

# **SIMULATION DES INTERETS AGRONOMIQUES ET ECONOMIQUES DES ECHANGES PAILLE-FUMIER ENTRE EXPLOITATIONS DE GRANDES CULTURE ET D'ELEVAGE**

E. THIERY<sup>1,2</sup>, G. Brunschwig<sup>1</sup>, P. Vesseyt<sup>1</sup>, C. Mosnier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: AgroSup Dijon, 26, Boulevard Docteur Petitjean-CS 87999, F-21079 Dijon Cedex

<sup>2</sup>: Université Clermont Auvergne, VetAgro Sup, Inra, UMR Herbivores, 63122 Saint-Genès-Champanelle

Correspondance : [eglantine.thiery@agrosupdijon.fr](mailto:eglantine.thiery@agrosupdijon.fr)

## **RESUME**

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, le recours aux engrais de synthèse a conduit à une spécialisation des systèmes d'exploitation en productions animales ou en productions végétales. On constate aujourd'hui, une diminution des stocks de matière organique présents dans les sols des exploitations spécialisées en productions végétales. Or la matière organique est un élément clé de la fertilité du sol (Lal, 2006). La réintroduction de fertilisants organiques peut être un moyen d'augmenter ou de maintenir les stocks de matière organique dans les sols. Les engrais de ferme comme le fumier sont connus pour leur teneur élevée en matière organique. Il est généralement associé à un échange de paille. Cependant, le fumier est souvent décrit comme une matière fertilisante pauvre et volumineuse. Cette étude, traite de l'intérêt économique de l'échange paille-fumier dans le cadre d'une amélioration de la fertilité du sol. Les résultats montrent que l'achat de fumier n'est intéressant économiquement parlant pour un prix compris entre 9 et 14€/t de fumier, au regard des bénéfices attendus avec une augmentation de la matière organique à court et long terme. D'autre part, il semble toujours intéressant pour l'exploitation d'élevage de vendre une partie de son fumier.

## **MOTS CLES**

Modélisation numérique, optimisation économique, échange paille-fumier, matière organique

## **INTRODUCTION**

À la suite d'un recours massif aux engrais de synthèse, à partir de la 2<sup>ème</sup> moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, l'augmentation des rendements des cultures s'est faite au dépend des stocks de matière organique présents dans les sols. Ceci au point d'atteindre un niveau critique de taux de matière organique dans les sols cultivés (Loveland and Webb, 2003). Or, la matière organique est un indicateur ubiquitaire de la fertilité du sol (Lal, 2006). Hijbeek et al. (2017) expliquent qu'une proportion trop faible de matière organique (< 5%), entraîne des problèmes de fertilité du sol, c'est-à-dire sa capacité à répondre aux besoins physique, chimique et biologique des plantes pour leur croissance (Abbott and Murphy, 2007 vu dans Diacono et Montemurro, 2010). Plusieurs auteurs ont observé une diminution significative de la stabilité de la structure du sol, lorsque que la proportion en matière organique est inférieure à 2% (Kemper and Koch, 1996 ; Greenland et al., 1975 vus dans Loveland and Webb, 2003). Diacono et Montemurro (2010) montrent qu'une dégradation de la structure du sol, autrement dit une diminution de la stabilité des agrégats peuvent conduire à une dégradation de la capacité de rétention en eau et une augmentation des risques de compaction du sol, qui réduisent la disponibilité en nutriment et peuvent entraîner des pertes de profit. Ces dégradations peuvent engendrer une perte de profit directe avec une diminution des rendements des cultures ou indirecte avec des difficultés de travail du sol (Hijbeek et al., 2017). Selon Kimetu et al. (2008) ces dernières devraient inciter, les agriculteurs à maintenir un certain seuil de matière organique dans leur sol. Dans le cadre du projet POEETE, les acteurs du

territoire de Saône et Loire ont ainsi fait part des questions et des inquiétudes des agriculteurs autour des problématiques de maintien de matière organique dans les sols dans certaines zones du territoire, spécialisées en grandes cultures.

Une solution évidente pour pallier à cette problématique serait de revenir à une fertilisation en partie organique. L'application régulière de fertilisant organique de type engrais de ferme comme le fumier ou engrais vert, peut contribuer à augmenter les stocks de matière organique des sols.

Cependant, bien que les fertilisants organiques apparaissent comme un moyen intéressant pour augmenter les stocks de matière organique et par conséquent la fertilité des sols, la spécialisation continue des systèmes de production des exploitations jusqu'en bassin de production spécialisé, a conduit les exploitations de grandes cultures à utiliser exclusivement des engrais minéraux. Les cycles locaux des nutriments (Schöder, 2005), autrefois permis dans des systèmes de production diversifiés comme les systèmes de polyculture-élevage, ont été perdus. S'il apparaît difficile de réintroduire l'élevage dans les exploitations de grandes cultures, plusieurs auteurs font l'hypothèse qu'il est possible de transposer ce bouclage de cycles à une échelle plus large que celle de l'exploitation. La maille territoriale permet de prendre en compte les interactions et synergies entre plusieurs exploitations spécialisées en grandes cultures et en élevage (Regan et al., 2017 ; Ryschawy et al., 2017 ; Moraine et al., 2017). Une grande majorité de ces interactions existent depuis longtemps, comme par exemple la mutualisation de matériel avec les CUMA, l'entraide sur des chantiers de récolte. Cependant, les échanges d'engrais sont peu développés. Il existe à ce jour, peu de références technico-économiques sur ces organisations, ne permettant pas d'éprouver les intérêts de la polyculture-élevage connus à l'échelle de l'exploitation et de conduire les agriculteurs à s'engager durablement dans de telles démarches territoriales.

L'objectif de cet article est de discuter des prix équitables pour les échanges paille/fumier compte tenu de l'intérêt de ce dernier pour répondre aux problématiques de maintien de matière organique dans les sols d'exploitations spécialisées en grandes cultures. Pour cela le modèle bioéconomique Orfee a été utilisé et a été appliqué à deux exploitations types de Saône-et-Loire : l'une spécialisée dans les grandes cultures et l'autre spécialisée en élevage allaitant.

## **MATERIEL ET METHODE**

Pour cette étude, il a été fait le choix de passer par une modélisation numérique, nous permettant de s'affranchir d'expérimentations sur des temps longs (durée supérieure à 10 ans) pour estimer les effets du fumier et pour agréger différentes connaissances sur des processus biologiques, chimiques et économiques à l'échelle de plusieurs systèmes d'exploitation. Les données utilisées dans ce travail s'appuient sur la participation d'experts de la recherche et de terrains. Elles concernent des processus biologiques ainsi que les pratiques et référentiels de terrain. Le choix des exploitations étudiées ainsi que des modalités d'interactions ont été discutés et choisis en prenant en compte les attentes de la profession à partir d'un entretien collectif d'acteurs du développement partenaires du projet.

### **Description du modèle ORFEE**

Le modèle utilisé pour cette étude est le modèle ORFEE (Optimization of Ruminant Farm for Economic and Environmental assessment) (Mosnier et al., 2017). C'est un modèle bioéconomique, représentant des exploitations en polyculture-élevage avec un ou plusieurs ateliers de ruminants (bovin viande, bovin lait, ovin viande) ainsi qu'un atelier végétal de cultures de céréales et oléo-protéagineux et de prairies. Ce modèle permet de représenter un large choix de pratiques et d'intégration comme les rotations culturales, la fertilisation organique, l'alimentation des animaux ou encore les objectifs de production. Le modèle optimise le revenu net en tenant compte des variabilités des politiques publiques et du marché, à l'échelle de l'exploitation agricole.

Pour répondre aux objectifs de cette étude plusieurs contraintes ont été ajoutées au modèle. Les principaux modules sollicités sont les modules de culture et de fertilisation. Les données relatives à la région d'étude comme le type de sol, les rendements de cultures, les itinéraires techniques ont été adaptées grâce à des documents tel que le GREN (Groupe régional d'expertise nitrates) Bourgogne 2012, les cas-types des Inosys-Réseaux d'Élevage et validées par des experts. Les prix de produits et des intrants ainsi que les rendements sont ceux mentionnés dans les actualisations annuelles des cas-types, et sont moyennés sur 6 années de 2010 à 2015.

L'équation 1 ci-dessous, tirée du guide méthodologique du calcul de la fertilisation azotée (Comifer, 2013) détermine dans le modèle les besoins des cultures en éléments azotés. Cette équation prend en compte l'azote exporté par les plantes et le reliquat d'azote présent dans le sol en fin de bilan (Rf) auquel on soustrait l'azote déjà consommé (Pi) (exclusivement pour les cultures d'hiver) et l'azote présent dans le sol (Ri) tous deux à l'ouverture du bilan. Les paramètres d'états initial (Ri) et final (Rf) varient en fonction de la région et de la qualité des sols. Cette équation prend également en compte les autres entrées d'azote dans le système sol-plante comme la minéralisation de l'humus (Mh), la minéralisation des résidus de cultures (Mr) et la minéralisation après retournement des prairies (Mhp). La minéralisation de l'humus est dépendante du type de sol, du type de plantes cultivées et de l'intensité de culture.

$$\text{Equation 1 : Besoin en azote (minéral et organique)} = (N_{\text{exporté}} + Rf) - (Pi + Ri) - (Mh + Mhp + Mr)$$

Cette équation permet d'estimer et de moduler les besoins de la culture en place en fonction des reliquats eux même dépendants du précédent cultural, du type de sol et des pratiques de l'agriculteur. Dans le but de créer plusieurs scénarios avec une fertilisation mixte (organique et minérale), plusieurs contraintes ont été ajoutées au modèle initial.

$$\text{Equation 2 : } V_{\text{Hacult}_c} \times \text{besN}_c \times \text{partForga} \leq V_{\text{Qfumier}} \times N_{\text{fumier}} \times \text{minerFumier}$$

$$\text{Equation 3 : } V_{\text{Hacult}_c} \times \text{besN}_c \times (1 - \text{partForga}) \leq V_{\text{Qfmin}} \times N_{\text{fmin}}$$

Ces deux équations permettent de déterminer une part minimum de fertilisation organique (partForga) à apporter sur les parcelles. L'équation 2 exprime la contrainte que la quantité de fumier à apporter ( $V_{\text{Qfumier}}$ ) multiplié à la part d'azote assimilable par les plantes ( $N_{\text{fumier}}$ ) et la vitesse de minéralisation du fumier (minerFumier) doit être supérieure ou égale à une part d'engrais en azote organique minimum en fonction des besoins en azote des cultures ( $\text{besN}_c/\text{ha}$ ) multipliés par les ha de chaque type de culture ( $V_{\text{Hacult}_c}$ ). La vitesse de minéralisation du fumier est dépendante du type de sol ainsi que des pratiques de cultures et d'application du fumier. Le modèle calcule également les besoins en phosphore et potasse dans d'autres équations. L'équation 3 est la contrainte de fertilisation minérale, construite de la même façon que l'équation 2. Elle signifie que la quantité d'engrais minéral apporté multiplié par son équivalence en azote doit être supérieure ou égale aux besoins des cultures ( $\text{besN}_c$ ) multiplié par le nombre d'hectare ( $V_{\text{Hacult}_c}$ ) en fonction des cultures en place, et la part d'engrais minérale (inverse à la part d'engrais organique).

Le Tableau 1 récapitule les différentes sources utilisées pour renseigner les paramètres du modèle. Le guide de fertilisation en azote (Comifer, 2013), a été utilisé pour le calcul des besoins des cultures et pour estimer la vitesse la minéralisation de la matière organique. Des référentiels des chambres

d'agriculture ainsi que d'autres chambres consulaires et instituts techniques ont été utilisés pour définir le prix de la paille et du fumier ainsi que le coût de transport du fumier. Dans les références techniques fournies par les chambres consulaires et autres organismes professionnels agricoles, on trouve différentes références de prix pour l'achat et la vente de fumier. Dans un premier cas, le chargement, le transport et l'épandage peut être réalisé par une entreprise de travaux agricoles (entre 21-29€/t). Dans un second cas, ces travaux sont à réaliser par le céréalier ou l'éleveur (entre 14 et 19€/t).

Tableau 1 : Sources des données utilisées pour la simulation des échanges paille-fumier

Paramètre	Valeur	Source
Rf	20kg N/ha	GREN Bourgogne 2012
Ri (céréale)	35 kg N/ha	GREN Bourgogne 2012
Ri (oléoprotéagineux)	40 kg N/ha	GREN Bourgogne 2012
Mh	33 kg N/ha	GREN Bourgogne 2012
Mhp	70 kg N/ha	GREN Bourgogne 2012
Minéralisation liée au fertilisant	0.1	GREN Bourgogne 2012
Valeur fertilisante du fumier (N)	5	CORPEN
Valeur fertilisante du fumier (P)	3.2	CORPEN
Valeur fertilisante du fumier (K)	7	CORPEN
Coût de transport fumier	2.7€/Tonnes	Barème agricole CEAFI Bassin Parisien et Nord 2007
Prix de la paille (bottelée)	60-80€/T	Référentiel élevage Inosys réseaux d'élevage
Prix du fumier (en tas à la ferme)	14-19€/T	Barèmes Oise (2016), Somme/Oise (2017)
Prix du fumier (chargé, transporté, épandu)	21-29€/T	Barèmes Oise (2016)

### Description des exploitations

Le Tableau 2 présente les principales caractéristiques des exploitations types utilisées pour la modélisation.

Tableau 2 : Description structurales des exploitations modélisées

		Exploitation de grandes cultures	Exploitation d'élevage
SAU (ha)		250	105
UTH		2	1
Type de sol		Limons profonds MO < 2%	
Productions	Elevage		112UGB (dont 66 vaches reproductrices)
	Cultures	Colza-blé-orge	Blé-orge-triticales, ensilage d'herbe et foin
Résultat courant (k€)		108	18.34

### L'exploitation grande culture

Les données utilisées pour l'optimisation de l'exploitation céréalières, sont des données techniques et économiques d'une exploitation moyenne, représentative de la zone d'étude. Elles ne constituent pas

un cas type en tant que tel. Dans le but de mettre en avant certains mécanismes sans complexifier outre mesure la simulation, une rotation caricaturale, avec les principales cultures de la zone d'étude (Blé-orge-colza) a été choisie. Le choix du type de sol s'est fixé sur un limon avec un potentiel moyen, lui aussi représentatif de la zone d'étude, avec un taux de matière organique inférieur à 2%.

Selon (Kemper and Koch, 1966 ; Greenland et al., 1975 ; Pretty, 1998) et d'après les retours terrains des experts enquêtés, l'exploitation ainsi décrite rencontre ou pourrait rencontrer dans les années à venir, des difficultés en lien avec la perte de matière organique dans le sol.

### **L'exploitation d'élevage**

Les données utilisées pour la description de l'exploitation en élevage de bovins allaitants sont tirées d'un cas-types issu des réseaux d'élevage Inosys. Notre choix s'est porté sur un élevage spécialisé en bovin Charolais en zone herbagère avec production de broutards lourds et de femelles finies. Les 105 ha de surfaces exploitées sont répartis en 11ha de terres cultivées, 71 ha de prairies permanentes non labourables dont 52 ha sont non fauchable et le reste des hectares en prairie fauchées et pâturées. Les céréales cultivées sont destinées à la complémentation et la finition des bovins de l'exploitation.

Ce système est bien représenté dans notre zone d'étude et présente plusieurs intérêts pour une coopération culture-élevage. En effet cette exploitation n'est pas autonome en paille, comme la plupart des systèmes de ce type, et possède une surface de culture faible.

Partant de ces caractéristiques d'exploitations, il paraît intéressant d'essayer d'associer les résultats de sorties de ces deux simulations et analyser la cohérence de la mise en place d'échange paille-fumier entre ces types d'exploitations.

### **Description des scénarios**

Pour chacune des deux exploitations plusieurs scénarios sont envisagés. Ces scénarios ont pour but de tester différents niveaux de fertilisation organique. La quantité et le type de fertilisation sont les variables optimisées dans cette étude, les assolements, les rendements des cultures et la taille du troupeau reste fixe dans les scénarios.

Le principal enjeu pour l'exploitation céréalière est de savoir à quel prix, le céréalier a-t-il intérêt à acheter du fumier. Notre hypothèse est que l'agriculteur a intérêt à appliquer du fumier sur ses parcelles, s'il en retire un bénéfice pécunier (économie de fertilisation minérale en azote et/ou gain des rendements des cultures) ou si, au moins, il ne perd pas d'argent ou de temps, pour réaliser cette pratique. Selon la littérature l'application de fumier n'a d'intérêt pour le stockage de matière organique qu'à une fréquence régulière et une quantité d'application donnée. En effet, Ziegler and Hédout (1991) estiment qu'après 4 ans entre deux applications de fumier l'effet attendu est négligeable. Pour ce qui est de la quantité à apporter, les références proposées varient de 7 tonnes par ha par an à 45 tonnes par ha sur un pas de temps plus long (Liang et al., 2013 ; Steutel et al., 2006). Avec l'aide d'experts la quantité de fumier à apporter a été fixée à 24 tonnes tous les deux ans pour un maintien ou une augmentation de la matière organique dans les parcelles cultivées. Cette pratique correspondra au scénario Ferti-orga long terme.

De plus, au regard de la littérature, nous partons du postulat que l'application régulière de fumier sur les parcelles de l'exploitation avec exportation des pailles, augmente la vitesse de minéralisation de l'azote ainsi que les stocks d'azote dans le sol. Par conséquent, et en accord avec le guide de calculs de la fertilisation azotée (Comifer, 2013) après dix ans d'application régulière de fumier, la disponibilité en azote du sol augmente, la quantité d'azote à apporter diminue. Une substitution de la fertilisation minérale est à prévoir. Pour le scénario témoin, on considère que l'exploitation n'effectue pas d'échange est que la paille est systématiquement enfouie. Cette pratique peut être favorable au

maintien du stock de matière organique dans le sol, cependant la dégradation des résidus de paille ne permet pas la même disponibilité en azote que le fumier.

Tableau 3 : Description des scénarios pour les simulations en exploitations de grandes cultures

	Témoin	Ferti-orga court terme	Ferti-orga long terme	Ferti-orga LT +10% rendement	Ferti-orga CT +10% prix paille
Type de fertilisation	Minérale	Mixte	Mixte	Mixte	Mixte
Epannage de fumier (T/ha/an)	0	12	12	12	12
Vente de paille (T)	0-5	500	587	587	587
Variation du prix de la paille					+10%
Mh	33	33	50	50	33
Période d'application de fumier	0	0-3 ans	10 ans et plus	10 ans et plus	0-3 ans
Variation des rendements en cultures				+10%	

D'autre part, plusieurs études (Zavattaro et al., 2017) montrant un potentiel gain de rendement liée à une amélioration de la fertilité du sol (rétention en eau, texture) alimentent l'hypothèse selon laquelle l'application de fertilisation minérale combinée à une fertilisation organique permettrait une hausse du rendement. Dans un quatrième scénario (Ferti-orga LT +10% rendement), la fertilisation mixte (organique et minérale) à court terme sera comparée à une fertilisation mixte (organique et minérale) à long terme avec une augmentation de 10% des rendements.

Dans cette étude la vente de fumier est associée à la vente de paille leurs prix sont eux aussi liés. On peut émettre l'hypothèse que le marché de la paille et un marché relativement stable, mais qu'il peut exister des variations de prix de ce produit. Dans un cinquième scénario, le scénario Ferti-orga court terme sera simulé avec une variation du prix de la paille de + 10%.

Dans le cas d'étude de l'exploitation d'élevage, la principale question que l'on se pose est de savoir à quel prix et dans quelle quantité est-il intéressant pour l'éleveur de vendre son fumier. Nous faisons l'hypothèse que l'éleveur peut être prêt à céder une partie de son fumier, cependant le risque est de détériorer les stocks de matière organique de ses propres parcelles, ou la substitution d'une partie de sa fertilisation organique par de la fertilisation minérale. A quel prix ne perd-il pas d'argent, au regard du coût actuel de la fertilisation minérale ? Quelle quantité de fumier peut-il céder ?

L'objectif étant de ne pas détériorer les stocks de matière organique dans les parcelles de l'éleveur.

Tableau 4 : Description des scénarios pour les simulations en exploitations d'élevage

	Témoïn	Fumier 100% vendu	Fumier vente libre
Type de fertilisation	Mixte	Minérale	Mixte
Epannage de fumier (T)	802	0	Libre
Mh	50	33	50
Période d'application de fumier	10 ans et plus	0	10 ans et plus

Dans ces simulations, on considère que la paille est à un prix de vente 20% inférieur au prix d'achat, ce qui permet de prendre en compte les coûts de transport.

## RESULTATS

### La ferme de grandes cultures

La première simulation porte sur l'impact d'un apport régulier de fumier sur les cultures par rapport à l'utilisation de fertilisants minéraux seuls et sur les résultats économiques de l'exploitations dans le cas où du fumier est acheté. L'apport d'une part de fertilisation organique conduit, comme il était attendu à une substitution d'une partie de la fertilisation minérale (entre 8 et 15% pour la fertilisation azotée).

Cependant, la substitution en fertilisants de synthèse mise en avant dans le Tableau 5, ne permet pas de diminuer les charges de fertilisation. En effet, le coût du fumier est relativement élevé par rapport à un fertilisant de synthèse au regard de la quantité d'éléments minéraux réellement utilisables par les plantes.

Tableau 5 : Résultats technico-économiques de la fertilisation dans les différents scénarios simulés

	Témoïn	Ferti-orga court terme	Ferti-orga long terme
Résultats techniques			
Fumier compact (T/ha)	0	12	12
N minéral (kg/ha)	162	150	138
P minéral	53	34	33
K minéral	40	30	26
Résultats économiques			
Prix du fumier chargé, transporté, épandu (€/T)	0	[21 ; 29]	[21 ; 29]
Produit d'exploitation (k€)	391	431	431
Charge de fertilisation (€/ha)	254	[470 ; 567]	[457 ; 556]
EBE(k€)	202	[192 ; 174]	[195 ; 176]
Résultat courant (k€)	108	[93 ; 79]	[95 ; 80]

La production d'environ 400 tonnes de paille dans les scénarios avec échanges à court et long terme permet une augmentation du produit d'exploitation. Ces produits supplémentaires restent relativement faibles au regard des charges de fertilisation, puisqu'ils ne permettent pas d'atteindre le même résultat courant.

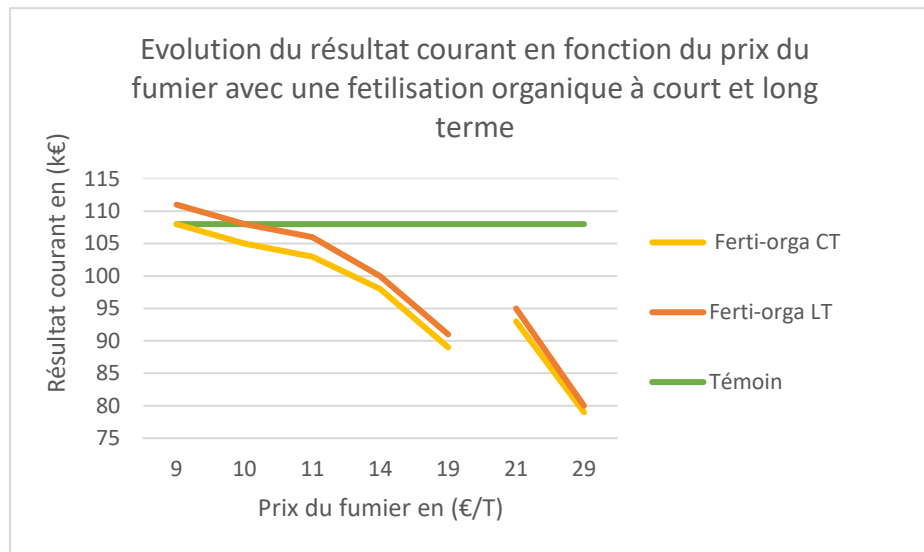


Figure 1: Représentation graphique de l'évolution du résultat courant de l'exploitation céréalière en fonction de scénarios à court et long terme

La Figure 1 représentant le résultat courant en fonction du prix du fumier, en considérant l'effet du fumier à court ou à long terme. Le témoin utilise uniquement une fertilisation minérale. De 9 à 19€/t, le prix du fumier ne comprend que le transport et pas l'épandage alors que de 21 à 29 €/t le transport et l'épandage sont inclus. Ceci explique que la fonction de réponse du résultat courant au prix du fumier soit discontinue.

On met en avant l'écart de résultat courant élevé entre le témoin et les deux scénarios pour un prix du fumier de 21 à 29 euros et même de 14-19 euros. Dans le contexte de l'étude et sur le court terme, l'achat du fumier est économiquement intéressant s'il est en deçà de 9 €/tonne. Dans une stratégie à plus long terme, et partant du postulat d'une augmentation de la vitesse de minéralisation de la matière organique (Schröder 2005), l'agriculteur peut acheter le fumier un euro de plus par tonne pour obtenir un résultat équivalant.



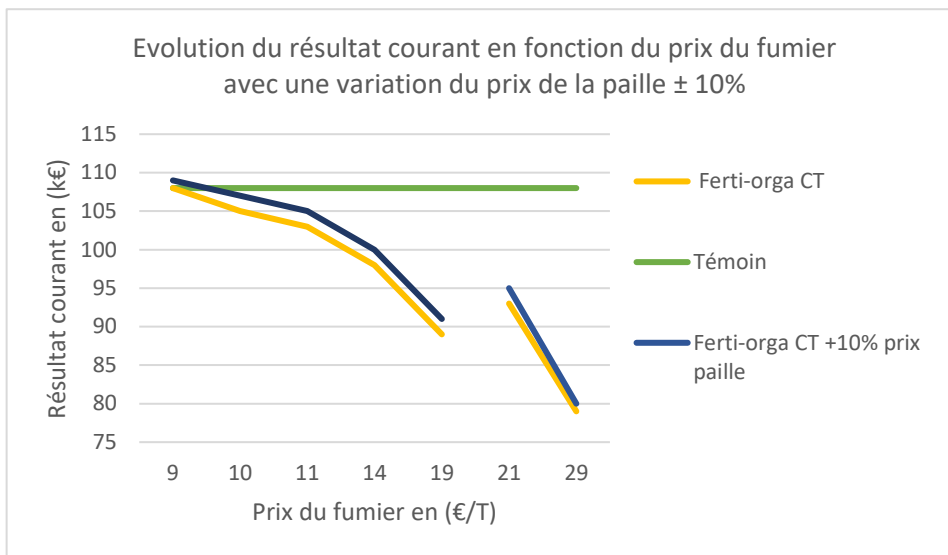


Figure 2 : Représentation graphique de l'évolution du résultat courant de l'exploitation céréalière en fonction de scénarios avec une variation du prix de la paille (10%)

Le prix de la paille est très variable d'une année sur l'autre et d'une région à l'autre, or ce dernier peut avoir un impact sur l'intérêt économique de l'échange paille-fumier. Selon les résultats de la Figure 2, une augmentation de 10% du prix de la paille n'apporte qu'une augmentation de 1.7% du résultat courant par rapport au scénario Ferti-orga court terme.

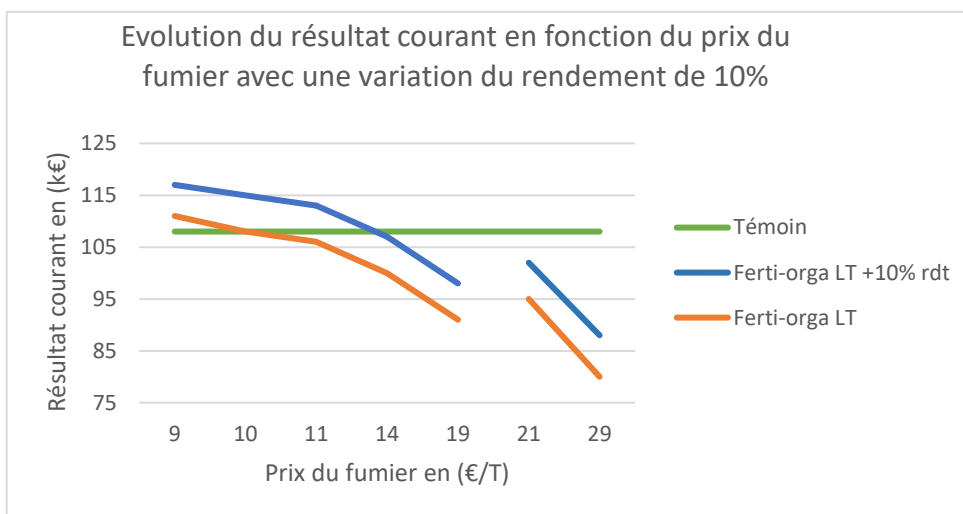


Figure 3 : Représentation graphique de l'évolution du résultat courant de l'exploitation céréalière en fonction de scénarios avec différents rendements (+10%)

Enfin, partant du postulat qu'une application régulière de fumier combinée avec une fertilisation minérale peut permettre une augmentation du rendement des cultures (Zavattaro et al., 2017), le quatrième scénario teste une augmentation de 10% des rendements des cultures (Figure 3). On observe un écart du résultat courant de pratiquement 10 k€ avec le scénario de la fertilisation organique et minérale à court terme. Dans le cas présent avec un intérêt du fumier d'autant plus élevé, l'agriculteur peut envisager d'acheter jusqu'à 14 euros une tonne de fumier pour rester à un résultat courant équivalent au témoin.

Les différents résultats présentés montrent que dans les conditions de cette étude, l'exploitant céréalier a intérêt à acheter du fumier pour maintenir les stocks en matières organiques de ses parcelles que pour des prix du fumier inférieur à 9€/t, voire jusqu'à 14€/t si on se place dans la situation où les rendements seraient améliorés.

### L'exploitation d'élevage

La structure initiale du cas type étudié ne permet pas une application de 24 tonnes de fumier par ha de surface agricole utile tous les deux ans. Cependant, la majorité des parcelles de cette exploitation sont des prairies. La littérature montre que les prairies temporaires sont réputées pour accumuler des quantités importantes de matière organique (Chabbi et Lemaire, 2007). On estime alors qu'un apport de 10 tonnes de fumier tous les deux ans peut suffire à maintenir le stock de matière organique dans les sols d'autant plus qu'une partie de ces surfaces sont pâturées et que cet apport complémentaire n'est pas comptabilisé. L'élevage produit chaque année environ 800T de fumier compact.

Tableau 6 : Résultats technico-économiques de la fertilisation dans les différents scénarios simulés de l'exploitation d'élevage

	Témoin	Fumier 100% vendu	Fumier vente libre
<b>Résultats techniques</b>			
Fumier compact (T/ha)	8 (5-27)	0	6 (5-13)
N minéral (kg/ha)	46	52	49
P minéral	0	4	2
K minéral	0	2	2
<b>Résultats économiques</b>			
Prix du fumier vendu (€/T)	0	10	10
Quantité de fumier épandu en moyenne (T/ha/an)	8	0	6
Produit d'exploitation (k€)	125	130	125
Charge de fertilisation (k€)	5.08	6.25	5.23
EBE(k€)	52	57	53
Résultat courant (k€)	18	22	19

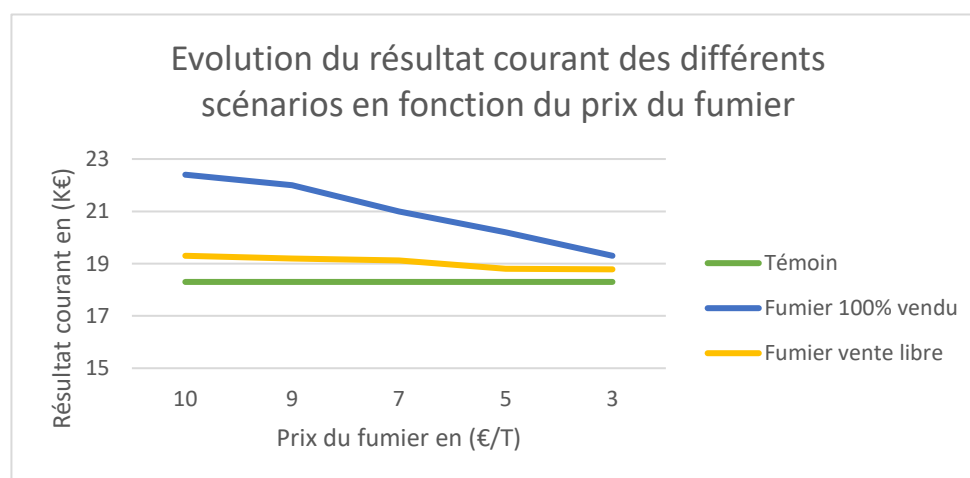


Figure 4: Représentation graphique de l'évolution du résultat courant de l'exploitation d'élevage en fonction de scénarios en fonction du prix du fumier

Dans le scénario où tout le fumier est vendu, on observe une augmentation du produit d'exploitation (Tableau 6), mais également, et en contrepartie, l'augmentation de l'utilisation de fertilisation minérale en azote, phosphore et potasse et par conséquent l'augmentation des charges de fertilisation. Néanmoins, le gain apporté par les produits supplémentaires permet d'augmenter le résultat courant de l'exploitation. Ce scénario semble le plus intéressant au niveau financier, seulement, il ne faut pas perdre de vue que dans ces conditions, l'agriculteur risque, à long terme, de déstocker la matière organique présente dans ses parcelles. Pour rester dans des conditions agronomiquement durables, et respecter les recommandations, l'agriculteur peut céder ou vendre au maximum 20% max du fumier produit. D'après la Figure 4, il semble intéressant dans cette configuration de vendre cette partie de fumier. D'après les résultats de cette simulation, la vente apparaît économiquement intéressante même pour des prix très bas du fumier (3 €/t de fumier).

## DISCUSSIONS

Le principal résultat de cette étude est que les prix du fumier des barèmes utilisés pour implémenter le modèle sont trop élevés au regard des effets bénéfiques pris en compte. D'autre part, il semble toujours intéressant financièrement pour l'éleveur de vendre une partie de son fumier même à prix bas. Il est donc envisageable que les deux exploitations puissent s'entendre sur un prix inférieur aux références utilisées. Plusieurs points, nous obligent toutefois, à prendre du recul sur ces résultats.

### La valeur des engrais de ferme

Tout d'abord, la valeur du fumier peut être sous-estimée, du fait que le modèle ne prenne pas en compte tous les aspects du fumier qu'ils soient positifs ou négatifs. En effet, le premier point d'échauffement concerne la différence entre la valeur fertilisante et la valeur amendante du fumier, la valeur fertilisante étant la plus souvent utilisée. C'est également sur celle-ci que la valeur économique du fumier est indexée, par équivalent azote. Les effets du fumier décrits dans la littérature sont assez peu quantifiables ou dépendants de conditions très précises de température, d'hygrométrie comme l'impact sur le rendement. D'autres paramètres sont difficilement généralisables dans une modélisation à l'échelle du système de production comme ici. Il est également complexe de comptabiliser économiquement des bénéfices environnementaux, lorsque ces derniers n'ont pas un impact direct sur d'autres mécanismes monétisables comme par exemple le rendement.

Il ressort des simulations que les éleveurs auraient intérêt à vendre une partie de leur fumier pour un prix bien inférieur aux barèmes proposés par les instituts techniques. Le marché du fumier est encore peu développé et ne reflète pas forcément le prix d'équilibre d'un marché qui serait mur. Il serait donc intéressant, au vu de ces résultats, de faire une expérimentation auprès des éleveurs et des céréaliers pour déterminer quel pourrait être le prix d'équilibre.

La valeur accordée aux engrais de fermes n'est pas la même selon le contexte local et les contraintes liées à la réglementation. Dans les zones du globe où les engrais artificiels sont peu chers et assurent des rendements élevés, le fumier perd de son intérêt et donc de sa valeur auprès des agriculteurs. Dans les zones en excédent structurel en effluents d'élevage comme au Pays Bas, dans le nord de l'Allemagne ou en Bretagne, les éleveurs sont prêts à payer pour se débarrasser de leurs effluents d'élevage. Au contraire, de Wit et al. (1997) montrent qu'à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, dans encore beaucoup de pays dits en voie de développement, les engrais de ferme sont considérés comme des fertilisants précieux avec autant de valeur que le lait ou la viande. Les producteurs en agriculture biologique accordent également un intérêt relativement fort aux engrais de ferme. Ces systèmes de productions n'ayant pas accès aux engrais de synthèse seront plus à même d'acheter du fumier ou d'autres engrais organiques à des prix plus élevés.

Dans notre étude nous sommes partis du postulat que les agriculteurs ne se connaissent pas avant l'échange paille-fumier, nous avons donc considéré que ces échanges étaient exclusivement marchands. Cependant, Asai (2013) montre que 80% des échanges paille-fumier sont non marchands au Danemark. Les barèmes utilisés proposent également des conversions de quantités de paille et fumier et vis-versa pour les agriculteurs qui ne souhaitent pas monétariser ces échanges.

Selon (Asai, 2013), les grandes exploitations en termes de taille de cheptel, de surface, rencontrent plus de difficultés pour trouver un partenariat stable. La mise en place de contrats pourrait permettre de stabiliser les échanges. Les résultats montrent que l'intérêt de faire appel à des entreprises de travaux agricole pour ce type de chantier, n'est pas intéressant économiquement. Pourtant, un intermédiaire possédant l'équipement et les ressources nécessaires pour prendre en main les négociations et la logistique serait une alternative pour la mise en place ces échanges. Le coût de cet intervenant supplémentaire reste la principale limite.

### **Le transport**

Il est envisageable que le coût du transport ait été sous-estimé car la distance entre les exploitations ont été supposées distantes de 5 à 10 km entre de l'étable à la parcelle à épandre, pourtant le territoire d'étude au complet s'étend sur des distances beaucoup plus grandes. Selon les barèmes utilisés, plus la distance entre les deux exploitations augmente plus le coût unitaire du transport augmente.

Le fumier reste un élément fertilisant volumineux, difficile et onéreux à transporter, selon plusieurs auteurs, l'intérêt de l'utilisation du fumier est circonscrit à « 5 minutes autour de l'étable » pour Russelle et al. (2007) et 5 km selon Asai (2013). Cette distance peut être plus grande entre deux exploitations biologiques (Asai, 2013).

Les traitements des effluents, comme par exemple le séchage des fèces, peuvent faciliter leur transport sur de plus grandes distances et ainsi avoir une meilleure redistribution sur le territoire (Asai et al., 2018).

### **L'intérêt environnemental de ces interactions**

Les externalités environnementales qui ne sont pas directement en lien avec la production n'ont pas été considérées dans la simulation. Les engrais organiques pourraient cependant améliorer le stockage de carbone et donc contribuer à limiter le réchauffement climatique (Diacono and Montemurro (2010). Cependant, de Wit et al. (1997) alertent sur les émissions de méthane et d'ammoniac liés aux pratiques d'épandage. Schröder (2005) parle de bonnes pratiques d'épandage pour lesquelles, la dose, le timing, la collecte et le stockage et l'application doivent être optimisés.

### **Les solutions complémentaires au fumier de bovin**

Les résultats montrent également que seulement 20% du fumier produit par l'exploitation d'élevage peut être exporté vers l'exploitation céréalière. Aux vues de la demande en fumier d'une exploitation céréalière de cette surface, il faudrait 19 exploitations d'élevage de cette configuration pour répondre aux besoins de l'exploitation céréalière. Cette dernière, peut quant à elle, fournir de la paille pour 4 exploitations d'élevage. Il existe un déséquilibre important entre les deux types d'exploitations par rapport à l'offre et la demande réellement présente sur le département.

Il est envisageable d'utiliser d'autre type d'engrais de ferme comme le compost ou le lisier. En effet, il existe une grande diversité d'élevage dans le département avec de possibles compensations entre les systèmes (systèmes bovins laitiers, systèmes granivores) et les types d'effluents produits (lisier de bovin, de porc, compost bovin - ovin).

D'autres part, d'autres pratiques pourraient être envisagées pour augmenter la matière organique des sols et améliorer leur fertilité sur le long terme. L'introduction de couvert végétaux ou d'engrais verts dans la rotation, par exemple, peuvent augmenter l'efficacité de l'utilisation des nutriments par les plantes, principalement en augmentant l'activité des populations microbiennes (Watson, 2002 lu dans Diacono et Montemurro, 2010 ; Triberti et al., 2008).

## **CONCLUSION**

Au regard des résultats, dans le contexte de cette étude, il n'est intéressant économiquement pour les exploitations céréalières d'utiliser du fumier qu'à un prix inférieur à 9 €/t. Une entente pourrait être formée avec les éleveurs puisque dans les conditions de l'étude, l'exploitation d'élevage peut vendre une partie de son fumier à un prix faible, jusqu'à 3€/t sans dégrader ses résultats économiques. La part vendue ne doit néanmoins pas dépasser 20% de sa production pour ne pas dégrader les stocks de matière organique de ses parcelles.

Cependant le gain obtenu avec cette vente de fumier reste limité et ne permettent peut-être pas de couvrir les coûts de l'organisation et des négociations autour de l'échange paille/fumier. Ces coûts ne sont pas forcément monétaires, cela peut être du temps de travail supplémentaire. Ils peuvent néanmoins être un frein à la mise en place d'échanges paille/fumier.

D'autre part, tous les aspects du fumier n'ont pas pu être pris en compte dans le modèle ou pas de façon complète. Ce qui apporte une sous ou surévaluation de la valeur réelle du fumier. Cette valeur étant pratiquement impossible à estimer dans toutes ces dimensions (biologique, chimique, économique, sociale) et selon tous les critères de variations possibles (température, hygrométrie).

La mobilisation des acteurs pour ce projet nous a permis d'intégrer une vision locale des problématiques rencontrées par les agriculteurs de la zone d'étude ainsi que des connaissances et qu'une expertise locales.

La modélisation offre la possibilité de tester rapidement un grand nombre de potentialités plus ou moins optimistes de différents mécanismes biogéochimiques et économiques. Ces différents scénarios offrent du matériel pour discuter et accompagner les coopérations entre exploitations de culture et d'élevage sur des questions de redistribution de matière organique sur le territoire, dans le cas présent avec des échanges paille/fumier mais d'autres échanges pourraient être étudiés.

L'échange paille/fumier malgré certaines lacunes encore existantes est une coopération déjà bien connue et pratiquée. Les échanges possibles entre des exploitations spécialisées d'élevage et de culture sont très nombreux avec pour certains des intérêts environnementaux et économiques plus intéressants que l'échange paille/fumier. Beaucoup de références et de mode d'organisation restent à construire. La modélisation semble être un outil intéressant pour lancer des réflexions sur des modes de fonctionnements alternatifs avec la prise en compte de nombreux critères et contraintes des systèmes étudiés.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier les acteurs du développement ayant participé à l'atelier collectif et qui ont pu être sollicité par la suite pour leur expertise pour valider certaines données de l'étude, ainsi que Sylvie Recous, Gwenaëlle Lashermes, Sabine Houot et Bernard Nicolardot pour leur expertise concernant les données sur la dynamique de l'azote et pour les recommandations d'applications du fumier.

## REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Asai, M., 2013. Understanding collaborative partnerships between farmers: the case of manure partnerships in Denmark. Department of Plant and Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Copenhagen.
- Asai, M., Moraine, M., Ryschawy, J., de Wit, J., Hoshide, A.K., Martin, G., 2018. Critical factors for crop-livestock integration beyond the farm level: A cross-analysis of worldwide case studies. *Land Use Policy* 73, 184–194.
- Chabbi, A., Lemaire, G., 2007. Rôle des matières organiques des prairies dans le cycle de l'azote et impacts sur la qualité de l'eau.
- Chabbi et Lemaire - 2007 - Rôle des matières organiques des prairies dans le cycle de l'azote
- Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée, 2013. Calcul de la fertilisation azotée : guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : cultures annuelles et prairies.
- Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée - 2013 - Calcul de la fertilisation azotée guide méthodologique
- de Wit, J., van Keulen, H., der Meer, H.G., Nell, A.J., 1997. Animal manure: asset or liability? *World Animal Review* 88, 30–37.
- Diacono, M., Montemurro, F., 2011. Long-Term Effects of Organic Amendments on Soil Fertility, in: Lichtfouse, E., Hamelin, M., Navarrete, M., Debaeke, P. (Eds.), *Sustainable Agriculture Volume 2*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 761–786.
- Edmeades, D.C., 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66, 165–180.
- Greenland, D.J., Rimmer, D., Payne, D., 1975. Determination of the Structural Stability Class of English and Welsh Soils, Using a Water Coherence Test. *Journal of Soil Science* 26, 294–303.
- Hijbeek, R., Cormont, A., Hazeu, G., Bechini, L., Zavattaro, L., Janssen, B., Werner, M., Schlatter, N., Guzmán, G., Bijttebier, J., Pronk, A.A., van Eupen, M., van Ittersum, M.K., 2017. Do farmers perceive a deficiency of soil organic matter? A European and farm level analysis. *Ecological Indicators* 83, 390–403.
- Kemper, W.D., Koch, E.J., 1966. Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada: Measurement Procedure, Correlations with Soil Constituents. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.
- Kimetu, J.M., Lehmann, J., Ngoze, S.O., Mugendi, D.N., Kinyangi, J.M., Riha, S., Verchot, L., Recha, J.W., Pell, A.N., 2008. Reversibility of Soil Productivity Decline with Organic Matter of Differing Quality Along a Degradation Gradient. *Ecosystems* 11, 726.
- Lal, R., 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development* 17, 197–209.
- Liang, B., Zhao, W., Yang, X., Zhou, J., 2013. Fate of nitrogen-15 as influenced by soil and nutrient management history in a 19-year wheat–maize experiment. *Field Crops Research* 144, 126–134.
- Loveland, Webb, 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research* 70, 1–18.
- Monaco, S., Hatch, D.J., Sacco, D., Bertora, C., Grignani, C., 2008. Changes in chemical and biochemical soil properties induced by 11-yr repeated additions of different organic materials in maize-based forage systems. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 608–615.
- Moraine, M., Melac, P., Ryschawy, J., Duru, M., Therond, O., 2017. A participatory method for the design and integrated assessment of crop-livestock systems in farmers' groups. *Ecological Indicators* 72, 340–351.
- Mosnier, C., Duclos, A., Agabriel, J., Gac, A., 2017. Orfee: A bio-economic model to simulate integrated and intensive management of mixed crop-livestock farms and their greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems* 157, 202–215.
- Pretty, J., 1999. *The Living Land: Agriculture, Food and Community Regeneration in the 21st Century*. Earthscan.
- 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. *European*

- Journal of Agronomy, Farming systems analysis and design for sustainable intensification: new methods and assessments 82, 342–356.
- Russelle, M.P., Entz, M.H., Franzluebbers, A.J., 2007. Reconsidering Integrated Crop–Livestock Systems in North America. *Agronomy Journal* 99, 325–334.
- Ryschawy, J., Martin, G., Moraine, M., Duru, M., Therond, O., 2017. Designing crop–livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? *Nutr Cycl Agroecosyst* 108, 5–20.
- Schröder, J., 2005. Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. *Bioresource Technology*, The 10th International Conference on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture 96, 253–261.
- Sleutel, S., De Neve, S., Németh, T., Tóth, T., Hofman, G., 2006. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *European Journal of Agronomy* 25, 280–288.
- Tiberti, L., Nastri, Giordani, Comellini, Baldoni, Toderi, 2008. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? - ScienceDirect. *European Journal of Agronomy* 29, 13–20.
- Watson, C.A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L.R., Rayns, F.W., n.d. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239–247.
- Zavattaro, L., Bechini, L., Grignani, C., van Evert, F.K., Mallast, J., Spiegel, H., Sandén, T., Pecio, A., Giráldez Cervera, J.V., Guzmán, G., Vanderlinden, K., D'Hose, T., Ruyschaert, G., ten Berge, H.F.M., 2017. Agronomic effects of bovine manure: A review of long-term European field experiments. *European Journal of Agronomy* 90, 127–138.
- Ziegler, Heduit, 1991. *Engrais de ferme : valeur fertilisante, gestion, environnement*. Institut Technique du Porc.