



HAL
open science

Un modèle multi-agents pour simuler les échanges de matières agricoles à l'échelle du territoire: application à l'évaluation de scénarios d'évolution pour un territoire de polyculture-élevage.

Hugo Fernandez Mena, Thomas Nesme, Sylvain Pellerin

► To cite this version:

Hugo Fernandez Mena, Thomas Nesme, Sylvain Pellerin. Un modèle multi-agents pour simuler les échanges de matières agricoles à l'échelle du territoire: application à l'évaluation de scénarios d'évolution pour un territoire de polyculture-élevage.. Innovations Agronomiques, 2019, 72, pp.91-106. 10.15454/YQWGSX . hal-02273371

HAL Id: hal-02273371

<https://hal.science/hal-02273371>

Submitted on 28 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Un modèle multi-agents pour simuler les échanges de matières agricoles à l'échelle du territoire : application à l'évaluation de scénarios d'évolution pour un territoire de polyculture-élevage

Fernandez-Mena H.^{1,2,3,4}, Nesme T.¹, Pellerin S.²

¹ Bordeaux Sciences Agro – UMR ISPA, Gradignan, Nouvelle Aquitaine

² INRA – UMR ISPA, Gradignan, Nouvelle Aquitaine

³ Montpellier SupAgro – UMR SYSTEM (CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Univ. Montpellier), Montpellier, Occitanie

⁴ ISARA Lyon – Département Agroécologie & Environnement, Lyon, Auvergne Rhône-Alpes

Correspondance : hugo.fernandez-mena@supagro.fr

Résumé

L'agriculture nécessite de mieux boucler les cycles des éléments minéraux localement afin de réduire sa dépendance à des ressources externes, souvent dépendantes de gisements non renouvelables. Ce recyclage de la biomasse et des nutriments se fait via des flux circulaires de matière, notamment de fertilisants, de produits végétaux, d'aliments du bétail, de coproduits et de déchets dans les territoires. Disposer de modèles simulant les échanges de matières entre les fermes et leurs partenaires économiques amont et aval dans les territoires est de nature à faciliter la conception et l'évaluation de scénarios alternatifs d'organisation de la production agricole fondés sur plus de circularité. Dans le présent travail, nous présentons le modèle multi-agents FAN (« Flows in Agricultural Networks») qui simule les flux des matières entre les fermes et leurs partenaires économiques dans les territoires agricoles de polyculture-élevage. Nous appliquons également ce modèle à un territoire de polyculture-élevage qui sert de cas d'étude, le Ribéracois, dans le département de la Dordogne en France. Différents scénarios sont simulés, qui ont pour objectif de développer le recyclage de la matière, favoriser la production de biogaz ou d'améliorer les interactions agriculture-élevage. Ces scénarios sont évalués en termes de production alimentaire et énergétique, de flux de matières et de logistique, de cycle des nutriments et d'émissions de gaz à effet de serre. Ce travail souligne l'utilité des modèles multi-agents pour imaginer et évaluer des solutions collectives tendant vers l'économie circulaire et pour prendre en charge les interactions entre acteurs économiques au sein des chaînes et filières alimentaires complexes.

Mots-clés : Flux de nutriments, Azote, Modèle multi-agents, Territoire, Economie circulaire, Ecologie agro-industrielle, Recyclage des produits organiques.

Abstract: An agent-based model for simulating agricultural materials exchanges in crop-livestock systems at the local scale : application to scenario assessment of a crop-livestock region in France

Closing the nutrient cycles locally requires improving biomass recycling in agro-food systems through more circular flows of fertilizers, crop products, feedstuff, by-products and organic wastes. Innovative tools exploring material exchanges between farms and their upstream and downstream partners in agro-food systems at the local scale are needed. In the present work, we present the FAN ("Flows in Agricultural Networks") model, an agent-based model that simulates a range of material flows among farms and their partners within mixed crop-livestock farming area. We also applied the FAN model to a case-study, the Ribéracois, in Dordogne department, France. Different scenarios were simulated that

enhanced nutrient use efficiency, recycling strategies, biogas production and crop-livestock interactions. The scenarios were assessed in terms of food provisioning, nutrient cycling and greenhouse gas emissions. This work demonstrates how agent-based tools can be powerful to imagine and evaluate collective solutions for circular economy and to account for interactions among economic actors within complex agro-food systems.

Keywords: Nutrient flows, Nitrogen, Agent-based model, Local scale, Circular economy, Agro-industrial ecology, Organic waste recycling.

1. Introduction

Plusieurs décennies de politiques publiques ont encouragé les fermes à se spécialiser en se connectant aux marchés globaux pour échanger massivement des denrées agricoles telles que des aliments pour les humains, des aliments composés pour animaux, du fourrage et des fertilisants (Lassaletta et al., 2014 ; MacDonald et al., 2015 ; Nesme et al., 2018). Ces « flux linéaires », c'est-à-dire caractérisés par une absence de circularité, entre régions agricoles à l'échelle nationale ou internationale ont contribué à augmenter la dépendance des systèmes agricoles à des intrants externes et à fragiliser leur autonomie et leur capacité de recyclage (Schipanski et Bennett, 2012). En particulier, ces « flux linéaires » sont problématiques pour les émissions de gaz à effet de serre (Carlson et al., 2016), pour la surutilisation des éléments fertilisants (Ringeval et al., 2017 ; Sutton et al., 2011), pour la protection des ressources naturelles servant à fabriquer les engrais de synthèse (Elser et Bennett, 2011) et pour l'autonomie des systèmes d'élevage (Herrero et al., 2013 ; Leip et al., 2015). Cette connectivité dans un marché global permet l'accès à un grand nombre de matières à des prix bas, mais au détriment de la valorisation des ressources locales et de l'autonomie des territoires (Fader et al., 2013 ; Le Noë et al., 2017).

A l'inverse, s'appuyer sur les échanges de matières locales via des « flux circulaires » peut favoriser l'intégration agriculture-élevage (Moraine et al., 2014 ; Regan et al., 2017), améliorer l'efficacité d'utilisation des déchets organiques (Alvarenga et al., 2015 ; Bodirsky et al., 2014 ; Metson et al., 2016) et permettre la production de biogaz (Lorenz et al., 2013). Ces systèmes visant à boucler les cycles des matières sont des points clés de l'économie circulaire (Murray et al., 2017) et de l'écologie agro-industrielle et territoriale (Fernandez-Mena et al., 2016). Disposer d'outils pour explorer et évaluer les échanges de matières entre les fermes et leurs partenaires économiques amont et aval est une condition pour la mise au point de scénarios d'économie circulaire dans les territoires agricoles (Fernandez-Mena et al., 2016).

L'article qui suit présente un modèle capable de simuler les flux de matières agricoles entre acteurs au sein de filières dans les territoires : FAN « Flows in Agricultural Networks », un modèle multi-agents, développé dans la plateforme de simulation GAMA de libre accès (Drogoul et al., 2013 ; Grignard et al., 2013 ; Taillandier et al., 2010). Nous avons appliqué le modèle FAN à un cas d'étude en France, le Ribéracois, dans le département de la Dordogne, pour lequel nous avons simulé des scénarios contrastés d'organisation de la production agricole. Les différents scénarios avaient pour objectif d'améliorer l'efficacité d'utilisation des éléments minéraux, de développer le recyclage de la matière, de favoriser la production du biogaz ou enfin de développer les synergies cultures-élevage. Enfin, grâce aux sorties de FAN, ces différents scénarios ont été évalués en termes de production alimentaire et énergétique, de flux de matières et de logistique, de cycle des nutriments et d'émissions de gaz à effet de serre.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Le territoire du Ribéracois

Le territoire du Ribéracois (Figure 1), dans le département de la Dordogne, région de Nouvelle-Aquitaine, a servi de cas d'étude pour appliquer le modèle FAN.

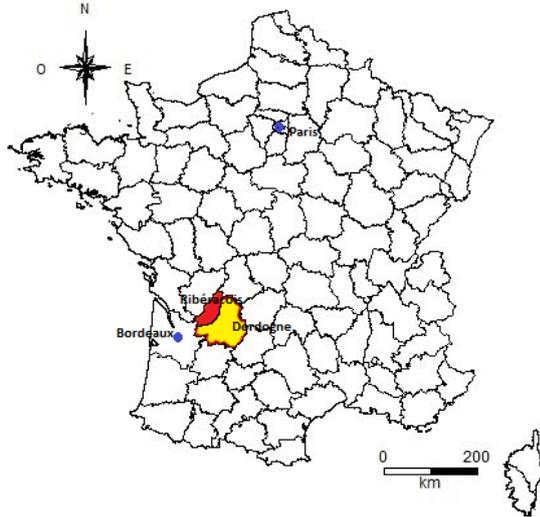


Figure 1 : Localisation du territoire 'Ribéracois' (en rouge) dans le département de la Dordogne (en jaune), région Nouvelle Aquitaine, sud-ouest de la France.

Le territoire du Ribéracois correspond à la petite région agricole du Ribéracois dans laquelle s'organise une communauté de communes. Le territoire a une superficie totale d'environ 1000 km², avec une SAU d'environ 500 km², une altitude moyenne de 80 m, des précipitations annuelles de 800 mm et une température moyenne de 12.3 °C. Le Ribéracois compte 835 fermes de diverses orientations technico-économiques¹ (OTEX) : grandes cultures, bovins lait, bovins viande, porcs, volailles, ovins et caprins, et vergers ou vignes (Tableaux 1 et 2).

Tableau 1 : Distribution des surfaces (ha) par orientation technico-économique des exploitations (OTEX) agricoles dans le territoire du Ribéracois (adapté d'Agreste, 2010).

Type des fermes	Nb de fermes	Surface totale moyenne (ha)	Céréales (ha)	Oléagineux (ha)	Légumineuses à graines (ha)	Ensilage de Maïs (ha)	Herbe (ha)	Autres fourrages (ha)	Fruits et légumes (ha)
Bovins lait	53	96,5	25,1	3,2	0,2	17,1	41,3	10,1	1
Bovins viande	91	65,9	8,4	1,4	0	1,5	51,3	2,3	0,6
Bovins mixte	7	151	21,4	0	0	12,8	112,1	3	0
Ovins et caprins	76	34,6	5,7	0,2	0	1,03	22,1	4,4	0
Porcs et volailles	37	31,5	16,2	0	0	0	10,8	0,4	0,3
Grandes cultures	291	69,6	41,8	13,3	0,4	0,1	8,5	0,9	0
Polyculture-élevage	208	62	25,6	6,6	0,1	1,4	23,7	2	0
Vergers et vignes	72	6,6	1,1	1,6	0	0	0	0	3,7

¹ On considère qu'une exploitation est spécialisée dans une OTEX si la production brute standard de la ou des productions concernées dépasse deux tiers du total. Les exploitations ne dépassant ce seuil de spécialisation, appartiennent à la catégorie polyculture-élevage. Pour les élevages hors sol (porcins, volaille) la production brute standard de l'exploitation est calculée sur la base des capacités d'élevage en bâtiment et non sur celle des animaux présents.

Tableau 2 : Distribution des effectifs animaux (nombre d'animaux en ruminants et nombre de places en monogastriques) par orientation technico-économique des exploitations (OTEX) agricoles dans le territoire du Ribéracois (adapté d'Agreste, 2010).

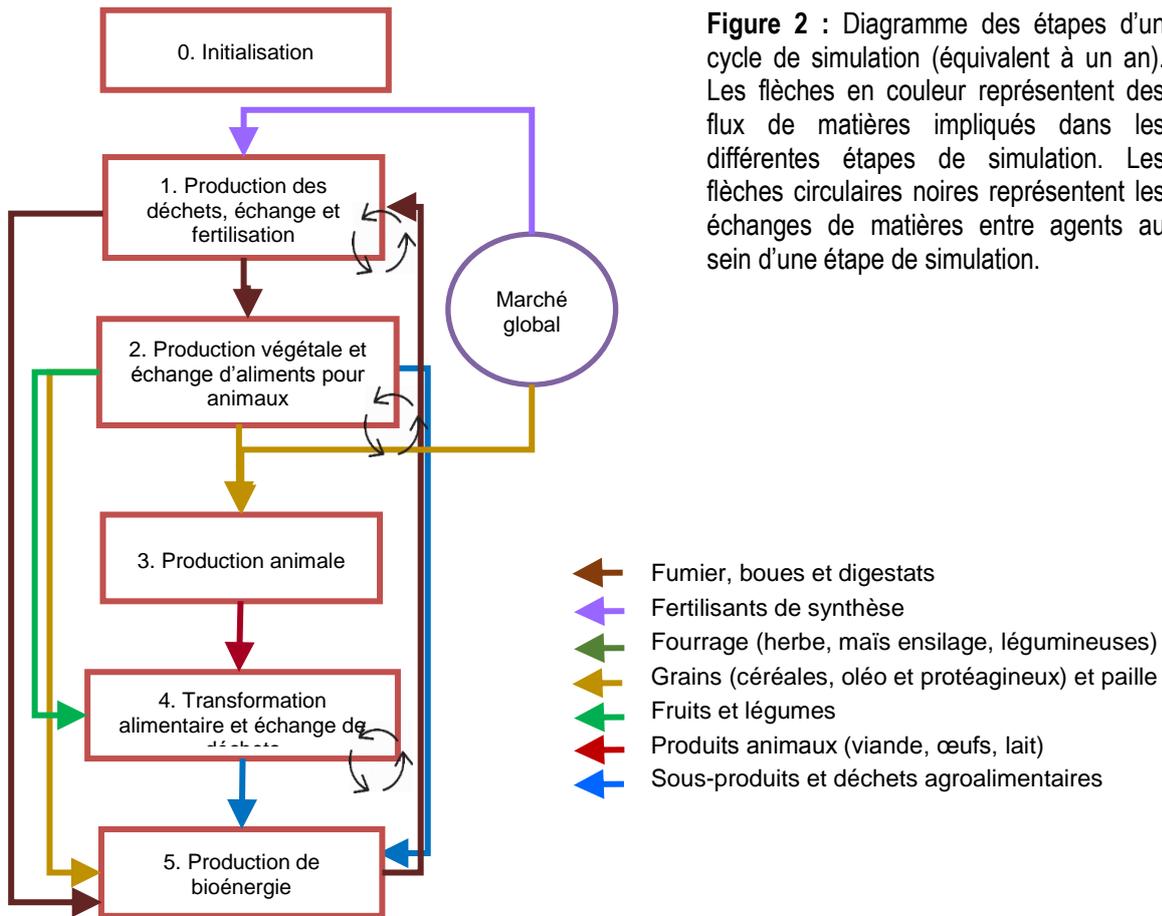
Type des fermes	Vache laitière	Vache allaitante	Veau	Mouton et chèvre laitier	Mouton et chèvre allaitant	Agneau	Truie	Porcelet	Porc d'engraissement	Poule pondeuse	Poulet de chair
Bovins lait	52,3	33,4	21,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	3,9
Bovins viande	0,0	68,9	35,0	0,0	2,9	0,4	0,0	0,0	0,0	3,4	2,2
Bovins mixte	31,1	120,4	45,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ovins et caprins	1,4	12,9	3,4	78,6	28,9	52,1	0,0	0,0	0,0	2,6	1,6
Porcs et volailles	0,0	9,0	4,1	0,0	4,4	0,0	49,5	29,7	56,9	5,9	1772,4
Grandes cultures	0,1	5,3	1,8	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,5
Polyculture élevage	2,6	29,4	11,5	1,0	4,5	4,0	0,0	0,0	0,0	3,6	6,0
Vergers et vignes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0

Plusieurs acteurs amont et aval opèrent également dans le territoire. Il s'agit principalement de trois organismes collecteurs de grains, de deux laiteries, de deux abattoirs, de quelques petites industries de transformation de fruits et de légumes, de quatre stations d'épurations des eaux et de quelques méthaniseurs en projet.

Les activités agricoles du Ribéracois sont caractérisées par plusieurs enjeux ayant trait à la gestion des nutriments et des ressources en biomasse. Les élevages sont concernés par une haute volatilité du prix des intrants qu'ils utilisent, notamment du soja et de la luzerne. Les exploitations utilisent une grande quantité d'éléments fertilisants (d'environ 160 kg de N minéral par ha et par an dans les fermes sans apports de fumier, et souvent plus en cas d'apport), malgré la nouvelle classification d'une partie du territoire en Zone Vulnérable Nitrates depuis 2015. Enfin, le développement de la méthanisation pour atteindre une autonomie énergétique se heurte à une compétition croissante entre usages pour les substrats méthanisables.

2.2 Le modèle FAN

Le modèle FAN est un modèle multi-agents (Bousquet et al., 2013), qui simule des agents correspondant à des représentations simplifiées (localisation, caractéristiques) des acteurs réels. Dans le modèle, les agents correspondent principalement aux fermes et aux partenaires économiques en amont et aval de ces fermes. Ces derniers sont : des collecteurs et transformateurs de grains, des fournisseurs d'engrais, des industries agroalimentaires, des abattoirs, des méthaniseurs et des stations d'épuration des eaux. Le modèle simule les échanges de matières agricoles et leur transformation, lors du cycle annuel de production (Figure 2).



Les matières échangées dans FAN (Figure 3) incluent différentes catégories de biodéchets et fertilisants, de cultures et produits animaux, d'aliments pour animaux et divers types de biomasse. Il s'agit, pour la plupart des matières, des flux entrants et sortants des fermes à l'exception de quelques déchets de transformation alimentaire partant pour la méthanisation avant leur transformation en digestats.

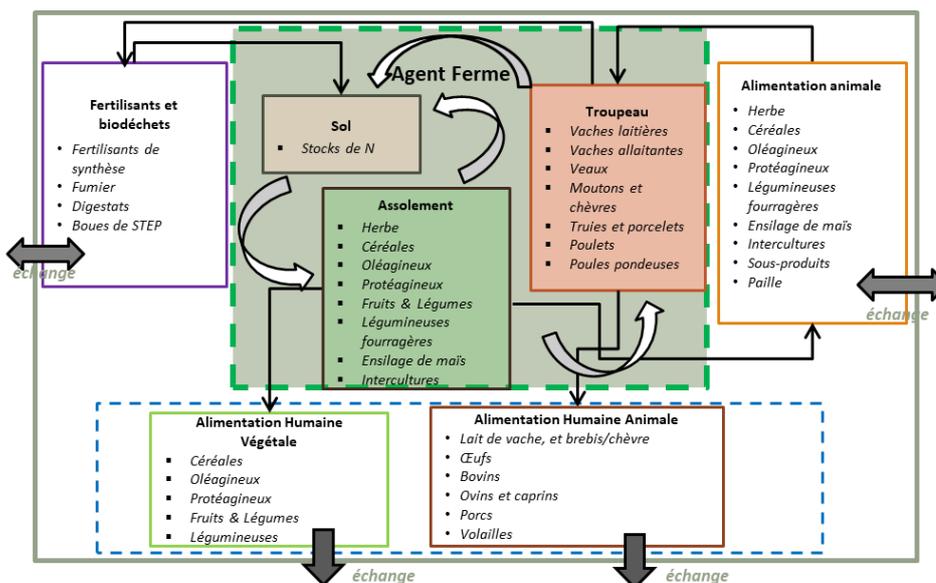


Figure 3 : Attributs des fermes et listes des matières échangées entre les fermes et leurs partenaires dans le modèle FAN.

Ces matières sont échangées au long d'un cycle de simulation afin de satisfaire les objectifs de production de chaque agent, tout en éliminant/valorisant les déchets produits au long du cycle. Les échanges de matières sont le résultat de la création de « partenariats » entre agents au sein du modèle. Un « partenariat » entre deux agents traduit la rencontre entre une offre et une demande pour un produit donné.

Dans le modèle, chaque couple possible d'agents est caractérisé, pour une matière donnée, par un « poids » traduisant la probabilité que deux agents établissent un partenariat pour échanger ladite matière (Figure 4). Ce « poids » est déterminé, pour une matière donnée, à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Poids}_{i,j} = \text{Proximité}_{i,j} * \text{Ratio Offre-Demande}_{i,j} * \text{Préférence} \quad (\text{Eq.1})$$

- Proximité = $\left(\frac{1}{\text{Distance}_{i,j}}\right)$; où distance_{ij} désigne la distance en km entre les agents i et j ; cette variable permet de simuler les contraintes logistiques pouvant peser sur les longs échanges de matières pondéreuses entre acteurs agricoles (Görgüner et al., 2015) ;
- Ratio Offre-Demande = $\left(\frac{\min(|\Psi S_i|, |\Psi D_j|)}{\max(|\Psi S_i|, |\Psi D_j|)}\right)$ où ΨS_i et ΨD_j désignent respectivement l'offre (ΨS , valeur négative) et la demande (ΨD , valeur positive) des agents, en kg de matières. Ce ratio a pour but de prendre en compte la différence entre les quantités proposées et demandées par deux agents pour l'échange de biomasse locale (Zhao et al., 2017). Il n'est pas appliqué aux matières provenant du marché global ;
- Coefficients de préférence [0-1]. Ils servent à rendre compte d'une préférence d'un agent vis-à-vis de différents usages pour une matière donnée (par exemple un fumier peut servir à fertiliser les sols ou à alimenter un méthaniseur) ou vis-à-vis de différentes matières pour un usage donné (par exemple la fertilisation des sols peut être assurée par des matières fertilisantes organiques ou minérales), sous l'effet de différentes subventions, normes ou marchés.

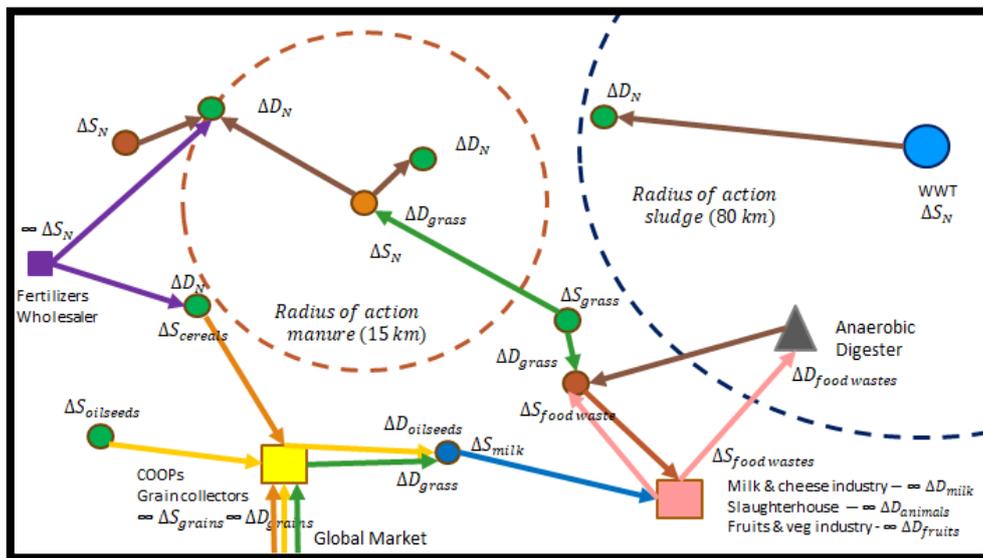


Figure 4 : Représentation des flux de matières dans le modèle FAN avec les potentiels d'offre (S) ou demande (D) de diverses matières. Des fermes sont représentées par des petits cercles, les autres formes sont des partenaires agricoles, en jaune un collecteur de grains, en rose une industrie agroalimentaire, en bleu une station d'épuration des eaux. Des exemples de flux sont représentés par des flèches, en marron pour l'azote sous forme de fumier, boues ou digestats ; en violet de fertilisants de synthèse ; en jaune des oléagineux ; en orange des céréales ; en vert de l'herbe ; en bleu du lait et en rose des déchets des industries agroalimentaires. Les cercles en pointillés représentent le potentiel rayon d'action de certaines matières résiduelles, comme le fumier ou les boues, pour lesquelles une distance maximale d'échange est appliquée.

De plus, le facteur « fidélité », limite l'exploration de nouveaux partenaires chaque année, et le facteur « disposition à échanger », limite le nombre d'agents potentiels pouvant participer à des échanges dans le territoire. L'application de cette équation permet d'attribuer un « poids » à chaque couple potentiel d'agents. Le modèle choisit ensuite de façon stochastique les agents qui vont échanger de la matière, en accordant plus de probabilité d'être choisis aux couples qui présentent le poids le plus fort. Cette stochasticité permet de rendre compte indirectement de la complexité sociale de ces échanges. Chaque cycle de simulation représente une année, avec ses différentes étapes allant de la production de déchets et aliments à leur transformation, en passant par les échanges de déchets, d'aliments pour animaux, de produits agricoles à transformer ou à méthaniser. Lors des simulations, le modèle FAN permet de montrer des visualisations de flux sur la plateforme GAMA, par exemple des matières organiques fertilisantes (Figure 5).

Le modèle FAN est capable de calculer à la fois la production agricole et la performance environnementale à travers un jeu d'indicateurs mobilisés pour évaluer les scénarios simulés. Ces indicateurs sont : la production animale et végétale, la production de bioénergie, les flux d'azote (N) des agroécosystèmes vers l'environnement, le nombre de flux locaux, les quantités et distances parcourues par les matières échangées ; et enfin les émissions de GES d'origine agricole ainsi que le stockage du carbone (C) dans les sols.

La production végétale est estimée d'après l'assolement des fermes par type de ferme et d'après les rendements des cultures obtenus à l'échelle du département (Agreste, 2010), ces derniers étant ajustés en fonction des apports de N aux sols agricoles. D'autres facteurs limitants tels que la disponibilité en eau ou les ravageurs ne sont pas pris en compte, car ils sont supposés non variables entre les scénarios simulés.

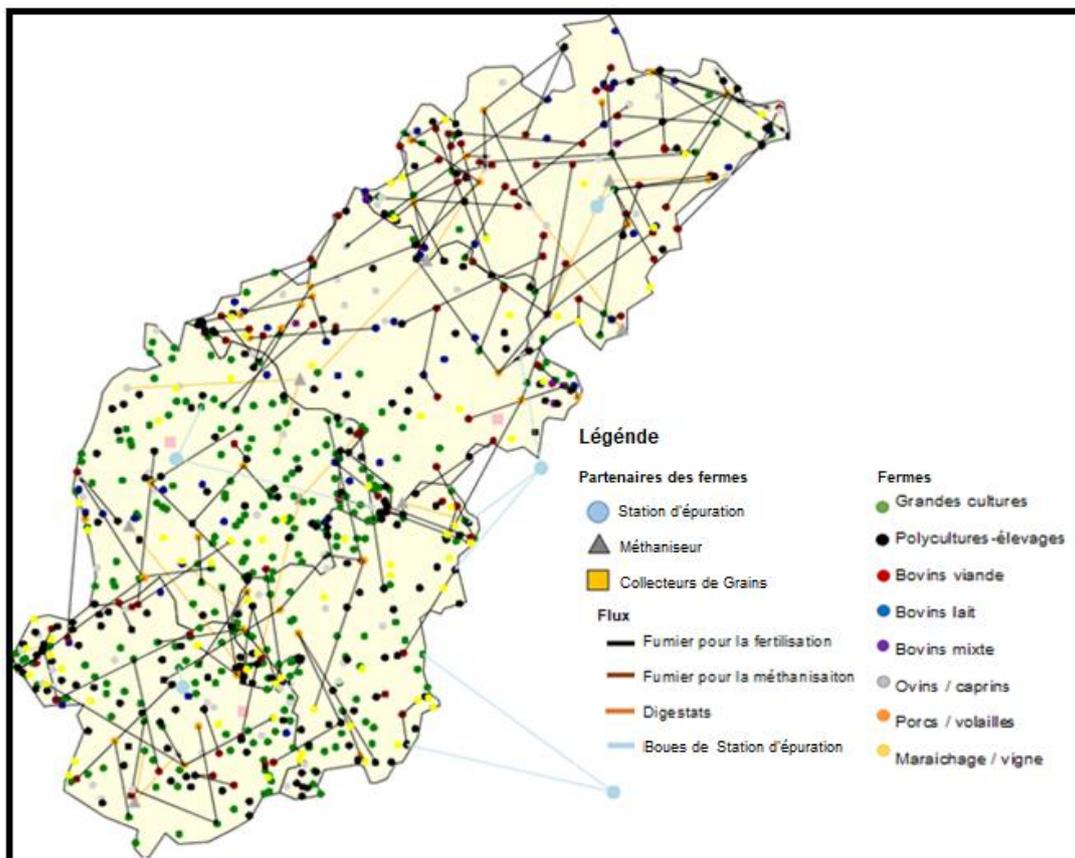


Figure 5 : Représentation des flux des matières résiduelles à vocation fertilisante dans la plateforme GAMA.

L'alimentation animale est estimée d'après les effectifs animaux par type de ferme (caractérisés à l'échelle du département) et par des données portant sur la consommation moyenne des aliments pour chacune des catégories d'élevage (caractérisées à l'échelle nationale ou régionale) (Devun et Guinot, 2012 ; Dusard, 2015 ; Gaudré 2015 ; Jousseins et al., 2014). Les besoins alimentaires des animaux sont supposés toujours satisfaits par un approvisionnement local (provenant de l'intérieur du territoire) ou global (provenant de l'extérieur) pour les aliments composés, car il s'agit de matières qui sont faciles à transporter. En revanche, l'approvisionnement des fermes en fourrage a été considéré que localement et sert à moduler la production de lait et viande des ruminants. La production animale est également obtenue par multiplication des effectifs animaux par des indicateurs de productivité moyenne par animal (caractérisée à l'échelle régionale pour les ruminants et nationale pour les monogastriques). À l'échelle de l'exploitation, la disponibilité en fourrages (herbe, ensilage et légumineuses fourragères) par animal module la production de lait et de viande (Agabriel, 2010), que nous faisons varier dans une fourchette de ± 10 % par rapport aux valeurs moyennes observées régionalement. La comparaison de la demande exprimée par les animaux et de l'offre des cultures permet de calculer des bilans fourragers et de concentrés, exprimés à l'échelle de la ferme ou du territoire.

La production de bioénergie par méthanisation est estimée en considérant un substrat générique composé de 68% de fumier, 17% de biomasse verte (à moitié déchets urbains, et moitié herbe ou cultures énergétiques) et 15% des déchets des industries agroalimentaires (ADEME, 2013). L'énergie produite par tonne de substrat, estimée proportionnellement au potentiel méthanogène des substrats entrants, est de 42 m³ de biogaz, avec un rendement de 34%, ce qui équivaut à 85.73 kWh d'électricité (Pöschl et al., 2010 ; ADEME, 2013).

Le nombre et les distances associées aux flux locaux sont estimés en définissant les flux locaux comme transportant des matières entre deux acteurs au sein du territoire. Nous considérons que chaque flux s'arrête lorsque les matières sont transformées au sein d'un agent. Les distances parcourues par les matières échangées entre deux acteurs sont estimées à vol d'oiseau, en formant l'hypothèse que les trajets sont parcourus en camion.

Les flux de N entre les agroécosystèmes et l'environnement sont estimés en considérant les flux entrants de N sur les sols agricoles (flux de N minéral, de déjections animales, de fixation symbiotique, d'apports d'autres déchets méthanisés) et les flux sortants des sols agricoles (flux de N récolté dans les végétaux, de NO₃ lessivé, de NH₃ volatilisé et de N₂O dénitrifié), ces derniers étant estimés sur la base des données et méthodes fournies par le GIEC. La dynamique de l'azote organique des sols est supposée à l'état d'équilibre.

Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) ont été calculées et exprimées en équivalent CO₂, en incluant les émissions directes et indirectes au sein du territoire liées aux flux des matières et les émissions induites à l'extérieur du territoire liées à des matières produites ailleurs mais qui rentrent dans le territoire.

2.3 Les scénarios

Différents scénarios ont été créés pour explorer les possibles évolutions des flux de matières dans les systèmes agricoles et alimentaires du Ribéracois (Figure 6). Les scénarios ont été proposés d'une manière emboîtée (à l'exception des deux derniers), i.e. chaque scénario contient le scénario précédent avec des changements de pratiques agricoles de plus en plus structurels. Les scénarios conçus ont les caractéristiques suivantes :

- **BAU** : La situation de base (« business as usual » en anglais) qui consiste à reproduire la situation existante.

- *BPA* : L'adoption de « Bonnes Pratiques Agricoles » par les fermes telles que l'ajustement de la fertilisation N et l'usage de cultures intermédiaires pour éviter les pertes de nutriments du côté cultures, et l'ajustement de la ration protéique des animaux du côté élevages (Peyraud et al., 2012).
- *BIOGAZ* : La mise en place de méthaniseurs afin de valoriser le potentiel maximal de transformation de matières locales. Dix méthaniseurs ont été répartis dans le territoire afin d'être approvisionnés collectivement.
- *Symb. C-E* : Symbiose Cultures-Élevages mettant en lien la production d'aliments pour animaux et sa consommation locale. Ce scénario ajuste la surface destinée aux aliments pour animaux de sorte à satisfaire la demande des élevages, notamment en substituant des céréales par de l'herbe ou des légumineuses.
- *Sans Fert.* : Sans Fertilisant de Synthèse est un scénario dans lequel la fertilisation de cultures est seulement satisfaite par des sources organiques. La production des cultures simulée est réduite si la quantité de N apportée aux sols ne suffit pas à couvrir les besoins des cultures.
- *Symb. C-E + E /2* : L'effectif des animaux d'élevage est réduite de 50%, en affectant tous les troupeaux de la même manière. L'assolement avec des cultures à vocation d'alimentation animale est ainsi modifié avec les nouveaux effectifs de troupeaux, tout en préservant une symbiose entre cultures et élevages.

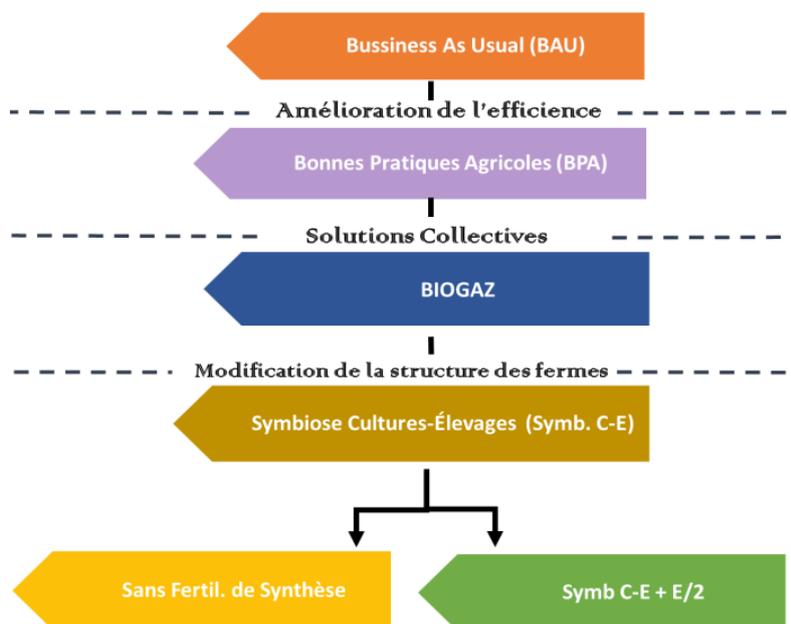


Figure 6 : Scénarios explorés avec le modèle FAN dans le territoire du Ribéracois.

3. Résultats

Dans cette partie, nous discutons les résultats de simulation du modèle FAN à travers différents indicateurs de production alimentaire et énergétique et de performances environnementale et logistique. Chaque scénario a été répété 30 fois (avec 30 distributions spatiales différentes des fermes au sein du territoire). Les résultats représentent la moyenne et l'écart type issus de 5 ans de simulation et 30 répétitions par scénario.

3.1 Flux locaux

Les résultats de simulations montrent que les différents scénarios recyclant des matières ont légèrement augmenté les échanges dans le territoire, en particulier lors de la mise en place de méthaniseurs et la symbiose entre cultures et élevages (Figure 7).

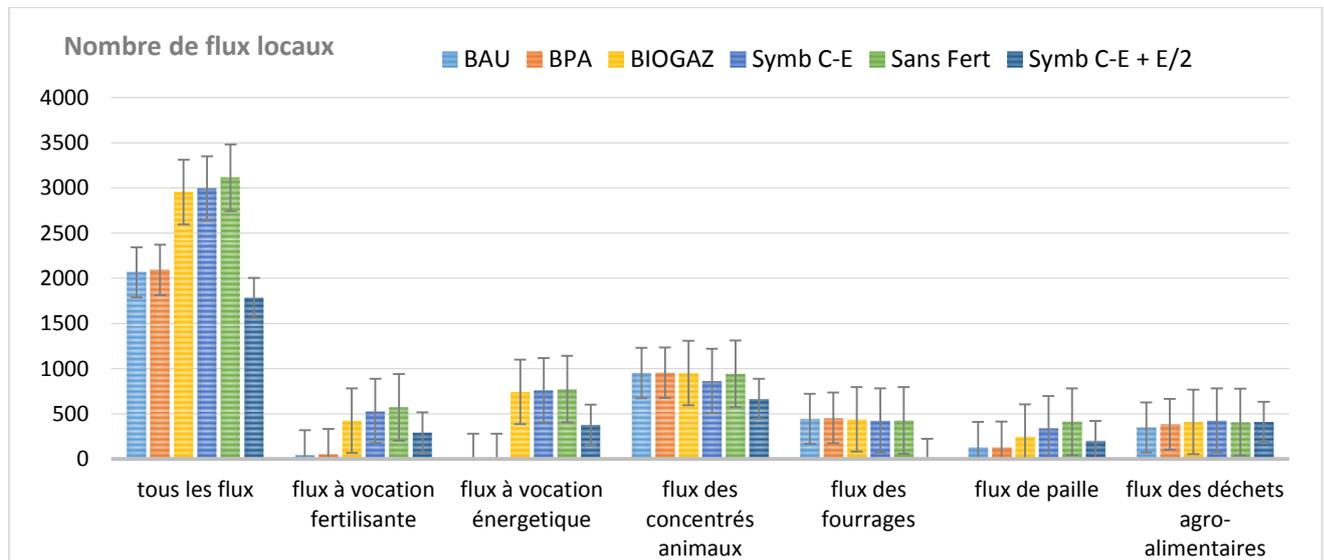


Figure 7 : Résultats de simulation de FAN pour le nombre de flux locaux.

3.2 Production végétale

Les simulations montrent que la production de cultures n'est pas affectée par les quatre premiers scénarios, ceux-ci n'entraînant pas de changements d'assolement ou de disponibilité en éléments fertilisants (Figure 8). Néanmoins, les grandes cultures voient leur production réduite lorsque les fertilisants de synthèse sont éliminés et ce d'autant plus lorsque l'élevage est réduit de moitié (ce qui aboutit, mécaniquement, à une diminution de la disponibilité en N organique pour fertiliser les sols). Par ailleurs, on observe un redressement des légumineuses au détriment des céréales dans le scénario introduisant une symbiose entre cultures et élevages (du fait d'une diminution des surfaces en céréales, au profit des surfaces en légumineuses à graines). Toutefois, la production de céréales augmente à nouveau dans le scénario visant une réduction drastique de l'élevage, par effet de substitution des surfaces en maïs ensilage par des surfaces en céréales.

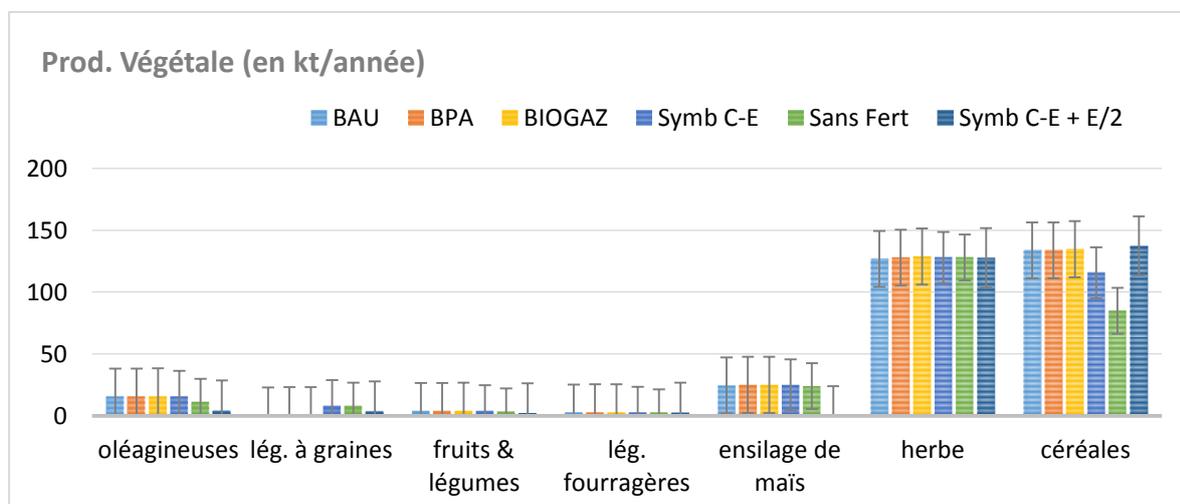


Figure 8 : Résultats de simulation de FAN pour la production végétale.

3.3 Production animale

Les résultats montrent le maintien constant de la production animale jusqu'aux scénarios de réduction des effectifs animaux (Figure 9). Néanmoins, la réduction est moins drastique pour les ruminants que pour les monogastriques. On remarque donc que suite à la réduction du nombre d'animaux ruminants, on trouve un effet positif sur la productivité par animal. En effet, les ruminants bénéficient d'une amélioration du bilan fourrager du territoire, qui était légèrement déficitaire dans le scénario d'origine (BAU).

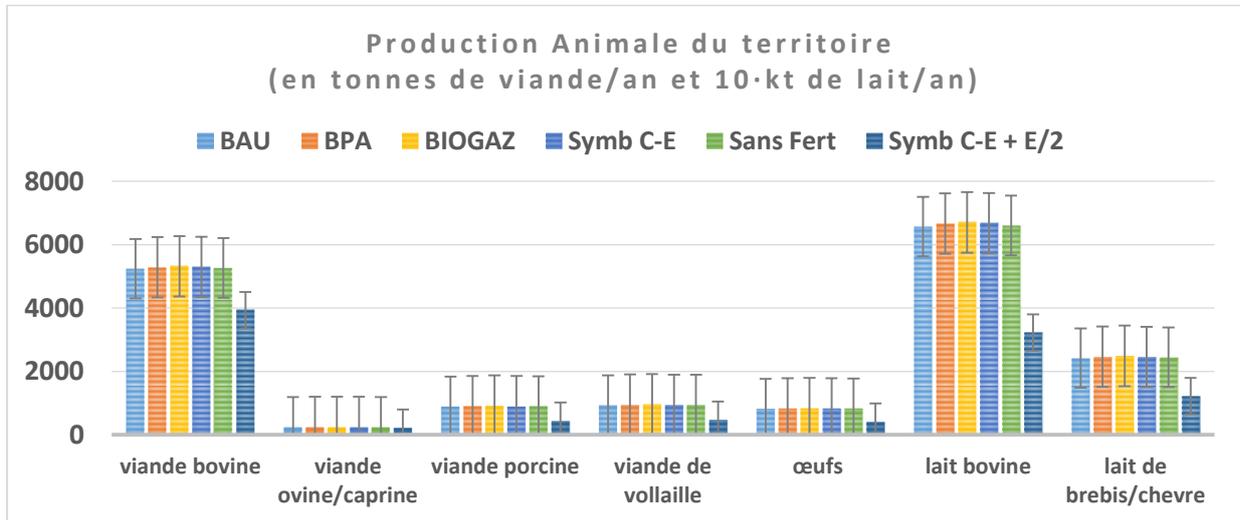


Figure 9 : Résultats de simulation de FAN pour la production animale.

3.4 Production de bioénergie

Le modèle FAN simule l'énergie produite par le gisement méthanisable du territoire. Le substrat total a été estimé par le modèle à 225 tonnes mais cette capacité chute dès que l'élevage est réduit, le fumier représentant 68% du substrat méthanisable. Les résultats montrent qu'à partir du scénario Biogaz, la production de biogaz est d'environ 9,0 milliard de m³, équivalent à une production d'électricité de 18,4 GWh, plus de la chaleur. Cette électricité servirait à satisfaire la demande de 3942 ménages dans le Ribérais, collaborant à l'autonomie énergétique du territoire, qui compte environ 20.000 habitants.

3.5 Flux d'azote

Concernant les apports d'azote aux sols, les résultats montrent une grande utilisation d'engrais de synthèse dans le scénario actuel (BAU), largement supérieure à la demande estimée des cultures dans le scénario « bonnes pratiques agricoles » (BPA) (Figure 10). Cette consommation d'engrais de synthèse diminue avec le développement de synergies entre cultures et élevages mais augmente mécaniquement dans le scénario de réduction de l'élevage par réduction de la disponibilité en effluents d'élevage pour fertiliser les sols et augmentation de la demande en N des surfaces en céréales. Le N provenant de l'excréta des animaux (collecté dans les bâtiments) alloué aux cultures sert à satisfaire la moitié de la demande totale en N des cultures. L'azote fixé symbiotiquement par les légumineuses a une importance remarquable lors de leur implantation dans les rotations, ainsi que le N apporté par les digestats de méthanisation. Enfin, les boues de STEP ont une faible importance dans les intrants d'azote totaux.

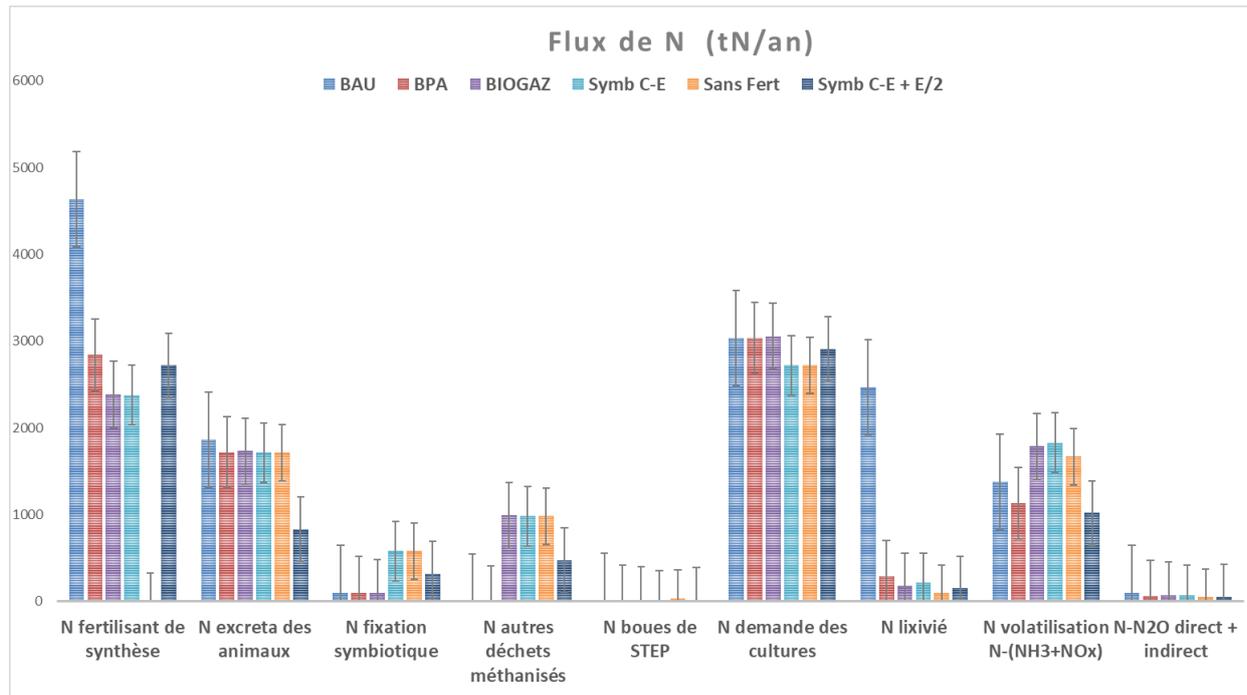


Figure 10 : Résultats de simulation de FAN à travers des indicateurs de flux d'azote (N).

Concernant les sorties d'azote, la demande de cultures varie avec le changement d'assolement : elle augmente avec l'augmentation des surfaces en céréales et oléagineux et elle diminue avec leur substitution par les légumineuses. Cette demande n'est pas totalement satisfaite quand les fertilisants de synthèse sont supprimés. De plus, des pertes d'azote sont observées sous différentes formes telles que lixiviation, volatilisation et dénitrification. Il est important de noter que la lixiviation de l'azote est très importante dans le scénario actuel (BAU), mais avec un important potentiel de réduction consistant à ajuster les doses de fertilisant et en généralisant l'utilisation de cultures pièges à nitrates, comme le représente le scénario BPA.

Avec la progression des scénarios, l'importance relative de l'azote organique dans les apports de N au sol augmente (Figure 11), notamment dans le scénario visant le développement de la méthanisation et, évidemment, dans le scénario sans fertilisants de synthèse.

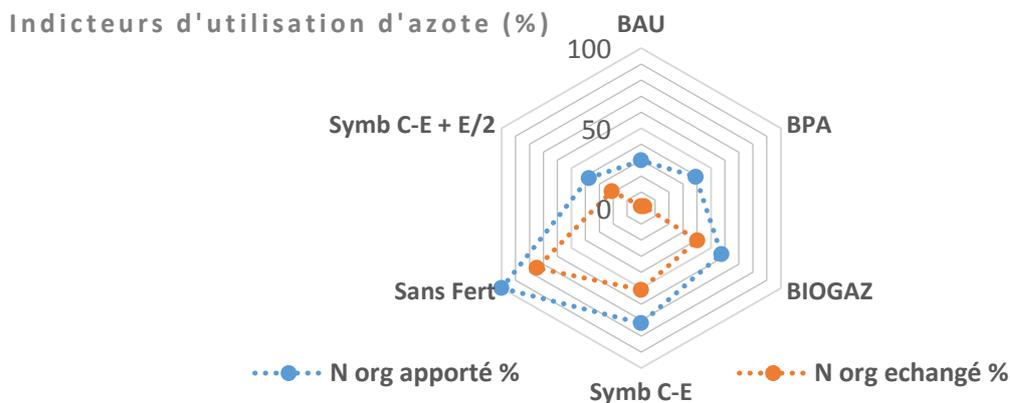


Figure 11 : Résultats de simulation de FAN à travers des indicateurs d'utilisation de l'azote organique. En bleu il est représenté le pourcentage d'azote organique sur le total d'azote apporté au sol au sein des fermes et en orange le pourcentage d'azote organique sur l'azote total lors des échanges des matières fertilisantes.

3.6 Émissions de gaz effet de serre

Les résultats montrent que le bilan total de gaz à effet de serre décroît au fur et à mesure de l'application des scénarios (Figure 12), notamment via la réduction de l'empreinte carbone associée à l'usage des intrants (fertilisants et aliments pour animaux) et la réduction des émissions de CH₄ associées à l'élevage. Les résultats montrent également que les émissions de CH₄ et N₂O contribuent à l'essentiel des émissions de GES (par comparaison aux émissions de CO₂), principalement sous l'effet des élevages et de leurs effluents. On observe également que la plus forte émission négative est associée au stockage de C dans les sols de prairies (Soussana and Tallec, 2010) tandis que la production de biogaz n'aboutit qu'à de faibles émissions nettes négatives de GES. Il est toutefois à noter que les méthaniseurs aident à réduire les émissions de CH₄ lors du stockage du fumier. Enfin, nous constatons que les échanges routiers de matières à l'aide de camion n'ont pas eu un grand impact sur le bilan de GES total.

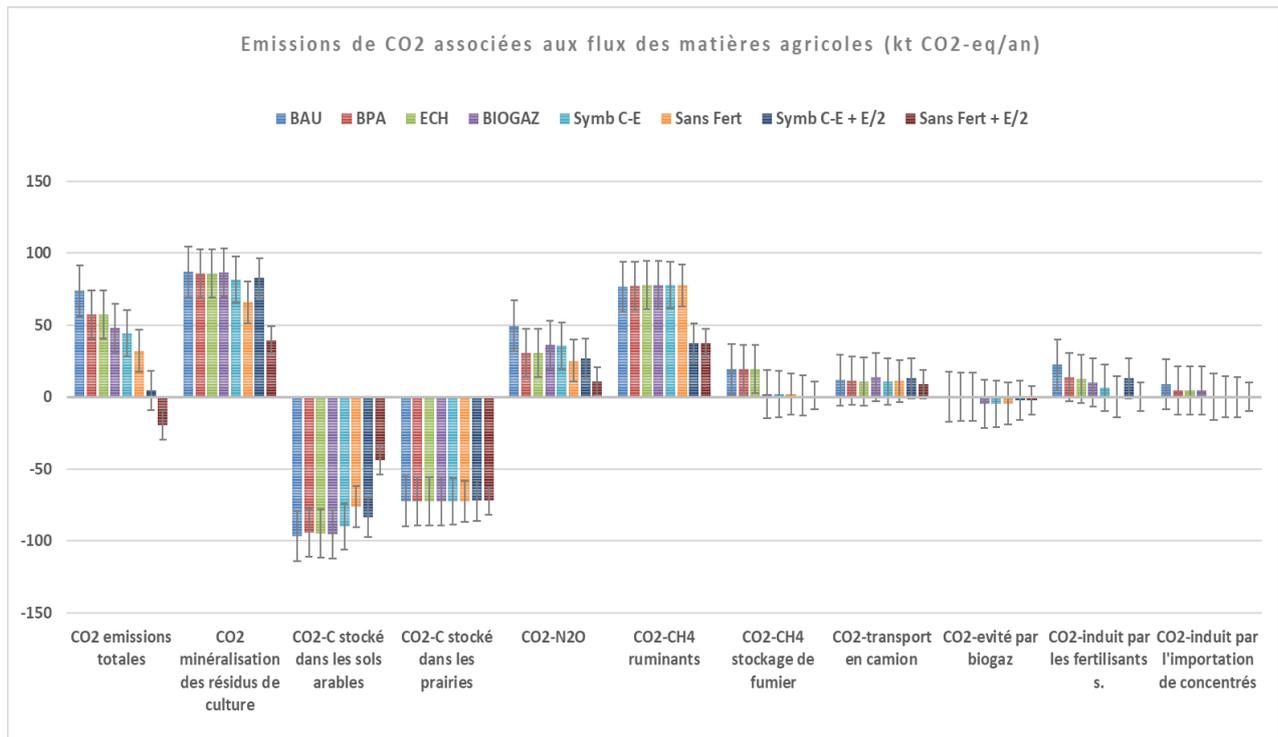


Figure 12 : Résultats de simulation de FAN à travers des indicateurs d'émission de gaz à effet de serre, en équivalents CO₂.

4. Discussion et conclusion

Dans ce travail nous avons montré comment dans le modèle FAN, la combinaison d'un modèle multi-agents à un modèle de calcul de la production agricole avec l'intégration des facteurs d'émission associés aux pratiques, a été utile pour rendre compte des interactions complexes entre acteurs économiques à travers plusieurs contraintes. Le cœur multi-agent du modèle a permis de simuler les échanges de matières entre acteurs, avec la mise en place des règles de décision sur l'allocation des matières, avec la prise en compte de l'échelle spatiale et la distance entre acteurs, et d'aboutir à une interface visuelle sur laquelle observer l'état du territoire lors de chaque simulation (Drogoul et al., 2013). Ainsi, le modèle FAN permet de prendre en charge plusieurs acteurs clés impliqués dans la circularité des flux de matières dans les chaînes alimentaires complexes. Le modèle est également capable de simuler le choix des agents pour certains produits ou pour certains usages. Enfin, le modèle intègre des stratégies d'autonomie ou de dépendance des acteurs agricoles vis-à-vis des marchés

locaux ou globaux. Toutes choses utiles pour concevoir des scénarios d'économie circulaire dans les territoires agricoles.

Les limitations de FAN résident dans l'absence de prise en compte des barrières socioéconomiques relatives à certains scénarios, telles que le coût économique des échanges et la volonté des acteurs à implémenter des solutions locales et collectives. De même, le modèle propose une vision simplifiée du fonctionnement des agroécosystèmes et du milieu pédoclimatique, ne permettant pas de moduler avec précision l'effet des pratiques agricoles sur la productivité des agroécosystèmes. On peut également noter des hypothèses fortes telles que l'égalité parfaite des valeurs fertilisantes des produits organiques et minéraux et l'homogénéité des caractéristiques du milieu. Si ces hypothèses sont, dans leur état actuel, assez critiquables, celles-ci peuvent être facilement modifiées dans le modèle afin de rendre celui-ci plus réaliste.

L'évaluation intégrée des scénarios simulés par le modèle FAN permettent de mieux étudier les interactions entre les différents composants du système. Globalement, nous observons que la performance environnementale s'améliore au fur et à mesure de l'application des scénarios visant le couplage entre les cultures et les élevages. En particulier, les scénarios favorisant les échanges entre les acteurs (i.e., Ech, Biogaz, C-E Symb.) font preuve d'un bon compromis pour augmenter la performance environnementale du territoire et son autonomie à travers de la coordination des acteurs, sans radicalement modifier les assolements et troupeaux des fermes. Recycler les matières agricoles dans une perspective de valorisation fertilisante, énergétique ou d'alimentation animale est possible et a du potentiel, malgré l'investissement que certains équipements demandent, en particulier les méthaniseurs. La reconception des systèmes agricoles proposée dans les derniers scénarios permet de réduire fortement les impacts environnementaux, mais aboutit clairement à une moindre productivité des cultures et des élevages.

En général, une production alimentaire plus durable et une production de bioénergie semblent possibles dans le territoire du Ribérais. Grâce au modèle FAN, nous avons pu rendre compte des interactions multiples entre les différents leviers d'action appliqués et la complexité des possibles avancées pour le bouclage des cycles de la matière et des éléments minéraux. Ce travail ouvre une nouvelle voie de simulation des flux des matières dans les systèmes agricoles et donne des pistes de réflexion pour des politiques agro-environnementales à l'échelle des territoires.

Références bibliographiques

- Alvarenga P., Mourinha C., Farto M., Santos T., Palma P., Sengo J., Morais M.-C., Cunha-Queda C., 2015. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Manag.* 40, 44–52.
- Agabriel J., 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux-Valeurs des aliments: Tables Inra 2010. Édition remaniée. Quae éditions.
- Agreste, 2010. Ministry of Agriculture, France. Recensement Agricole 2010. Retrieved 20 October, 2016 from <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>
- Bodirsky B.L., Popp A., Lotze-Campen H., Dietrich J.P., Rolinski S., Weindl I., Schmitz C., Müller C., Bonsch M., Humpenöder F., 2014. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nat. Commun.* 5.
- Bousquet F., Barreteau O., Mullon C., Weber J., 2013. Modélisation d'accompagnement: systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables, in: *Rendre Possible*. Editions Quæ, pp. 147–155.
- Campbell B., Beare D., Bennett E., Hall-Spencer J., Ingram J., Jaramillo F., Ortiz R., Ramankutty N., Sayer J., Shindell D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecol. Soc.* 22.

- Devun J., Guinot C., IDELE, 2012. Alimentation des bovins: rations moyennes et autonomie alimentaire. Collection Résultats, CR 00, 12(39), 005.
- Drogoul A., Amouroux E., Caillou P., Gaudou B., Grignard A., Marilleau N., Taillandier P., Vavasasseur M., Vo D.-A., Zucker J.-D., 2013. Gama: multi-level and complex environment for agent-based models and simulations. Presented at the Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 1361–1362.
- Dusard L., ITAVI, 2015. Personal communication, 5 July, 2016.
- El-Chichakli B., von Braun J., Lang C., Barben D., Philp J., 2016. Five cornerstones of a global bioeconomy. *Nature* 535, 221–223.
- Elser J., Bennett E., 2011. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. *Nature* 478, 29.
- Fader M., Gerten D., Krause M., Lucht W., Cramer W., 2013. Spatial decoupling of agricultural production and consumption: quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints. *Environ. Res. Lett.* 8, 014046.
- Fernandez-Mena H., Nesme T., Pellerin S., 2016. Towards an Agro-Industrial Ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale. *Sci. Total Environ.* 543, 467–479.
- Foley J.A., Ramankutty N., Brauman K.A., Cassidy E.S., Gerber J.S., Johnston M., Mueller N.D., O'Connell C., Ray D.K., West P.C., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337–342.
- Gaudré D., IFIP, 2016. Rapports de Nutrition des porcins. Retrieved June 2016, from : <http://www.ifip.asso.fr/fr/documentations>
- Godfray H.C.J., Beddington J.R., Crute I.R., Haddad L., Lawrence D., Muir J.F., Pretty J., Robinson S., Thomas S.M., Toulmin C., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science* 327, 812–818.
- Görgüner M., Aksoy A., Sanin F.D., 2015. A transport cost-based optimization for recycling of municipal sludge through application on arable lands. *Resour. Conserv. Recycl.* 94, 146–156.
- Grignard A., Taillandier P., Gaudou B., Vo D.A., Huynh N.Q., Drogoul A., 2013. GAMA 1.6: Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation. Presented at the International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Springer, pp. 117–131.
- Herrero M., Havlík P., Valin H., Notenbaert A., Rufino M.C., Thornton P.K., Blümmel M., Weiss F., Grace D., Obersteiner M., 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 20888–20893.
- Jousseins C., Tchakérian E., Boissieu C., Morin E., Turini T., IDELE, 2014. Alimentation des ovins: rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire. Collection résultats, CR 00, 14(301), 027.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Garnier J., Leach A.M., Galloway J.N., 2014. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry* 118, 225–241.
- Le Noë J., Billen G., Garnier J., 2017. How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Sci. Total Environ.* 586, 42–55.
- Leip A., Billen G., Garnier J., Grizzetti B., Lassaletta L., Reis S., Simpson D., Sutton M.A., De Vries W., Weiss F., 2015. Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environ. Res. Lett.* 10, 115004.
- Lorenz H., Fischer P., Schumacher B., Adler P., 2013. Current EU-27 technical potential of organic waste streams for biogas and energy production. *Waste Manag.* 33, 2434–2448. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.06.018>
- MacDonald G.K., Brauman K.A., Sun S., Carlson K.M., Cassidy E.S., Gerber J.S., West P.C., 2015. Rethinking agricultural trade relationships in an era of globalization. *BioScience* biu225.
- Metson G.S., MacDonald G.K., Haberman D., Nesme T., Bennett E.M., 2016. Feeding the corn belt: opportunities for phosphorus recycling in US agriculture. *Sci. Total Environ.* 542, 1117–1126.

- Moraine M., Duru M., Nicholas P., Leterme P., Therond O., 2014. Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *animal* 8, 1204–1217.
- Mueller N.D., Gerber J.S., Johnston M., Ray D.K., Ramankutty N., Foley J.A., 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490, 254.
- Nesme T., Metson G.S., Bennett E.M., 2018. Global phosphorus flows through agricultural trade. *Glob. Environ. Change* 50, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.04.004>
- Pöschl M., Ward S., Owende P., 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Appl. Energy* 87, 3305–3321.
- Peyraud J.-L., Cellier P., (Coords), Donnars C., Réchauchère O., Aarts F., Béline F., Bockstaller C., Bourblanc M., Cellier P., Delaby L., Dourmad J.Y., Dupraz P., Durand P., Faverdin P., Fiorelli J.L., Gaigné C., Kuikman P., Langlais A., Le Goffe P., Lescoat P., Morvan T., Nicourt C., Parnaudeau V., Peyraud J.L., Rochette P., Vertes F., Veysset P., 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, INRA, 68 p.
- Regan J.T., Marton S., Barrantes O., Ruane E., Hanegraaf M., Berland J., Korevaar H., Pellerin S., Nesme T., 2017. Does the recoupling of dairy and crop production via cooperation between farms generate environmental benefits? A case-study approach in Europe. *Eur. J. Agron.* 82, 342–356.
- Ringeval B., Augusto L., Monod H., Apeldoorn D., Bouwman L., Yang X., Achat D.L., Chini, L.P., Van Oost K., Guenet B., 2017. Phosphorus in agricultural soils: drivers of its distribution at the global scale. *Glob. Change Biol.* 23, 3418–3432.
- Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., De Vries W., de Wit C.A., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855.
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., Monforti-Ferrario, F., Nita, V., 2015. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: policies and facts. *Environ. Dev.* 15, 3–34.
- Schipanski M.E., Bennett E.M., 2012. The influence of agricultural trade and livestock production on the global phosphorus cycle. *Ecosystems* 15, 256–268.
- Soussana J.-F., Tallec T., 2010. Can we understand and predict the regulation of biological N₂ fixation in grassland ecosystems? *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 88, 197–213.
- Sutton M.A., Oenema O., Erisman J.W., Leip A., van Grinsven H., Winiwarer W., 2011. Too much of a good thing. *Nature* 472, 159.
- Taillandier P., Vo D.-A., Amouroux E., Drogoul A., 2010. GAMA: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. Presented at the International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems, Springer, pp. 242–258.
- Tittonell P.A., 2013. Farming systems ecology: Towards ecological intensification of world agriculture. Wageningen Universiteit Wageningen.
- Thual J., ADEME, 2013. État des lieux des projets de biogas par cogénération bénéficiant d'un récépissé d'identification
- Zhao L., Huang Y., Liu Z., Wu M., Jiang L., 2017. Research on Integration of Livestock Products Supply Chain Based on the Optimal Match Between Supply and Demand. Presented at the International Conference on Management Science and Engineering Management, Springer, pp. 1089–1102.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).