

Evaluation de l'incidence d'apports réguliers d'engrais de ferme sur des indicateurs de fertilité physique, chimique et microbiologique des sols, sous rotation maïs fourrage - blé et sous prairie temporaire (essais de longue durée)

A. Bouthier¹, R. Trochard²

1 : ARVALIS-Institut du Végétal, Station du Magneraud, F-17700 Saint-Pierre-d'Amilly ;
a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

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

Résumé

Afin d'évaluer l'impact de la fertilisation organique sur un certain nombre de propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, des analyses de terre ont été effectuées sur deux dispositifs expérimentaux ayant comparé des apports annuels de différents types d'engrais de ferme (fumiers bruts et compostés de bovins, porcs et volailles, lisiers de porcs) avec une fertilisation minérale seule pendant une dizaine d'années. Dans les deux dispositifs les différents régimes de fertilisation ont été appliqués sur 2 rotations : une rotation avec des cultures annuelles et une prairie temporaire fauchée. Par rapport à une fertilisation minérale seule, les apports réguliers de fumiers bruts ou compostés ont augmenté de manière significative le stock et modifié la composition (fractions granulométriques) de la matière organique du sol (MOS) sur les 25 premiers centimètres. L'augmentation du stock de MOS dépend étroitement des quantités de carbone organique apporté par les engrais de ferme sous prairie comme sous cultures annuelles. Ces modifications du statut organique sont à l'origine d'un supplément de minéralisation de l'azote organique du sol, mesurée à la fois au laboratoire et au champ, et d'une modification de certaines propriétés physiques du sol. Dans les deux dispositifs, parmi les propriétés physiques, l'effet le plus important est observé sur la conductivité hydraulique de l'horizon de surface, en lien avec l'existence d'une macroporosité plus importante. Les apports répétés d'engrais de ferme d'élevage ont aussi contribué à un enrichissement des 25 premiers centimètres du sol (horizon labouré) en phosphore, potassium et magnésium. Le supplément de teneur mis en évidence par les analyses s'ajuste bien au bilan cultural (apports – exportations) et ne permet pas de conclure à un écart d'efficacité entre les engrais de ferme apportés. Par ailleurs, par rapport à une fertilisation minérale seule, les apports organiques ont contribué de manière variable selon les sites, les systèmes de culture et les effluents, à limiter le processus d'acidification.

1. Les contextes expérimentaux et les analyses réalisées

Dans les régions d'élevage, beaucoup d'agriculteurs apportent régulièrement des engrais de ferme dans des successions de cultures annuelles comprenant du maïs fourrage, du colza et des céréales à paille ou sur les prairies. Il existe encore peu de références sur les effets à moyen et long terme de ces apports répétés sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols récepteurs qui sont le plus souvent des sols à dominante limoneuse, plus ou moins humides et instables. C'est ce qui a incité ARVALIS - Institut du végétal, en partenariat avec cinq unités de recherche INRA, à évaluer les effets sur le sol d'apports annuels répétés d'engrais de ferme dans deux dispositifs expérimentaux à La Jaillière (44) et Jeu-les-Bois (36), dispositifs qui ont été mis en place respectivement en 1996 et 1999. Pour les deux sites, l'objectif initial était de suivre pendant une dizaine d'années l'évolution de la valeur azotée de différents types d'engrais de ferme d'une part dans une rotation de cultures annuelles et d'autre part sur une sole maintenue en prairies pendant toute la durée de l'essai maintenue pendant toute la durée de l'essai. Sur le dispositif de La Jaillière, implanté sur un sol limono-argileux hydromorphe sur altérite de schiste, les cultures annuelles en rotation étaient du maïs fourrage et du blé tendre d'hiver avec pailles enlevées et la prairie était à base de ray-grass anglais fauché. Sur le dispositif de Jeu-les-Bois, implanté sur un sol sablo-limoneux humide drainé sur argile de Brenne, les cultures annuelles en rotation étaient du colza et du blé tendre avec pailles enlevées et la prairie était à base de ray-grass anglais (RGA), remplacé par de la fétuque élevée à partir de 2003.

Sur le dispositif de La Jaillière, six types d'engrais de ferme ont été comparés : fumiers bruts ou compostés de bovins, de porcs et de volailles. Les doses de fumier et compost appliquées annuellement correspondaient à 200 kg de N/ha sur le blé tendre d'hiver et le ray-grass anglais et 100 kg de N/ha pour le maïs fourrage. Les tonnages de produit brut apportés en moyenne sur la rotation maïs - blé (18, 14 et 6 t/ha par an respectivement pour les fumiers bruts et compostés de bovins, fumiers bruts et compostés de porcs, fumiers bruts et compostés de volailles) étaient donc inférieurs à ceux apportés sur la prairie (respectivement 22, 19 et 8 t/ha par an). Les apports d'engrais de ferme ont été réalisés à l'automne avant l'implantation du blé et sur la prairie, et au printemps avant l'implantation du maïs. Aucune fertilisation azotée minérale n'a été réalisée sur les modalités recevant des effluents. Par ailleurs, aucun apport d'engrais minéral phosphaté et potassique n'a été apporté sur le blé et le ray-grass anglais, et seulement 50 kg P₂O₅ ont été apportés en localisé au semis du maïs.

Sur le dispositif de Jeu-les-Bois, 4 types d'engrais de ferme ont été comparés : fumier brut ou composté de bovins, fumier de volailles et lisier de porcs. Sur l'ensemble des cultures, le fumier brut de bovins et le fumier composté de bovins sont appliqués annuellement à 2 doses correspondant respectivement à 100 et 200 kg d'azote total par hectare (soit une dose moyenne de 13,3 t/ha pour 100 kg N/ha et 27,2 t/ha pour 200 kg N/ha pour le fumier brut et de 14,4 t/ha pour 100 kg N/ha et 27,7 t/ha pour 200 kg N/ha pour le fumier composté). Le fumier de volailles et le lisier de porcs étaient appliqués annuellement à une dose correspondant à 100 kg d'azote total par hectare (soit une dose moyenne de 3,2 t/ha pour le fumier de volailles et 21,1 m³/ha pour le lisier de porcs). Les fumiers de bovins bruts ou compostés étaient apportés à l'automne avant l'implantation du colza et du blé et sur la prairie. Le fumier de volailles était apporté à l'automne sur la prairie et avant l'implantation du colza et au printemps (fin tallage) sur le blé. Le lisier de porcs était apporté au printemps pour toutes les cultures. Comme sur le dispositif de La Jaillière, les modalités avec engrais de ferme d'élevage n'ont pas reçu d'apports d'engrais azotés minéraux. En revanche, les apports de phosphore et potasse insuffisants par rapport à la dose conseillée (méthode COMIFER) sur certaines modalités organiques, ont dû être complétés par des apports sous forme d'engrais minéraux.

Dans les deux dispositifs, la modalité en fertilisation minérale seule a reçu une fertilisation azotée sous forme d'ammonitrate ajustée pour atteindre le rendement recherché et les apports de phosphore et de potasse y ont été gérés de façon à compenser les exportations par les cultures. Les essais comportaient aussi une modalité un témoin sans apport d'azote chaque année, tournant (2 parcelles utilisées chaque année à tour de rôle comme témoin non fertilisé et soumises à une fertilisation azotée minérale optimale (X) ou infra optimale (3/4 X) les autres années).

Dans les deux dispositifs, les essais en rotation de cultures annuelles étaient labourés chaque année.

L'évaluation des effets des régimes de fertilisation sur les propriétés des sols a donc été effectuée au moins une année après le dernier apport d'engrais de ferme en vue de s'affranchir des éventuels effets court terme liés à cet apport. Les prélèvements de terre en vue des analyses physico-chimiques et biologiques ont ainsi été effectués au cours des campagnes 2005-2006 à 2007-2008 sur le dispositif de La Jaillière et des campagnes 2008-2009 et 2009-2010 sur le dispositif de Jeu-les-Bois, sous sol nu ou sous culture non fertilisée selon les essais et les années. Le choix des analyses a répondu aux objectifs suivants :

- quantifier les effets des apports répétés d'engrais de ferme par rapport à une fertilisation minérale seule sur le stock de carbone et d'azote organique de la couche labourée (0-25 cm) et sa composition appréciée par la répartition du carbone et de l'azote dans différentes classes granulométriques (0-50 µ, 50-200 µ et 200-2 000 µ) et sa fraction vivante (biomasse microbienne) ;
- évaluer les effets sur la biodisponibilité du phosphore, potassium et magnésium apportés par les engrais de ferme et sur le pH du sol ;
- évaluer les conséquences des modifications du statut organique du sol dans les différents traitements sur un certain nombre de propriétés physiques et biologiques :
 - le potentiel de minéralisation en azote du sol apprécié par incubation au laboratoire et par suivi au champ sur sol nu ou sur culture non fertilisée ;
 - la stabilité structurale, la conductivité hydraulique à des humidités proches de la saturation, la porosité, les humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, les limites de liquidité et de plasticité.

2. Les apports d'engrais de ferme ont un effet marqué sur les teneurs en carbone et azote organique ainsi que leur composition granulométrique

Les résultats des analyses de teneur en C et N organiques réalisées sur l'essai de La Jaillière après l'arrêt des essais montrent :

- Sur l'essai en rotation maïs - blé (Tableau 1), des teneurs en carbone (C) de l'horizon 0-25 cm des fumiers de bovins et porcins significativement supérieures à celles de la modalité en fumure minérale seule (M4). En revanche, les teneurs en N ne montrent pas d'écart significatifs compte tenu d'une plus grande variabilité des mesures, mais les écarts exprimés en valeur relative par rapport à M4 sont du même ordre de grandeur que pour le C.

- Sur l'essai en prairie fauchée de RGA (Tableau 2), les analyses réalisées sur 2 horizons (0-10 et 10-25 cm) mettent en évidence un supplément de teneur en C et N organique par rapport à M4, plus important dans l'horizon 0-10 cm que 10-25 cm. Les écarts de teneur en C et N sur l'horizon 0-10 cm sont significatifs pour l'ensemble des effluents, alors que sur 10-25 cm, seule la teneur en C se différencie de manière significative entre le fumier de bovins composté et la modalité M4.

Cet accroissement des teneurs traduit donc un stockage de C et N variable selon les modalités organiques, significativement corrélé aux apports cumulés de C et N par les produits organiques (Figures 1 et 2 ; BOUTHIER *et al.*, 2007 ; MORVAN *et al.*, 2007). L'augmentation plus importante des teneurs observées sur l'essai en prairie que sur celui en rotation peut donc s'expliquer en partie par les apports plus importants d'engrais de ferme effectués sur l'essai en prairie. Dans les deux systèmes de culture, le rapport C/N de la matière organique n'est pas significativement modifié par les apports organiques.

Tableau 1 : Teneurs moyennes en C et N analysées en fin d'essai (2006) et écart de teneur par rapport à la modalité en fumure minérale seule (M4) pour l'essai en rotation blé - maïs de La Jaillière.

	% C (0-25 cm)	Ecart (% de M4)	% N (0-25 cm) (NS*)	Ecart (% de M4)	Rapport C/N
M4	1,29 (b)		0,14		9,28
FB	1,51(a)	17%	0,16	17%	9,26
FP	1,47 (a)	14%	0,15	9%	9,72
FV	1,37 (ab)	6%	0,15	4%	9,44
CB	1,42 (ab)	10%	0,16	12%	9,12
CP	1,44 (ab)	12%	0,15	8%	9,59
CV	1,29 (b)	0	0,14	1%	9,17

* NS : non significatif

Les lettres entre parenthèses correspondent aux groupes statistiques du test de Newman et Keuls.

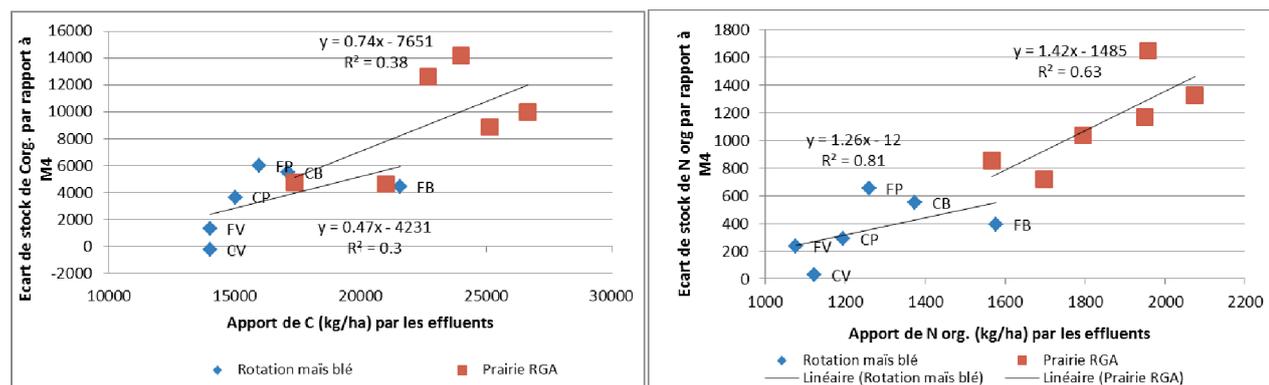
Tableau 2 : Teneurs moyennes en C et N analysées en fin d'essai (2006) et écart de teneur par rapport à la modalité en fumure minérale seule (M4) pour l'essai en ray-grass anglais fauché de La Jaillière.

	% C (0-10 cm)	Ecart (% de M4)	% N (0-10 cm)	Ecart (% de M4)	Rapport C/N	% C (10-25 cm)	Ecart (% de M4)	% N (10-25 cm)	Ecart (NS) (% de M4)	Rapport C/N
M4	1,89 (d)		0,18 (b)		10,48	1,27 (b)		0,13		9,3
FB	2,46 (ab)	31%	0,24 (a)	34%	10,22	1,32 (ab)	4%	0,14	8%	10,1
FP	2,31 (bc)	23%	0,23 (a)	29%	9,93	1,38 (ab)	9%	0,13	4%	10,3
FV	2,04 (cd)	8%	0,22 (a)	24%	9,11	1,32 (ab)	4%	0,13	-2%	10,0
CB	2,72 (a)	44%	0,26 (a)	46%	10,33	1,42 (a)	12%	0,14	8%	9,9
CP	2,58 (ab)	37%	0,26 (a)	44%	9,97	1,26 (b)	0%	0,13	-2%	9,6
CV	2,10 (cd)	11%	0,22 (a)	42%	9,53	1,32 (ab)	4%	0,14	5%	9,7

Les lettres entre parenthèses correspondent aux groupes statistiques du test de Newman et Keuls.

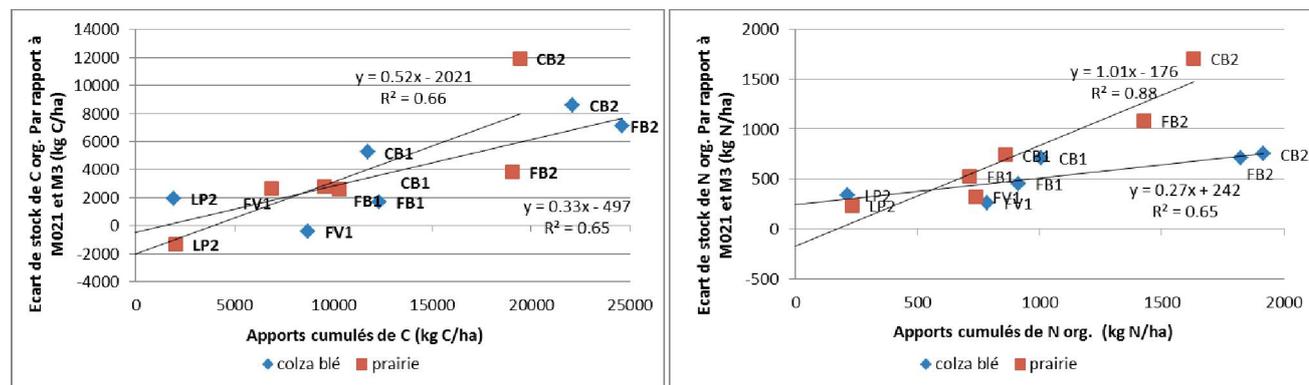
FB : fumier brut de bovins ; CB : fumier composté de bovins ; FP fumier brut de porcs ; CP fumier composté de porcs ; FV : fumier brut de volailles ; CV : fumier composté de volailles. M4 : fumure minérale seule.

Figure 1 : Relation entre les apports cumulés de C (a) et Norg (b) par les engrais de ferme et les écarts de stock de C et N mesurées en 2006 dans les essais « maïs-blé » et « RGA » du dispositif de La Jaillière.



Les résultats observés sur le site de La Jaillière sont confirmés par ceux obtenus sur le site de Jeu-les-Bois (Figure 2), quant à la relation entre les doses de C et N organique apportées par les engrais de ferme et l'accroissement de stock de C et N organique dans la couche arable. Toutefois, le stockage de C avec le fumier de bovins composté et de N avec le fumier de bovins brut et composté sont, pour des doses d'apport comparables, plus importants avec la prairie qu'avec la rotation colza blé.

Figure 2 : Relation entre les apports cumulés de C (a) et Norg (b) par les engrais de ferme et les écarts de stock de C et N mesurées en 2008 dans l'essai en rotation colza - blé et l'essai en prairie fauchée du dispositif de Jeu-les-Bois.



Les analyses de fractionnement granulométrique du C et du N organique permettent de quantifier les fractions plus ou moins stables de carbone et d'azote organique (BALESDENT *et al.*, 1997) : la fraction fine (0-50 μ) est identifiée comme la plus stable (temps de demi-vie dans le sol de 35 ans) et représente la part la plus importante du C et N organique (plus de 60 %) alors que les 2 fractions 50-200 μ (temps de demi-vie de 15 ans) et 200-2 000 μ (temps de demi-vie de 5,5 ans) sont moins stables et représentent respectivement moins de 20 % et de 10 %. Ces proportions peuvent varier selon le contexte pédoclimatique et l'histoire culturale. Ce type d'analyse se révèle donc utile pour connaître le devenir dans le sol du carbone et de l'azote apportés par les engrais de ferme d'élevage.

Sur les deux sites, les apports annuels de fumiers de bovins et porcins bruts et compostés modifient significativement la répartition du C et N organiques dans les fractions granulométriques, entraînant une augmentation relative de la fraction 50-200 μ par rapport aux 2 autres fractions. Mais, compte tenu de la part plus importante de la fraction fine, le stockage de C et de N organiques se fait majoritairement dans cette fraction comme l'illustrent les résultats de l'essai de Jeu-les-Bois (Figures 3 et 4). Les apports de fumiers de volailles et de lisiers de porcs ne modifient pas significativement la composition granulométrique du C et du N organique, mais l'absence d'effet significatif pour ces deux types de produits peut s'expliquer par des doses de C et de N apportées plus faibles.

Figure 3 : Relation entre la teneur en C et N organique dans les 3 fractions granulométriques et la teneur en C et N organique total, sur l'essai en rotation de Jeu-les-Bois.

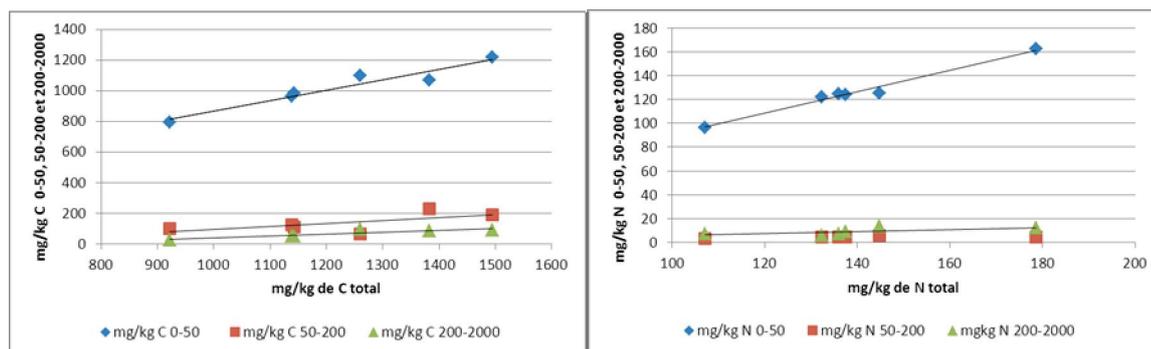
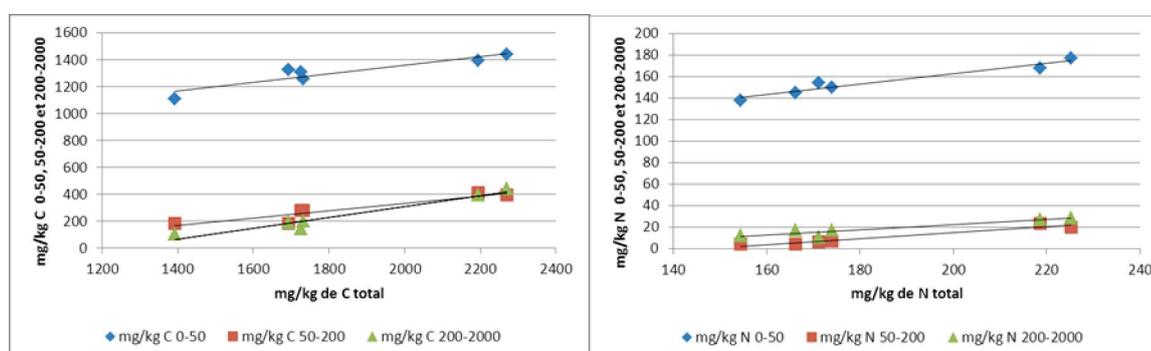


Figure 4 : Relation entre la teneur en C et N organique dans les 3 fractions granulométriques et la teneur en C et N organique total, sur l'essai en prairie de Jeu-les-Bois.



De manière générale, les apports d'engrais de ferme ne modifient pas de manière significative le rapport C/N des fractions granulométriques fine et moyenne, alors que le C/N de la fraction grossière est le plus souvent modifié mais de façon variable selon les sites (diminué à La Jaillièrre et augmenté à Jeu-les-Bois).

La répartition majoritaire des apports de C et N par les engrais de ferme dans des fractions fines et moyennes de la MO du sol, dont le temps de renouvellement est plus long, suggère que le stockage est durable. Toutefois, le contexte prairial se distingue du contexte des cultures annuelles par une augmentation relative de la taille des fractions 200-2000 μ plus importante.

3. Un supplément de fourniture d'azote par minéralisation en lien avec les historiques d'apports d'engrais de ferme

Les essais ont fait l'objet d'une quantification de la minéralisation par incubation au laboratoire et au champ selon deux méthodes : par suivi mensuel du stock d'azote minéral du sol sous sol nu et par bilan azoté sous culture non fertilisée.

Les flux de minéralisation au laboratoire ont été réalisées sur de la terre tamisée à 2 mm maintenue à une humidité légèrement inférieure à l'humidité à la capacité au champ (20 % de teneur en eau pondérale) et à une température de 15°C pendant 252 jours durant lesquels les quantités de C et N minéralisées ont été mesurées à 11 dates.

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.

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 (Jn) et permettant *in fine* de calculer la vitesse potentielle de minéralisation (Vp), égale au rapport entre le

flux de minéralisation mesuré et le nombre de jours normalisés. Le supplément de vitesse de minéralisation attribué aux apports répétés d'engrais de ferme a été calculé par différence entre les vitesses potentielles journalières (V_p) des traitements avec apports d'engrais de ferme et le traitement avec fertilisation minérale seule.

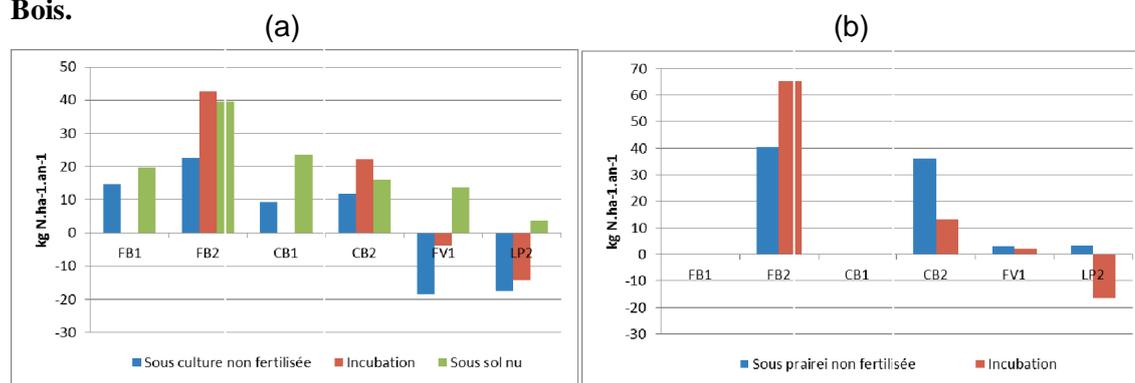
Sur le dispositif de Jeu-les-Bois, le flux de minéralisation a été mesuré en 2009 au laboratoire et sous culture non fertilisée pour les deux essais (prairie et rotation) et sous sol nu pour l'essai en rotation. L'effet des traitements organiques sur la minéralisation du N par incubation est peu différent entre l'historique prairie et l'historique rotation : les apports répétés de fumier brut de bovins à une dose calée sur un apport de 200 kg N/ha (FB2) est le seul traitement significativement ($P < 0,95$) supérieur à la fumure minérale avec un supplément de minéralisation d'environ 30 %. Le fumier de bovins composté (CB2) montre un effet intermédiaire mais non significativement différent de la fumure minérale et les autres modalités avec apports organiques ne se différencient pas de la fumure minérale.

Bien que les mesures au champ soient moins précises que celles réalisées au laboratoire, les suppléments de minéralisation mis en évidence avec le suivi sous sol nu et sous cultures non fertilisées, montrent des effets comparables avec les deux méthodes : le traitement FB2 présente le supplément le plus élevé dans l'essai rotation comme dans l'essai prairie et quelle que soit la méthode utilisée. Ce supplément de minéralisation d'azote, ramené à l'échelle de l'année, représente environ 40 kg N/ha. Le traitement CB2, malgré un apport de C et de N organique comparable au FB2, conduit à un supplément de minéralisation plus faible dans l'approche incubation comme dans l'approche au champ sous sol nu et sous blé non fertilisé. La précision des méthodes mises en œuvre ne permet pas de mettre en évidence d'effets des autres traitements organiques, qui correspondent à des doses de C et N organiques plus faibles que les traitements FB2 et CB2.

Le stockage d'azote organique consécutif aux apports répétés de fumier brut de bovins, plus important sous prairie, ne conduit donc pas à un supplément de minéralisation différent de la rotation de cultures annuelles. Par ailleurs, les apports répétés de fumier de bovins composté, malgré un stockage d'azote équivalent ou supérieur (sous prairie) au fumier brut, conduisent à une minéralisation d'azote plus faible.

Enfin sur ce site, la précision des résultats ne permet pas de mettre en évidence un écart significatif de taux de minéralisation de l'azote organique (minéralisation annuelle de l'azote exprimée en % du N total) entre la fertilisation organique à base de fumier de bovins et la fertilisation minérale. Le supplément de minéralisation serait surtout lié à un supplément de stockage d'azote organique.

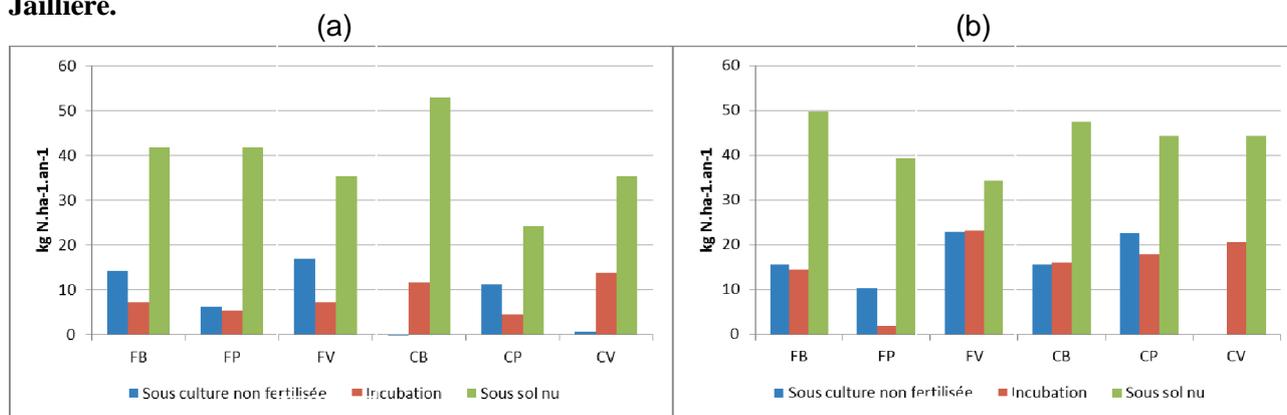
Figure 5 : Ecart de minéralisation nette annuelle par rapport à la modalité en fertilisation minérale seule, mesurée selon 3 méthodes dans l'essai rotation (a) et dans l'essai prairie (b) sur le dispositif de Jeu-les-Bois.



Sur le dispositif de La Jaillière, le flux de minéralisation a été mesuré pour les deux essais (prairie et rotation) au laboratoire et sous culture non fertilisée en 2006 et sous sol nu en 2007. Dans les deux essais, seul le suivi réalisé sous sol nu montre un écart entre les différentes modalités avec apports d'engrais de ferme et celle en fertilisation minérale seule (Figure 6). Les deux autres méthodes ne mettent pas en évidence d'écarts entre les différentes modalités. La meilleure aptitude du suivi sous sol nu à discriminer les effets des apports répétés d'engrais de ferme a été confirmée sur d'autres essais.

Contrairement à l'essai de Jeu-les-Bois, les résultats de La Jaillière suggèrent que les apports répétés d'engrais de ferme ont modifié le taux de minéralisation de l'azote organique (minéralisation annuelle de l'azote exprimée en % du N total) (MORVAN *et al.*, 2013). L'effet des différents types de fumiers et composts apportés sur la vitesse de minéralisation peut être aussi attribué à une modification de « l'activité minéralisatrice » des matières organiques du sol stockées suite aux apports organiques (TROCHARD *et al.*, 2009).

Figure 6 : Ecart de minéralisation nette annuelle par rapport à la modalité en fertilisation minérale seule, mesurée selon 3 méthodes dans l'essai rotation (a) et dans l'essai prairie (b) sur le dispositif de La Jaillière.



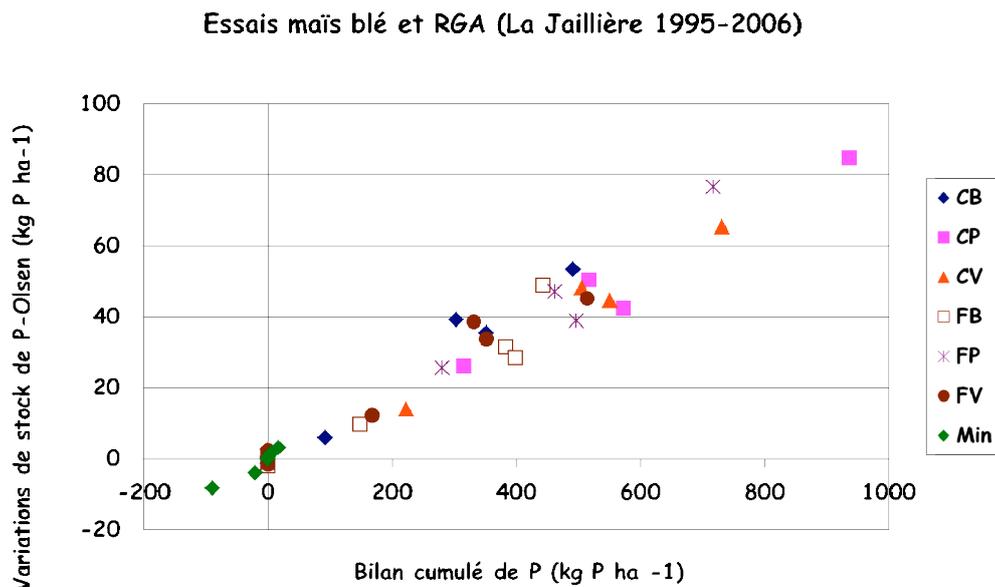
4. Une biodisponibilité du phosphore, potassium et magnésium peu différente entre les engrais de ferme

La biodisponibilité du phosphore, potassium et magnésium a été évaluée en comparant le bilan cultural (apports par la fertilisation minérale et organique diminués des exportations) aux teneurs en P_2O_5 Olsen, et K_2O et MgO échangeables mesurés en fin d'expérimentation. Sur l'essai de La Jaillière, la biodisponibilité du phosphore a également été quantifiée *via* la technique de dilution isotopique du phosphore ^{32}P , à partir du stock de phosphore dissous et de phosphore diffusible sur une durée de 1 an. Sur le dispositif de La Jaillière, les exportations ont été calculées à partir de teneurs mesurées dans les parties exportées alors qu'elles ont été calculées à partir des teneurs standard diffusées par le COMIFER (2009) sur le dispositif de Jeu-les-Bois.

Sur les deux dispositifs, les bilans culturaux du phosphore, du potassium et du magnésium sont le plus souvent excédentaires pour les modalités avec apports d'engrais de ferme, dans la mesure où les apports consécutifs à des doses d'engrais de ferme ajustées sur un apport d'azote total de 100 à 200 kg N/ha dépassaient largement les exportations des cultures. Les bilans culturaux sur les modalités avec fertilisation minérale seule sont le plus souvent très légèrement excédentaires ou équilibrés sur le dispositif de Jeu-les-Bois, car les doses y ont été ajustées pour compenser les exportations. Ils sont équilibrés ou déficitaires sur le dispositif de La Jaillière car des impasses de fertilisation ont été réalisées compte tenu d'une biodisponibilité correcte dans le sol de certains éléments. Les bilans culturaux très différents entre fertilisation minérale seule et fertilisation organique ne permettent donc pas en toute rigueur de comparer l'efficacité du phosphore, potassium et magnésium des engrais de ferme d'élevage et des engrais minéraux. Toutefois pour ces 3 éléments, les relations entre bilans culturaux et teneurs du sol s'ajustent linéairement et ne montrent pas de comportement particulier en lien avec l'origine (bovins, porcins, avicoles) et le mode de traitement (compostage ou non) des engrais de ferme (Figure 7).

De ces deux expérimentations, on peut conclure globalement qu'il est raisonnable, dans un contexte d'apports répétés sur une même parcelle, de prendre en compte dans le calcul de la fertilisation phosphatée, la quantité totale de P apportée sans établir de distinction en fonction de l'origine des déjections, ni du type de traitement (compostage).

Figure 7 : Variation du stock de P extractible (Olsen) en fonction du bilan cultural des deux essais du dispositif de La Jaillière.



5. Les engrais de ferme ne sont pas acidifiants

Les apports d'engrais de ferme ont différencié l'évolution du pH eau par rapport à la fertilisation minérale sur les deux dispositifs.

Les deux essais de La Jaillière n'ont reçu aucun apport d'amendement basique entre 1995 et 2006 et le pH eau qui était en 1995 respectivement de 6,6 et 6,7 sur l'horizon 0-25 cm des essais maïs - blé et RGA a peu évolué dans le traitement minéral de l'essai en rotation alors qu'il marque une baisse significative par rapport à 1995 (- 0,8) dans l'horizon 0-10 cm de la prairie. Les analyses en 2006 montrent un pH significativement plus élevé dans les modalités avec engrais de ferme comparativement à la fumure minérale, mais cet effet reste de faible ampleur (+ 0,3). Sur l'essai prairie, l'écart de pH avec la fumure minérale de l'horizon 0-10 cm va de 0,7 avec les fumiers bruts et compostés de volailles à plus de 1 unité avec les fumiers bruts et compostés de bovins et de porcs. Mais aucun effet significatif n'est observé dans les horizons sous-jacents.

Il faut se garder d'imputer ces effets pH aux seuls apports de fumiers ou composts. Les traitements organiques qui n'étaient pas complétés par une fertilisation azotée minérale ont vu leur rendement fortement limité par une alimentation azotée insuffisante, ce qui n'est pas le cas de la modalité en fertilisation minérale qui a reçu chaque année une dose d'azote minérale proche de l'optimum. En conséquence, le rendement des cultures sur les modalités avec engrais de ferme a été nettement plus faible que sur la modalité en fumure minérale. Les exportations d'« alcalinité » par les grains et les pailles ont donc été plus importantes sur cette modalité et peuvent contribuer à expliquer, au moins en partie, l'écart de pH avec les engrais de ferme.

Suite à deux apports d'amendements calcaires réalisés sur les deux essais du dispositif de Jueles-Bois (en 1998 avant la mise en place de l'expérimentation puis en 2002), le pH eau de la couche 0-25 cm, autour de 6 en 1998, est proche de 7 en 2008. Seul l'essai en rotation colza - blé met en évidence des effets significatifs entre modalités avec une augmentation de pH eau de l'ordre de + 0,3 unité dans les modalités avec apports de fumiers bruts et compostés de bovins par rapport à la modalité en fumure minérale seule.

6. Un effet des apports répétés d'engrais de ferme sur la macroporosité de la couche labourée

Les deux dispositifs ont fait l'objet de mesures visant à quantifier l'effet des statuts organiques induits par les apports répétés d'engrais de ferme sur 4 propriétés physiques de la couche labourée :

- mesures de stabilité structurale de mottes prélevées en sortie d'hiver dans l'horizon 0-10 cm

selon la norme NF X31-515 qui met en œuvre 3 types de tests : humectation rapide des agrégats à l'eau, humectation lente à l'eau, désagrégation mécanique à l'éthanol ;

- mesures d'humidité pondérale à 3 niveaux de potentiel hydrique (0,1, 0,33 et 16 bars correspondant à des pF (log10 du potentiel exprimé en cm d'eau) de 2, 2,5 et 4,2, sur des mottes prélevées dans l'horizon 10-20 cm. La différence d'humidité entre le pF 2 proche de la capacité au champ et le pF 4,2 proche du point de flétrissement des plantes est censée refléter la gamme de teneur en eau utile du sol. Une mesure de la densité apparente a été réalisée au moment du prélèvement pour exprimer la réserve utile en mm d'eau par cm d'épaisseur de sol ;

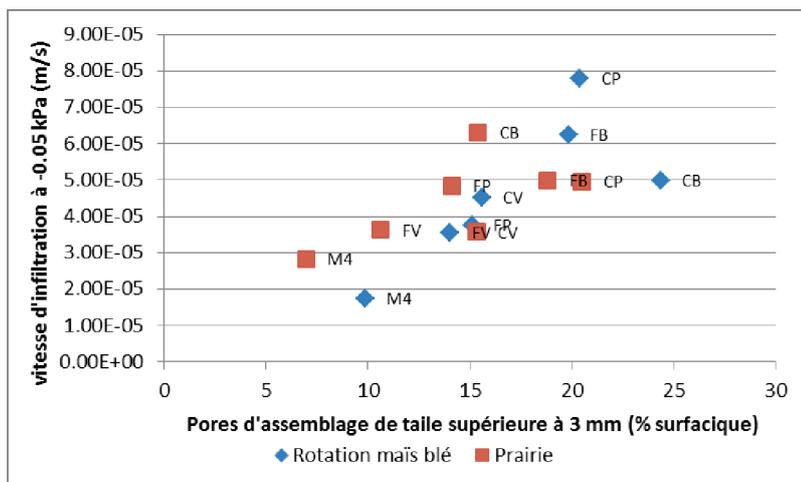
- mesures de vitesse d'infiltration au laboratoire à l'aide d'un infiltromètre Decagon sur des mottes prélevées au champ en sortie d'hiver dans la couche 10-20 cm. La conductivité hydraulique a été mesurée à 3 niveaux de potentiel hydrique situés entre l'état saturé d'eau et l'état ressuyé (-0,6, -0,2 et -0,05 kPa). Puis une quantification de la porosité a été réalisée par analyse d'image sur des échantillons de sol imprégnés par une résine contenant un pigment fluorescent, puis découpés horizontalement, de façon à obtenir une lame épaisse de 1 cm, polie sur sa face supérieure. L'analyse d'image a permis de quantifier la taille des pores différenciés selon 3 types : pores d'assemblage, pores fissuraux et pores tubulaires ;

- mesures des humidités pondérales à la limite de plasticité sur le site de La Jaillière uniquement, sur des mottes prélevées en sortie d'hiver dans l'horizon 0-25 cm de l'essai rotation et 0-10 et 10-25 cm de l'essai prairie.

Les modifications de statut organique suite aux apports d'engrais de ferme pendant 9 ans ne semblent pas suffisants pour modifier la stabilité structurale de la couche labourée, puisqu'aucun écart significatif n'a été mis en évidence entre les modalités sur les deux sites, excepté sur l'horizon 0-10 cm de l'essai prairie de La Jaillière où les teneurs en MO, plus fortement différenciées (Tableau 2), ont influé sur les résultats des tests d'humectation rapide et lente des agrégats à l'eau. Il en est de même pour l'humidité pondérale à la limite de plasticité. En revanche, aucun effet sur la capacité de stockage d'eau, appréciée par la mesure de l'humidité pondérale aux bornes de la réserve utile du sol, n'est mis en évidence.

Cependant, sur les deux sites, le pourcentage de macroporosité, principalement des pores d'assemblage, est nettement plus élevé avec l'apport répété d'engrais de ferme comparé à la fertilisation minérale. Les pores d'assemblage qui résultent pour partie de l'activité biologique (vers de terre...) favorisent les transferts dans les domaines de teneur en eau proches de la saturation comme le montre la Figure 8.

Figure 8 : Evolution de la conductivité hydraulique à -0,05 kPa en fonction du % surfacique des pores d'assemblage de rayon équivalent supérieur à 3 mm.



Ainsi, l'augmentation de la macroporosité, qui se répercute sur la perméabilité de l'horizon de surface, contribue à l'amélioration de l'écoulement des eaux surtout lors des années d'excès pluviométrique hivernal.

Conclusions

Après 10 ans d'apports annuels d'engrais de ferme sur deux dispositifs dont l'originalité était de comparer l'effet de ces apports sur une prairie fauchée et une rotation de cultures annuelles, les analyses réalisées mettent en évidence que l'augmentation du stock de carbone (C) et d'azote (N) organique de la couche labourée, par rapport à une fertilisation minérale seule, s'ajuste bien avec les apports de C et de N organique par les engrais de ferme d'élevage. Toutefois le supplément de stockage par tonne de C et N apporté diffère selon le site (plus élevé sur La Jaillière). L'effet système de culture n'est mis en évidence que sur les apports de C et N organiques les plus élevées sur le site de Jeu-les-Bois, avec un stockage plus important sous prairie. Dans ces deux expérimentations où la production de biomasse (donc de restitutions en C et N par les résidus de culture) a été plus faible dans les modalités avec apports organiques que celles avec fertilisation minérale seule, l'effet de stockage des engrais de ferme d'élevage est probablement sous-estimé.

La composition granulométrique du C et du N stockés montre qu'une part majoritaire du C et du N stockés se retrouve dans la fraction la plus fine (0-50 μ) à durée de vie plus longue, ce qui implique un effet à long terme de ce stockage. Toutefois, le contexte prairial se distingue des cultures annuelles par un stockage plus important dans les fractions plus grossières.

Ce supplément de stockage par rapport à une fertilisation minérale se traduit par un supplément de minéralisation d'azote qui atteint 40 à 60 kg N/ha par an pour les doses d'apport de N organique les plus élevées. La précision des résultats ne permet pas de différencier la prairie de la rotation de cultures annuelles.

Les apports d'engrais de ferme, dont les doses dépassaient le plus souvent les exportations de phosphore, potassium et magnésium des cultures, ont enrichi le sol en ces trois éléments alors que les modalités en fertilisation minérale étaient inférieures ou égales aux exportations des cultures. En l'absence d'apports équivalents avec des engrais minéraux, il est difficile de comparer leur efficacité à celle des engrais minéraux. En revanche, à bilan cultural identique, les différents types d'engrais de ferme ne semblent pas se distinguer quant à la biodisponibilité de ces trois éléments dans le sol.

Parmi les quatre propriétés physiques de la couche arable évaluées sur les deux dispositifs (stabilité structurale, capacité de stockage d'eau, humidité à la limite de plasticité, infiltrabilité), les modifications du statut organique du sol avec les apports d'engrais de ferme ont surtout eu un effet sur l'infiltrabilité de la couche labourée en lien avec une macroporosité d'origine biologique plus importante.

Références bibliographiques

- 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.
- 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.
- 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
- MORVAN T., TROCHARD R., BOUTHIER A., GRALL J. 2013 - Medium and long-term effects of animal waste application on soil N storage and mineralization. Colloque RAMIRAN
- 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