

Minéralisation de produits résiduaux organiques :

des sources d'azote variées

S. Houot¹, P. Pierre², B. Decoopman³, R. Trochard⁴

1 : INRA, UMR 1402 INRA-AgroParisTech ECOSYS, F-78850 Thiverval-Grignon ; houot@grignon.inra.fr

2 : IDELE, 9, rue A. Brouard, CS 70510, F-49105 Angers Cedex 02 ; patrice.pierre@idele.fr

3 : Chambre d'Agriculture de Bretagne, Rue Maurice Le Lannou, CS 74223, F-35042 Rennes Cedex

4 : ARVALIS Institut du Végétal, Station de La Jaillière, F-44370 La-Chapelle-Saint-Sauveur

Résumé

Près d'un tiers des prairies sont fertilisées par des produits résiduaux organiques, essentiellement des effluents d'élevage. Après une synthèse des données disponibles sur l'importance de l'utilisation des produits résiduaux organiques (PRO) dans la fertilisation des cultures annuelles et des prairies, la diversité des caractéristiques analytiques des PRO et de disponibilité potentielle de leur azote est présentée ainsi que quelques exemples de résultats expérimentaux d'évaluation de la disponibilité de l'azote de ces PRO en prairie. La disponibilité de l'azote des PRO pour les plantes dépend principalement de la proportion de N sous forme minérale et de la vitesse de minéralisation du N organique des PRO. La proportion d'azote organique dans ces effluents d'élevage varie de 30 % en moyenne dans les lisiers, 50 % dans les lisiers de bovins et fumiers de volailles à 80 à 90 % dans les fumiers de bovins. Le traitement par compostage des effluents d'élevage tend à diminuer la disponibilité de l'azote, mais la digestion anaérobie tend à augmenter cette disponibilité potentielle dans les digestats bruts en raison de la minéralisation des formes organiques en N-NH₄. Les valeurs fertilisantes azotées des effluents d'élevage se classent dans l'ordre : fumiers bovins < lisiers bovins < fientes de volailles < lisiers porcs. Le compostage avec une durée de maturation courte ne diminue que très peu la disponibilité de l'azote des fumiers de bovins stockés ; les lisiers et digestats ont des valeurs fertilisantes azotées du même ordre de grandeur. Les arrière-effets des apports répétés de PRO semblent assez peu marqués en prairie sans doute en raison des fortes teneurs en matière organique des sols de prairie.

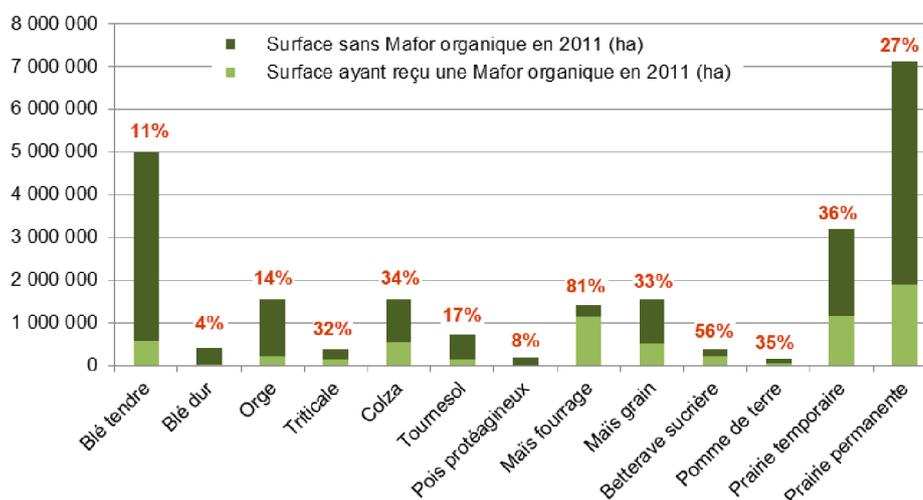
Introduction

Les matières résiduelles susceptibles d'être épandues sur les sols agricoles et forestiers sont issues des activités agricoles, urbaines et industrielles. Jusqu'à aujourd'hui, ce mode de valorisation était désigné comme « valorisation organique » car il concernait exclusivement des matières de nature organique. Désormais, des matières inorganiques (notamment les cendres issues de la combustion de biomasse bois) sont également concernées par cette voie de valorisation car elles présentent un intérêt agronomique et leur production se développe. Dans le cadre de l'expertise collective « Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole et forestier », la quantité de matières disponibles pour épandage a été évaluée à un total de 121 millions de tonnes de matière brute de produits résiduels essentiellement organiques (HOUOT *et al.*, 2014), provenant à 94 % des effluents d'élevage. A cela s'ajoutent 148 millions de tonnes de déjections animales émises directement au pâturage. En 2011, la synthèse des enquêtes Agreste « Pratiques culturales » montre que 27 % des surfaces en grandes cultures et 30 % des prairies ont fait l'objet d'une telle fertilisation organique. Ces produits résiduels organiques (PRO) sont utilisés pour fertiliser les cultures (sources de nutriments) et amender les sols (entretien des stocks de matière organique ou correction de pH). Face à la nécessité de diminuer les fuites d'azote vers les eaux souterraines et superficielles et de limiter les pertes par dégagements gazeux, il est nécessaire de connaître la dynamique de disponibilité de cet azote pour les plantes en vue d'ajuster les doses et les périodes d'apport aux besoins des plantes fertilisées. Après une synthèse des données disponibles sur l'importance de l'utilisation des PRO dans la fertilisation des cultures annuelles et des prairies, la diversité des caractéristiques analytiques des PRO et de disponibilité potentielle de leur azote, nous présenterons quelques exemples de résultats expérimentaux d'évaluation de la disponibilité de l'azote de ces produits résiduels organiques en prairie.

1. Bilan de l'utilisation de produits organiques en fertilisation des cultures et prairies

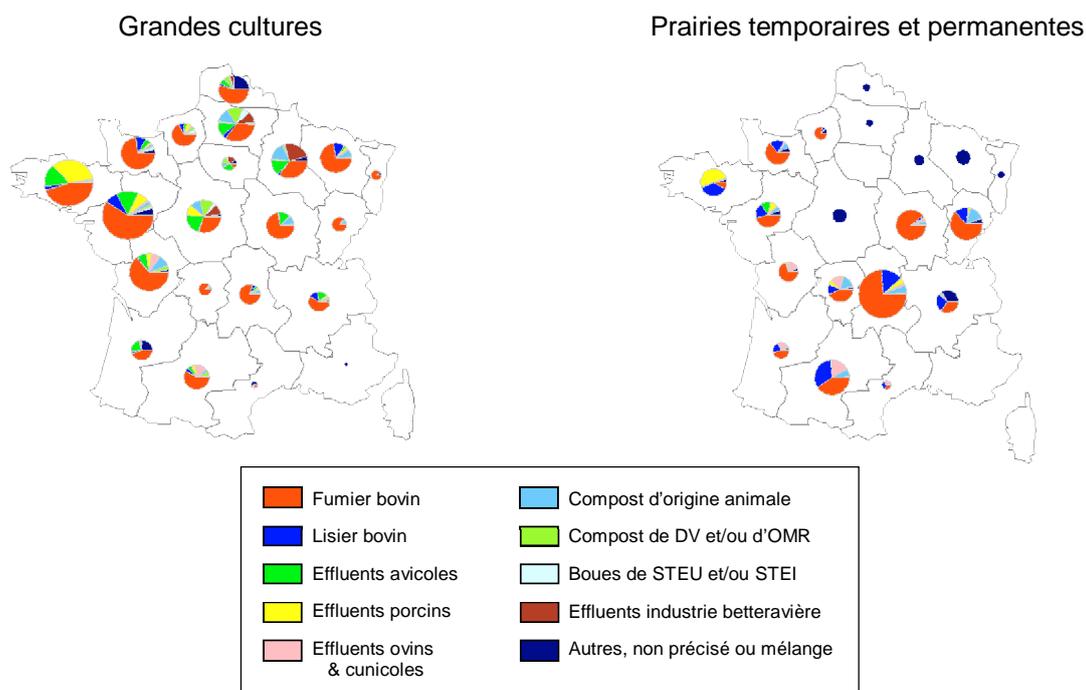
En 2011, 27 % des surfaces en grandes cultures et 30 % des prairies ont fait l'objet d'une fertilisation organique (Figure 1). Les prairies et cultures fourragères (maïs ensilage, avec 81 % des surfaces) sont les principales cultures fertilisées avec des PRO. Ces PRO proviennent en très grande majorité des exploitations elles-mêmes (93 à 98 %). Des proportions importantes des surfaces en betteraves sucrières et en pomme de terre sont également fertilisées avec des PRO mais qui proviennent moins souvent des exploitations (32 et 40 % seulement) et correspondent à des effluents issus de la transformation des productions.

Figure 1 : Répartition des surfaces (en hectares) qui ont reçu un épandage de Matières fertilisantes d'origine résiduelles (MAFOR) par type de grandes cultures et de prairie en 2011 (Agreste, enquête Pratiques culturales, 2011 : www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/).



La Figure 2 présente la diversité des origines des PRO épanchés en grandes cultures et en prairies. On retrouve l'importance des effluents d'élevage, principalement des fumiers de bovins sur l'ensemble du territoire et des effluents porcins dans l'ouest de la France. Les composts d'effluents d'élevage représentent 4 % environ du total des PRO épanchés. En 2013, moins de 1 % des effluents d'élevage étaient valorisés par digestion anaérobie, produisant ainsi des digestats à valoriser sur les cultures annuelles et prairies. Cependant cette filière est en pleine expansion actuellement. Enfin, les PRO d'origine non agricole ne concernent que 1 % des surfaces en prairies contre 9 % de celles en grandes cultures.

Figure 2 : Origine des PRO utilisés dans la fertilisation des cultures et prairies dans les différentes régions (enquête Pratiques culturales, 2011).



2. Lien entre valeur fertilisante azotée et valeur amendante organique des PRO

Un PRO apporté à un sol subit les mêmes grands types de transformation que tout autre type de matière organique (MO) :

- dégradation microbienne (action de la faune du sol également) en tant que source d'énergie (la très grande majorité des organismes vivant du sol sont hétérotrophes) et d'éléments pour leur propre synthèse moléculaire (anabolisme). Cette transformation conduit à la production de CO₂ provenant de la partie minéralisée pour produire de l'énergie et participe au maintien/développement de la microflore et faune du sol ;

- humification, ensemble de réactions chimiques de synthèses conduisant à des édifices moléculaires organiques complexes dont le degré de stabilité croît avec le degré de complexité. C'est cette MO humifiée, se liant aux particules minérales du sol (complexe argilo-humique), qui intervient dans les propriétés physiques et certaines propriétés chimiques du sol : stabilité des agrégats et de la structure (agencement des agrégats qui ménage la porosité du sol), propriétés hydriques, capacité d'échanges cationiques.

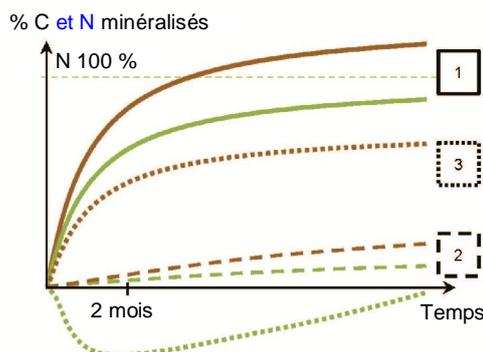
La biodégradation microbienne plus ou moins rapide de la MO des PRO après apport au sol est liée à la nature biochimique de la MO (dégradation plus lente de la lignine par exemple) et à la stabilisation de la MO initiale au cours du procédé de traitement (humification au cours du compostage) ou au cours d'une digestion « naturelle » (cas des fèces dans les fumiers par exemple) ou contrôlée (méthanisation par exemple). Si la MO d'un PRO est majoritairement composée de MO stable, c'est-à-dire peu biodégradable, cette dernière est minéralisée plus lentement par les micro-organismes du sol, et contribue de manière durable à l'augmentation du stock de MO du sol.

Au cours de la dégradation des PRO, les micro-organismes du sol utilisent la MO comme source de carbone et d'énergie. Plus la MO d'un PRO est facilement biodégradable, plus la biomasse microbienne du sol est potentiellement stimulée. Les micro-organismes incorporent aussi dans leur biomasse une partie du N issu de la dégradation de la MO. Ainsi, en fonction du niveau de concentration de ces éléments dans le PRO et des besoins des micro-organismes dégradants, il y a libération dans le sol de N minéral (minéralisation nette du N en excès par rapport aux besoins des micro-organismes) ou diminution du N minéral dans le sol (organisation nette dans la microflore du sol). Cette organisation nette limite alors la disponibilité du N pour les plantes. Cette immobilisation est toutefois transitoire, puisque, après épuisement des sources de MO facilement biodégradables, on observe la reminéralisation du N immobilisé.

Trois caractéristiques des PRO expliquent leur valeur amendante et fertilisante azotée : le niveau de stabilité de la MO, leurs teneurs en N organique et minéral et le rapport C/N des PRO. C'est le C/N total qui est la plupart du temps mentionné dans les caractéristiques analytiques des PRO. Pourtant, lors de la dégradation de la MO d'un PRO, c'est bien le C/N organique qui conditionne le résultat net « organisation » ou « minéralisation ». Etant donné l'étroite relation entre biodégradabilité du carbone organique et équilibre entre teneurs C et N pour prédire un phénomène d'organisation ou de minéralisation nette, il est difficile de proposer une valeur seuil de C/N organique, et il paraît plus judicieux de mentionner une « fourchette seuil » de C/N. L'importance de ces caractéristiques sur la dynamique de minéralisation du N organique qui conditionne en partie la valeur fertilisante N est schématisée dans la Figure 3 :

- Quand la MO du PRO est facilement biodégradable et que le rapport C/N organique du PRO est inférieur à 8-15, on observe une minéralisation nette du N organique ; la vitesse de minéralisation et la proportion de N organique minéralisée sont importantes dans l'année qui suit l'apport (cas 1, Figure 3).

Figure 3 : Dynamique de minéralisation du C (noir) et du N organique (gris) après apport d'un PRO au sol.



- Quand la MO du PRO est facilement biodégradable et que le rapport C/N organique est élevé (supérieur à 8-15), les micro-organismes du sol prélèvent du N minéral dans le stock du sol et/ou dans l'N minéral du PRO pour dégrader la MO (cas 3). Cette immobilisation, lorsqu'elle est plus importante que la quantité d'N minéral apportée par le PRO, doit être prise en compte pour positionner la date d'épandage à une période où elle ne pénalisera pas la culture. Cette organisation peut permettre d'élargir la période d'épandage à la période précédant la saison de drainage car, sous forme organique, le N est moins mobile et les risques de lixiviation limités.

- Quand la MO est stable, le C/N est proche de 8-15, sa minéralisation est lente ; la minéralisation nette d'N est faible à nulle mais la valeur amendante est importante ; le PRO (compost, digestat solide...) enrichit le stock de MO du sol (cas 2).

3. Diversité des valeurs fertilisantes azotées des PRO

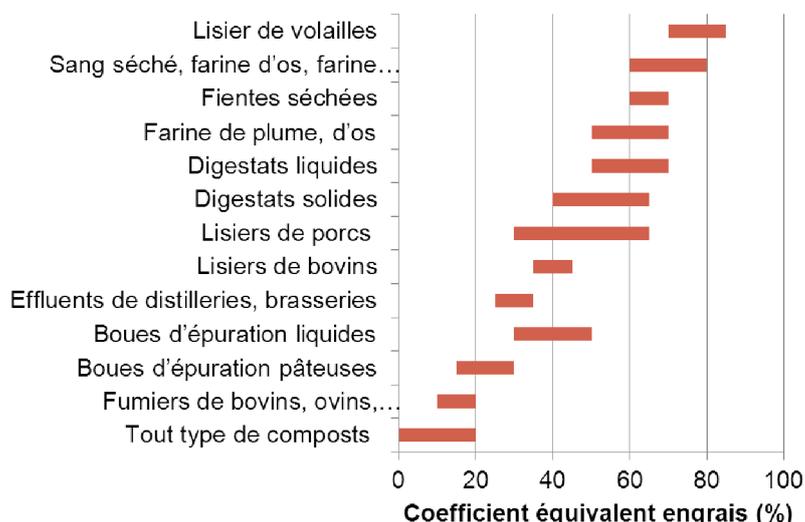
La disponibilité de l'azote présent dans les PRO est mieux connue sur le court terme, dans l'année qui suit l'apport ; elle est très variable mais relativement bien connue. La disponibilité du N des PRO au cours des années suivantes (arrière-effet) et les conséquences d'apports réguliers de PRO sont moins bien connues et moins bien prédites par les modèles.

- Disponibilité du N à court terme

Dans les PRO, le N est souvent majoritairement sous forme organique mais la proportion de N minéral (essentiellement sous forme ammoniacale) peut atteindre des pourcentages importants : 70 à 80 % dans les lisiers de porcs et jusqu'à 90 % dans certains digestats. Les PRO qui sont riches en N ammoniacal ou dont l'azote organique se minéralise vite (les boues d'épuration, tous les lisiers, les fientes de volailles, tous les digestats non compostés et sans séparation de phase) ont une valeur fertilisante potentielle élevée. La proportion d'azote utilisable par les plantes au cours de l'année qui suit l'apport est importante (30 à 100 %). A l'inverse, l'azote organique apporté par tous les composts et tous les fumiers avec litière se minéralise plus lentement en raison de la stabilité de la matière organique. Ces PRO ont donc une valeur fertilisante azotée à court terme faible – mais ils participeront à plus long terme aux fournitures d'N par le sol.

La valeur fertilisante à court terme est exprimée par un coefficient d'équivalence à l'engrais azoté minéral de référence. Ce coefficient est évalué *via* des expérimentations en champ. Il estime, par une proportion du N total du PRO, la dose d'engrais minéral de référence qui aura le même effet sur la culture que l'azote total du PRO. Ce coefficient est très différent selon les PRO (Figure 4), et peut varier pour un même PRO, en fonction de la période d'apport, des conditions d'apport et des cultures réceptrices. Ces coefficients évalués aux champs dans un contexte expérimental de bonnes conditions agronomiques reproductibles, prennent donc en compte une part de pertes par dégagements gazeux (NH₃ principalement).

Figure 4 : Fourchettes de coefficients d'équivalence engrais azoté pour différents types de PRO (d'après GUTSER *et al.* ; 2005 ; PEYRAUD *et al.*, 2012).



- Interaction entre traitement, disponibilité du N à court terme et valeur amendante des PRO

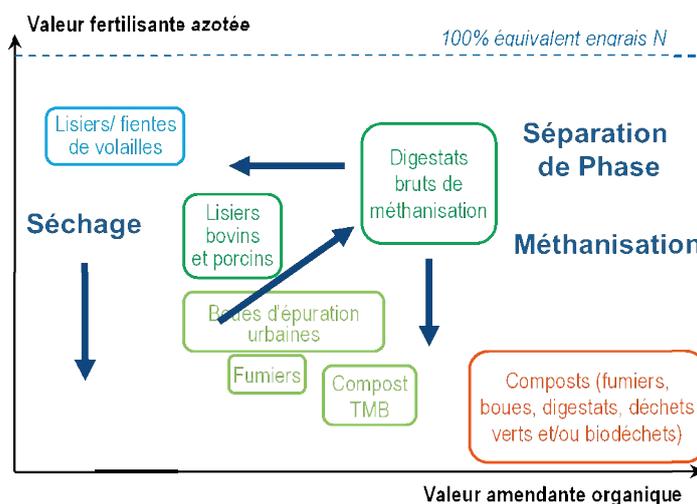
Les « valeur fertilisante azotée » et « valeur amendante » des PRO sont étroitement liées et on peut établir un gradient de distribution des PRO (Figure 5). Les PRO ayant une forte valeur fertilisante azotée ont en général une faible valeur amendante et inversement. Le traitement des PRO influence fortement ces valeurs amendante et fertilisante N :

- le compostage diminue la valeur fertilisante en raison i) de la stabilisation sous formes organiques du N et ii) d'une faible teneur en azote minéral due en partie aux pertes par volatilisation au cours du processus en raison de la stabilisation sous formes organiques du N dans la matière organique ; ces deux processus sont d'autant plus importants que la durée de maturation est longue ;

- le séchage ou la déshydratation par pressage, centrifugation, filtration... diminue la valeur fertilisante, en particulier en raison de la volatilisation de l'azote ammoniacal, sans pour autant augmenter la valeur amendante ;

- la digestion anaérobie au cours de laquelle les formes organiques de N se minéralisent en ammonium, ce qui augmente la biodisponibilité potentielle du N dans les digestats bruts. Les post-traitements des digestats peuvent diminuer fortement cette valeur fertilisante N (séparation de phase qui concentre dans la phase liquide l'ammonium, volatilisation de cet azote ammoniacal au cours du compostage, du séchage).

Figure 5 : Relation entre valeur fertilisante azotée et valeur amendante des PRO ; interaction avec les procédés de traitement (HOUOT *et al.*, 2014).



- Disponibilité du N à moyen et long termes

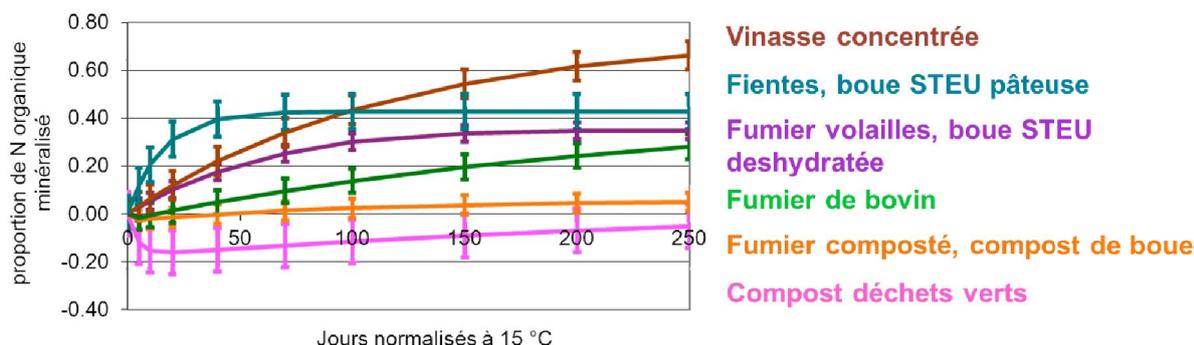
La disponibilité du N provient, à moyen terme (2 à 3 ans), de la minéralisation de la fraction moins facilement biodégradable de la MO du PRO, et à plus long terme (10 ans ou plus), elle provient de la minéralisation des MO humifiées. Les processus sont plus complexes, du fait des interactions avec la MO du sol, à laquelle les PRO s'incorporent progressivement. Les effets sur la disponibilité de N, qualifiés d'effets à court terme de deuxième année, sont parfois observés sur la culture suivant la culture réceptrice du PRO mais rarement observés sur prairie. A plus long terme, ils sont qualifiés d'effets résiduels à moyen terme ($\approx 10/15$ ans) ou d'arrière-effet à long terme ($> 15/20$ ans). Ils ne sont observés qu'en cas d'apports répétés de PRO.

Lorsque des apports réguliers de PRO sont réalisés, deux sources de N coexistent : la fourniture directe liée à la minéralisation à court terme du dernier épandage (processus prépondérant en cas d'apports de PRO facilement minéralisable), et la minéralisation progressive du stock de MO du sol entretenu par les apports répétés de PRO (effets majoritaires en cas d'épandage de PRO à MO stabilisée apparaissant à moyen/long terme. Ces derniers contribuent à augmenter la biodisponibilité du N dans les sols recevant régulièrement des PRO de type amendant, alors que la fourniture par l'apport le plus récent de PRO est faible. Cette augmentation de la disponibilité du N sera proportionnelle à l'augmentation des stocks de MO du sol, en faisant l'hypothèse que l'augmentation des stocks de MO dans les sols ne s'accompagne pas de modification de dynamique de cette MO. Les quantités de N potentiellement disponibles sont importantes à prendre en compte dans le calcul de la fertilisation azotée pour réduire les risques de sur-fertilisation et donc de lixiviation de NO_3 .

- Indicateurs, typologie et outils de prédiction des valeurs fertilisantes azotées

Les premiers indicateurs de la valeur fertilisante N d'un PRO sont ses caractéristiques physico-chimiques telles que les teneurs en N total et en N minéral, et le rapport C/N. Ces variables sont toutefois insuffisantes pour prévoir la dynamique de mise à disposition du N. Le suivi de la minéralisation du N organique au cours d'incubations en mélange dans un sol de référence et en conditions contrôlées de laboratoire (température et humidité constantes), méthode qui a été normalisée à l'AFNOR (XPU 44-163), permet de décrire et modéliser la dynamique de minéralisation du N organique par les micro-organismes du sol (courbe type en Figure 3). Ces cinétiques de minéralisation peuvent également être mesurées au champ en l'absence de plantes. Des typologies de PRO sont construites sur la base de ces cinétiques de minéralisation, un type de PRO étant associé à une dynamique de minéralisation du N organique. Cette typologie permet d'associer un comportement dans le sol après apport à des grands types de PRO (Figure 6).

Figure 6 : Typologie des PRO obtenue par classification ascendante hiérarchique sur des cinétiques de minéralisation au champ (sol nu) d'effluents organiques (BOUTHIER *et al.*, 2009).



4. Exemples de mesures de la valeur fertilisante azotée des PRO sous prairie

- Essai PRO sur ray-grass anglais

De 1995 à 2006, la valeur fertilisante azotée de fumiers de bovins, de porcs et de volailles a été comparée à celle de ces mêmes fumiers compostés et à une fertilisation minérale dans une culture de ray-grass anglais fauché dans le cadre d'essais conduits par ARVALIS - Institut du Végétal à La Jaillière (Loire-Atlantique). Les essais visaient à apporter des éléments de réponses sur :

- l'évolution à moyen terme de l'effet azote de fumiers de bovins, de porcs et de volailles apportés tous les ans sur un ray-grass anglais fauché ;

Tableau 1 : Traitements étudiés dans l'essai valeur azotée des composts et des fumiers issus d'élevages sur un ray-grass anglais fauché à La Jaillière.

Désignation du traitement	Engrais appliqué	Rythme d'apport	Dose* (kg N/ha)
M01	Témoin	1 an sur 2	0
M02		1 an sur 2	X
M11	Ammonitrate 33,5	1 an sur 2	X/4
M12		1 an sur 2	X
M21	Ammonitrate 33,5	1 an sur 2	X/2
M22		1 an sur 2	X
M31	Ammonitrate 33,5	1 an sur 2	3X/4
M32		1 an sur 2	X
M4	Ammonitrate 33,5	annuel	X
FB1	Fumier de bovins	annuel	< X
CB1	Compost de fumier de bovins	annuel	< X
CB21 CB22 CB23	Compost de fumier de bovins Ammonitrate 33,5	1 an sur 3	< X
		2 ans sur 3	X
FP1	Fumier de porcs	annuel	< X
CP1	Compost de fumier de porcs	annuel	< X
FV1	Fumier de volailles	annuel	< X
CV1	Compost de fumier de volailles	annuel	< X
CV21 CV22 CV23	Compost de fumier de volailles Ammonitrate 33,5	1 an sur 3	< X
		2 ans sur 3	X

* X correspond à la dose d'azote calculée pour atteindre le rendement objectif à l'aide de la méthode des bilans appliquée à la prairie

- la conséquence du compostage sur cet effet azote ;
- la part des effets directs et des effets cumulatifs d'apports répétés pour les composts de fumiers de bovins et de volailles.

L'essai mis en place est un dispositif à 3 blocs et 13 traitements (Tableau 1). La Jaillière se trouve dans le bocage angevin. La pluviométrie annuelle est de 608 mm avec une température moyenne de 11,5°C. Le sol est de type brun hydromorphe avec 20 % d'argile et 53 % de limons, un pH de 6,6.

Les caractéristiques moyennes des fumiers et composts de fumiers sont résumés dans le Tableau 2. Le compostage tend à augmenter la teneur en N total des PRO sauf pour le compost de fumier de volailles et à diminuer le C/N des PRO. Les caractéristiques physico-chimiques sont peu modifiées par le compostage qui a pourtant comporté 2 à 4 retournements.

Tableau 2 : Compositions moyennes des produits organiques épandus (traitements : cf. tableau 1) sur les essais ray-grass anglais à La Jaillière (44). Doses moyennes de PRO et N total apportées correspondantes.

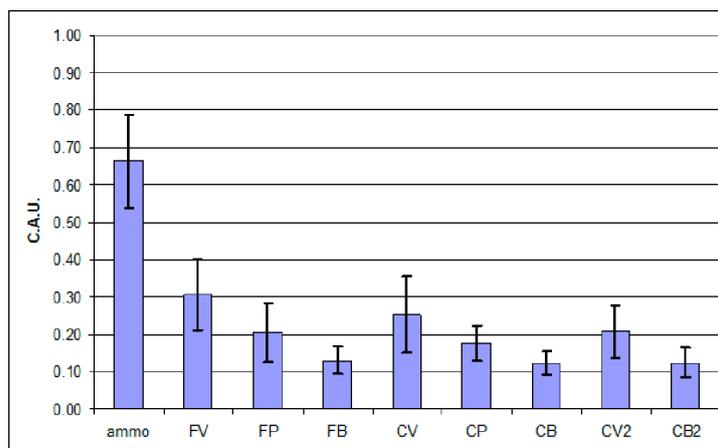
	pH	MS	MO	C total	N total	C/N	N-NO ₃	N-NH ₄	Doses	N total (kg/ha)	
		(% MB)					(% MB)		(t MB/ha)	mini	maxi
CB	9,02	33,7	21,4	12,0	1,1	11,1	0,04	0,01	21,0	123	298
CP	8,52	39,9	24,7	13,6	1,3	10,9	0,07	0,04	18,0	152	341
CV	8,92	58,1	39,2	21,9	2,2	9,9	0,00	0,21	8,1	67	269
FB	9,19	33,0	21,5	11,8	0,9	13,2	0,03	0,02	23,3	99	285
FP	8,91	38,4	26,4	14,4	1,1	12,8	0,04	0,06	19,6	160	248
FV	8,74	66,7	51,1	28,3	2,7	10,7	0,06	0,34	7,3	56	295

Le coefficient apparent d'utilisation (CAU) moyen de l'ammonitrate (0,66) est conforme aux valeurs couramment mesurées (Figure 7). Les CAU du N des produits organiques sur RGA sont variables au cours du temps tout en restant dans des ordres de grandeurs semblables pour un produit donné. Il n'y a pas d'évolution nette de la valeur de ces CAU au cours du temps, il est donc possible d'utiliser la valeur moyenne des 10 CAU calculés dans l'essai. Ces CAU moyens des produits organiques sont faibles. L'analyse de l'évolution des CAU par coupe montre que l'effet azote est acquis dès la coupe suivant l'apport et que de légers effets résiduels persistent certaines années sur la deuxième voire la troisième coupe (résultats non montrés).

Les CAU moyens des fumiers compris entre 0,13 et 0,25 classent les produits dans l'ordre : FB < FP < FV. On retrouve des ordres de grandeurs similaires aux proportions de N disponibles mesurées par les cinétiques de minéralisation au champ (Figure 6). Les CAU des composts de fumiers tendent à être plus faibles que ceux des fumiers non compostés, sauf pour les fumiers de bovins pour lesquels il n'y a pas d'effet du compostage. Cette diminution des CAU est sans doute liée à une stabilisation de la MO des composts qui se minéralise donc plus lentement. Cependant les différences ne sont pas significatives. Les rapports des CAU des PRO par rapport au CAU de l'engrais permettent d'estimer des coefficients équivalence engrais : ils sont de 0,2 pour les fumiers de bovins compostés ou non (ordre de grande des valeurs proposées par GUTSER *et al.*, 2005), 0,27 et 0,32 pour le fumier de porc composté et non composté ; de 0,38 et 0,47 pour le fumier de volaille composté ou non.

Les CAU moyens des fumiers compostés de bovins (CB2) apportés 1 année sur 3 sont égaux à ceux des composts apportés tous les ans (CB). Les CAU moyens des fumiers compostés de volailles (CV2) apportés 1 année sur 3 sont légèrement inférieurs aux composts apportés tous les ans (CV) après 4 apports consécutifs.

Figure 7 : Coefficient Apparent d'Utilisation moyen du N de l'engrais et des PRO dans les différents traitements. Les apports sont annuels sauf dans les traitements CV2 et CB2 où les apports se font un an sur 3.



– Comparaison des valeurs fertilisantes des lisiers et digestats de méthanisation

Des essais de comparaison de la valeur fertilisante azotée des lisiers et des digestats bruts de méthanisation sont effectués depuis quelques années par les Chambres d'Agriculture de Bretagne et Pays de Loire selon le protocole de la courbe de réponse à l'azote (*cf. Casdar PRO « Guide méthodologique »*). Ces 2 types de PRO ont une grande partie de leur azote sous forme minérale ammoniacale ; les pertes par volatilisation d'ammoniac peuvent diminuer fortement leur valeur fertilisante azotée. Les conditions climatiques suivant la période d'apport influencent donc largement les résultats de mesure des valeurs fertilisantes. Les résultats résumés dans le Tableau 3 montrent que les coefficients d'équivalence engrais (Keq) des digestats et lisiers sont du même ordre de grandeur. Ils varient d'une année à l'autre et peuvent atteindre 70-80 % dans un essai en climat humide du centre Finistère. L'apport avec un injecteur à disque (3/5 cm de profondeur) ne semble pas présenter de grandes différences par rapport à l'apport avec un pendillard (à confirmer). On retrouve bien la variabilité des valeurs de Keq des lisiers rapportée dans la Figure 4. Cependant en moyenne, les Keq des digestats tendent à être plus faibles sur prairie que la fourchette de 50 à 70 % proposée par GUTSER *et al.* (2005). Ils peuvent même s'effondrer à 0 % en cas d'apport par temps sec et sans pluie 10 jours durant après l'apport.

Tableau 3 : Coefficient équivalent engrais moyen calculés dans des essais d'apport de lisiers ou de digestats bruts sur ray-grass ou sur prairie (essais Chambres d'Agriculture de Bretagne et Pays de Loire).

Année	Région	Culture	Date d'apport	Méthode	Digestat	Lisier	Observations
2010	Bretagne	RGI	juin	pendillard	27%	22%	2 ^e coupe
2011	Bretagne	RGI	mars	pendillard	55%		1 ^{re} coupe
2013	Bretagne	RGA	mars	pendillard	72%	46%	coupes 1+ 2
2013	Bretagne	RGA	mars	injection	71%	84%	coupes 1+ 2
2014	Bretagne	Prairie	mars	injection	49%	44%	1 ^{re} coupe
2014	Bretagne	Prairie	juin	injection	48%	47%	coupes 1+ 2
2014	Bretagne	Prairie	mars	pendillard	38%	39%	1 ^{re} coupe
2014	Bretagne	Prairie	juin	pendillard	46%	47%	coupes 1+ 2
2014	Pays Loire	Prairie	mars	pendillard	35%	25%	coupes 1+2
2014	Pays Loire	Prairie	mai	pendillard	0%	0%	coupes 1+2

5. Synthèse

Trente pour cent des prairies sont fertilisées par des produits résiduaux organiques en grande majorité issues des exploitations agricoles (98 %) sous forme d'effluents d'élevage. La proportion d'azote organique dans ces effluents d'élevage varie de 30 % en moyenne dans les lisiers à 90 % dans les fumiers. La disponibilité de l'azote pour les plantes dépend de la proportion de N sous forme minérale et de la vitesse de minéralisation du N organique des PRO. Le traitement par compostage des effluents d'élevage tend à diminuer la disponibilité de l'azote en stabilisant les formes organiques et en les rendant plus lentement minéralisables. En revanche, la digestion anaérobie tend à augmenter la disponibilité potentielle dans les digestats bruts en raison de la minéralisation des formes organiques en NH_4 au cours de ce processus de digestion. Les valeurs fertilisantes azotées des effluents d'élevage se classent dans l'ordre fumiers bovin < lisiers bovin < fientes de volailles < lisier porc. Les résultats expérimentaux montrent que le compostage ne diminue que très peu la disponibilité de l'azote des fumiers et que les lisiers et digestats ont des valeurs fertilisantes azotées du même ordre de grandeur. Les arrière-effets des apports répétés de PRO semblent assez peu marqués, sans doute en raison des fortes teneurs en matière organique des sols de prairie qui masquent les effets des apports sur les stocks de matière organique des sols. Enfin, pour les PRO ayant les valeurs fertilisantes potentielles les plus importantes tels que les lisiers et les digestats, la date et les conditions climatiques le jour d'apport (et les jours suivants) ont un impact considérable sur l'efficacité de l'azote et génèrent donc, dans les situations climatiques les plus défavorables, des impacts environnementaux importants.

Références bibliographiques

- BOUTHIER A., TROCHARD R., PARNAUDEAU V., NICOLARDOT B. 2009. *Cinétique de minéralisation nette de l'azote organique des produits résiduaux organiques à court terme in situ et en conditions contrôlées*, 9e Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de la terre, Comifer-Gemas, 25-26 novembre 2009, Blois, 6 p.
- GUTSER R., EBERTSEDER, T., WEBER A., SCHRAML M., SCHMIDHALTER U. 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 168 (4): 439-446.
- HOUOT S., PONS M.N., PRADEL M., CAILLAUD M.A., SAVINI I., TIBI A. (2014). *Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Synthèse de l'Expertise scientifique collective INRA-IRSTEA, CNRS*. 103 p.
- PEYRAUD J.L., CELLIER P., DONNARS C., RÉCHAUCHÈRE O. (COORD.), AARTS F., BÉLINE F., BOCKSTALLER C., BOURBLANC M., CELLIER P., DELABY L., DOURMAD J.Y, DUPRAZ C., DURAND P., FAVERDIN P., FIORELLI J.L., GAGNÉ C., KUIKMAN P., LANGLAIS A., LE GOFFE P., LESCOAT T., MORVAN T., NICOURT C., PARNAUDEAU V., PEYRAUD J.L., ROCHETTE P., VERTES F., VEYSSET P. (2012). *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres, synthèse du rapport d'expertise scientifique collective*, INRA, France, 68 p.