table des matières..... | xi |
| Liste des sigles et abréviations | xvi |
| <i>Liste des tableaux</i> | xx |
| <i>Liste des figures</i> | xxii |
| CHAPITRE 1: Problématique et questions de recherche | 1 |
| 1. Changement climatique et agriculture | 2 |
| 1.3.1. Actions d'adaptation et d'atténuation..... | 3 |
| 1.3.2. Stratégies d'adaptation et d'atténuation pluri-échelles | 4 |
| 1.3.3. Complexité des actions d'atténuation et d'adaptation en Afrique de l'Ouest..... | 5 |
| 2. L'élevage et ses défis..... | 6 |
| 2.1. Importance et diversité des systèmes d'élevage | 6 |
| 2.2. Empreinte carbone élevée des élevages..... | 8 |
| 2.3. Evolution des populations humaines dans les régions du monde | 9 |
| 2.4. Fertilité des sols agricoles | 10 |
| 3. Echelle pertinente d'analyse de l'impact environnemental des élevages agro-sylvo-pastoraux ouest-africains | 10 |
| 4. Quelques méthodes d'évaluation des impacts environnementaux..... | 11 |
| 4.1. Lignes directrices 2006 du GIEC | 11 |
| 4.2. Autres approches d'évaluation des impacts environnementaux | 13 |
| 5. Engagements des Parties et inventaires nationaux de gaz à effet de serre..... | 14 |
| 5.1. Accords internationaux sur le changement climatique | 14 |
| 5.2. Sources-cles d'émission de ges dans des communications nationales..... | 16 |
| 5.3. Méthodes directes de mesures des émissions de méthane entérique..... | 18 |
| 5.4. Utilisation de modèles de prédiction des d'émissions de méthane entérique..... | 19 |
| 6. Questions et objectifs de recherche | 20 |
| 7. Dispositif et origines des données..... | 21 |

| | |
|---|---------------|
| 8. Plan du manuscrit..... | 22 |
| CHAPITRE 2: Analyse d’incertitude et de sensibilité des paramètres du modèle Tier 2 | 24 |
| 1. Abstract | 26 |
| 2. Introduction..... | 27 |
| 3. Materials and methods | 28 |
| 3.1. Location and livestock grazing systems..... | 28 |
| 3.2. Description of the used model..... | 29 |
| 3.3. Sources of input data | 29 |
| 3.4. Uncertainty and sensitivity analysis procedures | 31 |
| 3.4.1. Uncertainty analysis..... | 31 |
| 3.4.2. Sensitivity analysis..... | 34 |
| 4. Results | 35 |
| 4.1. Contribution of input parameters to uncertainty | 35 |
| 4.2. Sensitivity of used input parameters | 37 |
| 5. Discussion..... | 39 |
| 5.1. Moving to Tier 2 enteric methane emission factor | 39 |
| 5.2. Importance of input parameters | 40 |
| 6. Conclusions | 41 |
| Acknowledgments..... | 41 |
| CHAPITRE 3 : Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the | |
| Sudanian zone of Senegal | - 43 - |
| 1. Abstract | - 45 - |
| 2. Introduction..... | - 45 - |
| 3. Material and methods | - 47 - |
| 3.1. Site description..... | - 47 - |
| 3.2. Production system characteristics | - 47 - |
| 3.3. Predicted methane emission factor | - 48 - |
| 3.4. Livestock parameters | - 48 - |
| 3.4.1. Live weight, mature weight and average daily weight gain | - 48 - |
| 3.4.2. Milk yield and fat content. | - 49 - |
| 3.4.3. Animal work rates and locomotion | - 49 - |
| 3.5. Prediction of seasonal values of digestible energy and the methane conversion rate..... | - 53 - |
| 3.6. Assessment of dry matter intake..... | 60 |
| 4. Results..... | 60 |
| 4.1. Seasonal OMD, DE, Ym..... | 60 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Predicted diet composition | 61 |
| 4.3. Gross energy and dry matter intake..... | 61 |
| 4.4. Expected methane emission factors | 62 |
| 5. Discussion..... | 63 |
| 5.1. Seasonal feed digestibility | 63 |
| 5.2. Variation of methane conversion rate | 63 |
| 5.3. Trends in expected dry matter intake | 64 |
| 5.4. Annual methane emission factor..... | 66 |
| 5.5. Sensitivity of the predicted methane emission factor | 67 |
| 6. Conclusion | 67 |
| Acknowledgements | 68 |

CHAPITRE 4 : Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa is far lower than previous estimates..... 70

| | |
|---|---------------|
| 2. Introduction..... | 73 |
| 3. Materials and methods | 74 |
| 3.1. Study site and feeding systems | 74 |
| 3.2. Sources of livestock data used | 76 |
| 3.3. Computation of enteric methane emission factors | - 80 - |
| 4. Results and discussion | - 81 - |
| 4.1. Estimated enteric methane emission factors | - 81 - |
| 4.2. Effect of input parameters used | - 82 - |
| 4.3. Potential influence of estimated MEF and research perspectives | - 83 - |
| 5. Conclusion | - 87 - |
| Conflicts of interest..... | - 87 - |
| Acknowledgments..... | - 88 - |

CHAPITRE 5: Estimation des émissions de gaz à effet de serre du terroir de Saré Yoro Bana..... - 90 -

| | |
|--|---------------|
| 1. Introduction..... | - 91 - |
| 2. Méthodologie..... | - 92 - |
| 2.1. Organisation du terroir et systèmes de production..... | - 92 - |
| 2.2. Modèle conceptuel et postes d'émissions | - 93 - |
| 2.3. Emissions de GES comptabilisées..... | - 94 - |
| 6.1.1. 2.3.1. Méthane..... | - 94 - |
| 6.1.2. 2.3.2. Oxyde nitreux..... | - 94 - |
| 6.1.3. 2.3.2. Dioxyde de carbone..... | - 95 - |

| | |
|--|----------------|
| 2.4. Méthode d'estimation des émissions | - 95 - |
| 2.5. Données mobilisées | - 95 - |
| 2.5.1. Données d'activités..... | - 95 - |
| 2.5.2. Données sur la gestion des déjections à l'étable..... | - 96 - |
| 2.5.3. Facteurs d'émission utilisés..... | - 98 - |
| 3. Bilans GES comparés au sein du même terroir | - 100 - |
| 3. Allocation des impacts et intensité d'émission | - 101 - |
| 4. Résultats | - 101 - |
| 4.1. Estimation des émissions de GES | - 102 - |
| 4.2. Contribution des différents GES | - 103 - |
| 3.3. Contribution des différentes espèces animales | - 103 - |
| 3.4. Intensités d'émission | - 104 - |
| 3.5. Conséquence de la prise en compte du stockage de carbone | - 104 - |
| 4. Discussion | - 104 - |
| 4.1. Comparaison des deux méthodes d'estimation de GES | - 105 - |
| 4.2. Importance des postes d'émission | - 105 - |
| 4.2.1. Méthane entérique..... | - 105 - |
| 4.2.2. Brûlage des savanes | - 106 - |
| 4.2.3. Déjections directement déposées sur les parcours..... | - 106 - |
| 4.3. Variation des intensités d'émission | - 107 - |
| 4.4. Emissions de GES et stockage de carbone | - 108 - |
| 5. Conclusion | - 110 - |
| CHAPITRE 6: Discussion générale et conclusion | 112 |
| 1. Reconsidération des postes-clés aux émissions totales de gaz à effet de serre du terroir | 113 |
| 1.1. La contribution des animaux à travers leur activité biologique | 113 |
| 1.2. Influence de certains paramètres dans l'estimation des émissions de GES | 113 |
| 1.3. Rôle du stockage de carbone dans la compensation des émissions de gaz à effet de serre | 116 |
| 2. Actions potentielles d'atténuation des émissions de GES | 117 |
| 2.1. Amélioration de la ration alimentaire des animaux | 117 |
| 2.2. Optimiser la gestion des déjections animales | 118 |
| 3. Conclusions et perspectives | 120 |
| 3.1. Réponses aux questions de recherche | 120 |
| 3.2. Perspectives | 121 |

| | |
|---|----------------|
| <i>Références bibliographiques</i> | 123 |
| ANNEXE | - 162 - |

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ADF: acid detergent fibre

ADG: average daily weight gain (ou **GMQ**, gain moyen quotidien)

ADL: acid detergent lignin

AI : Analyse d'Incertitudes (ou **UA**, Uncertainty Analysis)

ANOVA: analysis of variance

AS : Analyse de sensibilité (ou **SA**, Sensitivity Analysis)

ASS : Afrique Sub-Saharienne (ou **SSA**, *Sub-Sahara Africa*)

ASS : Afrique subsaharienne (ou **SSA**, Sub-Saharan Africa)

AVSF : Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières

CC : Changement Climatique (ou *Climate Change*)

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CF: crude fibre

CH₄ : méthane

CH₄ : méthane

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO₂ : Dioxyde de carbone

CP: crude protein

CRZ : Centre de Recherches Zootechniques

DE: digestible energy

DMI: dry matter intake

EDS: early dry season

EE: ether extract

Eq-CO₂ : Équivalent dioxyde de carbone (ou équivalent carbone)

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

FAOSTAT : Base de données statistiques de la FAO

FE : facteur d'émissions (ou **EF**, *Emission Factor*)

FPCM: fat and protein-corrected milk

GEI: gross energy intake

GES : Gaz à effet de serre (ou **GHG**, *Green House Gase*)

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (ou **IPCC**, *Intergovernmental Panel on Climate Change*)

GLEAM : Modèle mondial d'évaluation de l'élevage et de l'environnement

GRA: Global Research Alliance

ha: hectare

IE : Intensification écologique

ILRI : Institut international de recherches sur l'élevage (*International Livestock Research Institute*)

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

Kt : kilotonne

LDS: late dry season

LW: average live body weight (ou **PV**, poids vif)

MEF: methane emission factors

MJ: Mégajoule

MO: Matière organique

MS: Matière sèche

N₂O : Oxyde nitreux

N₂O : oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote)

NAMA: Nationally Appropriate Mitigation Actions

NDC: Nationally Determined Contributions

NDF: neutral detergent fibre

NE: net energy

NH₃ : ammoniac

NO₃⁻ : nitrate

OMd: organic matter digestibility

PDF: probability density function

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PROGEBE : Projet de gestion durable du bétail ruminants endémiques

SELMET: systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux

SGF : Systèmes de gestion du fumier

SODEFITEX : Société de Développement et des Fibres

SRC: standardized regression coefficient

UBT: Unité Bovin Tropical (ou **TLU**, *Tropical Livestock Unit*)

WS: a wet season (WS)

Y_m: methane conversion factors

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----------------------------------|
| Table 2.1 : Input parameters used to estimate enteric methane emission factors for Gobra and Ndama cattle using the Tier 2 methodology and their sources | 30 |
| Table 2.2 : Assigned values of input parameters used in the Tier 2 model to assess enteric methane emission factors for Gobra and Ndama lactating cows | 32 |
| Table 2.3 : Assigned values of input parameters used in the Tier 2 model to assess enteric methane emission factors for Gobra and Ndama adult male cattle..... | 34 |
| Table 2.4 : Contribution to the overall uncertainty of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for lactating cows of Senegalese native cattle breeds | 36 |
| Table 2.5 : Contribution to the overall uncertainty of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for adult male Senegalese native cattle breeds..... | 37 |
| | |
| Table 3. 1 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric methane from Ndama cattle based on the ruminant nutrition approach and referenced sources | 50 - |
| Table 3. 2 : Average values of input parameters used to determine gross energy intake (GE, MJ/kg DM) of each class of Ndama cattle reared in southern Senegal. ... | 51 - |
| Table 3. 3 : Feedstuff used in this study taken from previous works and their average nutritional composition in terms of apparent dry matter (DM, %), crude protein (CP, g/kg DM), crude fibre (CF, g/kg DM), neutral detergent fibre (NDF, g/kg DM), acid detergent fibre (ADF, g/kg DM), acid detergent lignin (ADL, g/kg DM), ether extract (EE, g/kg DM), digestible organic matter (OMd, %), gross energy (GE, MJ/kg DM) and feed digestibility (DE, %)..... | 54 - |
| Table 3. 4 : Expected feed digestibility values obtained from organic matter digestibility sourced from various studies conducted in the study area, Kolda region | 60 |
| Table 3. 5 : Predicted dry matter intake of Ndama cattle as a function of each category of animal. Average values are based on estimations of seasonal gross energy intake (GE, MJ/d) divided by the associated energy density of the feed in each season | 61 |
| Table 3. 6 Summary of estimated average methane emission factors for Ndama cattle reared in the Sudanian zone of Senegal, as a function of the considered categories of cattle in each season and over the year..... | 62 |
| Table 3. 7 : Observed dry matter intake (DMI, kg DM/d) sourced from research conducted in the studied site, Saré Yoro Bana. The prediction of dry matter intake from all categories are based on daily DMI values of 4.4, 4.81, 4.0 and 3.6 kg DM/TLU (animal of 250 kg of liveweight), from Ickowicz and Mbaye (2001), Chirat (2009), | EFEFAECES Project 2013-2015 |

(<https://www.ppzs.org/projets/termine/waapp-efefaeces>) and Lecomte et al. (2016), respectively, assuming a linear relationship between metabolic weight ($LW^{0.75}$) and DMI..... 64

Table 3. 8 : Predicted daily dry matter intake (DMI, kg DM/d) in each season considering average daily gain (ADG, kg/d) sourced from Sissokho (1998), ISRA-PROGEBE dataset 2009-2015 and using the model from Minson and McDonald (1987) for each animal category..... 65

Table 4.1 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric fermentation by sheep using the 2006 IPCC Tier 2 methodology and their reference sources..... 77

Table 4.2 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric fermentation by goats using the 2006 IPCC Tier 2 methodology and their reference sources..... 78

Table 4.3 : Estimated dry matter intake based on NE requirements and the emission factor for enteric fermentation by different sub-categories of sheep..... - 86 -

Table 4. 4 Estimated dry matter intake based on NE requirements and the emission factor for enteric fermentation by different sub-categories of goat..... - 86 -

Tableau 5.1 : Synthèse des données d'activités utilisées dans l'estimation des émissions de GES..... - 97 -

Tableau 5.2 : Liste des coefficients utilisés dans l'estimation des émissions de GES. - 99 -

Tableau 5.3 : Liste des facteurs d'émission utilisés dans l'estimation des émissions de GES..... - 99 -

Tableau 5.4 : Bilan des émissions en tenant compte du stockage du carbone dans les sols de savanes et de forêts, selon les hypothèses de stockage et les deux méthodes (Tier 1, Tier2) d'inventaires des émissions..... - 104 -

Tableau 5.5 : Comparaison d'intensités d'émissions obtenues avec la méthode 2 et celles rapportées dans la littérature pour la région d'Afrique subsaharienne..... - 108 -

Tableau A.1 : Tableau récapitulatif des principaux paramètres utilisés et de leurs modalités respectives pour caractériser les exploitations agricoles..... clxxvii

Tableau A. 2 : Caractéristiques structurelles des exploitations agricoles enquêtées..... clxxxii

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|--------|
| Figure 1.1 : Répartition spatiale des trois principaux systèmes d'élevage au Sénégal (adapté de Benoit-Catin et Ba, 2005) | 8 |
| Figure 1.2 : Empreinte carbone brute de la production de lait et de viande d'espèce bovine dans les différentes régions du monde (source des données FAOSTAT 2020) | 9 |
| Figure 1.3 : Projection des populations humaines mondiales (a) et africaines (b) (exprimées en millions) (sources Nations Unies, 2017 et FAOSTAT, 2019, respectivement) | 10 |
| Figure 1.4 : Niveaux d'évaluation des émissions de GES proposés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat..... | 12 |
| Figure 1.5 : Schéma organisationnel de la gouvernance internationale sur la question du changement climatique conformément aux dispositions de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. | 16 |
| Figure 1.6 : Contribution (exprimées en Gg Eq-CO ₂) des sources d'émissions nationales de GES de quatre pays africains (sources des données FAOSTAT, 2020). Ent : méthane entérique ; Dej : déjections animales sur parcours ; Bsa : brûlage des savanes ; Riz : riziculture ; Gde : gestion des déjections ; Eng : engrais minéraux ; Res : résidus de cultures ; Fsl : fumier appliqué ; Brr : brûlage résidus ; | 17 |
| Figure 1.7 : Articulation des chapitres du document..... | 22 |
| | |
| Figure 2.1 : Sensitivity indices based on standardized regression coefficients of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for lactating cows of Senegalese native cattle breeds..... | 38 |
| Figure 2. 2 : Sensitivity indices based on standardized regression coefficients of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for adult males of Senegalese native cattle breeds..... | 39 |
| | |
| Figure 4. 1 : The main forage types of small ruminants reared in the sub-humid zone of Senegal. These results were obtained through surveys conducted with 300 households located in Bandafassi (n=84), Ouassadou (n=111) and Tenghory (n=105). On a scale from 1 to 10 points, the herd manager of small ruminant allocated importance to each type of forage. Then, for each survey area, the average proportion of each type of forage was calculated. | 75 |
| Figure 4.2 : Age pyramid of small ruminants in the sub-humid zone of Senegal expressed as a proportion of the total population (%). These figures are based on an animal sample of 987 sheep and 1575 goats from localities of Bandafassi, Ouassadou and Tenghory. | - 80 - |
| Figure 4.3 : Importance of input parameters used in the Tier 2 model to predict enteric methane emission factors for small ruminants in the Senegalese sub-humid | |

zone. The figure shows the increase in the Mean Square Error in terms of percentage (%IncMSE) and quality (IncNodePurity) when the parameter is randomly permuted. The parameter is important when the associated %IncMSE or IncNodePurity is higher. In our case, if the important parameters (i.e. Cfi, Ym and LW) are randomly permuted, they will change greatly the predicted enteric methane emission factor. - 87 -

Figure 5.1 : Organisation concentrique du terroir de Saré Yoro Bana (adaptée de Kairé, 1999, Manlay, 2001, Ickowicz et Mbaye, 2001) - 93 -

Figure 5.2 Schéma conceptuel des postes d'émissions comptabilisées dans l'évaluation de l'impact des gaz à effet de serre (méthane : CH₄, oxyde nitreux : N₂O et dioxyde de carbone CO₂) du terroir de Saré Yoro Bana..... - 94 -

Figure 5.3 : Stabulation des vaches pour la production de lait en saison sèche dans le village de Baty (Vélingara, Source : © S.Ndao) - 97 -

Figure 5.4 : Contribution (exprimée en %) aux émissions totales des différentes postes d'émission de GES du terroir de Sare Yoro Bana selon les méthodes 1 (valeurs par défaut GIEC) et 2 (certaines valeurs contextualisées). Ent : méthane entérique ; Bsa : brulage des savanes ; Dej : déjections sur parcours ; Gde: système de gestion des déjections; FTr: fabrication et transport d'engrais minéraux ; Eng: engrais minéraux ; Res : résidus de cultures ; Riz : riziculture ; Ter : termites ... - 102 -

Figure 5.5 : Contribution (exprimée en %) des différents GES aux émissions totales du terroir de Saré Yoro Bana selon les deux méthodes appliquées..... - 103 -

Figure 5.6 : Organisation de terroirs villageois autour des parcours communaux a kolda (adaptee de fanchette, 2011) - 110 -

Figure 6. 1 : Indices de sensibilité des données activités et des facteurs d'émission utilisés dans le bilan gaz à effet de serre du terroir de Saré Yoro Bana. Les indices sont obtenus après la génération de 100 000 valeurs de chaque paramètre d'entrée 114

Figure A. 1 : Average monthly rainfall and ambient temperatures between 1980 and 2016, Dry matter intake and organic matter digestibility observed in the study area, Kolda. Data are from Service de Météorologie Nationale and the Centre de Recherches Zootechniques de Kolda databaseclxiii

Figure A. 2 : Organization of the Tier 2 IPCC 2006 model for enteric methane emission factor estimate. Various information (input parameters) related to the livestock system should be gathered hence implemented to different equations in order to calculate energy requirement at each stage (e.g. maintenance, work). Thus, the gross energy intake allows to predict the enteric methane emission factor, with regard to the methane conversion rate and the value of energy content of methane clxiv

Figure A. 3 :Localisation de la zone d'étude dans le territoire nationalclxxiv

| | |
|--|----------|
| Figure A. 4 : Représentation de l'évolution du système de production animale dans la zone de Vélingara..... | clxxvi |
| Figure A. 5 : Organisation de la filière des effluents d'élevage de la collecte jusqu'à la phase d'application dans les parcelles de culture..... | clxxvii |
| Figure A.6 : Modèles d'étable (a) et fréquence de raclage du fumier des étables dans les localités d'origine des producteurs enquêtés (b).Les signes mentionnés dans la figure représentent les fréquences d'apparition des modalités de pratique dans la localité considérée. Saré Coly Sallé (SCS), Nématoba (NEM), Mballo Counda (MBC), Mampatim (MAM), Linkéring (LIN) et Kounkané (KAN). PFU : présence de façade ; ATF : absence de toit et de façade ; ABE : absence d'étable (vache mise au piquet) ; PTF : présence de toit et de façade ; PTU : présence de toit uniquement ; BIM : bimensuel ; QUO : quotidien ; HEB : hebdomadaire ; PHE : plus de deux semaines | clxxx |
| Figure A.7 : Composition des fumiers (a) et systèmes de stockage (b) selon les localités d'origine des producteurs enquêtés. Les signes mentionnés dans la figure représentent les modalités des pratiques et les chiffres sur l'axe des ordonnées leur fréquence d'apparition dans la localité considérée. | clxxxii |
| Figure A. 8 : Fréquence de la durée de stockage de la fumure organique après raclage dans les étables..... | clxxxiii |
| Figure A. 9 : Destination des fumiers stockés par les agroéleveurs de la zone de Vélingara | clxxxiii |

INTRODUCTION

De nos jours, la lutte contre le changement climatique est une priorité. En effet, au niveau mondial, une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est mise en œuvre, à travers les différents protocoles et engagements des pays. Dans tous les secteurs d'activités dont l'élevage, des efforts de réduction des émissions sont attendus.

Dans cet élan de réduction des émissions de GES, il est fondamental d'appréhender les niveaux d'impacts de chaque système de production sur le changement climatique. Actuellement, en Afrique subsaharienne (ASS), les travaux sur la participation des élevages au changement climatique sont habituellement faits à l'échelle nationale (inventaires nationaux de GES) ou sur des exploitations familiales individuelles. Ensuite, les facteurs d'émission (FEs) utilisés pour évaluer l'impact environnemental des activités de productions agricoles sont estimés à partir de travaux menés sur d'autres systèmes de productions, notamment ceux des pays développés.

Dans cette thèse, nous proposons en premier lieu de revoir le niveau d'analyse, en passant à un ensemble de taille économique et sociale suffisante pour être représentatif d'un socio-écosystème organisé à l'échelle duquel, des politiques d'actions puissent être mises en place, le terroir. Puis, nous cherchons à réduire les incertitudes associées aux résultats d'études d'impact par la contextualisation des FEs des postes-clés d'émission pour les systèmes agricoles ouest-africains. Cette démarche fait particulièrement défaut en Afrique de l'Ouest.

Le manuscrit est organisé autour de six (6) chapitres. La problématique et les questions de recherche sont abordées dans le chapitre 1. Ce dernier permet d'introduire quatre chapitres de résultats (c.-à-d. chapitre 2 à 5). En fin, le manuscrit se termine par une discussion générale et une conclusion (chapitre 6).



CHAPITRE 1: Problématique et questions de recherche

1. Changement climatique et agriculture

1.1. Un changement climatique avéré

Le changement climatique (CC) est défini par le GIEC (2014) comme une « *mutation dans l'état du climat qui peut être remarquée (p.ex. : par le biais de tests statistiques) par le changement de la moyenne et/ou de variabilité de ces propriétés, et qui se maintient pendant une durée assez longue telle que des décennies ou plus.* ». Une élévation de la température moyenne mondiale de 0,74°C a été constatée entre 1905 et 2005 (GIEC, 2007). Dans son 5^e rapport, le GIEC confirme que la planète se dirigerait vers un réchauffement de 4°C (GIEC, 2014). Si aucune initiative visant à maîtriser cette hausse n'est entreprise, empêcher un réchauffement climatique de 2°C serait irréalisable (Stocker, 2013 ; Kharin et al., 2018). Bien que ces projections de hausse de la température moyenne soient associées à des incertitudes, les résultats d'études les plus récentes confirment un réchauffement climatique et ses répercussions sur les précipitations (Nikulin et al., 2018 ; Diedhiou et al., 2018 ; Maúre et al., 2018).

L'agriculture, en particulier l'élevage, contribue au réchauffement de la planète à travers ses émissions directes et indirectes de GES, principalement le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O) et le méthane (CH₄) (Gerber et al., 2013). Ces émissions de GES sont mesurées à travers les différentes activités de production agricole identifiées dans un périmètre d'étude (p.ex. : parcelle de culture, exploitation agricole, territoire, région, planète).

À l'échelle mondiale, l'élevage est selon certains travaux (p. ex. : Gerber et al., 2013 ; Smith et al., 2014) responsable de 14,5 % des GES d'origine anthropique. Sur ce bilan, les bovins (viande et lait) seraient les principaux contributeurs aux émissions du secteur avec 65 % (soit 4,6 gigatonnes eq-CO₂), comparés aux autres espèces animales (p.ex. : petits ruminants, équins, camelins). Selon Gerber et al. (2013), les émissions les plus importantes de GES sont produites sous forme de méthane (CH₄, 44 %), notamment le méthane entérique émis durant la digestion des aliments par les ruminants. Le reliquat est réparti entre le protoxyde d'azote (N₂O, 29 %) et le dioxyde de carbone (CO₂, 27 %) émis tout au long du cycle de vie des produits mis sur le marché. En outre, un rapport de la FAO (Steinfeld et al., 2006) estime que l'élevage contribue à la dégradation des terres et des écosystèmes dans le sens où les cultures fourragères destinées à l'alimentation animale occupent 30 % des surfaces cultivées ; les animaux utilisent 26 % des surfaces exploitées de la planète dont 70 % sont dégradées. D'après ce même rapport, 8 % des utilisations humaines de l'eau sont destinées à l'irrigation des parcelles de cultures fourragères, sans oublier les polluants induits par les effluents. Ces émissions de GES, rapportées par de nombreuses études dans le secteur de l'agriculture, sont responsables du changement climatique.

1.2. Vulnérabilité de l'agriculture des pays du Sud

L'agriculture est vulnérable face au CC. Cette vulnérabilité est encore plus importante pour l'agriculture des pays où les moyens de subsistance des

populations proviennent essentiellement de la production agricole, en partie autoconsommées, et où les ressources naturelles seront plus impactés par le CC (Mertz et al., 2009 ; Soussana, 2013 ; Field, 2014).

Le CC affecte négativement les performances d'élevage (réduction du rendement et de la qualité du lait, perte de poids), les capacités reproductives (Renaudeau et al., 2007 ; Maurya et al., 2018 ; Sejian et al., 2018) et la productivité agricole des régions du monde (Olesen et Bindi, 2002). Avec le CC, la fréquence des événements climatiques extrêmes augmente ainsi que l'imprévisibilité des régimes climatiques (Amuzu et al., 2018 ; Bonan et Doney, 2018). Les conséquences néfastes du CC sur les performances agricoles seront particulièrement visibles chez les agriculteurs les plus pauvres qui verront leur niveau de précarité s'aggraver (Hertel et Rosch, 2010).

En Afrique de l'Ouest, les conséquences déjà rapportées du CC se caractérisent par une augmentation généralisée des températures (Sultan et Gaetani 2016). Dans cette même région, ces mutations déjà en cours vont perturber la répartition des zones climatiques (Sylla et al., 2016). Les répercussions négatives du CC sur les performances de productions agricoles vont se refléter sur la qualité et le prix des produits, et donc sur la sécurité alimentaire (Parry et al., 2004 ; Vermeulen et al., 2012).

1.3. Adaptation et atténuation des émissions de GES

1.3.1. Actions d'adaptation et d'atténuation

De nos jours, la question du CC a cessé d'être une problématique uniquement scientifique ; c'est un enjeu prégnant pour la société humaine, les pouvoirs politiques et les acteurs de développement (Soussana, 2013). En effet, face à cette situation de devoir produire suffisamment de protéines (animales et végétales) avec un impact moindre sur l'environnement, des initiatives d'atténuation et d'adaptation au CC ont été entamées par les pays signataires de la CCNUCC (p.ex. : les plans nationaux climat).

La CCNUCC (1998) définit l'atténuation (*mitigation* en anglais) comme un ensemble de stratégies contribuant à maintenir, voire réduire les sources d'émission de GES dans les systèmes naturels ou humains (p.ex. : conservation des puits de CO₂ tels que les forêts). Par rapport aux systèmes (naturels ou humains), le concept d'adaptation, tel que nous l'entendons dans notre étude, est relatif aux actions (naturelles ou planifiées) concourant à réduire les conséquences négatives du CC ou à optimiser les opportunités induites par ce dernier (McCarthy et al., 2001 ; Adger et al., 2007). En d'autres termes, l'atténuation s'intéresse à la réduction des émissions de GES alors que l'adaptation s'attaque aux effets du CC pour renforcer la résilience des sociétés et des écosystèmes.

En vue de favoriser un environnement de développement de systèmes à faible émission de GES, une volonté politique soutenue est nécessaire pour garantir le financement d'infrastructures et de technologies innovantes (Calderon et al., 2014). Incontestablement, en matière de stratégie d'atténuation des émissions de GES, un accompagnement politique, jusque-là marginal dans les négociations internationales, est fondamental pour adopter des systèmes de productions efficaces

(Fan et Ramirez, 2012), donc avantageux au plan économique et environnemental (Duncan, 2008).

Les réponses à la question de l'adaptation sont multiples (Le Coq, 2017). Pour certains auteurs, l'adaptation doit s'intéresser à l'évaluation des effets potentiels du CC sur les systèmes de production et leur vulnérabilité (Ericksen et al., 2009 ; Vermeulen et al., 2012). Altieri et al. (2015) proposent dans un premier temps d'identifier les marges de progrès. Puis, construire des systèmes de production agricole plus résilients au CC. Smit et Wandel (2006) suggèrent d'évaluer les capacités des populations à s'adapter au CC et de soutenir leur résilience. Ces différentes propositions laissent entrevoir des interactions entre les enjeux de l'adaptation et de l'atténuation. Les actions d'adaptation au CC peuvent avoir des conséquences positives comme néfastes sur le système de production (Locatelli, 2010). À ce sujet, d'autres auteurs ont souligné que des synergies peuvent être trouvées (p.ex. : Wilbanks et al., 2003 ; Smith et Olesen, 2010).

Les questions d'adaptation des systèmes doivent donc être envisagées comme des compléments essentiels aux problématiques d'atténuation des émissions de GES (Soussana, 2013 ; Wilkes et al., 2017).

1.3.2. Stratégies d'adaptation et d'atténuation pluri-échelles

Depuis plusieurs années, des stratégies d'atténuation et d'adaptation des émissions sont promues. Ces techniques abordent la question des CC à l'échelle villageoise (*Climate Smart Villages*, Aggarwal et al., 2013 ; Ojango et al., 2016 ; Aryal et al., 2016), du territoire (*Climate Smart Territories*, Louman et al., 2014 ; Minang et al., 2014), du paysage (*Climate Smart Landscape*, Scherr et al., 2012 ; Harvey et al., 2014 ; Torquebiau, 2017) et du système alimentaire (*Climate Smart Food System*, Lipper et al., 2014 ; Schneider et Fast, 2017).

D'après Le Coq (2017), le développement de ces divers concepts se justifie parce qu'il est primordial d'aborder la problématique du CC globalement, c'est-à-dire en intégrant les moyens d'adaptation, d'atténuation, de conservation de la biodiversité et de lutte contre l'insécurité alimentaire des populations les plus vulnérables.

En plus de ces stratégies proposées, la FAO soutient le concept de *Climate-Smart Agriculture* (CSA) ou agriculture intelligente face au climat (Lipper et al., 2014 ; Antle et al., 2018). Le CSA est un concept qui vise i) l'augmentation durable et équitable de la productivité agricole et des revenus ; ii) une plus grande résilience des systèmes alimentaires et des moyens de subsistance tirés de l'agriculture et iii) la réduction substantielle des émissions de GES dues aux activités agricoles (FAO, 2010). Les solutions à proposer dans le cadre du CSA doivent traiter de la mise en place de systèmes d'assurance récolte et couvrir une gamme de pratiques agricoles qui permettent aux systèmes de production considérés d'être plus résilients (Lipper et al., 2014 ; Campbell et al., 2014 ; Caron et al., 2017).

Aujourd'hui, le CSA est expérimenté dans de nombreuses régions du monde, notamment en Afrique (Totin et al., 2018). Par exemple, des études de cas menées dans les systèmes de production agricole africains ont exposé des résultats

prometteurs de cette approche (Connor et al., 2015 ; Douxchamps et al., 2016 ; Stefanovic et al., 2017 ; Weltin et al., 2018). Toutefois, si ces nombreux travaux de recherche ont abordé les effets positifs du CSA sous l'angle de l'atténuation (Edjabou et Smed, 2013 ; Brandt et al. 2017) ou de l'adaptation au changement climatique (Arslan et al., 2015 ; Douxchamps et al., 2016), peu d'études (p.ex. : Åby et al., 2014 ; Campbell et al., 2014) se sont intéressées aux questions qui intègrent les effets combinés de l'atténuation, de l'adaptation et de la productivité agricole.

A ce niveau de problématisation, nous pouvons admettre que les activités de production animale, notamment les systèmes extensifs, peuvent contribuer aux phénomènes de dégradation de terres et de déforestation, et que les systèmes de production des pays du Sud (p.ex. : région d'Afrique de l'Ouest) sont moins productifs que ceux du Nord (p.ex. : Europe). Néanmoins, les systèmes de production extensifs génèrent des effets bénéfiques à leur propre durabilité et à la résilience des écosystèmes qu'ils exploitent (Muchnik et Salcido, 2008 ; Blanfort et al., 2011 ; Le Coq, 2017 ; Dumont et al., 2018). En effet, l'élevage de type extensif propose des solutions pour faire face à des défis environnementaux. Par exemple, les sols sous prairies constituent un socle pouvant filtrer les substances polluantes afin de préserver les nappes d'eau souterraines (Sebillotte et Meynard 1990 ; Gascuel et al., 2008). Pareillement, les parcours naturels qui fournissent une grande partie de l'alimentation animale des systèmes extensifs sont également sources de stockage de carbone à travers la photosynthèse (Gérardeaux et al., 2015 ; Torquebiau, 2017 ; Razafimbelo et al., 2018).

Au Sénégal, des études (Ickowicz et al., 1999 ; Vayssières et al., 2015) ont rapporté que la relation entre les troupeaux caractérisés par une mobilité d'une part, et les ressources locales telles que les parcours naturels d'autre part, est menacée par l'extension des surfaces de culture. Soussana et al. (2010) ont montré que selon la zone écologique, les conditions pédoclimatiques et les pratiques agricoles, le potentiel de séquestration de carbone au sol varie annuellement de 0 à 4 t/ha. En conséquence, les sols agricoles peuvent constituer une option de réduction des émissions de GES s'ils sont gérés efficacement (Gerber et al., 2013).

1.3.3. Complexité des actions d'atténuation et d'adaptation en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, les systèmes intégrés agriculture-élevage dominent. Dans cette relation, les producteurs recyclent les biomasses entre les ateliers de production animale et végétale pour une meilleure autonomie en matière de nutriments et de carbone. Des illustrations de cette intégration sont rapportées par des travaux menés dans les localités du Nord Cameroun, au Sud du Mali (Blanchard et al., 2013) et au Burkina Faso (Diarisso et al., 2015 ; Andrieu et al., 2016 ; Bénagabou et al., 2017). En effet, dans les régions d'ASS, compte tenu d'un accès limité aux engrais minéraux (Rufino et al., 2006 ; Vanlauwe et al., 2014 ; Ezui et al., 2016 ; Zougmore et al., 2018), les producteurs mobilisent les résidus de cultures pour l'alimentation animale. Réciproquement, les fumiers d'animaux restent la principale source de fertilisants des sols agricoles (Rufino et al., 2006 ; Tifton et al., 2011).

Au Sénégal, l'intensification écologique (IE) des systèmes agricoles est de plus en plus identifiée comme une voie d'amélioration de la productivité, d'adaptation aux changements en cours et d'atténuation des émissions de GES. L'IE vise un accroissement des performances végétales et animales par une utilisation plus efficiente des ressources et par l'intensification des processus écologiques régulant la productivité des systèmes agricoles (Griffon, 2009 ; Dugué et al, 2011).

Des travaux menés dans le Bassin arachidier (Audouin et al, 2014 ; Wade et al., 2018 ; Grillot, 2018) et en Haute Casamance (Manlay, 2001 ; Vigan et al., 2014) montrent qu'une intensification des productions animales accompagnée d'un recyclage important des biomasses (résidus de culture, fumiers) constitue un bon levier pour améliorer la fertilité des sols et le rendement des cultures.

En définitive, l'évaluation de la contribution réelle des systèmes d'élevage extensif au CC requiert une prise en compte des effets néfastes mais aussi positifs des pratiques agricoles (Alary et al., 2011 ; Lazard, 2014 ; Vigne et al., 2015 ; Benoît et al., 2017 ; Ballantyne, 2017). Pour cela, la complexité des interactions entre les compartiments du système de production doit être mieux documentée pour appréhender les scénarios (p.ex. : l'impact de l'introduction d'une innovation) et les stratégies futures face au CC (Brisson et al., 2013).

2. L'élevage et ses défis

2.1. Importance et diversité des systèmes d'élevage

Dans les pays en développement, l'élevage représente plus de 30 % du produit intérieur brut agricole et connaît une croissance plus rapide que la plupart des autres sous-secteurs agricoles (Seré et Herrero, 2012). Les activités de productions animales représentent, en valeur, 40 % de la production, et concourent aux moyens de subsistance et à la sécurité alimentaire de près d'un milliard de personnes (Jahnke et Jahnke, 1982 ; FAO, 2009). En ASS, l'élevage de ruminants est bien plus qu'une question de production, c'est un moyen de survie. En effet, dans cette région, l'élevage est la principale source de revenus et d'emplois pour plus de 65 % des populations vivant en zones rurales (Banque Mondiale, 2015).

Les modes d'élevage de ruminants divergent d'une région du monde à une autre. Dans les pays tropicaux, notamment en Afrique subsaharienne (ASS), l'élevage est largement dominé par les systèmes d'élevage extensifs familiaux (Amole et Ayantunde, 2016). Ces derniers se caractérisent par la mobilité des troupeaux de bovins et de petits ruminants (Daget et Poissonnet, 1995 ; Guérin et Hubert, 1995 ; FAO, 2011) et une utilisation très limitée d'aliments concentrés (Rufino et al., 2006).

À l'opposé des systèmes d'élevage extensifs dits « à bas intrants », existent les systèmes intensifs qui mobilisent des moyens de production conséquents. Ce type d'élevage est couramment rencontré dans les pays développés (PAD). En effet, comparée aux pays en développement (PED), la proportion des céréales dans l'alimentation animale est plus élevée dans les PAD (Poux et Aubert, 2018). Les ruminants (bovins, caprins, ovins et buffles) sont estimés à 2,6 milliards de têtes, répartis dans tout le globe à l'exception de quelques zones telles que les parties

glaciales (FAOSTAT, 2020). Les PED abritent près de 70 % des effectifs mondiaux de ruminants mais n'utilisent que 23 % de la production mondiale de céréales (WRI, 2005). Globalement, 33 % des céréales produites dans le monde sont destinés aux animaux (Steinfeld et al., 2009). Cette situation laisse présager de grandes variations des besoins selon les niveaux et les exigences de production.

En Afrique les différences entre les systèmes de productions animales sont notables. Cette diversité est essentiellement liée au degré d'intégration entre les productions animales et végétales, à la nature des déplacements des troupeaux, etc. (Jahnke et Jahnke, 1982 ; Konandreas et Anderson, 1983, Guérin et Roose, 2015). Certains auteurs analysent ce niveau de relation par les flux de matières entre les productions animales et végétales, c'est-à-dire les quantités de fumure animale qui sont mobilisées pour la fertilisation des champs et les résidus de cultures réservés par l'agroéleveur pour alimenter les animaux (Landais et Lhoste, 1990 ; Landais, 2001 ; Moraine et al., 2012 ; Bonaudo et al., 2014).

Le plus souvent, la mobilité des animaux et le type de parcours (non artificialisé) sont mis en relief. Par exemple, au Sénégal, un découpage du territoire en plusieurs zones agroécologiques (cf. Benoit-Catin et Ba, 2005) permet de distinguer trois grands systèmes de production animale (Figure 1.1).

- Les systèmes sylvo-pastoraux dans la partie sahélienne (200-400 mm) qui se caractérisent par la transhumance sur des longues périodes et distances.
- Les systèmes d'élevage agropastoraux de la zone centre du Sénégal (400-800 mm.), autour du bassin arachidier et dans la zone des *Niayes*. Ces systèmes de production animale se différencient de ceux rencontrés dans la partie sylvopastorale par l'association entre l'élevage et les cultures (niébé et arachide notamment).
- Les systèmes agropastoraux dans la partie soudanienne du Sénégal (800-1200 mm.). En plus de la relation entre les cultures et l'élevage, ces systèmes de production se caractérisent par la place importante des ressources fourragères naturelles (arbres, arbustes et graminées) dans l'alimentation animale. Certains auteurs (p. ex. : Ickowicz et Mbaye, 2001 ; Dièye et Gueye, 2002) parlent de systèmes agrosylvopastoraux pour mettre en évidence le rôle de la composante « forêt » dans les systèmes de production animale de cette région du Sénégal.

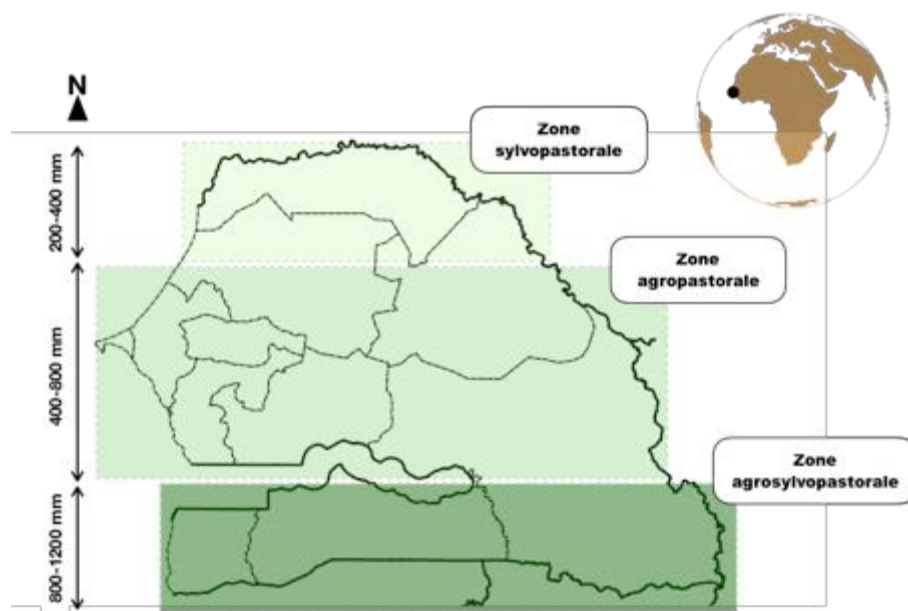


Figure 1.1 : Répartition spatiale des trois principaux systèmes d'élevage au Sénégal (adapté de Benoit-Catin et Ba, 2005)

2.2. Empreinte carbone élevée des élevages

Pour rendre compte de l'impact environnemental des systèmes de productions agricoles et identifier les voies d'amélioration des performances, l'empreinte carbone (EC, *carbon footprint*, en anglais) est l'un des indicateurs les plus utilisés (Bertrand et Barnett, 2011). Selon Gac et al. (2010), l'EC (exprimée en kg ou tonne Eq-CO₂/kg de produit) peut être définie comme les émissions (directes et indirectes) de GES comptabilisées au cours des processus de production rapportées à l'unité de produit (p. ex. : lait, viande, grains) ou de surface.

L'EC peut être exprimée de manière brute ou nette après prise en compte du stockage de carbone (Dollé et al., 2009). Des travaux récents montrent que l'élevage, tel qu'il est pratiqué en ASS a une EC plus élevée que celui présent dans d'autres régions du monde (Gerber et al., 2013). Les statistiques tirées de la base de données FAOSTAT (2020) corroborent l'assertion selon laquelle, l'EC des activités de productions (lait et viande) est plus importante en Afrique (Figure 1.2).

L'utilisation des fourrages fortement celluloses à haut pouvoir méthanogène, tels que les résidus de cultures (mil, maïs, sorgho, riz), expliquerait ce niveau d'empreinte carbone (Vayssières et al., 2011 ; Salah et al., 2014 ; Kohn, 2015). En effet, au cours de la digestion des fourrages, les ruminants contribuent aux émissions de GES par la production de composés carbonés gazeux comme le méthane (CH₄). Cette digestion incomplète des fourrages par les animaux induit le transport dans les déjections (urine et fèces) d'hydrates de carbone non digérés généralement enrichis en azote (N). La dégradation de ces déjections émet du protoxyde d'azote (N₂O) (GIEC, 2014 ; Nasiru et al., 2014).

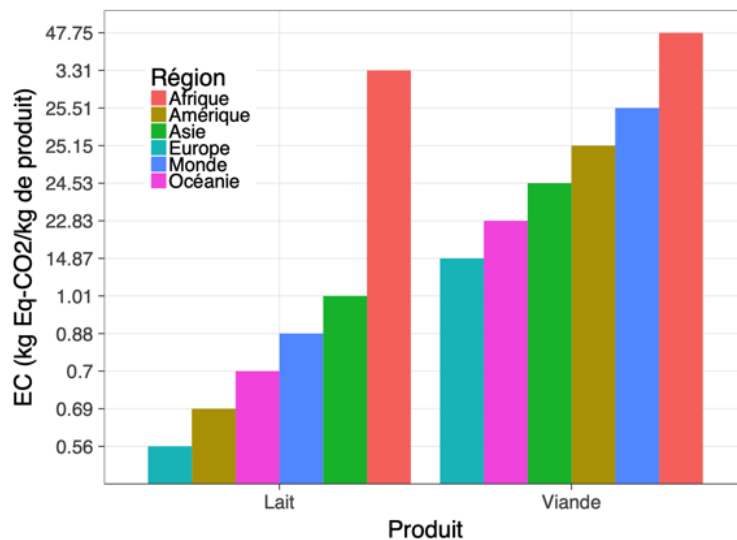


Figure 1.2 : Empreinte carbone brute de la production de lait et de viande d'espèce bovine dans les différentes régions du monde (source des données FAOSTAT 2020)

2.3. Evolution des populations humaines dans les régions du monde

Actuellement, la population humaine augmente dans les pays du Sud (Figure 1.3) où, entre 1900 et 2000, le nombre d'habitants est passé de 1 à 4,8 milliards ; il pourrait y atteindre 19 milliards d'individus en 2100 (Théwis et al., 2005). En ASS, la FAO (2018) prévoit une augmentation des produits agricoles de 70 % d'ici 2050. Compte tenu de la corrélation positive entre la taille de la population humaine et les effectifs animaux, les systèmes d'élevage d'ASS devront assurer les moyens de subsistance ainsi qu'une production durable et compétitive des exploitations agricoles familiales. Cet accroissement de la population dans les zones rurales d'ASS a pour conséquence que la durabilité des systèmes de production n'est pas encore assurée. En effet, des études rapportent une augmentation de 12 % du prix des denrées alimentaires d'ici 2030 en Afrique où les ménages les plus pauvres utilisent 60 % de leurs revenus pour leur nourriture (FAO, 2018). En outre, la durée moyenne des jachères est raccourcie (Coulibaly, 2008) et les ressources fourragères sur les parcours sont devenues limitées (Bremner et Sissokho, 1998). Il s'agira donc aussi de veiller à une utilisation raisonnée de ces ressources pour ne pas en anéantir la capacité de production.

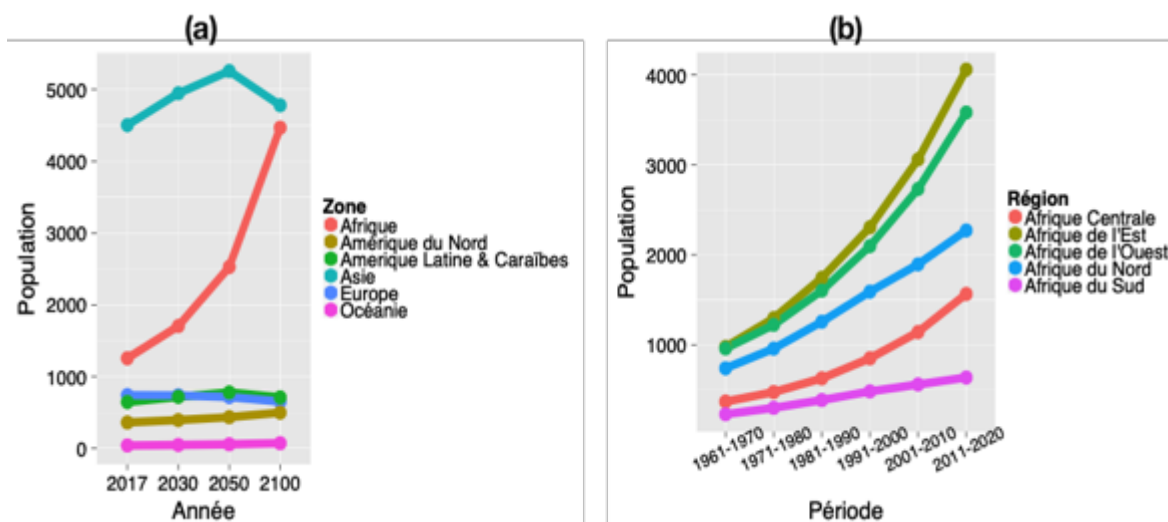


Figure 1.3 : Projection des populations humaines mondiales (a) et africaines (b) (exprimées en millions) (sources Nations Unies, 2017 et FAOSTAT, 2019, respectivement)

2.4. Fertilité des sols agricoles

Présentement, les éleveurs d'ASS exploitent davantage les résidus de cultures pour l'alimentation du bétail. Selon certains auteurs (p.ex. : Manlay et al., 2001 ; Rufino et al., 2010), cette stratégie compromet la fertilité des terres agricoles dans la mesure où les exportations de nutriments (azote notamment) ne sont pas compensées par les restitutions sous forme de déjections animales (urine et fèces). Cette situation de baisse de la fertilité des terres arables dans la région est exacerbée par d'autres phénomènes tels que la désertification, la salinisation et l'érosion des sols (Jahnke et Jahnke, 1982 ; Steinfeld et al., 2006 ; Costa et al., 2013).

En somme, les productions animales, notamment celles d'Afrique subsaharienne, sont face aux défis d'accroître les productions afin de satisfaire la demande en produits animaux, mais aussi de réglementer voire réduire les impacts environnementaux négatifs induits par les activités de production, principalement les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O , CH_4) qui contribuent significativement au réchauffement climatique.

3. Echelle pertinente d'analyse de l'impact environnemental des élevages agro-sylvo-pastoraux ouest-africains

Selon les auteurs, la notion d'« impact » revêt plusieurs définitions (Bocstaller et al., 2010). Dans le cadre de notre étude, nous entendons par « impact » les conséquences induites par les activités de production d'un système agro-sylvo-pastoral sur l'environnement.

En Afrique de l'Ouest (AO), la conception de modèles de production ne peut assurément se faire à l'échelle des unités de production telles que l'exploitation ou le

ménage. En effet, dans ces milieux, de nombreuses ressources (parcours naturels, résidus de cultures, points d'eau, etc.) sont gérées collectivement. Afin de tenir compte des réalités socio-culturelles préexistantes ainsi que de la gestion commune des terres agricoles et des espaces de parcours (Landais et Lhoste, 1990), l'échelle adéquate d'analyse est le terroir. Cette échelle est caractérisée par une cohérence agroécologique : gestion collective de ressources, interactions entre cultures et élevage, diversité spatiotemporelle des usages du sol, coexistence d'espaces cultivés et d'espaces semi-naturels. En plus, dans cette région d'AO, le terroir, notamment villageois, est souvent reconnu comme l'entité territoriale pertinente et représentative d'un socio-agro-écosystème organisé dans lequel des solutions techniques ou/et organisationnelles peuvent être mises en place (Dongmon et al., 2012 ; Dugué et al., 2013).

La notion de « terroir » telle que nous l'entendons dans le cadre de notre étude est « *l'espace dont une communauté villageoise agricole, définie par des liens de résidence, tire l'essentiel de ses moyens de subsistance* ». (Casabianca et al., 2006). Autrement dit, le terroir villageois est la portion du sol environnant où se localisent les champs et le bétail, dans la mesure où ce dernier est associé d'une manière ou d'une autre à la culture.

Donc, au-delà des échelles nationales auxquelles sont actuellement développés les grands inventaires de GES, un enjeu réside aussi dans le changement d'échelle et le passage de la dimension des petites exploitations familiales individuelles à celle d'ensembles de taille économique et sociale suffisante pour être représentatifs d'un socio-écosystème organisé à l'échelle duquel des politiques d'actions publiques et privées puissent être mises en place. Les travaux à cette échelle font particulièrement défaut dans la région d'ASS. Au Sénégal, un travail a été récemment réalisé en zone sahéenne, en situation d'élevage pastoral, sur l'aire de desserte d'un forage dans le Ferlo (Assouma et al., 2019), avec essentiellement des zébus de race *Gobra*. A notre connaissance, aucun travail de ce type n'a été mené sur un terroir agrosylvopastoral en zone soudanienne, avec des ruminants de plus petits formats (taurins *Ndama* et petits ruminants *Djallonkés*) et une plus grande importance des productions agricoles végétales qu'en zone sahéenne.

De ce qui précède, la question suivante mérite d'être soulevée : **Quelle est la contribution des différentes sources d'émissions à l'échelle d'un terroir villageois ?** La réponse à cette question est fondamentale pour identifier les actions prioritaires d'atténuation des émissions de GES.

4. Quelques méthodes d'évaluation des impacts environnementaux

4.1. Lignes directrices 2006 du GIEC

Aujourd'hui, le GIEC est l'organisme de référence internationale sur l'évaluation des changements climatiques (CC). En effet, il aide les pays signataires de la CCNUCC à préparer leurs inventaires nationaux suivant une méthodologie de bonnes pratiques intitulées « *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre* » (GIEC, 2006). En outre, le GIEC communique sur les avancées scientifiques, techniques et socio-économiques de l'impact des CC sur les

écosystèmes terrestres et sur les stratégies à mettre en place pour faire face aux conséquences (Tubiello et al., 2015). La méthodologie recommandée par le GIEC est internationalement reconnue en ce sens qu'elle répond aux exigences de qualité.

À travers ses Lignes directrices, le GIEC propose trois niveaux (ou Tier) d'approche (Tier 1, 2 et 3) pour estimer les émissions de GES. Ces procédures diffèrent en termes de précision, de complexité, et dépendent de la capacité des pays à mobiliser les informations requises (Figure 1.4).

Les coefficients du Tier 1 sont assortis d'une incertitude qui varie entre $\pm 30\%$ et $\pm 50\%$ (GIEC, 2006). Le Tier 2 est plus élaboré que le Tier 1. En effet, pour l'évaluation de l'impact des activités d'élevage, l'application du Tier 2 permet de prendre en compte la caractérisation du bétail et l'influence de l'alimentation (Bouvarel et al., 2010 ; Wilkes et al., 2017). Cependant, pour utiliser le Tier 2, des précautions doivent être prises. Selon le GIEC (2006), l'incertitude associée aux FE produits par le biais du Tier 2 est d'environ ± 20 . Le Tier 3, qui est le niveau le plus détaillé, nécessite plus d'informations sur le système de production, intègre une modélisation plus complexe et demande des moyens financiers importants.

Actuellement beaucoup d'institutions se sont inspirées des lignes directrices du GIEC pour développer des modèles. Par exemple, la FAO s'est basée de la méthodologie du GIEC (2006) pour préparer des rapports (p.ex. : Steinfeld et al., 2006 ; Opio et al., 2013) et développer des outils d'évaluation d'impact des systèmes de production agricole tels que le *Global Livestock Environmental Assessment Model* (GLEAM, <http://www.fao.org/gleam/fr/>) et le *Ex Ante Carbon-balance Tool* (Ex-act tools, <http://www.fao.org/tc/exact/outil-ex-act/fr/>).

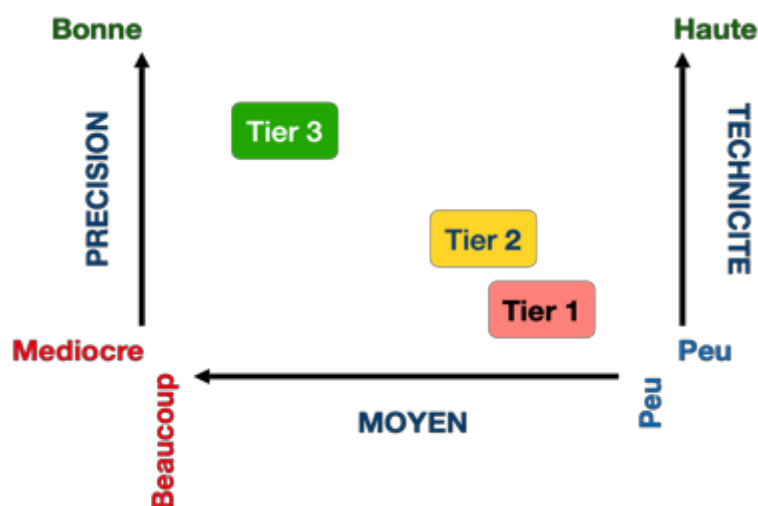


Figure 1.4 : Niveaux d'évaluation des émissions de GES proposés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

4.2. Autres approches d'évaluation des impacts environnementaux

D'autres méthodes et outils d'évaluation de l'impact environnemental des systèmes de production ont été mis en œuvre. Ces diverses approches diffèrent selon les objectifs de l'étude, l'échelle d'analyse, les sources/puits d'émission et les indicateurs pris en compte (Bernoux et al., 2010 ; Van der Werf et al., 2011 ; Olander et al. 2013).

En Europe, la méthode IDEA (Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles) utilise un système de « *scoring* » pour établir la durabilité d'une exploitation (Vilain, 2008). Pour un diagnostic agro-environnemental global de l'exploitation agricole, la méthode INDIGO permet, à travers plusieurs indicateurs (p. ex. : assolement, azote, irrigation, énergie), d'évaluer l'impact des pratiques sur la durabilité de l'exploitation considérée (Bockstaller et Girardin, 2008). Certains outils tels que PLANETE (Bochu, 2002), EDEN (Van de Werf et al., 2009), GES'TIM (Gac et al., 2010), DIA'TERRE (ADEME, 2011) et l'ACCT (Bochu et al., 2013) reprennent les principes généraux de l'analyse de cycle de vie (ACV) d'un produit. L'ACV est une méthode d'analyse environnementale plus aboutie. En effet, elle considère les émissions directes, les ressources utilisées dans le système de production et les émissions indirectes telles que celles associées à la fabrication d'intrants (Guinée, 2002 ; Hendrickson et al., 2006).

Le *Carbon Benefits Project* (CBP, <http://www.carbonbenefitsproject.org>) propose quant à lui des outils qui permettent d'estimer les variations de stock de carbone et les émissions de GES. Le CBP a déjà été appliqué en Amérique latine, en Asie et en Afrique de l'Est. Basé sur la méthodologie du GIEC, l'outil *Holos* est adapté au contexte de production canadien. Il permet d'estimer les émissions de GES dans un pas de temps annuel (Little et al., 2008). Une classification d'outils d'évaluation des impacts environnementaux des activités de production agricole, sur la base de leurs objectifs et de leurs échelles d'analyse est proposée par Colomb et al. (2013).

L'application de ces méthodes et outils met en évidence des leviers d'action pour réduire les émissions de GES dans le système de production. Cependant, le coût de l'implémentation de ces approches (p. ex.: Tier 3) dans les systèmes de production doit être préalablement évalué (Klumpp et al., 2013). Aussi, l'adaptation de ces méthodes dans les systèmes de production mixtes tels que ceux d'ASS nécessite un effort dans la définition du périmètre d'étude (Vayssières et al., 2011). Effectivement, dans cette région, les systèmes de production sont variés et les interactions entre les différents ateliers de production sont complexes (D'Aquino et al., 1995 ; Herrero et al., 2010).

Dans les pays en développement, notamment en ASS, des initiatives sont en cours de développement pour estimer les émissions et absorptions de GES provenant des exploitations agricoles familiales.

En Afrique de l'Est, un programme de recherches coordonné par le CGIAR/CCAFS a implémenté le Standard Assessment of Agricultural Mitigation Potential and Livelihoods (SAMPLES, <http://samples.ccafs.cgiar.org>). L'outil SAMPLES est déjà appliqué dans des pays tropicaux où les exploitations familiales sont majoritaires. En plus d'estimer les émissions de GES induites par les pratiques agricoles, le SAMPLES produit des indicateurs socio-économiques, donc des possibilités

d'atténuation (Rosenstock et al., 2016 ; Rofino et al., 2016). Mais, jusque-là, le SAMPLES n'a pas été expérimenté dans les systèmes de production agricole ouest-africains.

Les méthodologies existantes abordent plus la question des émissions de GES à l'échelle individuelle (p. ex.: troupeau, parcelle, exploitation) et ne prennent pas en compte la diversité et la complexité des exploitations familiales telles que celles d'ASS : (i) forte intégration agriculture-élevage, (ii) famille intégrée au système de production car haut niveau d'autoconsommation, (iii) mobilité des troupeaux qui sortent parfois des limites spatiales du système étudié, etc.

5. Engagements des Parties et inventaires nationaux de gaz à effet de serre

5.1. Accords internationaux sur le changement climatique

La problématique du réchauffement climatique était déjà une préoccupation internationale bien avant les années 80, période durant laquelle la sensibilisation sur les impacts environnementaux fut croissante (Boisson de Chazournes, 1997). En 1988, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ont fondé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais). À cette date, un rapport d'études des experts du GIEC avait déjà mentionné une élévation de la température à la surface du globe de 1,5 à 3,5 °C au cours des 100 années à venir.

En 1992, la Conférence sur l'environnement et le développement, organisée par les Nations Unies à Rio de Janeiro, a permis de décliner des mesures pour protéger l'environnement (Kiss et Doumbe-Bille, 1992). À cet effet, une Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, UNFCCC en anglais) a été adoptée et ratifiée par 188 pays (ou Parties).

Globalement, l'objectif de la CCNUCC par rapport au réchauffement climatique était de maintenir les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute interaction anthropique menaçante avec le système climatique (UN, 1992). À ce titre, tous les pays qui ont ratifié la Convention sont tenus de surveiller les niveaux d'émission de GES d'origine anthropique. De même, des communications nationales (CN) doivent être produites par les pays signataires et soumises à la CCNUCC. D'après le GIEC, ces inventaires doivent prendre en compte les sources d'émission et les puits de carbone tels que les forêts. En outre, les Parties devaient mettre en place une série de mesures concourant à l'adaptation aux changements climatiques (CC) ainsi qu'à l'atténuation des niveaux d'émission à l'échelle nationale et régionale. Cependant, les négociations pour l'application des mesures de la Convention de Rio ont montré des divergences d'intérêts entre les Parties. Par exemple, les pays développés tels que ceux de l'OCDE approuvaient la mise en place d'un instrument prévoyant une limitation des niveaux d'émission de GES. Quant aux pays en développement comme ceux d'Afrique subsaharienne, l'adoption de cette convention pouvait les contraindre à utiliser certaines sources d'énergie. Aussi, ces pays voulaient que le contenu de l'instrument soit rediscuté

pour deux raisons : (i) les Parties n'avaient pas le même niveau de responsabilité dans le réchauffement climatique et (ii) des incertitudes sur les conséquences du réchauffement de la planète restaient à surmonter. Finalement, les pays développés se sont engagés à fournir une assistance financière et technique aux pays en développement.

En 1997, un compromis a été trouvé entre les Parties lors de la réunion de Kyoto où la CCNUCC a été adoptée (Protocole de Kyoto). Durant ce dernier sommet, des précisions sur les stratégies de lutte contre le réchauffement climatique ont été formulées. Les pays développés (c.-à-d. les Parties visées dans l'annexe 1) devaient adapter leurs politiques de développement pour réduire leurs émissions de GES dans les secteurs d'activité (p. ex. : énergie, agriculture) avant 2020 (CCNUCC, 2009). Les pays en développement ne sont pas soumis à ces engagements (c.-à-d. les Parties non visées dans l'annexe 1).

Toutefois, comme le phénomène du CC est mondial, il a été décidé que toutes les Parties devaient s'investir pour le bien de l'humanité. Ainsi, le protocole de Kyoto engage les pays développés comme ceux en développement à coopérer pour faire face aux enjeux environnementaux en menant les actions suivantes :

- mettre en place des technologies respectueuses de l'environnement ;
- sensibiliser les populations aux changements climatiques et ;
- améliorer les techniques de production et de gestion des données utilisées pour réaliser les inventaires nationaux de GES.

L'engagement des Parties à réduire les émissions de gaz à effet de serre a été consolidé en 2015 lors de la COP21 (Accord de Paris). L'une des conclusions de l'Accord de Paris est de limiter le réchauffement climatique à 2°C (cf. Article 2 de l'Accord de Paris). Une documentation détaillée sur les décisions et les engagements des parties est disponible sur le site <https://unfccc.int>.

Dans la Figure 1.5, nous représentons, à titre informatif, les connexions entre la CCNUCC, les acteurs scientifiques et les pays signataires (PS) pour répondre aux enjeux du changement climatique. Afin d'honorer les accords internationaux, les PS soumettent à la CCNUCC leurs documents d'inventaires de GES (IN) à travers des communications nationales (CN). Les IN des PS sont réalisés suivant les Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (cf. GIEC, 2006). Sur la base des conclusions issues de ces IN, les PS et la CCNUCC proposent et soutiennent des options d'atténuation et d'adaptation des systèmes considérés face au changement climatique. Par exemple, à l'échelle nationale, des plans « climat » sont soutenus par le biais de projets et programmes. Ces stratégies ont pour objectif de renforcer la résilience et les revenus des populations vulnérables. À ce titre, les rapports publiés par le PS doivent refléter, de la manière la plus réaliste possible, les spécificités des systèmes de production agricole. Cette démarche constitue une opportunité d'aborder les vraies questions d'atténuation et d'adaptation des émissions de GES de l'agriculture dans un contexte où l'aide publique au développement dans les PED est passée de 19 % en 1980 à moins de 10 % de nos jours (FAO, 2010). Pour ce faire, les IN publiés par les PS, notamment ceux d'ASS, doivent s'appuyer sur les analyses et les recommandations des institutions locales de recherche agricole.

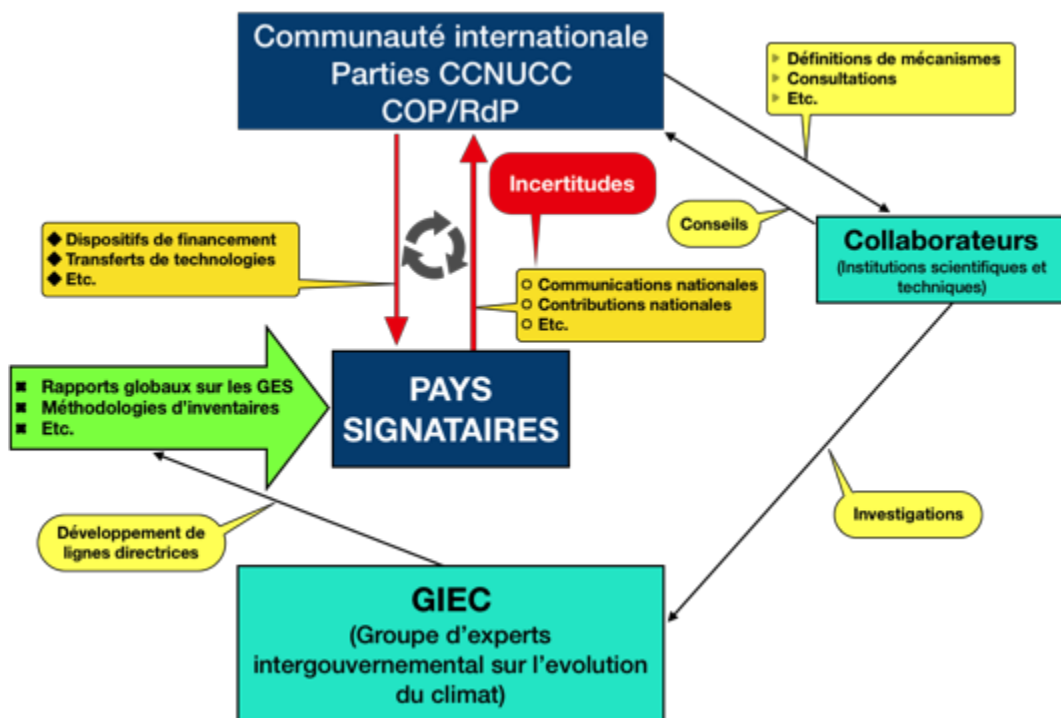


Figure 1.5 : Schéma organisationnel de la gouvernance internationale sur la question du changement climatique conformément aux dispositions de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

5.2. Sources-cles d'émission de ges dans des communications nationales

Sur la base des communications nationales soumises à la CCNUCC (<https://unfccc.int>), l'élevage à travers la fermentation entérique des animaux (Ent) et les déjections animales (Dej) est le principal contributeur aux émissions de GES de l'agriculture (Figure 1.6). Seulement, le rôle des animaux dans les émissions de GES varie considérablement à l'intérieur des régions du monde (Gerber et al., 2013). Cette situation s'explique par la diversité des pratiques et systèmes de production, mais aussi par les méthodologies utilisées.

Dans les pays développés, des expérimentations ont été menées (p.ex. : Johnson et al., 1994 ; Vermorel et al., 2008 ; Berndt et al., 2014). Ces recherches ont permis à ces pays de présenter des facteurs d'émission (FE) de méthane plus précis, qui tiennent compte des facteurs de variation (p.ex. : régime alimentaire, espèces animales, catégorie) de la production de méthane des ruminants.

Une recension des publications scientifiques sur la contribution de l'élevage d'ASS au changement climatique montre clairement que **la composante « Animal », à travers la fermentation entérique des ruminants et les déjections déposées sur les parcours, est la source-clé d'émission de GES** du système de production (cf. Steinfeld et al., 2006 ; Gerber et al., 2013 ; IPCC, 2014 ; Mottet et al., 2018). En raison d'une production d'articles scientifiques insuffisante pour les

agroécosystèmes d'ASS (Herrero et al 2008 ; Rosenstock et al., 2013 ; Wilkes et al., 2017) et suivant les recommandations du GIEC, la contribution aux émissions de GES des ruminants d'ASS est évaluée avec des facteurs d'émission (FE) par défaut du GIEC (Tier 1). Finalement, dans la majorité des pays d'ASS, les FE par défaut utilisés sont de 46 et 31 kg CH₄/tête pour les vaches en lactation et les autres catégories de bovins, respectivement. Pour les petits ruminants (ovins et caprins), la valeur de 5 kg CH₄/tête est appliquée (GIEC, 2006 ; GIEC, 2019).

L'application du Tier 1 dans les contextes de production agricole en ASS repose la problématique de l'incertitude des estimations de GES. En effet, l'estimation des FE du Tier 1 sont fondées sur des données bibliographiques. Ces dernières proviennent principalement des systèmes de production des pays du Nord (Pelster et al., 2015 ; Niu et al., 2018) qui ne correspondent pas nécessairement à ceux des pays tropicaux, notamment d'ASS. Aussi, les FE proposés par défaut ne peuvent tenir compte des spécificités des systèmes d'élevage extensif d'ASS. Ces derniers se caractérisent par une grande variabilité saisonnière et interannuelle des parcours naturels qui constituent les premières ressources alimentaires des ruminants dans ces systèmes de production animale.

Face à l'enjeu d'améliorer les estimations de l'impact environnemental des systèmes de production agricole d'ASS, notamment animale, la question se pose de savoir **quels facteurs d'émissions de méthane entérique utiliser pour les ruminants élevés dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux ?**

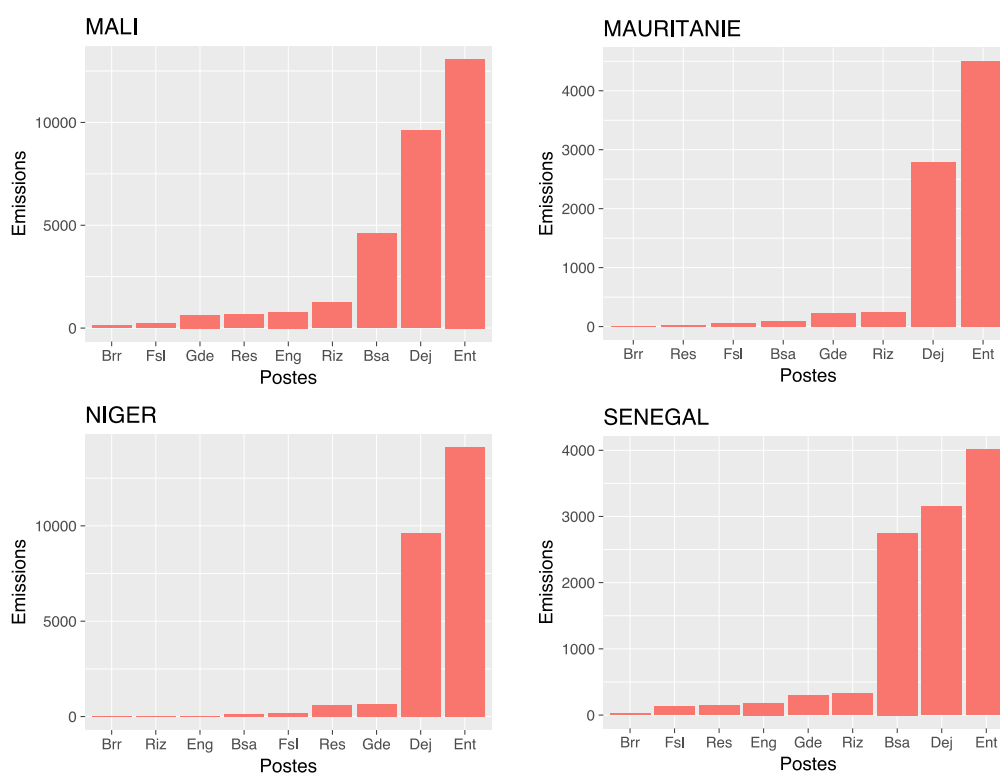


Figure 1.6 : Contribution (exprimées en Gg Eq-CO₂) des sources d'émissions nationales de GES de quatre pays africains (sources des données FAOSTAT, 2020). Ent : méthane entérique ; Dej : déjections animales sur parcours ; Bsa : brûlage des

savanes ; Riz : riziculture ; Gde : gestion des déjections ; Eng : engrais minéraux ;
Res : résidus de cultures ; Fsl : fumier appliqué ; Brr : brûlage résidus ;

5.3. Méthodes directes de mesures des émissions de méthane entérique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer les émissions de méthane entérique des animaux d'élevage. Mais, deux techniques dominent. Il s'agit de la chambre à gaz ou respiratoire (CR, *respiration chamber*) et du traceur (TT, *tracer technique*). Aux USA par exemple, le dispositif des CR est fréquemment installé pour évaluer les émissions de méthane entérique des ruminants (cf. Powers et al., 2014). Cependant, d'autres procédés tels que les traceurs, la micro-météorologie, la dilution des isotopes, etc. sont employés (Kebreab et al., 2006 ; Jonhson et al., 2007 ; Harper et al., 2011). Le principe des CR consiste à placer l'animal dans une enceinte. Les gaz émis (notamment CH₄ et CO₂) par l'animal lors de la respiration peuvent être mesurés. Le dispositif permet aussi de mettre en relation les quantités de méthane émises et le régime alimentaire qui est un facteur de variation très influent. Les expérimentations de Blaxter et Clapperton (1965) ainsi que de Moe et Tyrrell (1979) ont démontré que cette méthode quantifie précisément les émissions de méthane entérique. Cependant, malgré la justesse des calculs, la technique de CR n'est pas reproductible dans les systèmes extensifs (*grazing system*) car les aliments sélectionnés pour ce type d'expérience ne sont pas représentatifs, par exemple, de la diversité des espèces fourragères rencontrées dans les parcours ouest-africains (Clarke, 2002).

La méthode de mesure par les TT est largement détaillée sous forme de fiches par Hassouna et al. (2015). L'approche consiste à placer, dans le rumen, un bolus calibré (*permeation tube*) et rempli d'un volume précis d'hexafluorure de soufre (SF₆). Ensuite, un tube capillaire (*capillary tubing*) installé aux abords des naseaux de l'animal permet de collecter, sur un laps de temps prédéfini, des échantillons d'air stockés dans un tuyau (*Yoke*). Ce dispositif permet de mesurer des débits de CH₄ et de SF₆ sur des animaux sur parcours et au bâtiment (Zimmerman, 1993 ; Jonhson et al., 1994 ; Jonhson et al., 2007 ; Lasse, 2007). Historiquement, l'usage du traceur SF₆ a été très tôt expérimenté par des chercheurs de la *Washington state University* (cf. Johnson et al. 1994). Ensuite, il a été adapté en Nouvelle-Zélande (Lasse et al., 1997 ; Lasse et al., 2001), en Australie (McGinn et al., 2008 ; Deighton et al., 2014 ; Moate et al. 2015), au Canada (McGinn et al. 2006) et dans plusieurs pays européens (p. ex. : France, Pays-Bas, Irlande). Cependant, par rapport à la technique de la CR, les conclusions de recherche diffèrent. Par exemple, Grainger et al. (2007) rapportent que les émissions de CH₄ obtenues après application des deux techniques ne sont pas significativement différentes. Alors que pour Hammond et al. (2016), la valeur moyenne de production de CH₄ obtenue par la technique du TT peut différer d'environ $\pm 7,5\%$ pour un même animal. De plus, cette technique ne mesure pas toute la production de CH₄ dans l'intestin (McGinn et al., 2006). À noter que jusqu'en 2016, cette technologie n'était pas appliquée en Afrique, d'après une recension de plus d'une centaine de publications sur l'usage des traceurs (Deighton et al., 2016). Malgré le développement avéré de ces techniques de mesure, l'estimation des émissions sur de nombreux animaux sur parcours reste un enjeu pour la recherche (Powers et al., 2014). Goopy et al. (2011)

avaient proposé une méthode basée sur des chambres respiratoires mobiles, mais ces résultats selon Powers et al. (2014) doivent être utilisés avec beaucoup de prudence compte tenu des erreurs de mesure associées à l'expérimentateur. À ce titre, le *Greenfeed* est un dispositif qui minimise les incertitudes dues à l'intervention humaine (cf. Hammond et al., 2015). De plus, il est adaptable aux petits ruminants et est depuis un certain temps utilisé dans de nombreux pays pour estimer les émissions de CO₂ et de CH₄ (Hassouna et al., 2015 ; Hristov et al., 2015). Cependant, comparée à la méthode du SF₆ pour estimer les émissions de méthane, l'utilisation du *Greenfeed* n'a pas montré de différence statistique (cf. Hristov et al., 2016 ; Arbre et al., 2016 ; Jonker et al., 2016).

En somme, la majorité de ces méthodes développées pour mesurer directement les émissions de méthane entérique donnent d'assez bonnes précisions. Leur mise en œuvre sur des animaux de races locales, alimentés avec des rations à base des grands types de fourrages utilisés dans les systèmes extensifs agrosylvopastoraux, pourrait permettre d'estimer des facteurs d'émissions de méthane entérique par tête. Cependant, ces expérimentations nécessitent une certaine expertise et leur mise en œuvre peut être coûteuse, en particulier pour les pays en développement.

5.4. Utilisation de modèles de prédiction des d'émissions de méthane entérique

Des formules de prédiction de l'émission de méthane entérique par les ruminants sont mises en œuvre depuis de nombreuses années (Blaxter et Clapperton, 1965 ; Moe et Tyrrell, 1979). Par exemple, le modèle Tier 2 du GIEC actuellement utilisé repose sur le système américain proposé par le *National Research Council* (NRC). Sur la base des besoins énergétiques de l'animal (p.ex. : entretien, production) et de la connaissance du facteur de conversion du méthane, ce modèle estime la production de méthane de la catégorie animale considérée (GIEC, 2006). Avec une connaissance de la quantité d'aliment ingérée, des équations simples permettent d'estimer les émissions de méthane (Wilkerson et al., 1995 ; Vermorel et al. 2008 ; Kennedy et Charmley, 2012 ; Charmley et al., 2016 ; Niu et al., 2018).

D'autres formules de prédiction nécessitent des informations sur la composition chimique des fourrages et la proportion de concentré dans l'aliment distribué (Yan et al., 2000 ; Ellis et al., 2007 ; Sauvart et al., 2011 ; Salah et al., 2014 ; Sauvart et al., 2018).

Ces méthodes de prédiction sont plus facilement applicables dans le cas des pays en développement. Elles permettent également de valoriser les données déjà existantes sur la nutrition et l'alimentation des ruminants en milieu tropical. Cependant, de nombreux paramètres d'entrée sont nécessaires pour réaliser ces prédictions. De même que pour les mesures directes de l'émission de méthane entérique, ces paramètres d'entrée peuvent être coûteux à mesurer directement. Pour réduire l'incertitude de la prédiction des émissions de méthane entérique, la question se pose donc de savoir quels sont les paramètres d'entrée auquel la sortie du modèle de prédiction est la plus sensible. Cela permettra de savoir quels sont les paramètres d'entrée sur lesquels il faut être le plus précis, par des mesures

contextualisées, alors que d'autres paramètres pourront être moins précis et tirés de la bibliographie.

6. Questions et objectifs de recherche

La problématique traitée dans cette thèse est relative à la question centrale suivante : Dans une perspective de co-construire des systèmes de production durables dans des terroirs agro-sylvo-pastoraux d'Afrique de l'Ouest, quelle(s) démarche(s) adoptée(s) pour évaluer la contribution des systèmes d'élevage extensif aux émissions de gaz à effet de serre ?

Cette question centrale est abordée à travers trois sous-questions (SQ) soutenues chacune par une hypothèse (H) :

- SQ1 : Pour réduire les incertitudes dans la prédiction des facteurs d'émission de méthane entérique des ruminants, quels sont les paramètres d'entrée du modèle Tier 2 dont l'estimation doit être la plus précise ?

H1: Certains paramètres d'entrée du modèle Tier 2 sont très influents sur la prédiction des FE du méthane entérique.
- SQ2 : Comment prendre en compte la période de sous-nutrition des ruminants pour avoir une meilleure prédiction de facteurs d'émission de méthane entérique ?

H2: La prédiction des émissions de méthane entérique par l'estimation de besoins des ruminants surestime la quantité de gaz émise.
- SQ3 : En quoi la contextualisation des facteurs d'émission modifie l'évaluation de l'impact des activités de productions agricoles des systèmes agro-sylvo-pastoraux en Afrique de l'Ouest et modifie la contribution relative des différents postes d'émission ?

H3: La contextualisation des facteurs d'émission permet de revoir à la baisse la contribution des activités de productions agricoles aux émissions totales et redistribue la participation des différents postes d'émission liés à ces activités agricoles.

Les objectifs scientifiques de cette thèse sont :

Produire des facteurs d'émission (FE) spécifiques qui intègrent les particularités des systèmes de production agropastoraux des zones subhumides d'Afrique de l'Ouest.

Faire une estimation des émissions de GES d'une entité territoriale de type terroir villageois. Les facteurs d'émission et les données d'activités qui seront utilisés seront en partie ceux produits à partir de mesures in situ. Une attention particulière sera portée à la contribution de l'activité d'élevage bilan des émissions de GES.

Les objectifs de développement de la thèse sont :

- Repenser en concertation avec les acteurs de développement agricole, les leviers d'actions à mettre en œuvre pour assurer la durabilité des systèmes de production à l'échelle des terroirs.
- Proposer des stratégies pour améliorer qualitativement l'établissement des rapports nationaux sur les émissions et absorptions de gaz à effet de serre (GES), conformément aux accords de la politique climatique internationale.

7. Dispositif et origines des données

Le terroir villageois de *Saré Yoro Bana* (SYB, 14°94' Ouest ; 12°88' Nord) est le principal site retenu dans le cadre de cette thèse. Le village est situé dans la région administrative de Kolda, en Haute Casamance (partie sahélo-soudanienne du Sénégal). Dans cette zone, les systèmes de production agricole sont restés traditionnels depuis plusieurs décennies. Le choix du village de SYB se justifie également par le fait qu'il est représentatif (en matière d'agroécosystème) des terroirs villageois de la Haute Casamance. De plus, le terroir de SYB a abrité de nombreux programmes de recherches zootechniques et agroécologiques. Par exemple, l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD/EMVT) ont conjointement conduit le programme de recherche sur l'alimentation du bétail tropical (programme ABT 1987-1998). Les données collectées durant l'exécution du programme ABT, ainsi que les nombreux travaux de thèses (p.ex. : Ickowicz et al., 1999 ; Kairé, 1999 ; Manlay, 2000 ; Ezanno, 2002 ; Chirat, 2009) qui se sont fondés sur les informations de ce dernier ont été mobilisés dans cette thèse.

En outre, les données utilisées proviennent de travaux plus récents dans la région (p. ex. : Vigan, 2012 ; projet WAAPP EFEFAECES 2013-2015). Ces études ont permis d'actualiser des données sur les agroécosystèmes, d'asseoir d'importantes informations relatives à la spatialisation de l'usage des ressources par les animaux et de décrire les pratiques paysannes à l'échelle des terroirs villageois.

À travers plusieurs enquêtes menées dans les communes (N=6) de Vélingara, Kolda, des données primaires relatives aux performances de production des systèmes d'élevage ont été collectées. À l'opposé des pratiques agricoles traditionnelles de SYB, les systèmes de production rencontrés à Vélingara ont connu, sous l'intervention de structures techniques (p.ex. : projets de modernisation de l'élevage, ONG) une dynamique d'intensification (embouche bovine, production de lait en saison sèche), notamment avec l'utilisation de concentré dans l'alimentation animale pour améliorer les performances productives.

Enfin, d'autres données primaires utilisées dans cette thèse proviennent de suivis d'activités de terrain réalisées à *Tenghory* (Basse Casamance), à *Ouassadou* (Vélingara) et à *Bandafassi* (Kédougou), dans cadre du projet de gestion durable du bétail ruminant endémique en Afrique de l'Ouest (PROGEBE Sénégal 2010-2015).

8. Plan du manuscrit

La Figure 1.7 présente les connexions entre les parties du document. Ce dernier est composé de six (6) chapitres. Dans le **Chapitre 1**, nous avons resitué le contexte de notre étude, montré sa pertinence dans les débats scientifiques actuels qui posent la question de la contribution des activités de production agricole, notamment animale (lait, viande) au réchauffement climatique, et de la durabilité des systèmes de production agricole. Ensuite, à travers une analyse de sensibilité et d'incertitude, nous avons étudié les modalités d'application du niveau 2 du GIEC, pour estimer les émissions de méthane entérique des ruminants au Sénégal (**Chapitre 2**). Puis, les conclusions du chapitre 2 nous ont permis de produire des facteurs d'émission originaux pour les taurins Ndama (**Chapitre 3**) et les petits ruminants (**Chapitre 4**) de la zone soudanienne du Sénégal. Compte tenu de l'importance des postes « méthane entérique » et « déjections directes sur les parcours » dans la plupart des communications nationales de GES en Afrique Sub-Saharienne, nous avons orienté le **Chapitre 5** autour d'une estimation des émissions de GES à l'échelle d'un terroir villageois de la Haute Casamance. Enfin, la dernière partie du document (**Chapitre 6**) dresse la contribution scientifique de notre étude et les perspectives de recherche agricole dans la région.

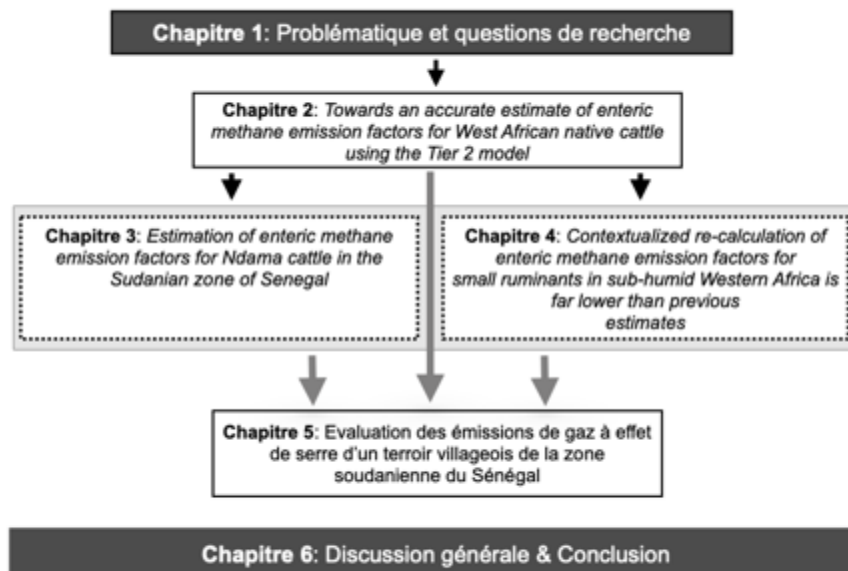


Figure 1.7 : Articulation des chapitres du document

CHAPITRE 2 : Analyse d'incertitude et de sensibilité des paramètres du modèle Tier 2

Dans ses dernières communications nationales sur les émissions de gaz à effet de serre de 2010 et 2015, le Sénégal a utilisé le modèle de prédiction Tier 2 du GIEC. Ce modèle permet d'estimer le facteur d'émission de méthane entérique pour chaque catégorie animale.

Le présent chapitre évalue la contribution spécifique des paramètres d'entrée à l'incertitude associée aux estimations, ainsi que la sensibilité de ces paramètres sur le modèle Tier 2. Un article est en révision sur *animal*. La partie « ¹²analyse de sensibilité » de l'article est déjà présentée sous forme d'étude de cas pour le Sénégal intitulé :

Ndao, S., Traoré, E. H., and Diop, M. (2018). Inventory practice: Sensitivity analysis to prioritize improvements in Senegal. In Wilkes. A., van Dijk, S. Tier 2 inventory approaches in the livestock sector: a collection of agricultural greenhouse gas inventory practices.

Cette étude de cas prend en compte les catégories « mâle adulte » et « vache en lactation » de deux races locales au Sénégal : le zébu *Gobra* et le taurin *Ndama*. Ces deux catégories constituent les sources-clés d'émission de méthane entérique.

¹² <https://www.agmrv.org/knowledge-portal/case-studies/inventory-practice-sensitivity-analysis-to-prioritize-improvements-in-senegal/>

¹³Towards a more accurate calculation of enteric methane emission factors for West African native cattle using the IPCC Tier 2 model

Short title: Uncertainty and sensitivity analysis of the Tier 2 method

¹³ **Ndao, S.** and Moulin, C-H. (2020). Towards an accurate estimates of enteric methane emission factor of Senegalese native cattle using the IPCC Tier 2 model (submitted to *animal* 24 February 2020).

1. Abstract

In the context of the Paris Agreement, and considering the importance of methane emissions from cattle in West Africa, application of a Tier 2 method to estimate enteric methane emission factors is clearly pertinent. The current study has two purposes. Firstly, it aims to detect how much an input parameter contributes to the overall uncertainty of enteric methane emission factors for cattle. Secondly, it aims to identify which input parameters require additional research efforts for strengthening the evidence base, thus reducing uncertainty related to the assessment of methane enteric emission factors. Uncertainty and sensitivity analysis methodologies were applied to input parameters in the calculation of enteric methane emission factors for lactating cows and adult male Senegalese native cattle, using the IPCC Tier 2 model. Generally, results show that the IPCC default inputs parameters such as the coefficient for calculating net energy for maintenance (Cfi), digestible energy (DE) and the methane conversion rate (Ym) are the first, second and third most important input parameters, respectively, in terms of their contribution to uncertainty of the enteric methane emission factor. The sensitivity analysis demonstrated that future research in Senegal should prioritize the development of Ym, Cfi and DE in order to estimate enteric methane emission factors more accurately and to reduce the uncertainty in national agricultural greenhouse gas inventories.

Keywords: uncertainty, sensitivity, Tier 2 model, native cattle, Senegal

2. Introduction

The important role of the livestock sector in food security is well understood (Herrero et al. 2008). At the same time, the sector plays a significant role in greenhouse gases emissions to the atmosphere (see Steinfeld et al., 2006; Gerber et al. 2013). Among total agriculture sector emissions (5.4 Gt CO₂e), 60% is due to livestock emission sources, mostly enteric fermentation (63%) (Tubiello et al. 2015).

Within the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), developing countries are presently required to submit national GHG inventory reports through National Communications. These reports are to be prepared following the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines for GHG inventories (see IPCC, 2006). The 2006 IPCC Guidelines set out three levels (or tiers) of increasing complexity (called Tiers 1-3) for use by a country. The purpose of the tiers is to provide reasonable estimates of national GHG emissions that take regional or country-specific livestock characteristics and agricultural practices into consideration. The Tier 1 method provides default values for GHG emissions per head of livestock and can reflect only variation in livestock numbers. The IPCC 2006 Tier 2 method of enteric fermentation from ruminant is based on net energy estimated using the National Research Council model (see NRC, 1989). This approach requires further details on the characteristics of livestock sub-categories and their performance, for example, in terms of production (e.g. milk yield, daily weight gain) and reproduction (e.g. percentage of lactating cows).

At present, due to the scarcity of appropriate information on agricultural production in Sub-Saharan Africa (SSA), most countries in this region use the Tier 1 approach to quantify agricultural GHG emissions (Rosenstock et al. 2013). However, adopting the IPCC Tier 2 methodology can increase the accuracy of emission estimates (Wilkes et al. 2017).

For example, in the SSA region, Du Toit et al. (2013) and Kouazounde et al. (2015) provide enteric methane emission factors (EF) for cattle in South Africa and Benin, respectively, using the Tier 2 approach. Since its second national communication in 2010, Senegal's national GHG inventory, prepared by the Ministry of Environment, has used EFs calculated using a Tier 2 by Diop (2003, unpublished data).

However, caution is required when applying the IPCC Tier 2 method to the livestock systems in Africa. A recent study report that the Tier 2 model had low predictive ability when the quality of diet changes (Benaouda et al. 2019). In addition, estimation of enteric methane through the IPCC Tier 2 model assumes that animal is reared in *ad libitum* conditions throughout the year. In extensive livestock systems such as in West Africa, feedstuffs from grazing resources is typically available in the wet season but very scarce during the dry season (Ickowicz and Mbaye 2001; Chirat et al. 2014; Assouma et al. 2018).

In recent years, further methods have been developed which allow highly accurate determination of emissions (see Kebreab et al. 2006 ; Goopy et al. 2011 ; Huhtanen et al. 2019). However, for developing countries, these new measurement techniques

may be very expensive and require significant knowledge to implement (Powers et al. 2014; Hammond et al. 2016). Despite its possible shortcomings, therefore, the 2006 IPCC Tier 2 method can be implemented to estimate enteric methane emissions from cattle to provide improved estimates of emissions compared to the default Tier 1 method (IPCC, 2006).

Implementing a detailed uncertainty and sensitivity analysis of the input parameters in the IPCC Tier 2 model can provide guidance for targeting future research efforts to improve enteric fermentation estimates, with which to inform national GHG inventories, Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs) and Nationally Determined Contributions (NDCs).

Here, the first objective is to use uncertainty analysis (UA) to identify which input parameters contribute significantly to the overall uncertainty of enteric methane emission factor estimates using the 2006 IPCC Tier 2 model. The second purpose is to apply sensitivity analysis (SA) in order to identify which parameters need additional research, thereby increasing the accuracy of enteric methane emission factor assessments.

3. Materials and methods

3.1. Location and livestock grazing systems

Senegal is the most westerly country in Africa with a tropical climate. It covers a surface area of 196,712 square kilometers and has an estimated population of 15.7 million (ANDS, 2018). Approximately 77% of the working population are employed in agricultural sector (Roy-Macauley et al. 2017). According to the latest population projections for the year 2018, the rural population represents about 53% of the total population (ANSD, 2018). The estimated ruminant livestock numbers provided by the Senegalese livestock ministry and animal production (MEPA) are 3.6 million cattle, 6.7 million sheep and 5.7 million goats (MEPA, 2016).

The extensive livestock farming systems in Senegal are based on two native cattle breeds which are found in different agroecological zones. The zebu *Gobra* (*Bos indicus*) and the taurine *Ndama* (*Bos taurus*) are mostly raised in the Northern and the Southern parts of Senegal, respectively (ISRA, 2005). The less common *Gobra x Ndama* crossbreed, termed *Djakoré* cattle, is located in the Senegalese groundnut basin. To improve national dairy production in Senegal, local cattle breeds are crossed with exotic dairy breeds e.g. Montbelliard, Holstein, through public artificial insemination campaigns (Marshall et al. 2019).

For this present study, the zebu *Gobra* and the taurine *Ndama* cattle, which are the two dominant domestic cattle breeds, are considered. Indeed, to our knowledge, the proportion of the cattle breeds in Senegal has not been officially documented. However, studying the regional livestock data of the MEPA and the distribution area of cattle, our approximations show the zebu *Gobra* and the taurine *Ndama* represent from 80% to 90% of the Senegalese cattle populations.

3.2. Description of the used model

Our evaluation considers the Tier 2 model proposed by IPCC (2006). This model (Equation 1) allow to approximate annually, enteric methane emission factors (MEF, kg CH₄/head) which is the output variable. To calculate the gross energy intake (GE, MJ/d), net energy (NE, MJ/d) needed for different metabolic functions (i.e. maintenance, activity, growth, lactation, work and pregnancy) and for each subcategory of animal was predicted, using various formulas presented in the IPCC Guidelines. The output variable is calculated based on input parameters, such as average live body weight (LW, kg), average daily weight gain (ADG, kg/day), milk production (Milk, kg/day), feeding situation, and digestible energy (DE, %). Finally, these parameters together with methane (CH₄) conversion factors (Y_m, %) enable calculation of net energy (NE, MJ/day), average daily feed intake (in terms of gross energy content, MJ/d) and the MEF (i.e. output) for each animal sub-category.

$$EF = [(GE * (Y_m/100) * 365)/55.65] \quad \text{Equation 1}$$

Where:

EF = emission factor, kg CH₄ head/yr

GE = gross energy intake, MJ head/yr

Y_m = methane conversion factor, per cent of gross energy in feed converted to methane

The factor 55.65, MJ/(kg CH₄) is the energy content of methane

3.3. Sources of input data

The data of input parameters used derive mainly from two Livestock Research Centres (LRC) of the Senegalese Agricultural Research Institute (*Institut Sénégalais de Recherches Agricoles*, ISRA, see www.isra.sn): the *Centre de Recherches Zootechniques de Dahra* (CRZ-D) and the *Centre de Recherches Zootechniques de Kolda* (CRZ-K). These LRCs are located in the *Ferlo* and the *Casamance* area, respectively. The general focus of these LRCs is to disseminate bulls to Senegalese family farms, so as to maintain and improve livestock productivity (milk and meat) of the indigenous cattle. Moreover, in the CRZ-D and CRZ-K, data on reproductive (e.g. rank of calving, calving interval) and productive (e.g. LW, ADG, Milk) performance are frequently collected through surveys and direct measurements implemented as part of research programs conducted independently or in partnership with international research organizations (e.g. CIRAD, FAO).

For this study, research reports, theses, publications and data sourced from ISRA databases (http://intranet.isra.sn/aurifere/opac_css/) were examined for relevant information. Documents (e.g. annual reports) from the Senegalese Livestock Ministry (MEPA, <http://www.elevage.gouv.sn/>) and the National Agency for Statistics and Demography (ANSD, <http://www.ansd.sn>) were also consulted. When *in situ* data was not available, information from the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories was used. Table 2.1 presents the data sources used to estimate emission factors for Senegalese cattle breeds.

Table 2.1 : Input parameters used to estimate enteric methane emission factors for Gobra and Ndama cattle using the Tier 2 methodology and their sources

| Parameters | Symbol | Unit | References | |
|---|--------|---------|--|---|
| | | | Gobra cattle | Ndama cattle |
| Coefficient for calculating Net energy for maintenance | Cfi | MJ/d/kg | IPCC 2006 (Table 10.4) | |
| Activity coefficient corresponding to animal's feed situation | Ca | MJ/d/kg | IPCC 2006 (Table 10.5) | |
| Average live body weight | LW | kg | CRZ-D database | CRZ-K database |
| Mature live body weight | MW | kg | From expert opinion | From expert opinion |
| Average daily weight gain | ADG | kg/d | Sow et al. 1988; Diop, 1990; Mbaye et al. 1991 | Sissokho, 1998; CRZ-K Research reports |
| Coefficient | C | dim. | IPCC 2006 (Equation 10.6) | |
| Average daily milk yield | Milk | kg/d | ISRA, 2005 | Sissokho et al. 2012 |
| Fat content of milk | Fat | % | Kalandi et al. 2015 | CRZ-K, unpublished data |
| Number of hours of work | Hour | h | CRZ-D Research reports | CRZ-K Research reports |
| Pregnancy coefficient | Cp | dim. | IPCC 2006 (Table 10.7) | |
| Methane conversion rates | Ym | % | IPCC 2006 (Table 10.12) | |
| Feed Digestibility | DE | % | IPCC 2006 (Table 10.2) | |

d: day; dim.: dimensionless

3.4. Uncertainty and sensitivity analysis procedures

Authors from many scientific fields have described the application of uncertainty analysis (UA) and sensitivity analysis (SA) procedures to various modelling situations (e.g. Saltelli et al. 2002 ; Makowski et al. 2006 ; looss, 2011 ; Faivre et al. 2016) and for a number of purposes (Hamby, 1994). For example, to achieve comprehensive uncertainties analysis, the IPCC Guidelines (IPCC, 2006) suggest Monte Carlo simulations (MC) as method. The MC methodology is correct for dealing with great uncertainties, complex models and existing correlations between parameters (Gibbons et al. 2006; Ortiz-Gonzalo et al. 2017). However, expanding the MC domain increases for example, the requirements of the user, in terms of acquiring additional data and designing hence, a need of strong collaboration between experts (Fauser et al. 2011). For this present study, the analysis of variance (ANOVA) and the standardized regression coefficient (SRC) were implemented for UA and SA, respectively.

Lactating cows (LC) and adult males (MA) are both studied animals' categories. The latest national GHG inventory indicates that these two animals' classes are the largest emission sources among all cattle categories in Senegal (see NIR SN, 2015). For each of these animal categories, only the relevant parameters were estimated. For example, parameters such as milk yield (Milk, kg/day), fat content of milk (Fat, %) and the coefficient for pregnancy (Cp) were not estimated for MA, while number of hours of work (Hour, h/day) was not accounted for LC. Hence, 11 and 9 input parameters are considered for LC and MA, respectively. The number of simulations were 200,000 and 20,000 for LC and MA, respectively. These numbers were assumed to be satisfactory to stabilize the output. Indeed, a 3-level complete factorial design is defined (see Makowski, 2013). Considering the K dichotomous input parameters, the design requires 3^K simulations i.e. 3^{11} and 3^9 combinations of values for LC and MA, respectively (Dziak et al. 2012).

3.4.1. Uncertainty analysis

The uncertainty analysis (UA) proposed in this study is related to the used enteric methane emission factor (MEF) of Senegalese native cattle (i.e, output), deriving from IPCC Tier 2 method.

The input parameters characterized are from two main sources i.e. parameters with values proposed by the 2006 IPCC Guidelines (PM) and parameters specific to extensive livestock farming systems in Senegal (PS).

The uncertainties of PM expressed in this study are those described in the literature (e.g. IPCC, 2006; Monni et al. 2007). Considering the Senegalese NIR, the uncertainties in the estimations of PS were not defined. In this condition, expert judgment is used to characterize the uncertainty of each PS. To do this, we proceeded as follows: the average value of each PS is estimated, using livestock data reported from research conducted *in situ*, Senegal. Then, these values were shared with national experts for assessment. These national specialists who worked previously on countrywide programs, which addressed livestock research concerns, suggest standard deviation around each achieved values of PS and hence, allow to determined relative uncertainties of each PS.

Consequently, an uncertainty of $\pm 15\%$ around the value of average live weight (LW, kg) and average daily gain (ADG, kg/day) were assumed. The fitted values of mature weight (MW, kg) are distorted by $\pm 25\%$. Milk production per lactating cow (Milk, kg/day) reported from the extensive livestock farming systems varies widely within and between Senegalese traditional farms, so uncertainty range of $\pm 20\%$ was assumed, while value of fat content of milk (Fat, %) was set to randomly fluctuate by $\pm 2\%$. Regarding feed digestibility (DE, %), an uncertainty of $\pm 15\%$ is most commonly reported in the literature (see Monni et al. 2007, Karimi-Zindashty et al. 2012; Milne et al. 2014). For this study, a value of $\pm 20\%$ was recommended by Senegalese experts, considering the extensive livestock farming systems, which are largely based on the use of rangeland forage resources. The probability density function (PDF) of all used input parameters is believed to be symmetrical.

The overall uncertainty in the estimated output is assumed to be normally distributed, with a 95% confidence interval of plus or minus the used uncertainty of the assigned value for each input parameters. The Table 2.2 and Table 2.3 listed the used values of the input parameters, for each breed and animal category.

To estimate the specific contribution of each parameter to overall uncertainty (i.e. uncertainty associated with calculation of enteric methane emission factors), the analysis of variance (ANOVA) procedure was applied, as mentioned previously. Doing this, the uncertainty ranges related to the input parameters were used to define the maximum and minimum values of each input parameter. The distributions are defined as uniform (i.e. normal distributions). Then, using the *runif* instruction, input parameter values were randomly generated using R software (R Core Team, 2018). To mimic the contributions of the generated values of each input parameter to the output uncertainty, the equations proposed by the IPCC (see IPCC, 2006, Table 10.3) were used. To rank the input parameters according to their effect on the output, the sums of the squares (Sum Sq) computed by the ANOVA procedure for each input parameter were divided by the total sums of squares. Therefore, the results were expressed as a proportion and ordered in terms of percentage to the output uncertainty, using the instruction *order* in the R software. The rule A (IPCC, 2006) is used to estimate the total uncertainty in enteric methane emission factor of studied animal's categories. The rule A is approximation approach based on first-order Taylor series expansion, often referred to as error propagations (Wu and Hsu, 2018).

Table 2.2 : Assigned values of input parameters used in the Tier 2 model to assess enteric methane emission factors for Gobra and Ndama lactating cows

| Symbol ¹ | Unit | Used value ² | | Uncertainty ($\pm\%$) | Sources of used uncertainties |
|---------------------|---------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------------------------------|
| | | Gobra | Ndama | | |
| ADG | kg/day | 0.135 | 0.110 | 15 | Expert judgment |
| C | dimensionless | 0.8 | 0.8 | 30 | Monni et al. 2007 |

| | | | | | |
|------|---------------|-------|-------|----|-------------------|
| Ca | MJ/day/kg | 0.36 | 0.36 | 30 | Monni et al. 2007 |
| Cfi | MJ/day/kg | 0.386 | 0.386 | 30 | Monni et al. 2007 |
| Cp | dimensionless | 0.10 | 0.10 | 10 | Monni et al. 2007 |
| DE | % | 50 | 50 | 20 | Expert judgment |
| Fat | % | 4.7 | 4.24 | 2 | Expert judgment |
| LW | kg | 250 | 200 | 15 | Expert judgment |
| Milk | kg/day | 0.922 | 0.870 | 20 | Expert judgment |
| MW | kg | 200 | 180 | 25 | Expert judgment |
| Ym | % | 6.5 | 6.5 | 15 | IPCC 2006 |

¹ For the definition of symbols, see Table 1

² For the sources of used values, see Table 1

Table 2.3 : Assigned values of input parameters used in the Tier 2 model to assess enteric methane emission factors for Gobra and Ndama adult male cattle

| Symbol ¹ | Unit | Used value ² | | Uncertainty ($\pm\%$) | Sources of used uncertainties |
|---------------------|---------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------------------------------|
| | | Gobra | Ndama | | |
| ADG | kg/day | 0.135 | 0.110 | 15 | Expert judgment |
| C | dimensionless | 1.2 | 1.2 | 30 | Monni et al. 2007 |
| Ca | MJ/day/kg | 0.36 | 0.36 | 30 | Monni et al. 2007 |
| Cfi | MJ/day/kg | 0.37 | 0.37 | 30 | Monni et al. 2007 |
| DE | % | 50 | 50 | 20 | Expert judgment |
| Hour | h/day | 1.23 | 1.23 | 10 | Expert judgment |
| LW | kg | 300 | 250 | 15 | Expert judgment |
| MW | kg | 200 | 180 | 25 | Expert judgment |
| Ym | % | 6.5 | 6.5 | 15 | IPCC 2006 |

¹ For the definition of symbols, see Table 1

² For the sources of used values, see Table 1

3.4.2. Sensitivity analysis

Importantly, some of the SA approach used in this study has been presented previously as a case study (see <https://www.agmrv.org/knowledge-portal/case-studies/inventory-practice-sensitivity-analysis-to-prioritize-improvements-in-senegal/>, accessed June 3, 2019) for the Livestock Research Group of the Global Research Alliance for Agricultural Greenhouse Gases (<https://globalresearchalliance.org>).

A *sensitivity* package developed by Pujol et al. (2012) and implemented in R software was used to conduct a global sensitivity analysis procedure (see Saltelli et al. 2008). First, to generate values between a minimum and the maximum, we set for a range of variation of $\pm 20\%$ around the allocated value of each input parameters, assuming a uniform distribution (with 95% confidence interval). Second, these values were input into the 2006 IPCC Tier 2 model to generate a range of values for the output. Finally, the standardized regression coefficient (SRC) was used to obtain sensitivity indices for each input parameter (see Saltelli et al. 1999). The SRC reflects the change in the standard deviation of the MEF when all other input parameters are fixed and unchanged (Lee Rodgers and Nicewander, 1988; Saporta, 2006).

4. Results

4.1. Contribution of input parameters to uncertainty

Considering the average value of used input parameters (uncertain quantities) and their associated uncertainties (percentage uncertainties), the total uncertainty due to the prediction of enteric methane emission factor of considered animal categories is 12%, using the formula 3.2 reported in the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006, Volume 1, Chapter 3).

The estimated values of the effect of each input parameter on overall uncertainty are presented in Table 2.4 and Table 2.5 for lactating cows and adult males of the Gobra and Ndama cattle breeds, respectively.

The results show the effect of broad difference in the values for input parameters used in terms of their influence (expressed as a percentage, %) to overall uncertainty. The coefficient for maintenance (Cfi) contributes more than 55% of the overall uncertainty. Digestibility (DE%) and the methane conversion factor (Ym) are the second and third most significant input parameters, respectively. The contributions of the other parameters are less than 10%.

In general, these results illustrate the same tendencies for each animal sub-category of each breed, even if there is some difference in terms of contribution of these parameters to overall uncertainty. For example, with respect to lactating cows, the effect of Cfi on the total uncertainty of enteric methane EF calculation is greater for Gobra (58.2%) compared to Ndama (54.4%). As opposed to lactating cows, the contribution of Cfi from adult males are 57.0% and 56.3% for Ndama and Gobra, respectively.

Table 2.4 : Contribution to the overall uncertainty of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for lactating cows of Senegalese native cattle breeds

| Species | Parameter s | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | Contribution (%) |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|--------|------------------|
| Gobra | | | | | | |
| | Cfi | 6302301 | 6302301 | 7319021 | 0.000 | 58.2 |
| | DE | 2064336 | 2064336 | 2397366 | 0.000 | 19.1 |
| | Ym | 1823864 | 1823864 | 2118099 | 0.000 | 16.8 |
| | Ca | 350673 | 350673 | 407245 | 0.000 | 3.2 |
| | LW | 96244 | 96244 | 111770 | 0.000 | 0.9 |
| | Milk | 20210 | 20210 | 23470 | 0.000 | 0.2 |
| | Cp | 3330 | 3330 | 3867 | 0.000 | 0.0 |
| | ADG | 109 | 109 | 127 | 0.000 | 0.0 |
| | Fat | 83 | 83 | 96 | 0.000 | 0.0 |
| | C | 66 | 66 | 77 | 0.000 | 0.0 |
| | MW | 16 | 16 | 18 | 0.000 | 0.0 |
| | Residuals | 172207 | 1 | NA | NA | 1.6 |
| Ndama | | | | | | |
| | Cfi | 4509591 | 4509591 | 6005876 | 0.000 | 54.4 |
| | DE | 1438224 | 1438224 | 1915428 | 0.000 | 17.3 |
| | Ym | 1293936 | 1293936 | 1723265 | 0.000 | 15.6 |
| | LW | 625802 | 625802 | 833444 | 0.000 | 7.5 |
| | Ca | 253737 | 253737 | 337927 | 0.000 | 3.1 |
| | Milk | 15579 | 15579 | 20748 | 0.000 | 0.2 |
| | Cp | 2938 | 2938 | 3913 | 0.000 | 0.0 |
| | Fat | 119 | 119 | 158 | 0.000 | 0.0 |
| | MW | 72 | 72 | 95 | 0.000 | 0.0 |
| | C | 68 | 68 | 90 | 0.000 | 0.0 |
| | ADG | 0 | 0 | 0 | 0.659 | 0.0 |
| | Residuals | 150164 | 1 | NA | NA | 1.8 |

NA: not applicable

Table 2.5 : Contribution to the overall uncertainty of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for adult male Senegalese native cattle breeds

| Species | Parameters | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) | Contribution (%) |
|--------------|------------|--------|---------|---------|--------|------------------|
| Gobra | | | | | | |
| | Cfi | 760631 | 760631 | 605099 | 0.000 | 56.3 |
| | DE | 216733 | 216733 | 172416 | 0.000 | 16.0 |
| | Ym | 195408 | 195408 | 155451 | 0.000 | 14.5 |
| | LW | 107049 | 107049 | 85160 | 0.000 | 7.9 |
| | Ca | 46181 | 46181 | 36738 | 0.000 | 3.4 |
| | Hour | 646 | 646 | 514 | 0.000 | 0.0 |
| | ADG | 8 | 8 | 6 | 0.014 | 0.0 |
| | C | 2 | 2 | 1 | 0.241 | 0.0 |
| | MW | 0 | 0 | 0 | 0.536 | 0.0 |
| | Residuals | 25128 | 1 | NA | NA | 1.9 |
| Ndama | | | | | | |
| | Cfi | 595693 | 595693 | 611755 | 0.000 | 57.0 |
| | DE | 161026 | 161026 | 165368 | 0.000 | 15.4 |
| | Ym | 148597 | 148597 | 152604 | 0.000 | 14.2 |
| | LW | 82999 | 82999 | 85237 | 0.000 | 7.9 |
| | Ca | 37722 | 37722 | 38739 | 0.000 | 3.6 |
| | Hour | 276 | 276 | 284 | 0.000 | 0.0 |
| | MW | 14 | 14 | 15 | 0.000 | 0.0 |
| | C | 1 | 1 | 1 | 0.273 | 0.0 |
| | ADG | 0 | 0 | 0 | 0.746 | 0.0 |
| | Residuals | 19465 | 1 | NA | NA | 1.9 |

NA: not applicable

4.2. Sensitivity of used input parameters

Figure 2.1 and Figure 2.2 show the standardized regression coefficients (SRC) of each input parameter used to evaluate the enteric methane emission factors for lactating cows and adult males of Senegalese native cattle, respectively.

According to the linear regression method implemented, the methane conversion rate (Y_m) and the coefficient for calculating net energy for maintenance (C_{fi}) are the parameters with the largest SRC. The results show also the importance of the digestibility of feed ($DE\%$) and liveweight (LW). The order of rank, in terms of sensitivity is identical for both cattle breeds and each animal sub-category. Moreover, our results reveal that among breeds, the SRC obtained for Ndama cattle are slightly larger. Differences are also observed between sub-categories. Compared to lactating cows, the SRC is higher for the adult male Gobra cattle for parameters such as Y_m , C_{fi} , and LW . For lactating cows, Y_m and DE showed more sensitivity for Ndama cattle, compared with adult males. However, irrespective of breed or sub-category, the differences observed between SRC of input parameters did not exceed 8%.

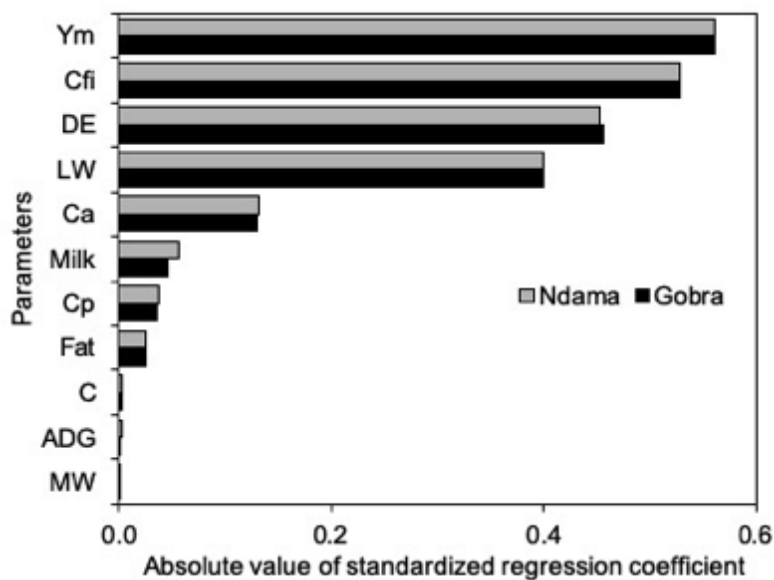


Figure 2.1 : Sensitivity indices based on standardized regression coefficients of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for lactating cows of Senegalese native cattle breeds

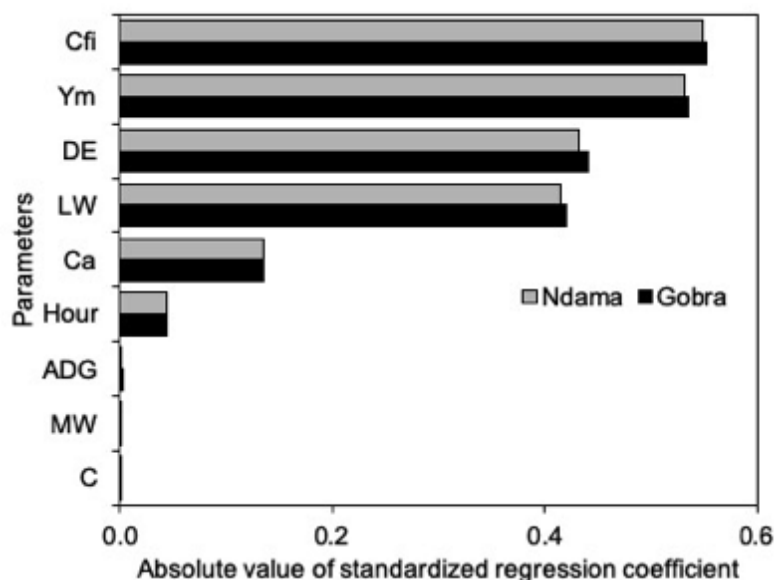


Figure 2. 2 : Sensitivity indices based on standardized regression coefficients of input parameters used to calculate enteric methane emission factors for adult males of Senegalese native cattle breeds

5. Discussion

5.1. Moving to Tier 2 enteric methane emission factor

To date, because of the scarcity of relevant data in developing countries in the SSA region, the Tier 1 approach is most commonly used to evaluate enteric methane emission from livestock (Ma et al. 2018; Ndung'u et al. 2019). Assessments at the regional level suggest that Africa has a higher uncertainty for each livestock product compared with Europe (Zhu et al. 2016). Additionally, Wilkes et al. (2017) reported that only about one third of countries located in developing regions has conducted evaluation of uncertainty in their national GHG inventory. Considering the absence of reliable information on livestock in the SSA region, the IPCC Guidelines suggest that the uncertainty of enteric fermentation emission factors ranges from $\pm 30\%$ to $\pm 50\%$ for Tier 1 and $\pm 20\%$ for Tier 2 approaches, respectively (see Vol 1, Chapter 3 and Vol 4, Chapter 10 in IPCC, 2006). Hence, the use of a Tier 2 approach may enable a decrease in the uncertainty of predicted enteric methane emission factors used in national GHG inventories (Hristov et al. 2018).

In Senegal, the third GHG emission inventory was submitted to the UNFCCC in 2015 (see <https://unfccc.int/documents/89618>). In that inventory, enteric methane emission of cattle was assessed using the Tier 2 methodology. Within the overall emission of agricultural sector, enteric methane was identified as a key source of emission (72%). According to contribution of livestock to the total agriculture emissions, cattle was responsible for 65%. However, until today, uncertainty analysis was not performed in that national GHG inventory.

5.2. Importance of input parameters

Considering the results of both uncertainty and sensitivity analysis computed in this study, our calculation indicate that the coefficient of maintenance (Cfi), the digestibility of feed (DE%) and the methane conversion factor (Ym) are the input parameters which require further research, because of their influence on the accuracy of enteric methane emission factors calculated using the 2006 IPCC Tier 2 approach.

The importance of Cfi has been pointed out in previous research conducted in other regions (e.g. Karimi-Zindashty et al. 2012; Milne et al. 2014). The value of Cfi implemented in our assessment was sourced from the IPCC (2006) guidelines. To our knowledge, studies which focus on this parameter are very few, particularly in developing countries, despite the dependence of this parameter on variation in temperature (IPCC, 2006).

The composition of fodder consumed by ruminants is well documented in Senegal, and the profile of organic matter digestibility (OMd) is available (see Ickowicz and Mbaye, 2001; Chirat et al. 2014; Doreau et al. 2016; Assouma et al. 2018). However, there is a need to determine at the national scale, an average value for OMd which takes into consideration seasonality. To date, the default value of feed digestibility (DE, %) from the IPCC (2006) guidelines (i.e. $50\pm 5\%$) has always been applied in the Senegalese national GHG inventory. In general, estimation of DE is very complex, considering the various factors which need to be taken into consideration (Hristov et al. 2013; Descheemaeker et al. 2016; Brandt et al. 2019). To deal with the issue of DE, the development of a robust formula, based on numerous data which consider the diversity of diet is important (Engène et al. 2019). For example, in West African livestock farming systems, the largest proportion of feed is from natural pastures (Gautier et al. 2005; Ouédraogo-Koné et al. 2006; Tongwane and Moeletsi, 2018). Cattle herds in this region graze different types of feedstuff (e.g. trees, crop residues, woody species, grasses). Throughout the seasons, the composition of the diet and the nutrient content of feedstuff both fluctuate (see Touré et al. 1998; Ickowicz and Mbaye, 2001; Amole and Ayantunde, 2016). Given the diversity of feedstuff and seasonal fluctuations in West Africa context, determining an annual average value of DE is challenging. A fixed value for DE is reasonable as it is supposed to represent the annual average. Additionally, apart from the proposed values of DE in the 2006 IPCC guidelines, reports of the value of DE is very limited in the literature, even in some developed countries. Indeed, in the lack of country-specific data related to the feeding system, Belgium applies DE values from the Netherlands, assuming that feed systems are comparable (see BEL NIR, 2018). Slovenia uses a predicted equation sourced from INRA (1989) and German feeding tables (see SLN NIR, 2018). In the national inventory of the UK, the DE values applied for dairy cattle were from tables of nutritive value and chemical composition of feeds, while for beef cattle values were based on expert opinion (see UK NIR, 2018).

The methane conversion factor (Ym, %) is the third parameter which need to be better estimated when using the Tier 2 approach. Ym is defined as the percent of gross energy intake that is converted into methane (kg CH₄/kg GEI). The appropriate value of Ym is the subject of considerable research by scientists (see Van Lingen et

al. 2019). Using a meta-analysis approach, Kaewpila and Sommart (2016) propose using $8.4 \pm 0.4\%$ (range 4.8% to 13.7%) for Y_m , while Kennedy and Charmley (2012) suggest a value which varies from 5.0% to 7.2%. Several countries apply values for Y_m other than the default values suggested by the 2006 IPCC guidelines. For example, Croatia calculated Y_m through a model reported by Hristov et al. (2013). Denmark used for dairy cattle a value for Y_m (range from 5.98% to 6.13%) reported by Hellwing et al. (2014).

Hence, in view of the diverse diet composition consumed by cattle over the course of the seasons in West Africa (Archimède et al. 2011; Nicholson, 2013; Taugourdeau et al. 2019), determination of an appropriate value for Y_m is clearly important for estimating the expected enteric methane emission factors, using IPCC 2006 Tier 2 approach.

In our case, we used expert judgement to deal with uncertainties of input parameters. Besides, for diverse reasons, the inputs parameters can be correlated. In Senegal, due to the scarcity of relevant report related to the percentage of native cattle breeds in the total cattle herd, it is probable that uncertainty of activity data is actually higher than uncertainty of emission factors, hence should be a priority for GHG inventory improvement.

6. Conclusions

The purpose of conducting uncertainty and sensitivity analysis was to identify the most important factors driving emission factors in order to prioritize future data improvement and research efforts so as to improve livestock GHG emission estimates and reduce the uncertainty of estimates for Senegal. Having applied analysis of variance and regression techniques for uncertainty analysis and sensitivity analysis, respectively, our results demonstrate that future research should focus on the estimates of the coefficient of maintenance, feed digestibility and the methane conversion factor.

Acknowledgments

This work was partially funded by the West Africa Agricultural Productivity Program (WAAPP/PPAAO). We thank colleagues who contributed to improving this manuscript, particularly those from the Global Research Alliance/Livestock Research Group.

CHAPITRE 3 : Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal

L'analyse présentée dans le chapitre précédent démontre que l'utilisation du modèle Tier 2 permet de réduire l'incertitude liée à la prédiction de facteur d'émission de méthane entérique. Cependant, dans l'objectif d'améliorer les précisions dans l'estimation au Sénégal, les paramètres d'entrée les plus sensibles doivent être connus et documentés.

Ce présent chapitre se base sur un poster déjà présenté lors du *10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores* et sur un article publié dans la revue *Tropical Animal Health and Production*.

Dans le chapitre précédent, la digestibilité de l'énergie ingérée (DE) et le facteur de conversion du méthane (Y_m) sont identifiés comme des paramètres d'entrée qui influencent le plus l'incertitude liée à la prédiction du facteur d'émission.

Ce chapitre propose une méthode de calcul des facteurs d'émission de méthane entérique du taurin Ndama qui permet de contextualiser ces deux paramètres d'entrée.

Notre approche a permis de prendre en compte la question de la variation en quantité et en qualité des rations alimentaires. En effet, nos estimations ont été faites par saison ; ceci permet de considérer les périodes de sous-nutrition des animaux en saison sèche.

¹⁴Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal

S. Ndao^{1,2,3,a}, E.H. Traore⁴, A. Ickowicz^{2,3,5}, C-H. Moulin²

¹ ISRA, Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, BP 53 Kolda, Sénégal

² SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

³ PPZS, Pastoral Systems and Dry Lands, Centre ISRA Hann BP 2057 Dakar, Sénégal

⁴ ISRA, Laboratoire National de l'Élevage et de Recherches Vétérinaires, BP 2057 Dakar, Sénégal

⁵ CIRAD, UMR SELMET, F-34398 Montpellier, France

Corresponding author: Séga Ndao. E-mail : sega.ndao@isra.sn

Short title: Enteric methane emission factors for Senegalese Ndama cattle

¹⁴ **Ndao, S.**, Traoré, E. H., Ickowicz, A., & Moulin, C. H. (2020). Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal. *Tropical Animal Health and Production*. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02280-z>

1. Abstract

Methane (CH₄) emission estimations for cattle in Sub-Saharan Africa (SSA) reflect limited production levels and diets that are high in cellulose forage. However, data on these livestock systems is lacking for their accurate evaluation. To provide guidance for climate change mitigation strategies in Senegal, it is necessary to obtain reliable estimates of CH₄ emissions from Ndama cattle reared in grazing systems, which is the predominant cattle system in the country. The objective of this study was to determine the annual methane emission factor (MEF) for enteric fermentation of Ndama cattle following the IPCC Tier 2 procedure. Our estimated annual MEF at the herd scale was 30.8 kg CH₄/TLU (30.7 kg CH₄/hd/yr for lactating cows and 15.1 kg CH₄/hd/yr for other cattle). These values are well below the default IPCC emission factor (46 and 31 kg CH₄/hd/yr for dairy and other cattle, respectively) proposed in the Tier 1 method for Africa. Our study showed that feed digestibility values differ with season (from 46 to 64%). We also showed that cattle lose weight and adapt to lower feed requirements during the long dry season, with a resulting major reduction in methane emissions. The results of this work provide a new framework to re-estimate the contribution of grazing systems to methane emissions in Africa.

Keywords: methane production, emission factor, taurine cattle, mixed system, Senegal

Implications

There is limited data from Sub-Saharan Africa with which to accurately estimate enteric methane production by cattle. This study estimated the enteric methane emission factor for Senegalese Ndama cattle using field data on a typical crop-livestock system in West Africa. Our results reveal an overestimation of methane emissions when using the default methane emission factor provided by the IPCC, a parameter widely used in GHG inventories for agricultural systems in Sub-Saharan Africa. Our approach increases the reliability of emission factors for enteric methane from cattle reared in extensive farming systems, thereby contributing to the development of better inventories and mitigation strategies for Sub-Saharan Africa

2. Introduction

In addition to providing an essential source of proteins in the human diet, accounting for up to 33% of total protein (Herrero *et al.*, 2013), livestock production is also responsible for 12% of global anthropogenic greenhouse gas emissions (Havlík *et al.*, 2014). Ruminants in particular produce large amounts of methane (CH₄) during their normal digestive processes. Emissions per gram of protein from cattle are 250 times higher

than emissions per gram of protein from legumes (Tilman and Clark, 2015). For this reason, considerable debate is ongoing about the role of livestock husbandry as a major producer of greenhouse gases (GHG) and the significance of its contribution to climate change. Among ruminants, cattle are the largest emitter of CH₄ because their rumen, a large forestomach, enables continuous fermentation due to the presence of a diverse population of microorganisms (Shibata and Terada, 2010).

However, livestock are an invaluable source of food and income for millions of poor people, especially in developing countries such as Senegal. Therefore, in the Sub-Saharan Africa (SSA) region, climate change mitigation policies involving livestock should be developed with extreme caution and with consideration of the production benefits people obtain from livestock (e.g., meat and milk, transport, employment).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) provides procedures for compilation of national GHG inventories. The guidelines specify GHG estimation approaches at three levels (or tiers) of increasing complexity (Tier 1-3) (see IPCC, 2006). The purpose of the tiers is to provide reliable estimates of national GHG emissions that take the characteristics and agricultural practices specific to each country into consideration.

To estimate methane emissions from ruminants, the default value of the Tier 1 approach has often been used in both extensive (e.g. grassland) and intensive (forage and concentrate) livestock production systems in SSA, even though the quantities of enteric CH₄ emitted by cattle can vary widely with diet composition and grazing season (Archimède *et al.*, 2011). The widespread use of the Tier 1 method, which is associated with high uncertainty, is due to the shortage of measurements from indigenous cattle breeds in the SSA region (Tallec *et al.*, 2012; Hristov *et al.*, 2018). Improved estimates of methane emission factors from cattle reared in extensive livestock systems is a pre-condition for establishing and assessing CH₄ mitigation strategies in the SSA region.

Livestock productions systems in SSA depend on natural grasslands, the major source of feedstuff for ruminants (Opio *et al.*, 2013). It is well established that CH₄ production from enteric fermentation varies with diet, grazing period (Eugène *et al.*, 2011) and daily dry matter intake (Hristov *et al.*, 2018). Studies conducted in the SSA region (e.g. Ouédraogo-Koné *et al.*, 2008; Gaidet and Lecomte, 2014) report high variation in intake and forage quality throughout the year. In Senegal, previous experiments on feeding behaviour have described the impact of daily management of pastoral herds on the diet profiles and digestibility of forage (see Ickowicz and Mbaye, 2001; Chirat *et al.*, 2014; Assouma *et al.*, 2018). These studies conclude that forage species in rangelands change in terms of composition and nutritive value, and that these changes are associated with fluctuation in feed intake. Guérin and Roose (2017) report additional detailed description of livestock production systems in Senegal.

Based on these studies, we assume that parameters such as digestible organic matter, digestibility and intake, and hence the value of the methane emission factor will vary between seasons.

The objective of this study is to evaluate enteric methane emission factors (MEF) for Ndama cattle reared in the Sudanian zone of Senegal, using the IPCC 2006 Tier 2 model and more precise estimates of model parameters that better reflect the indigenous livestock production systems.

3. Material and methods

3.1. Site description

The study was conducted in the Kolda region (12°49' N, 14°53' W). The local climate is tropical Sudanian with 1,065 mm average annual rainfall. The average annual temperature for the period 1980-2015 was 28.6 °C, with a maximum around April-May (*Service de Météorologie Nationale, Station de Kolda*). Based on rainfall distribution patterns observed over three decades, for our study, we divided the year into three 4-month seasons: a wet season (WS) from June to September, an early dry season (EDS) from October to January and a late dry season (LDS) from February to May. The rainy season usually lasts from the end of May to October. Further details on seasonal climate conditions, observed dry matter intake and digestible organic matter in the study area are provided in the Supplementary Figure S1-a and Figure S1-b.

3.2. Production system characteristics

Based on the classification proposed by Seré and Steinfeld (1996), the common livestock system in the study site can be defined as a rainfed mixed farming system. The main cattle breed in Kolda is the Ndama breed (*Bos taurus*). In its last activity report of 2016, the Senegalese Livestock Ministry (<http://www.elevage.gouv.sn>) estimated a cattle population reared in extensive systems of 3.4 million, of which the Ndama cattle represents about 30%. The calving-period in the extensive livestock system is not grouped but occurs randomly, as bulls run with the herd all year round. According to Sissokho (1998), 64% of calving occurs in the WS (i.e., rainy season), 22% in the EDS and 14% in the LDS. In the Sudanian area of Senegal, the use of forages resources is organized by farmers according to the seasons (Chirat et al., 2014). For example, during the WS, ruminants are herded away from the crop fields and only browse on fallow and forest zones where grass (e.g., *Cynodon sp.*, *Brachiaria sp.*), legumes (e.g., *Stylosanthes sp.*, *Alysicarpus sp.*) and standing hay (e.g. *Andropogon sp.*, *Pennisetum sp.*) are available. In the rainy season, forests and fallows account for around 90% of total time on pasture for cattle (Sissokho, 1998). After harvest (around December), the cattle herds return from the forest areas and freely graze crop residues (i.e., maize, millet, sorghum and rice straw). At dusk, herds are assembled and tethered close to the homesteads to spend the night. Throughout the free grazing period (i.e. after harvest), cattle continue to feed on fallows, savannah and forest lands. From April-May until the first rains, the lack of natural forage resources and the infrequency of supplemented fodder (e.g., concentrate feed), cattle tend to be underfed and lose weight as their stores of body fat are mobilized from their body reserves (Grimaud et al., 1998; Ezanno et al., 2005).

3.3. Predicted methane emission factor

To date in Senegal, no models are available to specifically assess the enteric methane emission factor (MEF) for domestic cattle reared in extensive livestock systems. For this purpose, the IPCC Tier 2 model (Supplementary Figure S2) was applied considering the particularities of Ndama cattle and their performances (e.g. live weight, average daily gain) using data from *in situ* studies. The IPCC Tier 2 approach for enteric fermentation is mainly based on ruminant net energy models from the National Research Council (see NRC, 1996). To use the Tier 2 model, input parameters including average live weight (LW, kg), average daily gain (ADG, kg/d), milk yield (MY, kg/d), feed situation and digestible energy (DE, % of gross energy content, GE, MJ/d) of grazed feed were estimated for each season. The formulas proposed by IPCC (2006) were used to calculate net energy (NE, MJ/d) and its components (i.e., maintenance, growth, pregnancy and lactation, locomotion) as well as corresponding average daily feed intake (in terms of GE) for each category of animal in the herd. The seasonal MEF (SMEF) was then estimated from gross energy (GE, MJ/d) and further multiplied by the predicted methane conversion factor (Y_m , %). In order to achieve the weighted annual MEF (AMEF), SMEF was summed within each category and then multiplied by the percentage of each animal category in the herd. Finally, with data on the average LW of each animal category, a conversion was made to tropical livestock units (TLU, animal of 250 kg LW).

3.4. Livestock parameters

Herd composition. We used a typical herd structure reported from the Sustainable Management of Globally Significant Endemic Ruminant Livestock in West Africa, PROGEBE Senegal. The proportions of animals in each category were 15%, 38%, 37% and 10% for calves (≤ 1 -year-old), sub-adults (> 1 to ≤ 4 years old), adult females (> 4 years old) and adult males (> 4 years old), respectively (Ejlertsen et al., 2012). This estimate was further refined using statistics sourced from the database of the Livestock Research Centre of Kolda (called ISRA/CRZ-K), which allowed us to estimate the proportion of lactating cows (i.e. annual percentage of females that give birth), and the sex ratio of growing animals.

3.4.1. Live weight, mature weight and average daily weight gain

Owing to the lack of published data on cattle production in the study area, we gathered data from various grey literature sources (e.g., theses, research activity reports). The average values of LW and mature weight (i.e., mature Ndama cattle in moderate body condition) were computed from the ISRA/CRZ-K database. The average daily gain (ADG) used in this study was calculated based on a dataset recorded through monitoring of 23 cattle herds from 10 villages around the Kolda region (Sissokho, 1998). The values adopted for male and female calves, respectively, were $+0.176 \pm 0.044$ kg/d and $+0.170 \pm 0.056$ kg/d. For sub-adults (i.e. heifers and young bulls) and adults (i.e. cows and bulls), seasonal ADG was $+0.12 \pm 0.04$, -0.04 ± 0.01 kg/d and -0.16 ± 0.01 kg/d for the WS, EDS and LDS, respectively.

3.4.2. Milk yield and fat content.

Because of the type of cattle reproduction system, calving rates vary by season and cows are not in the same lactation stage at a given date. A dataset on milk production collected through on-farm research surveys in the Kolda region (Sissokho 1998; ISRA/CRZ-K 2017, unpublished data) was used to evaluate the seasonal weighted value of milk yield (i.e., 0.834 ± 0.270 , 0.594 ± 0.198 and 0.373 ± 0.044 kg/d for WS, EDS and LDS, respectively) taking into account the proportion of lactating cows during each season. The values adopted for fat content were obtained from monitoring conducted by the ISRA/CRZ-K between August 2015 and May 2016.

3.4.3. Animal work rates and locomotion

The average daily number of hours worked by draft oxen is reported in surveys by ISRA-ITA and CIRAD (2005). Using the model proposed by Konandreas and Anderson (1982), the daily distance walked by cattle herds during grazing time is accounted for in the calculation of energy requirements for maintenance. Expert opinion provided estimates of 2, 5 and 8 km for average daily distance walked by Ndama cattle herds during WS, EDS and LDS, respectively. Table 3.1 and Table 3.2 inventory the parameters and their sources used to estimate the MEF with the IPCC Tier 2 method.

Table 3. 1 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric methane from Ndama cattle based on the ruminant nutrition approach and referenced sources

| Name of parameters | Symbol | Unit | Note of reference |
|--|--------|-----------|--|
| Herd structure | | % | Ejlertsen <i>et al.</i> 2012; ISRA-PROGEBE data 2009-2015 |
| Coefficient for calculating net energy for maintenance | Cfi | MJ day/kg | IPCC, 2006 (Table 10.4) |
| Activity coefficient corresponding to animal's feeding situation | Ca | MJ day/kg | IPCC, 2006 (Table 10.5) |
| Coefficient | C | | IPCC, 2006 (Equation 10.6) |
| Pregnancy coefficient | Cp | | IPCC, 2006 (Table 10.7) |
| Methane conversion rate | Ym | % | This present study |
| Feed digestibility | DE | % | This present study |
| Average live body weight | LW | kg | ISRA-PROGEBE data 2009-2015; CRZK Research reports |
| Mature live body weight | MW | kg | From expert opinion |
| Average daily weight gain | ADG | kg/day | Sissokho, 1998; ISRA-PROGEBE data 2009-2015; CRZK Research reports |
| Average daily milk yield | MY | kg/day | Sissokho, 1998; This present study |
| Fat content of milk | MCF | % | CRZK Research reports |
| Number of hours of work | Hour | h | ISRA-ITA and CIRAD, 2005 |

Table 3. 2 : Average values of input parameters used to determine gross energy intake (GE, MJ/kg DM) of each class of Ndama cattle reared in southern Senegal.

| Category | Class | Season | Inputs parameters ¹ | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|--------|--------------------------------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|----|---|---|
| | | | Cfi | Ca | LW | C | MW | ADG | MCF | MY | Hr | Cp | | |
| F Calves | 0-1yr | WS | MJ/d/kg | | kg | | kg | kg/d | % | kg/d | h | % | | |
| | | | 0.322 | 0.17 | 42 | 0.2 | 180 | 0.170 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | EDS | 0.322 | 0.17 | 42 | 0.2 | 180 | 0.170 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | | LDS | 0.322 | 0.17 | 42 | 0.2 | 180 | 0.170 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | M Calves | 0-1yr | WS | 0.322 | 0.17 | 49 | 0.2 | 180 | 0.176 | 0 | 0 | 0 |
| | | | EDS | | | 0.322 | 0.17 | 49 | 0.2 | 180 | 0.176 | 0 | 0 | 0 |
| LDS | 0.322 | 0.17 | 49 | | | 0.2 | 180 | 0.176 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Y Heifers | 1-2yr | WS | 0.322 | 0.17 | 65 | 0.8 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | EDS | 0.322 | 0.17 | 65 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | LDS | 0.322 | 0.17 | 65 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| Y Bulls | 1-2yr | WS | 0.322 | 0.17 | 74 | 1.0 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | EDS | 0.322 | 0.17 | 74 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | LDS | 0.322 | 0.17 | 74 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| B Heifers | 2-4yr | WS | 0.322 | 0.36 | 118 | 0.8 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| | | | EDS | 0.322 | 0.36 | 118 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-----|-------|------|-----|-----|-----|-------|------|------|-----|---|-----|
| | | LDS | 0.322 | 0.36 | 118 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R Bulls | 2-4yr | WS | 0.322 | 0.36 | 133 | 1.0 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | EDS | 0.322 | 0.36 | 133 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | LDS | 0.322 | 0.36 | 133 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Draft oxen | >4yr | WS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.0 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0.8 | 0 | 0 |
| | | EDS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | LDS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.0 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| A Bulls | >4yr | WS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.2 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | EDS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.2 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | LDS | 0.37 | 0.36 | 250 | 1.2 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D Cows | >4yr | WS | 0.37 | 0.36 | 180 | 0.8 | 180 | 0.120 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | EDS | 0.37 | 0.36 | 180 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | LDS | 0.37 | 0.36 | 180 | 0.8 | 180 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| L Cows | >4yr | WS | 0.37 | 0.36 | 223 | 0.8 | 180 | 0.120 | 3.61 | 0.83 | 0 | 0 | 0.1 |
| | | EDS | 0.37 | 0.36 | 223 | 0.8 | 180 | 0 | 3.59 | 0.59 | 0 | 0 | 0.1 |
| | | LDS | 0.37 | 0.36 | 223 | 0.8 | 180 | 0 | 5.35 | 0.37 | 0 | 0 | 0.1 |

¹ Feed digestibility (DE, %) and methane conversion rates (Ym, %) are computed. F: female, M: male, Y: young, L: lactating, D: dry, A: adult, R: replacement, B: bull, EDS: early dry season, LDS: late dry season, WS: wet season

3.5. Prediction of seasonal values of digestible energy and the methane conversion rate

Recent country case studies demonstrate that the IPCC Tier 2 method is sensitive to variation in input parameters such as the methane conversion factor (Y_m) and digestibility of the diet (DE) (see <https://www.agmrv.org/knowledge-portal/case-studies/inventory-practice-sensitivity-analysis-to-prioritize-improvements-in-senegal/>). In order to reduce the uncertainty in the assessment of the MEF and to consider the seasonal fluctuations in the diets, our approach computes seasonal values of DE and Y_m . We first identified at the study site the forage plants (FP) most commonly encountered and consumed by cattle herds in natural grasslands. Secondly, the chemical composition of these FP was estimated from *Feedipedia* (www.feedipedia.org/), considering variations in the nutritive value of each FP throughout the year (Table 3.3). Thirdly, the FP were used to mimic changes in seasonal diets and matched with experimental values of digestible organic matter (OMd, %) per TLU previously determined in the same study site by a tropical livestock feeding program, *Alimentation du Bétail Tropical* (ABT, scientific collaboration ISRA/CIRAD-IEMVT 1993-1998). The seasonal duration of cattle herds grazing in rangelands and the main FP in the pastures were considered in our analysis. For example, in the post-harvest period, cattle herds spend most of their time grazing croplands. Thus, the composition of the diet during the EDS is formulated with a higher proportion of crop residues compared to the other types of forage resources. Finally, the percentage of each type of feedstuff and their nutritional values was used to simulate the seasonal composition of the diets and average apparent values in terms of digestible energy (DE, %), neutral detergent fibre (NDF, g/kg DM), acid detergent fibre (ADF, g/kg DM). The values of seasonal Y_m were estimated following the formula developed by FAO (see Opio et al., 2013). The calculated values of DE and Y_m for each season were used to evaluate the SMEF for each category, except for calves. Since the digestive system of ruminants develops progressively, reaching adult capacity at about 1.5 years (Konandreas and Anderson, 1982), in addition to which experiments in the Kolda region to estimate intake by calves are absent, for calves we adopted fixed values of 65% and 4.5% for DE and Y_m , respectively.

Table 3. 3 : Feedstuff used in this study taken from previous works and their average nutritional composition in terms of apparent dry matter (DM, %), crude protein (CP, g/kg DM), crude fibre (CF, g/kg DM), neutral detergent fibre (NDF, g/kg DM), acid detergent fibre (ADF, g/kg DM), acid detergent lignin (ADL, g/kg DM), ether extract (EE, g/kg DM), digestible organic matter (OMd, %), gross energy (GE, Mj/kg DM) and feed digestibility (DE, %)

| Species | D M | CP | CF | NDF | ADF | ADL | EE | Ash | OM _d | GE | DE | References |
|---|--------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----------------|----|----|---|
| Wet Season (WS) | | | | | | | | | | | | |
| Elephant (<i>Pennisetum purpureum</i>) | 18 | 17 | 65 | 128 | 76 | 10 | 4 | 25 | 61 | 17 | 59 | www.feedipedia.or g/node/12365. Accessed February 2019 12 |
| Rhodes grass (<i>Chloris gayana</i>) | 25 | 22 | 92 | 187 | 107 | 15 | 5 | 22 | 60 | 18 | 58 | www.feedipedia.or g/node/12518. Accessed February 2019 12 |
| Desert date (<i>Balanites aegyptiacus</i>) | 94 | 134 | 165 | 303 | 199 | 101 | 48 | 144 | 61 | 17 | 51 | www.feedipedia.or g/node/11591. Accessed February 2019 14 |
| Umbrella thorn (<i>Acacia tortilis</i>) | 91 | 131 | 86 | 501 | 292 | 125 | 76 | 106 | 73 | 18 | 71 | www.feedipedia.or g/node/12810. Accessed February 2019 12 |
| Guinea grass (<i>Megathyrsus maximus</i>) | 23 | 25 | 85 | 164 | 99 | 14 | 4 | 24 | 59 | 18 | 55 | www.feedipedia.or g/node/416. Accessed February 2019 15 |
| Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i>) | 89 | 117 | 176 | 355 | 285 | 100 | 25 | 104 | 66 | 18 | 62 | www.feedipedia.or g/node/12808. Accessed 12 |

| Species | D M | CP | CF | ND F | ADF | ADL | EE | Ash | OM d | GE | DE | References |
|--|--------|----|-----|---------|-----|-----|----|-----|---------|----|----|---|
| Alyce clover (<i>Alysicarpus ovalifolius</i>) | 29 | 46 | 88 | 0 | 94 | 0 | 6 | 32 | 65 | 18 | 62 | www.feedipedia.or g/node/12821. Accessed February 2019 14 |
| Indian sandbur (<i>Cenchrus biflorus</i>) | 29 | 26 | 107 | 207 | 124 | 17 | 5 | 33 | 71 | 18 | 68 | www.feedipedia.or g/node/12201. Accessed February 2019 16 |
| Gamba grass (<i>Andropogon gayanus</i>) | 28 | 11 | 83 | 181 | 98 | 12 | 2 | 23 | 65 | 18 | 62 | www.feedipedia.or g/node/12115. Accessed February 2019 14 |
| Spear grass (<i>Heteropogon contortus</i>) | 39 | 20 | 145 | 291 | 164 | 20 | 5 | 34 | 59 | 18 | 56 | www.feedipedia.or g/node/12630. Accessed February 2019 14 |
| Egyptian crowfoot grass (<i>Dactyloctenium aegyptium</i>) | 30 | 25 | 101 | 208 | 118 | 16 | 5 | 28 | 63 | 18 | 61 | www.feedipedia.or g/node/12067. Accessed February 2019 14 |
| False brandy bush (<i>Grewia bicolor</i>) | 44 | 67 | 99 | 198 | 127 | 47 | 22 | 45 | 63 | 19 | 71 | www.feedipedia.or g/node/12146. Accessed February 2019 14 |
| Early Dry Season (EDS) | | | | | | | | | | | | |
| Pearl millet straw (<i>Pennisetum glaucum L.</i>) | 93 | 48 | 389 | 745 | 493 | 100 | 7 | 80 | 47 | 18 | 44 | www.feedipedia.or g/node/399. Accessed February 2019 12 |

| Species | D M | CP | CF | ND F | ADF | ADL | EE | Ash | OM d | GE | DE | References |
|---|--------|-----|-----|---------|-----|-----|----|-----|---------|----|----|--|
| Maize straw (<i>Zea mays</i> L.) | 93 | 34 | 394 | 766 | 494 | 78 | 6 | 61 | 55 | 18 | 53 | www.feedipedia.org/node/12874. Accessed February 2019 12 |
| Sorghum straw (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench) | 93 | 34 | 363 | 712 | 448 | 68 | 11 | 70 | 54 | 18 | 49 | www.feedipedia.org/node/379. Accessed February 2019 12 |
| Elephant grass (<i>Pennisetum purpureum</i>) | 89 | 92 | 318 | 635 | 374 | 52 | 17 | 97 | 59 | 18 | 55 | www.feedipedia.org/node/12366. Accessed February 2019 12 |
| Rhodes grass (<i>Chloris gayana</i>) | 86 | 87 | 305 | 654 | 356 | 48 | 15 | 84 | 60 | 18 | 56 | www.feedipedia.org/node/12519. Accessed February 2019 12 |
| Desert date (<i>Balanites aegyptiacus</i>) | 94 | 134 | 165 | 303 | 199 | 101 | 48 | 144 | 61 | 17 | 51 | www.feedipedia.org/node/11591. Accessed February 2019 14 |
| Umbrella thorn (<i>Acacia tortilis</i>) | 91 | 131 | 86 | 501 | 292 | 125 | 76 | 106 | 73 | 18 | 71 | www.feedipedia.org/node/12810. Accessed February 2019 12 |
| Pangola grass (<i>Digitaria eriantha</i>) | 81 | 64 | 289 | 575 | 337 | 46 | 15 | 61 | 58 | 18 | 55 | www.feedipedia.org/node/11654. Accessed February 2019 15 |
| Guinea grass (<i>Megathyrsus maximus</i>) | 90 | 82 | 330 | 644 | 383 | 54 | 14 | 103 | 57 | 18 | 54 | www.feedipedia.org/node/11522. Accessed 15 |

| Species | D M | CP | CF | ND F | ADF | ADL | EE | Ash | OM d | GE | DE | References |
|--|--------|-----|-----|---------|-----|-----|----|-----|---------|----|----|---|
| Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>) | 92 | 93 | 270 | 674 | 325 | 54 | 25 | 76 | 54 | 18 | 50 | www.feedipedia.or g/node/11850. Accessed February 2019 15 |
| Molasses grass (Melinis minutiflora) | 90 | 70 | 312 | 630 | 365 | 50 | 20 | 81 | 59 | 18 | 56 | www.feedipedia.or g/node/12339. Accessed February 2019 15 |
| Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i>) | 89 | 117 | 176 | 355 | 285 | 100 | 25 | 104 | 66 | 18 | 62 | www.feedipedia.or g/node/12808. Accessed February 2019 12 |
| Alyce clover (<i>Alysicarpus ovalifolius</i>) | 95 | 105 | 304 | 0 | 0 | 0 | 20 | 86 | 60 | 18 | 57 | www.feedipedia.or g/node/12822. Accessed February 2019 14 |
| Indian sandbur (<i>Cenchrus biflorus</i>) | 95 | 75 | 355 | 413 | 59 | 59 | 13 | 121 | 56 | 17 | 53 | www.feedipedia.or g/node/12202. Accessed February 2019 16 |
| Gamba grass (<i>Andropogon gayanus</i>) | 90 | 34 | 374 | 687 | 432 | 64 | 10 | 57 | 51 | 18 | 48 | www.feedipedia.or g/node/12116. Accessed February 2019 14 |
| Speargrass (<i>Heteropogon contortus</i>) | 93 | 30 | 358 | 738 | 429 | 75 | 12 | 68 | 54 | 18 | 50 | www.feedipedia.or g/node/12631. Accessed February 2019 14 |
| Egyptian crowfoot grass | 93 | 56 | 390 | 712 | 450 | 68 | 7 | 66 | 51 | 18 | 48 | www.feedipedia.or |

| Species | D | CP | CF | ND | ADF | ADL | EE | Ash | OM | GE | DE | References |
|--|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|--|
| (<i>Dactyloctenium aegyptium</i>) | M | | | F | | | | | d | | | g/node/12068. Accessed February 2019 14 |
| False brandy bush (<i>Grewia bicolor</i>) | 90 | 99 | 166 | 374 | 252 | 82 | 52 | 121 | 72 | 18 | 69 | www.feedipedia.org/node/15706. Accessed February 2019 14 |
| Rice straw (<i>Oryza sativa</i> L.) | 93 | 39 | 326 | 641 | 393 | 45 | 13 | 168 | 50 | 16 | 47 | www.feedipedia.org/node/557. Accessed February 2019 12 |
| Late Dry Season (LDS) | | | | | | | | | | | | |
| Pearl millet straw (<i>Pennisetum glaucum</i> L.) | 93 | 48 | 389 | 745 | 493 | 100 | 7 | 80 | 47 | 18 | 44 | www.feedipedia.org/node/399. Accessed February 2019 12 |
| Nigeria (<i>Pennisetum pedicellatum</i>) grass | 93 | 37 | 411 | 733 | 473 | 73 | 10 | 80 | 48 | 18 | 45 | www.feedipedia.org/node/12865. Accessed February 2019 14 |
| Bread grass (<i>Bracharia brizantha</i>) | 84 | 44 | 323 | 589 | 378 | 59 | 13 | 69 | 47 | 18 | 45 | www.feedipedia.org/node/11885. Accessed February 2019 15 |
| Bermuda grass (<i>Cynodon dactylon</i>) | 92 | 93 | 270 | 674 | 325 | 54 | 25 | 76 | 54 | 18 | 50 | www.feedipedia.org/node/11850. Accessed February 2019 15 |
| Indian sandbur (<i>Cenchrus biflorus</i>) | 95 | 75 | 355 | 413 | 59 | 59 | 13 | 121 | 56 | 17 | 53 | www.feedipedia.org/node/12202. Accessed 16 |

| Species | D M | CP | CF | ND F | ADF | ADL | EE | Ash | OM d | GE | DE | References |
|---|--------|----|-----|---------|-----|-----|----|-----|---------|----|----|--|
| Gamba grass (<i>Andropogon gayanus</i>) | 90 | 34 | 374 | 687 | 432 | 64 | 10 | 57 | 51 | 18 | 48 | www.feedipedia.org/node/12116. Accessed February 2019 14 |
| Rice straw (<i>Oryza sativa</i> L.) | 93 | 39 | 326 | 641 | 393 | 45 | 13 | 168 | 50 | 16 | 47 | www.feedipedia.org/node/557. Accessed February 2019 12 |

3.6. Assessment of dry matter intake

To determine daily dry matter intake (DMI, expressed in kg DM), the calculated gross energy intake for each animal category in each season were divided by the predicted seasonal energy density of the diets. These estimates of DMI were compared with the observed DMI previously reported through research in the study site.

4. Results

4.1. Seasonal OMD, DE, Ym

Our calculated values of digestible organic matter (OMd), feed digestibility (DE), methane conversion rate (Ym) and the nutritive values of seasonal diets are presented in Table 3.4.

Using data from the ABT program database for each season, the estimated apparent OMD of the intakes are 67%, 61% and 48% for the WS, EDS and LDS, respectively. Based on these values for OMD, our results show that DE varies by season. The value of DE is highest in the rainy season (64%) and declines over the early dry season (57%) and the late dry season (46%), with an average annual value of $55 \pm 9.2\%$. With an opposite trend to DE, the seasonal values of the methane conversion rate (Ym) increase from WS (6.6%) to LDS (7.5%) with an average value of $6.9 \pm 0.5\%$.

Table 3. 4 : Expected feed digestibility values obtained from organic matter digestibility sourced from various studies conducted in the study area, Kolda region

| Parameters | Unit | WS | EDS | LDS |
|------------|----------|-------|-------|-------|
| OMd | % | 67.0 | 61.0 | 48.0 |
| DE | % | 64.0 | 57.0 | 46.0 |
| Ym | % | 6.6 | 6.9 | 7.5 |
| DM | % as fed | 45.5 | 91.1 | 88.8 |
| CP | g/kg DM | 55.1 | 81.2 | 41.3 |
| CF | g/kg DM | 106.0 | 272.3 | 360.7 |
| NDF | g/kg DM | 211.6 | 540.2 | 657.4 |
| ADF | g/kg DM | 154.0 | 319.9 | 418.3 |
| ADL | g/kg DM | 38.8 | 73.2 | 64.9 |
| EE | g/kg DM | 16.2 | 26.4 | 11.4 |
| Ash | g/kg DM | 51.0 | 99.0 | 79.3 |
| GE | MJ/kg DM | 17.8 | 17.7 | 17.9 |

OMd: organic matter digestibility, GE: gross energy density, DE: feed digestibility, DM: dry matter, CP: crude protein, CF: crude fibre, NDF: neutral detergent fibre, ADF: acid

detergent fibre, ADL: acid detergent lignin, EE: ether extract, GE: gross energy, EDS: early dry season, LDS: late dry season, WS: wet season

4.2. Predicted diet composition

Considering the chemical composition of seasonal diets consumed by cattle herds in the study, crude protein (CP) concentration is lower during the LDS, while the values of crude fibre (CF), neutral detergent fibre (NDF) and acid detergent fibre (ADF) are increased from the WS to the EDS. In other words, the highest CF, NDF and ADF contents were recorded in the LDS, which is logically linked to changes in the digestibility of feed. In contrast to other components, the values of gross energy content of the seasonal diets are very similar, i.e. 17.8, 17.7 and 17.9 MJ/kg DM for the WS, EDS and LDS, respectively.

4.3. Gross energy and dry matter intake

The values of daily gross energy intake and the associated daily dry matter intake (DMI) of the diet consumed by each animal category during the WS, EDS and LDS are shown in Table 3.5.

Given our estimate based on the Tier 2 method, Table 10 shows that the expected intakes in terms of energy and dry matter are greater in the dry season (EDS and LDS) than in the rainy season (WS) for all categories of animal. Expressed in TLU, the average daily DMI was 3.9 ± 0.4 kg, when averaged through the year and across all animal categories, representing average daily intake at the herd scale.

Table 3. 5 : Predicted dry matter intake of Ndama cattle as a function of each category of animal. Average values are based on estimations of seasonal gross energy intake (GE, MJ/d) divided by the associated energy density of the feed in each season

| Category | Class | LW (kg) | GE | | | DMI | | |
|------------|--------|------------|-----------|-----|-----|--------------|------|------|
| | | | (MJ/hd/d) | | | (kg DM/hd/d) | | |
| | | | WS | EDS | LDS | WS | EDS | LDS |
| F Calves | 0-1 yr | 42 | 14 | 14 | 14 | 0.79 | 0.79 | 0.78 |
| M Calves | 0-1 yr | 49 | 16 | 16 | 16 | 0.90 | 0.90 | 0.89 |
| Y Heifer | 1-2 yr | 65 | 16 | 15 | 19 | 0.90 | 0.85 | 1.06 |
| Y Bulls | 1-2 yr | 74 | 16 | 17 | 21 | 0.90 | 0.96 | 1.17 |
| B Heifers | 2-4 yr | 118 | 28 | 29 | 37 | 1.57 | 1.64 | 2.06 |
| R Bulls | 2-4 yr | 133 | 31 | 31 | 41 | 1.74 | 1.75 | 2.29 |
| Draft oxen | >4 yr | 250 | 58 | 59 | 76 | 3.25 | 3.33 | 4.24 |
| A Bulls | >4 yr | 250 | 54 | 59 | 76 | 3.03 | 3.33 | 4.24 |
| D Cows | >4 yr | 180 | 43 | 45 | 59 | 2.41 | 2.54 | 3.29 |
| L Cows | >4 yr | 223 | 60 | 61 | 79 | 3.36 | 3.45 | 4.41 |

EDS: early dry season, LDS: late dry season, WS: wet season, LW: live weight, GE: gross energy intake, DMI: dry matter intake, hd: head, d: day, F: female, M: male, Y: young, L: lactating, D: dry, A: adult, R: replacement, B: bull, yr: year

4.4. Expected methane emission factors

Enteric CH₄ emission factors of Ndama cattle were evaluated using the Tier 2 approach. The expected seasonal enteric emission factors (SMEF) and annual methane enteric emission factors (AMEF) per animal category are presented in Table 3.6.

The AMEF ranged from 4.13 to 30.7 kg CH₄ per head of cattle. In view of the average LW and the proportion of each category of animals in the herd, the weighted annual methane emission factors due to enteric fermentation of Ndama cattle were 30.7 kg CH₄/hd for lactating cows (L Cow) and 15.1 kg CH₄/hd for other categories of cattle. Considering the herd structure, the annual weighted EF is 27.2 kg CH₄/hd. When expressed in TLU, the value is 30.8 kg CH₄/TLU/yr.

Table 3. 6 Summary of estimated average methane emission factors for Ndama cattle reared in the Sudanian zone of Senegal, as a function of the considered categories of cattle in each season and over the year

| Category | Proportion (%) | Cattle class | LW (kg) | SMEF (kg CH ₄ /hd/d) | | | AMEF (kg CH ₄ /hd/yr) |
|------------|----------------|--------------|---------|------------------------------------|-----|------|-------------------------------------|
| | | | | WS | EDS | LDS | |
| F Calves | 6 | 0-1 yr | 42 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 4.1 |
| M Calves | 6 | 0-1 yr | 49 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 4.7 |
| Y Heifer | 11 | 1-2 yr | 65 | 2.3 | 2.3 | 3.1 | 7.7 |
| Y Bulls | 8 | 1-2 yr | 74 | 2.3 | 2.6 | 3.4 | 8.3 |
| B Heifers | 17 | 2-4 yr | 118 | 4.0 | 4.4 | 6.0 | 14.4 |
| R Bulls | 5 | 2-4 yr | 133 | 4.5 | 4.7 | 6.7 | 15.8 |
| Draft oxen | 5 | >4 yr | 250 | 8.3 | 8.9 | 12.3 | 29.6 |
| A Bulls | 5 | >4 yr | 250 | 7.8 | 8.9 | 12.3 | 29.0 |
| D Cows | 15 | >4 yr | 180 | 6.2 | 6.8 | 9.6 | 22.6 |
| L Cows | 22 | >4 yr | 223 | 8.6 | 9.2 | 12.8 | 30.7 |

EDS: early dry season, LDS: late dry season, WS: wet season, LW: live weight, GE: gross energy, F: female, M: male, Y: young, L: lactating, D: dry, A: adult, R: replacement, hd: head, B: bull, SMEF: seasonal methane emission factor, AMEF: annual methane emission factor, yr: year, d: day

5. Discussion

5.1. Seasonal feed digestibility

The fluctuation in the estimated value of DE with the seasons is explained by the change in digestible organic matter (OMd), which results from plants ageing and dietary changes due to feed selection by cattle. This was recently confirmed by *in vivo* measured values of dietary OMd after F-NIRS analysis of 708 samples of faeces collected in the vicinity of our study area (Lecomte *et al.*, 2016). Their results confirmed that OMd is higher in the rainy season and declines during the dry season, with a total decrease from 70% to 46% over the course of the year. These values reflect the same tendencies as our estimated DE values. A similar profile was reported in the sylvopastoral region of Senegal, where Doreau *et al.* (2016), and Assouma *et al.* (2018) reviewed the variability of digestibility of forage available in tropical rangelands. Their conclusions confirm an overall range of OMd from 40% to 70%.

In other regions of tropical Africa, Elliot *et al.* (1961) recorded OMd over a continuous period of two years under natural pasture grazing with no supplemental feed. Using the faecal N and Cr₂O₃ method, Elliot *et al.* (1961) reported that OMd declined progressively from 60% to 44% between November and June. Furthermore, in Western Kenya, research from Goopy *et al.* (2018) revealed that depending on season, the digestibility of intake varies from 58% to 64%, i.e. around 10% greater than the fixed estimate of 50±5% proposed in the IPCC 2006 Tier 1 method.

5.2. Variation of methane conversion rate

Because of limited data on extensive livestock systems (including those in Sub-Saharan Africa), the IPCC Tier 1 model assumes that the methane conversion rate (Y_m) represents 6.5±1.0% of gross energy intake for cattle fed forage-based diets (IPCC, 2006). This value of Y_m is close to our predicted value (i.e., 7% lower). However, the methane conversion rate is still the subject of debate amongst scientists (see Escobar-Bahamondes *et al.*, 2017). In view of the different diet composition consumed by cattle over the seasons, the use of a generic Y_m value clearly impacts the predicted MEF. For example, using a meta-analysis approach, Kaewpila and Sommart (2016) propose using 8.4±0.4% (range 4.8% to 13.7%) for Y_m. This seems to be overestimated with respect to the default IPCC 2006 methane conversion factor commonly used for low quality forage. Besides, Kennedy and Charmley (2012) examined tropical grasses and legume species in conditions similar to those in our study area in Senegal. These authors reported for Y_m an average value of 6.1% (range 5.0-7.2%), i.e., 6% and 13% lower than the default Y_m recommended by IPCC (2006) and the computed value of this present study, respectively. Thus, because of the negative relationship between the two parameters, Y_m and DMI, for accurate estimation of AMEF for cattle reared under common feeding systems in West Africa, it is necessary to define a specific Y_m value to account for variation in DMI over the seasons (Jaurena *et al.*, 2015).

5.3. Trends in expected dry matter intake

Table 3.7 shows the observed daily dry matter intake per TLU sourced from various research studies conducted in the Sudanian zone of Senegal. Using all references listed, the prediction for all categories were calculated assuming a linear relationship between metabolic weight ($LW^{0.75}$) and intake. Expressed per TLU, the average daily DMI (i.e., 4.2 ± 0.5 kg) reported in these earlier researches is 7% higher than our predicted value of intake. This difference can be explained by the fact that the cattle used in these previous studies received supplemental feed (e.g., cottonseed, cowpea forage) in order to adjust milk production in the dry season.

Table 3. 7 : Observed dry matter intake (DMI, kg DM/d) sourced from research conducted in the studied site, Saré Yoro Bana. The prediction of dry matter intake from all categories are based on daily DMI values of 4.4, 4.81, 4.0 and 3.6 kg DM/TLU (animal of 250 kg of liveweight), from Ickowicz and Mbaye (2001), Chirat (2009), EFEFAECES Project 2013-2015 (<https://www.ppzs.org/projets/termine/waapp-efefaeces>) and Lecomte et al. (2016), respectively, assuming a linear relationship between metabolic weight ($LW^{0.75}$) and DMI.

| Category | Class | LW (kg) | Ickowicz and Mbaye 2001 | Chirat 2009 | EFEFAECES Project 2013-2015 | Lecomte <i>et al.</i> 2016 |
|------------|-------|---------|-------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|
| F Calves | 0-1yr | 42 | 1.16 | 1.27 | 1.05 | 0.95 |
| M Calves | 0-1yr | 49 | 1.31 | 1.43 | 1.19 | 1.07 |
| Y Heifer | 1-2yr | 65 | 1.60 | 1.75 | 1.45 | 1.31 |
| Y Bulls | 1-2yr | 74 | 1.76 | 1.93 | 1.60 | 1.44 |
| B Heifers | 2-4yr | 118 | 2.50 | 2.74 | 2.27 | 2.05 |
| R Bulls | 2-4yr | 133 | 2.75 | 3.01 | 2.50 | 2.25 |
| Draft oxen | >4yr | 250 | 4.39 | 4.81 | 3.99 | 3.59 |
| A Bulls | >4yr | 250 | 4.40 | 4.82 | 4.00 | 3.60 |
| D Cows | >4yr | 180 | 3.44 | 3.77 | 3.13 | 2.82 |
| L Cows | >4yr | 223 | 4.04 | 4.42 | 3.67 | 3.31 |

LW: live weight, F: female, M: male, Y: young, L: lactating, D: dry, A: adult, R: replacement, B: bull

Considering the estimate of DMI by season, it is noted that our assessment of intake showed a higher value in the dry season (LDS and EDS) compared with the rainy season. This profile conflicts with the trends reported in earlier research in Senegal. For example, Lecomte *et al.* (2016) demonstrated that, because of the availability and the nutritive quality of forage in the rainy season, ruminants tended to consume more feed

than in the dry season. To verify the effect of intake when the growth rate varies, we include our predicted seasonal average daily gain (kg/d) into an equation validated with data obtained from cattle fed tropical forages (Minson and McDonald, 1987), considering the average live weight of each animal category, except calves (Table 3.8). This analysis confirms that when cattle are not gaining weight (i.e., in underfed conditions), dry matter intake decreases. Overall, the tendency corroborates the conclusions of Lecomte *et al.* (2016). Moreover, others past research (e.g., Ayantunde, 1998; Schlecht *et al.*, 1999; Ayantunde *et al.*, 2014) in Sub-Saharan Africa is in accord with this profile of daily intake sourced from the main research studies carried out in Senegal. The seasonality of forage resource availability in terms of amount (accessibility of feedstuff) and quality (digestibility) causes the movements of herds from close to the settlements to more distant transhumance (Chirat *et al.*, 2014; Assouma *et al.*, 2018). This seasonality, which is typical of extensive livestock systems in SSA, should be reflected in the IPCC Tier 2 model. The Tier 2 model assumes that feeding allowances always fulfil animals' nutritional requirements for growth, maintenance, production, locomotion. When this optimistic assumption of the Tier 2 model is verified, the estimated intake during the late dry season can be overestimated. In practice, due to the scarcity of feed resources in the late dry season, the animals' nutrient intake is limited, and they lose weight (Ezanno *et al.*, 2005), which reduces their maintenance requirements (Kurihara *et al.*, 1999). In addition, to survive, the cattle draw on their body reserves (Ezanno *et al.*, 2003).

Table 3. 8 : Predicted daily dry matter intake (DMI, kg DM/d) in each season considering average daily gain (ADG, kg/d) sourced from Sissokho (1998), ISRA-PROGEBE dataset 2009-2015 and using the model from Minson and McDonald (1987) for each animal category

| Category | LW (kg) | Season (ADG, kg/d) | | |
|------------|---------|--------------------|-------------|-------------|
| | | WS (+0.12) | EDS (-0.04) | LDS (-0.16) |
| Y Heifer | 65 | 2.52 | 2.04 | 1.71 |
| Y Bulls | 74 | 2.65 | 2.15 | 1.81 |
| B Heifers | 118 | 3.25 | 2.70 | 2.32 |
| R Bulls | 133 | 3.47 | 2.90 | 2.51 |
| Draft oxen | 250 | 5.18 | 4.48 | 3.98 |
| A Bulls | 250 | 5.19 | 4.48 | 3.99 |
| D Cows | 180 | 4.16 | 3.53 | 3.09 |
| L Cows | 223 | 4.79 | 4.12 | 3.64 |

Under tropical conditions, livestock performance (e.g. average daily gain) is strongly influenced by forage availability. The instantaneous intake rates of Ndama cattle grazing

freely in the dry season have been reported to be the lowest and feed digestibility to decline throughout the early, middle and late dry season (i.e. the period lasting from February to May, see Chirat *et al.*, 20014). In Senegal, voluntary intake varies with the seasons because a highly significant relationship exists between OMD and DMI (see Konandreas and Anderson, 1982; Reid *et al.*, 2005). Clearly, DMI decreases from the WS to the LDS because of the negative effect of NDF content (Salah *et al.*, 2015), which is further reinforced by the scarcity of feed resources. In view of the production performances observed, such as average daily gain (Sissokho, 1998) and body condition score (Ezanno *et al.*, 2005) in the study area, the level of daily DMI is expected to be lower in the dry season.

5.4. Annual methane emission factor

Considering the estimates of MEF per head, our weighted value is 33% and 51% lower than the default annual values of 46.0 and 31 kg CH₄ for dairy and other cattle in Sub-Saharan Africa (see IPCC 2006, Tables 10A.1 and 10A.2), respectively. In addition, our proposed value of MEF (27.3 kg CH₄) is 30% lower compared with the 39.5 kg CH₄/hd suggested by Kouazounde *et al.* (2015) for Benin. When expressed in TLU, our estimated CH₄ MEF is 6% higher than the 29.1 kg CH₄ reported by Herrero *et al.* (2008) for the West Africa region, and our recommended annual methane enteric MEF is 18% below the value reported by Goopy *et al.* (2018) in East Africa (i.e. 37.5 kg CH₄/TLU).

These relative variances between the results of our study and some works cited in the literature may in part be due to the procedure used. For example, in comparison with the yearly value proposed by Goopy *et al.* (2018), our method is different from the calculation method used to propose the MEF value in that study. To take into account the herd structure, our assessment proposes a weighted MEF, while the EFs from Goopy *et al.* (2018) are estimated through a representative individual animal. In addition, the forage species encountered in rangelands in West Africa can change in both composition and nutritive value (Reid *et al.*, 2005) with associated fluctuations in intake, and hence in variation in the MEF.

With regard to previous works in the study area, our estimate is 14% above the 26.6 kg CH₄/TLU suggested by Lecomte *et al.* (2016), who used the Faecal Near Infrared Spectroscopy approach. In the northern Senegalese sylvopastoral area, recent research by Assouma (2016) recommends a yearly value of 27.07 kg CH₄/TLU for the indigenous Gobra cattle (*Bos indicus*).

The variation between our estimated AMEF and MEF sourced from some international references (e.g. IPCC, 2006) for Sub-Saharan Africa resulted directly from values in input parameters (e.g. Ym, DE) used in the predictive algorithms (e.g. Blaxter and Clapperton, 1965; Charmley *et al.*, 2008) to calculate the MEF for cattle. For example, the Tier 1 default value is based on an assumed value of feed digestibility (e.g. 50±5% for animals consuming low-quality forage), whereas in the present study, we computed the DE for each season in order to account for the actual livestock production found in the study area. The seasonal lack of pasture and access to water in a particular belt over the course of the year due to environmental and seasonal land use constraints,

pushes cattle herds to search elsewhere for grazing and watering opportunities (Ayantunde *et al.*, 2014). Several studies were conducted a long time ago to determine how digestibility explains DMI in grazing situations with a highly variable supply of forage and high proportions of roughage in the diet, which recognized digestibility as the major factor limiting dry matter intake (e.g. Baile and Forbes, 1974). Accordingly, the CH₄ production rate is increased by changing DE (Blaxter and Clapperton, 1965).

5.5. Sensitivity of the predicted methane emission factor

In the West Africa region, adult animals are not the only category in a herd. In our case, herd structure is known and we were able to take this into account. This herd structure influenced the variations in AMEF at the herd scale. Indeed, depending on the proportion of a certain class (e.g. lactating cows, which has a higher AMEF) in the herd, the global estimated annual MEF increases or decreases as a function of intake by cattle in each category. For example, different proportions of lactating cows (from 20-30%) in the herd were tested to examine the effect of variation on the weighted AMEF. As expected, our simulation shows a positive relation between an increase in the percentage of lactating cows and the overall AMEF. When the proportion of L cows increases (e.g. by 10%), the AMEF at the herd scale increases by 2%. This effect is in agreement with findings of recent studies (e.g. Malik *et al.*, 2015; Sejian *et al.*, 2015), whose authors proposed to reduce the number of heads in low-productive livestock systems (e.g. in Sub-Saharan Africa), which include numerous young animals. Conversely, a logical mitigation pathway would be to reduce the proportion of high methane emitting animals, especially if they are non-productive (e.g. old cows). One difficulty with these proposals is that the existing herd structure has been shown to be suited to the low availability of food resources and the risks associated with the length of the dry season, whereby heifers first calve at the age of five and mature cows calve only every two years (Ezanno *et al.*, 2003). Furthermore, improving the animal performance of each category through use of concentrate feeds or health control is not economically feasible at large scale in Senegal.

The main remaining uncertainty concerns the estimation of forage intakes. Although we estimated fluctuations in these intakes using observed changes in liveweight, this may not account for all the sparing mechanisms that enable ruminants to reduce their nutritive requirements, thus greatly reducing methane emissions during the dry season (Kurihara *et al.*, 1999).

6. Conclusion

The IPCC 2006 Tier 2 method was used to evaluate enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal. Our results reveal an overestimation of the MEF when using the default value provided in the IPCC Tier 1 approach, a

parameter that is widely used in GHG inventories for livestock systems in Sub-Saharan Africa. Before recommending effective strategies to mitigate the environmental impact of livestock systems in Senegal, direct measurements (e.g., GreenFeed method), in cattle production would be useful to accurately estimate enteric methane emissions.

Acknowledgements

The conception and discussions on this paper took place at the Mixed Research Unit on Livestock Systems in Mediterranean and Tropical Areas (SELMET, CIRAD - INRA - SupAgro). The West Africa Agricultural Productivity Program (WAAPP) Project supported by the World Bank provided funding. Special thanks go to the National coordinator of PROGEBE Senegal. We are also grateful to the staff of ISRA-CRZ Kolda for providing datasets and their valuable help. We also appreciate editorial and expert assistance from members of the GRA/LRG.

Declaration of interest

None.

Software and data repository resources

None.

CHAPITRE 4 : Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa is far lower than previous estimates

Ce chapitre se base sur un article publié dans la revue *Tropical Animal Health and Production* intitulé :

Ndao, S., Moulin, C. H., Traoré, E. H., Diop, M., & Bocquier, F. (2019). Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa is far lower than previous estimates. *Tropical Animal Health and Production*. 51 : 919-928

Les valeurs de facteurs d'émission couramment utilisées pour les petits ruminants, notamment en Afrique subsaharienne, proviennent de prédictions élaborées sur la base d'un modèle développé dans les pays en développement, le Tier 2.

Ce chapitre se base sur des données de suivis longitudinaux de troupeaux de petits ruminants. Les performances zootechniques proviennent de différentes localités de la zone sud du Sénégal.

Comme dans le chapitre précédent, les valeurs de facteurs d'émission produites pour les petits ruminants sont ensuite utilisées pour l'esquisse du bilan gaz à effet de serre (chapitre 6) à l'échelle du terroir, en lieu et place des valeurs par défaut proposées dans la littérature.

¹⁵Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa are far lower than previous estimates

Séga Ndao^{1,2,3,*}, Charles-Henri Moulin², El Hadji Traoré⁴, Mamadou Diop⁴, François Bocquier²

¹ ISRA, Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, BP 53 Kolda, Sénégal

² SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France

³ PPZS, Pastoral Systems and Dry Lands, Centre ISRA Hann BP 2057, Dakar, Senegal

⁴ ISRA, Laboratoire National de l'Élevage et de Recherches Vétérinaires, BP 2057 Dakar Hann, Sénégal

* **Corresponding author:** Séga Ndao, Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, BP 53 Kolda, Senegal

Email address: sega.ndao@isra.sn

¹⁵ **Ndao, S.**, Moulin, C. H., Traoré, E. H., Diop, M., & Bocquier, F. (2019). Contextualized re-calculation of enteric methane emission factors for small ruminants in sub-humid Western Africa is far lower than previous estimates. *Tropical animal health and production*. 51 : 919-928. <https://doi.org/10.1007/s11250-018-1775-4>.

1. Abstract

Given the projected growth of methane emission by ruminants in developing countries, there is a clear need for reliable estimates of their contribution to greenhouse gas emissions. Existing studies have rarely considered sheep and goats. The objective of this study was to predict enteric fermentation methane emission factors (EFs) for *Djallonké* sheep and West African Dwarf goats, following the 2006 IPCC Tier 2 methodology. Estimated enteric methane emission factors, expressed per head of animal per year, were 2.3 kg CH₄ and 2.0 kg CH₄ for sheep and goats species, respectively. Compared with the generic Tier 1 emission factor of 5 kg CH₄ head proposed by the IPCC for small ruminants in the sub-Saharan Africa region, our suggested values are 56% and 60% lower for sheep and goat, respectively. These lower values took account of the particular flock structure of both sheep and goats. These estimates also accounted for differences in live weight according to age and corresponding estimated feed intake. This work is a step forward in the revision of small ruminant emission factors and can further support assessment of mitigation strategies in Senegalese livestock farming systems.

Keywords: enteric methane; emission factor; grazing system; small ruminants; Senegal

short title: enteric methane emission of small ruminants in the tropics

2. Introduction

The history of animal domestication dates back more than 12,000 years (Soren et al. 2015). Small ruminants, i.e. sheep and goats, were the first to be domesticated for human use before other livestock species (Myers 2011).

In the tropics, where most developing countries are located (Preston and Leng 1987), sheep and goats play important roles in nutrition and livelihoods, especially for vulnerable members of society, such as women and children (Kosgey 2004; Missohou et al. 2004; Peacock 2005). In addition, small ruminants (SR) produce manure, which is the main source of organic fertiliser used in traditional productions systems of developing countries (Jaitner et al. 2001). Small ruminants are also sold to finance agricultural production inputs during the rainy season (Malick et al. 2015).

In Senegal, SR are an essential component of the livestock economy. Indeed, the large population of SR and their short production cycle compared with that of cattle species allow small ruminants to contribute significantly to meat production. In 2016, sheep and goats in Senegal accounted for 23% of meat production (MEPA 2016).

Despite the numerical importance of small ruminants in Senegal, there have been only limited previous studies of production performance (e.g., liveweight, average daily gain), particularly in extensive systems (e.g. Fall et al. 1982). Some research assessing ruminant productivity constraints has been conducted through the livestock research centres (e.g. ISRA/CRZ Dahra and ISRA-CRZ Kolda, located in the semi-arid and subhumid zone, respectively). Another investigation program, called *Programme de productivité des petits ruminants au Sénégal*, was implemented through partnerships between the French Agricultural Research Centre for International Development (CIRAD-EIMVT) and the Senegalese Agricultural Research Institute (ISRA). This latter cooperation provided data on the productivity and the pathology of SR reared in diverse agroecological regions of Senegal (e.g. Faugère and Faugère 1986).

Today, climate change poses significant threats to humans and ecosystems all over the world (Smith et al. 2014), and the West Africa region is particularly vulnerable (Palazzo et al. 2017; Partey et al. 2018). In the agricultural sector of developing countries, livestock is a significant source of GHG emissions (Smith et al. 2014; FAO 2016). In general, it is projected that greenhouse gas (GHG) emissions through livestock activities will continue to increase in developing countries, mostly emitted gas in the form of methane (CH₄) due to enteric fermentation (e.g. Bhatta et al. 2015). In sub-Saharan Africa (SSA), enteric fermentation of ruminants plays a key role in total agricultural emissions (Valentini et al. 2014). Herrero et al. (2008) estimated that in Africa, from 2000 to 2030, methane emissions may increase by 40%.

Enteric methane is a normal product of ruminal fermentation of feed, which is affected by feed composition and quality (Lenka et al. 2015). Methane production tends to increase as the fiber content of feed increases and as the protein content of feed decreases (Johnson and Johnson, 1995). Consequently, at a given level of production (milk or meat) ruminants in SSA emit more CH₄ per head than ruminants in developed countries (IPCC 2006; Gerber et al. 2013). However, estimates of CH₄

production in SSA are associated with high uncertainty because emission measurements from grazing ruminants are very limited (Tallec et al. 2012). Therefore, the Tier 1 CH₄ emission factor recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories suggests using a default value of 5 kg CH₄ head/year for sheep or goats when detailed information (e.g., reproductive and productive performance) on livestock is not available (IPCC 2006). This default annual methane emission factor (MEF) for small ruminants (i.e. 5 kg CH₄) is often applied in developing countries' GHG inventories (Pelster et al. 2016).

In its last national communication in 2015, Senegal used this default MEF for indigenous sheep and goats (NIR 2015). It is well established that CH₄ production from enteric fermentation varies with diet, grazing period (Archimede et al. 2011; Eugene et al. 2011) and daily dry matter intake (Soren et al. 2015, Hristov et al. 2018). Additionally, the Tier 1 MEF does not take into consideration factors like animal physiology or production level (Cersosimo and Wright 2015). Clearly, compared with Tier 2 and Tier 3 approaches, the default Tier 1 MEF is the less accurate methodology for determining an enteric methane emission factor in a particular context.

The main objective of the present study is to estimate enteric methane emission factors for small ruminants reared in the sub-humid zone of Senegal using the Tier 2 methodology, in order to increase the accuracy of assessments given the context of local livestock production systems.

3. Materials and methods

3.1. Study site and feeding systems

This study was conducted in the sub-humid zone in southern Senegal. In this region, small ruminants are kept in traditional smallholdings that raise diverse types of livestock in integrated crop-livestock systems (Ly et al. 2010). The main pure-breeds of small ruminants in this part of the country are the *Djallonke* sheep and the West African Dwarf (WAD) goat (ISRA 2005). These two species are mainly found in West and Central Africa because they are trypanotolerant, i.e. able to survive, reproduce and remain productive under trypanosomiasis risk without the need for chemicals or drugs to control the vector or parasite (Wilson 1988; Ly et al. 2010). Published estimates of the distribution of small ruminant breeds in Senegal are limited. However, in its latest activity report, the Livestock Ministry estimated their populations at about 6.0 million and 5.2 million for sheep and goats, respectively (MEPA 2016).

Agrosylvopastoral production systems, commonly found in southern Senegal, are characterized by integrated crop-livestock production in which animal production and agricultural crops are concurrently farmed in the same area or sequentially farmed in rotation or succession (Wilson 1988; Fernández-Rivera et al. 2004). Like cattle in the studied region, the most important feed resources for small ruminants are from rangelands, pastures, annual forages and very scarce purchased concentrate feeds (see Figure 4.1). In this region, the use of concentrated feed is very limited, except

for during the fattening period before marketing livestock and prior to religious events, (Powell et al. 2004; Holechek et al. 2017). However, farmers with sufficient financial resources supplement their animals with concentrate or groundnut leaves (*Arachis hypogaea* L.), which is an important agricultural by-product in Senegal.

During the dry season (November-June), small ruminants graze freely around rangelands and crop fields (Jaitner et al. 2001; Ly et al. 2010). Habitually, the small ruminant herds return to the settlement during the day for watering. At twilight, the herds return to spend the night in a pen. From the onset of the rainy season (May-June) to the harvest period (October-November), the movement of flocks is restricted due to crop production on arable land. Thus, the small ruminants are tethered in nearby pastures areas (e.g. fallows, bush fields) or grouped into flocks overseen by a shepherd to prevent them from damaging crops.

In Senegal, like in many West African countries, the reproduction system for small ruminants is not seasonal because the ram and the billy goat are always kept with the flock (Kosgey et al. 2006). Hence, lambing and kidding occur throughout the year. In the context of our study site, births are more frequent during the March-May and September-November (Faugère et al. 1990).

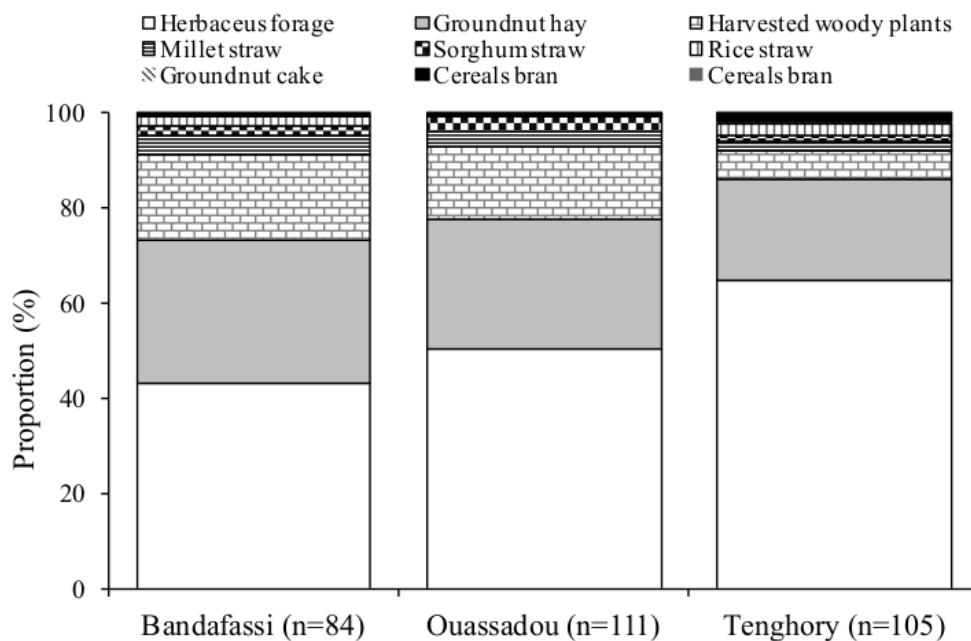


Figure 4. 1 : The main forage types of small ruminants reared in the sub-humid zone of Senegal. These results were obtained through surveys conducted with 300 households located in Bandafassi (n=84), Ouassadou (n=111) and Tenthory (n=105). On a scale from 1 to 10 points, the herd manager of small ruminant allocated importance to each type of forage. Then, for each survey area, the average proportion of each type of forage was calculated.

3.2. Sources of livestock data used

The values of specific input parameters (i.e. herd structure, liveweight (LW, kg) and average daily weight gain (ADG, kg/d)) for each animal class derived from our calculations using the PROGEBE-Senegal database. PROGEBE-Senegal was a project that undertook ruminant monitoring in three different localities in southern Senegal. These areas are *Bandafassi* (12°31' N, 12°19' W), *Ouassadou* (13°13' N, 13°49' W) and *Tenghori* (12°48' N, 16°13' W). In each zone, 20 herds (i.e., 10 flocks of sheep and 10 flocks of goats) were randomly sampled and monitored between 2009 and 2013. Other values were obtained from the database of the Senegalese Agricultural Research Institute (*Institut Sénégalais de Recherches Agricoles*, ISRA), and include research reports, theses and publications. Additional public data were obtained from the Livestock Ministry of the Senegalese Government (MEPA). However, when information was lacking or no representative data could be identified, references were sourced from published literature or reports of international organizations, such as the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The main criterion for data selection was that the data must come from research conducted in Senegal or in tropical conditions. The justification of this approach is to ensure that the information related to livestock reared on comparable diets and in similar climate conditions and agricultural production systems. All values of input parameters used, including flock structure by ages and sex, and their respective sources are reported in Table 4.1 and Table 4.2 for sheep and goats, respectively. The Figure 4.2 shows details of the proportion of animals in different classes used in this study.

Table 4.1 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric fermentation by sheep using the 2006 IPCC Tier 2 methodology and their reference sources

| Parameter | Abb. | Unit | Female (age, month) | | | | | | Male (age, month) | | | | | | Referen ce |
|---|------|---------|---------------------|-------|--------|---------|------|-------|-------------------|--------|---------|-------|---------------------------|--|---------------|
| | | | [0-3] | [3-6] | [6-12] | [12-24] | >24 | [0-3] | [3-6] | [6-12] | [12-24] | >24 | | | |
| Flock structure | | % | 4.1 | 8.0 | 11.1 | 17.5 | 36.1 | 3.2 | 6.2 | 7.2 | 5.4 | 1.2 | Present study | | |
| Coefficients for calculating NEm | Cfi | MJ d/kg | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.217 | 0.21 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.217 | 0.217 | IPCC 2006 Table 10.4 | | |
| Coefficient corresponding to animal's feeding situation | Ca | | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.01 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | IPCC 2006 Table 10.5 | | |
| Average weight | LW | kg | 8.2 | 12.0 | 16.9 | 21.6 | 26.0 | 7.8 | 12.6 | 17.7 | 22.8 | 25.2 | Present study | | |
| Adult female weight | MW | kg | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | ISRA 2005, 331 pp | | |
| Average weight | ADG | kg/d | 0.220 | 0.088 | 0.063 | 0.040 | 0.01 | 0.175 | 0.095 | 0.066 | 0.043 | 0.025 | Present study | | |
| Fat content | Fat | % | 0 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | FAO 2018. | | |
| Milk yield | Milk | kg/d | 0 | 0 | 0 | 0.240 | 0.24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Adewumi and Olorunmi 2009 | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|---|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
| Pregnancy | Cp | % | 0 | 0 | 0 | 0.077 | 0.077 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | IPCC 2006 Table 10.7 |
| Digestibility | DE | % | 70 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 70 | 50 | 50 | 50 | 50 | IPCC 2006 Table 10.2 |
| Methane conversion rate | Ym | % | 4.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 4.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | IPCC 2006 Table 10.13 |

Table 4.2 : Input parameters used to estimate emission factors for enteric fermentation by goats using the 2006 IPCC Tier 2 methodology and their reference sources

| Parameters | Abb. | Unit | Female (age, month) | | | | | | Male (age, month) | | | | | | References |
|---|------|---------|---------------------|-------|--------|---------|------|-------|-------------------|--------|---------|-------|--|--|----------------------|
| | | | [0-3[| [3-6[| [6-12[| [12-24[| >24 | [0-3[| [3-6[| [6-12[| [12-24[| >24 | | | |
| Flock structure | | % | 3.6 | 6.6 | 11.7 | 17.2 | 40.3 | 2.2 | 4.3 | 6.7 | 5.4 | 1.9 | | | Present study |
| Coefficients for calculating NEm | Cfi | MJ d/kg | 0.236 | 0.23 | 0.236 | 0.217 | 0.21 | 0.236 | 0.23 | 0.23 | 0.217 | 0.217 | | | IPCC 2006 Table 10.4 |
| Coefficient corresponding to animal's feeding | Ca | | 0.011 | 0.01 | 0.011 | 0.011 | 0.01 | 0.011 | 0.01 | 0.01 | 0.011 | 0.011 | | | IPCC 2006 Table |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------|------|------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|-------|-------|---------------------------------|--|--|--|--|--|------|
| situation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 10.5 |
| Average weight | body weight | LW | kg | 7.1 | 9.9 | 14.4 | 19.1 | 24.0 | 6.6 | 10.5 | 13.1 | 17.9 | 19.2 | Prese nt study | | | | | | |
| Adult weight | female | NW | kg | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | 18.7 | ISRA 2005, 335 pp | | | | | | |
| Average weight | daily | ADG | kg/d | 0.126 | 0.07 ² | 0.054 | 0.035 | 0.01 ⁷ | 0.128 | 0.07 ⁷ | 0.04 ⁹ | 0.034 | 0.020 | Prese nt study | | | | | | |
| Fat content | | Fat | % | 0 | 0 | 0 | 4.77 | 4.77 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Zahra deen et al. 2009 | | | | | | |
| Milk yield | | Milk | kg/d | 0 | 0 | 0 | 0.22 | 0.22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ISRA 2005, 317 pp | | | | | | |
| Pregnancy | | Cp | % | 0 | 0 | 0 | 0.077 | 0.07 ⁷ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | IPCC 2006 Table 10.7 | | | | | | |
| Digestibility | | DE | % | 70 | 50 | 50 | 50 | 50 | 70 | 50 | 50 | 50 | 50 | IPCC 2006 Table 10.2 | | | | | | |
| Methane conversion | | Ym | % | 4.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 4.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | 6.5 | IPCC 2006 Table 10.13 | | | | | | |

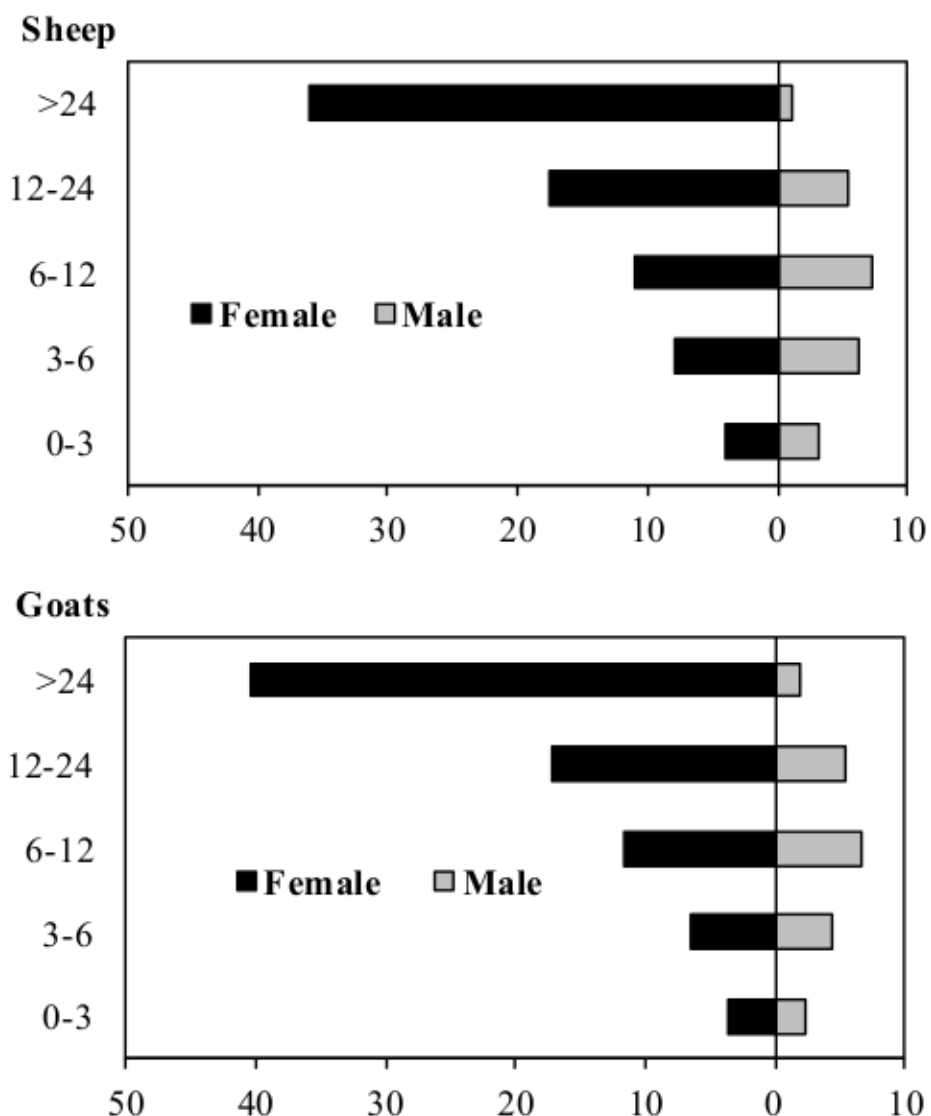


Figure 4.2 : Age pyramid of small ruminants in the sub-humid zone of Senegal expressed as a proportion of the total population (%). These figures are based on an animal sample of 987 sheep and 1575 goats from localities of Bandafassi, Ouassadou and Tenghory.

3.3. Computation of enteric methane emission factors

To estimate enteric CH₄ emissions from small ruminants, the 2006 IPCC Tier 2 methodology was used. Accordingly, daily gross energy intake (GEI, MJ/d) is estimated for each category of small ruminant (SR), based on their net energy requirements for maintenance, activity, lactation, pregnancy, and weight gain, taking into account the net energy and digestible energy content of feed. Then, the annual enteric methane emission factor (EF) is estimated by multiplying the calculated GEI by the IPCC (2006) default methane conversion rate (Y_m, see Volume 4, Chapter 10,

Table 10.13), expressing the value on an annual basis taking into account the duration each class of animal is present in the year, and dividing by the energy content of methane (i.e. 55.65 MJ/kg CH₄) (Equation 1). In order to estimate daily dry matter intake (DMI, kg DM/d), the GEI for each animal category was divided by the energy density of feed (i.e. 18.45 MJ/kg DM) as proposed by the 2006 IPCC guidelines. The energy density of feed enables conversion of GEI into dry matter intake (i.e. kg DMI/d) for each animal class. The list of formulas used to compute enteric methane emission factors for small ruminants are reported in the Supplementary Materials.

$$EF = [(GE * (Y_m/100) * 365)/55.65] \quad \text{Equation 1}$$

Where:

EF = emission factor, kg CH₄ head/yr

GE = gross energy intake, MJ head/yr

Y_m = methane conversion factor, per cent of gross energy in feed converted to methane

The factor 55.65, MJ/(kg CH₄) is the energy content of methane

4. Results and discussion

4.1. Estimated enteric methane emission factors

The estimated gross energy intake, daily dry matter intake and annual emission factors for enteric methane from small ruminants' sub-categories are reported in Table 4.3 and Table 4.4, for sheep and goat's species, respectively.

Overall, our annual weighted enteric fermentation methane emission factors (i.e. at the flock scale) for SR reared in the traditional livestock systems in southern Senegal are 2.3 kg CH₄/head and 1.9 kg CH₄/head for sheep and goats, respectively. Compared with the default annual emission factor (i.e. 5 kg CH₄/head) commonly used for SR in the sub-Saharan Africa region (see IPCC 2006, Table 10.10), our predicted MEFs are 56% and 60% lower for sheep and goats, respectively. These differences between our estimated MEF and the default value recommended by the IPCC are due to the fact that input parameters for Tier 1 are assumed to be representative at the continental scale, while our Tier 2 estimations are specific to the livestock production systems in the Senegalese subhumid zone. Furthermore, the standard MEF recommended in the 2006 IPCC Guidelines for SR in the SSA region is mostly based on investigations reported by Crutzen et al. (1986). In their study, these latter authors noted the scarcity of data related to livestock systems in

developing countries. Consequently, Crutzen et al. (1986) adopted a daily gross energy intake (GEI) of 13 MJ for developing countries, based on several assumptions. Then, to estimate the annual MEF for sheep in developing countries, Crutzen et al. (1986) applied the values of 6.0% and 55.65 MJ, corresponding to the methane conversion factor and the energy content of 1 kg methane, respectively. After calculation, Crutzen et al. (1986) obtained and recommended the generic annual MEF of 5 kg CH₄/head for sheep reared in developed countries. The same procedure was used for goats, in which the annual enteric MEF suggested by Crutzen et al. (1986) was based on an average daily GEI of 14 MJ sourced from research conducted in India (see Pandey 1980).

4.2. Effect of input parameters used

In our estimates, the herd structure of SR reared in Senegalese traditional livestock systems was taken into account. In the traditional livestock systems of West Africa, numerous classes of SR are grouped in the same feeding system because they are managed as a single group (Kosgey et al. 2006). Thus, to have a population-weighted estimate for the enteric MEF, EFs for distinctive animal classes were calculated, with consideration of their respective proportions in the flock, and the duration of each physiological stage. Therefore, the percentage of certain classes, especially the main emitters of enteric methane (i.e. adult sheep and goats), has a major influence on the annual weighted EF. For example, in our case study, the proportions of adults (i.e. billy goat, ram) are rather high (i.e. 20% and 23% in goats and sheep, respectively), while young animals (< 6 months) are fewer. These particular flock structures can be explained because the category of male adults contributes greatly to annual animal offtake (Lancelot et al. 2002; Ejlersen et al. 2012), largely during family ceremonies (e.g. baptism, marriages) or religious festivals (e.g. *Tabaski* day for Muslims). Moreover, contagious diseases and other factors (e.g. plague of small ruminants, gastrointestinal parasitism) induce high mortality rates among small ruminants, especially young animals (see Otte and Chilonda 2002; Hammami et al. 2016).

The liveweight (LW, kg) reported for small ruminants in the 2006 IPCC Guidelines (i.e., 45 and 40 kg for sheep and goat, respectively in SSA region) are higher than those derived from our calculations. The LW values used in this study are consistent with those reported in the literature for the same small ruminant species reared in similar regions (see Adebawale 1988; Mourad et al. 2001; Gbangboche et al. 2006; Sowande and Sobola 2008). In order to investigate the importance of using accurate input parameter values in the Tier 2 enteric methane emission factor model, we computed “RandomForest” procedures (Breiman 2001) available in R software (version 3.3.3). The results (Figure 4.3) show that LW is the third most important parameter after the maintenance coefficient (C_{fi}) and the methane conversion rate (Y_m). In other words, applying a higher LW in the Tier 2 model for our study zone would result in overestimation of the estimated MEF of small ruminants.

Clearly, this study contributes to the indirect assessment of enteric methane emission factors for small ruminants, using the Tier 2 approach. While our study shows that the Tier 2 method can be applied in developing countries like Senegal, there are known limitations (Wilkes et al. 2017). In particular, because of the lack of data on feed digestibility (DE, %) in the SSA region, we applied a fixed value (i.e., 50±5%) as recommended in the IPCC (2006) Guidelines. However, previous work in the Senegalese subhumid zone suggests that DE can be expected to vary. In the study site, it has been reported that the instantaneous intake rates of Ndama cattle (*Bos taurus*) grazing freely are lowest in the dry season and feed digestibility declines through the early, middle and late dry season (Ickowicz and Mbaye 2001; Ezanno et al. 2003; Chirat et al. 2014). Considering the relationship between digestibility and the production of enteric methane (Opio et al. 2013; Soren et al. 2015; Sejian et al. 2015), one can assume that methane production fluctuates through the year.

In addition, an expected trend is observed in the region of *Ferlo*, the semi-arid part of Senegal where Doreau et al. (2016), using in vitro approach, reported that CH₄ production potential differs significantly through the seasons. Their results indicate that methane production is greater from February to June (i.e. 29.7-35.2 ml/g DM) and decreases during the rainy season (i.e. 24.6-28.6 ml/g DM) from July to September. In the same vein, adopting the hand plucking approach, Assouma et al. (2018) reviewed the variability of dry matter intake and the digestibility of the forage on rangelands in the *Widou Thiengoly* territory (15°59'N, 15°19'W), northern Senegal. Their research demonstrates that during the wet season, averages intakes are 86.8±12.0 g DM/LW^{0.75} and 90.4±17.1 g DM/LW^{0.75} for sheep and goats, respectively, whereas in the dry season, the averages intake values are 66.2±4.7 g DM/LW^{0.75} and 66.8±3.3 g DM/LW^{0.75} for sheep and goats, respectively. Furthermore, using the F-NIRS method, Assouma et al. (2018) showed that feed digestibility decreases from February to June (i.e. dry season) and increases throughout the June-September period (i.e. rainy season). In Eastern Africa, Reid et al. (2005) indicated that forage species in rangelands change in terms of composition and nutritive value, and these factors are associated with variation in feed intake. Furthermore, research conducted in other regions reveals that the CH₄ conversion rate could vary together with changing digestibility of feed and the level of feeding (Blaxter and Clapperton 1965; Sejian et al. 2015; Hristov et al. 2018). These authors found that gross energy intake increased when the digestibility of feed increased, although there is no simple relationship between these two factors. Significantly, the sub-humid zone is characterized by variation in rainfalls (Cour and Snrech 1998; Fernández-Rivera et al. 2004, Zougmore et al. 2018), and changes in the length of the plant growing season (Ouédraogo-Koné et al. 2008), both of which are likely to cause variation in the digestibility and availability of feedstuff for grazing animals.

4.3. Potential influence of estimated MEF and research perspectives

In Senegal, the total GHGs emitted in 2010 was 13,084 Gg CO₂-e and the agriculture sector was the main source, i.e. 6,408 Gg CO₂-e (see NIR 2015). Within the agriculture sector, 77% was from methane gas, with 72% and 5% contributed by enteric methane and rice fields, respectively. According to contribution of livestock to overall agriculture emissions, cattle play the major role (62%), followed by small

ruminants (15%) and other species (10%). In light of this profile, enteric methane from ruminants is a key category source in Senegal's national GHG inventory. However, it is important to point out that this inventory is based on the default emission factor of 5 kg CH₄ applied to both sheep and goats. Considering our suggested values, i.e. 2.3 kg CH₄ and 2.0 kg CH₄ for sheep and goats respectively, which are based on specific input parameters values, the contribution of small ruminants to overall agriculture emission is greatly overestimated (15% vs 7%). Considering the influence of livestock on GHG (and especially methane) emissions, and the inevitable impact of climate change on SSA livestock systems, research should contribute to more accurate enteric MEF estimates. Our work to produce a representative annual MEF for small ruminants in traditional livestock system in Senegal, suggests that the use of specific liveweight data is imperative, because the MEF is highly sensitive to this parameter. Furthermore, Senegalese livestock research should investigate the relationships between intake, digestibility and their impact on MEF development. This approach will require modeling of the MEF though the seasons, because feed availability and digestibility, for example, affect both feed intake and animal performances, and thus the MEF.

The Senegalese Government (SG) is now implementing the *Plan Sénégal Emergent* (PSE, see <https://www.sec.gouv.sn/dossiers/plan-sénégal-emergent-pse>). The PSE is the official public policy for development and has guided numerous actions through several national projects. Many specific purposes of the PSE address climate change (CC) impacts in Senegal. Furthermore, in accordance with the Paris Agreement, the SG has stated the unconditional objective to reduce national GHG emissions by 5% (i.e. unconditional option) by 2030. However, for this to be achieved, the PSE must fill the gap (40%) in its funds in order to decrease of 21% (conditional option) the total GHG emitted at the national scale.

Examining the SG priority actions, the policies are more focused on adaptation to CC compared with improvement of GHG estimates and mitigation aspects. Through public policies, governments in developing countries need to shoulder research related to mitigation options in the face of CC. For example, to reduce uncertainties, research should improve the calculation of enteric methane which is a key emission-source in the overall GHG inventories in many countries in the SSA region. In this regard, various methods have been developed by scientists, mainly in developed countries. These methods allow to estimate the enteric MEF for ruminants more accurately. For example, in the USA, respiration chambers are commonly used to measure CH₄ emissions from ruminants (Powers et al. 2014). However, other procedures such as sulfur hexafluoride (SF₆) tracers have been also used (e.g. Kebreab et al. 2006; Deighton et al. 2014; Barbosa et al. 2018).

Despite the expansion of these new measurement tools, the difficulty of quantifying emissions from grazing animals such as those reared in Senegal remains to be overcome (Powers et al. 2014). For example, use of the respiration chamber technique to measure enteric CH₄ losses give highly accurate results compared with the tracer approach (McGinn et al. 2006). However, the use of chambers requires significant knowledge and is expensive to operate, especially for developing countries (Hammond et al. 2016). Considering the type of livestock systems in Senegal, which is mainly based on natural pastures, we can assume that a direct

approach like SF₆ tracers could be adapted to validate the enteric methane emission factor for small ruminants in Senegal.

For mitigation of enteric fermentation emissions, rumen manipulation in order to reduce methanogenesis (i.e., the production of methane by a group of micro-organisms) is particularly relevant. For example, Garg and Sherasia (2015) reported that for tropical feeding systems, reducing methanogenesis decreases fermentation in the rumen because of the key role of these micro-organisms in H₂ elimination from the rumen. Moreover, the use of concentrate (e.g. feeding of cereal grains) is a potential pathway to decrease enteric methane emissions. However, this mitigation strategy should be employed cautiously because of the ethical concerns over competition between humans and livestock for food security (Powell et al. 2004). Also, due to the diversity of forages in extensive feeding systems in Senegal, the use of phytochemical substances such as tannins could be explored. For example, studies conducted in other regions (e.g. Tavendale et al. 2006; Alves et al. 2017) show very promising ways to mitigate enteric methane emission of ruminants. Other enteric methane mitigation strategies are available but need to be tested in extensive livestock systems, such as those in Senegal, in order to validate their effectiveness. From this perspective, the implementation of this research needs to be supported by governments in developing countries through public policies.

Table 4.3 : Estimated dry matter intake based on NE requirements and the emission factor for enteric fermentation by different sub-categories of sheep

| Sex | Class (month) | GEI (MJ/hd) | DMI (kg/hd) | MEF (kg CH ₄ /hd) |
|--------|------------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| Female | [0-3[| 1.0 | 0.06 | 0.30 |
| | [3-6[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [6-12[| 4.0 | 0.22 | 1.71 |
| | [12-24[| 6.0 | 0.33 | 2.56 |
| | >24 | 8.0 | 0.44 | 3.41 |
| Male | [0-3[| 1.0 | 0.06 | 0.30 |
| | [3-6[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [6-12[| 4.0 | 0.22 | 1.71 |
| | [12-24[| 4.0 | 0.22 | 1.71 |
| | >24 | 4.0 | 0.22 | 1.71 |

DMI: daily dry matter intake; GEI: daily gross energy intake; MEF: annual enteric methane emission factor; hd: head

Table 4. 4 Estimated dry matter intake based on NE requirements and the emission factor for enteric fermentation by different sub-categories of goat

| Sex | Class (month) | GEI (MJ/hd) | DMI (kg/hd) | MEF (kg CH ₄ /hd) |
|--------|------------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| Female | [0-3[| 1.0 | 0.06 | 0.30 |
| | [3-6[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [6-12[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [12-24[| 6.0 | 0.33 | 2.56 |
| | >24 | 6.0 | 0.33 | 2.56 |
| Male | [0-3[| 1.0 | 0.06 | 0.30 |
| | [3-6[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [6-12[| 2.0 | 0.11 | 0.85 |
| | [12-24[| 4.0 | 0.22 | 1.71 |
| | >24 | 4.0 | 0.22 | 1.71 |

DMI: daily dry matter intake; GEI: daily gross energy intake; MEF: annual enteric methane emission factor; hd: head

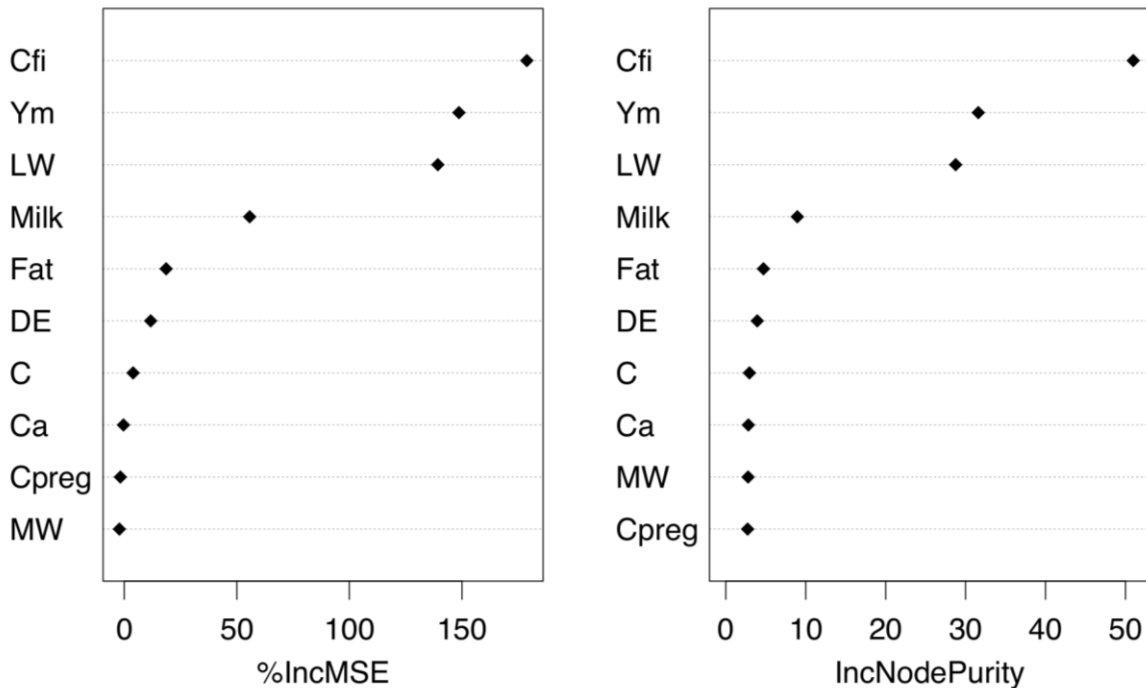


Figure 4.3 : Importance of input parameters used in the Tier 2 model to predict enteric methane emission factors for small ruminants in the Senegalese sub-humid zone. The figure shows the increase in the Mean Square Error in terms of percentage (%IncMSE) and quality (IncNodePurity) when the parameter is randomly permuted. The parameter is important when the associated %IncMSE or IncNodePurity is higher. In our case, if the important parameters (i.e. Cfi, Ym and LW) are randomly permuted, they will change greatly the predicted enteric methane emission factor.

5. Conclusion

The Tier 2 methodology recommended by the IPCC was used to develop enteric methane emission factors for native *Djallonké* sheep and West African Dwarf goats in Senegal. Our estimates suggest EFs of 2.3 kg CH₄/head/year for sheep and 1.9 kg CH₄/head/year for goats. These emission factors are far lower than the annual default value of 5 kg CH₄/head recommended in the Tier 1 method for Sub-Saharan Africa. However, direct quantification methods are needed to produce more accurate estimates of methane emissions from feed digestion by small ruminants reared in southern Senegalese extensive production systems. Future research should focus on factors (e.g. feed digestibility, dry matter intake and liveweight) that may contribute strongly to variability in enteric methane production.

Conflicts of interest

The authors declare that no conflicts of interest have affected the conduct of the work proposed in this paper.

Acknowledgments

Mr Sega Ndao would like to acknowledge to the National coordinator of PROGEBE Senegal for sharing datasets. We also appreciated expert assistance from the members of the Global Research Alliance, Livestock Research Group (GRA/LRG).

CHAPITRE 5: Estimation des émissions de gaz à effet de serre du terroir de Saré Yoro Bana

Dans ce chapitre, nous présentons deux méthodes de calcul des émissions de GES à l'échelle d'un terroir villageois, Saré Yoro Bana, Haute Casamance.

L'objectif est d'étudier la manière dont l'adaptation des facteurs d'émission peut influencer la contribution des postes d'émission de gaz à effet de serre au sein d'un terroir représentatif des agroécosystèmes de la zone soudanienne du Sénégal.

L'application des deux méthodes sur les systèmes de production confirme une redistribution de l'impact total sur les postes d'émissions considérés. En effet, l'analyse met notamment en lumière une surestimation de la contribution des animaux aux émissions de GES.

L'étude montre aussi que le terroir se comporte comme un puits de carbone si les parcours de forêts sont pris en compte. En revanche, les pratiques agricoles, la mobilité des troupeaux à l'intérieur et à l'extérieur du terroir et la gestion des ressources organiques doivent être décrites de manière précise pour solidifier l'assertion selon laquelle le terroir de Saré Yoro Bana est un puits de carbone.

1. Introduction

Les activités de productions agricoles (APA) induisent des émissions de GES tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), responsables du CC (GIEC, 2006). Au regard de certains rapports d'institutions internationales (Steinfeld, 2006 ; GIEC, 2014; Tubiello et al., 2015), l'Afrique subsaharienne (ASS) est l'une des régions du monde qui contribuent le plus au changement climatique.

Jusqu'à présent, la plupart des travaux relatifs aux estimations des émissions de GES en ASS ont été faites à l'échelle nationale ou régionale. Aussi, en raison d'une indisponibilité de données sur les systèmes de productions agricoles (Vayssières et Rufino, 2012 ; Rosenstock et al., 2019), les émissions provenant des activités agricoles sont généralement estimées avec des facteurs d'émissions (FE) par défaut du GIEC (2006). Ce niveau d'approche occasionne des incertitudes élevées dans les estimations des quantités de GES émis dans l'atmosphère (Kouazounde et al., 2015 ; Kim et al., 2016). Aussi, l'approche par défaut du GIEC (2006) ne permet pas d'appréhender la complexité des systèmes de productions agricoles tels que ceux d'ASS (Ndung'u et al., 2019 ; Aliyu et al., 2019).

Pour comprendre les impacts environnementaux des APA en Afrique de l'Ouest où l'agriculture est une activité clé pour les communautés (Ickowicz et al., 2010), soutenir l'élaboration de stratégies d'atténuation des émissions de GES et concevoir des systèmes agricoles durables, une approche systémique nous semble pertinente (Osty, 1978 ; Kuemmerle et al., 2013 ; Assouma, 2016). En effet, les SPA en Afrique de l'Ouest se caractérisent par l'interaction entre de nombreux facteurs (Petit, 2013), une cohérence agroécologique, une gestion des ressources qui s'opère avec une diversité spatiotemporelle, et où la coexistence des zones de productions agricoles ont un sens (Conway, 1985 ; Tittonell, 2013). Les APA en Afrique de l'Ouest sont gérées au sein des exploitations familiales alors que l'utilisation des ressources comme les parcours communaux est décidée par les autorités villageoises (Dugué et Dongmo, 2004; Rosenstock et al., 2013).

2. Méthodologie

2.1. Organisation du terroir et systèmes de production

Le terroir villageois de Sare Yoro Bana (SYB) est situé dans la région de Kolda, dans la zone subhumide du Sénégal. Le système de production agricole de SYB peut être définie comme un système intégré agriculture-élevage. En termes d'organisation spatiale, SYB est représentatif des écosystèmes paysagers d'Afrique de l'ouest (Manlay, 2001 ; Fanchette, 2011). La colonisation de ce terroir s'est faite par l'occupation des forêts de plateau qui séparent les vallées ou par la multiplication des grands villages des basses terres vers les jachères (Ickowicz et al., 1999 ; Manlay et al, 2004).

Le cheptel ruminant (bovin, ovin et caprin) est essentiellement constitué de bovins Ndama, d'ovins Djallonké et de chèvres naines d'Afrique de l'Ouest. Néanmoins, les espèces asines et équines sont présentes pour assurer certains travaux dans les exploitations (p. ex. : traction, labour). En début de la saison sèche froide (novembre-février), les troupeaux de bovins reviennent progressivement des zones de parage d'hivernage (savanes et forêts) pour exploiter les résidus de cultures (maïs, millet, sorgho, riz), les jachères et les repousses dans les champs. Le soir, les troupeaux sont regroupés autour des champs de case pour y passer la nuit. En saison de pluies (juin-octobre), les animaux (notamment les bovins) sont en permanence parqués en zone de savanes et de forêts. Ceci permet de garder les troupeaux à l'écart des parcelles de cultures.

Les activités de productions végétales ont lieu principalement pendant la saison des pluies (juin-octobre). Les agroéleveurs de SYB pratiquent une agriculture diversifiée : les céréales (maïs, mil, sorgho, riz) en cultures pluviales et irriguées, les légumineuses (p. ex. : arachide et niébé) en cultures de rente (Fanchette, 1999 ; Manlay, 2000). Les champs de cultures continues, ou auréole de case (Figure 5.1) sont majoritairement occupés par les céréales telles que le mil (*Pennisetum glaucum* L.), le maïs (*Zea mays* L.) et le sorgho (*Sorgho bicolor* L. Moench). Les cultures de légumineuses comme l'arachide (*Arachis hypogea* L.) et le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) sont mises dans des zones de culture semi-permanente (avec jachères) situées autour des champs de brousse (auréole de brousse), en complément de cultures de céréales (mil) ou d'autres cultures de rente comme le coton.

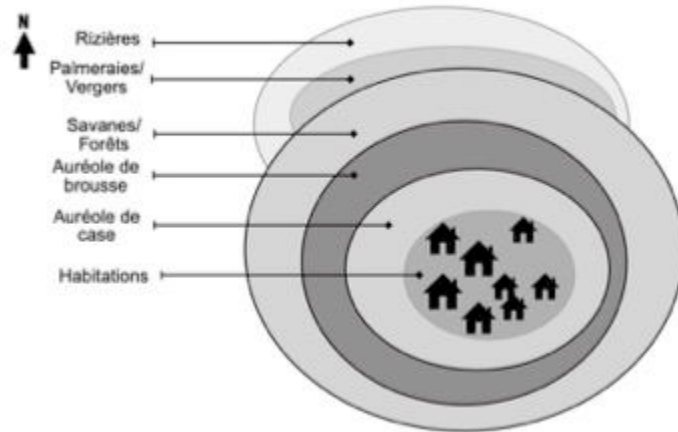


Figure 5.1 : Organisation concentrique du terroir de Saré Yoro Bana (adaptée de Kairé, 1999, Manlay, 2001, Ickowicz et Mbaye, 2001)

2.2. Modèle conceptuel et postes d'émissions

Pour évaluer les émissions de GES (directs et indirects) à l'échelle du terroir de SYB, notre approche s'appuie sur la méthode d'analyse de cycle de vie (Van der Werf et al., 2009) des produits agricoles du terroir qui constitue notre périmètre d'étude. Le fonctionnement du terroir est conceptualisé sur la Figure 5.2. Cette dernière présente aussi les flux de matières et les sources d'émission et d'absorption de GES retenues pour l'évaluation.

Considérant les émissions directes de GES induites par les processus de production au niveau du terroir et celles occasionnées indirectement par la fabrication et le transport d'intrants agricoles, les postes d'émission de GES comptabilisées dans notre évaluation sont :

- *Fabrication et transport de fertilisants minéraux ;*
- *Fermentation entérique ;*
- *Gestion des déjections ;*
- *Riziculture ;*
- *Fertilisants minéraux ;*
- *Termites ;*
- *Déjections déposées sur les pâturages ;*
- *Résidus de récoltes ;*
- *Brûlage des savanes.*

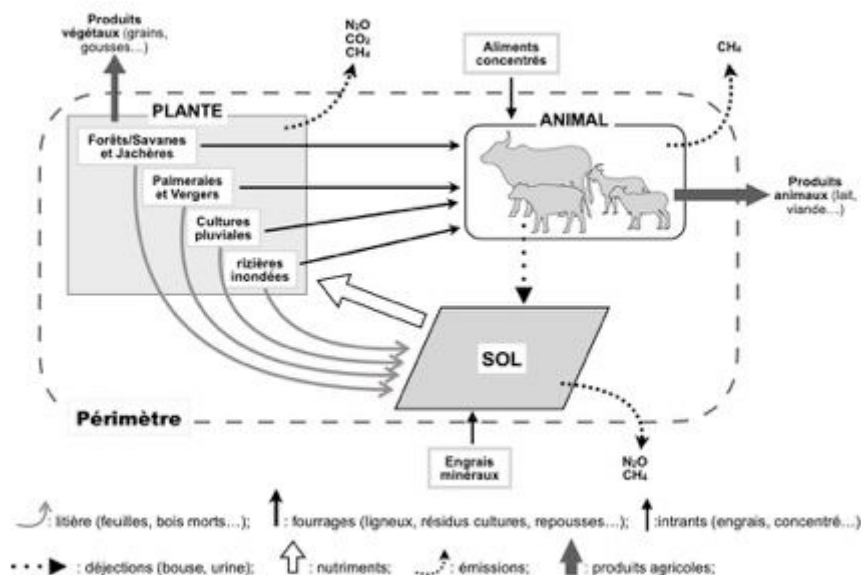


Figure 5.2 Schéma conceptuel des postes d'émissions comptabilisées dans l'évaluation de l'impact des gaz à effet de serre (méthane : CH₄, oxyde nitreux : N₂O et dioxyde de carbone CO₂) du terroir de Saré Yoro Bana

2.3. Emissions de GES comptabilisées

6.1.1. 2.3.1. Méthane

Pour les émissions de méthane (CH₄), la fermentation entérique par les animaux d'élevage, la décomposition anaérobie de la matière organique des rizières sont comptabilisées. Également, les quantités de méthane émises durant la dégradation anaérobie des constituants de la matière végétale par les termites sont prises en compte (Brauman et al., 2000).

6.1.2. 2.3.2. Oxyde nitreux

Les émissions de N₂O sont principalement induites par les apports d'azote (N) aux sols agricoles (Tubiello et al., 2015). Ces apports proviennent des résidus de récolte, des déjections et des fertilisants minéraux (p. ex. : Urée, NPK). Les émissions de N₂O se produisent directement avec les phénomènes de nitrification (c.-à-d. de l'ammonium converti en nitrate) et de dénitrification (c.-à-d. nitrate converti en gaz azoté) des apports directs d'azote (Lenka et al., 2015). Les émissions indirectes de N₂O résultent de l'enrichissement en azote par le lessivage, le ruissellement de nitrate et par volatilisation de l'ammoniac provenant des sols agricoles (Samer, 2015 ; GIEC, 2019).

6.1.3. 2.3.2. Dioxyde de carbone

Les émissions de dioxyde de carbone comptabilisées sont celles provenant de la fabrication et du transport des engrais ; celles induites par le brûlage des résidus de cultures et des parcours de savanes. L'élevage, tel que pratiqué à SYB est de type extensif donc, associé à l'exploitation de parcours naturels. Ces espaces sont d'importantes sources de stockage de carbone (Serpantié et al., 2001 ; Corbeels et al., 2015). Ainsi, le potentiel de compensation des émissions est considéré dans l'évaluation

2.4. Méthode d'estimation des émissions

Notre étude suit méthodologie du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais), principal organisme pour l'évaluation du changement climatique (Tubiello et al., 2015). Pour évaluer l'impact environnemental de l'activité de production, le GIEC propose une formule de base (Équation 5.1). Cette équation est le produit de la donnée d'activité (DA, *Activity Data*) par le facteur d'émission (FE, *Emission Factor*). La formule doit être appliquée à chacun des compartiments pendant une période donnée et sur une région spécifiée (Herrero et al., 2008 ; Tubiello et al., 2015). Ensuite, les pouvoirs de réchauffement globaux (PRG) des GES rapportés par le GIEC (2014) permettent de convertir en équivalent CO₂ (Eq-CO₂), les contributions à l'effet de serre des différents gaz. Les coefficients respectifs des PRG sont 34 (CH₄), 298 (N₂O) et 1 (CO₂).

$$\text{Emission/Absorption de GES (Eq-CO}_2\text{)} = \text{AD} * \text{EF} \quad \text{Equation 5.1}$$

2.5. Données mobilisées

2.5.1. Données d'activités

La mobilisation d'un important jeu de données a été faite pour estimer les données d'activités sur le terroir (Tableau 5.1) :

- Les données d'activités primaires (p. ex. : le cheptel, les surfaces cultivées ou mises en jachères, les quantités d'intrants minéraux achetées, semences achetées) ont été obtenues à travers des entretiens directs auprès de l'ensemble des agroéleveurs du village de SYB. Ces enquêtes ont été faites entre février et mai 2017.
- Les données secondaires comme les rendements culturaux utilisés ont été estimées à partir des statistiques fournies par la Direction Régionale du Développement Rural de Kolda (DRDR Kolda). D'autres données techniques liées à l'excrétion animale (kg/UBT/jr) et la quantité d'azote (kg N/kg MS) contenue dans les déjections ont été estimées à partir d'informations provenant d'études antérieures réalisées dans la zone d'étude (Programme ABT ; Ickowicz

et al, 1999 ; Kaïré, 1999 ; Manlay, 2000 ; Ickowicz et Mbaye, 2001 ; Chirat, 2010 ; Vigan, 2012) et de nos calculs. Les quantités de combustible (t MS/ha) disponibles dans les parcours sont rapportées par Ickowicz et Mbaye, 2001. Les quantités d'azote (N/kg MS) apporté au sol par les résidus de récoltes sont obtenues en considérant pour chaque culture, les proportions de résidus de récoltes laissées dans les parcelles et celles prélevées par les éleveurs (Vigan, 2012). Ensuite, nous avons pris en compte la teneur en azote des résidus rapportées des études antérieures (Le Tiec, 1996, Kaïré, 1999 ; Manlay, 2001). Les émissions liées aux brûlages des savanes ont été estimées à partir de la biomasse disponible (t MS/ha) et des proportions de surface moyenne brûlée. Cette valeur est obtenue à partir des rapports d'activités de l'inspection régionale des Eaux et Forêts de Kolda (IREF de Kolda).

- Les valeurs de paramètres zootechniques comme la production laitière (l/jour), le gain moyen quotidien (kg/jour) ou le taux de croît annuel du troupeau découlent de suivis effectués en milieux villageois (données ISRA-CRZ 2009-2018) et de résultats de projet de recherche sur la préservation du taurin Ndama dans la zone sud du Sénégal (ISRA-PROGEBE Sénégal 2009-2015).

2.5.2. Données sur la gestion des déjections à l'étable

Le village de SYB est resté traditionnel en termes d'intensification depuis plusieurs décennies. Pour appréhender la dynamique des systèmes de production animale dans la zone soudanienne du Sénégal (p. ex. : stabulation des vaches pour la production laitière en contre-saison), des informations ont été collectées par enquêtes chez des exploitations agricoles familiales (EAF) situées dans le département de Vélingara. Ces entretiens complémentaires ont été réalisés auprès entre avril et juin 2017. Ces enquêtes visaient à comprendre les pratiques des éleveurs en termes de gestion des déjections provenant des systèmes de stabulation laitières à l'étable. Pour ce faire, une liste constituée de quatre-vingt-huit (88) EAF répertoriées durant les activités du Projet d'Amélioration de la Production Laitière dans la zone de Vélingara (WVS, World Vision Sénégal/Projet PAPlait) a servi de population de base. Dans le choix des enquêtés, nous avons veillé à la diversité des origines des éleveurs, de la représentativité de ces dernières dans la population de base, de l'ancienneté dans la filière (>10 ans ou <10 ans), et de la diversité des races exploitées (locale, métis ou exotique). En définitive, nous avons tiré au hasard 50 éleveurs (c.-à-d. 57 % de la population de base).

Pour estimer les proportions de déjections gérées annuellement à Vélingara, les animaux (ruminants et non-ruminants) de chaque EAF enquêtée ont été recensés. Ensuite, les effectifs par espèces et par catégories ont été convertis en unités bétail tropical (UBT), unité de référence qui équivaut à un animal de référence de 250 kg de poids vif dans les pays tropicaux (Meyer, 2019). La valeur moyenne de 656 g MS/100 kg PV, issue des travaux de Fall et Faye (1989) dans la zone, a été utilisée pour évaluer les quantités de déjections produites par les animaux (kg MS/j) de chaque EAF. Aussi, pour les vaches en stabulation qui pâturent la journée et reviennent à l'étable en fin d'après-midi (stabulation partielle, Figure 5.3), nous avons présumé que 40 % de l'excrétion quotidienne est déposée directement sur les sols (sols agricoles et espaces de parcours naturels). Cette supposition se fonde sur les

résultats de Fall et Faye (1989) qui rapportent que 60 % de la quantité excrétée par les vaches a lieu entre 18h00 et 8h00 du matin. Concernant les animaux en stabulation permanente, nous avons supposé pour la période de stabulation que la totalité des déjections est déposée à l'étable, donc susceptible d'être gérée. Les informations détaillées de cette étude sur les pratiques de gestions des déjections dans les EAFs de Vélingara sont reportées en annexe du document.



Figure 5.3 : Stabulation des vaches pour la production de lait en saison sèche dans le village de Baty (Vélingara, Source : © S.Ndao)

Tableau 5.1 : Synthèse des données d'activités utilisées dans l'estimation des émissions de GES

| Paramètres | Description | Unité | Valeur utilisée | Références |
|------------|---|------------|-----------------|--|
| Herd | population animal | UBT | 490 | Enquêtes 2017 |
| FSN | quantité engrais appliquée | kg N/an | 1092 | Enquêtes 2017 |
| FON | quantité d'azote contenue dans les déjections restituées sur les parcours | kg N/an | 6697 | Manlay, 2000; Ickowicz et Mbaye, 2001; Guérin et Roose, 2017 |
| FUN | quantité urée appliquée | kg urée/an | 1624 | Vigan 2012; Enquêtes 2017 |

| | | | | |
|-------|--|---------|-----|------------------------------------|
| FCR | quantité d'azote contenue dans les résidus de récoltes | kg N/an | 598 | Vigan 2012; Enquêtes 2017 |
| Rice | surface des rizières | ha | 17 | Enquêtes 2017 |
| Crop | surface utilisée pour les cultures végétales | ha | 279 | Enquêtes 2017 |
| BioB* | masse de combustible disponible | t/ha | 4-7 | IPCC 2006, Ickowicz et Mbaye, 2001 |
| FSU | surface de savanes/forêts | ha | 126 | Vigan 2012, Enquêtes 2017 |

UBT : unité bétail tropical ; t : tonne ; ha : hectare ; an : année ; kg N : kilogramme d'azote

2.5.3. Facteurs d'émission utilisés

Les facteurs d'émission retenus sont contextualisés lorsque possible, sinon les FEs recommandés par le GIEC (2006) sont utilisés (tableaux 5.2 et 5.3).

Les émissions induites par la fermentation entérique des bovins et des petits ruminants sont calculées avec les FEs estimés dans le cadre de cette thèse (cf. Chapitre 3 et 4). Pour les autres espèces animales (équines et asines etc.), les FEs par défauts du GIEC ont été conservés en l'absence de références spécifiques.

Concernant les émissions provenant des rizières, le FE générique (c.-à-d. 20 g CH₄/m²/an) a été appliqué (Tubiello et al., 2015). Actuellement au Sénégal, pour les émissions dues aux termites, les FEs de méthane ne sont pas disponibles. Par conséquent, le coefficient reporté par une étude réalisée au Burkina Faso (Brümmer et al., 2008) est utilisé, conformément aux lignes directrices du GIEC (2006).

Les estimations des émissions directes (nitrification, dénitrification) et indirectes (lessivage, volatilisation) d'oxyde nitreux sont faites avec les FEs proposés par le GIEC (2006, Volume 4, chapitre 10 et 11).

Les FEs appliqués pour estimer les émissions dues aux brûlages des savanes proviennent du GIEC (2006, Vol. 4, Ch. 2) et de la Base de données mondiale sur les émissions d'incendie (www.globalfiredata.org).

Pour évaluer les quantités de CO₂ d'origine énergétique émises lors de la fabrication et le transport de fertilisants minéraux, les FEs utilisés proviennent de l'outil GES'TIM (2010), un guide méthodologique d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (Gac et al., 2010). Pour les estimer les émissions associées au transport, la distance prise en compte est celle entre l'origine (le Mali principalement) et la destination (SYB, Kolda) en passant par Dakar. Les émissions induites par la fabrication et le transport des concentrés alimentaires ne sont pas comptabilisées. L'impact induit par la fabrication et le transport des concentrés alimentaires n'a pas été comptabilisé à cause de leur faible utilisation par les éleveurs du terroir.

Pour alimenter le débat sur la capacité des écosystèmes ouest africain à compenser leurs émissions de GES, une valeur moyenne de stock de carbone est utilisée. Cette

dernière est tirée de la bibliographie (Ago et al., 2016) et du *Global Forest Resources Assessment* (FRA, 2010, cf. <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/>).

Tableau 5.2 : Liste des coefficients utilisés dans l'estimation des émissions de GES

| Paramètres | Description | Unité | Valeur utilisée | Références |
|------------|--|----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Burn | proportion moyenne de surface brûlée | % | 10 | IREF Kolda; PROGEBE Senegal |
| Cf | facteur de combustion | - | 0,73 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 2 |
| FrL | Fraction d'azote lessivée | kg N less. /kg N appliquée | 0,3 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| FrF | Fraction d'azote volatilisé | kg N vol. /kg N appliquée | 0,1 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| FrM | Fraction de la quantité de déjections volatilisé | kg N vol. /kg N appliquée | 0,2 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| UEF | Fraction perdue de la quantité d'azote contenu dans l'urée | % | 0,2 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |

less : lessivage ; vol. : volatilisation

Tableau 5.3 : Liste des facteurs d'émission utilisés dans l'estimation des émissions de GES

| Paramètres | Description | Unité | Valeur utilisée | Références |
|------------|---|---------------------------------------|-----------------|--|
| REF | FE de méthane des rizières | g CH ₄ /m ² /an | 20 | Tubiello et al. 2015 |
| Cgef | quantité de dioxyde de carbone par kg de biomasse végétale brûlée | g/kg MS | 1613 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 2 |
| Mgef | quantité de méthane par kg de biomasse végétale brûlée | g/kg MS | 2,3 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 2 |
| Ngef | quantité d'oxyde nitreux par kg de biomasse végétale brûlée | g/kg MS | 0,21 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 2 |
| MEF | FE de méthane provenant de la fermentation entérique | kg CH ₄ /UBT/an | 29 | Herrero et al 2008; Ndao et al. 2019; Ndao et al. 2020; Bois et al. 2020 |
| MAF | FE de méthane provenant des déjections | kg CH ₄ /UBT/an | 0,9 | IPCC 2006; Ndao et al. 2019; Ndao et al. 2020 |
| EF1 | FE direct d'oxyde nitreux pour les ajouts d'azote | kg N ₂ O-N/kg N | 0,01 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| EF3 | FE d'oxyde nitreux pour les ajouts d'azote provenant des déjections | kg N ₂ O-N/kg N | 0,02 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |

| | | | | |
|-----|--|-----------------------------|--------|---------------------------|
| EF4 | FE des émissions indirectes d'oxyde nitreux dues à la volatilisation | kg N2O-N/kg NH3-N+NOx-N vol | 0,01 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| EF5 | FE des émissions indirectes d'oxyde nitreux dues au lessivage | kg N2O-N/kg N appliquée | 0,0075 | IPCC 2006, Vol.4, Chap 11 |
| TEF | FE des missions provenant de termitières | kg CH4/ha/an | 3,38 | Brümmer et al 2009 |
| CEF | FE de la quantité moyenne de carbone stocké | t CO2/ha/an | 2,0 | Ago et al. 2016, FRA 2010 |

g : gramme; kg : kilogramme ; t : tonnes ; ha : hectare ; UBT : unité bétail tropical ; MS : matière sèche ; N : azote

3. Bilans GES comparés au sein du même terroir

Le bilan GES du terroir tel que nous l'entendons dans cette étude est l'estimation des quantités de GES émises (ou absorbées) dans l'atmosphère, à travers les activités de productions, sur une année. Notre travail qui couvre la période de mai 2016 à avril 2017, considère les émissions associées aux activités agricoles menées à l'intérieur du terroir de SYB et les impacts dus à la transformation et au transport des engrais minéraux (émissions en amont).

Dans l'objectif de faire une comparaison des approches, deux méthodes ont été adoptées pour calculer les émissions de GES à l'échelle du terroir de Saré Yoro Bana :

– La Méthode 1 : une approche générique du bilan GES

A travers cette technique, les émissions de GES ont été estimées avec les facteurs d'émissions recommandés par le GIEC (2006) pour l'Afrique (Tier 1). Cette méthode 1 est appliquée en l'absence de références locales. Cette approche par défaut du GIEC (2006) est actuellement appliquée par la majorité des pays africains qui, par exemple, n'ont pas encore caractérisé leurs systèmes de gestion des déjections animales. Avec cette méthode, l'hypothèse est que 83 % des déjections animales sont déposées directement au sol, 6 % sont brûlées, 5 % sont épandues quotidiennement (cf. GIEC, 2006, Vol.4, chap.10 annexe 10A.2).

– La Méthode 2 : une approche systémique du bilan GES

Dans notre approche, les émissions de méthane entérique des déjections des ruminants (bovins et petits ruminants) qui constituent le poste le plus émetteur dans la plupart des inventaires de GES des pays africains ont été comptabilisées avec des facteurs d'émissions contextualisés (Tier 2). Pour les autres espèces animales (équins, asins), les FE par défaut du GIEC (Tier 1) ont été appliqués en l'absence de valeurs spécifiques. Aussi, notre démarche propose une caractérisation spécifique des systèmes de gestion des déjections animales existants dans la zone. Dans notre contexte d'étude, les bovins qui représentent l'essentiel du bétail ne sont pas élevés dans des bâtiments et l'épandage quotidien n'est pas une pratique courante. En effet, les troupeaux sont aux pâturages durant la journée (p. ex. parcours, terres cultivées). La nuit, ils sont parqués à proximité des habitations (parcage nocturne).

En période de saison sèche, en moyenne 18 % des vaches en lactation sont mises en stabulation laitière pour une période d'environ deux mois (cf. annexe MMS). Il découle de ce système de conduite qu'à l'échelle de l'année, l'essentiel des déjections animales est déposé au sol (98%) et à des endroits différents (p. ex. : zone de forêts ou savanes, champs de cases, bas-fonds). Ensuite, la pratique du brûlage des déjections n'est pas une pratique courante dans la zone et ne peut donc être généralisée. Aussi, pour estimer les émissions dues au dépôt direct des déjections sur le sol, l'approche par défaut du GIEC (2006) utilise le produit de la donnée d'activité (quantité d'azote dans les déjections) par le facteur d'émission par défaut. Pour obtenir la quantité d'azote excrétée par les animaux, nous avons utilisé une valeur spécifique qui provient de la recension de travaux antérieurs menés dans la zone d'étude (Cf. Guérin et al., 1990 ; Manlay, 2000 ; Guérin et Roose, 2017). De même, pour les émissions associées aux feux de savanes, la masse de combustible rapportée par des travaux antérieurs dans la zone d'étude a été utilisée, en lieu et place de la valeur par défaut recommandée par le GIEC (2006) pour les savanes tropicales. Aussi, nous avons utilisé la proportion moyenne de surface effectivement brûlée dans la zone de savanes/forêt du terroir.

3. Allocation des impacts et intensité d'émission

Pour rendre compte des différentes fonctions du système de production étudié, les émissions totales sont rapportées par hectare de surface (kg Eq-CO₂/ha) et par habitant (kg Eq-CO₂/habitant).

Dans le contexte de production du terroir étudié, nous avons distingué les ateliers de productions animales et végétales. Ces deux ateliers génèrent différents produits agricoles (p. ex. : lait, viande, grains de céréales). Ainsi, les intensités d'émission (c.-à-d., émission par unité de produit) de GES pour l'atelier animal ont été respectivement exprimées, pour le lait et la viande, en kg de lait corrigé (kg Eq-CO₂/kg FPCM) et en kg de poids vifs (kg Eq-CO₂/kg PV). Pour les cultures, l'intensité d'émission a été exprimée en kg Eq-CO₂/kg produit.

Par rapport aux postes d'émissions, les impacts environnementaux ont été affectés en tenant compte des étapes de production et des finalités. Ainsi, nous avons procédé de la manière suivante :

- les émissions provenant de l'activité biologique des animaux (méthane entérique), de la gestion des déjections animales, des déjections déposées sur les pâturages, des résidus de récoltes et le brûlage des savanes ont été attribuées aux produits animaux.
- les émissions des rizières, celles induites par la fabrication et le transport des fertilisants minéraux, les émissions provenant des termitières ont été allouées aux cultures.

4. Résultats

4.1. Estimation des émissions de GES

Les émissions totales de GES du terroir sont estimées à 1,12 kt Eq-CO₂/an et 0,81 kt Eq-CO₂/an suivant, respectivement les méthodes 1 et 2.

La Figure 5.4 montre pour les deux méthodes appliquées, la contribution (%) aux émissions totales de GES des postes d'émissions considérés. Quelle que soit la méthode, la fermentation entérique (Ent), les feux de savanes (Bsa) et le dépôt direct des déjections animales sur les parcours (Dej) sont les postes qui contribuent le plus à l'émission totale.

Toutefois, l'utilisation des facteurs d'émissions (FEs) de méthane entérique (bovins et petits ruminants) développés dans cette étude induit une redistribution de la contribution respective des postes d'émissions pris en compte. En effet, avec la méthode 2, la part de la fermentation entérique dans les émissions de GES varie de 7 %, comparée à la méthode 1 (71 % contre 65 %). Cette tendance est aussi observée pour les brûlage de savanes et les déjections sur parcours qui baissent, respectivement de 14 % et 10 %. En revanche, nous constatons que la participation de la gestion des déjections (Gde) augmente de 114% avec la méthode 2. Mais, ce dernier poste ne représente que 4 % des émissions totales. L'évaluation des émissions de GES montre que les autres postes d'émissions (p. ex. : riziculture, engrais minéraux) participent pour moins de 1 % aux émissions totales.

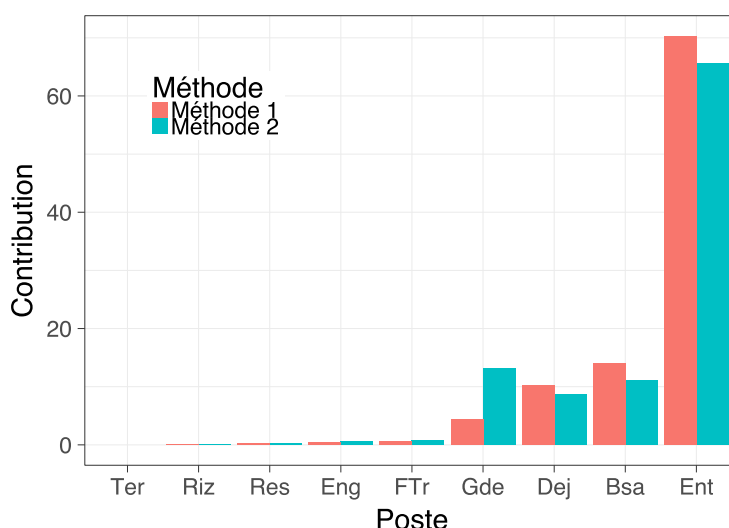


Figure 5.4 : Contribution (exprimée en %) aux émissions totales des différentes postes d'émission de GES du terroir de Sare Yoro Bana selon les méthodes 1 (valeurs par défaut GIEC) et 2 (certaines valeurs contextualisées). Ent : méthane entérique ; Bsa : brûlage des savanes ; Dej : déjections sur parcours ; Gde: système de gestion des déjections; FTr: fabrication et transport d'engrais minéraux ; Eng: engrais minéraux ; Res : résidus de cultures ; Riz : riziculture ; Ter : termites

4.2. Contribution des différents GES

Considérant les principaux GES de l'agriculture, le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂) représentent respectivement, pour la méthode 1, 73, 13 et 15 % des émissions totales. Avec la méthode 2, les contributions du CH₄ et du CO₂ diminuent de respectivement, 18 et 4 %. Pour le N₂O, les émissions augmentent 42 % (Figure 5.5).

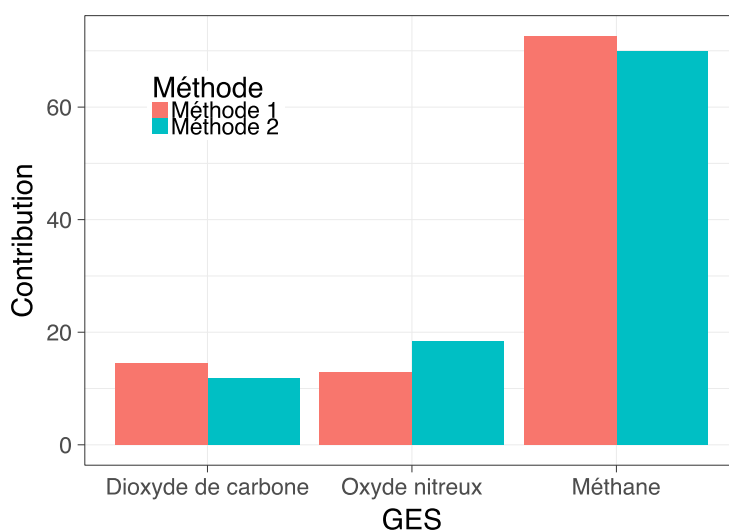


Figure 5.5 : Contribution (exprimée en %) des différents GES aux émissions totales du terroir de Saré Yoro Bana selon les deux méthodes appliquées

3.3. Contribution des différentes espèces animales

La répartition des émissions par espèces animales selon la méthode 2 est présentée dans la Figure 5.6. Les bovins participent significativement aux émissions totales, avec notamment les vaches en lactation (76 %). Les petits ruminants (ovins et caprins) et les autres animaux (chevaux et ânes) participent peu aux émissions totales (respectivement 5 % et 6 %).

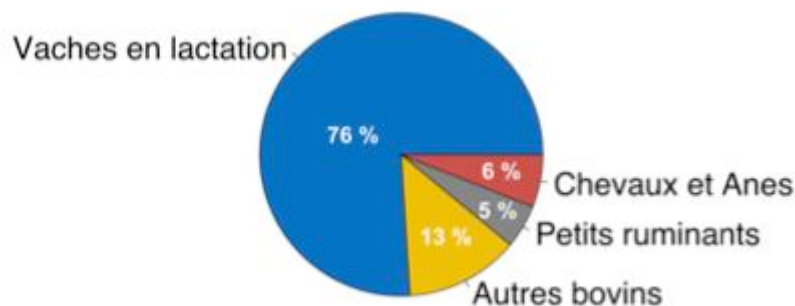


Figure 5.6 : Contribution relative des différentes espèces animales aux émissions totales de GES du terroir de Saré Yoro Bana selon la méthode 2

3.4. Intensités d'émission

Les émissions totales (sans intégration du stockage de carbone) de GES sont de 2,0 t Eq-CO₂/ha et 2,6 t Eq-CO₂/habitant. Exprimées en kilogramme de produits animaux, les IE du lait et de la viande de bovins sont respectivement de 4,9 kg Eq-CO₂/kg de lait et de 18,5 Eq-CO₂/kg de poids vif. Pour les petits ruminants, l'IE est de 12,0 Eq-CO₂/kg de poids vif. Pour les productions végétales, l'impact des activités est de 11,8 Eq-CO₂/kg de grain produit.

3.5. Conséquence de la prise en compte du stockage de carbone

La comptabilisation dans les émissions totales d'une valeur moyenne du stockage de carbone (2,0 t C/ha/an) montre que le terroir se comporte comme un puits de carbone et ceci, quelle que soit la méthode appliquée. Toutefois, si une capacité de stockage de carbone de -0,50 t C/ha/an est retenue (hypothèse basse), le terroir se comporterait comme une source d'émission (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Bilan des émissions en tenant compte du stockage du carbone dans les sols de savanes et de forêts, selon les hypothèses de stockage et les deux méthodes (Tier 1, Tier2) d'inventaires des émissions

| Hypothèses sur le stockage de carbone | Emissions totales (t C/ha/an) | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| | Méthode 1 | Méthode 2 |
| Basse (0,5 t C/ha/an) | 0,77 | 0,47 |
| Moyenne (2,0 t C/ha/an) | -0,25 | -0,56 |
| Haute (3,5 t C/ha/an) | -1,28 | -1,59 |

4. Discussion

4.1. Comparaison des deux méthodes d'estimation de GES

L'application des deux méthodes met en évidence l'importance d'utiliser des valeurs contextualisées (données d'activité et facteurs d'émission), pour calculer les émissions de GES dues aux activités de productions agricoles. Avec la méthode 1 (ou Tier 1), la DA peut être spécifique mais le FE par défaut provient souvent du GIEC (2006) et a une valeur fixée. De ce fait, les émissions totales estimées avec la méthode 1 ne dépendent que des FE utilisés. Ainsi, la diminution de 28 % des émissions totales avec la méthode 2 peut s'expliquer par la surévaluation de l'ingestion journalière des animaux. Cette surestimation de l'ingestion se répercute sur deux postes d'émission de GES. Le premier poste est l'émission de méthane entérique (Patra, 2017, van et al., 2019, Ndao et al., 2020). Le second poste concerne les émissions directes d'oxyde nitreux. Elles sont influencées par les sources d'azote telles que les intrants minéraux et les déjections animales : une surévaluation de l'ingestion chez les animaux va également contribuer à la surestimation des émissions induites par les déjections (Dollé et al., 2011 ; Guingand et al., 2017). Les quantités d'émissions de GES sont très sensibles aux FE utilisés, notamment ceux des postes-clés d'émission (p. ex. : méthane entérique, déjections directes sur parcours). Les terroirs agrosylvopastoraux d'Afrique de l'ouest sont caractérisés par une forte densité animale (Couacy-Hymann et al., 2006 ; Sieza et al., 2019). Ainsi, la contextualisation des FE utilisés est nécessaire pour ne pas surestimer les émissions totales.

Pour la suite de la discussion, les résultats obtenus avec la méthode 2 (approche systémique), plus représentative du système étudié, seront conservés pour estimer les émissions de GES induites par les activités de productions menées à l'intérieur du terroir.

4.2. Importance des postes d'émission

4.2.1. Méthane entérique

Le rôle du méthane entérique dans les émissions de GES a déjà été rapporté par des travaux antérieurs (p. ex : Steinfeld et al. 2006 ; Herrero et al., 2013). Concernant les espèces animales, le rôle prépondérant des ruminants (notamment les bovins) dans les émissions s'explique par leur importance dans le cheptel (90 % des UBT). Ensuite, les ruminants perdent entre 4 et 12 % environ de l'énergie brute (EB) ingérée sous forme de méthane, alors que par exemple, les chevaux perdent entre 2 et 3 % de l'EB (Sauvant, 1992). Globalement, le poids du méthane entérique dans les émissions totales peut s'expliquer par la population animale et les pratiques d'alimentation des animaux. En effet, l'élevage dans les systèmes ouest africains se caractérise par un taux faible d'exploitation du cheptel (Diop, 1992 ; Ba, 2011 ; Alary et al., 2019). En ce qui concerne l'alimentation, le régime des ruminants en Afrique subsaharienne est largement basé sur l'utilisation des fourrages naturels et des résidus de cultures (Boudet, 1975 ; Klein et al., 2014). Les résidus de cultures considérés ici sont les parties des plantes de céréales et de légumineuses non consommées par l'homme (FAO, 2014). Les ruminants sont capables de transformer ces types de fourrages en protéines (lait, viande) et en fumure organique grâce à leur tube digestif (Faverdin et al., 2018). Mais, ces ressources alimentaires très utilisées en Afrique sont peu digestibles (Gouro et Ly, 2012 ; Vall et al., 2015) et leurs valeurs

alimentaires faibles ; compte tenu de leur forte teneur en fibres insolubles (p. ex. : NDF, *Neutral Detergent Fiber*). En effet, à partir d'une comparaison indirecte des graminées avec une photosynthèse de type C4 et celles de type C3, Assoumaya et al. (2007) ont démontré que les graminées en C3 sont plus efficaces que les plantes en C4, en termes de digestibilité, d'ingestion et de teneur en matières azotées totales (MAT, g/kg MS). Dans la mesure où les graminées en C4 sont principalement localisées dans les zones tropicales (Crush et Rowarth, 2007), il est clair qu'une ration basée sur des fourrages tropicaux va favoriser une augmentation de la production de méthane par unité d'énergie ingérée (Johnson et Johnson, 1995 ; Gerber et al., 2014 ; Sauvart et al., 2018). A ce propos, Archimède et al. (2018) ont rapporté que les graminées en C4 sont plus riches en fibres (NDF, g/kg MS) que les celles en C3. De même, des travaux récents (Hammond et al., 2016 ; Eugène et al., 2019) ont observé une relation linéaire et positive entre la teneur en NDF et les quantités de méthane entérique.

4.2.2. Brûlage des savanes

Nos estimations montrent l'impact des quantités de GES émises à travers la combustion de la biomasse présente dans les parcours de savanes et de forêts. Des études antérieures ont souligné que les émissions de GES dans le continent africain sont affectées par les incendies de végétation (p. ex. Van Der Werf et al., 2003 ; Williams, et al., 2007 ; Lehsten et al., 2008). Ces feux peuvent être considérés comme un facteur négatif dans la mesure où ils participent à la charge atmosphérique en GES (Vieira et al., 2015) et menacent la sécurité des populations et de leurs biens (McLeman, 2010), sans oublier l'effet négatif sur la durabilité des ressources (Devineau et al., 2010). Toutefois, la question de l'incidence réelle des feux sur l'environnement est toujours débattue (Mbow et al., 2003). En effet, les conclusions admises dans les écosystèmes forestiers le sont beaucoup moins dans les savanes où les herbacées pérennes dominent (D'Aquino et al., 1995). Ensuite, le brûlage de la végétation des parcours tropicaux est une pratique ancienne qui permet d'aménager l'espace (Ghebrehiwot et al., 2011 ; Sow et al., 2013). D'autres auteurs (p.ex. : Sawadogo et al., 2008 ; Smit et al. 2010) préconisent le recours aux feux afin de réduire la densité des espèces ligneuses dans les savanes pour permettre à la strate herbacée de se développer. Donc, il peut être admis aussi que les feux favorisent également la durabilité des savanes (Sankaran et al., 2005). Pour une meilleure comptabilisation de la combustion de la biomasse dans le bilan GES, d'autres recherches devraient être menées afin de fournir des réponses généralisables. Ces dernières doivent intégrer des variables biophysiques à des échelles temporelles et géo-spatiales pour saisir les implications des feux sur la dynamique des végétations (Werner, 2012 ; Rossi et al., 2016).

4.2.3. Déjections directement déposées sur les parcours

Les déjections directement déposées sur les pâturages constituent le troisième poste d'émission le plus important du terroir de SYB. Dans les systèmes agropastoraux, la restitution directe des déjections et le système le plus courant. Dans ce système de dépôt direct des déjections sur le sol, les émissions de méthane sont mineures (en

aérobie) contrairement aux émissions d'oxyde nitreux qui peuvent être très importantes (White et al., 2001 ; Rufino et al., 2006 ; Selbie et al., 2015). Avec le pouvoir de réchauffement global très élevé de l'oxyde nitreux (PRG=298) et la forte densité animale dans le terroir, il est évident que la contribution des déjections directes sur les émissions totales soit importante. Toutefois, il est prématuré de tirer de conclusions définitives par rapport à la participation réel de ce poste (Herrero et al., 2011). En effet, des fortes variations des émissions peuvent être notées (GIEC, 2006) et la production de FE pour estimer les émissions directes d'oxyde nitreux, notamment pour la région d'Afrique subsaharienne reste très limitée (Pelster et al., 2016). A ce titre, le FE par défaut du GIEC (2006) a été utilisée. Cette situation repose la question l'incertitude dans les estimations de GES.

La restitution des déjections animales dans les systèmes agrosylvopastoraux n'est pas homogène. En effet, les animaux sont très mobiles dans l'espace et le temps (Giller et al. 2011 ; Turner et al., 2014 ; Aryal et al., 2018). Cette mobilité des animaux permet à ces derniers de jouer un rôle très important pour ces terroirs. En effet, la productivité agricole en Afrique de l'Ouest est limitée par des facteurs tels que la disponibilité des nutriments (notamment azote) dans le sol (Schlecht et al., 2006 ; Omotayo et al., 2009). Avec l'accès limité aux intrants minéraux pour les producteurs, la restauration de la fertilité des sols dans cette région d'Afrique de l'ouest est assurée principalement par les déjections animales directement restituées aux champs, au travers de la pratique de parcage nocturne en saison sèche sur des parcelles agricoles qui vont être cultivées la saison des pluies suivantes (Blanchart et al., 2014 ; Noufe et al., 2018 ; Avadi et al., 2020).

4.3. Variation des intensités d'émission

Le Tableau 5.5 présente les intensités d'émission (IE) de GES estimées à l'échelle du terroir et celles tirées de la littérature. De manière générale, les intensités d'émission (IE) estimées dans notre bilan GES sont en deçà des valeurs rapportées dans le cadre d'une étude de bilan GES d'un territoire au nord du Sénégal (Assouma et al., 2014 ; Assouma, 2016) et celles calculées pour la région d'Afrique subsaharienne (Gerber et al., 2014).

Les techniques de calcul, d'allocation des émissions aux différents produits agricoles (Cederberg et Stadig, 2003), l'origine des FE mobilisés, le type de système étudié (pastoral ou agropastoral) sont autant de facteurs qui peuvent expliquer les différences de résultats (Alemu et al., 2017). Aussi, les intensités d'émission sont également sensibles au potentiel de réchauffement global (PRG, *Global Warming Potential*) appliqué (Beauchemin et al., 2010). Dans notre étude, les valeurs de PRG pour les gaz N₂O (PRG=310) et CH₄ (PRG=34) proviennent de la cinquième évaluation du GIEC (2014), qui diffèrent par exemple de celles de Gerber et al. (2014), c.-à-d. 25 et 298 pour respectivement CH₄ et N₂O. Un autre élément d'explication des variations de résultats est la méthode d'allocation des émissions (Gac et al., 2010 ; Zhao et al., 2017). En effet, pour le cas spécifique du terroir de SYB, la répartition des impacts entre produits (lait, viande, grains etc.) n'est pas simple. Nous nous sommes rapportés à des travaux antérieurs (FAO, 2010) pour allouer les émissions car des études spécifiques sur la question de l'allocation pour des terroirs tels que SYB n'est pas encore rapporté dans la littérature. Donc, il est

probable que la démarche adoptée pour allouer les impacts influence les résultats. Aussi, pour estimer l'IE par hectare, nous avons considéré dans notre évaluation, la surface totale du terroir, excepté la partie abritant les habitations (5 ha). Cette démarche suit les lignes directrices recommandées par le GIEC (2006). Mais, en réalité, de grandes superficies peuvent être considérées sans qu'elles ne soient pas utilisées pour des activités de productions agricoles (Ross et al., 2017).

Tableau 5.5 : Comparaison d'intensités d'émissions obtenues avec la méthode 2 et celles rapportées dans la littérature pour la région d'Afrique subsaharienne

| Intensité d'émission | Cette étude | Assouma et al. 2014 | Gerber et al. 2014 |
|---|-------------|---------------------|--------------------|
| Emissions par hectare de surface (t Eq-CO ₂ /ha) | 2,0 | 0,7 | 0,8 |
| Emissions par habitant (t Eq-CO ₂ /habitant) | 2,6 | 10,2 | 3,8 |
| Emissions par kg de lait de vache (kg Eq-CO ₂ /kg FPCM) | 4,9 | 9,8 | 9,0 |
| Emissions par kg de poids vif bovins (kg Eq-CO ₂ /kg PV) | 18,5 | 39,6 | 71,0 |
| Emissions par kg de poids vif petits ruminants (kg Eq-CO ₂ /kg PV) | 12,0 | 15,8 | 36,0 |
| Emissions par kg de produit agricole (kg Eq-CO ₂ /kg grain) | 23,2 | - | - |

4.4. Emissions de GES et stockage de carbone

L'élevage, tel que pratiqué à SYB est de type extensif donc, associé à l'exploitation de parcours naturels (savanes et forêts) qui sont d'importantes sources de stockage de carbone au sol (FAO, 2013). Cependant, les écosystèmes africains, ainsi que leur vulnérabilité au CC continuent d'animer les débats internationaux relatifs au cycle du carbone. En effet, de nombreuses questions restent actuellement ouvertes. Par exemple, les données spécifiques permettant de caractériser les flux de carbone dans les savanes et les forêts africaines sont encore rares (Ciais et al., 2011 ;

Chiwara et al., 2018). Pour alimenter le débat sur la capacité des écosystèmes ouest africain à compenser leurs émissions de GES, nous avons appliquée une valeur moyenne de référence du stockage annuel de carbone. Nos résultats montrent que les émissions de GES dues aux activités peuvent être compensées par le carbone séquestré en moyenne dans l'écosystème. Toutefois, en hypothèse basse, le système pourrait se comporter comme une source d'émission. A ce niveau, une des questions qui mérite d'être abordée est l'effet des pratiques agricoles sur la dynamique du stock de carbone. Dans les régions africaines, l'incertitude liée à la connaissance de l'équilibre du carbone dans les écosystèmes est assez élevée (Ciais et al., 2011 ; Beirne et al., 2019 ; Chabi et al., 2019). Aussi, le débat sur cette question de séquestration de carbone n'est pas clos parce que les conclusions par rapport aux flux de carbone sont controversées. Par exemple, Ciais et al. (2009) rapportent que les systèmes terrestres africains se comportent comme un puits de carbone pour la période 1901-2002, alors que Williams et al. (2007) ont démontré un bilan GES neutre pour la même région.

En plus des pratiques, l'organisation du terroir peut impacter l'incertitude des estimations donc, le potentiel des écosystèmes à séquestrer le carbone. Par exemple, dans notre cas d'étude, les pâturages fournissent une bonne partie des ressources fourragères au cheptel, notamment en période d'hivernage (juin-octobre). En conséquence, le stock de carbone dans le système doit être inclus dans le bilan GES (Blanfort et al., 2009). Cependant, au regard de l'organisation spatiale des villages (Figure 5.6) et de l'état des recherches actuelles, il est difficile de conclure sur la capacité de ce type d'écosystème à séquestrer du carbone. En effet, l'estimation de la séquestration de carbone à l'échelle de l'écosystème requiert une meilleure appréhension des flux et puits de carbone. La mobilité des troupeaux transhumants (flèche rouge) et sédentaires (flèche marron) à l'intérieur et entre les terroirs villageois, les bois récoltés par les populations, les feuilles et les litières consommées par les animaux doivent être évaluées avec précision ; parce que la séquestration de carbone peut être rapidement perdue (Soussana et Lemaire, 2014). C'est ce genre d'approche qui permet de déterminer si l'écosystème est réellement une source ou un puits des émissions de GES (Otenyo, 2015).

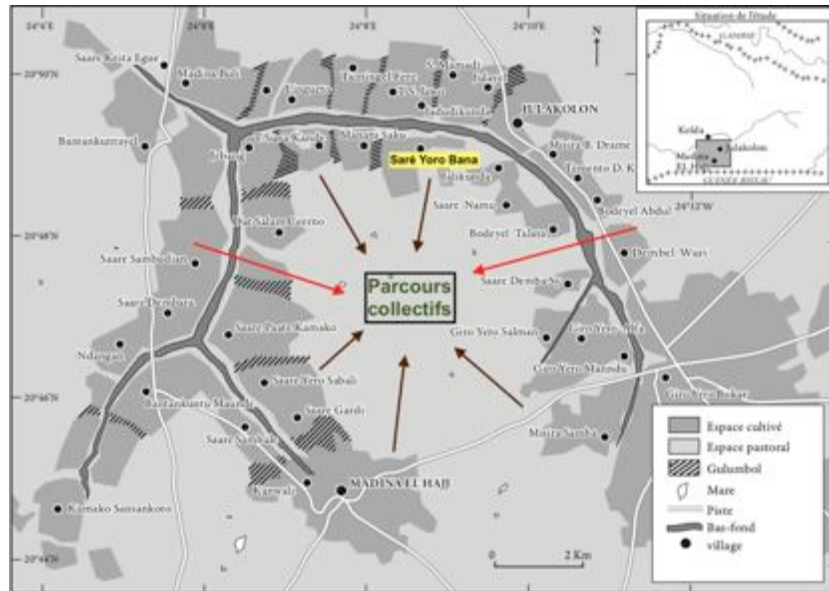


Figure 5.6 : Organisation de terroirs villageois autour des parcours communaux a kolda (adaptee de fanchette, 2011)

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre d'un terroir agrosylvopastoral afin d'identifier les actions permettant de réduire l'impact environnemental des activités de productions agricoles. Nos résultats montrent des intensités d'émission de GES plus faibles comparées aux estimations déjà faites pour l'Afrique subsaharienne. Aussi, les animaux, à travers la fermentation entérique et leurs déjections directement déposées au sol durant le pâturage le parcage de nuit, et les feux de savanes représentent les principaux contributeurs aux émissions totales de GES. Cependant, en comparaison aux valeurs par défaut, l'utilisation de facteurs d'émission spécifiques révèle une réduction de la contribution aux émissions totales du méthane entérique qui est la source-clés des émissions de GES des systèmes d'élevage ouest-africains. Afin d'améliorer la précision des estimations et appréhender la complexité des interactions entre les composantes des systèmes agrosylvopastoraux, des facteurs d'émission contextualisés doivent être produits. Aussi, les résultats de notre étude montrent que la prise en compte d'une valeur moyenne de stock carbone permet de compenser les émissions de GES. A ce propos, des recherches approfondies sur la capacité du système à compenser ses émissions par la séquestration de carbone sont indispensables.

CHAPITRE 6: Discussion générale et conclusion

Ce chapitre de discussion générale est centré autour des postes-clés d'émission de gaz à effet de serre du terroir de *Saré Yoro Bana* (SYB) mis en évidence dans le chapitre 5. Ensuite, des réponses aux questions de recherche exposées au début sont apportées. En fin, compte tenu de la spécificité du système de production du terroir de SYB, nous donnerons quelques pistes de recherches zootechniques qui permettent de repenser la contribution des systèmes agro-sylvo-pastoraux aux émissions de gaz à effet de serre.

1. Reconsidération des postes-clés aux émissions totales de gaz à effet de serre du terroir

1.1. La contribution des animaux à travers leur activité biologique

Actuellement, les modèles de prédiction des quantités de méthane entérique émises sont susceptibles d'être améliorés si la digestibilité des fourrages, les quantités réellement ingérées par les animaux et la disponibilité des ressources (saisonnalité) sont considérées (Benaouda et al., 2019). À titre d'exemple, une étude récente a évalué, avec le modèle GLEAM (*Global Livestock Environmental Assessment Model*), la capacité potentielle de quelques pays d'Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Mali, Niger, Sénégal) à augmenter leur productivité laitière tout en atténuant les émissions de méthane entérique (FAO et NZAGRC, 2019). Pour le Sénégal, cette étude rapporte une intensité d'émission moyenne de plus de 30 kg Eq-CO₂/kg FPCM pour les bovins, c'est-à-dire 83 % plus importante que notre valeur (4,9 kg Eq-CO₂/kg FPCM). En fait, le modèle GLEAM développé par la FAO est basé sur des données SIG et fonctionne à partir de modules tels que le troupeau, l'alimentation et le système (cf. <http://www.fao.org/gleam/en/>). Les besoins énergétiques de chaque catégorie animale sont calculés à partir des connaissances de la composition nutritionnelle des rations, puis, les facteurs d'émissions (FEs) pour chaque catégorie. Par rapport à la ration, l'hypothèse dans le modèle GLEAM est que les animaux reçoivent l'alimentation à volonté. Dans notre contexte, la rareté des ressources fourragères en saison sèche induit une baisse des quantités ingérées (kg MS/UBT) par les bovins. Cette situation a comme conséquence une sous-nutrition des animaux (Ezanno, 2002 ; Chirat et al., 2014). Ce déficit de couverture des besoins alimentaires se traduit par une baisse de performance pondérale chez les animaux (Fall et al. 1982 ; Seré et al., 1996 ; Ezanno et al., 2005). Au regard des relations positives entre les quantités ingérées et les émissions de méthane entérique (Beauchemin et al., 2006 ; Ku-Vera et al., 2018 ; Dall-Orsoletta et al., 2019), il est certain que les FEs de méthane entérique sont surestimés si les périodes de sous-alimentation ne sont pas comptabilisées. Pour surmonter cet obstacle, nos prédictions de FEs de méthane entérique (Chapitres 3 & 4) se sont basées sur une prise en compte de la saisonnalité et des performances d'élevages observées dans la zone d'étude.

1.2. Influence de certains paramètres dans l'estimation des émissions de GES

Le calcul des émissions GES à l'échelle du terroir est associé à une incertitude. Cette dernière est liée au fait que les données d'activité (DA) et les facteurs d'émission (FE) utilisés pour faire les estimations peuvent varier au cours du temps (Tubiello et al., 2015). La variabilité des DA et des FE mobilisés est une source d'incertitude qu'il faudra mieux décrire pour obtenir des estimations de GES plus représentatifs de la réalité du terrain d'étude.

Dans l'objectif d'affiner les estimations de GES faites au chapitre précédent, nous avons cherché à identifier les paramètres (DA et FE) qui ont une forte influence sur

les émissions de GES du terroir. Pour cela, nous avons appliqué deux techniques d'analyses.

Les deux méthodes sont basées sur la régression linéaire et permettent d'obtenir des coefficients de corrélation partielle sur les rangs (PRCC) et de régression standard sur les rangs (SRRC). Saporta (2000) et Saltelli et al. (2006) donnent plus de détails sur les préalables à respecter et la procédure d'obtention des coefficients.

Les résultats de l'analyse de l'influence individuelle des paramètres (DA et FE) mobilisés pour la réalisation des estimations d'émissions de GES sont présentés dans la Figure 6.1. Cette dernière révèle que le facteur d'émission utilisés pour estimer les émissions de N₂O liées aux déjections animales déposées sur les parcours (EF3), la proportion d'azote (N) contenue dans les déjections déposées sur le sol (FON) et l'effectif du cheptel (Herd) ont les effets les plus importants sur la comptabilisation des émissions totales de GES.

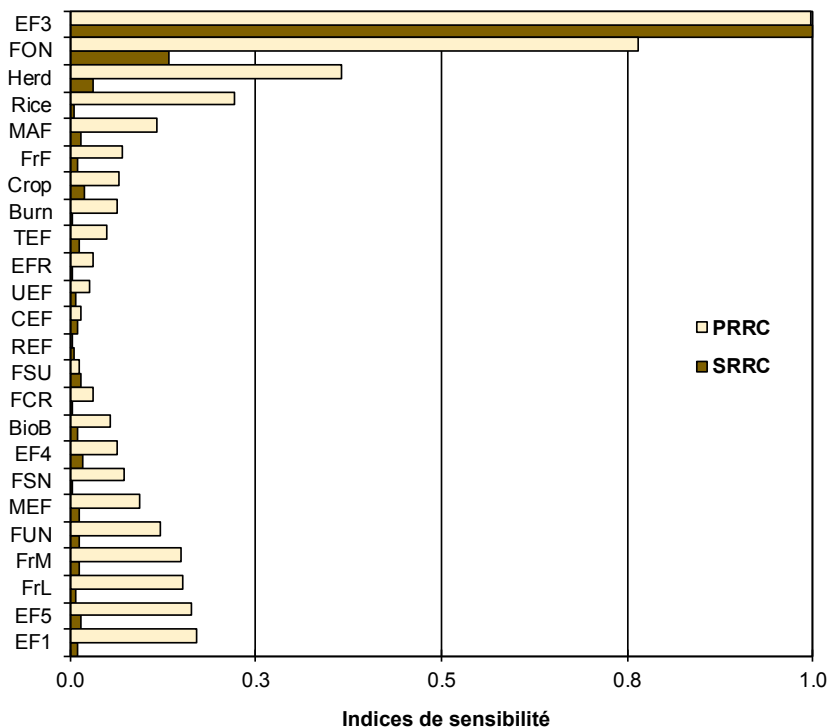


Figure 6. 1 : Indices de sensibilité des données activités et des facteurs d'émission utilisés dans le bilan gaz à effet de serre du terroir de Saré Yoro Bana. Les indices sont obtenus après la génération de 100 000 valeurs de chaque paramètre d'entrée

En fonction de la méthode utilisée (c.-à-d. PRCC ou SRRC), nous remarquons que la hiérarchisation de l'importance des paramètres varie. Ces différences ont été expliquées par Iman et Helton (2006). D'après ces derniers auteurs, les valeurs de coefficients peuvent être différentes, mais donnent en général le même classement en termes de sensibilité pour les paramètres les plus influents. Des travaux de

recherches menés dans d'autres régions ont déjà illustré l'importance de EF3 dans les émissions de GES (p.ex. : Basset-Mens et al., 2006 ; Winiwarter et Muik, 2010 ; Milne et al., 2014).

Actuellement, les travaux liés aux émissions de N₂O (p.ex. : la volatilisation, le lessivage/ruissellement, fraction d'azote excrétée) restent très limités dans les pays en développement, notamment en Afrique (Leip, 2010). En l'absence de données spécifiques fiables, la valeur de EF3 utilisé dans notre évaluation GES est celle recommandée par le GIEC (2006). Ce coefficient par défaut (EF3) est produit sur une évaluation des émissions de N₂O liées aux déjections animales de différentes espèces bovines. Ces animaux sont élevés majoritairement dans les pays développés (de Klein et al., 2003). Ensuite, les variations du coefficient EF3 peuvent être induites par des facteurs tels que la période du dépôt des déjections (p. ex. l'automne ou l'été), les conditions météorologiques (p. ex. humides ou sèches) et le type de sol (Oenema et al., 1997).

L'autre enseignement est que les recherches futures devraient également produire plus de références sur l'azote (N) contenue dans les déjections animales directement déposées sur les parcours (FON). Pour cette étude, les données utilisées pour estimer la proportion d'N dans les déjections animales proviennent de recherches faites dans la zone d'étude, Kolda. Ces travaux (p. ex. Ickowicz et Mbaye, 2001 ; Manlay, 2000 ; Chirat, 2009) soulignent que la quantité de N excrétée dépend de la nature du régime alimentaire. En outre, la disponibilité des fourrages en qualité et en quantité varie considérablement au cours des saisons (Chirat et al., 2014). Donc, nous supposons que les déjections produites par les animaux, ainsi que la teneur en N des excréments varient. Cette hypothèse est appuyée par des recherches récentes menées dans la zone sylvopastorale du Sénégal où Assouma et al. (2016) ont démontré que la valeur du bilan GES, à l'échelle des unités paysagères, dépend des quantités de déjections animales déposées au sol.

L'effectif animal est aussi un paramètre dont la variation influence les émissions de GES. Généralement, l'information sur les effectifs du cheptel est tirée des suivis d'élevage. Pour diverses raisons (p.ex. : facteurs culturels), les éleveurs en Afrique ne communiquent pas complètement l'information requise par rapport au cheptel (Lhoste, 2001, Awa et al., 2004). Cette réticence occasionne de fortes incertitudes qu'il faudra réduire pour obtenir une évaluation des émissions de GES qui reflètent les pratiques de production agricole.

Dans ce contexte d'augmentation des émissions de GES, des auteurs signalent que les émissions de méthane entérique pourraient être diminuées en réduisant la taille du troupeau (Boadi et al., 2004 ; Mottet et al., 2017 ; Sejian et al., 2018). Toutefois, pour être adoptée, cette stratégie nécessite l'approbation de l'éleveur. Par exemple, dans les communautés pastorales (p. ex. : Peulh), la taille du troupeau revêt un caractère important au plan sociologique (De La Rocque et al., 1999). En effet, plusieurs membres de la famille peuvent contribuer à l'établissement du troupeau (Corniaux et al., 2006). Par conséquent, réduire l'effectif du cheptel ne peut être faite de façon unilatérale. Aussi, des études antérieures (p.ex. : D'Aquino et al., 1995) avaient identifié les déjections animales comme une ressource pouvant restaurer la dégradation physique et organique des sols de la zone humide et subhumide d'Afrique. Au regard de ce qui précède, l'augmentation (ou maintien) de l'effectif animal paraît plus cohérente dans les systèmes de productions agricoles à bas

intrants ; en ce sens qu'elle favorise plus d'apport de matière organique au sol (Ganry et Thuriès, 2017). De même, l'importance de la taille du troupeau est une stratégie qui permet de faire face aux pertes qui surviennent durant les périodes d'épizootie ou de sécheresse (Thébaud, 2002 ; Lesnoff et al., 2012) ; mais aussi d'avoir un accès plus facile aux crédits (Faye, 2001 ; Richard et al., 2019).

Pour une évaluation des émissions de GES plus précise, les variations spécifiques des paramètres d'entrée tels que ceux liés aux déjections animales déposées sur les parcours, la proportion d'azote (N) contenue dans ces déjections et l'effectif des animaux devraient être mieux appréhendées et prises en compte dans les estimations. Cette approche a été déjà recommandée par Freibauer (2003) et Leip (2010) pour d'autres régions.

1.3. Rôle du stockage de carbone dans la compensation des émissions de gaz à effet de serre

Des études précédentes au Sénégal ont montré la variation de la dynamique du carbone dans les écosystèmes (Woomer et al., 2004 ; Marone et al., 2017 ; Assouma et al., 2020). Effectivement, dans la zone du Bassin arachidier, Touré et al. (2013) rapportent des valeurs de stocks de carbone de 8 t C/ha (sol sableux) et 13 t C/ha (sol sablo-limoneux) dans l'horizon 0-20 cm. D'après les mêmes auteurs, le carbone stocké dans la couche 0-100 cm atteint 20 t C/ha et 40 t C/ha sur les sols sableux et sablo-limoneux, respectivement. Dans notre terroir d'étude, Kaïré (1999) montre que les jachères de plus de 20 ans peuvent stocker environ 20 t C/ha. Pourtant, par rapport à la dynamique du carbone, des pertes de 37 % (sur 100 ans) du stock moyen ont été rapportées avec l'utilisation du modèle CENTURY (cf. Parton et al. 2004 ; Woomer et al. 2004).

Ailleurs dans le monde, certains travaux ont montré des voies d'atténuation des émissions de GES par le stockage et la séquestration de carbone (p.ex. : Bationo et al., 2007 ; Corbeels et al., 2019). Selon Soussana et al. (2010), le stockage du carbone peut compenser 50 % des émissions provenant du sol (N_2O) et de l'activité biologique des animaux (CH_4). Peters et al. (2012) concluent que 89 % de l'atténuation potentielle du changement climatique (CC) de l'agriculture peut provenir de la séquestration du carbone. Les travaux de Balesdent et Arrouays (1999) montrent qu'une augmentation annuelle de 0,4 % du stock de carbone dans l'horizon 0-40 cm de tous les sols de la planète, a comme effet positif une compensation des émissions de GES d'origines anthropiques. De ces travaux de Balesdent et Arrouays (1999) est née l'initiative 4 pour 1000 (<https://www.4p1000.org>) qui est maintenant un programme international. Cette initiative est en phase avec d'autres programmes tels que REDD+ (www.un-redd.org), qui a l'ambition de réduire les émissions issues de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les pays en développement. Cependant, dans l'état actuel des connaissances, les conclusions de cette initiative sont empreintes d'un niveau d'incertitude élevé (Torquebiau, 2017). L'agroforesterie telle que décrite dans Nair (1993) et Bussoni et al. (2019) peut aussi contribuer au stockage et à la séquestration du carbone (Stavi et Lal, 2013). Dans les pays en développement, l'agroforesterie rend des services aux petites exploitations familiales (Marone et al., 2017) et ouvre des opportunités sur les crédits carbone (Feliciano et al., 2018).

2. Actions potentielles d'atténuation des émissions de GES

2.1. Amélioration de la ration alimentaire des animaux

Durant cette dernière décennie, les travaux scientifiques ont permis de mieux comprendre les effets du changement climatique sur les systèmes de productions agricoles. Pour l'élevage, il est reconnu que les bovins sont plus méthanogènes que les autres animaux (asins, équins etc) en raison de l'activité microbienne dans leur rumen (Sauvant, 1992 ; Steinfeld et al., 2006) et les stratégies de diminution des émissions de méthane entérique sont connues. Aussi, le potentiel d'atténuation des émissions est davantage prometteur dans les localités où la productivité animale est faible (Gerber et al., 2014).

Certaines interventions relatives au rationnement des animaux sont prometteuses. Une des stratégies appropriées pour les élevages de ruminants est d'accroître la productivité par l'amélioration de la qualité nutritive de la ration (de Klein et al., 2014). Dans cette perspective, l'introduction de légumineuses fourragères (p.ex. : niébé, arachide) comme complément aux fourrages pauvres améliore la qualité de la ration donc, de la digestion (Archimède et al., 2018b). En effet, avec l'utilisation de légumineuses, la digestibilité de la matière organique (OMd) varie de 66 à 73 % (Prasad et al., 2010). Aussi, la constitution de réserves fourragères est un autre levier d'action intéressant. Par exemple, au Burkina Faso, , cette innovation a permis aux agroéleveurs d'améliorer les performances zootechniques (lait et viandes) de leurs troupeaux, notamment en saison sèche (Delma et al., 2016 ; Sib et al., 2018).

Le traitement des pailles à l'urée a été identifié comme l'intervention ayant un fort potentiel de réduction du méthane par unité de produits (lait ou viande). D'après une étude de la FAO (2019) en Afrique de l'Ouest, cette technologie a la capacité de réduire de 20 % l'intensité d'émission tout en augmentant la production laitière de 43 %. Toujours, selon cette même étude de la FAO, l'amélioration génétique des races bovines accompagnée d'une couverture sanitaire permettent une diminution de 25 % des émissions et une augmentation de 30 % de la production de lait. Ainsi, l'amélioration de la digestibilité des rations est une stratégie qui permet de réduire les émissions de méthane entérique des animaux, mais aussi d'avoir une meilleure efficacité environnementale (diminution de l'intensité des émissions par kg de lait ou de viande).

Dans cette perspective de réduire les émissions de méthane provenant de l'activité biologique des ruminants, l'utilisation de fourrages riches en tanin a été rapportée (Jayanegara et al., 2012 ; Goel et al., 2012 ; Aboagye et al., 2019). Les tanins sont largement présents dans les fourrages (graminées, arbustes et légumineuses) des régions chaudes (Johnson, 1984). Avec la consommation de fourrages riches en tanins, des réductions d'environ 40 % des émissions de méthane sont rapportées (Jayanegara et al., 2012 ; Archimède et al., 2016). Toutefois, au regard de la diversité des types de tannins et des risques d'intoxication (Maxin et al., 2018), il faudra des recherches complémentaires pour consolider l'effet de la teneur en tanins du régime sur les quantités de méthane émises par les ruminants (Sauvant et al., 2018).

De même, sur la base d'une méta-analyse, certains auteurs (p.ex. : Grainger et Beauchemin, 2011 ; Patra, 2013) ont étudié l'impact de la teneur en lipide (extrait étheré, EE) d'un régime sur la production de méthane. Les conclusions de ces derniers travaux montrent qu'un potentiel de réduction du méthane existe avec l'incorporation de lipides dans la ration, notamment ceux contenant des acides gras insaturés (Doreau et al., 2011). Cependant, pour éviter l'effet négatif des lipides sur la digestion, il faudra veiller à ce que dans la ration, la teneur en extrait étheré n'excède 60 g/kg MS (Sauvant et al., 2018).

2.2. Optimiser la gestion des déjections animales

Dans la zone d'étude (région de Kolda), la stabulation laitière s'est progressivement développée avec l'avènement des projets et programmes d'intensification des productions animales (Fall, 1987 ; Dieye, 2003 ; Corniaux et al., 2005 ; Seck et al., 2016 ; Ferrari et al., 2017). Ces études ont permis aux structures de développement local de travailler sur l'intégration d'étables fumières dans les exploitations agricoles et de vulgariser des modèles d'intensification (p. ex. : stabulation bovine) des systèmes de productions animales de la région (Fall et Faye, 1989 ; Fall et Faye, 1991 ; Faye et Fall, 1991). Ces diverses techniques ont révélé un potentiel d'amélioration des performances de productions animales (lait, GMQ, fumier) et végétales (grain, pailles). De même, ces travaux menés en milieu paysan ont permis d'acquérir des références sur les systèmes de production agricole (Sonko, 1986 ; Lhoste et Richard, 1993). Toutefois, les informations jusque-là collectées se sont davantage concentrées sur l'évaluation des performances technico-économiques (Fall et Faye, 1989) ou les possibilités d'amélioration des techniques de fabrication de fumier et des transferts de fertilité dans les terroirs villageois (Lhoste et Richard, 1993 ; Manlay et Ickowicz, 2000). Au-delà de l'amélioration des performances zootechniques des animaux (lait, viande), notamment en saison sèche, la stabulation permet de disposer d'une quantité importante de fumier pouvant servir à la restauration et au maintien de la fertilité des terres cultivables (Fall et Faye, 1992 ; Lhoste et Richard, 1993 ; Ly et al., 1997).

Les expériences antérieures sur les fumiers d'étable étaient surtout axées sur l'analyse des pratiques de gestion (Fall et Faye, 1989) et l'évaluation de leurs effets sur les rendements des cultures. Les problématiques d'efficacité environnementale ont rarement été abordées. A cet effet, nous avons adressé la question des pratiques de gestion des déjections animales sur les parcours naturels et au niveau des étables à travers des entretiens menés dans la zone (cf. annexe). Les conclusions de cette étude mettent en évidence une diversité de pratiques de gestion des déjections, donc des voies d'amélioration de l'efficacité du système. Pour ce faire, les déjections provenant des étables doivent être mieux conservées avant leur épandage dans les champs. Cette pratique permettra de (i) faire des économies d'échelle sur l'achat d'engrais minéral moins accessible pour ces populations, et (ii) d'avoir de la matière organique de meilleure qualité que la poudrette de parc.

Des travaux plus récents dans la zone ont abordé les méthodes à mettre en œuvre pour produire un fumier de qualité et en quantité suffisante. Toutefois, ces études n'ont été menées qu'à l'échelle infra (c.-à-d. animal, parcelle de culture). Puisque les pratiques paysannes divergent d'un village à un autre et à l'intérieur des terroirs

(Lhoste et Richard, 1993), il est important de décrire les systèmes de gestion des fumiers en prenant en compte la diversité des exploitations agricoles de la zone ; ceci afin d'accompagner les transformations et d'apporter une meilleure connaissance des mécanismes en jeu pour promouvoir les pratiques agricoles les plus efficaces.

3. Conclusions et perspectives

Pour améliorer les connaissances sur les émissions de GES des systèmes d'élevage d'Afrique de l'Ouest, nous nous étions fixé des objectifs. En effet, il était question à travers cette thèse d'(e) :

- **Produire des facteurs d'émission (FE) des postes-clés d'émission en intégrant les particularités des systèmes de production ouest-africains.** Dans les pays en développement comme le Sénégal, l'amélioration des estimations d'émission permet de mieux identifier les réponses climatiques compatibles avec leurs objectifs de développement rural et de sécurité alimentaire, incluant la préservation des ressources naturelles ainsi que l'accroissement de la résilience des systèmes de production.
- **Evaluer les émissions de GES d'un ensemble territorial de type terroir villageois.** Les facteurs d'émission utilisés sont ceux produits durant cette thèse. Une attention particulière est portée à la contribution de l'activité d'élevage aux émissions de GES, et à sa variabilité spatio-temporelle.

3.1. Réponses aux questions de recherche

Globalement, les objectifs de départ ont été atteints et les sous-questions (SQ) ont été abordées. En effet, des facteurs d'émission (FEs) de méthane entérique ont été développés pour les bovins Ndama (chapitre 3) et les petits ruminants (chapitre 4) élevés dans la zone soudanienne du Sénégal. Ces FE sont originaux car ils tiennent compte des performances d'élevage réellement observées dans la zone et considèrent le caractère saisonnier du système d'élevage. Ensuite, une estimation des émissions de GES induites par les activités agricoles a été proposée, selon deux approches (chapitre 5).

Avant de calculer les FEs de méthane entérique avec le modèle Tier 2 du GIEC, nous avons examiné les paramètres d'entrée qui peuvent influencer sur la précision de l'estimation, à travers une analyse d'incertitude et de sensibilité (chapitre 2). Les résultats de cette étude nous ont indiqué que la digestibilité de l'énergie ingérée (DE), le facteur de conversion du méthane (Y_m) et le coefficient pour calculer l'énergie d'entretien (C_{fi}) sont les paramètres qui doivent être mieux appréciés pour diminuer les incertitudes associées à la prédiction de méthane entérique (réponse SQ1). C'est pourquoi dans l'estimation des FEs de méthane entérique pour les bovins (chapitre 3), nous avons dans un premier temps, inventorié les principaux fourrages consommés par les troupeaux bovins de la zone. Puis, sur la base des valeurs de digestibilité de la matière organique de ces fourrages (OMd), nous avons pu obtenir des valeurs spécifiques de digestibilité de l'énergie et de facteur de conversion de méthane selon les saisons (réponse SQ2).

Des estimations de GES déjà réalisées pour les systèmes de productions en Afrique indiquent une contribution très importante du méthane entérique et des déjections

animales. Cependant, les coefficients utilisés pour faire ces calculs sont assortis d'une incertitude de ± 50 %. Avec des estimations de GES basées sur des FEs contextualisés et réalistes, nous avons montré (chapitre 5) que le niveau des émissions totales de GES et que la part des ruminants dans ces émissions totales étaient surestimées (réponse SQ3) par rapport à des évaluations reposant sur l'utilisation de la méthode Tier 1.

3.2. Perspectives

- Améliorer la productivité des élevages dans les systèmes extensifs d'Afrique de l'Ouest est une piste intéressante pour répondre à différents enjeux du développement durable, notamment en termes d'adaptation au changement climatique et de son atténuation. Pour améliorer l'ingestion, nous recommandons l'incorporation dans la ration des vaches en stabulation de sous-produits agro-industriels (p.ex. : graine de coton, sons de céréales locales). Ensuite, les déjections provenant de ces étables doivent être utilisées pour produire de l'énergie (biogaz). Enfin, la matière organique collectée des bio-digesteurs doit être conservée pour les cultures. Cependant, des stratégies doivent être mises en place pour parer à l'indisponibilité des sous-produits. Par exemple, dans notre région d'étude, les statistiques provenant de la Direction régionale du développement rural montrent une chute importante de la production du coton depuis les années 2000. Cette tendance qui semble se poursuivre a occasionné une rareté de la graine de coton largement utilisée par les producteurs des bassins laitiers ;
- Développer des outils d'aide à la décision qui permettent de scénariser la rentabilité économique des innovations proposées et l'impact des activités de productions sur la durabilité du système (stockage de carbone, recyclage des nutriments, baisse de la fertilité des sols, pollution des nappes, etc.).
- Les connaissances des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités agricoles et les moyens d'en atténuer les impacts sont en constante progression, notamment dans les pays en développement. Actuellement, il s'agira d'élargir les technologies d'estimation de ces impacts dans les pays en développement. Cette démarche est une condition indispensable pour aller vers une meilleure identification des options d'intensification.
- La trop faible disponibilité des données agricoles dans les pays en développement est un obstacle à surmonter. Des opportunités de financement existent et permettent de prendre en charge ces questions. Les structures en charge de la question climatique dans les pays en développement doivent, en collaboration avec les institutions de recherche, mettre en place des dispositifs de mesures, de collecte et d'analyse de données, de manière continue.
- Il est reconnu que les technologies permettant d'obtenir des mesures directes telles que le *GreenFeed* ou les chambres sont assez coûteuses pour les pays en développement et leur installation nécessite une certaine expertise. En attendant, l'adaptation de certaines méthodes d'estimations indirectes (formules, équations)

constitue une piste intéressante pour améliorer les inventaires. Cependant, leur application doit faire l'objet de vérifications.

Références bibliographiques

- Aboagye, I. A., Oba, M., Castillo, A. R., Koenig, K. M., Iwaasa, A. D., & Beauchemin, K. A. (2018). Effects of hydrolyzable tannin with or without condensed tannin on methane emissions, nitrogen use, and performance of beef cattle fed a high-forage diet. *Journal of animal science*, 96(12), 5276-5286.
- Åby, B. A., Kantanen, J., Aass, L., & Meuwissen, T. (2014). Current status of livestock production in the Nordic countries and future challenges with a changing climate and human population growth. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A—Animal Science*, 64(2), 73-97.
- Adebowale, E. A. 1988. Performance of young west African Dwarf goats and sheep fed the aquatic macrophyte *Echinochloa stagnina*. *Small Ruminant Research*, 1(2), 167-173.
- ADEME, M., ACTA, A., Arvalis, A. P. C. A., Civam, C., & Cuma, I. F. I. P. IFV, Institut de l'Élevage, ITAVI, INRA, Solagro. 2011. Guide de la méthode complet Dia'terre®. Version, 1.
- Adewumi, O. O., and Olorunnisomo, A. O. 2009. Milk yield and milk composition of West African dwarf, Yankasa and crossbred sheep in southwest of Nigeria. *Livestock Research for Rural Development*, 21(3), 1-8.
- Adger, W. N., Agrawala, S., Mirza, M. M. Q., Conde, C., o'Brien, K., Pulhin, J., ... & Takahashi, K. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. *Climate change*, 717-743.
- Aggarwal, P. K., Zougmore, R. B., & Kinyangi, J. (2013). Climate-smart villages: A community approach to sustainable agricultural development.
- Ago, E. E., Agbossou, E. K., Ozer, P., & Aubinet, M. (2016). Mesure des flux de CO₂ et séquestration de carbone dans les écosystèmes terrestres ouest-africains (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 1(20), 1-15.
- Alary, V., Duteurtre, G., & Faye, B. (2011). Élevages et sociétés: les rôles multiples de l'élevage dans les pays tropicaux. *Productions animales*, 24(1), 145.
- Alary, V., Dutilly, C., & Wane, A. (2019). Contributions socio-économiques de l'élevage des herbivores.
- Alassane, B. A. (2011). *Exploitation du cheptel bovin dans la zone cotonnière au Mali-Sud* (Doctoral dissertation, Thèse, École Doctorale Sibighe, Cirad, France).
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Rome: FAO: ESA Working paper (No. 12-03, p. 4).
- Aliyu, G., Luo, J., Di, H. J., Lindsey, S., Liu, D., Yuan, J., ... & Ding, W. (2019). Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates. *Science of The Total Environment*, 669, 547-558.

- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 869-890.
- Alves, T. P., Dall-Orsoletta, A. C., and Ribeiro-Filho, H. M. N. 2017. The effects of supplementing *Acacia mearnsii* tannin extract on dairy cow dry matter intake, milk production, and methane emission in a tropical pasture. *Tropical animal health and production*, 49(8), 1663-1668.
- Amole T.A., Ayantunde A. A. (2016). Climate-smart livestock interventions in West Africa: A review. CCAFS Working Paper no. 178. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Amon, B., Amon, T., Boxberger, J., & Alt, C. (2001). Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 60 (1-3), 103-113.
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006). Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, ecosystems & environment*, 112(2-3), 153-162.
- Amuzu, J., Jallow, B. P., Kabo-Bah, A. T., & Yaffa, S. (2018). The Climate Change Vulnerability and Risk Management Matrix for the Coastal Zone of The Gambia. *Hydrology*, 5(1), 14.
- Andrieu, N., Pédelahore, P., Howland, F., Descheemaeker, K., Vall, É., Bonilla-Findji, O., ... & Chia, E. (2016). Climate-smart farms? Case studies in Burkina Faso and Colombia. In *Climate Change and Agriculture Worldwide* (pp. 143-154). Springer, Dordrecht.
- ANSD. (2016). Situation économique et sociale du Sénégal en 2013. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, Statistique sur l'Agriculture et l'Élevage. Dakar : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographique.
- ANSD. (2018). Rapport projection de la population du Sénégal en 2018. Division du recensement et des statistiques démographiques. Direction des statistiques démographiques et sociales. Accessed August 10, 2019: http://www.ansd.sn/ressources/publications/Rapport_population_060219%20002%20RECSn%20.pdf.
- Antle, J. M., Homann-KeeTui, S., Descheemaeker, K., Masikati, P., & Valdivia, R. O. (2018). Using AgMIP Regional Integrated Assessment Methods to Evaluate Vulnerability, Resilience and Adaptive Capacity for Climate Smart Agricultural Systems. In *Climate Smart Agriculture* (pp. 307-333). Springer, Cham.
- Arbre, M., Rochette, Y., Guyader, J., Lascoux, C., Gómez, L. M., Eugène, M., ... & Martin, C. (2016). Repeatability of enteric methane determinations from cattle using either the SF₆ tracer technique or the GreenFeed system. *Animal Production Science*, 56(3), 238-243.
- Archimede, H., Bastianelli, D., Fanchone, A., Gourdine, J. L., & Fahrasmane, L. (2018a). Aliments protéiques dans les systèmes mixtes intégrés polyculture-élevage en régions tropicales. *INRA Productions Animales*, 31(3), 221-236.

- Archimède, H., Eugène, M., Magdeleine, C. M., Boval, M., Martin, C., Morgavi, D. P., ... & Doreau, M. (2011). Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 59-64.
- Archimède, H., Marie-Magdeleine, C., Boval, R., Sauvant, D. 2018b. Spécificités de l'alimentation des ruminants en régions chaudes. In INRA 2018. Alimentation des ruminants, Apports nutritionnels-Besoins et réponses des animaux, Rationnement-Tables des valeurs des aliments, Éditions Quæ, Versailles, France, Chapitre 22, p. 443-472.
- Archimède, H., Rira, M., Barde, D. J., Labirin, F., Marie-Magdeleine, C., Calif, B., ... & Doreau, M. (2016). Potential of tannin-rich plants, *Leucaena leucocephala*, *Glyricidia sepium* and *Manihot esculenta*, to reduce enteric methane emissions in sheep. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 100(6), 1149-1158.
- Arslan, A., McCarthy, N., Lipper, L., Asfaw, S., Cattaneo, A., & Kokwe, M. (2015). Climate smart agriculture? Assessing the adaptation implications in Zambia. *Journal of Agricultural Economics*, 66(3), 753-780.
- Aryal, J. P., Singh, R., Gehlawat, S. K., Agarwal, T., & Jat, M. L. (2016). Framework, guidelines and governance for designing local adaptation plan of action to mainstream climate smart villages in India.
- Aryal, S., Maraseni, T., Cockfield, G., & de Bruyn, L. L. (2018). Transhumance, livestock mobility and mutual benefits between crop and livestock production. In *Sustainable Agriculture Reviews 31* (pp. 25-39). Springer, Cham.
- Assouma, M. H. (2016). Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : contribution de l'élevage. Thèse de doctorat, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Montpellier.
- Assouma, M. H., Lecomte, P., Hiernaux, P., Ickowicz, A., Corniaux, C., Decruyenaere, V., ... and Vayssières, J. 2018. How to better account for livestock diversity and fodder seasonality in assessing the fodder intake of livestock grazing semi-arid sub-Saharan Africa rangelands. *Livestock Science*. 216: 16-23.
- Assouma, M. H., Vayssières, J., Bernoux, M., Hiernaux, P., & Lecomte, P. (2014). Bilans Gaz à Effet de Serre d'un écosystème sylvo-pastoral tropical dans la zone semi-aride du Sénégal. French symposium Rencontres Recherches Ruminants, (pp. 35-38). Paris, France.
- Assoumaya, C., Sauvant, D., et Archimède, H. (2007). Etude comparative de l'ingestion et de la digestion des fourrages tropicaux et tempérés. *INRA Productions Animales*, 20(5), 383-392.
- Aubert, C., Dollé, J-B, Guingand, N. (2010). Synthèse 4. Bonnes pratiques environnementales en productions avicole, bovine et porcine : les choix techniques. In *Elevages et environnement*, Editions Quæ. 187-248.
- Audouin, E., Vayssières, J., Odru, M., Masse, D., Dorégo, G. S., Delaunay, V., & Lecomte, P. (2015). Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest. *Les sociétés rurales face aux changements environnementaux en Afrique de l'Ouest*. IRD, Marseille, France, 403-427.
- Awa, D. N., Njoya, A., Logtene, Y. M., Ndomadji, J. A., Onana, J., Awa, A. A., ... & Delafosse, A. (2004). Contraintes, opportunités et évolution des systèmes d'élevage

en zone semi-aride des savanes d'Afrique centrale. *Cahiers Agricultures*, 13(4), 331-340.

- Ayantunde AA 1998. Influence of grazing regimes on cattle nutrition and performance and vegetation dynamics in Sahelian rangelands. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands.
- Ayantunde AA, Asse R, Said MY and Fall A 2014. Transhumant pastoralism, sustainable management of natural resources and endemic ruminant livestock in the sub-humid zone of West Africa. *Environment, development and sustainability* 16, 1097-1117.
- Ayantunde, A. A., Duncan, A. J., van Wijk, M. T., & Thorne, P. (2018). Role of herbivores in sustainable agriculture in Sub-Saharan Africa. *animal*, 12(s2), s199-s209.
- Badiane, A. N., Khouma, M., & Sène, M. (2000). Gestion et transformation de la matière organique. Synthèse des travaux menés au Sénégal depuis 1945. Dakar : Edition ISRA.
- Baile CA and Forbes JM 1974. Control of feed intake and regulation of energy balance in ruminants. *Physiological Reviews* 54, 160-214.
- Balesdent, J., & Arrouays, D. (1999). An estimate of the net annual carbon storage in French soils induced by land use change from 1900 to 1999. *CR Acad Agri*, 85, 265-277.
- Ballantyne, P. (2017). Obtenir de multiples avantages en ayant recours aux solutions basées sur l'élevage : Compte rendu de la 7ème réunion du Partenariat multipartite du Programme mondial pour un élevage durable, Addis-Abeba, 8-12 mai 2017.
- Banque Mondiale. 2015. « A Measured Approach to Ending Poverty and Boosting Shared Prosperity: Concept, Data, and the Twin Goals ». Policy Research Report. DOI: 10.1596/978-1-4648-0361-1. Washington, DC (USA). <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20384>.
- Barbosa, A. L., Voltolini, T. V., Menezes, D. R., de Moraes, S. A., Nascimento, J. C. S., and de Souza Rodrigues, R. T. 2018. Intake, digestibility, growth performance, and enteric methane emission of Brazilian semiarid non-descript breed goats fed diets with different forage to concentrate ratios. *Tropical animal health and production*, 50(2), 283-289.
- Basset-Mens, C., Ledgard, S., Cox, N., Kelliher, F. M., & Carran, A. (2006). Uncertainty of global warming potential of milk production on an average New Zealand dairy farm. *population*, 19, 20.
- Bationo, A., & Mkwunye, A. U. (1991). Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Fertilizer research* 29 (1), 117-125.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural systems*, 94(1), 13-25.
- Beauchemin, K. A., Coates, T., Farr, B., & McGinn, S. M. (2012). Can the sulfur hexafluoride tracer gas technique be used to accurately measure enteric methane production from ruminally cannulated cattle? *Journal of Animal Science*, 90(8), 2727-2732.

- Beauchemin, K. A., Janzen, H. H., Little, S. M., McAllister, T. A., & McGinn, S. M. (2010). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: A case study. *Agricultural Systems*, 103(6), 371-379.
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131.
- Beirne, C., Miao, Z., Nuñez, C. L., Medjibe, V. P., Saatchi, S., White, L. J. T., & Poulsen, J. R. (2019). Landscape-level validation of allometric relationships for carbon stock estimation reveals bias driven by soil type. *Ecological Applications*, e01987.
- Belgium NIR (2018). Accessed August 20, 2019 at: <https://unfccc.int/documents/65711>
- Bénagabou, O. I., Blanchard, M., Yaméogo, V. M. B., Vayssières, J., Vigne, M., Vall, E., ... & Nacro, H. B. (2017). L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficacité, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 70(2), 31-41.
- Benaouda, M., Martin, C., Li, X., Kebreab, E., Hristov, A. N., Yu, Z., ... & Bannink, A. (2019). Evaluation of the performance of existing mathematical models predicting enteric methane emissions from ruminants: animal categories and dietary mitigation strategies. *Animal Feed Science and Technology*, 114207.
- Benoit-Catin, M. et Ba, C.O. (2005). Les systèmes productifs in Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. ISRA-ITA-CIRAD, 129-143 pp.
- Benoît, M., Tchamitchian, M., Penvern, S., Savini, I., & Bellon, S. (2017). Potentialités, questionnements et besoins de recherche de l'Agriculture Biologique face aux enjeux sociétaux. *Économie rurale*, (5), 49-69.
- Berger, M. (1996). L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. Montpellier. 60 pages : Agriculture et développement.
- Berndt, A., Boland, T. M., Deighton, M. H., Gere, J. I., Grainger, C., Hegarty, R. S., ... & Martin, R. J. (2014). Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. Ministry of Primary Industries: Wellington, New Zealand.
- Bernoux, M., Branca, G., Carro, A., Lipper, L., Smith, G., & Bockel, L. (2010). Ex-ante greenhouse gas balance of agriculture and forestry development programs. *Scientia Agricola*, 67(1), 31-40.
- Bhatta, R., Malik, P. K., Prasad, C. S., and Bhatta, R. 2015. Enteric methane emission: status, mitigation and future challenges: an Indian perspective. *Livestock Production Climate Change*, 229.
- Blanfort, V., Doreau, M., Huguenin, J., Lazard, J., Porphyre, V., Soussana, J. F., & Toutain, B. (2011). Impacts et services environnementaux de l'élevage en régions chaudes. *Productions animales*, 24(1), 89.
- Blanfort, V., Dorel, M., & Soussana, J. F. (2009). Elevage et environnement, quels enjeux en zone tropicale? http://agritrop.cirad.fr/559583/1/document_559583.pdf.

- Blaxter, K. L., and Clapperton, J. L. 1965. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition*, 19, 511–522.
- Blondel, D. (1971a). Contribution à l'étude de la dynamique de l'azote en sol ferrugineux tropical à Séfa. *Agron. Trop.*, 1334-1353.
- Blondel, D. (1971b). Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (dior) au Sénégal. *Agron. Trop.*, 1303-1333.
- Boadi, D., Benchaar, C., Chiquette, J., & Massé, D. (2004). Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: update review. *Canadian Journal of Animal Science*, 84(3), 319-335.
- Bochu, J. L. (2002). PLANETE : Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Toulouse, Solagro.
- Bochu, J. L., Metayer, N., Bordet, C., Gimaret, M., Tuomisto, H., Haastrup, P., & Constantin, A. L. 2013. Development of Carbon Calculator to promote low carbon farming practices. Accessible 27 novembre 2018 sur: https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f60_methdology-guidelines-final-final.pdf
- Bockstaller, C., & Girardin, P. (2008). Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. Document INRA-ARAA. INRA, Colmar. Consulté le 27 novembre 2018: <https://www6.inra.fr/means/content/download/3316/34433/version/2/file/Descriptif%20détaillé%20des%20indicateurs%20provenant%20de%20la%20méthode%20INDIGO.pdf>
- Bockstaller, C., Espagnol, S., Guichard, L., Petit, J., Raison, C., & Vertès, F. (2010). Synthèse 1. Stratégies de choix des méthodes et outils d'évaluation environnementale en systèmes d'élevage. In *Elevages et environnement*, Editions Quae. 15-64.
- Boisson de Chazournes, L. (1997). La gestion de l'intérêt commun à l'épreuve des enjeux économiques : Le Protocole de Kyoto sur les changements climatiques. *Annuaire français de droit international*, 701-715.
- Bonan, G. B. et Doney, S. C. (2018). Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 359(6375), eaam8328.
- Bonauto, T., Bendahan, A. B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., ... & Tichit, M. (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*, 57, 43-51.
- Boudet, G. (1975). Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères.
- Bouvarel, I., Dourmad, J-Y., Gac, A. (2010). Synthèse 2. Les stratégies d'alimentation des animaux au sein de l'exploitation et du territoire et leurs incidences environnementales. In *Elevages et environnement*, Editions Quae. 65-118.
- Brandt, P., Herold, M., & Rufino, M. C. (2018). The contribution of sectoral climate change mitigation options to national targets: a quantitative assessment of dairy production in Kenya. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034016.
- Brandt, P., Kvakić, M., Butterbach-Bahl, K., & Rufino, M. C. (2017). How to target climate-smart agriculture? Concept and application of the consensus-driven decision support framework “targetCSA”. *Agricultural Systems*, 151, 234-245.

- Brauman, A., Bignell, D. E., & Tayasu, I. (2000). Soil-feeding termites: biology, microbial associations and digestive mechanisms. In *Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology* (pp. 233-259). Springer, Dordrecht.
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Breman, H., et K Sissokho. 1998. L'intensification agricole au Sahel. Paris, France : Karthala. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20006782413>.
- Brisson, N., Terray, L., Calvet, J-C., Déqué, M., de Noblet-Ducoudré, N. 2013. L'incertitude dans les études d'impact et d'adaptation au changement climatique. In *S'adapter au changement climatique*, Editions Quae. 31-44.
- Bruinenberg, M. H., Zom, R. L. G., & Valk, H. (2002). Energy evaluation of fresh grass in the diets of lactation dairy cows. *NJAS Wageningen journal of life sciences*, 50(1), 67-81.
- Brümmer, C., Brüggemann, N., Butterbach-Bahl, K., Falk, U., Szarzynski, J., Vielhauer, K., & ... & Papen, H. (2008). Soil-atmosphere exchange of N₂O and NO in near-natural savanna and agricultural land in Burkina Faso (W. Africa). *Ecosystems*, 4(11), 582-600.
- Calderón, F., Oppenheimer, J., & Stern, N. (2014). Better growth, better climate—the new climate economy report—The synthesis report. Tech. rep., The Global Commission on the Economy and Climate, Washington, DC.
- Campbell, B. M., Thornton, P., Zougmore, R., Van Asten, P., & Lipper, L. (2014). Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 39-43.
- Carey, P. L., Cameron, K. C., Di, H. J., Edwards, G. R., & Chapman, D. F. (2016). Sowing a winter catch crop can reduce nitrate leaching losses from winter-applied urine under simulated forage grazing: a lysimeter study. *Soil use and management*, 32(3), 329-337.
- Caron, P., Valette, E., Wassenaar, T., d'Eeckenbrugge, G. C., & Papazian, V. (2017). *Des territoires vivants pour transformer le monde*. Editions Quae.
- Casabianca, F., Sylvander, B., Noël, Y., Béranger, C., Coulon, J. B., Giraud, G., ... & Vincent, E. (2006). Terroir et typicité: propositions de définitions pour deux notions essentielles à l'appréhension des Indications Géographiques et du développement durable. *Actes du VIème Congrès International des Terroirs Viticoles*, 3-7.
- CCNUCC. 2009. Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount. https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf (accès le novembre 12, 2018).
- Cederberg, C., & Stadig, M. (2003). System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 350-356.
- Cersosimo, L. M. and Wright, A. D. G. 2015. Estimation Methodologies for Enteric Methane Emission in Ruminants. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation*(pp. 209-220). Springer, New Delhi.
- Chabi, A., Lautenbach, S., Tondoh, J. E., Orekan, V. O. A., Adu-Bredu, S., Kyei-Baffour, N., ... & Fonweban, J. (2019). The relevance of using in situ carbon and

nitrogen data and satellite images to assess aboveground carbon and nitrogen stocks for supporting national REDD+ programmes in Africa. *Carbon balance and management*, 14(1), 12.

- Chadwick, D. R. (2005). Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: effect of compaction and covering. *Atmospheric environment*, 39(4), 787-799.
- Charmley E, Stephens ML and Kennedy PM 2008. Predicting livestock productivity and methane emissions in northern Australia: development of a bio-economic modelling approach. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 109-113.
- Charmley, E., Williams, S. R. O., Moate, P. J., Hegarty, R. S., Herd, R. M., Oddy, V. H., ... & Hannah, M. C. (2016). A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia. *Animal Production Science*, 56(3), 169-180.
- Chianu, J. N., Chianu, J. N., & Mairura, F. (2012). Mineral fertilizers in the farming systems of sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for sustainable development*, (32(2)), 545-566.
- Chirat G 2009. Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours en zone tropicale sèche. PhD thesis, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.
- Chirat G, Groot JC, Messad S, Bocquier F and Ickowicz A 2014. Instantaneous intake rate of free grazing cattle as affected by herbage characteristics in heterogeneous tropical agro-pastoral landscapes. *Applied Animal Behaviour Science* 157, 48-60.
- Chirat, G. (2009). Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours, en zone tropicale sèche. Montpellier: Montpellier SupAgro.
- Chirat, G., Groot, J. C., Messad, S., Bocquier, F., and Ickowicz, A. 2014. Instantaneous intake rate of free grazing cattle as affected by herbage characteristics in heterogeneous tropical agropastoral landscapes. *Applied Animal Behaviour Science*, 157, 48-60.
- Chiwara, P., Ogotu, B. O., Dash, J., Milton, E. J., Ardö, J., Saunders, M., & Nicolini, G. (2018). Estimating terrestrial gross primary productivity in water limited ecosystems across Africa using the Southampton Carbon Flux (SCARF) model. *Science of the Total Environment*, 630, 1472-1483.
- Ciais, P., Bombelli, A., Williams, M., Piao, S. L., Chave, J., Ryan, C. M., & ... & Valentini, R. (2011). The carbon balance of Africa: synthesis of recent research studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*(369), 2038-2057.
- Clarke, H. (2002). Ruminant methane emission measurements and estimates-From gut to globe. In *Proceedings-New Zealand Society of Animal Production* (Vol. 62, pp. 206-210). New Zealand Society of Animal Production.
- Colomb, V., Touchemoulin, O., Bockel, L., Chotte, J. L., Martin, S., Tinlot, M., & Bernoux, M. (2013). Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. *Environmental Research Letters*, 8(1), 015029.

- Connor, D. J., van Rees, H., & Carberry, P. S. (2015). Impact of systems modelling on agronomic research and adoption of new practices in smallholder agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(8), 1478-1489.
- Conway, G. R. (1985). Agroecosystem analysis. *Agricultural administration*, 20(1), 31-55.
- Corbeels, M., Cardinael, R., Naudin, K., Guibert, H., & Torquebiau, E. (2019). The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research*, 188, 16-26.
- Corbeels, M., Thierfelder, C., & Rusinamhodzi, L. (2015). Conservation agriculture in sub-Saharan Africa. In *Conservation agriculture* (pp. 443-476). Springer, Cham.
- Corniaux, C., Duteurtre, G., Dieye, P. N., & Chapuis, R. P. (2005). Les minilaiteries comme modèle d'organisation des filières laitières en Afrique de l'Ouest: succès et limites. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 58(4), 237-243.
- Corniaux, C., Vatin, F., & Faye, B. (2006). Gestion du troupeau et droit sur le lait: prise de décision et production laitière au sein des concessions sahéliennes. *Cahiers agricultures*, 15 (6), 515-522.
- Costa, S., G. M. Crovetto, et S. Bocchi. 2013. « family farming in Africa 3 overview of good agricultural practices in Sub-Saharan Africa ». Research report. Milan, Italy: University of Milan.
- Couacy-Hymann, E., Aplogan, G. L., Sangaré, O., Compaoré, Z., Karimu, J., Awoueme, K. A., ... & Valarcher, J. F. (2006). Étude rétrospective de la fièvre aphteuse en Afrique de l'Ouest de 1970 à 2003. *Rev. Sci. Tech. Int. Epiz*, 25(3), 1013-1024.
- Coulibaly, D. 2008. « Changements socio- techniques dans les systèmes de production laitière et commercialisation du lait en zone périurbaine de Sikasso, Mali ». These CIRAD. Paris, France.
- Cour, J. M. and Snrech, S. (Eds.). 1998. Preparing for the future: A vision of West Africa in the year 2020 (p. 153). Paris: OECD. Available at: <http://sahel.stir.ac.uk/dspace/handle/10253/132>
- Crush, J. R., & Rowarth, J. S. (2007). The role of C4 grasses in New Zealand pastoral systems. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(2), 125-137.
- Crutzen, P. J., Aselmann, I., and Seiler, W. 1986. Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 38(3-4), 271-284.
- D'Aquino, P., Lhoste, P., & Le Masson, A. (1995). Interactions entre les systèmes de production d'élevage et l'environnement. *Systèmes de production mixtes. Agriculture pluviale et élevage en zones humide et sub-humide d'Afrique*. Montpellier, France, 117 p.
- Daget, P. H., & Poissonet, J. (1995). La végétation des pâturages in *Pastoralisme, Troupeaux, Espaces et Sociétés*. Daget PH. et Godron M, 87-98.
- Dall-Orsoletta, A. C., Leurent-Colette, S., Launay, F., Ribeiro-Filho, H. M., & Delaby, L. (2019). A quantitative description of the effect of breed, first calving age and feeding strategy on dairy systems enteric methane emission. *Livestock Science*, 224, 87-95.

- de Klein, C., Barton, L., Sherlock, R., Li, Z., & Littlejohn, R. (2003). Estimating a nitrous oxide emission factor for animal urine from some New Zealand pastoral soils. *Aust. J. Soil Res.* (41), 381-399.
- De La Rocque, S., Bengaly, Z., Michel, J. F., Solano, P., Sidibé, I., & Cuisance, D. (1999). Importance des interfaces spatiales et temporelles entre les bovins et les glossines dans la transmission de la trypanosomose animale en Afrique de l'Ouest. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 52(3-4), 215-222.
- De Ridder, N., & Van Keulen, H. (1990). Some aspects of the role of organic matter in sustainably intensified arable farming systems in the West-African semi-arid-tropics (SAT). *Fertilizer research*. 26 (1-3), 299-310.
- Deighton, M. H., Williams, S. R. O., Hannah, M. C., Eckard, R. J., Boland, T. M., Wales, W. J., & Moate, P. J. (2014). A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 47-63.
- Deighton, M., Williams, R., Moate, P. (2016). The sulphur hexafluoride (SF6) tracer gas technique for determination of methane emissions from ruminants. The 6th International Greenhouse Gas and Animal Agriculture (GGAA2016 special edition), Melbourne, Australia.
http://www.greenhouse.unimelb.edu.au/GGAA/0940_Matt%20Deighton.pdf.
- Deighton, M., Williams, S., Hannah, M., Eckard, R., Boland, T., Wales, W., and Moate, P. 2014. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 47-63.
- Delma, B. J., Nacro, H. B., Bougouma-Yameogo, V., & Vall, E. (2016). Conception participative d'innovations et accompagnement des projets d'élevage familiaux au Burkina Faso: explorer, expérimenter et évaluer. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 69(2), 63-71.
- Denmark NIR. (2016). Accessed June 6, 2019 at: <https://dce2.au.dk/pub/SR189.pdf>
- Descheemaeker, K., Oosting, S. J., Tui, S. H. K., Masikati, P., Falconnier, G. N., & Giller, K. E. (2016). Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop–livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments. *Regional Environmental Change*, 16(8), 2331-2343.
- Devineau, J. L., Fournier, A., & Nignan, S. (2010). Savanna fire regimes assessment with MODIS fire data: their relationship to land cover and plant species distribution in western Burkina Faso (West Africa). *Journal of Arid Environments*, 74(9), 1092-1101.
- Diao, M. B., Senghor, C. D., & Diao, B. (2002a). Les femmes dans la filière lait périurbaine au Sénégal. Cas de la région de Kolda. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 55(4), 299-304.
- Diao, M. B., Senghor, C. D., Diao, B., & Thys, E. (2002b). Production et transformation du lait en région agropastorale au Sénégal: cas de la zone périurbaine de Kolda. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 55 (3), 221-228.
- Diarisso, T., Corbeels, M., Andrieu, N., Djamen, P., & Tiftonell, P. (2015). Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 101(3), 295-315.

- Diedhiou, A., Bichet, A., Wartenburger, R., Seneviratne, S. I., Rowell, D. P., Sylla, M. B., ... & Kane, N. A. (2018). Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5° C and 2° C global warming. *Environmental Research Letters*.
- Dieye, P. N. (2003). Comportements des acteurs et performances de la filière lait périurbain de Kolda (Sénégal). Institut agronomique méditerranéen. Accesible sur : http://hubrural.org/IMG/pdf/senegal_lait_periurbain_kolda.pdf.
- Dieye, P. N., & Gueye, M. (2002). Les systèmes agriculture—élevage au Sénégal : importance, caractéristiques et contraintes. *Improving Crop–Livestock Systems in the Dry Systems in the Dry Savannas of y Savannas of West and Central Africa est and Central Africa*, 127.
- Dieye, P. N., Faye, A., Seydi, M., & Cissé, S. A. (2002). Production laitière périurbaine et amélioration des revenus des petits producteurs en milieu rural au Sénégal. *Cahiers agricultures*, 11(4), 251-257.
- Diop, A. T. (1992). La gestion des parcours de l'aire d'influence du forage de Tatki: relations entre donnees de vegetation, taux d'exploitation et transhumance. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 45(1), 81-90.
- Diop, M. (1990). Les Systèmes d'élevage Dans Le Ferlo : Etude synthétique de la Situation actuelle. Papier préparé pour le séminaire sur "Les systèmes de production de lait et de viande au Sahel. ISRA-EISMV.
- Diop, M., & Van Vleck, L. D. (1998). Estimates of genetic parameters for growth traits of Gobra cattle. *Animal Science*, 66(2), 349-355.
- Diop, M., Fall, A., Lancelot, R., Mall, I., and Ndiaye. S. (2006). Evaluation Des Performances Zootechniques Des Bovins Croisés Dans Le Bassin Arachidier (Sénégal). Institut Senegalais de Recherches Agricoles, Laboratoire National de l'Élevage et de Recherches Veterinaires. Unival: Institut Senegalais de Recherches Agricoles, Laboratoire National de l'Élevage et de Recherches Veterinaires.
- Dollé, J. B., Agabriel, J., Peyraud, J. L., Faverdin, P., Manneville, V., Raison, C., ... & Le Gall, A. (2011). Les gaz à effet de serre en élevage bovin: évaluation et leviers d'action. *INRAE Productions Animales*, 24(5), 415-432.
- Dollé, J. B., Delaby, L., Plantureux, S., Moreau, S., Amiaud, B., Charpiot, A., ... & Le Gall, A. (2013). Impact environnemental des systèmes bovins laitiers français. *INRA Prod. Anim*, 26(2), 207-220.
- Dongmo, A. L., Vall, E., Diallo, M. A., Dugue, P., Njoya, A., & Lossouarn, J. (2012). Herding territories in Northern Cameroon and Western Burkina Faso: Spatial arrangements and herd management. *Pastoralism: Research, Policy and Practice*, 2(1), 26.
- Doreau M, Benhissi H, Thior YE, Bois B, Leydet C, Genestoux, L. and Ickowicz A 2016. Methanogenic potential of forages consumed throughout the year by cattle in a Sahelian pastoral area. *Animal Production Science* 56, 613-618.
- Doreau, M., Martin, C., Eugène, M., Popova, M., & Morgavi, D. P. (2011). Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *Productions animales*, 24(5), 461.
- Douxchamps, S., Van Wijk, M. T., Silvestri, S., Moussa, A. S., Quiros, C., Ndour, N. Y. B., ... & Ouedraogo, M. (2016). Linking agricultural adaptation strategies, food

- security and vulnerability: evidence from West Africa. *Regional Environmental Change*, 16(5), 1305-1317.
- Du Toit, C. J. L., Meissner, H. H., & Van Niekerk, W. A. (2013). Direct methane and nitrous oxide emissions of South African dairy and beef cattle. *South African Journal of Animal Science*, 43(3), 320-339.
- Dugué, P., & Dongmo, A. L. (2004). Traction animale et association agriculture élevage dans les savanes d'Afrique de l'ouest et du centre. D'un modèle techniciste à une démarche d'intégration raisonnée à différentes échelles. *Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 3-4(57), 157-165
- Dugué, P., Kossoumna Liba'a, N., Dongmo, A. L., Paresys, L., & Balarabe, O. (2013). Du territoire d'activités au territoire d'acteurs : le cas de l'élevage dans la zone de savane du nord Cameroun. 77-93.
- Dumont, B., Ryschawy, J., Duru, M., Benoit, M., Delaby, L., Dourmad, J. Y., ... & Sabatier, R. (2018). Les bouquets de services, un concept clé pour raisonner l'avenir des territoires d'élevage. *L'élevage en Europe : une diversité de services et d'impacts : INRA Productions Animales 04/17 vol 30*, 30(4), 407-422.
- Duncan, K. (2008). Agricultural practices that reduce greenhouse gases (GHGs) and generate co-benefits. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 110, 61-69.
- Dziak, J. J., Nahum-Shani, I., & Collins, L. M. (2012). Multilevel factorial experiments for developing behavioral interventions: Power, sample size, and resource considerations. *Psychological methods*, 17(2), 153.
- Easter, T. S., Killion, A. K., & Carter, N. H. (2018). Climate change, cattle, and the challenge of sustainability in a telecoupled system in Africa. *Ecology and Society*, 23(1).
- Edjabou, L. D., & Smed, S. (2013). The effect of using consumption taxes on foods to promote climate friendly diets—The case of Denmark. *Food policy*, 39, 84-96.
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 5). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Ejlertsen M, Poole J and Marshall K 2012. Sustainable management of globally significant endemic ruminant livestock in West Africa: Estimate of livestock demographic parameters in Senegal. Nairobi: ILRI Research Report 29. 48 pp
- Elliott, RC, Fokkema, K and French, CH 1961. Herbage consumption studies on beef cattle. 2. Intake studies on Afrikander and Mashona cows on veld grazing-1959/60. *Rhodesia Agricultural Journal*, 58, 124-130.
- Ellis, J. L., Kebreab, E., Odongo, N. E., McBride, B. W., Okine, E. K., & France, J. (2007). Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of dairy science*, 90(7), 3456-3466.
- Ericksen, P. J., Ingram, J. S., & Liverman, D. M. (2009). Food security and global environmental change: emerging challenges. 373-377.
- Escobar-Bahamondes P, Oba M and Beauchemin KA 2017. An evaluation of the accuracy and precision of methane prediction equations for beef cattle fed high-forage and high-grain diets. *animal* 11, 66-77.

- Eugène M, Martin C, Mialon MM, Krauss D, Renand G and Doreau M 2011. Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 330-337.
- Eugène, M., Doreau, M., Archimède, H., Giger-Reverdin, S., & Sauvant, D. (2019). Modelling by meta-analysis enteric methane emissions from ruminants fed forages supplemented or not with tannins. *animal*, 291.
- Eugene, M., Martin, C., Mialon, M. M., Krauss, D., Renand, G., and Doreau, M. 2011. Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 330–337.
- Eugène, M., Sauvant, D., Nozière, P., Viallard, D., Oueslati, K., Lherm, M., ... & Doreau, M. (2019). A new Tier 3 method to calculate methane emission inventory for ruminants. *Journal of environmental management*, 231, 982-988.
- Ezanno P, Ickowicz A and Bocquier F 2003. Factors affecting the body condition score of Ndama cows under extensive range management in Southern Senegal. *Animal Research* 52, 37-48.
- Ezanno P, Ickowicz A and Lancelot R 2005. Relationships between Ndama cow body condition score and production performance under an extensive range management system in Southern Senegal: calf weight gain, milk production, probability of pregnancy, and juvenile mortality. *Livestock Production Science* 92, 291–306.
- Ezui, K. S., Franke, A. C., Mando, A., Ahiabor, B. D. K., Tetteh, F. M., Sogbedji, J., ... & Giller, K. E. (2016). Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa. *Field crops research*, 185, 69-78.
- Faivre, R., looss, B., Mahévas, S., Makowski, D., & Monod, H. (2016). Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement. Editions Quae.
- Faivre, R., looss, B., Mahévas, S., Makowski, D., & Monod, H. (2013). Analyse de sensibilité et exploration de modèles: application aux sciences de la nature et de l'environnement. Editions Quae.
- Fall, A. 1987. Les systèmes d'élevage en Haute Casamance. Mémoire de titularisation - ISRA/CRZ Kolda.
- Fall, A. et Faye, A. 1991. L'embouche paysanne en Haute Casamance. Rapport de Recherche ISRA- CRZ/Kolda.
- Fall, A., & Faye, A. (1989). Rapport de suivi d'étables fumières dans le département de Kolda. Rapport de recherche. Centre de Recherche Zootechnique, Kolda, Senegal.
- Fall, A., Diop, M., Sandford, J., Wissocq, Y. J., Durkin, J. W., & Trail, J. C. M. (1982). *Evaluation of the productivities of Djallonke sheep and N'Dama cattle at the Centre de Recherches Zootechniques, Kolda, Senegal*. ILCA.
- Fan, S., & Ramirez, A. (2012). Achieving food security while switching to low carbon agriculture. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4), 041405.
- Fanchette, S. (2011). Le Fuladu, pays des peuls de Haute Casamance (Sénégal).
- FAO (2010). Climate-Smart Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/013/i1881e/i1881e00.htm> (Accessible: 14 november 2018).

- FAO et NZAGRC. 2019. Soutenir un développement à basses émissions des secteurs laitiers pastoraux et agropastoraux en Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina-Faso, Mali, Niger & Sénégal). Rome. 46pp
- FAO. (2009). L'agriculture mondiale à l'horizon 2050. Forum d'experts de haut niveau. Comment nourrir le monde en 2050. Rome.
- FAO. (2016). The State of Food and Agriculture 2016: Climate change, agriculture and food security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2009. « La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Le point sur l'élevage. » Rapport d'activités. ISBN 978-92-5-206215-8. Rome, Italie.
<http://www.fao.org/catalog/inter-e.htm>.
- FAO. 2010. Pour une agriculture intelligente face au climat : Politiques, pratiques et financements en matière de sécurité alimentaire, d'atténuation et d'adaptation. Rome (Italie) : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 55 p.
- FAO. 2011. « World livestock ». Research report 978-92-5-107013- 0. Rome, Italy: Food and agriculture organization of the united nations.
<http://www.fao.org/docrep/014/i2373e/i2373e.pdf>.
- FAO. 2014. Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'ouest. Etat des lieux et perspectives pour l'élevage. Bureau Régional pour l'Afrique de la FAO. Accra. 73 pages.
- FAO. 2016. The State of Food and Agriculture 2016: Climate change, agriculture and food security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2018. <http://www.fao.org/dad-is/browse-by-country-and-species/en/>
- FAO. 2018. L'alimentation et l'agriculture pour réaliser les ODD : 20 actions interconnectées pour orienter les décideurs. Rome (Italie) : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2018.
- FAOSTAT, 2019. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data>.
- Faugère O., Dockes, A.C., Perrot C., Faugère B., 1990. L'élevage traditionnel des petits ruminants au Sénégal. I. Pratiques de conduites et d'exploitation des animaux chez les éleveurs de la région de Kolda. *Journal of Tropical Livestock Science*, 43, 249-259.
- Faugère, O. and Faugère, B. (1986). Flock monitoring and control of individual performances of small ruminants bred in an African traditional environment: Methodology features. *Journal of Tropical Livestock Science*, 39(1), 29-40.
- Fausser, P., Sørensen, P. B., Nielsen, M., Winther, M., Plejdrup, M. S., Hoffmann, L., ... & Thomsen, M. (2011). Monte Carlo (Tier 2) uncertainty analysis of Danish Greenhouse gas emission inventory. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 1(3-4), 145-160.
- Faverdin, P., Baumont, R., Boval, J., Agabriel, J., Delagarde, R. 2018. Ingestion des aliments. In INRA 2018. Alimentation des ruminants, Apports nutritionnels-Besoins et réponses des animaux, Rationnement-Tables des valeurs des aliments, Éditions Quæ, Versailles, France, Chapitre 2, p. 33-41.
- Faye, A. et Fall, A. 1991a. Le système d'élevage en Haute Casamance : Caractéristiques, contraintes et problématiques de Recherche ISRA- CRZ/Kolda. Communication au séminaire du 12 au 13 Mars 1991 à Kolda.

- Faye, A., Fall, A. et Sèye, C.S. 1991b. Vers une intensification des productions animales et une meilleure intégration agriculture-élevage en zone cotonnière de la Haute Communication du séminaire ISRA/CRZ du 12 au 13 Mars 1991 à Kolda.
- Faye, B. (2001). Le rôle de l'élevage dans la lutte contre la pauvreté. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 54(3-4), 231-238.
- Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., & Nayak, D. R. (2018). Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions?. *Agriculture, ecosystems & environment*, 254, 117-129.
- Fernández-Rivera, S., Okike, I., Manyong, V., Williams, T. O., Kruska, R. L., and Tarawali, S. A. 2004. Classification and description of the major farming systems incorporating ruminant livestock in West Africa. In *Sustainable crop–livestock production for improved livelihoods and natural resources management in West Africa*. Proceedings of an international conference held at IITA, Ibadan, Nigeria.
- Ferrari, S., Corniaux, C., & Duteurtre, G. (2016). Choix de la matière première et modes de gouvernance au sein des chaînes laitières industrielles au Sénégal (No. 310-2016-5444).
- Field, C. B. (Ed.). (2014). *Climate change 2014–Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*. Cambridge University Press.
- Flachowsky, G. (2015). Carbon footprints for food of animal origin. In P. Malik, R. Bhatta, J. Takahashi, R. Kohn, & C. Prasad, *Livestock Production and Climate Change* (pp. 125-145). Boston: Cabi Climate Change Series.
- Frank, B., & Swensson, C. (2002). Relationship between content of crude protein in rations for dairy cows and milk yield, concentration of urea in milk and ammonia emissions. *Journal of Dairy Science*. 85(7) : 1829-1838.
- Freibauer, A. (2003). Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. *Eur J Agron* (19), 135–160
- Gac, A., Cariolle, M., Deltour, L., Dollé, J. B., Espagnol, S., Flénet, F., ... & Malaval, C. (2011). GES'TIM—des apports pour l'évaluation environnementale des activités agricoles. *Innovations Agronomiques* (17), 83-94.
- Gac, A., Deltour, L., Cariolle, M., Dollé, J. B., Espagnol, S., Flénet, F., ... & Malaval, C. (2010). GES'TIM, Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. *Version*, 1, 155.
- Gaidet N and Lecomte P 2013. Benefits of migration in a partially-migratory tropical ungulate. *BMC ecology*, 13 (1), 36.
- Garry F., Thuriès L.. 2017. In : Roose, Eric (ed.). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens : contribution à l'agroécologie*. Marseille : IRD, p. 179-195.
- Garry, F., & Badiane, A. (1998). La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne. *Diagnostic et perspectives*. *Agriculture et développement*. 18 : 73-80.
- Garg, M. R. and Sherasia, P. L. 2015. Ration balancing: A practical approach for reducing methanogenesis in tropical feeding systems. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 285-301). Springer, New Delhi.

- Gascuel-Odoux, C., Dorioz, J. M., Merot, P., Massa, F., Grimaldi, C., & Poulénard, J. (2008). Rôle des prairies dans les pollutions diffuses. Effet de la localisation et des bordures (haie, dispositifs enherbés, berges). *Fourrages*, 192, 409-422.
- Gautier, D., Bonnérat, A., & Njoya, A. (2005). The relationship between herders and trees in space and time in northern Cameroon. *Geographical Journal*, 171(4), 324-339.
- Gbangboche, A. B., Adamou-Ndiaye, M., Youssao, A. K. I., Farnir, F., Detilleux, J., Abiola, F. A., and Leroy, P. L. 2006. Non-genetic factors affecting the reproduction performance, lamb growth and productivity indices of Djallonke sheep. *Small Ruminant Research*, 64(1-2), 133-142.
- Gérardeaux, E., Affholder, F., Bernoux, M., & Muller, B. (2015). Les relations entre systèmes de culture annuels tropicaux et changement climatique. *Changement climatique et agricultures du monde*, 107-120.
- Gerber PJ, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, ... and Tempio G. 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., ... & Tempio, G. (2014). Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage—Une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome*.
- Gerber, P., Vellinga, T., Opio, C., & Steinfeld, H. (2011). Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science*, 139(1-2), 100-108.
- Ghebrehiwot, H. M., Kulkarni, M. G., Light, M. E., Kirkman, K. P., & Van Staden, J. (2011). Germination activity of smoke residues in soils following a fire. *South African Journal of Botany*, 77(3), 718-724.
- Gibbons, J. M., Ramsden, S. J., & Blake, A. (2006). Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. *Agriculture, ecosystems & environment*, 112(4), 347-355.
- Giller, K. E., Tittonell, P., Rufino, M. C., Van Wijk, M. T., Zingore, S., Mapfumo, P., ... & Rowe, E. C. (2011). Communicating complexity: integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural systems*, 104(2), 191-203.
- Goel, G., & Makkar, H. P. (2012). Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical animal health and production*, 44(4), 729-739.
- Goopy JP, Onyango AA, Dickhoefer U and Butterbach-Bahl K 2018. A new approach for improving emission factors for enteric methane emissions of cattle in smallholder systems of East Africa—Results for Nyando, Western Kenya. *Agricultural Systems* 161, 72-80.
- Goopy, J. P., Woodgate, R., Donaldson, A., Robinson, D. L., & Hegarty, R. S. (2011). Validation of a short-term methane measurement using portable static chambers to estimate daily methane production in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 219-226.

- Gouro, A., & Ly, C. (2012). Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'Ouest–Etat des lieux et perspectives pour l'élevage. *Rapport d'expertise provisoire*. FAO.
- Grainger, C., & Beauchemin, K. A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal feed science and technology*, 166, 308-320.
- Grainger, C., Clarke, T., McGinn, S. M., Auldist, M. J., Beauchemin, K. A., Hannah, M. C., ... & Eckard, R. J. (2007). Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF6) tracer and chamber techniques. *Journal of dairy science*, 90(6), 2755-2766.
- Grillot, M. (2018). Modélisation multi-agents et pluri-niveaux de la réorganisation du cycle de l'azote dans des Systèmes agro-sylvo-pastoraux en transition. Le cas du bassin arachidier au Sénégal. Thèse de doctorat. Université de Montpellier. 167 pages.
- Grillot, M., Guerrin, F., Gaudou, B., Masse, D., & Vayssières, J. (2018). Multi-level analysis of nutrient cycling within agro-sylvo-pastoral landscapes in West Africa using an agent-based model. *Environmental modelling & software*, 107, 267-280.
- Grimaud, P., Richard, D., Kanwé, A., Durier, C., & Doreau, M. (1998). Effect of undernutrition and refeeding on digestion in *Bos taurus* and *Bos indicus* in a tropical environment. *Animal Science*, 67(1), 49-58.
- Guérin H and Roose E 2017. Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique Occidentale. Points de vue d'un zootechnicien et d'un agro-pédologue. In E. Roose, Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens: Contribution à l'agro-écologie (pp. 133-148). IRD Editions. Montpellier, France.
- Guérin, G., & Hubert, B. (1995). Le troupeau au pâturage. In *Pastoralisme. Troupeaux, espaces et sociétés*. Universités Francophones, 361-384.
- Guérin, G., & Roose, E. (2015). Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi arides d'Afrique occidentale : points de vue d'un zootechnicien et d'un agro-podologue. In *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens, Contribution à l'agroécologie*. IRD Editions, 133-148.
- Guérin, H., & Roose, E. (2017). Ingestion, restitution et transfert d'éléments fertilisants aux agrosystèmes par les ruminants domestiques en régions semi-arides d'Afrique Occidentale. Points de vue d'un zootechnicien et d'un agro-pédologue. pp.161-178
- Guérin, H., Richard, D., Duché, A., & Lefèvre, P. (1990). Composition chimique des fèces de bovins, d'ovins et de caprins exploitant des parcours naturels ou agro-pastoraux sahélo-soudaniens: utilisation pour estimer la valeur nutritive de leur régime. *Reproduction Nutrition Development*, 30(Suppl. 2), 167s-168s.
- Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5), 311.
- Guingand, N., Espagnol, S., Vigan, A., Hassouna, M., Lorinquer, E., Ponchant, P., ... & Loyon, L. (2017). ELFE, une base de données pour caractériser les émissions gazeuses.

- Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*, 32(2), 135-154.
- Hammami, P., Lancelot, R., and Lesnoff, M. 2016. Modelling the dynamics of post-vaccination immunity rate in a population of Sahelian sheep after a vaccination campaign against peste des petits ruminants virus. *PLoS one*, 11(9), e0161769.
- Hammond, K. J., Crompton, L. A., Bannink, A., Dijkstra, J., Yáñez-Ruiz, D. R., O’Kiely, P., ... & Schwarm, A. (2016). Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 13-30.
- Hammond, K. J., Humphries, D. J., Crompton, L. A., Green, C., & Reynolds, C. K. (2015). Methane emissions from cattle: estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer. *Animal Feed Science and Technology*, 203, 41-52.
- Hammond, K. J., Jones, A. K., Humphries, D. J., Crompton, L. A., & Reynolds, C. K. (2016). Effects of diet forage source and neutral detergent fiber content on milk production of dairy cattle and methane emissions determined using GreenFeed and respiration chamber techniques. *Journal of dairy science*, 99(10), 7904-7917.
- Hammond, K., Crompton, L., Bannink, A., Dijkstra, J., Yáñez-Ruiz, D., O’Kiely, P., . . . Reynolds, C. (2016). Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology* (219), 13-30.
- Harper, L., Denmead, O., & Flesch, T. (2011). Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 0(166 - 167), 227 - 239.
- Harvey, C. A., Chacón, M., Donatti, C. I., Garen, E., Hannah, L., Andrade, A., ... & Clement, C. (2014). Climate - smart landscapes: opportunities and challenges for integrating adaptation and mitigation in tropical agriculture. *Conservation Letters*, 7(2), 77-90.
- Hassouna, M., Eglin, T., Cellier, P., Colomb, V., Cohan, J. P., Decuq, C., ... & Fauvel, Y. (2015). Mesurer les émissions gazeuses en élevage—Gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d’azote. *Diffusion INRA-ADEME*.
- Havlík P, Valin H, Herrero M, Obersteiner M, Schmid E, Rufino MC and Frank S 2014. Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 3709-3714.
- Heisey, P. W., & Norton, G. W. (2007). Fertilizers and other farm chemicals. *Handbook of agricultural economics*. (3), 2741-2777.
- Hellwing, A. L. F., Weisbjerg, M. R., Brask, M., Alstrup, L., Johansen, M., Hymøller, L., ... & Lund, P. (2016). Prediction of the methane conversion factor (Y_m) for dairy cows on the basis of national farm data. *Animal production science*, 56(3), 535-540.
- Hendrickson, C. T., Lave, L. B., & Matthews, H. S. (2006). Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach. *Resources for the Future*.

- Herrero M, Havlík P, Valin H, Notenbaert A, Rufino MC and Thornton P K 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 52, 20888-20893.
- Herrero, M., Gerber, P., Vellinga, T., Garnett, T., Leip, A., Opio, C., ... & Montgomery, H. (2011). Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 779-782.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Kruska, R., & Reid, R. S. (2008). Systems dynamics and the spatial distribution of methane emissions from African domestic ruminants to 2030. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. (126) : 122-137.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Notenbaert, A. M., Wood, S., Msangi, S., Freeman, H. A., ... & Lynam, J. (2010). Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, 327(5967), 822-825.
- Hertel, T. W., & Rosch, S. D. (2010). Climate change, agriculture and poverty. The World Bank.
- Holechek, J. L., Cibils, A. F., Bengaly, K., and Kinyamario, J. I. 2017. Human population growth, African pastoralism, and rangelands: A perspective. *Rangeland ecology and management*, 70(3), 273-280.
- Hou, Y., Velthof, G. L., & Oenema, O. (2015). Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment. *Global change biology*, 21(3), 1293-1312.
- Hristov, A. N., Kebreab, E., Niu, M., Oh, J., Bannink, A., Bayat, A. R., ... and Dijkstra, J. 2018. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *Journal of dairy science*, 101(7), 6655-6674.
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., ... & Gerber, P. J. (2013). Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of animal science*, 91(11), 5045-5069.
- Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T. W., Harper, M. T., Weeks, H. L., ... & Kindermann, M. (2015). An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34), 10663-10668.
- Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T., Harper, M. T., Weeks, H., ... & Williams, S. R. O. (2016). Comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows. *Journal of dairy science*, 99(7), 5461-5465.
- Huhtanen, P., Ramin, M., & Hristov, A. N. (2019). Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit. *Livestock science*, 222, 31-40.
- Huijsmans, J. F. M., Schröder, J. J., Mosquera, J., Vermeulen, G. D., Ten Berge, H. F. M., & Neeteson, J. J. (2016). Ammonia emissions from cattle slurries applied to grassland: should application techniques be reconsidered? *Soil use and management*, 32, 109-116.
- Ickowicz, A., and Mbaye, M. (2001). Forêts soudaniennes et alimentation des bovins au Sénégal: potentiel et limites. *Bois et forêts des tropiques*, (270), 47-61.

- Iooss, B. (2011). Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques. *Journal de la Société Française de Statistique*, 152(1), 1-23.
- Iooss, B., and Lemaître, P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods. In *Uncertainty management in simulation-optimization of complex systems* (pp. 101-122). Springer, Boston, MA.
- IPCC 2006. 2006 IPCC guidelines for National greenhouse gas inventories. Prepared by the national greenhouse gas inventories programme. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), *Agriculture, Forestry and Other Land Use*, vol. 4. Institute for Global Environmental Strategies. International Panel on Climate Change, Hayama, Japan.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Approaches to data collection. Volume 1, Chapter 2. International Panel on Climate Change.
- ISRA. (2005). Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. Institut Sénégalais de Recherches Agricoles. Dakar. ISRA-ITA-CIRAD.
- ISRA. (2005). Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. Institut Sénégalais de Recherches Agricoles. Dakar : ISRA-ITA-CIRAD.
- Jaitner, J., Sowe, J., Secka-Njie, E., and Dempfle, L. 2001. Ownership pattern and management practices of small ruminants in The Gambia—implications for a breeding programme. *Small Ruminant Research*, 40 (2), 101-108.
- Jaurena G, Cantet JM, Arroquy JI, Palladino RA, Wawrzekiewicz M and Colombatto D 2015. Prediction of the Ym factor for livestock from on-farm accessible data. *Livestock Science* 177, 52-62.
- Jayanegara, A., Leiber, F., & Kreuzer, M. (2012). Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 96(3), 365-375.
- Jayne, T. S., Snapp, S., Place, F., & Sitko, N. (2019). Sustainable agricultural intensification in an era of rural transformation in Africa. *Global Food Security*, 20, 105-113.
- Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, 73(8), 2483-2492.
- Johnson, K. A., Westberg, H. H., Michal, J. J., & Cossalman, M. W. (2007). The SF6 tracer technique: methane measurement from ruminants. In *Measuring methane production from ruminants* (pp. 33-67). Springer, Dordrecht.
- Johnson, K., Huyler, M., Westberg, H., Lamb, B., & Zimmerman, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. *Environmental science & technology*, 28(2), 359-362.
- Johnson, W. L. (1984). Strategies for improving the nutritional status of small ruminants in tropical ecosystems. *Preventive Veterinary Medicine*, 2(1-4), 589-601.
- Jones, M. J., & Wild, A. (1975). *Soils of the West African Savana*. Technical communication No. 55 : Commonwealth Agricultural Bureau.
- Jonker, A., Molano, G., Antwi, C., & Waghorn, G. C. (2016). Enteric methane and carbon dioxide emissions measured using respiration chambers, the sulfur hexafluoride tracer technique, and a GreenFeed head-chamber system from beef

- heifers fed alfalfa silage at three allowances and four feeding frequencies—. *Journal of animal science*, 94(10), 4326-4337.
- Kaewpila C and Sommart K 2016. Development of methane conversion factor models for Zebu beef cattle fed low-quality crop residues and by-products in tropical regions. *Ecology and evolution* 20, 7422-7432.
- Kaewpila, C., & Sommart, K. (2016). Development of methane conversion factor models for Zebu beef cattle fed low - quality crop residues and by - products in tropical regions. *Ecology and evolution*, 6(20), 7422-7432.
- Kalandi, M., Sow, A., Guigma, W. V. H., Zabre, M. Z., Bathily, A., & Sawadogo, G. J. (2015). Evaluation de la qualité nutritionnelle du lait cru dans les élevages traditionnels de Kaolackau Sénégal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(2), 901-909.
- Karimi-Zindashty, Y., MacDonald, J. D., Desjardins, R. L., Worth, D. E., Hutchinson, J. J., & Vergé, X. P. C. (2012). Sources of uncertainty in the IPCC Tier 2 Canadian livestock model. *The Journal of Agricultural Science*, 150(5), 556-569.
- Kebreab, E., Clark, K., Wagner - Riddle, C., & France, J. (2006). Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian journal of animal science*, 2(86), 135-137.
- Kebreab, E., Johnson, K. A., Archibeque, S. L., Pape, D., & Wirth, T. (2008). Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. *Journal of animal science*, 86(10), 2738-2748.
- Kennedy, P. M., & Charmley, E. (2012). Methane yields from Brahman cattle fed tropical grasses and legumes. *Animal Production Science*, 52(4), 225-239.
- Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5° C to 2.0° C depending on rarity. *Earth's Future*.
- Kim, D. G., Saggat, S., & Roudier, P. (2012). The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93(1), 51-64.
- Kim, D. G., Thomas, A. D., Pelster, D., Rosenstock, T. S., & Sanz-Cobena, A. (2016). Greenhouse gas emissions from natural ecosystems and agricultural lands in sub-Saharan Africa: synthesis of available data and suggestions for further research. *Biogeosciences*, 13(16), 4789-4809.
- Kim, S. W., Less, J. F., Wang, L., Yan, T., Kiron, V., Kaushik, S. J., & Lei, X. G. (2019). Meeting global feed protein demand: challenge, opportunity, and strategy. *Annual review of animal biosciences*, 7, 221-243.
- Kiss, A. C. and Doumbe-Bille, S. (1992). Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Rio de Janeiro-juin 1992). *Annuaire français de droit international*, 38(38), 823-843.
- Klein, H. D., Rippstein, G., Huguenin, J., Toutain, B., Guerin, H., & Louppe, D. (2014). *Les cultures fourragères*. Éditions Quae.
- Klumpp, K., Faverdin, P., Benoit, M., Pellerin, S., Bamière, L., Chemineau, P., ... & Doreau, M. (2013). Réduction des émissions de gaz à effet de serre des ruminants:

choix des techniques les plus efficaces, ampleur de la réduction, coût de leur mise en application. *Rencontres Recherches Ruminants*, 20, 315-318.

- Kohn, R. A. (2015). Nitrogen emissions from animal agricultural systems and strategies to protect the environment. *Livestock production and climate change. CABI Climate Change Series*, 6, 61-72.
- Konandreas, PA and Anderson FM 1982. Cattle herd dynamics: an integer and stochastic model for evaluating production alternatives. ILRI publications (aka ILCA Research Report n°2 and ILRAD).
- Kosgey, I. S. 2004. Breeding objectives and breeding strategies for small ruminants in the tropics. Available at: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/121527>
- Kosgey, I. S., Baker, R. L., Udo, H. M. J., and Van Arendonk, J. A. M. 2006. Successes and failures of small ruminant breeding programmes in the tropics: a review. *Small Ruminant Research*, 61(1), 13-28.
- Kouazounde, J. B., Gbenou, J. D., Babatoude, S., Srivastava, N., Eggleston, S. H., Antwi, C., ... & McAllister, T. A. (2015). Development of methane emission factors for enteric fermentation in cattle from Benin using IPCC Tier 2 methodology. *animal*, 9(3), 526-533.
- Kowal, J. (1970). The hydrology of a small catchment basin at Samaru. IV assessment of soil erosion under varied land management and vegetation cover. *Niger. Agric. J.*, 143-147.
- Kuemmerle, T., Erb, K., Meyfroidt, P., Müller, D., Verburg, P. H., Estel, S., ... & Levers, C. (2013). Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Current opinion in environmental sustainability*, 5(5), 484-493.
- Kurihara M, Magner T, Hunter RA and McCrabb GJ 1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition* 81:227-234.
- Kwayke, P. K. (1980). The effects of method of dung storage and its nutrient (NPK) content and crop yield in the North East Savanna Zone of Ghana. The use of organic materials as fertilizer in Africa. FAO, Rome: Soil Research Institute, Kwadaso-Kumasi, Ghana.
- Lairez, J., bouvarel, I., Feschet, P., Aubin, J., & Bockstaller, C. (2015). *Agriculture et développement durable. Guide de l'évaluation multicritère*. Paris : Educagri editions/Éditions Quae.
- Lancelot, R., Lesnoff, M., and McDermott, J. J. 2002. Use of Akaike information criteria for model selection and inference: an application to assess prevention of gastrointestinal parasitism and respiratory mortality of Guinean goats in Kolda, Senegal. *Preventive veterinary medicine*, 55(4), 217-240.
- Landais, E. (2001). *Pratiques d'élevage extensif : identifier, modéliser, évaluer (No. 27)*. Editions Quae.
- Landais, E., Lhoste, P. (1990). L'association agriculture-élevage en Afrique intertropicale : un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. *Cahiers des sciences humaines*, 26(1-2), 217-235.
- Lasey, K. R. (2007). Livestock methane emission: from the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. *Agricultural and forest meteorology*, 142(2-4), 120-132.

- Lassey, K. R., Ulyatt, M. J., Martin, R. J., Walker, C. F., & Shelton, I. D. (1997). Methane emissions measured directly from grazing livestock in New Zealand. *Atmospheric environment*, 31(18), 2905-2914.
- Lassey, K. R., Walker, C. F., McMillan, A. M. S., & Ulyatt, M. J. (2001). On the performance of SF6 permeation tubes used in determining methane emission from grazing livestock. *Chemosphere-Global Change Science*, 3(4), 367-376.
- Lazard, J. (2014). La diversité des piscicultures mondiales illustrée par les cas de la Chine et du Nigeria. *Cahiers Agricultures*, 23(1), 24-33.
- Le Coq, J. F. (2017). Vers une analyse des dynamiques institutionnelles pour le développement rural et les services environnementaux dans les pays du Sud.
- Lecomte P, Decruyenaere V, Eugène M, Bois B, Ndao S and Ickowicz A 2016. F-NIRS approach of the seasonal profile of CH4 emission of dairy herds in a agro sylvo pastoral ecosystem of sub-Saharan Africa (Kolda, Senegal). The 6th International Greenhouse Gas and Animal Agriculture (GGAA2016 special edition), Melbourne, Australia, p.1 poster.
- Lee Rodgers, J., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59-66.
- Lenka, S., Lenka, N. K., Sejian, V., and Mohanty, M. 2015. Contribution of Agriculture Sector to Climate Change. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 37-48). Springer, New Delhi.
- Lesnoff M., Corniaux C., Hiernaux P., 2012. Sensitivity analysis of the recovery dynamics of a cattle population following drought in the Sahel region. *Ecological Modelling* 232, 28-39.
- Leuning, R., Baker, S. K., Jamie, I. M., Hsu, C. H., Klein, L., Denmead, O. T., & Griffith, D. W. T. (1999). Methane emission from free-ranging sheep: a comparison of two measurement methods. *Atmospheric Environment*, 33(9), 1357-1365.
- Lhoste, P. (2001). L'étude et le diagnostic des systèmes d'élevage. *Atelier de Formation des agronomes SCV, Madagascar*, 13-23.
- Lhoste, P., & Richard, D. (1993). Contribution de l'élevage à la gestion de la fertilité à l'échelle du terroir. *Reseau Erosion*, 463-489.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., ... & Hottle, R. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature climate change*, 4(12), 1068.
- Little, S., Linderman, J., Maclean, K., & Janzen, H. (2008). HoloS—A tool to estimate and reduce greenhouse gases from farms. Methodology and algorithms for versions 1.1. x. Agriculture and Agri-Food Canada, Cat. No (p. 158). A52-136/2008E-PDF.
- Locatelli, B. (2010). Local, global : intégrer atténuation et adaptation. Perspective (Édition française). Consulté le 3 décembre 2018 sur : <http://hal.cirad.fr/cirad-01480515/document>.
- Louman, B., Campos-Arce, J. J., Mercado, L., Imbach, P., Bouroncle, C., Finegan, B., ... & Villanueva, C. (2014). Climate Smart Territories (CST): An integrated approach to food security, ecosystem services, and climate change in rural areas. *Climate-Smart Landscapes: Multifunctionality in Practice*, 75.

- Ly, C., Diaw, A., & Faye, A. (1997). Etables fumières et production laitière au Sénégal. *Cahiers agricultures*, 6(6), 561-570.
- Ly, C., Fall, A., and Okike, I. 2010. The Livestock Sector in Need of Regional Strategies. *Livestock in a changing landscape. Experiences and regional perspectives*, 27.
- Ma, L., Zhong, M., Zhu, Y., Yang, H., Johnson, D. A., & Rong, Y. (2018). Annual methane budgets of sheep grazing systems were regulated by grazing intensities in the temperate continental steppe: A two-year case study. *Atmospheric environment*, 174, 66-75.
- Makowski, D. (2013). Objectifs et principales étapes de l'analyse d'incertitude et de sensibilité. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles*. Editions Quae, Versailles, 3-30.
- Makowski, D., Naud, C., Jeuffroy, M. H., Barbottin, A., & Monod, H. (2006). Global sensitivity analysis for calculating the contribution of genetic parameters to the variance of crop model prediction. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), 1142-1147.
- Malick, P. K., Bhatta, R., Takahashi, J., Kohn, R. A., and Prasad, C. S. 2015. *Livestock production and climate change (Series 6. ISBN-13: 978 1 78064 432 5 ed.)*. Boston: CAB International.
- Manlay, R. (2001). *Organic matter dynamics in mixed-farming systems of the west African savanna: a village case study from South Senegal*. ENGREF. Nancy: ENGREF.
- Manlay, R., & Ickowicz, A. (2000). Rôle de l'élevage dans la dynamique de la matière organique à l'échelle d'un terroir agro-pastoral de Haute-Casamance. *Floret & Pontanier (éd., 2000)*, 50, 534-545.
- Marone, D., Poirier, V., Coyea, M., Olivier, A., & Munson, A. D. (2017). Carbon storage in agroforestry systems in the semi-arid zone of Niayes, Senegal. *Agroforestry Systems*, 91(5), 941-954.
- Marshall, K., Gibson, J. P., Mwai, O., Mwacharo, J. M., Haile, A., Getachew, T., ... & Kemp, S. J. (2019). *Livestock Genomics for Developing Countries—African Examples in Practice*. *Frontiers in genetics*, 10.
- Martins, J. M., Guo, F., & Swanson, D. A. (2018). Population: Survival and Growth. In *Global Population in Transition* (pp. 1-41). Springer, Cham.
- Mathot, M., Decruyenaere, V., Stilmant, D., & Lambert, R. (2012). Effect of cattle diet and manure storage conditions on carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from tie-stall barns and stored solid manure. *Agriculture, ecosystems & environment*, 148, 134-144.
- Maúre, G., Pinto, I., Ndebele-Murisa, M., Muthige, M., Lennard, C., Nikulin, G., ... & Meque, A. (2018). The southern African climate under 1.5° C and 2° C of global warming as simulated by CORDEX regional climate models. *Environmental Research Letters*, 13(6), 065002.
- Maurya, V. P., Sejian, V., Kumar, D., & Naqvi, S. M. K. (2018). Biological ability of Malpura rams to counter heat stress challenges and its consequences on production performance in a semi-arid tropical environment. *Biological Rhythm Research*, 49(3), 479-493.

- Maxin, G., Nozière, P., SAUVANT, D., & Baumont, R. (2018). Appliquer les méthodes d'évaluation multicritère aux rations des ruminants: identification des critères à évaluer et des indicateurs à mesurer sur les aliments. *INRA Productions Animales*, 31(3), 255-268.
- Mbaye, M., Diop, M. and Ndiaye, M. (1991). Etude de la puberté et des paramètres de production du zebu Gobra en milieu traditionnel. ISRA-EISMV.
- Mbow, C., Sambou, B., Ba, A. T., & Goudiaby, A. (2003). Vegetation and fire readiness in main morphological units of Niokolo Koba National Park (Southeast Senegal). *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 103(1), 55-62.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (Eds.). (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 2)*. Cambridge University Press.
- McGinn, S. M., & Flesch, T. K. (2018). Ammonia and greenhouse gas emissions at beef cattle feedlots in Alberta Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 43-49.
- McGinn, S. M., Beauchemin, K. A., Iwaasa, A. D., & McAllister, T. A. (2006). Assessment of the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer technique for measuring enteric methane emissions from cattle. *Journal of environmental quality*, 35(5), 1686-1691.
- McGinn, S., Chen, D., Loh, Z., Hill, J., & al. (2008). Methane emissions from feedlot cattle in Australia and Canada. *Australian Journal of Experimental Agriculture* (48), 183 - 185.
- McLeman, R. (2010). Impacts of population change on vulnerability and the capacity to adapt to climate change and variability: a typology based on lessons from "a hard country". *Population and Environment*, 31(5), 286-316.
- MEPA. (2016). Rapport d'activités du Ministère de l'Élevage et des Productions Animales. Available at : <http://www.elevage.gouv.sn/>
- Mertz, O., Halsnæs, K., Olesen, J. E., & Rasmussen, K. (2009). Adaptation to climate change in developing countries. *Environmental management*, 43(5), 743-752.
- Meyer C., éd. sc. (2019). *Dictionnaire des Sciences Animales*. [On line]. Montpellier, France, Cirad. [25/04/2019]. <URL : <http://dico-sciences-animales.cirad.fr/> >.
- Milne, A. E., Glendining, M. J., Bellamy, P., Misselbrook, T., Gilhespy, S., Casado, M. R., ... & Whitmore, A. P. (2014). Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture. *Atmospheric Environment*, 82, 94-105.
- Minang, P. A., van Noordwijk, M., Freeman, O. E., Mbow, C., de Leeuw, J., & Catacutan, D. (Eds.). (2014). *Climate-smart landscapes: multifunctionality in practice*. ASB Partnership for The Tropical Forest margins.
- Minson, DJ and McDonald, CK 1987. Estimating forage intake from the growth of beef cattle. *Tropical Grasslands* 21(3), 116-122.
- Missohou A., Diouf L., Sow R.S., Wollny C.B.A., 2004. Goat milk production and processing in the Niayes in Senegal. *South African Journal of Animal Science*, 34 (suppl. 1): 151-154
- Moate, P. J., Deighton, M. H., Ribaux, B. E., Hannah, M. C., Wales, W. J., & Williams, S. R. O. (2015). Michaelis–Menten kinetics predict the rate of SF₆ release from

- permeation tubes used to estimate methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 200, 47-56.
- Moe, P. W., & Tyrrell, H. F. (1979). Methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 62(10), 1583-1586.
- Monni, S., Perälä, P., & Regina, K. (2007). Uncertainty in agricultural CH₄ and N₂O emissions from Finland—possibilities to increase accuracy in emission estimates. Mitigation and adaptation strategies for global change, 12(4), 545-571.
- Moraine, M., Therond, O., Leterme, P., & Duru, M. (2012). Un cadre conceptuel pour l'intégration agroécologique de systèmes combinant culture et élevage. http://www7.inra.fr/ciag/revue/volume_22_octobre_2012.
- Mottet, A., Henderson, B., Opio, C., Falcucci, A., Tempio, G., Silvestri, S., ... & Gerber, P. J. (2017). Climate change mitigation and productivity gains in livestock supply chains: insights from regional case studies. *Regional environmental change*, 17(1), 129-141.
- Mourad, M., Gbanamou, G., and Balde, I. B. 2001. Carcass characteristics of West African dwarf goats under extensive system. *Small Ruminant Research*, 42(1), 81-85.
- Muchnik, J., & Salcido, G. T. (2008). Systèmes agroalimentaires localisés: état des recherches et perspectives. *Cahiers agricultures*, 17(6), 513-519.
- Mutenje, M. J., Farnworth, C. R., Stirling, C., Thierfelder, C., Mupangwa, W., & Nyagumbo, I. (2019). A cost-benefit analysis of climate-smart agriculture options in Southern Africa: Balancing gender and technology. *Ecological Economics*, 163, 126-137.
- Myers, M. L. 2011. Livestock rearing: its extent and health effects. *Encyclopaedia of occupational health and safety*. International Labor Organization, Geneva.
- Nasiru, A., Ibrahim, M. H., & Ismail, N. (2014). Nitrogen losses in ruminant manure management and use of cattle manure vermicast to improve forage quality. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3(2), 57.
- National Inventory Report of Senegal (NIR). 2015. Available at : <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/national-communications-and-biennial-update-reports-non-annex-i-parties/national-communication-submissions-from-non-annex-i-parties>.
- National Research Council (NRC) 1996. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*, 7th Edit., Nat. Acad. Press, Washington, DC.
- National Research Council. (1989). *Recommended dietary allowances*. National Academies Press.
- Ndao, S., Bocquier, F., Moulin, C. H., Lecomte, P., Manlay, R. J., Traore, E. H., & Vayssières, J. 2016. Facteur de variation du bilan gaz à effet de serre d'un terroir agrosylvopastoral de la zone subhumide du Sénégal. In *Proceedings of the French symposium Rencontres Recherches Ruminants*. 7-8 December. 23 (p. 229).
- Ndao, S., Traoré, E. H., Diop, M. (2018). Inventory practice: Sensitivity analysis to prioritize improvements in Senegal. In *Tier 2 inventory approaches in the livestock sector: a collection of agricultural greenhouse gas inventory practices*, GRA-CGIAR-CCAFS-New Zealand Government. 172-174.

- Ndung'u, P. W., Bebe, B. O., Ondiek, J. O., Butterbach-Bahl, K., Merbold, L., & Goopy, J. P. (2019). Improved region-specific emission factors for enteric methane emissions from cattle in smallholder mixed crop: livestock systems of Nandi County, Kenya. *Animal Production Science*, 59(6), 1136-1146.
- Nicholson, F. A., Bhogal, A., Rollett, A., Taylor, M., & Williams, J. R. (2018). Precision application techniques reduce ammonia emissions following food-based digestate applications to grassland. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 110(1), 151-159.
- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *ISRN Meteorology*, 2013.
- Nikulin, G., Lennard, C., Dosio, A., Kjellström, E., Chen, Y., Hänsler, A., ... & van Meijgaard, E. (2018). The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the CORDEX ensemble. *Environmental Research Letters*, 13(6), 065003.
- Niu, M., Kebreab, E., Hristov, A. N., Oh, J., Arndt, C., Bannink, A., ... & Crompton, L. A. (2018). Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Global change biology*.
- Ojango, J. M. K., Audho, J., Oyieng, E., Recha, J., Okeyo, A. M., Kinyangi, J., & Muigai, A. W. T. (2016). System characteristics and management practices for small ruminant production in "Climate Smart Villages" of Kenya. *Animal Genetic Resources/Recursos génétiques animales/Recursos genéticos animales*, 58, 101-110.
- Olesen, J. E., & Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European journal of agronomy*, 16(4), 239-262.
- Opio, C., Gerber, P., Mottet, A., Falcucci, A., Tempio, G., MacLeod, M., ... and Steinfeld, H. 2013. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains—A global life cycle assessment. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO), Rome, 1-214.
- Ortiz-Gonzalo, D., Vaast, P., Oelofse, M., de Neergaard, A., Albrecht, A., & Rosenstock, T. S. (2017). Farm-scale greenhouse gas balances, hotspots and uncertainties in smallholder crop-livestock systems in Central Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 248, 58-70.
- Osty, P. L. (1978). L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement. *Bulletin technique d'information*, 326, 43-49.
- Otte, M. J. and Chilonda, P. 2002. Cattle and small ruminant production systems in sub-Saharan Africa. A systematic review.
- Ouédraogo-Koné S, Kaboré-Zoungrana CY and Ledin I 2008. Intake and digestibility in sheep and chemical composition during different seasons of some West African browse species. *Tropical Animal Health and Production*, 40(2), 155-164.
- Ouédraogo-Koné, S., Kaboré-Zoungrana, C. Y., & Ledin, I. (2006). Behaviour of goats, sheep and cattle on natural pasture in the sub-humid zone of West Africa. *Livestock Science*, 105(1-3), 244-252.
- Ouédraogo-Koné, S., Kaboré-Zoungrana, C. Y., and Ledin, I. 2008. Intake and digestibility in sheep and chemical composition during different seasons of some

- West African browse species. *Tropical Animal Health and Production*, 40(2), 155-164.
- Palazzo, A., Vervoort, J. M., Mason-D'Croz, D., Rutting, L., Havlík, P., Islam, S., ... and Zougmore, R. 2017. Linking regional stakeholder scenarios and shared socioeconomic pathways: quantified west African food and climate futures in a global context. *Global Environmental Change*, 45, 227-242.
- Pandey, A. N. 1980. Vegetation and bovine population interactions in the Savanna grazing lands of Chandraprabha sanctuary, Varanasi 1. seasonal behaviour of grazing lands [India]. *Tropical Ecology (India)*.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., & Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change*, 14(1), 53-67.
- Partey, S. T., Zougmore, R. B., Ouédraogo, M., and Campbell, B. M. (2018). Developing climate-smart agriculture to face climate variability in West Africa: challenges and lessons learnt. *Journal of cleaner Production*, 187, 285-295.
- Patra, A. K. (2013). The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livestock science*, 155(2-3), 244-254.
- Patra, A. K. (2017). Prediction of enteric methane emission from cattle using linear and non-linear statistical models in tropical production systems. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 22(4), 629-650.
- Peacock, C. 2005. Goats—A pathway out of poverty. *Small Ruminant Research*, 60(1-2), 179-186.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J. P., ... & Doreau, M. (2014). Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole?. *Innovations agronomiques*, 37, 1-10.
- Pelster, D. E., Gisore, B., Goopy, J., Korir, D., Koske, J. K., Rufino, M. C., & Butterbach-Bahl, K. (2016). Methane and nitrous oxide emissions from cattle excreta on an East African grassland. *Journal of environmental quality*, 45(5), 1531-1539.
- Pelster, D. E., Gisore, B., Goopy, J., Korir, D., Koske, J. K., Rufino, M. C., & Butterbach-Bahl, K. (2016). Methane and nitrous oxide emissions from cattle excreta on an East African grassland. *Journal of environmental quality*, 45(5), 1531-1539.
- Pelster, D. E., Rufino, M. C., Rosenstock, T., Mango, J., Saiz, G., Diaz-Pines, E., ... & Butterbach-Bahl, K. (2015). Smallholder African farms in western Kenya have limited greenhouse gas fluxes. *Biogeosciences Discussions*, 12(18).
- Petersen, S. O., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J., & Sommer, S. G. (2013). Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal*, 7(s2), 266-282.
- Petit, C. (2013). Transitions des exploitations agricoles vers l'agriculture biologique dans un territoire. Approche par les interactions entre systèmes techniques et de commercialisation. Application aux aires d'alimentation de captages en Île-de-France. *Carnets de géographes*, (6).

- Popova, M. (2011). Structure et activité de la communauté des Archaea méthanogènes du rumen en relation avec la production de méthane par les ruminants (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- Porteous, O. (2018). Trade and Agricultural Technology Adoption: Evidence from Africa.
- Poux, X., & Aubert, P. M. (2018). Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. Consulté le 16 novembre 2018 sur : <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Etude/201809-ST0918-tyfa.pdf>
- Powell, J. M., Fernández-Rivera, S., Williams, T. O., & Renard, C. (1995). Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of Sub-Saharan Africa. Technical paper, Addis Ababa Ethiopia.
- Powell, J. M., Pearson, R. A., and Hiernaux, P. H. 2004. Crop–livestock interactions in the West African drylands. *Agronomy journal*, 96 (2), 469-483.
- Powers, W., Auvermann, B., Cole, A., Gooch, C., Grant, R., Hatfield, J., . . . Powell, J. M. (2014). Chapter 5: Quantifying Greenhouse Gas Sources and Sinks in Animal Production Systems. In *Quantifying Greenhouse Gas Fluxes in Agriculture and Forestry: Methods for Entity - Scale Inventory*. Office of the Chief Economist, U.S. Department of Agriculture. Washington. DC.: USDA.
- Powers, W., Auvermann, B., Cole, A., Gooch, C., Grant, R., Hatfield, J., . . . Powell, J. M. 2014. Chapter 5: Quantifying Greenhouse Gas Sources and Sinks in Animal Production Systems. In *Quantifying Greenhouse Gas Fluxes in Agriculture and Forestry: Methods for Entity - Scale Inventory*. Office of the Chief Economist, U.S. Department of Agriculture. Washington. DC. USDA.
- Prasad, K. V. S. V., Khan, A. A., Vellaikumar, S., Devulapalli, R., Ramakrishna Reddy Ch, N. S., & Blümmel, M. (2010). Observations on livestock productivity in sheep fed exclusively on haulms from ten different genotypes of groundnut. *Animal Nutrition and Feed Technology S*, 10, 121-126.
- Preston, T. R., and Leng, R. A. 1987. Matching ruminant production systems with available resources in the tropics and sub-tropics. Penambul Books.
- Probert, M. E., Okalebo, J. R., & Jones, R. K. (n.d.). The use of manure on smallholders' farms in semi-arid eastern Kenya. *Experimental Agriculture*. 31(3), 371-381.
- Pujol, G., looss, B., Janon, A., Gilquin, L., Le Gratiot, L. and Lemaitre, P. (2012). Package `sensitivity': Sensitivity Analysis. R Package Version 1.5.
- Quak, W., Hengsdijk, H., Bakker, E. J., Sissoko, K., & Touré, M. S. (1996). Description agronomique quantitative des systèmes de production végétale en zone Soudano-Sahélienne (No. 28). Wageningen: AB-DLO [etc.].
- Quideau, P. (2010). Synthèse 3. Les effluents d'élevage, les coproduits de traitement et leurs incidences environnementales. In *Elevages et environnement*, Editions Quae. 119-186.
- Qureshi, M. I., Rasli, A. M., & Zaman, K. (2016). Energy crisis, greenhouse gas emissions and sectoral growth reforms: Repairing the fabricated mosaic. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3657-3666.

- Razafimbelo, T. M., Andriamananjara, A., Rafolisy, T., Razakamanarivo, H., Masse, D., Blanchart, E., ... & Albrecht, A. (2018). Impact de l'agriculture climato-intelligente sur les stocks de carbone organique du sol à Madagascar. *Cahiers Agricultures*, 27(3), 35001.
- Reid, R. S., Serneels, S., Nyabenge, M., and Hanson, J. 2005. The changing face of pastoral systems in grass-dominated ecosystems of eastern Africa. *Grasslands of the World*, 19-76.
- Rennie, T. J., Gordon, R. J., Smith, W. N., & VanderZaag, A. C. (2018). Liquid manure storage temperature is affected by storage design and management practices—A modelling assessment. *Agriculture, ecosystems & environment*, 260, 47-57.
- Richard D., Alary V., Corniaux C., Duteurtre G., Lhoste P., 2019. Dynamique des élevages pastoraux et agropastoraux en Afrique intertropicale. Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux. Collection *Agricultures tropicales en poche*. 250 p. + cahier quadri 18 p.
- Richard, D., Doumad, J-Y., Coulon, J-B., Picon-Cochard, C. 2013. Elevages et filières animales. In *S'adapter au changement climatique, Agriculture, écosystèmes et territoires*. Editions Quæ, 107-121 pp.
- Rosenstock, T. S., Lamanna, C., Namoi, N., Arslan, A., & Richards, M. (2019). What Is the Evidence Base for Climate-Smart Agriculture in East and Southern Africa? A Systematic Map. In *The Climate-Smart Agriculture Papers* (pp. 141-151). Springer, Cham.
- Rosenstock, T. S., Rufino, M. C., Butterbach-Bahl, K., & Wollenberg, E. (2013). Toward a protocol for quantifying the greenhouse gas balance and identifying mitigation options in smallholder farming systems. *Environmental Research Letters*, 8(2), 021003.
- Rosenstock, T. S., Sander, B. O., Butterbach-Bahl, K., Rufino, M. C., Hickman, J., Stirling, C., ... & Wollenberg, E. (2016). Introduction to the SAMPLES Approach. In *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* (pp. 1-13). Springer, Cham.
- Roy-Macauley, H., Zougmore, R., Nelson, G. C., & Jalloh, A. (2017). L'agriculture Ouest-Africaine et le changement climatique. *Intl Food Policy Res Inst*.
- Rufino, M. C. (2008). *Quantifying the contribution of crop-livestock integration to African farming*. Wageningen: Wageningen University.
- Rufino, M. C., Atzberger, C., Baldi, G., Butterbach-Bahl, K., Rosenstock, T. S., & Stern, D. (2016). Targeting landscapes to identify mitigation options in smallholder agriculture. In *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* (pp. 15-36). Springer, Cham.
- Rufino, M. C., Rowe, E. C., Delve, R. J., & Giller, K. E. (2006). Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 4(112), 261-282.
- Salah N, Sauvant D and Archimède H 2015. Response of growing ruminants to diet in warm climates: a meta-analysis. *animal* 9, 822-830.
- Salah, N., Sauvant, D., & Archimède, H. (2014). Nutritional requirements of sheep, goats and cattle in warm climates: a meta-analysis. *animal*, 8(9), 1439-1447.

- Saltelli, A., Chan, K., & Scott, M. (2000). Sensitivity analysis. Probability and statistics series. *John and Wiley & Sons, New York*.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley & Sons.
- Saltelli, A., Tarantola, S., & Chan, K. S. (1999). A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, 41(1), 39-56.
- Saltelli, Andrea. (2002). Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis* 22 (3): 579–590.
- Sangaré, M., Bationo, A., Hiernaux, P., & et Fernandez-Rivera, S. (2002). Effect of type and level roughage offered to sheep and urine addition on compost quality and millet growth and production in the Sahel. *Nutrient cycling in Agroecosystems*. (62), 203-208.
- Sankaran, M., Hanan, N. P., Scholes, R. J., Ratnam, J., Augustine, D. J., Cade, B. S., ... & Ardo, J. (2005). Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, 438(7069), 846.
- Saporta, G. (2006). *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip
- Sauvant, D. (1992). La production de méthane dans la biosphère : le rôle des animaux d'élevage. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA* numéro 18. pp. 65-70.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S., Engène, M. (2018). Chapitre 14 : Emission de méthane entérique. In *Alimentation des ruminants, Apports nutritionnels – Besoins et réponses des animaux Rationnement – Tables des valeurs des aliments*, Editions Quæ. 243-249.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S., Peyraud, J.-L. 2018. Emissions de méthane entérique. In *INRA 2018. Alimentation des ruminants, Apports nutritionnels-Besoins et réponses des animaux, Rationnement-Tables des valeurs des aliments*, Éditions Quæ, Versailles, France, Chapitre 2, p. 243-245.
- Sauvant, D., Giger-Reverdin, S., Serment, A., & Broudiscou, L. (2011). Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *Productions Animales*, 24(5), 433.
- Savadogo, P., Tiveau, D., Sawadogo, L., & Tigabu, M. (2008). Herbaceous species responses to long-term effects of prescribed fire, grazing and selective tree cutting in the savanna-woodlands of West Africa. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 10(3), 179-195.
- Scherr, S. J., Shames, S., & Friedman, R. (2012). From climate-smart agriculture to climate-smart landscapes. *Agriculture & Food Security*, 1(1), 12.
- Schlecht E, Blümmel M and Becker K 1999. The influence of the environment on feed intake of cattle in semi-arid Africa. Regulation of feed intake'. (Eds D Van der Heide, EA Huisman, E Kanis, JWM Osse), *MWA Versteegen* 19, 167-185.
- Schneider, G., & Fast, V. (2017). Mapping the growing capacity of climate smart food in urban environments. *Canadian Food Studies/La Revue canadienne des études sur l'alimentation*, 4(2), 4-24.
- Sebillotte, M., & Meynard, J. M. (1990). Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. *Nitrates, agriculture, eau*, Paris, INRA, 289-312.

- Seck, M., Marshall, K., & Fadiga, M. L. (2016). Cadre de politique pour le développement de la filière laitière au Sénégal. Accessible sur : https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/80672/senegal_dairy_pr_fr.pdf?sequence=3.
- Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark. Available online at: www.ccafs.cgiar.org
- Sedogo, M. P. (1993). Evolution des sols ferrugineux tropicaux lessivés sous cultures : influence des modes de gestion sur la fertilité. Abidjan : Université Nationale de Côte d'Ivoire.
- Sejian V, Samal L, Haque N, Bagath M, Hyder, I, Maurya VP, ... Lal R 2015. Overview on Adaptation, Mitigation and Amelioration Strategies to Improve Livestock Production Under the Changing Climatic Scenario. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (Vol. 22, pp. 359-397). Springer India.
- Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J. B., Dunshea, F. R., & Lacetera, N. (2018). Adaptation of animals to heat stress. *animal*, 1-14.
- Sejian, V., Prasad, R. S., Lees, A. M., Lees, J. C., Al-Hosni, Y. A., Sullivan, M. L., & Gaughan, J. B. (2018). Assessment of the carbon footprint of four commercial dairy production systems in Australia using an integrated farm system model. *Carbon Management*, 9(1), 57-70.
- Sejian, V., Samal, L., Haque, N., Bagath, M., Hyder, I., Maurya, V. P., ... and Lal, R. 2015. Overview on adaptation, mitigation and amelioration strategies to improve livestock production under the changing climatic scenario. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 359-397). Springer, New Delhi.
- Selbie, D. R., Buckthought, L. E., & Shepherd, M. A. (2015). The challenge of the urine patch for managing nitrogen in grazed pasture systems. In *Advances in agronomy* (Vol. 129, pp. 229-292). Academic Press.
- Séré C and Steinfeld S 1996. World livestock production systems: current status, issues and trends. FAO Animal Production and Health Paper 127. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Séré, C., et M. Herrero. 2012. « Le rôle de l'élevage pour les pays ACP: défis et opportunités futurs Briefings de Bruxelles sur le développement ». Briefing n° 12. Bruxelles, Belgique: CTA.
- Séré, C., Steinfeld, H., & Groenewold, J. (1996). *World livestock production systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Serpantié, G., Ouattara, B., Louppe, D., Sougafara, B., Gnahoua, G. M., Ouattara, N., ... & Mallet, B. (2001). Fertilité et jachères en Afrique de l'Ouest. *La jachère en Afrique tropicale. De la jachère naturelle à la jachère améliorée. Le point des connaissances*, 21-83.
- Seye, C. S. 1993. La Stabulation fumièrre comme facteur de développement de la traction animale en zone cotonnière du Sénégal. *Research for Development of Animal Traction in West*, 157.
- Shibata M and Terada F 2010. Factors affecting methane production and mitigation in ruminants. *Animal Science Journal* 81, 2-10.
- Sib, O., Bougouma-Yameogo, V. M., Blanchard, M., Gonzalez-Garcia, E., & Vall, E. (2018). Production laitière à l'ouest du Burkina Faso dans un contexte d'émergence

de laiteries: diversité des pratiques d'élevage et propositions d'amélioration. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 70(3), 81-91.

- Sieza, Y., Gomgnimbou, A. P., Serme, I., & Belem, A. (2019). Etude de la variabilité climatique sur la dynamique d'occupation et d'utilisation des terres à des fins agropastorales dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(4), 1980-1994.
- Sileshi, G. W., Jama, B., Vanlauwe, B., Negassa, W., Harawa, R., Kiwia, A., & Kimani, D. (2019). Nutrient use efficiency and crop yield response to the combined application of cattle manure and inorganic fertilizer in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1-19.
- Sissokho MM 1998. Cattle herd dynamics and performance under village husbandry in the Kolda region (Southern Senegal). MSc thesis, Oregon State University, Oregon, USA.
- Slovenia NIR. (2018). Accessed June 6, 2019 at: <https://unfccc.int/documents/65714>
- Smale, M., Byerlee, D., & Jayne, T. (2013). Maize revolutions in sub-Saharan Africa. In *An African green revolution*. Springer, Dordrecht., 165-195.
- Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 282-292.
- Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D. D., Honda, Y., Liu, Q., ... and Sauerborn, R. (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Smith, P., & Olesen, J. E. (2010). Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(5), 543-552.
- Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., ... et Ravindranath, N. H. 2014. Chapter 11 Agriculture forestry other land use AFOLU in: climate change 2014 mitigation of climate change IPCC Working Group III Contribution to AR5 (Cambridge: Cambridge University Press)
- Sommer, S. G., Olesen, J. E., Petersen, S. O., Weisbjerg, M. R., Valli, L., Rodhe, L., & Béline, F. (2009). Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Global Change Biology*, 15(12), 2825-2837.
- Sonko M.L., 1986. Méthodologie de l'étude des pratiques traditionnelles de fumure animale. L'exemple de la démarche adoptée par l'ISRA en Basse Casamance. In : LANDAIS E., FAYE J., éd. Méthodes pour la recherche sur les systèmes d'élevage en Afrique intertropicale. Actes de l'atelier ISRA de Mbour, Sénégal, 2-8 février 1986. Maisons-Alfort, IEMVT-CIRAD, p. 413-428 (Etudes et synthèses de l'IEMVT, no20).
- Soren, N. M., Sejian, V. and Malik, P. K. 2015. Enteric methane emission under different feeding systems. In *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 187-208). Springer, New Delhi.
- Soussana, J. F. (2013). S'adapter au changement climatique : Agriculture, écosystèmes et territoires. Editions Quae. 299 p.

- Soussana, J. F., Graux, A. I., & Tubiello, F. N. (2010). Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of experimental botany*, 61(8), 2217-2228.
- Sow, I., S. R., Denis, J., Trail, J., Thiongane, P., Mbaye, M., & Diallo. 1988. (1988). Productivité du zébu Gobra au Centre de Recherches Zootechniques de Dahra (Senegal). Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, Recherches Sante et Productions Animales. Unival.
- Sow, M., Hély, C., Mbow, C., & Sambou, B. (2013). Fuel and fire behavior analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas. *Journal of arid environments*, 89, 84-93.
- Sowande, O. S., and Sobola, O. S. 2008. Body measurements of West African dwarf sheep as parameters for estimation of live weight. *Tropical Animal Health and Production*, 40(6), 433-439.
- Stefanovic, J. O., Yang, H., Zhou, Y., Kamali, B., & Ogalleh, S. A. (2017). Adaption to climate change: a case study of two agricultural systems from Kenya. *Climate and Development*, 1-19.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales Mendez, M., & De Haan, C. (2009). L'ombre portée de l'élevage : impacts environnementaux et options pour leur atténuation. FAO, Rome, 464 p.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & De Haan, C. (2006). Livestock's long shadow. Environmental issues and options. FAO, Rome.
- Stocker, T F. 2013. The Closing Door of Climate Targets. *Science*. 339: 280-82
- Storm, I. M., Hellwing, A. L. F., Nielsen, N. I., & Madsen, J. (2012). Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. *Animals*, 2(2), 160-183.
- Sultan, B., & Gaetani, M. (2016). Agriculture in West Africa in the twenty-first century: Climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1262.
- Sylla, M. B., Elguindi, N., Giorgi, F., & Wisser, D. (2016). Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change*, 134(1-2), 241-253.
- Talleg, T., Klumpp, K., Hensen, A, Rochette, Y., and Soussana, J.-F. 2012. Methane emission measurements in cattle grazed pasture: a comparison of four methods. *Biogeosciences*, 9, 14407-14436.
- Taugourdeau, S., Daget, P., Chatelain, C., Mathieu, D., Juanes, X., Huguenin, J., & Ickowicz, A. (2019). FLOTROP, a massive contribution to plant diversity data for open ecosystems in northern tropical africa. *Scientific data*, 6(1), 118.
- Tavendale, M. H., Lane, G. A., Schreurs, N. M., Fraser, K., and Meagher, L. P. 2006. The effects of condensed tannins from *Dorycnium rectum* on skatole and indole ruminal biogenesis for grazing sheep. *Australian journal of agricultural research*, 56(12), 1331-1337.
- Team, R. C. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved December 24, 2018, from <https://www.r-project.org>.

- Teenstra, E. D., Vellinga, T. V., Aktasaeng, N., Amatayaku, W., Ndambi, A., Pelster, D., ... & Andeweg, K. (2014). Global assessment of manure management policies and practices (No. 844). Wageningen UR Livestock Research.
- Thébaud, B. (2002). *Foncier pastoral et gestion de l'espace au Sahel: Peuls du Niger oriental et du Yagha burkinabé*. KARTHALA Editions.
- Thewis, A., A. Bourbouze, R. Compère, J. M. Duplan, et J. Hardouin. 2005. Manuel de zootechnie comparée Nord-Sud. ISSN (INRA):1144-7605. Editions Quae.
- Thornton, P. K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., & Herrero, M. (2009). The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural systems*, 101(3), 113-127.
- Tilman D and Clark M 2015. Food, Agriculture and the environment: Can we feed the world and save the Earth? *Daedalus* 144, 8-23.
- Tomkins, N. W., Denman, S. E., Pilajun, R., Wanapat, M., McSweeney, C. S., & Elliott, R. (2015). Manipulating rumen fermentation and methanogenesis using an essential oil and monensin in beef cattle fed a tropical grass hay. *Animal Feed Science and Technology*, 200, 25-34.
- Tongwane, M. I., & Moeletsi, M. E. (2018). A review of greenhouse gas emissions from the agriculture sector in Africa. *Agricultural Systems*, 166, 124-134.
- Torquebiau, E. (2017). Le changement climatique, un défi pour la recherche : l'exemple de l'initiative «4‰ ». *OCL*, 24(1), D108.
- Totin, E., Segnon, A., Schut, M., Affognon, H., Zougmore, R., Rosenstock, T., & Thornton, P. (2018). Institutional Perspectives of Climate-Smart Agriculture: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(6), 1990.
- Touré, S. F., Michalet-Doreau, B., Traoré, E., Friot, D., & Richard, D. (1998). Occurrence of digestive interactions in tree forage-based diets for sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 74(1), 63-78.
- Traore, K., & Stroosnijder, I. (2005). Sorghum quality, organic matter amendments and health; farmers' perception in Burkina Faso, West Africa. *Ecology of Food and Nutrition*. 44(3), 225–245.
- Tubiello, F. N., Córdor-Golec, R. D., Salvatore, M., Piersante, A., Federici, S., Ferrara, A., ... & Jacobs, H. (2015). Estimating greenhouse gas emissions in agriculture: a manual to address data requirements for developing countries. *Estimating greenhouse gas emissions in agriculture: a manual to address data requirements for developing countries*.
- Turner, M. D., McPeak, J. G., & Ayantunde, A. (2014). The role of livestock mobility in the livelihood strategies of rural peoples in semi-arid West Africa. *Human Ecology*, 42(2), 231-247.
- UK NIR. (2018). Accessed August 22, 2019 at: <https://unfccc.int/documents/65762>
- Valentini, R., Arneth, A., Bombelli, A., Castaldi, S., Cazzolla Gatti, R., Chevallier, F., ... and Houghton, R. A. 2014. A full greenhouse gases budget of Africa: synthesis, uncertainties, and vulnerabilities. *Biogeosciences*, 11, 381-407.
- Vall, E., Diallo, M. A., Vigne, M., Bénégabou, I., Vayssières, J., Ba, A., ... & Blanchard, M. (2015). Les facettes agroécologiques de l'élevage des ruminants en Afrique de l'Ouest et du Centre.

- van der Werf, H. M. G., Kanyarushoki, C., & Corson, M. S. (2011). L'Analyse de Cycle de Vie : un nouveau regard sur les systèmes de production agricole. *Innovations agronomiques*, 12, 121-133.
- van der Werf, H. M., Kanyarushoki, C., & Corson, M. S. (2009). An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of environmental management*, 90(11), 3643-3652.
- Van Lingen, H. J., Niu, M., Kebreab, E., Valadares Filho, S. C., Rooke, J. A., Duthie, C. A., ... & Eugène, M. (2019). Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283, 106575.
- Van Lingen, H. J., Niu, M., Kebreab, E., Valadares Filho, S. C., Rooke, J. A., Duthie, C. A., ... & Eugène, M. (2019). Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283, 106575.
- Vanlauwe, B., Wendt, J., Giller, K. E., Corbeels, M., Gerard, B., & Nolte, C. (2014). A fourth principle is required to define conservation agriculture in sub-Saharan Africa: the appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity. *Field Crops Research*, 155, 10-13.
- Vayssières, J., & Rufino, M. C. (2012). Managing Nutrients Cycles in Crop and Livestock Systems with Green Technologies. *Food Engineering Series*, 7, 151-182.
- Vayssières, J., Thevenot, A., Vigne, M., Cano, M., Broc, A., Bellino, R., ... & Lecomte, P. (2011). Evaluation des inefficiences zootechnique et environnementale pour intensifier écologiquement les systèmes d'élevage tropicaux. Etude de cas à la Réunion. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 64(1-4), 73-79.
- Vermeulen, S., Zougmore, R., Wollenberg, E., Thornton, P., Nelson, G., Kristjanson, P., ... & Campbell, B. (2012). Climate change, agriculture and food security: a global partnership to link research and action for low-income agricultural producers and consumers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), 128-133.
- Vermorel, M., Jouany, J. P., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., & Dourmad, J. Y. (2008). Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Prod. Anim*, 21(5), 403-418.
- Vidal, P., & Fauche, J. (1962). Quelques aspects de la dynamique des éléments minéraux d'un sol dior soumis à différentes jachères. *Agron., Trop.* 828-840.
- Vieira, D. C. S., Fernández, C., Vega, J. A., & Keizer, J. J. (2015). Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology*, 523, 452-464
- Vigan, A. (2013). Trajectoire sur 15 ans et durabilité du terroir agro-pastoral de Sare Yero Bana : une approche par les flux de biomasse et d'azote. Mémoire d'ingénieur agronome, ISA, Lille.
- Vigne, M., Avadi Tapia, A. D., Corson, M. S., Vayssières, J., & Wassenaar, T. (2017). Évaluer la capacité des systèmes de production à répondre aux enjeux du développement durable des territoires. In *Des territoires vivants pour transformer le monde*, 207.

- Vigne, M., Blanfort, V., Vayssières, J., Lecomte, P., & Steinmetz, P. (2015). Contraintes sur l'élevage dans les pays du Sud : les ruminants entre adaptation et atténuation. Torquebiau E. Changement climatique et agricultures du monde. Collection Agricultures et défis du monde, Cirad-AFD. Editions Quae, 123-136.
- Vilain, L. (2008). La méthode IDEA : indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. Educagri éditions.
- Vlaming, J. B. (2008). Quantifying variation in estimated methane emission from ruminants using the SF6 tracer technique. A Thesis of Doctor of Philosophy in Animal Science. Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Wade, C., Vayssières, J., Thiam M., Faye A., Diaw M.T., Dieng A., Lecomte, P. 2018. Effet de l'intensification de l'élevage et d'une gestion améliorée de la fumure animale sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en systèmes mixtes agriculture-élevage au centre du Sénégal. In : Abstracts of the 3R - Rencontres Recherches Ruminants. Paris, France, 5-6 Décembre 2018.
- Weltin, M., Zasada, I., Piorr, A., Debolini, M., Geniaux, G., Perez, O. M., ... & Schulp, C. J. (2018). Conceptualising fields of action for sustainable intensification—A systematic literature review and application to regional case studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 257, 68-80.
- Werner, P. A. (2012). Growth of juvenile and sapling trees differs with both fire season and understorey type: Trade-offs and transitions out of the fire trap in an Australian savanna. *Austral Ecology*, 37(6), 644-657.
- White, S. L., Sheffield, R. E., Washburn, S. P., King, L. D., & Green, J. T. (2001). Spatial and time distribution of dairy cattle excreta in an intensive pasture system. *Journal of environmental quality*, 30(6), 2180-2187.
- Wilbanks, T. J., Kane, S. M., Leiby, P. N., Perlack, R. D., Settle, C., Shogren, J. F., & Smith, J. B. (2003). Possible responses to global climate change: integrating mitigation and adaptation. *Environment: Science and policy for sustainable development*, 45(5), 28-38.
- Wilkerson, V. A., Casper, D. P., & Mertens, D. R. (1995). The Prediction of Methane Production of Holstein Cows by Several Equations¹. *Journal of Dairy Science*, 78(11), 2402-2414.
- Wilkes, A., Reisinger, A., Wollenberg, E. and van Dijk, S. (2017). Measurement, reporting and verification of livestock GHG emissions by developing countries in the UNFCCC: current practices and opportunities for improvement. CCAFS Report No. 17. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS) and Global Research Alliance for Agricultural Greenhouse Gases (GRA).
- Wilkes, A., Reisinger, A., Wollenberg, E., & van Dijk, S. (2017). Measurement, reporting and verification of livestock GHG emissions by developing countries. Consulté le 29 novembre sur: https://cgispace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/89335/CCAFS_Report17.pdf
- Wilson R. T., 1988. Small ruminants production systems in tropical Africa. *Small Ruminant Research*, 1 (4): 305-325.
- Winiwarter, W., & Muik, B. (2010). Statistical dependence in input data of national greenhouse gas inventories: effects on the overall inventory uncertainty. In *Greenhouse Gas Inventories* (pp. 19-36). Springer, Dordrecht.

- Woomer, P. L., Touré, A., & Sall, M. (2004). Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *Journal of arid environments*, 59(3), 499-510.
- World Resources Institute, 2005. Earth trends, Agriculture and food, Table data base. http://pdf.wri.org/wrr05_dt_all.pdf.
- Wu, S. J., & Hsu, C. T. (2018). Modeling of uncertainty for flood wave propagation induced by variations in initial and boundary conditions using expectation operator on explicit numerical solutions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 113(9), 1447-1465.
- Xu, R., Tian, H., Pan, S., Prior, S. A., Feng, Y., Batchelor, W. D., ... & Yang, J. (2019). Global ammonia emissions from synthetic nitrogen fertilizer applications in agricultural systems: Empirical and process-based estimates and uncertainty. *Global change biology*, 25(1), 314-326.
- Yan, T., Agnew, R. E., Gordon, F. J., & Porter, M. G. (2000). Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets. *Livestock Production Science*, 64(2-3), 253-263.
- Zahradeen, D., Butswat, I. S. R., and Mbat, S. T. 2009. A note on factors influencing milk yield of local goats under semi-intensive system in Sudan savannah ecological zone of Nigeria. *Livestock Research and Rural Development*, 21(3), 34. Available at: <https://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd21/3/zahr21034.htm>
- Zaman, M., Saggat, S., Blennerhassett, J. D., & Singh, J. (2009). Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(6), 1270-1280.
- Zhang, J., Zhuang, M., Shan, N., Zhao, Q., Li, H., & Wang, L. (2019). Substituting organic manure for compound fertilizer increases yield and decreases NH₃ and N₂O emissions in an intensive vegetable production systems. *Science of The Total Environment*.
- Zhu, B., Kros, J., Lesschen, J. P., Staritsky, I. G., & de Vries, W. (2016). Assessment of uncertainties in greenhouse gas emission profiles of livestock sectors in Africa, Latin America and Europe. *Regional Environmental Change*, 16(6), 1571-1582.
- Zhu, Y., Merbold, L., Pelster, D., Diaz-Pines, E., Wanyama, G. N., & Butterbach-Bahl, K. (2018). Effect of dung quantity and quality on greenhouse gas fluxes from tropical pastures in Kenya. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(10), 1589-1604.
- Zimmerman, P. R. (1993). U.S. Patent No. 5,265,618. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Zougmore, R. (2018). Promoting Climate-Smart Agriculture Through Water and Nutrient Interactions Options in Semi-arid West Africa: A Review of Evidence and Empirical Analysis. In *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients Through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro-Ecosystems* (pp. 249-263). Springer, Cham.
- Zougmore, R. B., Partey, S. T., Ouédraogo, M., Torquebiau, E., and Campbell, B. M. 2018. Facing climate variability in sub-Saharan Africa: analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks. *Cahiers Agricultures (TSI)*, 27(3).

Zoundi, J. S., Lalaba, A., Tiendrebeogo, J. P., & Bambara, D. (2007). Systèmes de cultures améliorés à base de niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) pour une meilleure gestion de la sécurité alimentaire et des ressources naturelles en zone semi-aride du Burkina Faso. *Tropicultura*. (25), 87-96.



ANNEXE

Annexe chapitre 3

Supplementary Material

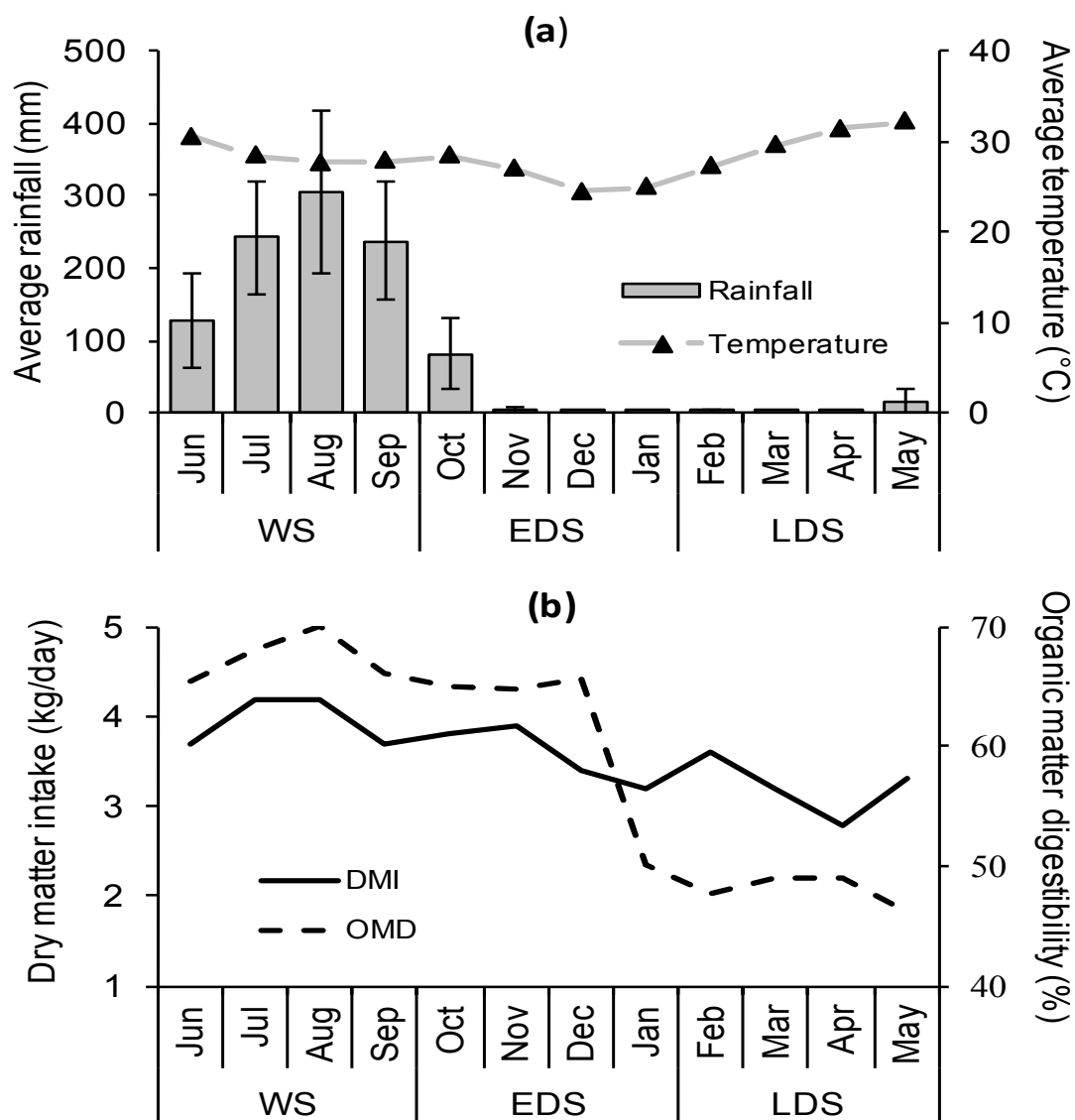


Figure A. 1 : Average monthly rainfall and ambient temperatures between 1980 and 2016, Dry matter intake and organic matter digestibility observed in the study area, Kolda. Data are from Service de Météorologie Nationale and the Centre de Recherches Zootechniques de Kolda database

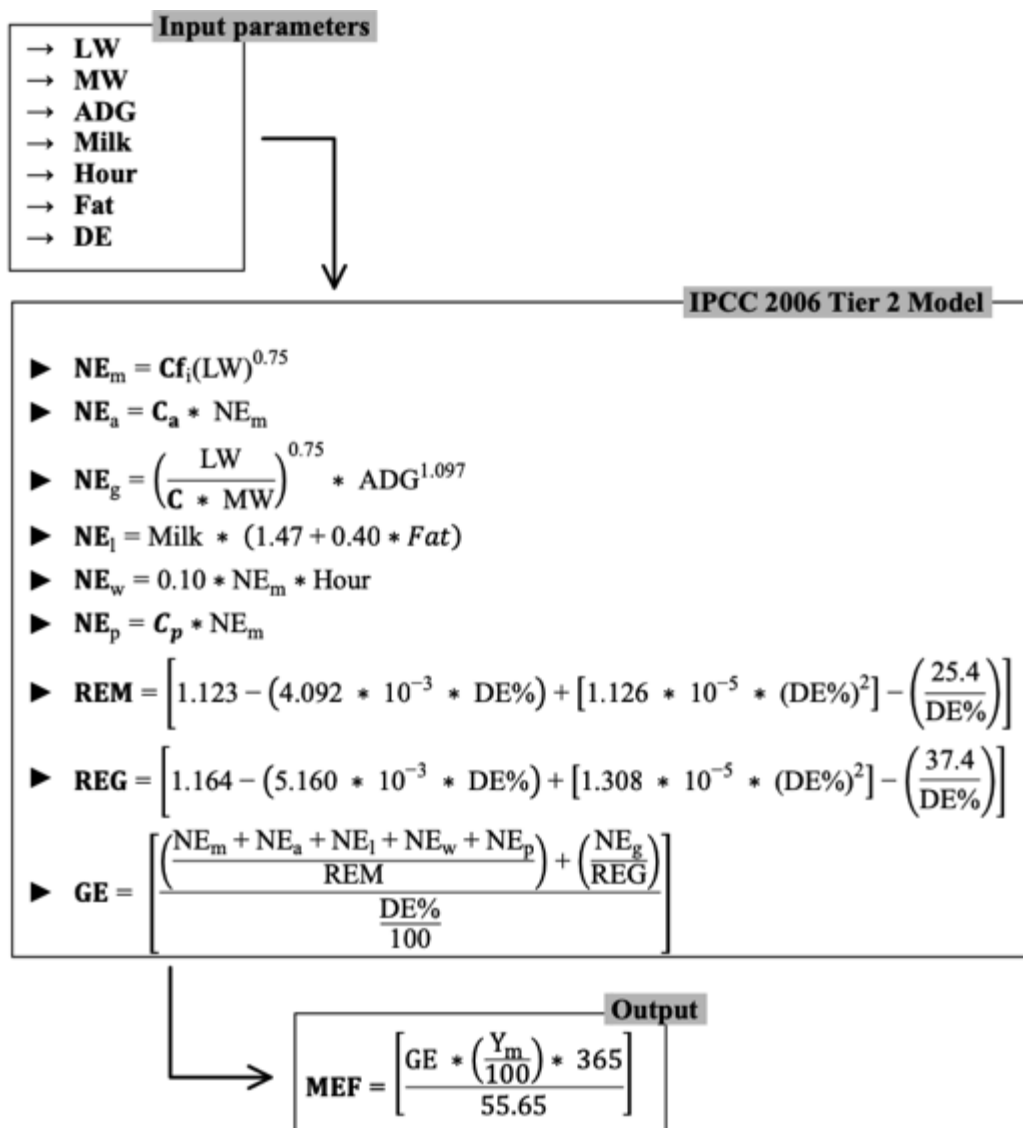


Figure A. 2 : Organization of the Tier 2 IPCC 2006 model for enteric methane emission factor estimate. Various information (input parameters) related to the livestock system should be gathered hence implemented to different equations in order to calculate energy requirement at each stage (e.g. maintenance, work). Thus, the gross energy intake allows to predict the enteric methane emission factor, with regard to the methane conversion rate and the value of energy content of methane

Annexe chapitre 4

Supplementary information

List of equations used to estimate enteric emission factor for small ruminants

Net energy for Maintenance (2006 IPCC Guidelines, Equation 10.3)

$$NE_m = Cf_i(\text{Weight})^{0.75}$$

Where:

NE_m = net energy required by the animal for maintenance, MJ day⁻¹

Cf_i = a coefficient which varies for each animal category as shown in Table 10.4 (Coefficients for calculating NE_m), MJ day⁻¹kg⁻¹

Weight = live weight of animal, kg

Net Energy for Activity (2006 IPCC Guidelines, Equation 10.5)

$$NE_a = C_a * \text{weight}$$

Where:

NE_a = net energy for animal activity, MJ day⁻¹

C_a = coefficient corresponding to animal's feeding situation, MJ day⁻¹kg⁻¹ (Table 10.5, Activity coefficients)

weight = liveweight of animal, kg

Net Energy for Growth (2006 IPCC Guidelines, Equation 10.7)

$$NE_g = \frac{WG_{lamb}(a + 0.5b (BW_i + BW_f))}{365}$$

Where:

NE_g = net energy needed for growth, MJ day⁻¹

BW_i = the average live body weight of the animals at weaning, kg

WG_{lamb} = the average weight gains (BW_f-BW_i), kg yr⁻¹

BW_f = the average live body weight at slaughter, kg

a, b = constants described in table 10.6

Net Energy for Lactation (2006 IPCC Guidelines, Equation 10.9)

$$NE_l = \text{Milk} * EV_{\text{milk}}$$

Where:

NE_l = net energy for lactation, MJ day⁻¹

Milk = amount of milk produced, kg of milk day⁻¹

EV_{milk} = A default value of 4.6MJ/kg which corresponds to a milk fat content of 7% by weight

Net Energy for Pregnancy (2006 IPCC Guidelines, Equation 10.13)

$$NE_p = C_p * NE_m$$

Where:

NE_p = net energy required for pregnancy, $MJ\ day^{-1}$

C_p = pregnancy coefficient (see Table 10.7)

NE_m = net energy required by the animal for maintenance (Equation 10.3), $MJ\ day^{-1}$

Ratio of net energy available in diet for maintenance to digestible energy consumed (REM) (2006 IPCC Guidelines Equation 10.14)

$$REM = \left[1.123 - (4.092 * 10^{-3} * DE\%) + [1.126 * 10^{-5} * (DE\%)^2] - \left(\frac{25.4}{DE\%} \right) \right]$$

Where

REM = ratio of net energy available in a diet for maintenance to digestible energy consumed

DE% = digestible energy expressed as a percentage of gross energy

Ratio of net energy available for growth in a diet to digestible energy consumed (REG) (2006 IPCC Guidelines Equation 10.15)

$$REG = \left[1.164 - (5.160 * 10^{-3} * DE\%) + [1.308 * 10^{-5} * (DE\%)^2] - \left(\frac{37.4}{DE\%} \right) \right]$$

Where:

REG = ratio of net energy available for growth in a diet to digestible energy consumed

DE% = digestible energy expressed as a percentage of gross energy

Gross Energy (2006 IPCC Guidelines Equation 10.16)

$$GE = \left[\frac{\left(\frac{NE_m + NE_a + NE_l + NE_w + NE_p}{REM} \right) + \left(\frac{NE_g}{REG} \right)}{\frac{DE\%}{100}} \right]$$

Where:

GE = gross energy, MJ day⁻¹

NE_m = net energy required by the animal for maintenance (Equation 10.3), MJ day⁻¹

NE_a = net energy for animal activity (Equations 10.4 and 10.5), MJ day⁻¹

NE_l = net energy for lactation (Equations 10.8, 10.9, and 10.10), MJ day⁻¹

NE_w = net energy for work (Equation 10.11), MJ day⁻¹

NE_p = net energy required for pregnancy (Equation 10.13), MJ day⁻¹

REM = ratio of net energy available in a diet for maintenance to digestible energy consumed (Equation 10.14)

NE_g = net energy needed for growth (Equations 10.6 and 10.7), MJ day⁻¹

REG = ratio of net energy available for growth in a diet to digestible energy consumed (Equation 10.15)

DE% = digestible energy expressed as a percentage of gross energy

Emission Factor (2006 IPCC Guidelines Equation 10.21)

$$EF = \left[\frac{GE * \left(\frac{Y_m}{100} \right) * 365}{55.65} \right]$$

Where:

EF = emission factor, $\text{kg CH}_4 \text{ head}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

GE = gross energy intake, $\text{MJ head}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

Y_m = methane conversion factor, per cent of gross energy in feed converted to methane

The factor $55.65 \text{ (MJ (kg CH}_4\text{)}^{-1})$ is the energy content of methane

Etude des pratiques de gestion des fumiers par les agroéleveurs de la zone de Vélingara, Kolda

Ce travail a été présenté lors des premières journées scientifiques de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles. La présentation est intitulée :

Etude des pratiques de gestion des fumiers par les agroéleveurs de la zone de Vélingara, Kolda.

Il repose sur des données collectées à travers des enquêtes de terrain. Les investigations ont été menées dans plusieurs localités du département de Vélingara, bassin cotonnier de la région de Kolda. Ces zones présentent des différences en termes de dynamique d'intensification des systèmes de productions animales avec l'établissement de nombreuses structures de développement.

L'étude fait le point sur les différents systèmes d'alimentation des vaches en stabulation pendant la saison sèche, les systèmes de gestion des fumiers qui proviennent des étables et les possibles effets de ces pratiques sur l'atelier de production végétale.

Résumé

L'intensification des systèmes de production agricole a favorisé l'augmentation de la productivité agricole, mais elle a aussi modifié la relation étroite entre les cultures et l'élevage. Cette dynamique d'intensification laisse aujourd'hui présager un surplus d'azote, des difficultés à recycler ce nutriment, et donc d'éventuels impacts négatifs sur l'environnement (pollutions des eaux de surface, émissions d'ammoniac (NH_3) et de protoxyde d'azote (N_2O)). Dès lors, il s'impose d'instaurer des pratiques agricoles productives et respectueuses de l'environnement tout en mettant un accent particulier sur la gestion durable de la matière organique (MO) dans les agrosystèmes. Dans ce contexte, des entretiens ont été conduits auprès de 50 agroéleveurs choisis de manière raisonnée dans six communes du département de Vélingara, Kolda. L'étude avait pour objectifs de i) diagnostiquer les systèmes de gestion des fumiers produits dans les étables de la zone de Vélingara, et ii) estimer les proportions de fumiers gérées sur la base des chaînes de gestion des fumiers identifiées. Les informations collectées l'ont été à différents niveaux : agroéleveur (identité, commune, village d'origine, effectif main-d'œuvre...) ; animal (effectif troupeau, proportion des vaches, effectif autres espèces) ; aliment (conduite alimentaire, type et quantité d'aliment concentré distribué par jour, type de fourrage distribué...) ; étable (modèle d'étable, temps de présence des vaches, usage et type de litière) ; fumier (fréquence de raclage, composition, mode et temps de stockage, traitement, destination, mode et période d'épandage). Nos enquêtes révèlent une absence de plancher en dur dans la majorité des étables (90 %), ce qui favorise des risques de pollution des eaux souterraines par le nitrate (NO_3^-) contenu dans les déjections. En outre, 45 % des agroéleveurs associent les foin d'arachide (FA) et de niébé (FN) alors que 35 % mobilisent les FA et les résidus de cultures de céréales. Les agroéleveurs utilisent principalement de l'aliment concentré mixte : 50 % associent la graine de coton (GC) aux différents sons de céréales (SC). D'autres stratégies d'alimentation, comme la GC seule (22 %) et les SC (16 %), sont aussi utilisées. Les résultats montrent également de fortes probabilités de perte par volatilisation ammoniacale (NH_3) des fumiers produits, même si à l'échelle des exploitations, la fraction gérée est faible (2 %). En effet, 76 % des agroéleveurs ne couvrent pas leur tas de fumier durant la phase de stockage. Dans 80 % des cas, les fumiers sont entreposés pendant plus de 3 mois et l'enfouissement au moment de l'épandage n'est pas pratiqué. Les fumiers sont principalement destinés aux champs de maïs (71 %). En somme, ces résultats montrent que les interventions futures dans ces localités doivent être axées sur l'amélioration de la gestion de la MO provenant des étables. Cette démarche permettrait de minimiser les émissions gazeuses et le gaspillage de la ressource azotée dans ces terroirs.

Introduction

Le développement de l'agriculture dans le monde, et en particulier le développement des systèmes de production animale dans les pays d'Afrique subsaharienne (ASS), a été largement débattu cette dernière décennie. En effet, si les services rendus (valorisation des territoires, création d'emplois, augmentation de revenus, etc.) par l'élevage sont avérés, sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre (GES) est soulignée dans plusieurs rapports d'institutions internationales (Steinfeld et al., 2006 ; Gerber et al., 2013).

Parallèlement, la population mondiale devrait augmenter de plus d'un tiers d'ici 2050 (Martins et al., 2018). Cette progression devrait concerner davantage les pays en développement, notamment ceux d'ASS (FAO, 2009) où les productions agricoles sont déjà insuffisantes (Lairez et al., 2015) et où les sols sont pauvres en matières organiques et fertilisantes (Powell et al., 1995 ; Rufino et al., 2006). Cette situation découle du fait que les systèmes de production d'ASS sont caractérisés par une faible utilisation d'intrants azotés (Porteous, 2018 ; Jayne et al., 2019). Pour la restauration de la fertilité des sols dans cette région, les exploitations agricoles comptent davantage sur la fumure organique animale (Grillot et al., 2018 ; Sileshi et al., 2019). La valeur fertilisante de cette matière organique varie en fonction de plusieurs facteurs intervenant dans les différentes étapes de son processus de production (p. ex. aliments distribués, litière), de gestion (Ganry et Badiane 1998, Rufino et al., 2006), de stockage et d'épandage. Des études antérieures (Ly et al., 1997) menées en Haute-Casamance et en Afrique soudano-sahélienne (Berger, 1996) ont montré que les fumiers épandus dans les parcelles de cultures sont de qualité agronomique médiocre et de quantité insuffisante.

Dans un contexte d'amélioration des performances des systèmes de production pour l'instauration d'une autosuffisance alimentaire et la préservation de l'environnement, la plupart des études se sont davantage focalisées sur la transition vers l'utilisation d'engrais synthétiques (p. ex. engrais NPK) que sur l'amélioration en qualité et en quantité des fumiers, principale source d'amendement organique disponible dans les exploitations agricoles familiales des régions d'ASS (Ayantunde et al., 2018 ; Easter et al., 2018).

Face à la croissance forte des productions de lait et de viande attendue dans les pays du Sud (Steinfeld et al., 2006 ; Gerber et al., 2013), à la dynamique d'intensification des systèmes de productions animales et à la nécessité d'intégrer l'évaluation d'impacts environnementaux pour concevoir des systèmes de production durables (FAO, 2010), il apparaît utile de mener une étude sur les systèmes de gestion des fumiers pour avoir une meilleure connaissance des pratiques paysannes. Cette démarche devrait permettre de satisfaire durablement les besoins alimentaires des populations en constante augmentation et favoriser des écosystèmes sains dans un contexte de changement climatique.

L'hypothèse de la présente étude est qu'une variété de gestion de la matière organique présage une différence en matière d'efficacité environnementale (c.-à-d. la production agricole rapportée à la quantité de gaz émise) et agronomique des

exploitations, donc des voies d'amélioration des systèmes de production de la zone d'étude.

Cette étude a deux objectifs :

Dans un premier temps, il s'agit de diagnostiquer les systèmes de gestion des fumiers produits dans les étables de la zone de Vélingara.

Ensuite, à partir de l'estimation des quantités de fumier produites par les animaux, des fractions gérées dans les systèmes de gestion des fumiers identifiés seront proposées.

Méthodologie

Présentation de la zone d'étude

Le département de Vélingara fait partie de la région administrative de Kolda, Sénégal (Figure A.3). Le climat est de type soudano-guinéen avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1003 ± 198 mm (ISRA-CRZ Kolda, relevés pluviométriques enregistrés entre 1980 et 2016).

La saison pluvieuse s'étale de juin à octobre avec des précipitations maximales enregistrées entre août et septembre. La saison sèche couvre la période de novembre à mai. Les températures moyennes mensuelles les plus basses sont enregistrées entre décembre et janvier et varient de 25 à 30°C. Les périodes les plus chaudes se situent entre mars et septembre avec des variations de 30 à 40°C.

La région dispose de 2 millions d'hectares de terres cultivables et les activités agricoles mobilisent plus de 70 % des actifs (ANSD, 2015). Les producteurs de la zone s'adonnent aux cultures vivrières (mil, maïs, sorgho, riz, fonio) et de rente (arachide, coton, niébé, manioc, sésame). Néanmoins, les rendements sont généralement faibles à cause de la dégradation progressive du potentiel de production des terres cultivables (ISRA, 2005). Ce phénomène est notamment lié au prix élevé des engrais chimiques et à une faible utilisation d'amendements organiques (compost, fumiers, etc.).

Le cheptel ruminant est composé de bovins (race Ndama, *Bos Taurus*) et de petits ruminants. Ces derniers sont constitués majoritairement par la race djallonké chez les ovins et la race guinéenne chez les caprins. Ces animaux se caractérisent par leur petit format et leur tolérance à la trypanosomiase. Les espèces asines et équines introduites plus récemment y sont présentes et assurent certains travaux dans les terroirs (traction, labour, transport).

L'élevage dominant est de type extensif, agrosylvopastoral. En effet, durant la saison sèche, les animaux (notamment les bovins) pâturent librement (vaine pâture). Ils exploitent les résidus de récoltes et la végétation spontanée des zones de forêts et savanes naturelles (Ickowicz et Mbaye, 2001 ; Manlay et al., 2001). Le soir, les

troupeaux sont mis au piquet autour des champs de case (parcelles de culture à proximité des habitations) pour y passer la nuit (parcage de nuit).

Pendant la saison des pluies, les troupeaux bovins utilisent les pâturages naturels des zones de forêt et de savane où ils sont parqués en permanence pour être tenus à l'écart des cultures.

Le département de Vélingara est caractérisé par une transition vers des systèmes d'élevage semi-intensif liée à l'essor de la demande en lait. Cette volonté s'explique par la présence d'un cheptel important et diversifié par rapport au reste de la région de Kolda (Fall et Faye, 1989 ; Ly et al., 1997 ; ANSD, 2015).

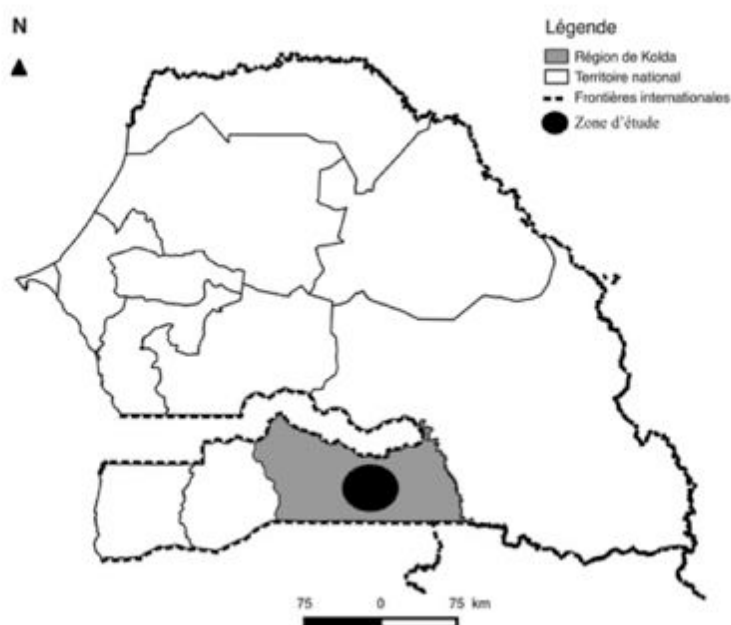


Figure A. 3 : Localisation de la zone d'étude dans le territoire national

Dynamique du système de production et cadre d'analyse

La Figure A.4 montre l'évolution du système d'élevage traditionnel (ST) vers un système semi-intensif (SE) avec l'introduction d'innovations telles que la stabulation bovine pour améliorer les performances de productions animales. En effet, le système de conduite traditionnel est basé sur une utilisation quasi exclusive des pâturages naturels et de résidus de cultures. Après l'introduction de la technique de stabulation dans le ST, l'organisation des principaux flux de matières organiques au sein du système d'élevage se complexifie. En effet, les producteurs sélectionnent, parmi leurs troupeaux, des vaches en lactation qui seront mises en stabulation pour la production de lait en contre-saison (décembre à mai, généralement). Ces reproductrices sont nourries avec des aliments concentrés (p. ex. : son, graine de coton, tourteau, etc.) et des fourrages (p. ex. : résidus de cultures céréalières, fanes de légumineuses). Ensuite, les fumiers, constitués de déjections (urine et bouse), et

parfois de refus alimentaires, sont enlevés des étables pour être stockés pendant un temps variable ou épandus directement dans les champs de case (parcelles à proximité des habitations).

Les différentes étapes de gestion des fumiers habituellement rencontrées sont symbolisées dans la Figure A.5. Ces étapes couvrent les phases comprises entre la collecte des déjections au niveau des étables d'élevage et l'épandage dans les parcelles de culture. Durant ces différents stades, des pertes de nutriments (notamment en N) sont enregistrées.

Au niveau des étables, les déjections produites par les vaches en stabulation émettent des gaz tels que l'ammoniac (NH_3), l'oxyde nitreux (N_2O) et le diazote (N_2) (GIEC, 2006). Les quantités émises dépendent de facteurs tels que l'effectif animal, le type de ration distribuée, le modèle de logement, la fréquence de raclage des excréments (Amon et al., 2001 ; Zhu et al., 2018).

À l'étape de stockage surviennent d'autres pertes de nutriments (ammoniac notamment) dues au système de stockage des fumiers (tas couvert ou à ciel ouvert) (Vayssières et Rufino, 2012 ; Behera et al., 2013 ; McGinn et Flesch, 2018).

Après épandage, des pertes par volatilisation, ruissellement, lessivage peuvent aussi être enregistrées (GIEC, 2006 ; Galy-Lacaux et al., 2016 ; Xu et al., 2018). Les facteurs favorisant les pertes à cette étape sont entre autres : la période d'application, la technique d'épandage (fumier enfoui ou fumier en superficie du champ), la nature des sols, le type de culture (Rufino, 2006 ; Kim et al., 2012 ; Huijsmans et al., 2016 ; Nicholson et al., 2018).

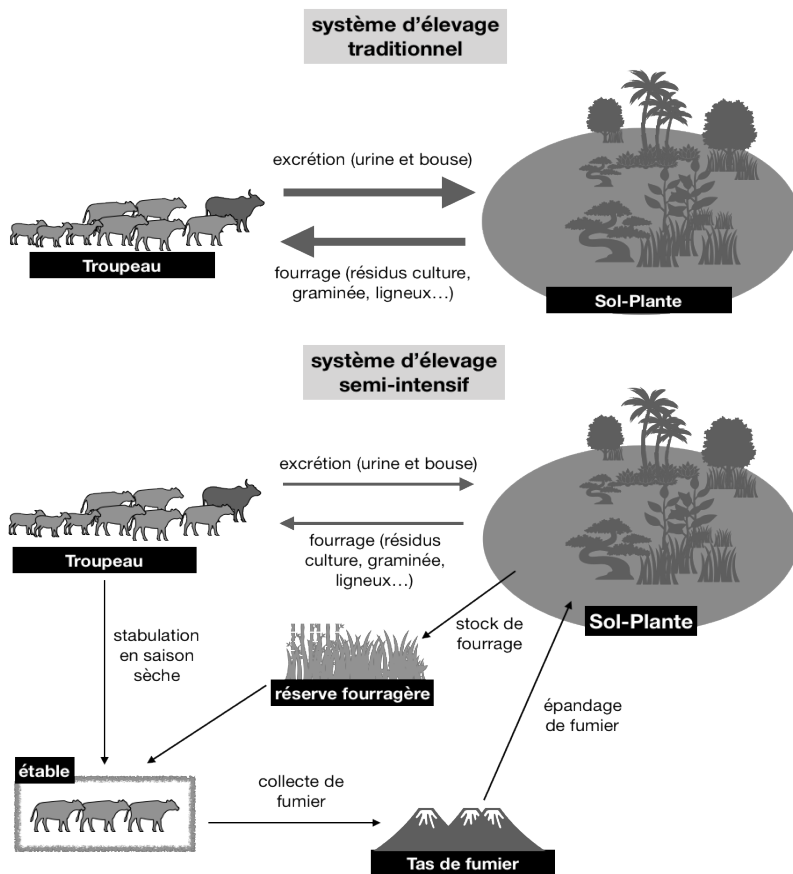


Figure A. 4 : Représentation de l'évolution du système de production animale dans la zone de Vélingara

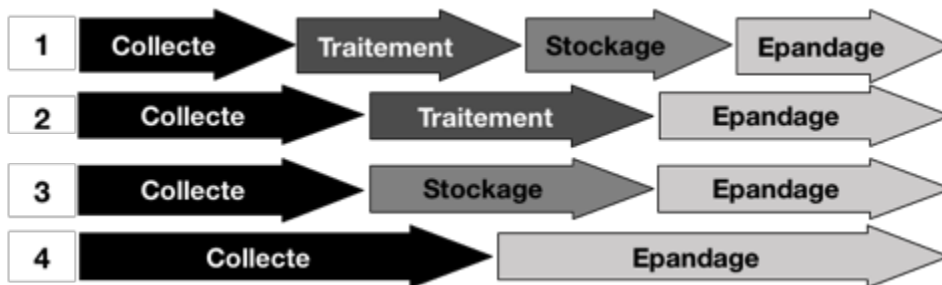


Figure A. 5 : Organisation de la filière des effluents d'élevage de la collecte jusqu'à la phase d'application dans les parcelles de culture

Échantillonnage, collecte et analyse de données

Afin de disposer d'un référentiel actualisé sur le flux de matière organique (fumure animale, notamment) issue du système d'élevage semi-intensif (SE) dans la zone de Vélingara, des entretiens individuels structurés ont été réalisés auprès des agroéleveurs (AEs) d'avril à juin 2017.

Une liste constituée de quatre-vingt-huit (88) AEs répertoriés durant les activités du Projet d'Amélioration de la Production Laitière dans la zone de Vélingara (WVS, World Vision Sénégal/Projet PAlait) a servi de population de base. L'objectif était d'interroger au moins 50 % de ces AEs. En définitive, 50 AEs (c.-à-d. 57 % de la population de base) ont pu être renseignés. Les communes (*Saré Coly Sallé* (SCS), *Némataba* (NEM), *Mballo Counda* (MBC), *Mampatim* (MAM), *Linkéring* (LIN) et *Koukané* (KAN)) ont constitué les sous-ensembles (ou strates) à partir desquels les AEs interrogés ont été tirés au hasard (échantillonnage aléatoire). Cependant, dans l'échantillonnage, nous avons veillé au respect de la représentativité des communes dans la population de base. Par exemple, le nombre d'AEs choisis au hasard dans la commune de Linkéring (N=12) se justifie par le fait que 24 % des AEs dans la liste d'origine sont localisés dans cette commune.

Les entretiens ont été réalisés avec le chef d'exploitation ou une personne désignée par ce dernier. Les informations collectées l'ont été à différentes étapes de la production agricole. Le Tableau A.1 répertorie les paramètres pris en compte dans cette étude.

Les données collectées ont fait l'objet d'analyses descriptives (tableaux de fréquences, représentations graphiques).

Tableau A.1 : Tableau récapitulatif des principaux paramètres utilisés et de leurs modalités respectives pour caractériser les exploitations agricoles

| Étapes | Paramètres | Modalités | Explications |
|----------|-------------|--|---|
| Conduite | Stabulation | Perm.: en permanence ; Part.: partiellement | Cette variable permet d'avoir une idée sur la conduite des vaches : les animaux sont-ils en permanence dans les enclos ou sont-ils partiellement conduits avec le reste du troupeau à une période de la journée ? |
| Conduite | Ration | AB : absence de concentré ; GC : graine de coton ; MX : mixte de son de céréales et tourteaux ; SC : son de céréales ; CFRC : cultures fourragères et résidus de cultures céréalières ; FA : fanes d'arachide ; FARC : fanes d'arachide et résidus de cultures céréalières ; FNRC : fanes de niébé et résidus de cultures ; ML : | Cette variable décrit les différents types d'aliments utilisés par les producteurs de la zone étudiée. |

| Étapes | Paramètres | Modalités | Explications |
|-------------|----------------------|---|---|
| | | fanés de légumineuses ; MLRC : fanés de légumineuses et résidus de cultures céréalières | |
| Étable | Modèle d'étable | PFU : présence de façade ; ATF : absence de toit et de façade ; ABE : absence d'étable (vache mise au piquet) ; PTF : présence de toit et de façade ; PTU : présence de toit uniquement | Cette variable recense les différents modèles d'étable dans lesquels les vaches sont logées |
| Collecte | Type de fumier | EF: urine + fèces ; UFR : urine + fèces + refus alimentaires | Cette variable recense les composants du fumier, à savoir s'il est uniquement constitué des fèces et urines de vaches ou s'il contient également les refus alimentaires |
| Collecte | Fréquence de raclage | BIM : bimensuel ; QUO : quotidien ; HEB : hebdomadaire ; PHE : plus de deux semaines | Cette variable donne un aperçu de l'entretien des bâtiments d'élevage, i.e. la fréquence d'évacuation de la fumure animale |
| Stockage | Mode de stockage | Couv. : couverture du fumier ; Ncouv. : fumier non couvert | Cette variable décrit le mode de stockage de la fumure animale, i.e. la couverture ou non du tas de fumier |
| Stockage | Temps de stockage | [1-2M] : stockage de 1 à 2 mois ;]2-3M] : stockage de 2 à 3 mois ; [0-1M] : stockage de 0 à 1 mois ; +3M : stockage de plus de 3 mois | Cette variable indique la durée du stockage de la fumure avant l'application dans les parcelles de culture |
| Application | Mode d'application | Enf. : enfouissement du fumier ; Nen. : fumier non enfoui | Cette variable décrit la méthode selon laquelle les agriculteurs appliquent le fumier sur ou dans le sol |
| Application | Destination fumier | MI : mil ; MA : maïs ; MM : mil-maïs ; TC : toute culture | Cette variable montre les parcelles qui reçoivent en priorité le fumier issu des |

| Étapes | Paramètres | Modalités | Explications |
|--------|------------|-----------|--------------|
| | | | étables |

Résultats

Conduite alimentaire

Analysées globalement (c.-à-d. indépendamment de la localité), les données d'enquêtes montrent une diversité de systèmes d'alimentation. Les résidus de culture céréalière (RC) sont mobilisés par les AEs dans plus de 95 % des cas. Ce type de fourrage est fréquemment associé à de la fane d'arachide seule (FARC, 33 %) ou au mélange de fanes de légumineuses (MLRC, 33 %), notamment la fane d'arachide (*Arachis hypogaea*) et de niébé (*Vigna unguiculata*).

Pour l'aliment concentré, les mélanges de sons de céréales et tourteaux (MX ; 49 %) et la graine de coton (GC ; 22 %) sont les plus utilisés. Par contre, certains AEs ne distribuent pas de concentré aux vaches en stabulation (AB ; 16 %).

Modèles d'étable et entretien

La Figure A.5 présente les résultats relatifs aux types d'étable et au mode de gestion du fumier c.-à-d. sa fréquence de raclage.

Globalement, les abris utilisés par les AEs pour la production laitière sont très divers. Cette variabilité est plus marquée dans les localités de *Mampatim* (MAM) et de *Némataba* (NEM) qui présente au moins quatre types de modèles d'étable. Néanmoins, cette diversité est moins perçue dans la localité de MBC où il n'existe que deux modèles d'étable (PFU et PTU, Figure 4a). Pourtant, dans les communes de *Linkéring* (LIN) et de *Mampatim* (MAM), la moitié des exploitations enquêtées sont dépourvues d'étable (ABE). La totalité des étables rencontrées n'avait pas de plancher en dur (cimenté).

En ce qui concerne l'entretien des étables, les résultats indiquent que la fréquence de raclage des fumiers change d'une commune à une autre ainsi qu'à l'intérieur d'une même commune. Pour plus du tiers (33 %) des AEs dans les localités de *Koukané* (KAN), *Mballo Counda* (MBC) et *Némataba* (NEM), les fumiers sont évacués selon une fréquence bimensuelle (BIM, Figure A.5a). Le raclage quotidien (QUO) n'a été rencontré que dans la commune de *Saré Coly Sallé* (SCS). En outre, l'exploitation des données d'enquêtes montre que chez certains AEs, notamment ceux de LIN ou de NEM, les étables sont nettoyées à des fréquences d'une semaine (HEB) ou à plus de deux semaines d'intervalle (PHE).

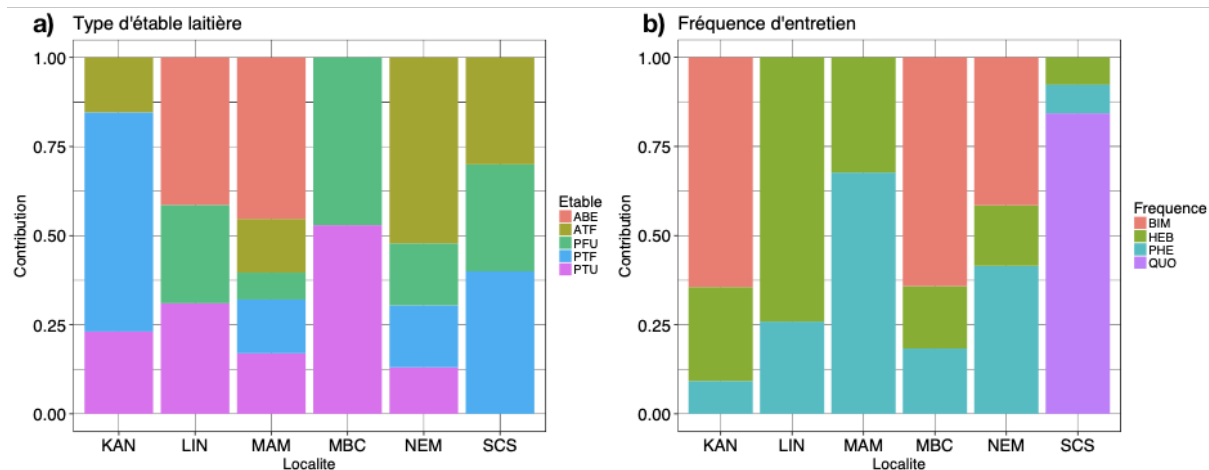


Figure A.6 : Modèles d'étable (a) et fréquence de raclage du fumier des étables dans les localités d'origine des producteurs enquêtés (b). Les signes mentionnés dans la figure représentent les fréquences d'apparition des modalités de pratique dans la localité considérée. Saré Coly Sallé (SCS), Nématoba (NEM), Mballo Counda (MBC), Mampatim (MAM), Linkéring (LIN) et Kounkané (KAN). PFU : présence de façade ; ATF : absence de toit et de façade ; ABE : absence d'étable (vache mise au piquet) ; PTF : présence de toit et de façade ; PTU : présence de toit uniquement ; BIM : bimensuel ; QUO : quotidien ; HEB : hebdomadaire ; PHE : plus de deux semaines

Gestion des fumiers d'étable

La Figure A.7 montre respectivement les résultats concernant les éléments constitutifs des fumiers (Figure A.7a) et le mode d'entreposage dans les exploitations (Figure A.7b). On note en général que les fumiers raclés des étables sont constitués d'urine et de bouse de vache uniquement (EF, 53 %), alors que le reste est composé de déjections (urine et bouse) mélangées aux refus alimentaires (EFR, 47 %).

Les fumiers sont souvent entreposés sans couverture (Ncouv., 76 %), particulièrement dans les localités de MAM et SCS où les tas sont déposés à ciel ouvert. Toutefois, certains AEs comme ceux de LIN (58 %) et de KAN (40 %) bâchent leurs tas de fumier.

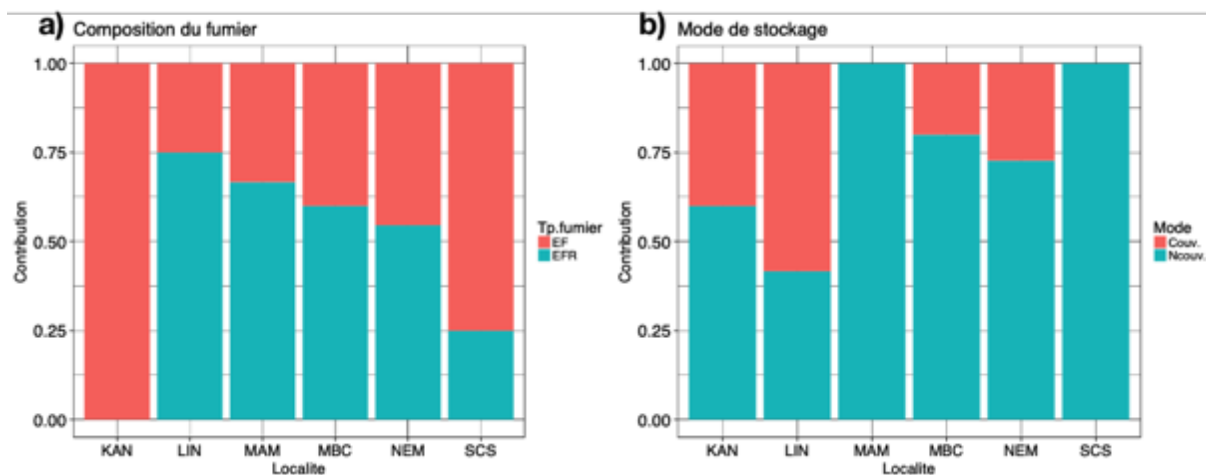


Figure A.7 : Composition des fumiers (a) et systèmes de stockage (b) selon les localités d'origine des producteurs enquêtés. Les signes mentionnés dans la figure représentent les modalités des pratiques et les chiffres sur l'axe des ordonnées leur fréquence d'apparition dans la localité considérée.

Le temps de stockage des fumiers dans les différentes localités met aussi en évidence une diversité de pratiques. En effet, la proportion d'AEs enquêtés qui stockent leurs fumiers plus de 3 mois (+3M) varie de 80 à 100 % (Figure A.8). Toutefois, on note que dans certaines communes (p.ex. : MAM, KAN), les fumiers provenant des étables sont épandus (20 % des cas) après une durée de stockage de moins d'un mois.

Les études montrent que le traitement des effluents d'élevage, c.-à-d. la séparation des phases solides (fumiers) et liquides (lisiers), n'est pas une pratique courante dans la zone.

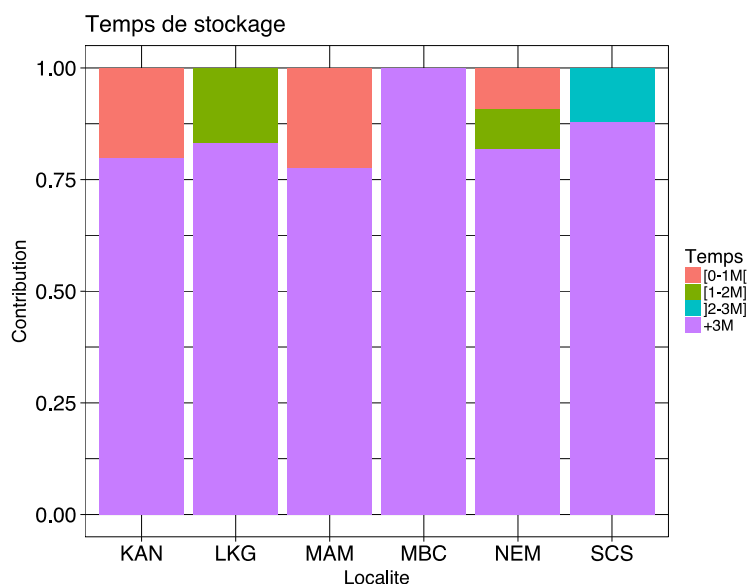


Figure A. 8 : Fréquence de la durée de stockage de la fumure organique après raclage dans les étables

Proportion de fumiers gérée à l'échelle de l'exploitation

Le Tableau A.2 présente les caractéristiques structurelles des exploitations enquêtées. L'effectif moyen de vaches reproductrices est de 34 UBT. La proportion de femelles mises en stabulation par les AEs en saison sèche varie de 2 % à 100 %, avec une moyenne de 18 %. La quantité moyenne de fumier potentiellement produite dans les exploitations est de 63 tonnes par an. Considérant les effectifs d'animaux des AEs interrogés et leurs productions estimées de fumier, la proportion de fumier gérée sous forme solide varie de 0 à 9 %, avec une moyenne annuelle de 2 %.

Tableau A. 2 : Caractéristiques structurelles des exploitations agricoles enquêtées

| Paramètres | Unité | Min | Moyenne | Max |
|---|--------|------|---------|-----|
| Effectif main-d'œuvre | Nombre | 1 | 4 | 10 |
| Proportion de vaches en stabulation | % | 2 | 18 | 100 |
| Surface agricole utile | ha | 0.75 | 2.3 | 10 |
| Effectif vaches | UBT | 2 | 34 | 243 |
| Effectif autres bovins | UBT | 4 | 21 | 84 |
| Effectif ovins | UBT | 0 | 1.3 | 9.0 |
| Effectif caprins | UBT | 0 | 1.0 | 4.0 |
| Effectif équins | UBT | 0 | 0.9 | 5.6 |
| Effectif asins | UBT | 0 | 1.2 | 3.5 |
| Production annuelle de fumier | t | 8 | 63 | 368 |
| Proportion de fumier potentiellement gérée | % | 0 | 2 | 9 |
| Durée moyenne de stabulation | j | 49 | 86 | 152 |
| Proportion de fumier directement déposée sur les sols de parcours | % | 91 | 98 | 100 |

Valorisation agronomique des fumiers d'étable

Les fumiers d'étable sont prioritairement utilisés pour la fertilisation des champs réservés à la culture de maïs (70 % des enquêtés, Figure A.9). Cette tendance est particulièrement observée chez les AEs des communes de MBC et LIN. Toutefois, certains producteurs (p.ex. : 40 % des producteurs de KAN) ne privilégient aucune culture quant à l'utilisation des fumiers.

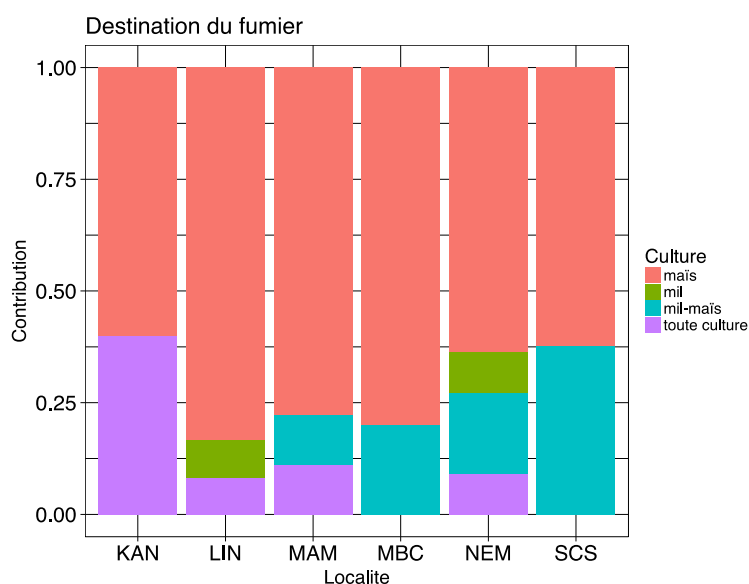


Figure A. 9 : Destination des fumiers stockés par les agroéleveurs de la zone de Vélingara

Discussion

Systèmes d'alimentation et risques d'émissions gazeuses

À travers cette étude, nous avons observé une diversité dans la conduite alimentaire qui peut s'expliquer par l'inégalité des moyens financiers dont disposent les AEs pour acheter des compléments alimentaires (son, tourteau) et l'accessibilité des ressources fourragères dans la zone. Les diverses stratégies d'affouragement observées laissent prévoir une inégalité des émissions azotées sous forme d'ammoniac (NH_3) et d'oxyde nitreux (N_2O) au niveau des étables.

À notre connaissance, les niveaux d'émission de gaz au niveau des bâtiments d'élevage ne sont pas encore bien documentés dans la zone d'étude. Cependant, dans d'autres régions, Frank et Swensson (2002) ont remarqué que dans les bâtiments d'élevage (BEs), les émissions de NH_3 provenant des vaches recevant un régime constitué en moyenne de 13 % de matière azotée totale (MAT) étaient significativement inférieures à celles des vaches nourries avec un régime alimentaire plus élevé (MAT= 17 %).

Toutefois, les températures basses ont un effet réducteur sur les émissions de NH_3 dans les BEs. En effet, la volatilisation ammoniacale pendant la nuit est d'environ 10 à 20% inférieure à celle de la journée (Powell et al., 2008).

Par ailleurs, l'absence de plancher en dur dans les étables visitées est un facteur favorisant les risques de pollution d'eaux souterraines (phénomène d'eutrophisation) et de la qualité de l'air (acidification). En effet, l'azote (N) fécal représente de faibles

risques environnementaux en ce sens qu'il est sous forme organique (Dollé et al., 2013). Cependant, l'N urinaire, excrété sous forme d'urée qui est disponible et rapidement minéralisable dans le sol, présente des risques de pertes (Pelster et al., 2016 ; Kim et al., 2019).

Constitution et gestion des fumiers d'étable

Nos résultats ont révélé que la fumure organique est souvent constituée, en plus des déjections animales (urine et fèces), de refus d'aliments (47 %). Cette tendance peut être due aux pratiques de rationnement des vaches à l'étable par les AEs. En effet, des travaux antérieurs (p.ex. : Badiane et al., 2000 ; ISRA, 2005) menés dans la zone d'étude ont prouvé qu'en général, les AEs distribuent l'aliment *ad libitum*, ce qui peut engendrer des restes alimentaires si la quantité offerte par l'AE est supérieure à la capacité d'ingestion des vaches.

En outre, nous avons vu plus haut que la gestion des étables (fréquence d'évacuation) et des fumiers (mode, temps et systèmes de stockage de la fumure) était variable entre les communes et à l'intérieur d'une même localité. Ces disparités de pratiques peuvent être expliquées par au moins deux facteurs : i) une insuffisance de la main-d'œuvre (MO) pour gérer les fumiers dans certaines exploitations, ii) l'absence de moyen de transport adéquat pour déplacer les fumiers des étables aux lieux d'entreposage. En effet, les enquêtes ont révélé que l'effectif moyen de la MO est de quatre (4) personnes. Cette carence en MO expliquerait également les longues durées (75 à 100 % des AEs stockent leurs fumiers +3M) de stockage des fumiers provenant des étables.

Considérant cette variation dans les stratégies d'alimentation, d'entretien des étables et de temps de stockage des fumiers, une différence qualitative de la fumure organique peut être envisagée. Cette hypothèse soulèverait la discussion sur les quantités de fumier à apporter aux différentes cultures (c.-à-d. les doses recommandées). Par exemple, la quantité recommandée avec le fumier de bovin en stabulation est de 4 t/ha parce que cette dose d'amendement donne le même rendement que l'apport de 50 % de la dose de fumure minérale vulgarisée (ISRA, 2005) ; en conséquence, il s'opère une économie financière sur le coût d'engrais minéraux. Cependant, la variation de certains événements biologiques (minéralisation, fixation de l'azote) et de transferts au niveau du sol (lixiviation, érosion) comme dans l'atmosphère (volatilisation ammoniacale, dénitrification) influence la qualité des fumiers et donc, probablement, les quantités à épandre dans les parcelles de culture.

Dans la zone d'étude, des travaux antérieurs conduits par Blondel (1971a et 1971b) ont rapporté des flux de minéralisation de 157 kg/ha alors que les études de Jones et Wild (1975) révèlent, pour des pentes inférieures à 4%, des pertes annuelles par érosion de 0 à 21 t/ha. Kowal (1970) évalue les pertes moyennes annuelles en azote attribuables respectivement à l'érosion et au ruissellement à 6,3 kg/ha et 7,4 kg/ha. Les travaux de Vidal et Fauche (1962) dans la même région ont aussi mis en évidence de fortes variations spatiales et temporelles concernant le phénomène de lixiviation. Selon ces derniers auteurs, les pertes annuelles sont en moyenne de 4,5

kg/ha sous cultures non fertilisées mais peuvent atteindre 50 kg/ha sous les sols nus. Les résultats d'études simulant les conditions des parcelles de cultures au Sénégal ont montré que 40 % de l'urée apportée est perdue sous forme de volatilisation de l'azote (ISRA, 2005). Aussi, après trois mois de stockage d'un fumier non couvert, les pertes en azote peuvent être d'environ 60% (Kwakye, 1980 ; Probert et al., 1995). Des stratégies qui consistent, par exemple, à bâcher les tas de fumier ont été proposées (Chadwick, 2005 ; Hou et al., 2015 ; Zhang et al., 2019) pour réduire ce phénomène de volatilisation du NH₃. La couverture des fosses de lisier permet une réduction des émissions de NH₃ de 70 % (Dollé et al., 2013). Les conclusions de ces travaux mentionnés précédemment concordent avec celles de travaux menés dans d'autres terrains qui ont montré que la valeur nutritive des fumiers est liée aux pratiques de gestion de cette matière organique, depuis l'excrétion jusqu'à son épandage dans les parcelles de cultures (p.ex. Quak et al., 1996 ; Rufino, 2008). Toutefois, la couverture des tas de fumier nécessite d'être évaluée dans nos conditions de production. En effet, cette pratique favorise une condition en anaérobiose, source potentielle d'émission de méthane (CH₄), un important gaz à effet de serre responsable du changement climatique (Mathot et al., 2012 ; Petersen et al., 2013).

Utilisation des fumiers

Nous avons observé que la plus grande partie du fumier collecté dans les étables est appliquée dans les champs de maïs (*Zea mays* L.). Ce fait démontre l'importance de cette culture dans la région. De plus, des études antérieures (p.ex. : Smale et al., 2013) ont prouvé qu'en Afrique subsaharienne (ASS), à l'exception de l'Afrique du Sud, l'essentiel de la production de maïs est destiné à l'alimentation humaine (77 %) et animale (12 %).

Dans les pays développés, cette céréale constitue, après la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.), la culture la plus fertilisée en engrais minéral parce qu'exigeante en nutriments (Heisey and Norton, 2007). Cependant, pour l'ASS, les revenus des paysans ne leur permettent pas de payer une quantité suffisante de fertilisant minéral (Smale et al., 2013). À titre d'illustration, cette région enregistre le niveau d'utilisation d'engrais minéral le plus bas au monde (Chianu et al., 2012), avec une moyenne estimée à environ 14 kg N/ha, même si certains pays (p.ex. : le Nigéria) ont des moyennes qui avoisinent 50 kg N/ha.

Dans un contexte où la question de la baisse de la capacité productive des terres en ASS continue d'alimenter les débats, les producteurs (agriculteurs et éleveurs) à faibles capitaux de cette région font face à la cherté des engrais minéraux et au manque de gestion de la fumure organique (Zoundi et al., 2004). Afin d'apporter des réponses scientifiques, des études relatives à la valorisation des fumiers ont été menées pour améliorer la fertilité des sols (Sedogo, 1993 ; Sangaré et al., 2002 ; Traoré et Stroosnijder, 2005). Il ressort majoritairement de ces travaux qu'une meilleure gestion des fumiers permet de réduire les niveaux d'apports d'engrais minéraux (p.ex. : Zoundi et al., 2007).

Pour Quak et al. (1996), les rendements en ASS sont essentiellement déterminés par la disponibilité en eau et en éléments nutritifs. Dans la zone d'étude, les AEs utilisent principalement le fumier pour fertiliser leurs champs. Considérant que l'eau

n'est pas un facteur limitant dans la zone d'étude, la qualité des fumiers issus des étables doit être mieux décrite. Toutefois, on peut admettre que la composition chimique du fumier joue un rôle essentiel dans la dynamique des éléments nutritifs du sol (De Ridder et Van Keulen, 1990 ; Bationo et Mokwunye, 1991).

Fumier géré dans chaque SGF

Dans ses communications nationales de gaz à effet de serre (GES) de 2010 et 2015, le Sénégal a utilisé les paramètres par défaut du GIEC pour estimer les quantités de GES émises par le secteur de l'agriculture à travers la gestion des fumiers car très peu de données sur les chaînes de gestion des fumiers sont disponibles.

Notre étude révèle une faible proportion de fumier géré dans la zone de Vélingara. En effet, l'essentiel de la production annuelle de fumier est déposé directement au sol durant les périodes de parcage nocturne et de pâturage (80-98 %). Cette tendance observée s'explique par le nombre limité de vaches mises en stabulation et au temps passé par ces animaux dans les étables.

Au regard de l'impact environnemental, cette situation induit de faibles émissions de N. En effet, à l'échelle du troupeau, les quantités de déjections qui sont stockées puis épandues sont infimes (Zaman et al., 2009 ; Carey et al., 2016). Toutefois, cette proportion de fumier géré peut varier considérablement puisque les objectifs de l'AEs influencent les effectifs d'animaux mis en stabulation. Aussi, selon ses moyens de production, l'AE peut prolonger la durée de la stabulation. Cette pratique permettra de disposer de plus de fumier à gérer.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de constater que dans la zone concernée, des stratégies doivent être développées pour limiter les pertes en nutriments (notamment en azote) et les émissions de gaz à effet de serre dans l'environnement. Actuellement, les publications les mieux partagées rapportent une augmentation de la croissance démographique en Afrique subsaharienne. Dans cette situation, il s'agira d'améliorer la productivité agricole (animale et végétale) pour satisfaire la demande en protéines de ces populations. Les tendances actuelles ne plaident pas en faveur de l'atteinte de cet objectif. En effet, les engrais minéraux sont onéreux pour les producteurs à faibles capitaux alors que les fumiers, qui constituent la première ressource d'amendement organique dans ces régions, sont insuffisants en quantité et en qualité. Les recherches futures doivent prendre en compte toute la filière depuis la phase de collecte jusqu'à l'épandage des fumiers pour identifier les étapes-clés où les émissions de gaz (et pertes en nutriments) sont les plus importantes. Les données produites à travers ces travaux permettront la mise en place de divers outils d'aide à la décision qui serviront à modéliser des systèmes efficaces en matière de performances agricoles et environnementales.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'ISRA, à travers le Centre de Recherches Zootechniques de Kolda, et la World Vision Sénégal à travers son *Cluster* de Vélingara. Nous remercions les agroéleveurs de la zone de Vélingara pour leur disponibilité. Nous sommes redevables à Messieurs Mouhamadou Abdoulaye DIANDY et Amadou Tidiane BALDE qui ont bien voulu réviser les données d'enquêtes.