

VALEUR AZOTE A COURT MOYEN ET LONG TERME DES PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES ISSUS D'ELEVAGES

Auteurs: TROCHARD Robert¹, BOUTHIER Alain², MORVAN Thierry³, Jean GRALL⁴

¹ ARVALIS Institut du végétal, La Jaillière La Chapelle Saint Sauveur F-44370.
r.trochard@arvalisinstitutduvegetal.fr,

² ARVALIS Institut du végétal, Saint Pierre d'Amilly F-17700. a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

³ INRA, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes . morvan@rennes.inra.fr

⁴ Pôle Agronomie-Productions végétales, Chambre régionale d'Agriculture, rond-point Maurice Le Lannou CS 14226 35042 Rennes cedex. jean.grall@bretagne.chambagri.fr

Introduction : Un besoin de références sur les effets azote long terme de produits résiduares organiques

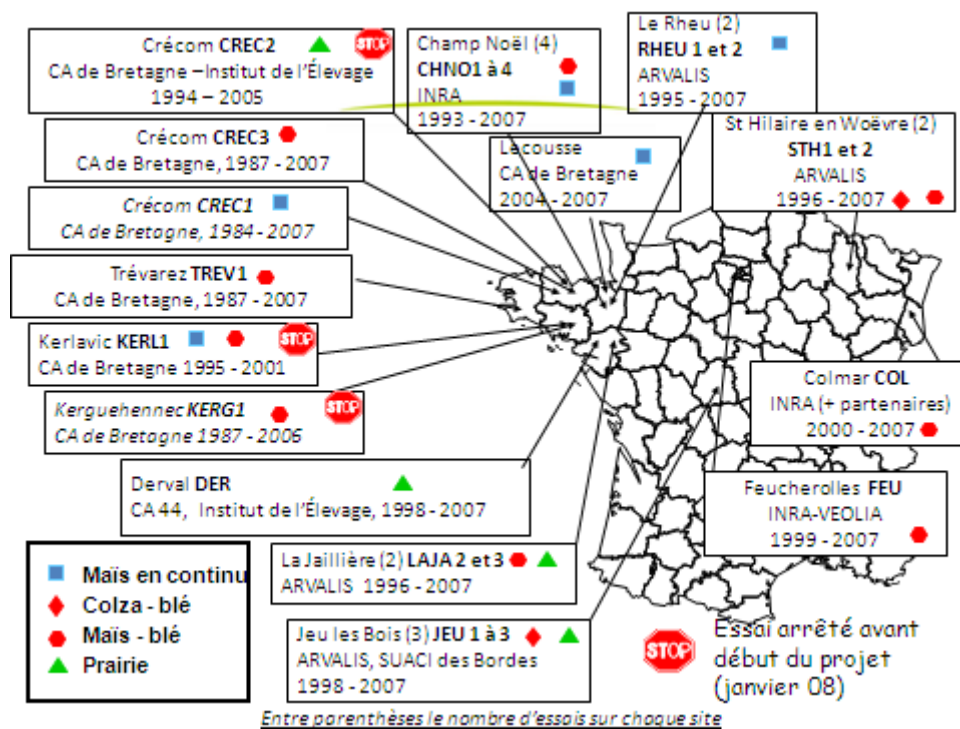
Un projet CASDAR « Gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevages » pour mieux quantifier les effets azote à long terme des apports de produits organiques issus d'élevages(PROE).

Les agriculteurs français épandent annuellement sur leurs parcelles cultivées 330 millions de tonnes de produits organiques dont 94 % sont issus de l'activité d'élevage et 205 Mt sous forme de fumiers de bovins. Ces produits organiques constituent un gisement important d'azote, de l'ordre de 60 % de l'azote épandu sous forme d'engrais minéraux. A la différence des engrais azotés minéraux, une partie de l'azote des PRO se trouve sous des formes organiques diverses (acides aminés, peptides, ADN,...) et sous forme minérale, essentiellement ammoniacale. La valeur fertilisante azotée est donc en partie liée à la minéralisation progressive de l'azote organique qui peut s'étendre sur des durées plus ou moins longues selon la composition des produits. L'acquisition de références sur la valeur fertilisante azotée des produits organique, a surtout porté jusqu'à présent sur l'évaluation des effets à court terme (année de l'apport). Bien que les références soient encore peu nombreuses, des coefficients d'utilisation de l'azote sur la culture réceptrice de l'apport, sont actuellement utilisés dans les différents outils de calcul de fertilisation, pour les produits les plus courants, et selon différentes modalités d'apport. Par contre, les effets azote à moyen et long terme sont encore aujourd'hui mal appréciés car les références issues d'expérimentations de longue durée sont rares.

Un projet CASDAR a été conduit de 2007 à 2011 par 9 organismes (ARVALIS-Institut du Végétal, INRA, Institut de l'Élevage, Chambres d'Agriculture de Bretagne, Chambres d'Agriculture de Loire-Atlantique, du Cher, de la Creuse, de la Haute-Vienne et de l'Indre) dans le but de valoriser les résultats de l'ensemble des essais de longue durée avec apports de PROE, mis en place par ces organismes pour mieux quantifier la disponibilité en azote des PROE. Ces essais cumulent entre 7 et 20 années d'apports à des fréquences variables, dans des conditions pédoclimatiques variées (figure 1). Le projet avait pour objectifs de réaliser une synthèse des effets azote annuels et mettre en œuvre des mesures complémentaires en vue de quantifier les effets d'apport répétés de PROE sur le statut organique du sol et sur le supplément d'activité minéralisatrice résultant de ce stockage.

Cette communication reprend les principaux résultats issus de l'analyse des effets azote annuels et présente les résultats des mesures réalisées après l'arrêt des apports pour les fumiers de bovins, produit le plus répandu et présent sur la quasi-totalité des essais.

Figure 1 : présentation des sites expérimentaux étudiés dans le projet CASDAR « Gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevages » (les abréviations figurant à côté du nom des essais seront utilisées dans la suite de l'article).



Etat des connaissances sur la minéralisation de l'azote organique des PRO.

L'effet direct N des PRO sur la culture réceptrice est imputable à la forme ammoniacale et aux formes organiques minéralisées au cours de la période d'absorption de la culture réceptrice. Après la récolte de cette culture, la minéralisation se poursuit, mais il ressort de la bibliographie que le taux de minéralisation de la MO résiduelle des effluents décroît rapidement avec le temps : dans un article de synthèse, Beegle et al. (Beegle, Kelling et al. 2008) mentionnent des taux de minéralisation variant de 2 à 18 % en année 2, et de 1 à 7 % en année 3. Du fait de cette décroissance rapide, la quantification des flux de minéralisation des PROE au-delà de la 1^{ère} ou 2^{ème} année, requière la mise en œuvre d'essais de moyenne durée. L'estimation de ces flux est relativement difficile, du fait de l'imprécision généralement élevée attachée aux grandeurs calculées. Cüsick et al (2006) ont ainsi montré sur un essai portant sur la comparaison de différentes approches (marquage 15N, bilan azoté...) que le taux de minéralisation de l'azote organique résiduel d'un fumier de bovins en année 2 après l'apport variait de 4 à 12 % selon la méthode utilisée.

L'azote organique résiduel au-delà de la 3^{ème} année après l'apport aurait une dynamique proche de celle de la matière organique du sol (MOS) et contribuerait sur le long terme à en modifier le stock et la nature. Les références valorisables sous nos climats tempérés, se limitent aux essais de Rothamstead (UK) et Askov (DK) initiés il y a plus d'un siècle, qui mettent en évidence un accroissement des teneurs en C et N dans l'ensemble des compartiments de la MOS associés aux argiles, limons et sables (Christensen, 1988), ainsi qu'une augmentation de la taille du compartiment microbien. S'appuyant sur l'évolution des teneurs en C des sols de l'essai de Rothamstead, Mary et Guérif (1994) ont en outre étayé l'hypothèse d'une influence « qualitative » des apports de PRO sur l'activité minéralisatrice, via une augmentation de la proportion de la matière organique du sol (MOS) « active » dans un sol recevant du fumier. Ces quelques essais de très longue durée apportent donc des informations importantes sur l'évolution du statut organique du sol et permettent de voir vers quelle situation d'équilibre évoluent ces systèmes. La question de l'évolution du statut organique du sol et de son fonctionnement est beaucoup moins documentée, lorsque l'on s'intéresse à des systèmes de cultures représentatifs des zones d'élevage de l'Ouest ayant reçu régulièrement des PROE au cours de 10 à 30 dernières années.

Dans la suite de cet article, le terme « supplément de minéralisation » (en abrégé SMIN-N pour Supplément de MINéralisation de N) sera utilisé pour désigner la minéralisation de l'azote organique d'un PRO à partir de la 2nde année suivant l'apport. Ce terme sera suivi du numéro de l'année suivant l'apport, à laquelle il se réfère : 2^{ème}, 3^{ème} année. Le SMIN-N long terme se réfère à la 4^{ème} année et aux suivantes.

Améliorer l'estimation des effets azote des PRO dans les outils de calculs de fertilisation azotée

Les outils de calcul de fertilisation azotée diffèrent quant à leur mode de prise en compte des effets azote à long terme. Dans la méthode de calcul développée par le COMIFER qui a fait l'objet d'une actualisation en 2011, les effets azote des PRO sont pris en compte au niveau de l'effet direct sur la culture réceptrice et d'un effet long terme, estimé à partir de la minéralisation du stock d'azote organique du sol modulé par un coefficient FSyst, traduisant l'effet à long terme des restitutions organiques sur la qualité de la MOS stockée. Des valeurs de FSyst sont proposées sur la base d'une expertise, mais n'ont toutefois pas fait l'objet de validation à partir de données expérimentales.

Dans certaines régions et pour certains outils de calcul, la méthode de calcul du guide COMIFER 1996 qui fait intervenir un terme de minéralisation spécifique de l'azote des PRO (Mha), a été conservée soit avec le paramétrage proposé par défaut ou bien avec un paramétrage régionalisé (cas de la méthode de calcul développée par les Chambres d'Agriculture de Bretagne). Face à cette diversité d'estimations qui peuvent conduire à des résultats différents pour des situations analogues, l'objectif du projet était de constituer une base de paramétrage unique permettant une homogénéisation du mode de calcul des effets azote à long terme.

Démarche suivie pour quantifier les effets azote sur les 21 essais de longue durée étudiés

Des protocoles très variés

25 essais répartis sur 15 sites ont été pris en compte au niveau du projet, implantés en majorité sur des sols limoneux de l'Ouest de la France, dans des rotations maïs fourrage/blé (pailles exportées), représentatives des exploitations d'élevages de cette région. Les quelques essais implantés dans des rotations céréalières (colza, maïs grain et blé avec pailles enfouies ou enlevées), se situent dans des régions plus continentales: Feucherolles(78), Jeu les Bois(36), St Hilaire en Woëvre(55), Colmar(68). Enfin, 4 essais ont été conduits en prairie temporaire. Tous les essais en cultures annuelles ont été conduits en labour. Mis en place entre 1987 et 2004, dans des dispositifs blocs avec 3 ou 4 répétitions (excepté sur 1 site), ces essais avaient tous comme objectif principal d'évaluer les effets 'azote' résultant d'apports répétés de PROE. Les protocoles expérimentaux ont cependant différencié sur plusieurs points :

- 9 PROE différents (lisiers, fumiers, composts issus d'élevages bovins, porcins ou avicoles) ont été étudiés. Les PROE étudiés sont différents d'un essai à l'autre mais le fumier de bovins, produit organique le plus répandu, a été étudié sur la majorité des essais.
- Les doses, les fréquences d'apport (annuels à tous les 3 ans selon les essais) et les périodes d'apport, sont également très variables. Les doses de produit ont été le plus souvent calculées sur la base d'une quantité d'azote à apporter. Quelques essais ont permis de comparer des doses, des fréquences (tous les ans, 2 ans ou 3 ans) ou des périodes d'apport.
- les apports organiques étaient ou non complétés avec une fertilisation azotée minérale.
- les essais comptent un (en général non limitant) ou plusieurs traitements (courbe de réponse) avec une fertilisation azotée minérale seule apportée sous forme d'ammonitrate.
- tous les essais excepté un seul, comportaient un témoin sans apport d'azote chaque année. Ce témoin était soit fixe soit tournant (2 ou 3 parcelles utilisées chaque année à tour de rôle comme témoin non fertilisé, et soumises à une fertilisation azotée minérale optimale ou infra optimale les autres années).

Le tableau 1 résume les modalités expérimentales mises en œuvre sur les différents essais

Tableau 1 : protocoles des essais

Sigle essai	CB	CLP	CP	CV	FB	FP	FV	LB	LP	comparaisons			témoin sans azote fixe	témoin sans azote tournant	1 seul traitement ammonitrate (dose X)	courbe de réponse ammonitrate	PROE complétés par fertilisation N minérale
										dates	doses	fréquences					
CHNO1																	
CHNO3																	
CREC1																	
KERL1																	
LECO1																	
RHEU1																	
RHEU2																	
CHNO2																	
CHNO4																	
CREC3																	
LAJA2																	
STH2																	
STH4																	
TREV1																	
COL																	
FEU																	
JEU1																	
JEU2																	
STH1																	
STH3																	
KERG1																	
CREC2																	
DER																	
JEU3																	
LAJA3																	

C = compost ; L = lisier ; F = fumier ; B = bovins ; V = volailles ; P = porcins

Les mesures réalisées en routine sur les essais ont porté sur les rendements et l'azote absorbé par les parties aériennes des cultures, la composition des PROE (teneurs en MS, Ntotal et N ammoniacal), les teneurs en C et N de la couche arable en début et fin d'expérimentation et des mesures de stocks d'azote minéral dans le sol, permettant de réaliser des bilans azotés annuels

Des mesures complémentaires ont été réalisées dans le cadre du projet dans les essais encore suivis au début du projet CASDAR, afin de quantifier le stockage de carbone et d'azote organique ainsi que le supplément de minéralisation de l'azote par rapport à une fertilisation minérale seule, liés aux apports répétés de produits organiques:

- des mesures de fractionnement granulométriques des matières organiques et des incubations au laboratoire en conditions contrôlées d'échantillons de terre prélevés dans l'horizon labouré, ont été réalisées sur 12 essais de 2006 à 2009, sur des sols prélevés au moins 12 mois après l'arrêt des apports de produits organiques pour quantifier les effets long terme.

- 9 d'entre eux ont aussi fait l'objet d'une quantification de la minéralisation au champ selon deux méthodes, soit par suivi mensuel du stock d'azote minéral du sol sous sol nu, soit par bilan azoté sous culture non fertilisée. Sur 7 essais, ces suivis ont été réalisés sur 2 à 4 années consécutives, avec l'une ou l'autre des 2 méthodes.

Méthodes mises en œuvre pour quantifier les effets N des PROE:

L'effet azote des apports de PROE sur les cultures en cours d'essai a été évalué par le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU), égal au supplément d'absorption d'azote par les parties aériennes sur le traitement PROE, comparativement au témoin non fertilisé, rapporté à la quantité d'azote total apporté par le PROE.

Le calcul du CAU n'est interprétable que dans la partie linéaire de la courbe de réponse à l'azote et peut conduire à une sous-estimation de l'effet N des PRO si l'on situe au-delà. Pour cette raison, les CAU dont le calcul ne satisfaisait pas cette condition n'ont pas été retenus. Le calcul des CAU annuels, sur chaque traitement d'un essai permet d'obtenir des séries temporelles de CAU d'un produit épandu sur une culture à une dose, fréquence et période données. L'évolution du CAU au cours du temps a ensuite été analysée statistiquement sur ces séries temporelles, pour vérifier si au-delà des fluctuations interannuelles, il évoluait tendanciellement au cours du temps ou restait stable.

Les flux de minéralisation au champ après l'arrêt des apports ont été calculés avec le modèle LIXIM (Mary et al, 1999) pour les suivis sous sol nu, et par un calcul du bilan d'azote sous culture non fertilisée (relation 1) :

$$N \text{ minéralisé} = R_f - R_e + L + N_{abs} \quad (1),$$

avec R_e : reliquat entrée de bilan, mesuré en sortie d'hiver, R_f : reliquat de fin de bilan, mesuré après la récolte, L : Lessivage d'azote sous forme nitrique pouvant se produire au printemps et estimé avec le modèle STICS ; N_{abs} : quantité d'azote absorbée par la culture sur la période de calcul du bilan.

Dans les 2 approches, l'effet du climat a été modélisé par le calcul du temps 'normalisé', la durée en jours calendaires étant convertie en durée exprimée en nombre de jours normalisés (J_n) et permettant *in fine* de calculer la vitesse potentielle de minéralisation (V_p), égale au rapport entre le flux de minéralisation mesuré et le nombre de jours normalisés. Le supplément de minéralisation (SMIN-N) attribué aux apports répétés de PROE a été calculé par différence entre les vitesses potentielles journalières (V_p) des traitements PROE et le traitement avec fertilisation minérale(MIN).

Les mesures de teneur en C et N organique de la couche labourée en fin d'essai ont permis de calculer les grandeurs MI-C (Manure Induced C) et MI-N (Manure induced N) égales à la différence des teneurs (en mg/kg terre fine) entre le traitement PROE et le traitement avec fertilisation minérale. Les densités apparentes et la teneur volumique de cailloux, ont aussi permis de calculer le stockage de C et N dans la couche labourée, par différence entre le traitement MIN et les traitements avec apports de PROE. Enfin, les mesures de fractionnement granulométrique de la MO ont permis d'identifier les fractions particulières 200-2000 μ , 50-200 μ et la fraction fine < 50 μ et de calculer la répartition de C et de N stocké dans les différentes fractions granulométriques.

Enfin, une démarche de modélisation de l'évolution au cours du temps du taux de minéralisation de l'azote organique, a été réalisée sur l'effectif des traitements avec apport de fumiers de bovins pour lesquels les données sont les plus nombreuses, à l'aide d'un modèle simple proposé par Pratt et al (1973). Ce modèle est fondé sur le calcul de la minéralisation du N organique des effluents par application de séries temporelles de taux de minéralisation annuels, appelées 'decay constants', ces 'decay constants' constituant une 'decay serie' (ce modèle sera appelé DSM pour Decay Serie Model dans la suite de l'article). Selon ce modèle, la minéralisation de l'azote organique de l'effluent est donc calculée sur un pas de temps annuel par les relations suivantes :

$$N_{\text{minéralisé}1} = k_1 \cdot N_{\text{org}}$$

$$N_{\text{minéralisé}2} = k_2 \cdot (1 - k_1) \cdot N_{\text{org}}$$

$$N_{\text{minéralisé}3} = k_3 \cdot (1 - k_2) \cdot (1 - k_1) \cdot N_{\text{org}}$$

Avec : N_{org} : quantité de N organique apportée par le PROE, k_1 : taux de minéralisation de l'azote organique apporté par l'effluent au cours de l'année de l'apport et k_2, k_3, \dots, k_n : coefficients de minéralisation de l'azote organique résiduel mesuré en début d'année 2, 3, ..., n. On considère que la décroissance des valeurs se produit au maximum sur une durée inférieure ou égale à 4 ans, les coefficients de minéralisation des années postérieures à l'année 4 étant considérés comme constants et égaux à ceux de l'année 4. Les paramètres ont été obtenus par optimisation du modèle sur les données de stockage et de suppléments de minéralisation calculés à partir des mesures réalisées en fin d'essai.

L'ensemble des données rassemblées et calculées dans le cadre du projet a été intégrée dans une base de données ACCESS appelée N-PROE, accessible à l'ensemble des partenaires du projet.

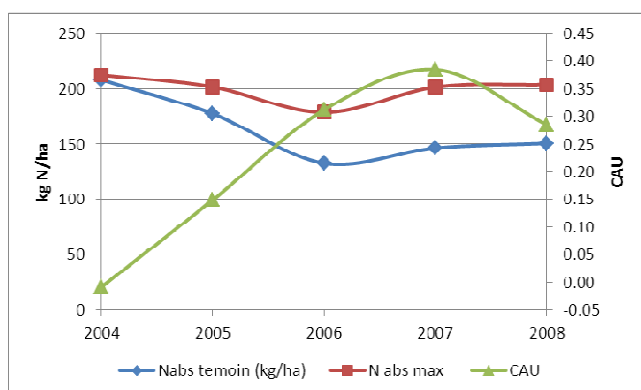
Bilan des effets azote des PROE mesurés sur les cultures

Effets mesurés en cours d'essais sur les cultures réceptrices

La synthèse des essais a permis de constituer un référentiel de 691 valeurs de CAU annuels répartis en 105 séries temporelles de 3 à 10 années, après élimination de 17 années-essais où le CAU n'a pas été validé. La réponse à la fertilisation azotée minérale y était très faible voire nulle, le plus souvent en raison d'une absorption d'azote élevée du témoin non fertilisé, parfois conjuguée à un faible niveau de production de la culture. Ce type de situation observé essentiellement sur maïs et plus rarement sur colza et sur blé, s'explique par la plus forte interception de la minéralisation annuelle du sol par le maïs et la part plus importante de la fourniture en azote du sol par rapport aux besoins d'azote de cette culture.

L'analyse de l'évolution du CAU au cours du temps sur les séries temporelles a nécessité d'éliminer les 2 à 4 premières années de suivi sur 9 essais. Ces essais étaient en effet caractérisés par une absorption d'azote plus importante du témoin la 1^{ère} année de suivi, qui décroissait rapidement au cours des 2 ou 3 années suivantes pour se stabiliser sur le reste de la durée de suivi. La figure 2 montre ce type d'évolution sur un essai en monoculture de maïs fourrage où le CAU plus faible des 2 premières années lié à la plus forte fourniture du sol a dû être éliminé. Dans les essais où l'on dispose de l'historique cultural avant la mise en place de l'essai, ce type d'évolution semble lié à des pratiques culturales antérieures au début de l'essai, ayant laissé un stock d'azote minéral ou rapidement minéralisable important en début d'essai.

- Figure 2 : évolution de l'azote absorbé par les parties aériennes du témoin sans azote, de la parcelle fertilisée en ammonitrate et du CAU du fumier de bovins sur l'essai de Lecousse (35)



L'analyse de l'évolution des CAU sur ces 105 situations retenues ne met en évidence d'augmentation significative de celui-ci au cours du temps (au seuil d'erreur fixé à 10 %) que sur 2 d'entre elles. Toutefois la variabilité interannuelle des CAU est importante, le coefficient de variation moyen est de 46 %.

Sur l'ensemble des situations où il n'a pas été mis en évidence d'évolution significative au cours du temps, la valeur moyenne du CAU et l'écart type entre essais, ont été calculés par type de produit, culture réceptrice et période d'apport et sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Valeurs moyennes et écart types des CAU des PROE étudiés sur les 25 essais

culture	période apport		FB	CFB	FP	CFP	FV	CFV	LB	LP
blé	automne	nb valeurs	45	32	4	4	4	8		14
		valeurs e.t	0.1 ± 0.06	0.09 ± 0.06	0.1 ± 0.05	0.06 ± 0.03	0.19 ± 0.04	0.12 ± 0.03		0.36 ± 0.19
	printemps	nb valeurs					14		2	13
		valeurs e.t					0.29 ± 0.11		0.83 ± 0.12	0.53 ± 0.14
colza	fin été	nb valeurs	36	23			8			7
		valeurs e.t	0.2 ± 0.12	0.18 ± 0.12			0.45 ± 0.22			0.28 ± 0.24
	printemps	nb valeurs								5
		valeurs e.t								0.51 ± 0.16
maïs	automne	nb valeurs	18	9						14
		valeurs e.t	0.08 ± 0.05	-0.04 ± 0.10						0.36 ± 0.14
	printemps	nb valeurs	50	45	4	16	13	7		59
		valeurs e.t	0.25 ± 0.14	0.22 ± 0.14	0.35 ± 0.15	0.26 ± 0.15	0.38 ± 0.13	0.32 ± 0.14		0.35 ± 0.19
prairie	automne	nb valeurs	31	41	9	10	17	19		7
		valeurs e.t	0.13 ± 0.08	0.10 ± 0.06	0.16 ± 0.03	0.16 ± 0.05	0.29 ± 0.09	0.22 ± 0.09		0.25 ± 0.21
	printemps	nb valeurs		10	1					7
		valeurs e.t		0.28 ± 0.18	0.39					0.48 ± 0.24

Les fumiers bruts ou compostés de bovins ont des CAU proches, expliqués par une durée de maturation des fumiers de bovins compostés, généralement du même ordre de grandeur que la durée de stockage du fumier. Cette observation sur la valeur moyenne de CAU tous essais confondus est confirmée lorsqu'on analyse individuellement les essais où ces deux produits étaient comparés. Les CAU varient de 0 pour le fumier composté en apport d'automne avant du maïs à 0.28 lorsque l'apport a lieu au printemps sur prairie. Sur maïs comme sur prairie le CAU d'un apport d'automne est beaucoup plus faible que celui d'un apport de printemps.

Les CAU de fumiers bruts ou compostés issus d'élevages porcins apportés sur maïs au printemps et sur blé ou prairies en automne sont légèrement supérieurs aux mêmes produits issus d'élevages bovins.

Les CAU des fumiers bruts ou compostés issus d'élevages de volailles confirment la meilleure efficacité immédiate de l'azote de ces produits par rapport aux produits bovins ou porcins en apport de printemps sur blé ou avant maïs, et en apport d'automne avant colza ou sur prairie. Par ailleurs, l'efficacité des fumiers compostés reste du même ordre de grandeur que celle de fumiers bruts.

Les lisiers de porcs apportés au printemps montrent des CAU plus élevés sur blé et colza que sur maïs avant lequel ils étaient le plus souvent incorporés.

Quelques essais ayant comparé plusieurs doses d'apport de fumiers bruts ou compostés de bovins et de porcins, montrent que le CAU d'apports réalisés sur blé et maïs a tendance à décroître au-delà d'une dose d'apport correspondant à 150 à 200 kg d'azote total.

Les résultats des essais étudiés dans le cadre du projet, confirment les ordres de grandeurs des coefficients d'équivalence engrais ammonitrate (KeqN défini comme le rapport du CAU de l'azote apporté par un PRO et du CAU de l'ammonitrate) fournis dans la brochure « Fertiliser avec des engrais de ferme » publiée en 2001. Toutefois les références issues du projet fournissent des valeurs plus élevées pour les fumiers de bovins compostés sur toutes cultures, les fumiers de bovins compostés apportés au printemps sur prairies, les fumiers de porcs apportés au printemps sur maïs.

Un supplément de minéralisation en 2^{ème} année après l'apport

Plusieurs essais mettaient en comparaison pour certains produits, des fréquences d'apports différentes et ont pu être valorisés pour quantifier un éventuel supplément de minéralisation en 2^{ème} année après l'apport. Deux groupes d'essais peuvent être distingués selon la fréquence d'apport étudiée :

- 6 essais ont comparé des apports annuels à des apports tous les 3 ans. Le CAU du traitement recevant un apport tous les ans, y a été comparé à celui d'un apport effectué tous les 3 ans. Un CAU du traitement avec apport annuel supérieur à celui du traitement avec apport tous les 3 ans, traduit l'existence d'un supplément de minéralisation lié aux apports réalisés la ou les 2 années antérieures. Les produits étudiés étaient variés : fumiers bruts ou compostés de bovins, fumiers compostés de volailles. Malgré des écarts le plus souvent en faveur des CAU des apports annuels mais rarement supérieurs à 0.10, la précision des mesures n'a pas permis de mettre en évidence des écarts significatifs. En effet, sur 18 situations combinant type de PROE-culture réceptrice-période d'apport, une seule met en évidence un écart significatif de CAU en faveur des apports annuels. Sur l'essai de Jeu les

bois où les fréquences d'apports de fumiers bruts ou compostés de bovins étaient comparées à la fois sur blé et sur colza d'une succession colza-blé, les plus forts écarts (+ 0.10 à 0.18) sont enregistrés sur colza suggérant que cette espèce, avec une croissance végétative en automne, plus importante que le blé était plus apte à utiliser le supplément de minéralisation de l'apport réalisé l'année antérieure.

- Sur 7 essais en succession maïs blé avec des apports réalisés tous les 2 ans sur maïs et complétés par une fertilisation azotée minérale, le CAU a été mesuré sur le blé ne recevant pas d'apport. Pour tous les produits testés (fumier de bovins, fumier composté de bovins, fumier de porcs et fumier de volailles), le blé qui suivait l'apport réalisé au printemps précédent sur maïs montrait un supplément d'absorption de 6 à 20% de l'azote apporté par le PROE sur le maïs précédent, selon les essais et les produits (figure 3), mais ce supplément ne s'accroissait pas au cours du temps (figure 3).

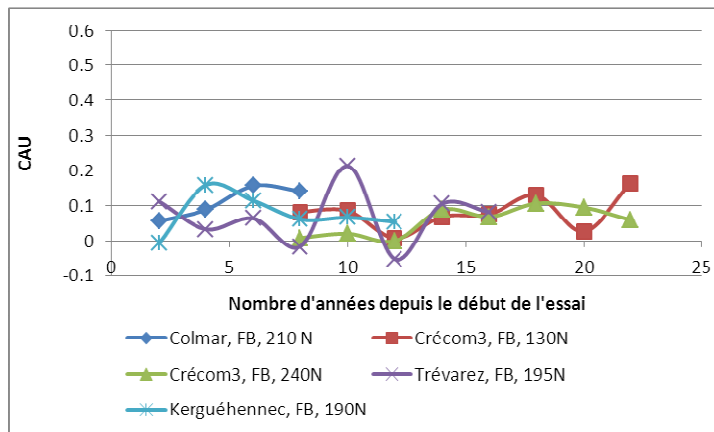


Figure 3 : Evolution du CAU sur blé, de l'azote d'un apport de fumier de bovins apporté sur le maïs précédent

Ces essais avec comparaison de fréquence d'apport suggèrent donc l'existence de suppléments de minéralisation en 2^{ème} année après l'apport le plus souvent sur un blé succédant à un maïs ayant reçu un apport. Ces effets le plus souvent inférieurs à 10 % de l'azote apporté, s'extériorisent d'autant plus que le délai entre l'apport et l'absorption de la culture en année 2 est court, et ne semblent pas s'accroître au cours du temps ce qui tendrait à montrer que les suppléments de minéralisation valorisable par les cultures en année 3 après l'apport et à long terme, sont de faible ampleur et masqués par la variabilité interannuelle des apports.

Bilan des effets azote des fumiers(FB) et fumiers compostés(CB) de bovins mesurés après l'arrêt des apports

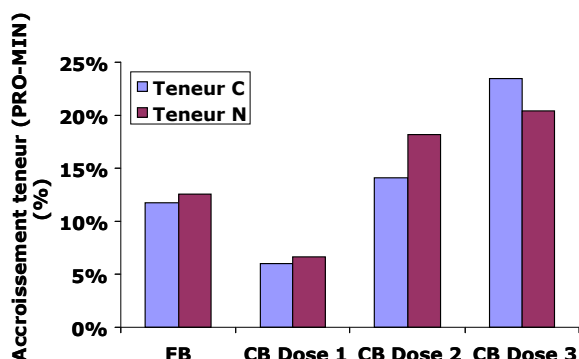
Effets sur les teneurs CN (MI-C et MI-N) et sur la qualité de la MO

Les apports de produits bovins ont entraîné une différenciation significative ($P < 0.05$) des teneurs en C et N organique des sols, comparativement au traitement en fertilisation minérale, pour la majorité des essais, à l'exception des essais DER et TREV, et des doses d'apport faibles pour les essais CREC3, LAJA2, RHEU1, STH1 et STH2. Cette augmentation des teneurs est corrélée à la dose d'apport comme l'illustrent les résultats de l'essai RHEU1 (figure 4).

L'analyse des évolutions au cours du temps sur les essais disposant d'une mesure de la teneur au moins en début et en fin d'essai, montre que la teneur en C organique des traitements en fertilisation minérale seule, a le plus souvent tendance à baisser, ce qui peut s'expliquer par le contexte d'exportations de tous les résidus de culture sur une majorité d'essais en succession maïs fourrage blé. Les apports de PROE ont permis de maintenir cette teneur sur 55 % des essais, voire de l'augmenter sur 36 % et n'ont pas permis d'éviter une diminution dans 10 %. Ces derniers cas correspondent à des apports de fumiers de volailles ou de lisiers de porcs. Cette stabilité de la teneur en matières organiques du sol dans la moitié des essais signifie que les apports réalisés compensent

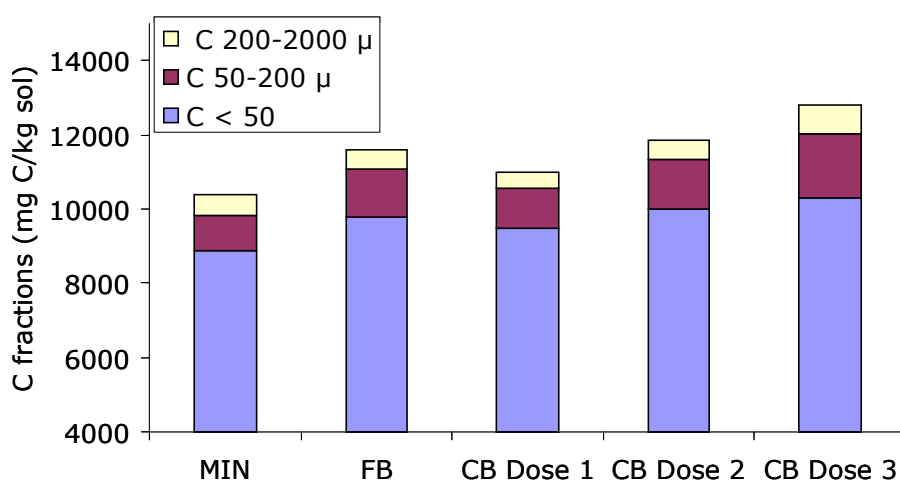
les pertes dans le bilan humique à la parcelle. Les écarts de teneur en fin d'expérimentation quantifient la participation des apports de PROE au bilan humique.

Figure 4 : Effet d'apports répétés de fumier de bovins bruts (FB) et compostés (CB), sur les teneurs en C et N du sol, mesurés sur l'essai RHEU1 en 2006, soit après 11 ans d'apports annuels de produits



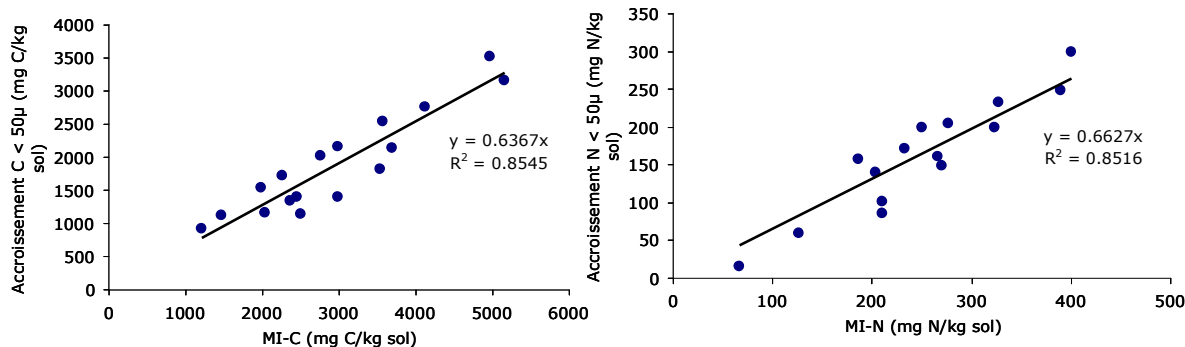
La répartition de la MO dans les fractions granulométriques du sol pour les différents traitements de l'essai RHEU1 est présentée à la figure 5. On observe que les apports d'effluents ne modifient pas la taille du compartiment 200-2000 μ , et que le stockage de MO résultant des apports de produits se produit dans les fractions 50-200 μ et 0-50 μ .

Figure 5 : Effet d'apports répétés de fumier (FB) et de fumier composté de bovins (CB) à 3 doses, sur la répartition du C organique dans les 3 fractions granulométriques: essai RHEU1



Les mêmes observations sont faites sur les autres essais. On montre en effet que la MO apportée par l'effluent se retrouve majoritairement (64 % en moyenne pour C, et 66 % pour N), dans la fraction fine < 50 μ et que le reste de la MO de l'effluent est stocké dans la fraction particulière 50-200 μ (figure 6). Ce résultat permet de confirmer la stabilisation de la MO des effluents dans les sols, car la MO associée à ces fractions est caractérisée par des temps de renouvellement longs (Balesdent et Recous, 1997).

Figure 6 : Relation entre l'accroissement de teneur en C et N organique dans la fraction < 50 μ , avec l'accroissement de teneur en C et N organique total, sur l'ensemble des essais.



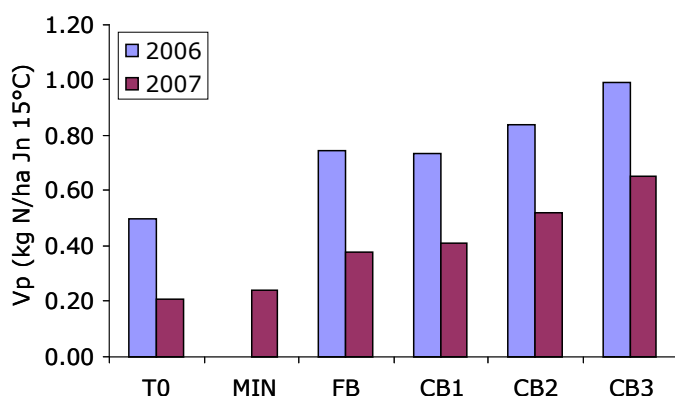
Suppléments de minéralisation N (SMIN-N) mesurés au champ et au laboratoire après l'arrêt des apports

Le supplément de minéralisation de N attribué aux apports de FB et CB a été calculé par différence avec le traitement ayant reçu une fertilisation minérale pendant la durée des essais, et exprimé en vitesse potentielle journalière V_p ($\text{kg N ha}^{-1} \cdot \text{jn}^{-1}$), la modélisation de l'effet du climat par le calcul du temps en jours 'normalisés' (jn) permettant de comparer les données obtenues sur des essais différents et pour des années différentes.

Des valeurs positives de supplément de minéralisation sont calculées sur la majorité des essais et des traitements pour l'année ou les années qui suivent l'arrêt des apports, et des valeurs de SMIN-N supérieures à $0.1 \text{ kg N ha}^{-1} \cdot \text{jn}^{-1}$ (soit supérieures à $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ environ) sont calculées sur 79 % de l'effectif. Les mesures de laboratoire conduisent également à calculer une minéralisation significativement supérieure ($P < 0.05$) à celle du témoin minéral dans la majorité des cas (72 % de l'effectif), les différences non significatives étant généralement observées pour les situations d'apports à faibles doses.

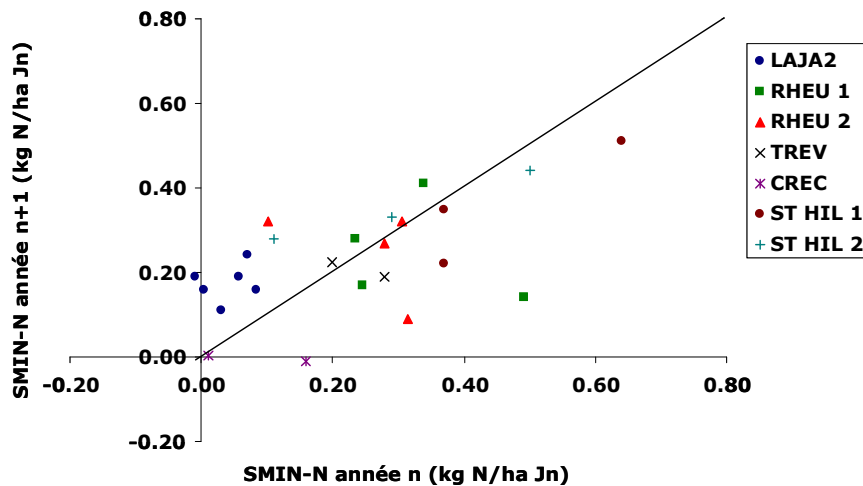
La figure 7 donne une illustration des flux de minéralisation mesurés sur l'essai RHEU1 en 2006 et 2007, soit un an et deux ans après l'arrêt des apports. Les apports de fumiers bruts ou compostés de bovins conduisent pour cet essai à un supplément de minéralisation compris entre 0.23 et $0.49 \text{ kg N ha}^{-1} \cdot \text{jn}^{-1}$ en 2006 et entre 0.14 et $0.41 \text{ kg N ha}^{-1} \cdot \text{jn}^{-1}$ en 2007, croissant avec la dose d'apport de compost.

Figure 7 : Vitesses potentielles de minéralisation journalières calculées sur l'essai RHEU1 en 2006 et en 2007, soit un an et deux ans après l'arrêt des apports (mesures réalisées par bilan N sous maïs non fertilisé en 2006, et par un suivi de N minéral en sol nu en 2007)



L'effet de la dose d'apport sur le supplément de minéralisation est confirmé sur les 3 autres essais comparant des doses: CREC3, STH1 et STH2. L'effet 'temps' (nombre d'années après l'arrêt des apports) est par contre plus difficile à interpréter. La figure 8 compare les valeurs de SMIN-N mesurées $n+1$ années aux valeurs mesurées n années (avec n égal à 1 ou 2) après l'apport. On ne voit pas de tendance significative à la décroissance des valeurs de SMIN-N entre ces 2 années.

Figure 8 : Relation entre le SMIN-N mesuré l'année n (1^{ère} ou 2^{ème} année après l'arrêt des apports) et l'année n+1 (2^{ème} ou 3^{ème} année après l'arrêt des apports).



Approche de la dynamique de l'azote organique des fumiers de bovins par modélisation

Cette démarche de modélisation a été mise en œuvre sur 12 jeux de données provenant des 7 essais pour lesquels on mesure un effet significatif des apports de FB et CB sur le stockage et la minéralisation. Afin de réduire l'indétermination sur les valeurs de paramètres, le modèle DSM a été ajusté simultanément sur les valeurs de stockage (MI-N) et sur les suppléments de minéralisation de l'azote mesurés au champ après l'arrêt des apports, à l'exception de l'essai FEU pour lequel on ne dispose que de mesures de laboratoire. DSM converge pour chaque essai vers des jeux de paramètres permettant un bon ajustement du modèle sur les grandeurs mesurées.

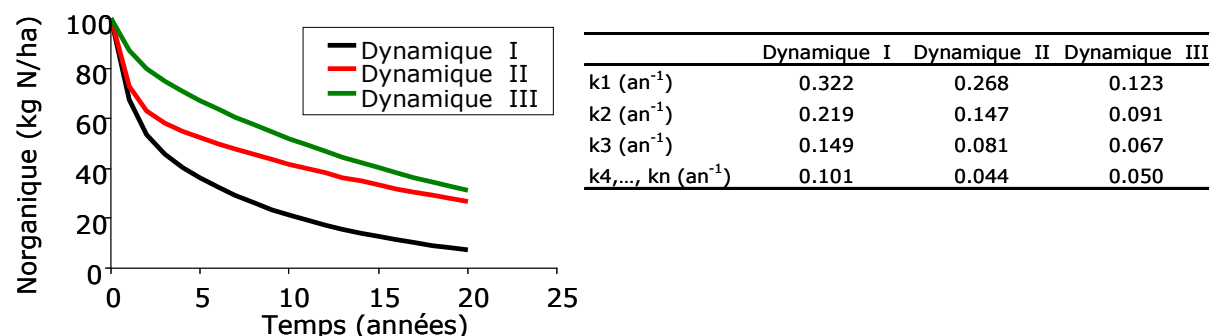
Les dynamiques d'évolution de la MO caractérisées sur ces 12 jeux de données peuvent être au final regroupées en 3 dynamiques 'types' (figure 9):

- une dynamique de type I, sur les essais RHEU1 et de CREC1 et 3, correspondant à des situations à faible stockage de l'azote organique des effluents (N résiduel inférieur à 10%, 20 ans après l'apport)
- une dynamique de type III, sur les essais de FEU et ST HIL2, correspondant à l'inverse à des situations de fort stockage de l'azote organique (N résiduel égal à 31 %, 20 ans après l'apport)
- une dynamique de type II intermédiaire, sur les essais de CHNO et STH1.

Les valeurs de paramètres calculées pour les différents traitements 'Dose' sont très proches, pour un essai donné, ce qui tend à montrer que l'évolution de la MO des effluents sur le moyen terme n'est pas liée à la dose d'apport.

La variabilité des dynamiques observée entre sites est 'attendue' et s'explique par les effets de différents facteurs (composition du produit, climat, sol), et de leurs interactions ; les travaux de C Peltre (2010) sur la modélisation du stockage du C résultant d'apports de fumier de bovins sur des sites expérimentaux de longue durée vont dans le même sens.

Figure 9 : Dynamiques d'évolution du N organique des fumiers et composts bovins, calculées avec le modèle DSM sur 7 essais, et valeurs de paramètres associées à ces dynamiques



Ce travail montre que la minéralisation de la MO résiduelle des effluents se maintient à des taux relativement élevés et supérieurs dans la durée à ceux de la MO du sol, les taux de minéralisation annuels donnés par les coefficients de 4^{ème} année et plus de DSM étant en moyenne sur l'ensemble des essais 2.5 fois supérieurs à ceux de la MO du sol. Les taux de minéralisation calculés pour la dynamique I, essentiellement déterminés par les données de l'essai RHEU1, nous paraissent cependant très élevés et conduisent à s'interroger sur les valeurs faibles de stockage mesurées et *a contrario* sur les valeurs de minéralisation fortes mesurées après l'arrêt des apports. L'écart important de pH mesuré entre la parcelle en fertilisation minérale (pH 5.5) et les parcelles avec apports de fumiers (pH 6) pourrait avoir notamment conduit à amplifier les valeurs de supplément de minéralisation utilisées pour ajuster le modèle. Par ailleurs des mesures de teneur en C et N organique entre 30 et 40 cm de profondeur suggèrent un stockage de C et N des PROE possible au-delà de la seule couche labourée.

Conclusions

10 ans d'apports annuels ou 20 ans d'apports bisannuels de PROE qui cumulent de 1000 à 3000 kgN.ha-1, conduisent pour un grand nombre de traitements à un stockage significatif de C et N organique dans les sols, comparativement à une fertilisation minérale seule. Dans des essais le plus souvent conduits en systèmes de cultures exportant la majeure partie des résidus de récolte, où le stock de C organique a diminué au cours du temps, de tels apports de PROE ont permis un maintien ou une augmentation de ce stock. Le stockage est corrélé à la dose apportée, pour un essai donné, mais varie fortement d'un site à l'autre, pour un même type de produits, l'effet 'site' étant lié à la fois au contexte agropédoclimatique et à la composition initiale des PROE.

Le stockage du C et N apporté par les PROE dans des fractions fines (0-50 μ) et intermédiaires (50-200 μ) à turn over lent suggère que les effets sur la minéralisation d'azote du sol vont s'exercer sur des temps longs.

La dynamique d'évolution du N organique apporté par les fumiers de bovins, approchée avec un modèle à pas de temps annuel (modèle « Decay series » de Pratt), ajusté à la fois sur le stockage MI-N et le supplément de minéralisation SMIN-N mesurés après l'arrêt des apports, conduit à calculer des valeurs de SMIN-N croissantes avec le temps pour des scénarios d'apport réguliers. Toutefois, certaines expérimentations avec des contextes d'apports moins représentatifs peuvent contribuer à amplifier les suppléments de minéralisation modélisés. Trois dynamiques 'types' différentes selon les essais (situations à stockage 'fort' vs situations à stockage 'faible'), ont été caractérisées mais sont difficiles à extrapoler, car les facteurs explicatifs des différences mesurées entre les dynamiques n'ont pas été identifiés.

L'analyse de l'évolution au cours du temps des suppléments annuels d'absorption d'azote des cultures réceptrices, induits par les apports répétés de PROE, ne permet pas de rendre compte d'un accroissement de SMIN-N au cours du temps. L'évolution dans le temps des CAU peut être masquée par :

- l'importante variabilité interannuelle des CAU (coefficients de variation de l'ordre de 50 %).
- un temps d'occupation des cultures (entre 40 et 70 % du temps annuel estimé en jours normalisés) qui ne leur permet pas de valoriser la totalité du SMIN-N annuel. Le reste du SMIN-N peut être l'objet de pertes par lixiviation qui ont été mises en évidence dans certains essais (Champ Noël).
- une capacité limitée des cultures à absorber le supplément de minéralisation. C'est le cas du maïs pour lequel la différence entre les besoins d'azote et la fourniture du sol est souvent faible

Il semble donc que 10 ans d'apports annuels de PROE représentent un délai encore trop court pour qu'un supplément de minéralisation de N puisse être significativement mis en évidence par la mesure de l'absorption de N par les cultures.

D'autres processus peuvent aussi expliquer le fait que l'on n'observe pas d'effets cumulatifs significatifs au niveau de l'absorption d'azote des cultures. Ces processus, tels que les pertes d'azote sous forme nitrique et sous forme organique dissoute, les pertes gazeuses par dénitrification, le transfert et le stockage de N organique dans les horizons, permettraient d'expliquer les écarts relativement importants ('déficit de bilan') entre le cumul de l'azote absorbé par les cultures et le stockage de N.

Les méthodes de calculs des effets azote long terme (méthode COMIFER 2011 et méthode développée par les chambres d'Agriculture de Bretagne) ont été évaluées sur la base des suppléments de minéralisation mesurés après l'arrêt des apports. Les résultats montrent que les estimations réalisées par ces méthodes sont peu précises. Des travaux sont en cours pour proposer des améliorations au cours de l'année 2012.

Outre les acquis sur les suppléments de minéralisation à moyen et long terme, les résultats de l'étude ont permis d'enrichir le référentiel des effets directs mesurés sur les cultures réceptrices en élargissant la gamme des produits référencés (composts), des cultures réceptrices, des doses, fréquences et périodes d'apports ainsi que des conditions agropédoclimatiques. Mais le faible nombre d'essais disponibles ne permet pas de proposer de modulation de l'effet direct d'un type produit selon le contexte agropédoclimatique.

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier du ministère de l'agriculture et de la pêche dans le cadre d'un projet CASDAR, « gestion durable des sols avec des produits organiques issus d'élevages ».

Bibliographie :

Balesdent J. ; Recous S., 1997 - The residence times of C, and the potential for C storage in some French cultivated soils. *Can. J. Soil Sci.*, 77, 187-193.

Bodet J.M., Trochard R., Corgnet M., Castillon P., Laurent F., 2005 - Etude de l'évolution des effets azote de fumiers apportés annuellement pendant 6 ans dans une rotation maïs fourrage-blé tendre d'hiver ou sur un ray-grass anglais fauché. EGS, volume 12 numéro 3, pp 209 220.

Bouthier A., Trochard R., Morvan T., 2007 - Effets d'apports répétés de fumiers Stockés et compostés sur le statut organique du sol. Colloque COMIFER-GEMAS.

Chang C., Janzen H., 1996 - Long-Term Fate of Nitrogen from Annual Feedlot Manure Applications. *J. Environ. Qual.* 25, 785-790.

Jenkinson D.S., Rayner J.H., 1977 - The turnover of soil organic matter in some of Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123, 298-305.

Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999 - Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. of Soil Sci.*, 50, 549-566.

Morvan T., Ruiz L., Viaud V. 2007 - Cumulative effects of applications of organic fertilizers on soil organic matter dynamics. In : Mineral versus organic fertilization conflict or synergism ? de Neve, S.; Salomez, J.; Van den Bossche, A.; Haneklaus, S.; Van Cleemput, O.; Hofman, G.; Schnung, E. (Eds). 16th International Symposium of the International Scientific Centre of Fertilizers (CIEC) 16-19 septembre 2007, Ghent, BE. : 362-370

Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2010 - Optimisation of the RothC Model pools to simulate C dynamics after application of exogenous organic matters in soils.

Pratt P. F., Davis S., Sharpless R. G., 1976 - A four-year field trial with animal manures. I. Nitrogen balances and yields. II. Mineralization of nitrogen. *Hilgardia* 44 (5) : 99-112; 113-125

Schröder J J, Jansen A G, Hilhorst G J, 2005 - Long-term supply from cattle slurry. *Soil Use and Management* 21, 196-204

Thomsen, I.K., 2005 - Crop N utilization and leaching losses as affected by time and method of application of farmyard manure. *European Journal of Agronomy*, 22 p.1-9.

Trochard R., Bouthier A., Morvan T. 2009 - Effets d'apports répétés de fumiers Stockés et compostés sur la minéralisation de l'azote organique du sol. Colloque COMIFER-GEMAS