

Valeur agronomique (C, N, P) de digestats de méthanisation d'origine agricole et agro-alimentaire de Dordogne

Lionel Jordan-Meille, Christian Morel, Xavier Salducci, Julien Michaud

1. Contexte, enjeux, objectifs

La méthanisation (Ademe, 2010) est la transformation de la matière organique en un biogaz grâce à l'action de bactéries dans un **milieu dépourvu d'oxygène**. Ce procédé simple est à même de participer à la recomposition du bouquet énergétique national qui devra, selon les engagements européens pris par la France, être constitué de 23 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie finale d'ici à 2020. Les atouts de la méthanisation sont évidents et cette filière est en plein développement dans le monde agricole. Depuis 2010, la loi de modernisation agricole reconnaît, sous conditions, **la méthanisation comme une activité agricole**. Cette loi a donc permis à un traitement connu de longue date de se développer dans le milieu agricole, en favorisant la fiscalité des projets. Le nombre **d'unités de méthanisation va en se développant**, passant d'une centaine en 2013 à 442 unités en activité en 2016 (source SINOE) dont 239 à la ferme.

Le processus de dégradation biologique peut être réalisé à partir de différents types de déchets : matières organiques issues de **l'industrie agroalimentaire**, déchets ménagers, fumiers et lisiers des **exploitations agricoles**, etc... . Une fois transformées, ces matières constituent un reliquat de moindre volume et partiellement décarboné, le **digestat**. Il s'agit d'une matière fertilisante et épandable puisqu'elle contient des éléments nutritifs majeurs (N, P, K, S, Ca, Mg,...), des oligoéléments (Fe, Cu, Mn, Zn, Mo, B), ainsi que sa matière carbonée non dégradée. La valorisation agronomique des digestats pose des questions importantes au monde agricole, notamment celle de savoir **en quoi ces matières sont différentes des engrais de ferme** que l'agriculture manipule habituellement. Ces matières sont assez peu référencées, y compris au niveau international. Sur le plan réglementaire, les digestats sont considérés comme des **déchets**. Toutefois, un arrêté récent (13/06/2017) a instauré une procédure adaptée permettant la **mise sur le marché** et l'utilisation de **digestats bruts de méthanisation de type agricole**, sous conditions de respects notamment de certains intrants, modes de stockage, usages, tels que précisés dans un cahier des charges spécifique. Leur utilisation fait donc encore l'objet d'études destinées à tester leur intérêt agronomique. C'était l'un des objectifs principaux du **projet CASDAR Méth@+.com** (2013-2016) piloté par l'Association des Eleveurs de la Dordogne (Asseldor) et la Chambre d'Agriculture de Dordogne. Cette étude porte sur l'intérêt agronomique de plusieurs digestats produits en Dordogne, à travers des mesures sur la **biodisponibilité** des éléments N et P, ainsi qu'à travers **l'évolution de la matière organique** des digestats incorporés au sol.

L'approche est **expérimentale** : les digestats testés ont été produits par 5 méthaniseurs de ce département, et sont représentatifs à la fois de différents types de rations, déterminées par un gradient de composition entre origines agricoles et agro-alimentaires (graisse de canard) et de **procédés de post-traitements** : utilisation de digestats bruts, issus de séparation de phase, voire séchés pour les phases solides. En outre, l'évaluation des qualités agronomiques des digestats repose sur une variété de méthodes complémentaires, allant de la simple caractérisation chimique, à des mesures biochimiques en incubation, en conditions de cultures en milieux contrôlés ou au champ. Une mise en cohérence de l'ensemble des résultats permet de tirer les avantages et inconvénients d'épandre des **digestats en substitution à des produits bruts agricoles** qui les composent.

2. Digestats et méthodes d'évaluation de la valeur agronomique

2.1. Origine et traitement des digestats étudiés

Les digestats testés proviennent de trois unités de méthanisation situées en Dordogne (Saint Pierre d'Eyraud, Marcillac Saint Quentin, Nojals et Clottes) et produisent 5 types de digestats suivant la nature des matières premières d'origine agricole et/ou agro-industrielle et le traitement post-méthanisation (produit brut (Br), produit séché par épandage sous chapelle chauffée (Sé), produits liquide (Li) et solide (So) obtenus par séparation de phase après passage sur des filtres à bandes, figure 1). Compte tenu de la durée du programme **méth@+.com** (2013-2016) et du nombre d'expérimentations menées, plusieurs lots de chaque type de digestats ont été étudiés. La proportion des matières premières provenant de l'agriculture est d'environ 60% dans le digestat brut et séché du

méthaniseur de Saint Pierre d'Eyraud (Agri.60_Br & Agri.60_Sé), de 94 % dans le digestat brut du méthaniseur de Marcellac St Quentin (Agri.94_Br), et de 90% dans les digestats liquides et solides du méthaniseur de Nojals et Clottes (Agri.90_So & Agri.90_Li) (figure 1).

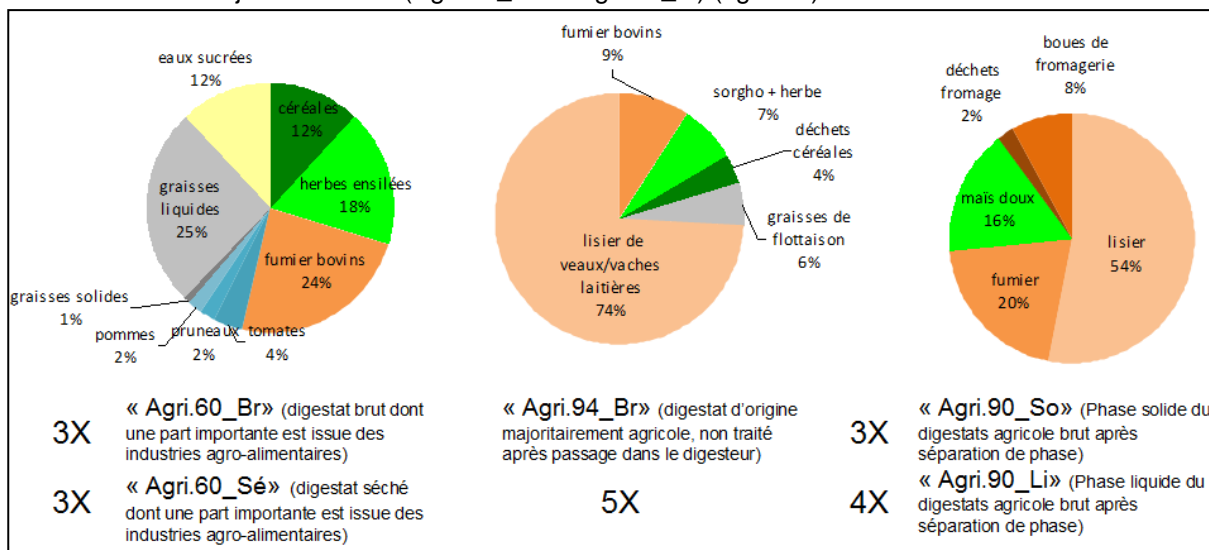


Figure 1 – Composition de la ration des 3 digesteurs et nomenclature adoptée en fonction de la composition des rations (le chiffre mentionné après "Agri" désigne le pourcentage de matière d'origine agricole dans la ration) et des procédés de post-traitement ("Br" : digestat brut sans post traitement, "Sé": digestat brut séché, "So" & "Li" : phases solides et liquides issues d'un procédé de séparation de phase). Les nombres suivis d'un "X" expriment le nombre de lots de chaque digestat utilisé au cours des expérimentations.

2.2. Potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote

Le potentiel de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) (XP U44-163) est la quantité minéralisée de C et d'N d'un produit organique lors d'**incubations** faites en conditions contrôlées pendant 3 mois. Les conditions d'incubation sont une température de 28°C et une humidité de la terre équivalente à celle de la capacité au champ (pF2.5). Le produit organique préparé pour essai (séché à 38°C et broyé à 1 mm) est incorporé à la quantité de 2 g C / kg de terre. Les produits liquides et bruts ont été apportés tels quels dans la terre. La terre de référence est une terre de grandes cultures dont les caractéristiques correspondent à celles demandées par la norme (argile ≤ 25%, pH_{eau} ≤ 7.3, CaCO₃ ≤ 0.2%, C_{org} ≤ 10g/kg). Le C minéralisé (C-CO₂) est piégé par de la soude 0.5M et dosé après 1, 3, 7, 14, 21, 28, 49, 70, 91 jours d'incubation. L'N minéralisé sous forme de nitrate (N-NO₃) et d'ammonium (N-NH₄) est dosé après extraction par du KCl 1 M, après 0, 7, 14, 28, 49, 70, 91 jours..

2.3. Fractionnement Biochimique et Calcul de l'Indice de Stabilité de la MO

L'analyse du fractionnement biochimique de la matière organique (NF U44-164, 11-2014) a pour objectif de calculer un indicateur qui exprime *a priori* le pourcentage de matière organique (MO) **potentiellement résistante à la dégradation** (ISMO) du produit et qui à terme sera incorporée dans la fraction humique du sol. L'ISMO est une appréciation rapide en laboratoire du coefficient K1 (Coefficient Iso-humique) d'un produit organique, coefficient obtenu habituellement à partir d'expérimentation plein champ de moyenne à longue durée. Le produit préparé (séché à 38°C et broyé à 1 mm) subit une succession d'extractions séquentielles avec des réactifs de plus en plus agressifs. A chaque étape, la matière organique résiduelle est déterminée par calcination. En parallèle, le coefficient de minéralisation du carbone après 3 jours d'incubation à 28°C est déterminé selon XP U44-163. Au final, l'indice ISMO (exprimé en % de la MO du produit) est calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{ISMO} = 44,5 + (0,5 \times \text{SOL}) - (0,2 \times \text{CEL}) + (0,7 \times \text{LIC}) - (2,3 \times \text{ct3}), \text{ avec :}$$

- SOL, HEM et LIC : fractions solubles, d'hémicellulose, de lignine & cutine, en % C_{org} du produit,
- ct3 : coefficient de minéralisation à 3 jours exprimé en % C_{org} du produit.

2.4. Principe des biotests, variables mesurées et indicateurs associés (CAU, CRU, Kéq)

Les biotests mis en œuvre permettent d'apprécier la biodisponibilité du N et du P contenus dans les digestats à tester. On ne peut mesurer qu'un seul élément par biotest. Ils s'appuient sur des mesures de croissance d'une plante poussant sur un mélange "terre + digestat", relativement à un témoin non fertilisé (sol seul) et à un traitement de référence enrichi de formes très solubles dans l'eau (triple-superphosphate, ammonitrate). Les quantités de digestat utilisées lors des biotests sont choisies de manière à apporter une quantité égale de l'élément total incriminé (N ou P). Les doses testées peuvent être uniques ou plurielles. Les témoins de référence fertilisés en engrais soluble apportent des quantités égales en éléments totaux à ceux apportés par les digestats. La plante-test est généralement une graminée. La durée d'un biotest peut varier de 1 à plusieurs mois. Les plantes sont ferti-irriguées à partir de solutions nutritives complètes comprenant l'ensemble des minéraux indispensables moins celui étudié. Les mesures de biomasse se font par pesées des coupes, réalisées au ciseau, à intervalles de 15 j environ.

Dans cette étude, pour les biotests N, les seules grandeurs mesurées sont de la matière sèche aérienne (MS), mesurée et cumulée à chaque coupe (grammes) et de la teneur en N ([N]) mesurée sur la matière sèche (mg.g^{-1}). Ces grandeurs permettent de calculer des quantités de N prélevées, ramenées par kg de sol utilisé (M_{sol}) :

$$\begin{array}{ll} \text{sur sol non amendé :} & N_{\text{sol}} = (MS_{\text{sol}} \cdot [N]_{\text{sol}}) / M_{\text{sol}} \\ \text{la modalité organique :} & N_{(\text{sol}+\text{digestat})} = (MS_{(\text{sol}+\text{digestat})} \cdot [N]_{(\text{sol}+\text{digestat})}) / M_{\text{sol}} \\ \text{sur sol fertilisé chimiquement :} & N_{(\text{sol}+\text{engrais})} = (MS_{(\text{sol}+\text{engrais})} \cdot [N]_{(\text{sol}+\text{engrais})}) / M_{\text{sol}} \end{array}$$

On accède ensuite aux indicateurs de biodisponibilité, calculables pour chaque dose apportée :

- **Quantité de N prélevée** issue du digestat, en faisant l'hypothèse que l'ajout d'un fertilisant ne modifie pas significativement la quantité de minéral prélevé du sol :

$$N_{\text{digestat}} = N_{(\text{sol}+\text{digestat})} - N_{\text{sol}}$$

- **Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU)**: il s'agit d'une l'expression de la biodisponibilité de l'N du digestat, calculée comme la différence entre le minéral prélevé du sol fertilisé moins celui du sol non fertilisé divisée par la dose apportée de minéral :

$$\% \text{CAU } N_{\text{digestat}} = (N_{(\text{sol}+\text{digestat})} - N_{\text{sol}}) * 100 / \text{Dose}$$

On calcule aussi le CAU de la forme purement minérale :

$$\% \text{CAU } N_{\text{engrais}} = (N_{\text{engrais}} - N_{\text{sol}}) * 100 / \text{Dose}$$

Le CAU ne fournit qu'une valeur relative : plus les essais durent longtemps, plus la biodisponibilité d'un fertilisant s'exprime. C'est la raison pour laquelle l'indicateur Kéq (Coefficient d'équivalence engrais) lui est préféré, car moins contingent de certaines conditions expérimentales.

La valeur fertilisante N, exprimée sous la forme d'un **Kéq** représente la phytodisponibilité du N du digestat par rapport à celle de la forme de référence (ammonitrate) :

$$\% \text{Kéq-NH}_4\text{NO}_3 = \% \text{CAU } N_{\text{digestat}} / \% \text{CAU } N_{\text{engrais}}$$

Concernant les biotests P, ils reproduisent les mêmes principes et calculs mais ont bénéficié de l'utilisation de la **méthode de traçage isotopique**, selon une démarche scientifique et méthodologique largement éprouvée (Morel et Fardeau, 1989; 1990), y compris sur des produits de recyclage issus d'effluents d'élevage et de l'industrie (Achat et al. 2014). Cette méthode permet de calculer la **valeur précise du P issu du digestat** d'une part, et du sol d'autre part, même en mélange. Des études antérieures ont prouvé la nécessité d'une telle détermination, car le P prélevé du sol peut augmenter suite à l'ajout d'un produit, ne pas varier voire diminuer dans quelques situations (Morel et Fardeau, 1990). En outre, des mesures de **biomasses racinaires** ont été réalisées dans le but de mieux comprendre le fonctionnement global du système sol-digestat-plante. Ainsi, par rapport aux

grandeurs précédentes, **qui s'appliquent aussi au P**, on peut ajouter les indicateurs suivants : (Tableau X).

- **Contribution du P apporté** sous forme de digestat à la nutrition phosphatée :

$$\%Pdff = P_{\text{digestat}} * 100 / P_{(\text{sol}+\text{digestat})}$$

- **Coefficient réel d'utilisation** (CRU-P), rapport de la quantité prélevée de P du produit rapportée à celle apportée :

$$\%CRU = P_{\text{digestat}} * 100 / \text{Dose}$$

- **La valeur fertilisante P** (Kéq-TPS) a été calculée en utilisant soit %Pdff, soit %CRU ou %CAU.

- **L'interaction solxproduit** sur la nutrition phosphatée de la culture représente la différence entre le P prélevé uniquement du sol avant et après fertilisation, souvent exprimée en pourcentage du P prélevé du sol témoin (non fertilisé).

Sur l'ensemble des variables étudiées, des analyses de variance (ANOVA) et une comparaison statistique des moyennes ont été réalisées.

2.5. Caractéristiques des biotests destinés à mesurer les valeurs fertilisantes N et P

La plus grande partie des biotests a été réalisée sous serre. Les biotests N et P sont réalisés de manière indépendante. Pour les biotests N, le sol utilisé provenait d'une prairie en friche située en Dordogne, riche en limon et pauvre en matière organique (tableau 1). Trois doses (en plus d'un témoin non fertilisé) ont été apportées, calculées de manière à apporter l'équivalent de 50, 100 et 150% des besoins de N d'une culture de Ray grass italien. Pour le biotest P, le sol utilisé a été prélevé dans la couche labourée d'une parcelle du domaine expérimental d'AgroParisTech-Grignon, constituée de limon éolien et largement appauvrie en P (tableau 1).

En complément, un essai au champ a été réalisé, mais avec un seul digestat (Agri.94_B). Le semis de Ray grass a eu lieu en octobre, et les prélèvements se sont déroulés en janvier et avril. Les faibles doses d'azote épandues (30 et 51% de la dose nominale, tableau 1) sont liées à la forte dilution du digestat le jour de son utilisation. Les volumes de digestat épandus ont été estimés à 40 et 66 m³.ha⁻¹ selon la dose. Les mesures de biomasses ont été réalisées par deux méthodes complémentaires : fauche (janvier 2015) et herbométrie (avril 2015). Les valeurs de Keq représentent la moyenne de celles obtenues pour chacune des deux doses et des deux dates.

Tableau 1 – Détails des modalités des biotests réalisés sur les digestats, selon l'élément étudié. M_{sol} : masse de sol utilisée pour chaque répétition de chaque modalité. Rép : nombre de répétition du biotest. RGI : Ray grass italien. Les doses calculées s'appuient sur une masse de terre de 3500 tonnes par hectare.

	Type de sol	Teneurs en N ou P	M _{sol} (kg)	Plante-test (1 g.kg ⁻¹)	Durée (j)	Rép.	Nbre coupes	Doses Kg.ha ⁻¹
P serre	Li, pH 8.1, C/N 11	8 ppm P _{Olsen}	1	Mélange graminées	75	4	4	176 kg P.ha ⁻¹
N serre	Li-A, pH 6.6, C/N 11	0.8 g N _{tot} kg ⁻¹	4.8	RGI	70	4	3	57–114–171 kg N.ha ⁻¹
N champ	Sa-A, pH 8, C/N 6.3	0.88 g N _{tot} kg ⁻¹	/	RGI	180	3	2	33–56 kg N.ha ⁻¹

3. Résultats

3.1. Composition élémentaire et fractionnement biochimique des digestats

Les analyses physico-chimiques des cinq types de digestats testés (tableau 1) font apparaître les tendances suivantes :

- les **variations de qualité inter-digestats** sont bien plus liées aux procédés de post traitement (siccité, teneur en P, N-NH₄, C/N) qu'aux rations dont ils sont issus (influence sur le pH, modérée);

- les mesures de siccité des digestats les classent en trois catégories : liquide (Agri.96_B, Agri.90_Li, Agri.60_Br), pâteux (Agri.90_So) et solide (Agri.60_Sé);
- le **pH** des digestats est systématiquement basique, le plus neutre d'entre eux étant le digestat agricole solide issu de la séparation de phases;
- les valeurs de **C/N** laissent supposer des capacités à libérer l'N pour les digestats agricoles liquides et bruts (C/N < 12) et au contraire à provoquer une faim d'N pour le digestat agricole solide;
- la **teneur en MO** (par rapport à la matière sèche) est d'au moins 65%, ce qui classe les digestats largement au-dessus des composts de déchets verts, et du même ordre de grandeur que les fumiers de bovins, voire au-dessous pour le digestat agricole solide issu de la séparation de phases;
- l'azote ammoniacal est un **fort déterminant de l'azote total** ($N_{tot} (g.kg^{-1}) = 26 + 1.1 N-NH_4$, $r^2 = 0.85$);
- l'azote ammoniacal **disparaît totalement des digestats séchés ou solides**; il est en revanche fortement concentré dans les digestats bruts;
- les digestats agricoles liquides et bruts sont **les plus riches en N et P** (par rapport à la matière sèche), à mi-chemin entre lisiers de bovins et lisiers de porcs;
- les teneurs en potassium sont **assez bien corrélées** avec celles des teneurs en azote ammoniacal;
- il existe une **variabilité** de qualité au sein des lots d'un même digestat (écarts-types, tableau 2), notamment concernant les teneurs en eau et l'azote sous ses différentes formes.

Tableau 2 – Composition chimique et biochimique, teneurs en matières sèche et organique des digestats testés lors de l'étude, exprimées par rapport à la matière sèche. Les digestats sont classés par ordre croissant de teneur en MS. Le nombre entre parenthèse suivant les noms des digestats désigne le nombre de lots utilisés, essais N, P et biochimiques confondus. Les nombres entre parenthèse du tableau désignent les écarts types. Pour la nomenclature des digestats, se référer à la figure 1.

		Agri.96_B (5)	Agri.90_Li (4)	Agri.60_B (3)	Agri.90_So (3)	Agri.60_Sé (3)
MS	%	4 (2)	4 (0)	9 (1)	25 (5)	63 (20)
MO	g kg ⁻¹	651 (63)	702 (2)	708 (2)	834 (47)	673 (38)
pH	/	7,9	7,9	8,3	7,2	9,3
C/N	/	4 (0)	5 (0)	6 (0)	22 (4)	12 (0)
N-total	g kg ⁻¹	66 (18)	62 (13)	47 (16)	20 (4)	27 (2)
N-NH4	g kg ⁻¹	44 (5)	29 (1)	39 (4)	0 (0)	0 (0)
N-org	% N-total	53 (24)	68 (18)	55 (33)	98 (2)	100 (0)
N-NH4	% N-total	47 (24)	32 (18)	45 (33)	2 (2)	0 (0)
P	g kg ⁻¹	13 (1)	19 (1)	11 (1)	9 (0)	12 (1)
K	g kg ⁻¹	76 (13)	46 (2)	40 (2)	11 (0)	54 (5)
Ca	g kg ⁻¹	25 (1)	31 (1)	21 (1)	12 (1)	24 (1)
Mg	g kg ⁻¹	7 (1)	8 (0)	6 (0)	5 (0)	6 (0)
N / P	/	5,1	3,3	4,3	2,2	2,3
ISMO	/	68 (1)	79 (6)	76 (11)	61 (4)	80 (4)

Concernant les analyses biochimiques des digestats (lignine, cellulose, hémicellulose, sucres solubles), ceux-ci présentent peu de différences en fonction de l'origine des matières entrantes (IAA ou agricoles) et avec la composition de fumier bovin ou de compost de déchets verts (DV), à l'exception des digestats liquides et bruts qui ont une fraction soluble plus élevée.

La valeur moyenne de l'ISMO des digestats est de 73% (tableau 2). Cette valeur est élevée et classe les digestats dans des produits organiques à forte stabilité, supérieure à celle du fumier bovin, mais inférieure au compost DV. On observe cependant que le digestat Agri.60_Sé présente le même niveau d'ISMO que celui d'un compost DV.

3.2. Potentiel de minéralisation du Carbone et de l'Azote

Sur la base de leur cinétique de minéralisation du C, les digestats peuvent être divisés en 2 groupes (figure 2). Le premier groupe serait constitué par les digestats Agri.60_Se et Agri.90_Li et regrouperait des produits fortement stabilisés, avec des potentiels de minéralisation de la matière organique <15% du C_{org}. Ces produits se comportent à peu près comme tous les produits compostés, et les composts verts en particulier. Le second groupe contient les digestats Agri.96_B, Agri.60_Br et Agri.60_So. Ils se comportent comme un fumier bovin ou une matière végétale non compostée, c'est-à-dire avec un potentiel de minéralisation moyen compris entre 25% et 50%.

Les résultats des cinétiques de minéralisation de l'N sont présentés en % de minéralisation nette de l'azote organique du produit (figure 2). L'azote organique des digestats liquides ou brut n'est quasiment pas disponible en 1^{ère} année d'application. On observe même une immobilisation partielle ou totale de l'N lors de l'apport des produits brut (Agri.96_B, Agri.60_Br). Globalement, ces produits se comportent à peu près comme des composts DV, qui présentent des coefficients de minéralisation de -7% en moyenne (Celesta-lab, n=11). L'azote organique des produits solide et sec apparaît un peu plus disponible, avec un pic de minéralisation qui ne dépasse pas les 20% de N_{org}. Ces coefficients de minéralisation de l'N correspondent à peu près à ceux obtenus pour des fumiers bovins (Celesta-lab, n=5). Au final, ces digestats ne créent pas une famille spécifique de produit organique, mais se comportent tantôt comme des fumiers bovins, tantôt comme des composts DV.

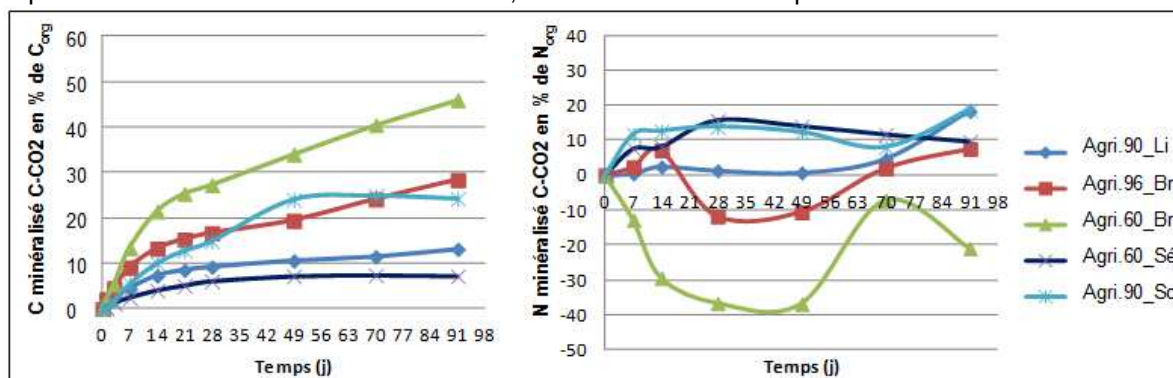


Figure 2 – Cinétique de minéralisation du carbone des digestats, à gauche, et minéralisation nette de l'azote organique des digestats à droite. Pour la nomenclature des digestats, se référer à la figure 1.

3.3. Valeur fertilisante azotée

3.3.1. Résultats des biotests en conditions contrôlées

Les biotests montrent des performances de l'azote des digestats se classant de manière intermédiaire entre témoin non fertilisé et 100% minéral (figure 3). Les effets "dose" sont également logiquement classés. Les quantités d'azote prélevées montrent une allure linéaire, du fait des augmentations de biomasse et/ou de concentrations en N. La biodisponibilité de l'azote minéral (CAU Ammonitrate) se situe entre 30 et 50%. Celle du digestat agricole brut (Agri.96_B) est la plus forte et la moins dépendante des doses appliquées, au voisinage de 30%. Les valeurs de biodisponibilité des digestats Agri.90_Li et Agri.60_Br sont équivalentes (18%). Il ne semble pas y avoir de tendance générale concernant la relation entre la dose d'azote apportée et le CAU. Le calcul d'une biodisponibilité moyenne basée sur la moyenne des disponibilités de chaque dose sera retenu.

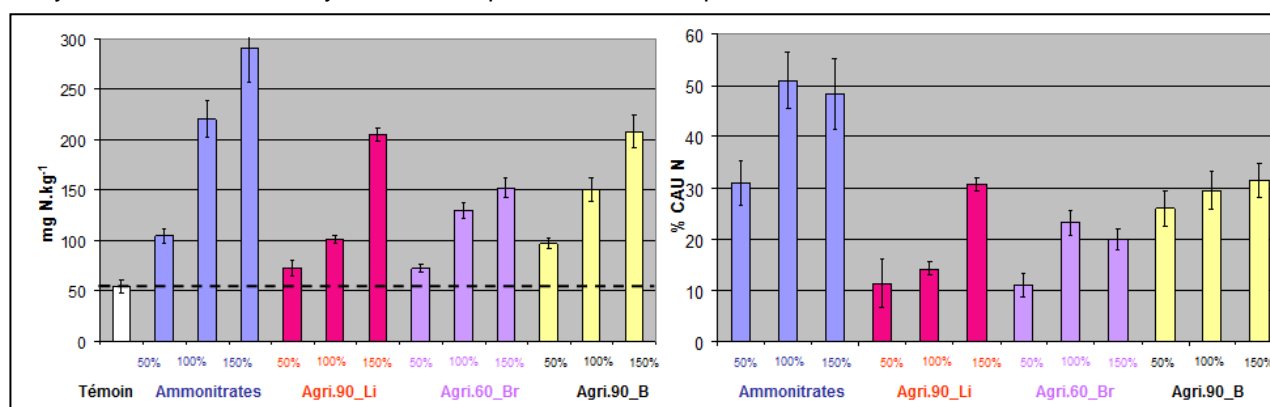


Figure 3 – Exemples de résultats de biotests (conditions contrôlées) réalisés sur la valeur azotée des digestats : quantité d'azote prélevé (N_{digestat}) et Coefficient Apparent d'Utilisation (%CAU N_{digestat}). Pour la nomenclature des digestats, se référer à la figure 1.

3.3.2. Résultats des biotests en plein champ

Les apports d'azote par le digestat brut ont été 4 fois moins concentrés que ce qui était attendu, du fait d'une **trop forte dilution** de celui-ci pendant son stockage ou d'un mauvais brassage avant le pompage (figure 4). Par conséquent, les résultats d'efficacité de l'azote ont été moins robustes qu'attendu. Le digestat a nettement favorisé la **croissance de l'herbe** (+ 10 kg de MS par kg d'N apporté, résultats non montrés).

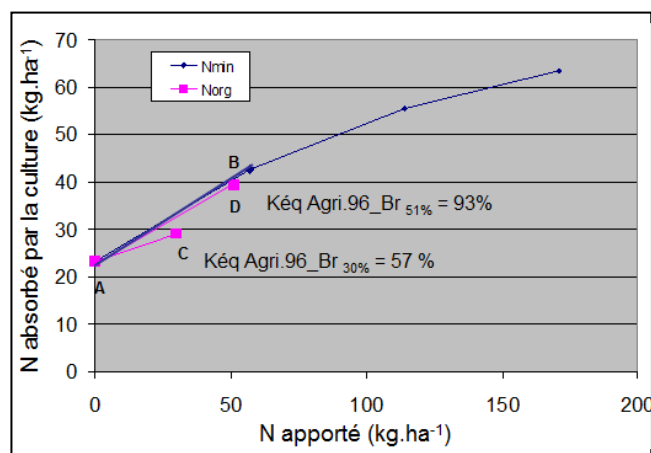


Figure 4 – Courbes de réponse de l'absorption d'N à l'apport d'engrais minéraux (courbe bleue) et du digestat agricole brut (Agri.96_Br) (courbes roses) lors de l'essai au champ. Les valeurs des coefficients équivalents engrais (%Kéq-NH₄NO₃) se réfèrent à des apports d'azote par le digestat ne valant que 30 et 51% de la dose nominale.

L'essai a globalement manqué d'azote sur la deuxième partie de sa période (Janvier – Avril). Bien qu'aucun chiffre unique ne puisse faire office de référence, eu égard à la variabilité des données, on peut néanmoins retenir que l'azote du digestat semble bénéficier d'une bonne valorisation, au moins égale à 57% d'un engrais minéral. Les valeurs de Kéq obtenues pour le digestat agricole brut dans l'essai au champ (57 à 93%, figure 4) se situent dans la même fourchette que celles obtenues lors du biotest (58 à 84%). La variabilité mesurée lors de ce type d'expérimentation a également été soulignée par Decoopman *et al.* (2017) qui a mesuré des valeurs de Kéq variant du simple au triple, sur Ray Grass, en fonction des périodes de pousse.

3.3.3. Synthèse sur la valeur fertilisante azotée des digestats

L'ensemble des résultats (biotests serre + champ) montre que le digestat présentant la meilleure efficacité de son azote est le digestat brut agricole (Agri.96_Br), dont le Kéq-N est de 72% au champ et en pots de culture. Les autres digestats à faible siccité (Agri.90_Li, Agri.60_Br) présentent une valeur intermédiaire de 43%. Quant aux fractions les plus sèches, leur Kéq-N chute à 32 et 17% pour les digestats Agri.90_So et Agri.60_Sé respectivement. Ces résultats convergent avec ceux de la littérature (Cabaret *et al.* 2002, Martel *et al.* 2013, Cavalli *et al.* 2016), qui montrent que les digestats solides présentent un faible coefficient d'équivalent-engrais, contrairement aux digestats bruts et liquides qui ont une équivalence similaire à celles des lisiers, autour de 70%.

3.4. Valeur fertilisante phosphatée

Les biotests avec marquage isotopique du P du sol par des ions phosphate tracés au ³²P et l'analyse par dilution isotopique permettent de **chiffrer exactement l'origine des quantités prélevées** de P soit du sol (Psol), soit du digestat (Pdigestat) ou du TSP (PTSP) au sein de la quantité totale de P prélevé (P(sol+digestat)). Les résultats marquants de cette étude sont (tableau 3) :

- L'apport de 50 mg P kg⁻¹ **augmente significativement la production** de matière sèche (résultats non montrés) et les valeurs de P(sol+digestat) et P(sol+TSP). Par exemple, l'ajout de TSP multiplie par 3 le prélèvement par rapport au témoin non fertilisé. Ce résultat est expliqué par le très faible niveau de P disponible dans le sol, et des conditions optimales de culture.
- La valeur de Psol varie significativement entre les traitements. Les écarts sont compris entre -13% du témoin pour Agri.60_Br et +43% pour TSP.
- Cette interaction du traitement sur Psol est essentiellement expliquée par une **exploration racinaire variable** suite aux traitements (figure 5). Elle est respectivement de -24% et de +19% de l'exploration racinaire du témoin pour Agri.60_Br et TSP. La conséquence directe est que Pdigestat varie entre 4.8 et 7.8 mg P kg⁻¹ de sol alors qu'elle est de 8.9 mg P kg⁻¹ pour le TSP.
- Le **%CRU-P** varie entre 9.6% pour D60%_Br et 17.9% pour le TSP.
- Le **%CAU-P** varie également mais sur une gamme encore plus large allant de 8% pour Agri.60_Br à 23% pour le TSP.

- En considérant le %Pdff qui prend en considération l'interaction digestats×plantexsol, **il n'y a plus de différence significative**. La moyenne du %Pdff des digestats est de 51% et ne diffère pas significativement de celle du P-TSP.
- En conséquence, la valeur fertilisante phosphatée des digestats, aussi appelée Kéq-TSP, rapport du %Pdff-digestat au %Pdff-TSP, est de 100%. **Le P des digestats est donc complètement substituable à celui des engrais phosphatés solubles-eau.**

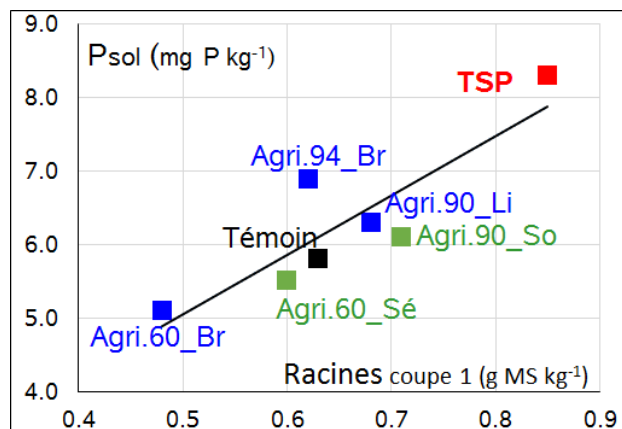


Figure 5 – Relation entre la quantité de P, prélevé uniquement du sol par la culture, et la masse de racines produite (coupe 1) en fonction des différents traitements. Pour la nomenclature des digestats, se référer à la figure 1.

La méthode de traçage/marquage isotopique confirme une nouvelle fois qu'il existe une interaction positive ou négative suite à l'ajout d'un produit sur la nutrition phosphatée. Cet effet a déjà souvent été décrit dans la littérature (Morel and Fardeau, 1990 ; 1991 ; Achat et al. 2014 ; Andriamananjara et al. 2016). La conséquence est que l'origine du prélèvement, que ce soit du P disponible du sol ou du produit ajouté, diffère significativement en fonction des traitements. Dans cette étude, ces différences s'expliquent par une exploration racinaire plus petite ou plus grande que celle observée dans le traitement « Témoin » et donc une interception du P du sol plus petite ou plus grande.

Tableau 3 – Quantité totale (P(sol+digestat)) de P prélevé par la culture de graminées prairiales (Σ 4 coupes) et quantité de P prélevé soit du sol (Psol), soit du digestat (Pdigestat). %Pdff : contribution du P apporté sous forme de digestat à la nutrition P. %CRU : Coefficient réel d'utilisation du P apporté sous forme de digestat. %CAU : Coefficient d'utilisation apparent du P du digestat. Kéq : valeurs fertilisantes P calculées en utilisant soit %Pdff, soit %CRU ou %CAU. Pour la nomenclature des digestats, se référer à la figure 1.

Traitement	Quantité de P prélevé à partir de ...			%Pdff	%CRU	%CAU	Kéq-TSP calculé avec ...		
	Sol + digestat	Sol	Digestat				%Pdff	%CRU	%CAU
	mg P.kg ⁻¹	mg P.kg ⁻¹	mg P.kg ⁻¹				%	%	%
Témoin	5.8 (1.0)	5.8 (1.0)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
TSP	17.2 (2.2)	8.3 (1.0)	8.9 (1.8)	52 (5)	18 (4)	23 (4)	100 (9)	100 (20)	100 (19)
D94%_Br	11.9 (1.4)	6.3 (1.1)	5.5 (0.5)	47 (4)	11 (1)	12 (3)	91 (8)	62 (6)	53 (12)
D60%_Br	9.9 (1.3)	5.1 (0.5)	4.8 (0.9)	49 (3)	10 (2)	8 (2)	94 (6)	54 (9)	36 (11)
D60%_Sé	11.9 (0.4)	5.5 (0.5)	6.4 (0.7)	53 (5)	13 (1)	12 (1)	103 (9)	71 (8)	53 (4)
D90%_Li	14.7 (1.6)	6.9 (0.3)	7.8 (1.4)	53 (3)	16 (3)	18 (3)	102 (6)	87 (15)	78 (14)
D90%_So	13.4 (1.7)	6.1 (0.5)	7.3 (1.4)	54 (5)	14 (3)	15 (3)	104 (9)	81 (16)	66 (14)

4. Discussion

4.1. Questionnement sur la qualité des digestats bruts

Les relatives bonnes performances des digestats bruts testés (biotests, ISMO, cinétiques de minéralisation) s'expliquent en partie par le caractère très artificiel des expérimentations pour lesquelles la forte teneur en eau n'a pas été un élément limitant pour leur déroulement. Ces matières, par exemple très riche en azote ammoniacal (tableau 1) ont en effet permis des gains importants de croissance lors des biotests (Kéq = 73%). Cependant, il faut souligner que l'usage des digestats liquides ou bruts sera en pratique très compliqué du fait des volumes importants à manipuler pour

avoir la même efficacité que des amendements traditionnels. De plus, les produits bruts sont ceux qui présentent le plus de variabilité quant à leur contenu minéral, extrêmement dépendant d'une teneur en eau particulièrement fluctuante. Ceci s'est vérifié lors du test en plein champ où des volumes importants épandus (40 à 70 m³.ha⁻¹) n'ont pu apporter que de faibles quantités d'azote total. Par rapport à l'effet amendant, lorsque les valeurs d'ISMO sont exprimées par rapport à la matière brute, la faible teneur en MO conduit à des apports 5 à 10 fois plus élevés qu'un apport de fumier ou de compost vert (ISMO # 200 kg de MO.t⁻¹) pour avoir la même efficacité. La mise en place d'un séparateur de phase ou la possibilité de sécher les digestats semblent être un complément indispensable aux méthaniseurs pour aider à la valorisation amendante des produits, mais dans ce cas, presque tout l'azote minéral est perdu. Sur le plan du P et du C, l'application des digestats secs ou solides se rapprochent à première vue, de celle des fumiers bovins ou des composts DV.

4.2. Mise en cohérence des résultats sur N (analyses chimiques, biotests, cinétiques)

Une vision synthétique des résultats analytiques et expérimentaux portant sur l'azote des digestats montre a) que le contenu en azote total est fortement influencé par le contenu en azote ammoniacal, b) que plus la part d'effluents agricoles augmente dans la ration, plus le contenu en ammonium augmente, c) que la valeur agronomique mesurée sur un pas de temps court (les résultats des biotests s'obtiennent au bout de 3 mois de culture en conditions optimales, soit l'équivalent d'une saison au champ) dépend entièrement du contenu en azote ammoniacal et enfin d) que le contenu en azote organique n'a qu'une faible incidence sur la libération d'azote, les potentiels de minéralisation étant faibles à très faibles. Les Kéq-N ne dépendent pas des potentiels de minéralisation. On peut donc conclure que, pour l'azote, le seul intérêt des digestats réside dans leur contenu relativement élevé en azote ammoniacal, et que tout doit être mis en œuvre pour garder cette valeur à son maximum, que ce soit pendant le stockage ou au cours de l'épandage.

4.3. Valeur agronomique globale

La connaissance des teneurs en éléments totaux des digestats, ainsi que des coefficients d'équivalence engrais du N et du P, permet de raisonner sur la satisfaction nutritionnelle des cultures suite à un épandage. Dans l'exemple qui suit, le raisonnement de la dose de digestat est fondé sur son contenu en azote. Le digestat choisi est un digestat agricole brut dosant 3 g N_{tot}.kg⁻¹ MB, ou 70g N_{tot}.kg⁻¹ MS). La culture choisie est du Ray grass, avec un rendement objectif de 7 tonnes.ha⁻¹, entraînant un prélèvement de 180 kg N.ha⁻¹. Compte tenu d'une fourniture du sol estimée à 50 kg N.ha⁻¹ et d'un Kéq-N de 70%, la quantité totale de N à apporter est de 190 kg.ha⁻¹, soit 63 m³/ha⁻¹ de digestat brut ou 2.7 tonnes de digestat sec. Cet apport se traduira par une fertilisation phosphatée supérieure aux exportations annuelles de P par les cultures (tableau 4), et cette tendance ne pourra que se creuser au fur et à mesure que le produit sera mal conservé (volatilisation) ou subira des procédés de post-traitement (voir ligne "N/P du tableau 2).

	P	K	Ca	Mg	S
Concentrations dans digestat (mg g ⁻¹)	14	75	25	7	6
Quantités apportées totales (kg ha ⁻¹)	36	199	66	19	16
Teneur ds RGI (kg tonne ⁻¹)	4	28	10	1	1
Exportations (kg ha ⁻¹)	26	196	70	8	9
% satisfaction besoins	140	101	95	253	175

Tableau 4 – Comparaison entre les quantités de minéraux contenues dans 2.7 t ha⁻¹ de digestat (correspondant à 190 kg N ha⁻¹) et les quantités exportées par une récolte de 7 T de Ray Grass

4.4. De la valeur toute relative de certains indicateurs de biodisponibilité ...

L'expression de la valeur fertilisante P, représentée par le Kéq-TSP, a montré des résultats contrastés selon le type de calcul. En calculant la valeur fertilisante phosphatée avec %CRU-P ou %CAU-P, les résultats varient considérablement entre traitements (tableau 3) car ces deux grandeurs sont directement affectées par l'interception du P par les racines dont la masse varie beaucoup entre les traitements (figure 5). **La conclusion est que dans la même étude, suivant l'approche expérimentale et le choix de la grandeur utilisée pour calculer Kéq-TSP, on obtient des informations contradictoires.** Par exemple pour le digestats Agri.60_Br, la valeur fertilisante P est de 36% en utilisant le %CAU-P et de 94% avec %Pdff. Comme la valeur fertilisante phosphatée est généralement déterminée avec le %CAU sans employer la technique de marquage isotopique et donc sans différencier l'origine du P prélevé en fonction des sources, on comprend que la grande variabilité de résultats publiés pour un produit donné est conditionnée par le choix des conditions opératoires, le

type de sol et sa teneur en phosphore disponible (Bolland and Gilkes, 1997). Pour prendre en compte l'interaction de l'ajout du produit, nous recommandons l'utilisation %Pdff pour chiffrer la valeur fertilisante phosphatée.

De manière plus générale, les comparaisons des valeurs fertilisantes obtenues avec les références bibliographiques doivent impérativement être faite culture par culture, et bien distinguer les résultats des biotests effectués en conditions contrôlées de ceux réalisées en plein champ où les facteurs de variabilité sont nombreux (Decoopman *et al.* 2017).

4.5. Prédiction des valeurs fertilisantes par les seules mesures chimiques

La connaissance de la qualité physico-chimique des digestats au moment de l'épandage (teneur en eau, [minéraux]) semble suffisante pour évaluer correctement les effets sur la nutrition des plantes et sur le renouvellement de l'humus du sol. En effet, la teneur en azote ammoniacal contrôle presque entièrement la biodisponibilité azotée du digestat; quant au phosphore, il est aussi biodisponible qu'une forme de référence de type TSP. Les résultats sur l'ISMO nous indiquent enfin que l'ensemble des produits possède un bon pouvoir humigène, et que de ce fait, seule la teneur en MO par rapport à la matière brute saura les hiérarchiser (digestats solides favorisés).

4.6. Digestats ou produits bruts ?

Lors de la phase d'élaboration d'un projet de méthanisation, la question se pose à l'agriculteur de savoir quel sera l'impact de la substitution de l'utilisation de ses engrais de ferme bruts par des digestats. Cette question a notamment été développée par Decoopman (2007). Le présent travail fournit quelques pistes de réponses :

- les processus de méthanisation améliorent la disponibilité en azote minéral du digestat brut, avec comme revers de médaille des risques importants de volatilisation;
- il est possible de bénéficier d'une amélioration de la valeur fertilisantes du fait de la variation de la ration (enrichissement NPK via les co-produits), bien que dans notre étude, toute dilution avec des produits autres qu'agricoles ait entraîné une baisse du contenu en N;
- de manière générale, les caractéristiques agronomiques sont plus dépendantes du type de post – traitement (séparation de phase, évapo–concentration, séchage...) que des matières entrant dans la composition des digestats;
- concernant l'effet amendant, les digestats n'ont pas de grandes différences de comportement avec des fumiers bovins ou des composts, se comportant tantôt comme l'un, tantôt comme l'autre, et ce malgré la perte d'une fraction de C dans le biogaz.

4.7. Critères de choix d'un post-traitement

Le type de digestat produit par une unité de méthanisation doit se faire en amont du projet de méthanisation. Elle doit intégrer les facteurs agronomiques (besoins en effets amendants, besoins en azote et phosphore biodisponibles, besoins en libération d'azote à plus long terme ...), des capacités d'investissement, des distances de transport vers les parcelles, et de l'acceptabilité sociale des digestats, notamment pour les fractions liquides (tableau 5).

Tableau 5 – Critères de choix d'un traitement post-digestat. En rouge, les caractéristiques représentant un frein dans l'utilisation des produits. De faibles distances de transport représentent bien un inconvénient pour la valorisation agricole des digestats sur l'ensemble des parcelles des exploitations.

Type de digestats	Forme des digestats	Type de post-traitement	Caractéristiques agronomiques					Niveau d'investissement	Distances de transport
			MO	N _{organique}	N _{min}	P _{total}	K _{total}		
			structuration	arrières effets	effets engrais				
Digestats liquides bruts	Liquide	X							
Refus solides de séparation de phases	Solide	Séparateur de phases							
Refus liquides de séparation de phases	Liquide								
Distillat par ferti-irrigation	Liquide	Evapo-concentration							
Concentrat	Liquide à chaud								
Refus solide sép. phase + concentrat	Solide								
Digestats séchés	Solide	Serre solaire							

faible
moyen
fort

fort coût
<10 km
faible coût
>10 km

Références bibliographiques

- Achat D, Sperandio M, Daumer M-L, Santellani A-C, Prud'Homme L, Akhtar M, Morel C, 2014. Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma*. 232-234, 24-33
- Ademe, 2010. C'est le moment d'agir. N°40. Novembre 2010
- Andriamananjara A, Rabeharisoa L, Prud'homme L, Morel C, 2016. Drivers of Plant-Availability of Phosphorus from Thermally Conditioned Sewage Sludge as Assessed by Isotopic Labeling. *Frontiers in Nutrition* Vol. 3, article 19, 1-11
- Askri A. 2015. Valorisation des digestats de méthanisation en agriculture : effets sur les cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote. Thèse, AgroParisTech, 234p.
- Bolland M D A, Gilkes R J, 1987. How effective are calciphos and phospal. *Fert. Res.* 12, 229-239.
- Cabaret M M, Hanocq D, Grall J, Tico S, Blondel R, 2002. Coefficient d'équivalence engrais azoté des principaux engrais de ferme. *Chambre Agri. de Bretagne. Guide pratique du technicien*. 32p.
- Cavalli D, Cabassi G, Borrelli L, Geromel G, Bechini L, Degabno L, Gallina P M, 2016. Nitrogen fertilizer replacement value of undigested liquid cattle manure and digestates. *Europ. J. Agronomy.*, 7, 34-41
- Decoopman B, 2007. Quelles pratiques pour substituer le digestat aux engrais minéraux ? Recueil des interventions de la Journée technique nationale 13 mai 2014 : « méthanisation. De nouvelles opportunités pour les territoires ». Journée technique nationale 13 mai 2014. ADEME Editions, Angers 2014 Référence ADEME 7947 ISBN 978 - 2-35838 – 493 - 3
- Decoopman B, Houot S, Hanocq D, Lejars L, Airiaud A, 2017. Quelle efficacité azoté du digestat brut de méthanisation aux champs? *JRI Biogaz méthanisation, UniLaSalle Beauvais*, 11-13 avril.
- Martel S, Desmeules X, Landry C, Lavallée S, Paré M, Tremblay F, 2013. Valeur fertilisante des digestats de méthanisation. *Agrinova*
- Morel C, Fardeau JC, 1989. Native soil and fresh fertilizer phosphorus uptake as affected by rate of applications and P fertilizers. *Plant and Soil*, 115: 123-128
- Morel C, Fardeau JC, 1990. Uptake of phosphate from soils and fertilizers as affected by soil P availability and solubility of phosphorus fertilizers. *Plant and Soil*, 121: 217-224.
- Morel C, Linères M, Guivarch A, Kvarnström E, Parnaudeau V, Nicolardot B, Morel J-L, 2005. Phytodisponibilité et valeur fertilisante du phosphore de déchets urbains. pp. 35-44. *Agriculture et épandage de déchets urbains et agro-industriels. Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 25, Paris, 154p.
- Morel C, 2017. Qualité et valeur agronomique (disponibilité du phosphore, forme, contaminants). Journée « Le phosphore recyclé en agriculture : gisements, produits, qualité, réglementation » organisée par le Comifer et European Sustainable platform (ESPP). le 11 avril 2017, Paris, France. Téléchargeable à http://www.comifer.asso.fr/images/groupe-de-travail/journees-thematiques/Comifer-ESPP_Journee-Phosphore-Recycle-11avril2017_Morel.pdf
- Nanzer S, Oberson A, Berger L, Berset E, Hermann LI 2014. The plant availability of phosphorus from thermo-chemically treated sewage sludge ashes as studied by 33P labeling techniques. *Plant Soil* 377:439–56. doi:10.1007/s11104-013-1968-6
- Sinaj S, Traore O, Frossard E, 2002. Effect of compost and soil properties on the availability of compost phosphate for white clover (*Trifolium repens* L.). *Nutr Cycl Agroecosyst* 62:89–102. doi:10.1023/A:1015128610158