

# Impact de la typologie des digestats sur les nutriments disponibles pour la plante : utilisation d'indicateurs de caractérisation pour prédire la fertilisation minérale

Julie Jimenez\*, Dominique Patureau\*, Marco Grigatti\*\*, Nicolas Bernet\*

\* LBE INRA, UR0050, 102 Avenue des Etangs, Narbonne, F-11100, France

\*\* Department of Agricultural and Food Sciences, Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy

## Introduction

La méthanisation constitue une brique majeure au sein de la bioéconomie circulaire car elle valorise les résidus organiques sous forme d'énergie (i.e. biométhane) mais également sous forme de fertilisants organiques (i.e. digestat) se substituant aux engrais chimiques apportés aux cultures (fourrage, céréales). Néanmoins, l'utilisation agricole de ces digestats est soumise à des contraintes réglementaires et environnementales, en termes de qualité des nutriments disponibles et de matière organique utilisable pour le sol. De plus, les digestats sont très variables selon leurs intrants et les procédés les générant (Guilayn et al. 2019). Afin de mieux contrôler et piloter la qualité des digestats, une meilleure connaissance de l'accessibilité et de la disponibilité des nutriments et de la matière organique vis-à-vis du potentiel agronomique à satisfaire (i.e. par exemple la disponibilité de l'azote N et du phosphore P) est indispensable. C'est pourquoi, l'objectif de cette étude est de déterminer quels compartiments issus de la caractérisation de l'accessibilité de N et P sont minéralisés au sol et utilisés par les plantes afin de (i) évaluer l'impact de la typologie sur la réponse obtenue et (ii) utiliser des indicateurs issus de la caractérisation des digestats pour prédire cette fraction utilisable.

## Matériels et méthodes

Dix digestats ont été choisis à partir de la typologie publiée par Guilayn et al. (2019) selon leurs intrants (fumier bovin, lisier porcin, résidus de récoltes, boues station d'épuration, fractions fermentescibles issus des ordures ménagères FFOM, biodéchets et centralisés à l'échelle du territoire). Afin d'avoir une référence en compostage et d'observer l'impact du compostage, deux composts de digestats (boues et FFOM) ont été inclus. De même, la séparation de phase a été incluse avec la phase liquide et la phase solide d'un digestat centralisé. Enfin, 3 digestats utilisés lors d'une étude similaire réalisée par Grigatti et al. (2019) ont été inclus dans les analyses statistiques. Le tableau 1 présente les noms et les caractéristiques de ces digestats.

Tableau 1 : Descriptions des digestats utilisés

Nom	Type	Echelle	Conditions	Substrat	Référence
Agri_1	digestat	Industriel	Voie sèche, mésophile, batch (2 mois)	Fumier bovin	Cette étude
Agri_2	digestat	Industriel	Voie liquide mésophile, continue, temps de séjour 60 jours	Lisier bovin co-digéré avec des résidus de légumes et des cultures intermédiaires	
Agri_3	digestat	Laboratoire	Voie sèche, mésophile, batch	Paille de blé ensilée	
Sludge_1	Digestat épaissi	Industriel	Voie liquide mésophile, continue, temps de séjour 20 jours puis filtre presse	Boues de station d'épuration d'eaux usées urbaines STEP	
Sludge_2	Compost de boues_1	Industriel	Compostage	digestat de boues de STEP (1/3) et déchets verts (2/3)	
FFMSW_1	digestat	Industriel	Voie sèche, thermophile, continu piston, temps de séjour 20 jours	Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères (FFOM)	
FFMSW_2	compost de digestat	Industriel	Compostage	96% FFOM, 50% déchets verts, 14% déchets aro-alimentaires	
BioW_1	digestat	Industriel	Voie liquide mésophile, continue, temps de séjour 60 jours	Biodéchets (60%) de supermarchés co-digérés avec des déchets agro-alimentaires (28%) et des résidus de culture (12%)	

<b>Centr_1</b>	Phase solide d'un digestat	Industriel	Voie liquide mésophile, continue, temps de séjour 50 jours puis presse à vis	Huile (20%), résidus de culture (10%), déchets agro-alimentaires (55%), boues STEP(10%), biodéchets (5%)  Boues de STEP Boues issues du traitement des vinasses Lisier bovin et cultures énergétiques	Grigatti et al. (2019)
<b>Centr_2</b>	Phase liquide d'un digestat	Industriel	Voie liquide mésophile, continue, temps de séjour 50 jours puis presse à vis		
<b>D1</b>	Digestat	Industriel	Voie liquide thermophile, continue		
<b>D2</b>	Digestat	Industriel	Voie liquide mésophile, continue		
<b>BD</b>	Digestat	Industriel	Voie liquide thermophile, continue		

Ces dix digestats ont été caractérisés par des analyses globales : matières sèches et matières volatiles par séchage (105°C, 24h puis 550°C, 2h respectivement) et gravimétrie, carbone et azote par analyseur élémentaire, phosphore et métaux (ICP) puis par des analyses fines. Concernant ces dernières, deux méthodes basées sur des extractions chimiques séquentielles afin de décrire leurs niveaux d'accessibilité en N et P (Jimenez et al. (2017) pour N et Grigatti et al. (2017) pour P), comme le synthétise le schéma de la Figure 1.

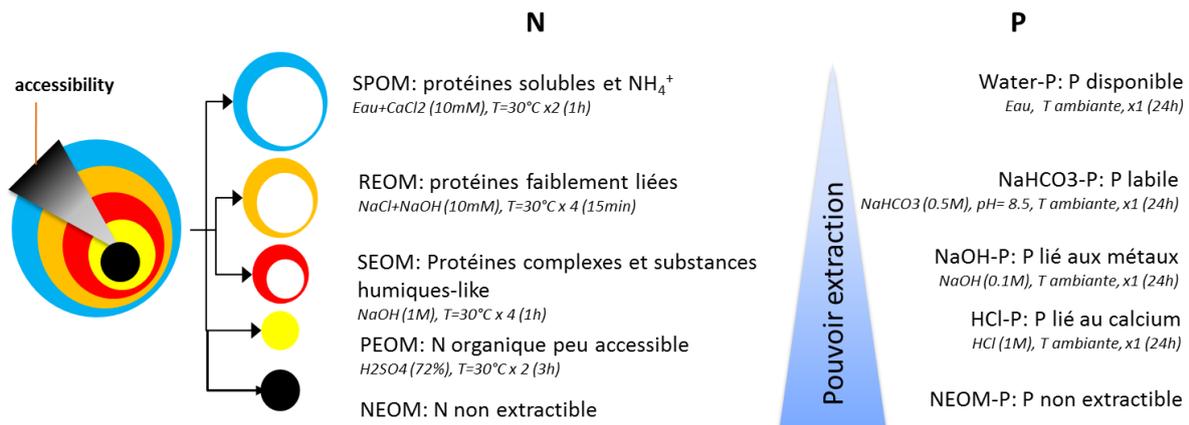


Figure 1 : Méthodologies appliquées pour la caractérisation de l'accessibilité de N et P

Des incubations sur sol agricole ont aussi été menées afin de suivre l'évolution de N et P sur sol nu avec des prélèvements aux jours 0, 14, 28, 56, 84, pour analyse de N minéralisé (extraction 1M KCl, 30min) et P (0.5 M NaHCO<sub>3</sub>, pH 8.5, 30 min) comme décrit par Grigatti et al. (2017). La dose de digestats apportée était de 170 kg N.ha<sup>-1</sup>.

Le sol utilisé était un sol plutôt calcaire (Vallée du Po, Bologne, Italie) avec les caractéristiques suivantes : pH (H<sub>2</sub>O 1:2.5), 7.90; distribution de taille des particules : 184 mg kg<sup>-1</sup>, sable, 425 mg kg<sup>-1</sup>, argile, 391 mg kg<sup>-1</sup> argile; total CaCO<sub>3</sub>, 85 g kg<sup>-1</sup>; carbone organique, 10.2 g kg<sup>-1</sup> ; azote, 1.60 g kg<sup>-1</sup>; C:N, 8.3; K échangeable, 330 mg K<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup>, CEC 27.2 meq. 100 g<sup>-1</sup>, P extractible de 808 mg kg<sup>-1</sup>.

Les digestats ont été utilisés comme engrais organiques dans des tests en pots pour cultiver du ray-grass (*Lolium multiflorum* subsp. *Italicum*) comme décrit par Grigatti et al. (2017). En triplicata, la même dose de digestats que pour les incubations sur sol nu a été appliquée.

Un témoin positif (Ctrl+) a été réalisé avec des engrais chimiques (N (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) et P et K (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)). Un témoin négatif (Ctrl-) a été réalisé sans apport de digestat.

Trois récoltes ont été réalisées sur ces tests en pots à 28, 56 et 84 jours avec analyses de N et P sur la biomasse aérienne et racinaire. Tous les tests ont été réalisés en triplicatas.

Un coefficient apparent d'utilisation (CAU) a pu être calculé selon l'équation :

$$\text{CAU (\%)} = \sum_{i=1}^3 \frac{\text{C utilisé par traitement}_{ti} - \text{C utilisé par le contrôle ctrl}_{-ti}}{\text{C ajouté}} \cdot 100$$

Avec C utilisé par traitement (tn) est l'azote ou phosphore consommé par la plante (mg pot<sup>-1</sup>) d'un

traitement par digestat au temps t (i = récolte 1-3.); C utilisé par le contrôle ctrl-(ti) est l'azote ou phosphore (mg pot-1) consommé par la plante dans un pot non traité au temps t t (i = récolte 1-3); C ajouté est l'azote ou le phosphore du digestat ajouté initialement dans le pot (mg pot-1).

Des tests statistiques (Analyse en Composantes Principales, ACP, et classification ascendante hiérarchique CAH) ont été réalisés sur l'ensemble des résultats afin d'évaluer les corrélations entre résultats de caractérisation et résultats issus des tests en pots.

## Résultats

### **Variabilité de la qualité des digestats**

Les digestats de méthanisation étudiés ont montré avoir une grande variabilité en termes d'éléments majeurs voire mineurs comme le montre le Tableau 2, notamment en azote total, ammonium, potassium et calcium (i.e. impact probable sur la spéciation du P).

Les échantillons les plus riches en N (44-48 g.kg-1) sont la phase liquide du digestat centralisé (Centr\_2), le digestat de lisier porcin (Agri\_2) et les digestats de boues de STEP et vinasse (Sludge\_1, D1 et D2). Les échantillons les moins concentrés sont les digestats de FFOM et son compost (entre 15 et 17 g.kg-1).

Les échantillons les plus riches en P sont le digestat de boues (Sludge\_1) et son compost (Sludge\_2), ainsi que la phase solide du digestat centralisé (Centr\_1) et le digestat D2 (boues issues du traitement de vinasses) avec une teneur en P entre 18 et 20 g.kg-1. Les teneurs les plus faibles (4 g.kg-1) sont obtenues pour le digestat de FFOM et son compost ainsi que le digestat de paille ensilé (Agri\_3).

**Tableau 2 : Caractéristiques globales des digestats étudiés**

Paramètres	MS	MV	C	NT	C/N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N*	P	K	S	Al	Ca	Fe
Unités	%	%TS	g.kg MS <sup>-1</sup>										
Agri_1	17.10%	70.20%	382.9	27.98	13.68	6.28	0.07	5.36	21.22	3.59	2.31	18.53	1.58
Agri_2	4.40%	70.10%	404.71	44.53	9.09	87.85	1.58	10.37	27.41	6.23	3.23	23.08	2.81
Agri_3	14%	87.00%	454.83	17.72	25.67	2.99	0.79	4	12.98	1.63	0.65	13.44	0.94
Sludge_1	22.40%	51.70%	283.35	43.06	6.58	10.8	1.09	20.44	2.15	6.23	6.66	69.08	42.6
Sludge_2	59.10%	48.50%	258.01	26.61	9.7	0.92	1.18	16.15	4.9	5.33	12.56	41.25	37.48
FFMSW_1	19.70%	48.70%	279.3	17.78	15.71	10.5	1.43	4.21	11.49	2.22	8.68	37.05	5.79
FFMSW_2	53.30%	41.80%	232.55	15.39	15.11	0.04	0.47	4.23	8.22	5	2.73	29.72	5.06
BW_1	24.90%	79.00%	438.64	30.89	14.2	27.68	3.4	10.79	7.25	2.16	8.46	42.31	7.89
Centr_1	26.40%	82.20%	438.17	28.62	15.31	6.81	2.83	6.93	4.86	6.27	2.68	17.56	11.54
Centr_2	6%	60.00%	320.53	45.47	7.05	34.74	0.74	17.98	16.1	7.58	9.33	27.08	12.07
D1	3.94%	58.20%	344.2	47.8	7.2	nd	nd	7.1	Non déterminé			10	1.9
D2	3.09%	59.40%	397.8	44.9	8.9	nd	nd	18.4				37	8.6
BD	5.05%	68.30%	515	43	12	nd	nd	6.2				11	1

\* mesuré par extraction KCL (1M) sur les échantillons lyophilisés broyés

De plus, la caractérisation fine de l'accessibilité de N et P, présentée dans la Figure 2, montre que la variabilité a un impact sur la spéciation de ces éléments.

Selon leur typologie et la nature des substrats intrants de la méthanisation, comme montré par Guilayn et al. (2019), la variabilité observée justifie ainsi une représentativité significative de ces derniers sur les tests menés par ailleurs.

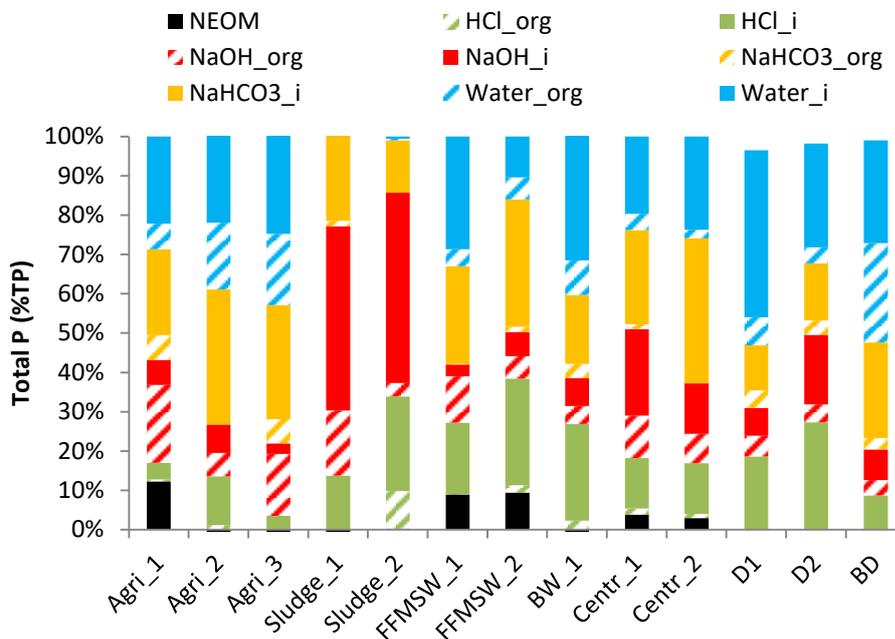
En effet, les résultats obtenus montrent que les digestats étudiés n'ont pas les mêmes spéciations en N et P.

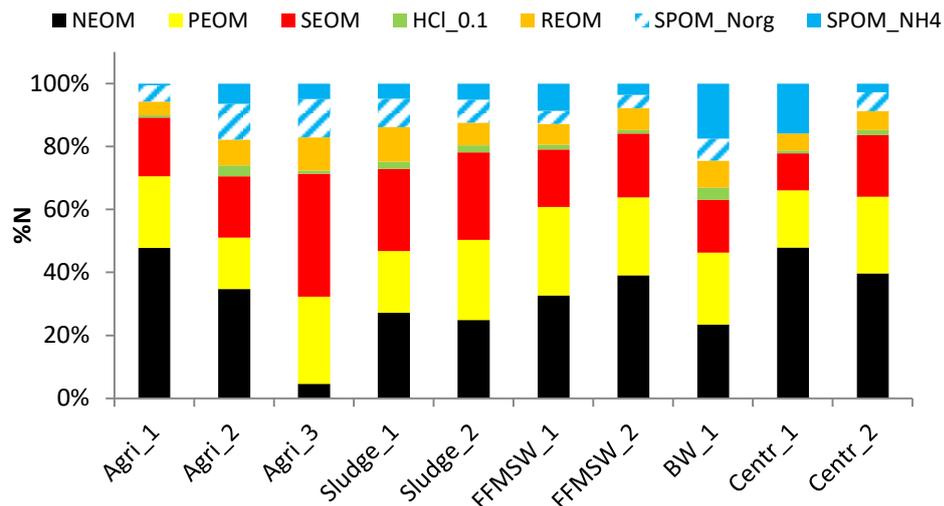
Concernant l'accessibilité de N, l'azote minéral est obtenu dans la fraction extractible à l'eau SPOM.

L'azote organique non extractible varie entre 25 et 48% sauf pour Agri\_3 avec seulement 5% d'azote dans la fraction NEOM. Une étude statistique sur ces données uniquement (résultats non présentés) montre que 4 groupes peuvent être déterminés : les digestats Centr\_1 et BW\_1 qui ont une fraction ammoniacale de SPOM élevée, Agri\_2 et Sludge\_1 sont plutôt riches en protéines solubles et facilement extractibles (SPOM et REOM), Agri\_3 avec une fraction de protéines complexes élevée (SEOM) et enfin Agri\_1, FFMSW\_1 et 2 et le compost Sludge\_2 qui ont une fraction azotée PEOM élevée.

Concernant l'accessibilité de P, une analyse similaire a été réalisée. Le P minéral est plus important que le P organique dans toutes les fractions, comme reporté par Grigatti et al. (2015, 2017, 2019) sur des digestats et des composts. Seul le digestat de paille ensilée Agri\_3 possède seulement 40% de P organique extractible en comparaison avec les autres digestats (10 à 33%).

4 groupes ont aussi été révélés par une analyse statistique (non présentée). En les classant par ordre d'accessibilité chimique, on observe les groupes suivants : fractions minérales labiles, extraites à l'eau et au NaHCO<sub>3</sub> (digestats de biodéchets et industrie agro-alimentaires BW\_1, D1 et D2), les digestats contenant du P organique labile (digestats de lisier BD and Agri\_2), les digestats intermédiaires (FFMSW\_1 et 2 et Centr\_1 et 2), les digestats fibreux ayant une forte part de P organique dans NaHCO<sub>3</sub> et NaOH (Agri\_1 et Agri\_2), les digestats caractérisés par une forte fraction de P extractible à la soude (digestats de boues Sludge\_1) et enfin ceux extractibles au HCl (compost de digestat de boues Sludge\_2). Les intrants semblent avoir un impact sur la spéciation, contrairement à la spéciation de l'azote, sauf pour le groupe intermédiaire.



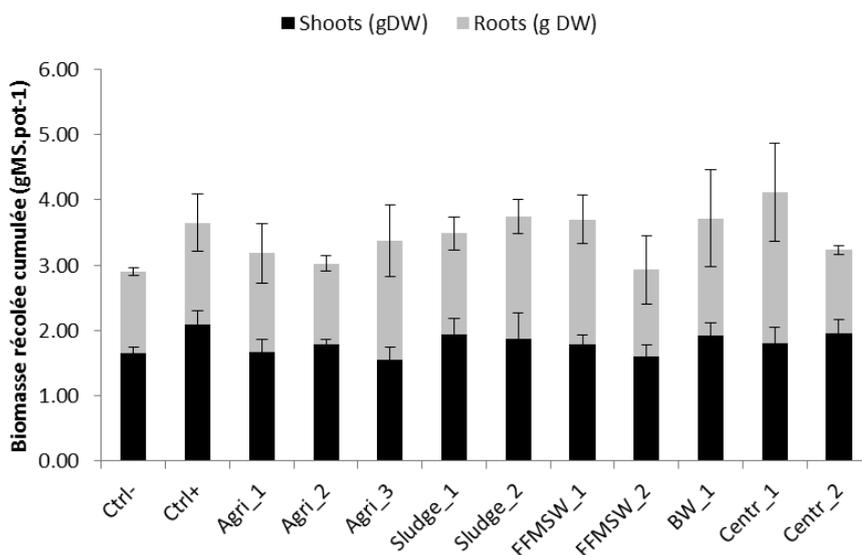


b

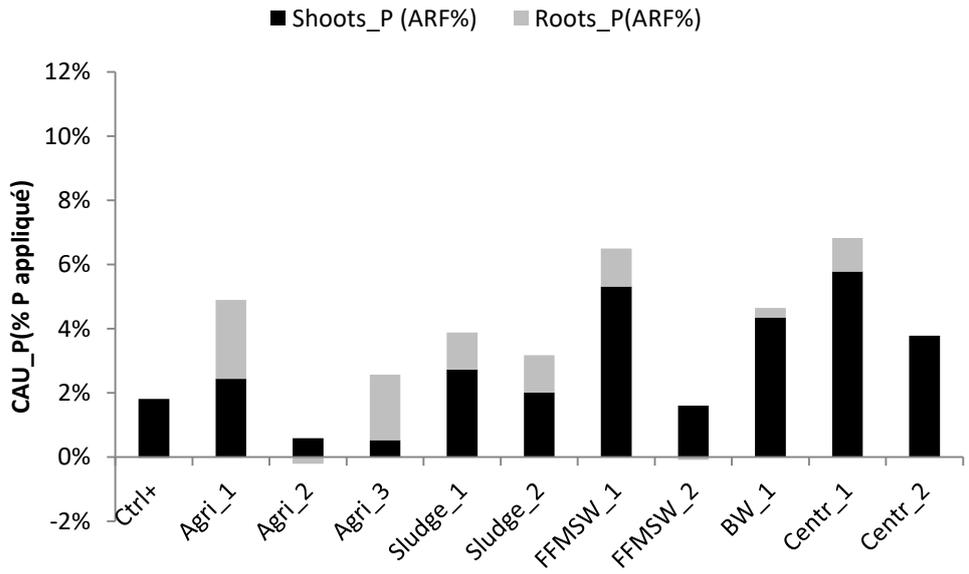
Figure 2 : Caractérisation de l'accessibilité de P (a) et N (b) appliquée aux digestats de l'étude

### Tests d'incubation sur sol et en pot

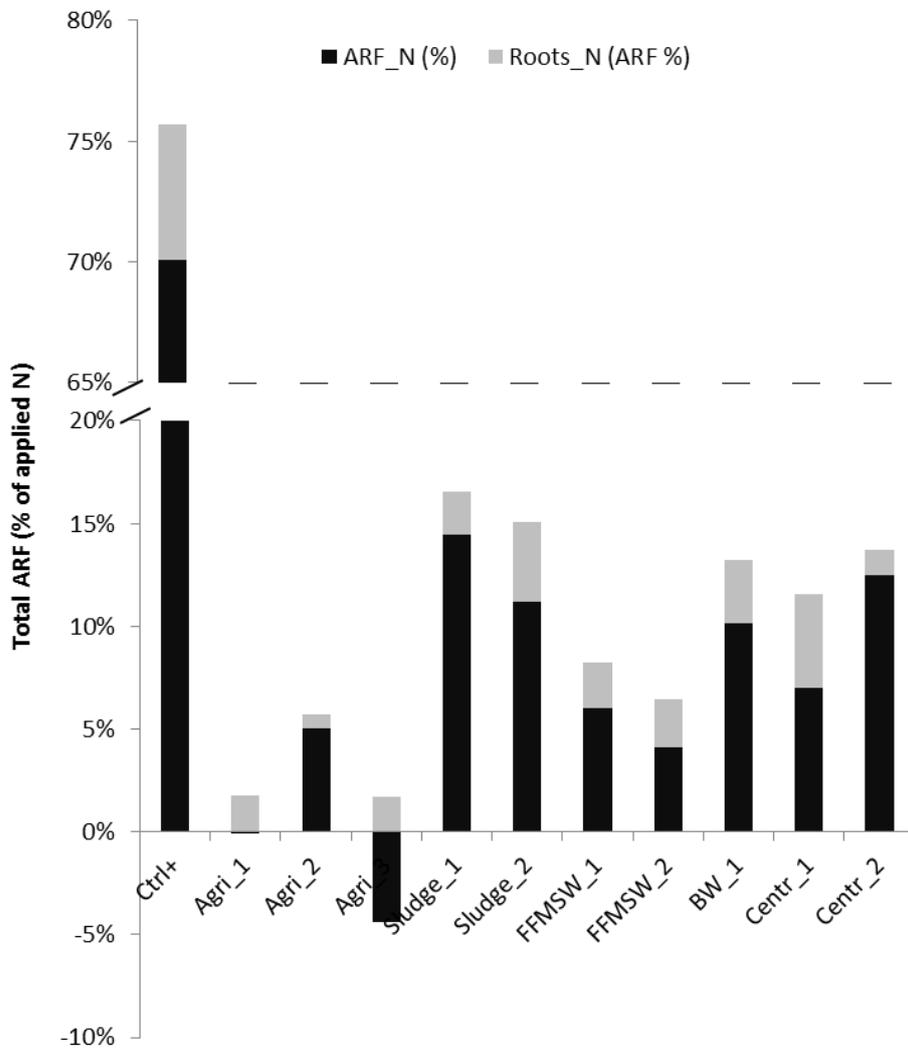
Concernant les tests en pot, la Figure 3 présente l'ensemble des résultats obtenus lors des tests en pots. La Figure 3a présente la biomasse récoltée cumulée par traitement en grammes de MS. Statistiquement, il n'y a pas de différences entre les traitements que ce soit pour les tissus aériens ou racinaires (Kruskal-Wallis test  $p=0.89$  et  $0.23$  respectivement). Néanmoins, il en ressort que peu de biomasse a été obtenue pour les traitements Agri\_2 (digestat de lisier porcin), FFMSW\_2 (compost de digestat FFOM), proches du témoin négatif, et les meilleurs résultats ont été obtenus pour les traitements Centr\_1 (phase solide d'un digestat centralisé) et BW\_1 (digestat de biodéchets).



a



b



c

k\_eq\_N (%)                      5%   8%   -4%   25%   25%   11%   11%   16%   15%   22%

Figure 3 : a) Biomasse récoltée cumulée issu des tissus aériens (shoots) et racinaires (roots) par traitement appliqué dans les tests en pots ; b) Coefficients Apparent d'Utilisation du P total (b) et du N total (c)

### Résultats obtenus sur le phosphore

Les tests en pots via le paramètre coefficient apparent d'utilisation du phosphore (CAU\_P) ont été significativement influencés par le traitement (i.e. digestat utilisé) (*Kruskal-Willis*,  $p = 0.021$ ), comme le montre la Figure 3b. Le coefficient d'équivalence engrais P (CAU\_P traitement/CAU\_P\_Ctrl+) est de 100% pour tous les traitements sauf pour le digestat de lisier porcin avec seulement 35%.

L'étude de l'évolution de P sur sol nu et après récoltes sur les biomasses montre que la caractérisation de l'accessibilité de P des digestats a un effet significatif sur la fraction de P immobilisée par le sol et celle utilisée par la plante. En effet une corrélation négative significative apparaît entre la fixation du P sur sol nu et sa teneur en phosphore organique extractible à ( $R = -0.66$ ,  $p = 0.036$ ). Le CAU\_P issus des tissus aériens récoltés est significativement corrélé avec la fraction extractible à l'eau du P ( $r = 0.49$ ,  $p = 0.09$ ) alors que la CAU-P issus des tissus racinaires est significativement corrélé avec la fraction de P organique extractible par  $\text{NaHCO}_3$ , fraction labile du P, ( $r = 0.62$ ,  $p = 0.025$ ).

Enfin, une ACP et une CAH appliquées aux résultats montrent que les performances des traitements par les digestats sont groupées, non seulement selon leur nature mais également selon leur accessibilité en termes de P (Figure 4). En effet, les digestats possédant un faible degré de P accessible sont le compost de digestat de boues (Sludge\_2), le digestat de boues (Sludge\_1) ainsi que les digestats fibreux (Agri\_1 et 3). En effet, les digestats de boues sont riches en P liés aux métaux, extractibles à la soude et donc peu disponibles. De même, le compost de digestats de boues est riche en  $\text{NaOH}_P$  inorganique et en  $\text{HCl}_P$  très faiblement disponible car lié au Ca. Les digestats fibreux présentent quant à eux des fractions organiques  $\text{NaHCO}_3_P$  et  $\text{NaOH}_P$  élevées, nécessitant une minéralisation. Les digestats issus de FFOM et centralisés sont dans un même groupe, plutôt intermédiaire en termes de CAU\_P. Enfin, les digestats liquides issus de biodéchets, de lisier bovin et de boues de vinasses ont un P soluble élevé et un CAU\_P total élevé.

La connaissance de la disponibilité du P et de ses effets permet d'anticiper la fertilisation, selon le type de sol, en ne se basant pas que sur une analyse globale de P. En effet, c'est le cas des digestats de boues Sludge\_1 et 2 qui ont des teneurs en P les plus élevées (même niveau de Centr\_1) et leurs traitements ont obtenu des CAU\_P modérés voire faibles.

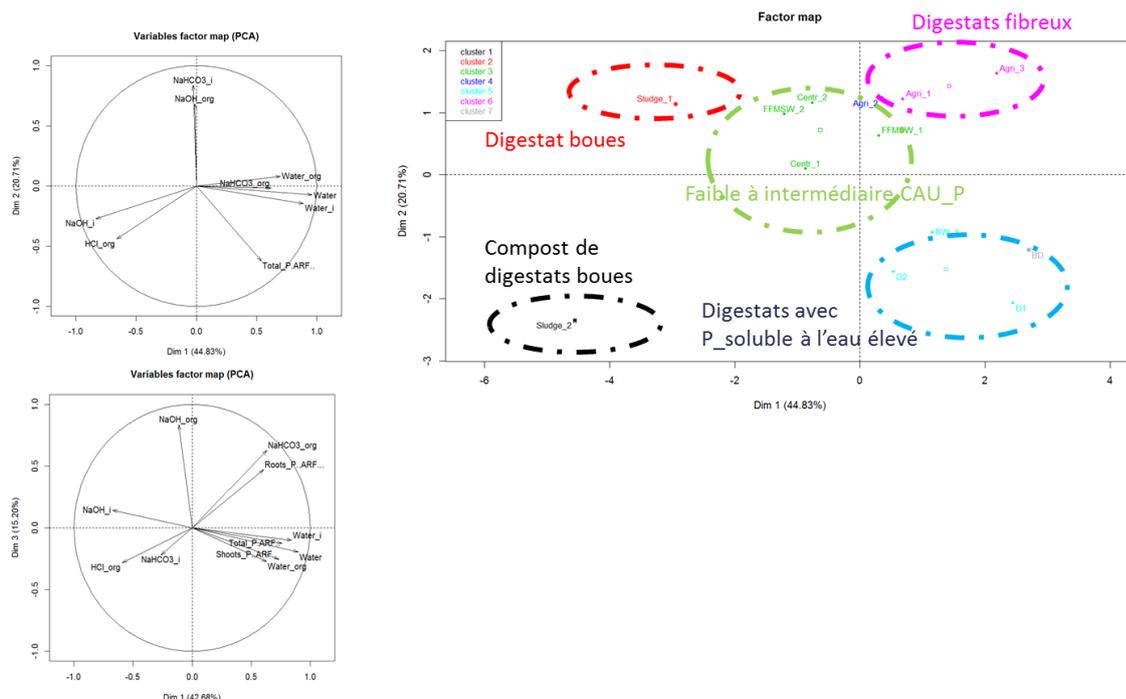


Figure 4 : Analyse statistique (ACP et CAH) appliquée aux données de caractérisation de P et aux résultats de CAU\_P

### Résultats obtenus sur l'azote

Les résultats issus des incubations N sur sol nu illustrés par la Figure 5 montrent une très forte immobilisation de l'azote des digestats de manière générale sur ce type de sol calcaire entre 0 et 56 jours. Cela est certainement dû à la méthodologie des incubations où l'utilisation d'échantillons lyophilisés et broyés est réalisée (norme XPU 44-163).

Or, certains digestats de méthanisation utilisés sont très riches en ammonium (comme le digestat de lisier de porc, de biodéchets, phase liquide du digestat territorial et digestat de boues, avec une perte allant de 80% à 100% d'ammonium après lyophilisation, cf. tableau 2). Après 56 jours, l'azote organique semble être rendu disponible, sauf pour le digestat de fumiers et d'ordures ménagères, très fibreux.

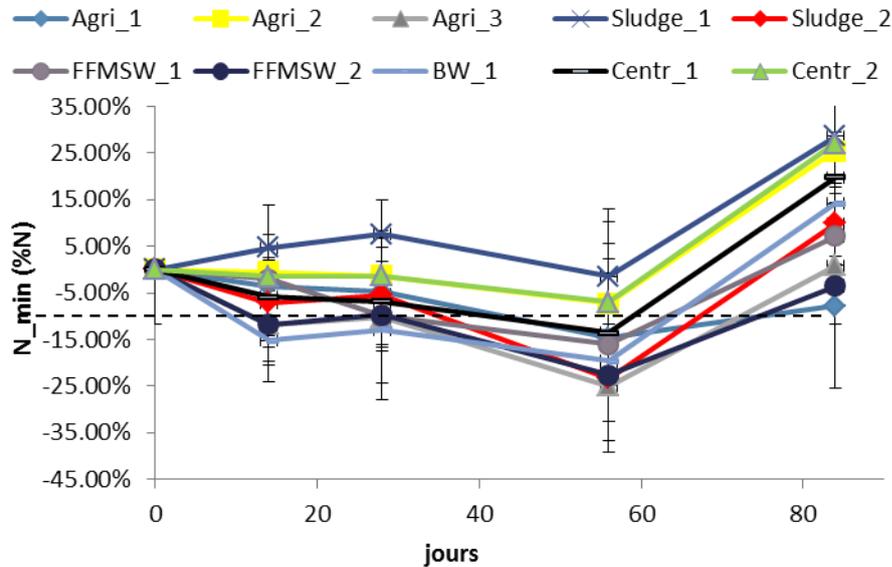


Figure 5 : Evolution de l'azote minéralisé par traitement lors de l'incubation sur sol nu

Les tests en pots via le paramètre coefficient apparent d'utilisation de l'azote CAU\_N ont été significativement influencés par le traitement, seulement dans le cas des tissus aériens (Kruskal-Wallis,  $p = 0.026$ ), comme le montre la Figure 4c. Les coefficients d'équivalence engrais N sont faibles (de -4% à 22%) par rapport à d'autres études effectuées sur d'autres types de sols.

De la même manière que P, la minéralisation de N et l'utilisation de l'azote minéral par la plante sont significativement impactés par les caractéristiques des digestats particulièrement par le ratio C/N comme montré déjà par d'autres études (Decoopman et al., 2017) et par l'accessibilité de l'azote organique.

Des corrélations négatives sont obtenues entre l'azote minéralisé et le ratio C/N ainsi que la fraction fibreuse faiblement accessible PEOM ( $r=-0.72$ ,  $p = 0.019$  et  $r=-0.5$ ,  $p= 0.043$ , respectivement).

Une corrélation significative entre le CAU\_N des tissus aériens et le ratio C/N est obtenue ( $r=-0.82$ ,  $p=0.004$ ). La teneur en N dans la fraction moins accessible et fibreuse a un impact négatif sur le CAU\_N ( $r=-0.58$ ,  $p = 0.44$ ) ainsi que sur l'azote minéralisé ( $-0.58$ ,  $p=0.08$ ).

Une équation issue d'une régression linéaire a été déterminée puis validée avec des données de Grigatti et al. (2015) :

$$CAU_{N_{\text{tissu aérien}}} = -0.0085 \times \frac{C}{N} + 0.1782, r^2 = 0.6718$$

Concernant le CAU\_N des tissus racinaires, une corrélation positive a été observée avec la teneur en nitrates de la fraction extractible à l'eau content ( $r=0.72$ ,  $p=0.017$ ), la teneur en ammonium extractible à l'eau des digestats ( $r= 0.61$ ,  $p=0.06$ ), ce qui est cohérent avec la disponibilité des nutriments.

Une classification a été réalisé (Figure 6) comme pour le P et il apparaît que la distribution de l'accessibilité de N des digestats impacte la typologie déterminée. 4 groupes sont déterminés, similaires à ceux observés sans ajout des résultats des tests en pots :

- digestats de paille (Agri\_3) très fibreux (C/N, PEOM\_N élevés) et une fraction SEOM\_N (protéines complexes et substances humiques) également élevée ;
- les digestats riches en protéines facilement extractibles et plutôt liquides (Agri\_2, Centr\_2 et Sludge\_1) ayant les plus forts CAU\_N en tissus aériens ;
- les digestats intermédiaires entre fibre et protéines (digestats FFOM, composts et Agri\_1) ayant des protéines solubles à l'eau nécessitant une minéralisation pour être disponibles ;

- les digestats de biodéchets/déchets agro-alimentaires (BW\_1 et Centr\_1) riches en ammonium et nitrates ayant un CAU\_N racinaire fort et un CAU\_N en tissus aériens moyennement élevé.

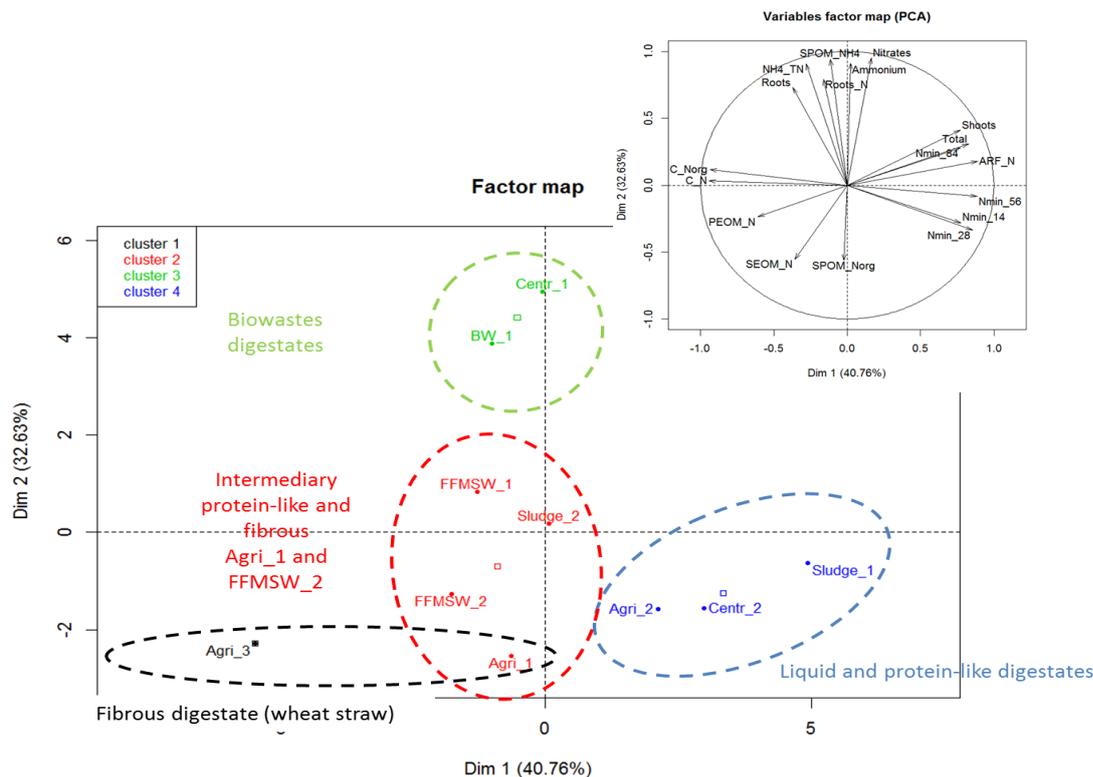


Figure 6 : Analyse statistique (ACP et CAH) appliquée aux données de caractérisation de P et aux résultats de CAU\_P

Ainsi, à partir des résultats obtenus, des premières tendances de potentiel de fertilisation en N et P selon la typologie du digestat, sur la croissance du ray-grass, avec ce type de sol (calcaire), ont pu être proposées.

#### Premières tendances de préconisations (associées à ce sol et à ce type de plante)

A partir des résultats obtenus, il apparaît que :

- Les digestats avec un ratio C/N  $\geq 15$  et une fraction fibreuse PEOM\_N et humique SEOM\_N élevés sont non conseillés comme fertilisants N (digestats fumier pailleux, digestat paille ensilée, composts de digestats);
- Les procédés de traitements des digestats ont un impact sur le potentiel fertilisant N et P
  - Considérant la séparation de phases: la phase solide du digestat centralisé est plus appropriée comme fertilisant P que la phase liquide, plutôt fertilisant N;
  - Le compostage a aussi un impact: les composts étudiés ont potentiel fertilisant N plus faible que les digestats bruts (boues de STEP et FFOM).
- Le digestat de lisier de porc testé (Agri\_2) n'est pas conseillé comme fertilisant P. Cependant, concernant son potentiel fertilisant N, les résultats doivent être revus et validés étant donné la perte d'ammonium subie pendant la préparation des échantillons.
- Le digestat de biodéchets testé (BW\_1) est apparu comme un digestat ayant à la fois un potentiel fertilisant N et P.
- Les digestats et compost de digestats de boues de STEP (Sludge\_1 et 2) ont un fort potentiel fertilisant N mais un potentiel fertilisant P modéré.

#### Conclusions et perspectives

La spéciation de l'accessibilité des nutriments N et P des digestats varie selon la nature des intrants de la méthanisation. Cette spéciation impacte les résultats issus des incubations sur sol nu ainsi que les coefficients apparent d'utilisation de N et P par la plante pour sa croissance. Selon le tissu récolté (aérien ou racinaire), les variables de caractérisation ayant un impact significatif sont différentes pour P et N, pour ce type de sol calcaire. Ainsi, une connaissance plus fine des digestats permettrait un

contrôle plus adéquat de la fertilisation.

Les tests d'incubation sur sol ou en pot devraient être réalisés sans préparation d'échantillon (sans séchage ou lyophilisation) afin d'éviter la perte d'ammoniac pendant le processus.

En termes de perspectives, des essais au champ sur des sols contrastés pour des cultures ayant des besoins en nutriments contrastés devraient être réalisés afin de proposer un guide d'aide à la fertilisation par type de digestat.

Enfin, une stratégie similaire pourrait éventuellement être mise en place pour les micropolluants (organiques, métalliques et biologiques) afin de déterminer et anticiper leur impact après épandage.

## Références

Decoopman, B., Houot, S., Germain, M. Hanocq, D., Airiaud, A., Lejare, L., Lerouc, C. (2017). Valeur azote des digestats de méthanisation. Rencontres COMIFER-GEMAS 2017.

Guilayn, F., Jimenez J., Rouez M., Crest M., Patureau D. (2019) First fertilizing-value typology of digestates: a decision-making tool for regulation waste management. Waste Management.

Grigatti, M., Boanini, E., Bolzonella, D., Sciubba, L., Mancarella, S., Ciavatta, C., Marzadori, C. (2019). Organic wastes as alternative sources of phosphorus for plant nutrition in a calcareous soil. Waste Management, 93, 34-46.

Grigatti, M., Boanini, E., Mancarella, S., Simoni, A., Centemero, M., Veeken, A.H. (2017). Phosphorous extractability and ryegrass availability from bio-waste composts in a calcareous soil. Chemosphere, 174, 722-731.

Grigatti, M., Boanini, E., Cavani, L., Ciavatta, C., Marzadori, C. (2015). Phosphorous in digestate-based compost : chemical speciation and plant-availability. Waste BiomassValor, 6, 481-493.

Jimenez, J., Han, L., Steyer, J.-P., Houot, S., Patureau, D. (2017). Methane production and fertilizing value of organic waste: organic matter characterization for a better prediction of valorization pathways. Bioresource Technology, 241, 1012-1021.