

Incidence d'apports répétés d'engrais de ferme sur la fertilité physique, chimique et microbiologique des sols sous rotation de cultures annuelles et sous prairie temporaire

A. Bouthier¹, R. Trochard²

Les éleveurs valorisent mieux leurs effluents d'élevage et les utilisent pour fertiliser prairies et cultures en rotation. Mais quels sont les effets à long terme de ces apports répétés sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols ?

RÉSUMÉ

Deux dispositifs expérimentaux ont comparé l'effet de divers engrais de ferme (fumiers bruts et compostés de bovins, porcs et volailles, lisiers de porcs) sur 2 systèmes de culture (avec cultures annuelles ou prairie). Par rapport à une fertilisation minérale seule, les apports réguliers de fumiers bruts ou compostés ont augmenté de manière significative le stock de C et N et modifié la composition (par fraction granulométrique) de la matière organique de la couche labourée. Il peut en résulter un supplément de minéralisation de l'azote organique du sol et des modifications de certaines propriétés de l'horizon labouré (augmentation de la conductivité hydraulique, en lien avec une macroporosité plus importante, et des teneurs en P, K et Mg). On ne note pas de différence significative entre les différents engrais de ferme.

SUMMARY

Effects of repeated applications of farm fertilisers on fertility-related physical, chemical, and microbiological properties of soils in ley-arable rotations and temporary pastures

What are the long-term effects of using livestock effluent as fertiliser on the physical, chemical, and microbiological properties of soils? Using data from 2 experimental sites, we compared the impacts of different farm fertilisers (raw and composted manure from cattle, swine, and poultry as well as liquid swine manure) on 2 types of crop systems (a ley-arable rotation and a grassland). In contrast to when only mineral fertilisers were used, the regular application of raw or composted manure significantly increased levels of C and N in the soil and changed the composition of the organic matter (according to the granulometric fractions) found in the plough layer. These changes could enhance the mineralisation of organic nitrogen in the soil and modify certain properties of the plough layer (e.g., increased hydraulic conductivity, which is associated with greater macroporosity, and increased levels of P, K, and Mg). We observed no significant differences due to farm manure type.

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. 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 (Loire-Atlantique) et Jeu-les-Bois (Indre), dispositifs qui ont été mis en place respectivement en 1996 et 1999. Pour les deux dispositifs, 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 un essai avec une rotation de cultures annuelles et d'autre part dans un essai maintenu en prairie pendant toute la durée de l'essai.

AUTEURS

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

MOTS CLÉS : Azote, carbone, compost, expérimentation longue durée, fertilisation organique, fertilité du sol, fumier, lisier, magnésium, matière organique, phosphore, prairie, rotation culturale, sol, système de culture.

KEY-WORDS : Carbon, compost, crop succession, crop system, grassland, long-duration experiments, magnesium, manure, nitrogen, organic fertilisation, organic matter, phosphorus, soil, soil fertility, slurry.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Bouthier A., Trochard R. (2015) : "Incidence d'apports répétés d'engrais de ferme sur la fertilité physique, chimique et microbiologique des sols sous rotation de cultures annuelles et sous prairie temporaire", *Fourrages*, 223, 211-219.

	Rotation maïs - blé	Prairie
	Apport organique brut moyen annuel (t/ha)	
La Jaillière (objectif : 100 kg N/ha sur maïs et 200 kg N/ha sur blé et prairie)		
- FB : Fumier brut de bovins	18	22
- FP : Fumier brut de porcs	14	19
- FV : Fumier brut de volailles	6	8
- CB : Fumier composté de bovins	18	22
- CP : Fumier composté de porcs	14	19
- CV : Fumier composté de volailles	6	8
Jeu-les-Bois		
- FB1 : Fumier brut de bovins (100 kg N/ha)	13,3	12,4
- FB2 : Fumier brut de bovins (200 kg N/ha)	27,2	24,9
- CB1 : Fumier composté de bovins (100 kg N/ha)	14,4	14,1
- CB2 : Fumier composté de bovins (200 kg N/ha)	27,7	27,0
- FV : Fumier de volailles (100 kg N/ha)	3,2	2,9
- LP : Lisier de porcs (100 kg N/ha)	21,1 m ³ /ha	19,2 m ³ /ha

TABLEAU 1 : **Traitements organiques appliqués dans les 2 essais de La Jaillière et Jeu-les-Bois comparant une rotation et une prairie.**

TABLE 1 : *Organic fertilizers applied at 2 experimental sites (La Jaillière and Jeu-les-Bois), where a ley-arable rotation and a grassland system were compared.*

■ Présentation des 2 dispositifs

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** (RGA) fauché. **Six types d'engrais de ferme ont été comparés** : fumiers bruts ou compostés de bovins, de porcs et de volailles (tableau 1). 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 étaient donc inférieurs à ceux apportés sur la prairie. Les apports d'engrais de ferme ont été réalisés à l'automne pour le blé (avant son implantation) et la prairie, et au printemps pour le maïs (avant son implantation). Aucune fertilisation azotée minérale n'a été réalisée sur les moda-

lités recevant des engrais de ferme. 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**, implanté sur un sol sablo-limoneux humide drainé sur argile et grès 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**, remplacé par de la fétuque élevée à partir de 2003. **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 (tableau 1). Le fumier de volailles et le lisier de porcs étaient appliqués annuellement à une dose correspondant à 100 kg d'azote total par hectare. Les

Rotation blé - maïs (horizon du sol 0-25 cm)					Ray-grass anglais (horizon du sol 0-10 cm)					Ray-grass anglais (horizon du sol 10-25 cm)							
	% C*	Ecart (% MIN)	% N (ns*)	Ecart (% MIN)	Rapport C/N		% C*	Ecart (% MIN)	% N (ns*)	Ecart (% MIN)	Rapport C/N		% C*	Ecart (% MIN)	% N (ns*)	Ecart (% MIN)	Rapport C/N
MIN	1,29 (b)		0,14		9,28	MIN	1,89 (d)		0,18 (b)		10,48	MIN	1,27 (b)		0,13		9,3
FB	1,51(a)	17%	0,16	17%	9,26	FB	2,46 (ab)	31%	0,24 (a)	34%	10,22	FB	1,32 (ab)	4%	0,14	8%	10,1
FP	1,47 (a)	14%	0,15	9%	9,72	FP	2,31 (bc)	23%	0,23 (a)	29%	9,93	FP	1,38 (ab)	9%	0,13	4%	10,3
FV	1,37 (ab)	6%	0,15	4%	9,44	FV	2,04 (cd)	8%	0,22 (a)	24%	9,11	FV	1,32 (ab)	4%	0,13	-2%	10,0
CB	1,42 (ab)	10%	0,16	12%	9,12	CB	2,72 (a)	44%	0,26 (a)	46%	10,33	CB	1,42 (a)	12%	0,14	8%	9,9
CP	1,44 (ab)	12%	0,15	8%	9,59	CP	2,58 (ab)	37%	0,26 (a)	44%	9,97	CP	1,26 (b)	0%	0,13	-2%	9,6
CV	1,29 (b)	0	0,14	1%	9,17	CV	2,10 (cd)	11%	0,22 (a)	42%	9,53	CV	1,32 (ab)	4%	0,14	5%	9,7

* Les lettres entre parenthèses correspondent aux groupes statistiques du test de Newman et Keuls ; ns : non significatif

TABLEAU 2 : **Teneurs moyennes en C et N en fin d'essai (2006) et écarts par rapport à la modalité en fumure minérale seule (MIN) pour la rotation blé - maïs et la prairie de La Jaillière.**

TABLE 2 : *Mean C and N levels in the soil at the end of the experiment (in 2006) and how they compared with values obtained for mineral fertilisation (MIN) in the wheat-maize rotation and the grassland at La Jaillière site.*

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 du 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 n'ont pas reçu d'apports d'engrais azotés minéraux. En revanche, les apports de phosphore et de 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** (MIN) 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 « témoin sans apport d'azote » tournant chaque année (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). Les deux essais en rotation de cultures annuelles étaient labourés chaque année.

■ Suivi des dispositifs

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 à 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,

effets **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, du potassium et du magnésium** apportés par les engrais de ferme **et sur le pH du sol** ;

- évaluer les conséquences des **modifications du statut organique du sol** 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. Net effet des apports d'engrais de ferme sur le stock de C et N organique et la composition granulométrique du sol

Les analyses de teneur en C et N organiques réalisées sur l'essai de La Jaillière après l'arrêt des apports organique apportent certains résultats :

- Sur la rotation maïs - blé (tableau 2), les teneurs en carbone (C) de l'horizon 0-25 cm des fumiers bruts ou compostés de bovins et porcins (FB, FP, CB, CP) sont significativement supérieures à celles de la modalité en fumure minérale seule (MIN). En revanche, les teneurs en N ne montrent pas d'écarts significatifs compte tenu d'une plus grande variabilité des mesures, mais les écarts exprimés en valeur relative par rapport à MIN sont du même ordre de grandeur que pour le C.

- Sur la prairie de RGA fauchée (tableau 2), les analyses réalisées sur 2 horizons (0-10 et 10-25 cm) mettent

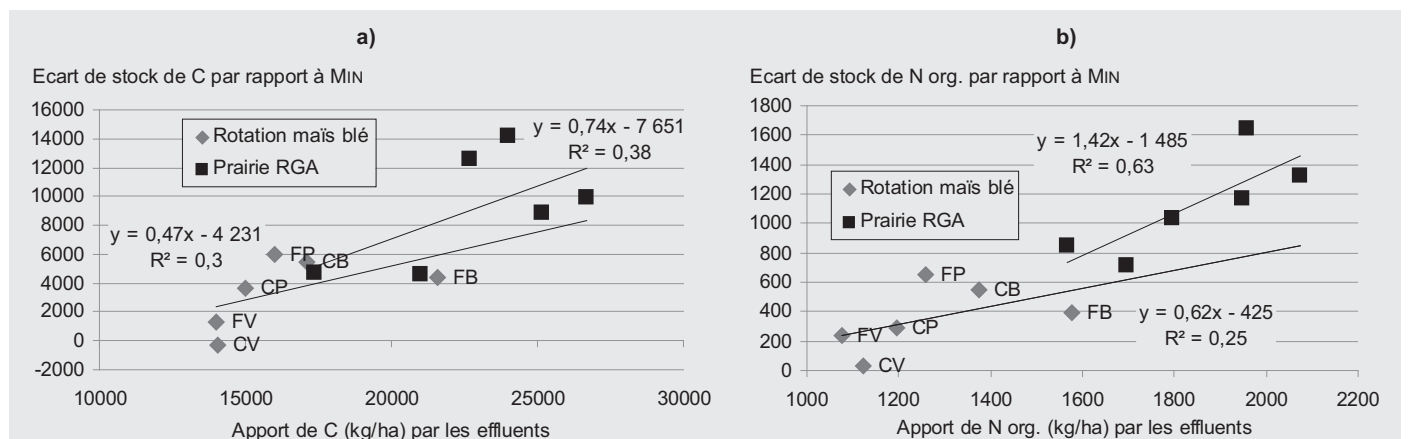


FIGURE 1 : Relation entre les apports cumulés des engrais de ferme et les écarts de stock a) pour C et b) pour N organique pour la rotation maïs - blé et la prairie de La Jaillière (année 2006).

FIGURE 1 : Relationship between farm-fertiliser inputs and relative nutrient accumulation in the arable layer for a) C and b) organic N in the wheat-maize rotation and the grassland at La Jaillière site (2006).

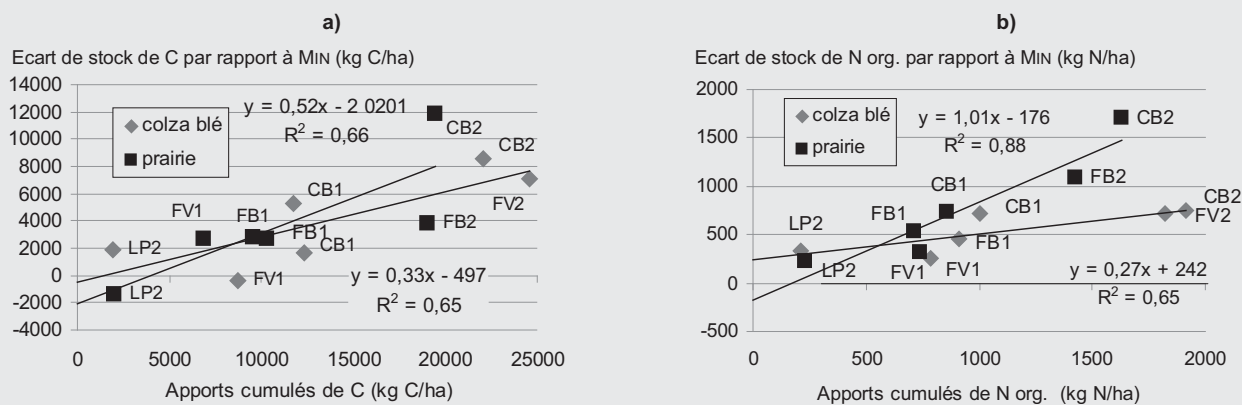


FIGURE 2 : Relation entre les apports cumulés des engrais de ferme et les écarts de stock a) pour C et b) pour N organique pour la rotation colza - blé et la prairie de Jeu-les-Bois (année 2008).

FIGURE 2 : Relationship between farm-fertiliser inputs and relative nutrient accumulation in the arable layer for a) C and b) organic N in the wheat-rape rotation and the grassland at Jeu-les-Bois site (2008).

en évidence un supplément de teneur en C et N organique par rapport à MIN, plus important dans l'horizon 0-10 cm que dans celui de 10-25 cm. Les écarts de teneur en C et N sur l'horizon 0-10 cm sont significatifs pour l'ensemble des engrais de ferme, 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 MIN.

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.

Les résultats observés sur le site de La Jaillièrre 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 est, pour des doses d'apport comparables, plus important avec la prairie qu'avec la rotation colza - blé.

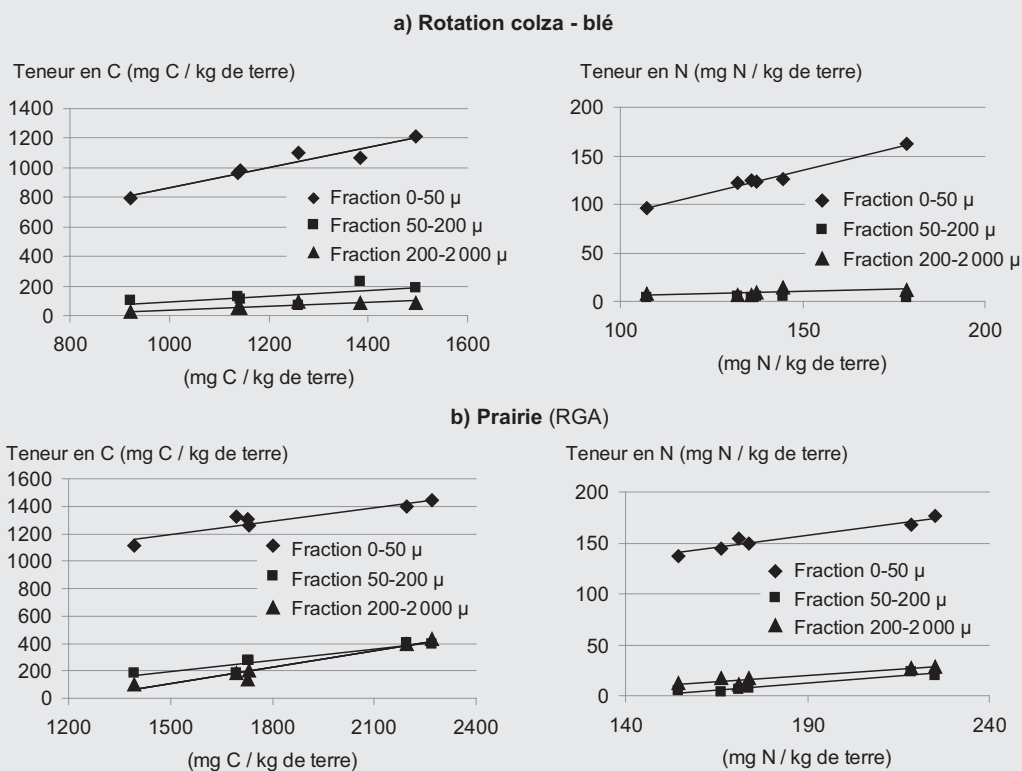


FIGURE 3 : Relation entre la teneur en C ou N organique dans les 3 fractions granulométriques du sol et la teneur en C ou N organique total, pour a) la rotation et b) la prairie de Jeu-les-Bois.

FIGURE 3 : Relationship between C and organic N levels in the three granulometric soil fractions and overall C and organic N levels in a) the rotation and b) the grassland at Jeu-les-Bois site.

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 RECOUS, 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 200-2000 µ (temps de demi-vie de 5,5 ans) sont moins stables et représentent respectivement moins de 20 % et 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 3a et 3b). 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.

De manière générale, les apports d'engrais de ferme ne modifient pas significativement le rapport C/N des fractions granulométriques fines et moyennes, alors que **le C/N de la fraction grossière est le plus souvent modifié** mais de façon variable selon les sites (diminué à La Jaillière 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 200-2 000 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 mesures de 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 deux 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 (Vp) 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 (figure 4). L'effet des traitements organiques sur la minéralisation du N par incubation est peu différent entre l'historique pour la prairie et l'historique pour la rotation : la modalité

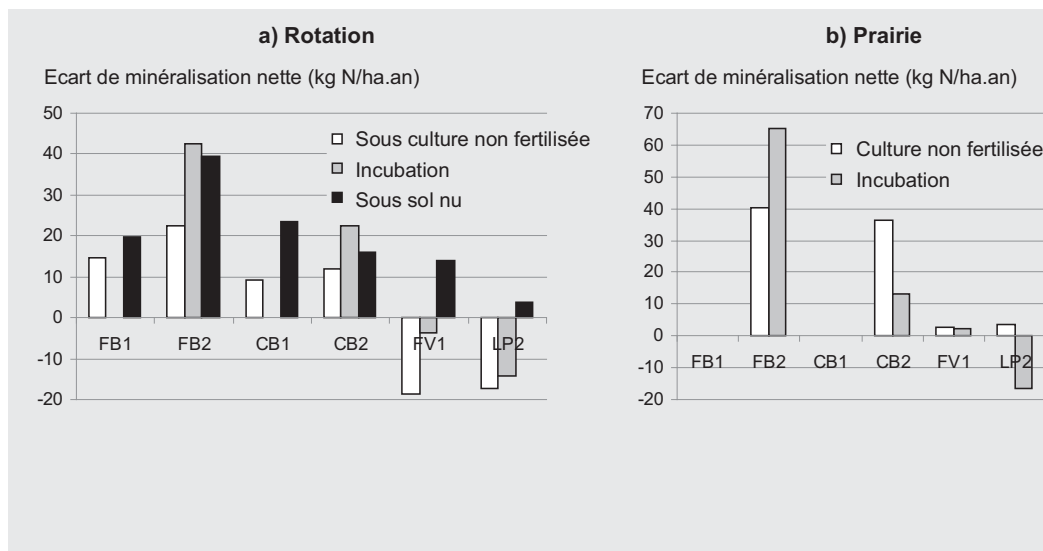


FIGURE 4 : Ecart de minéralisation nette annuelle par rapport à la modalité en fertilisation minérale seule, mesurée selon plusieurs méthodes pour a) la rotation et b) la prairie de Jeu-les-Bois.
FIGURE 4 : Comparison of the net annual mineralization dynamics associated with the different mineral fertilisation treatments, estimated using several techniques in a) the rotation and b) the grassland at Jeu-les-Bois site.

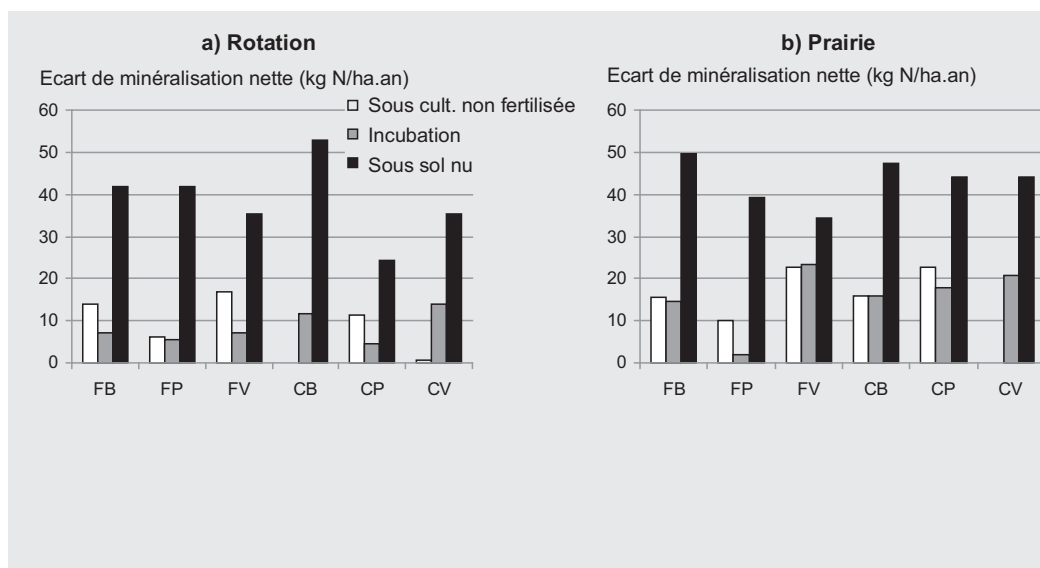


FIGURE 5 : Ecart de minéralisation nette annuelle par rapport à la modalité en fertilisation minérale seule, mesurée selon 3 méthodes pour a) la rotation et b) la prairie de La Jaillière.

FIGURE 5 : Comparison of the net annual mineralization dynamics associated with the different mineral fertilisation treatments, estimated using 3 techniques in a) the rotation and b) the grassland at La Jaillière site.

avec apports annuels de fumier brut de bovins à une dose calée sur un apport de 200 kg N/ha (FB2) est la seule significativement ($P < 0,95$) supérieure à celle en 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 ; 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 de minéralisation N le plus élevé** dans l'essai en rotation comme dans l'essai en 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 à 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 modalités organiques, qui correspondent à des doses de C et N organiques plus faibles.

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.

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 5). 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).

4. Une biodisponibilité du phosphore, potassium et magnésium comparable entre les différents 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, K_2O et MgO échangeables mesurés en fin d'expérimentation. Sur le dispositif 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. Les exportations ont été calculées à partir de teneurs mesurées dans les parties exportées alors que,

à Jeu-les-Bois, elles ont été calculées à partir des références de teneurs diffusées par le COMIFER (2009).

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 de ces 3 éléments, 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 6).

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).

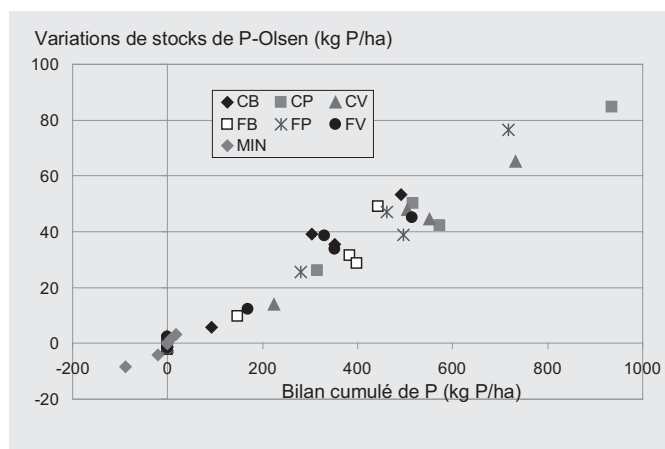


FIGURE 6 : Variation du stock de P extractible (Olsen) en fonction du bilan cultural des essais en rotation et en prairie de La Jaillière.

FIGURE 6 : Relationship between variation in extractable phosphorus levels (P Olsen) and P accumulated nutrient balance in the ley-arable rotation and the grassland at La Jaillière site.

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} était en 1995 respectivement de 6,6 et 6,7 sur l'horizon 0-25 cm des essais en rotation maïs - blé et en RGA. Le pH a peu évolué dans le traitement minéral sous la rotation alors qu'il marque une baisse significative par rapport à 1995 (-0,8) dans l'horizon 0-10 cm de la prairie. Dans l'essai en rotation, 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). Dans l'essai en 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.

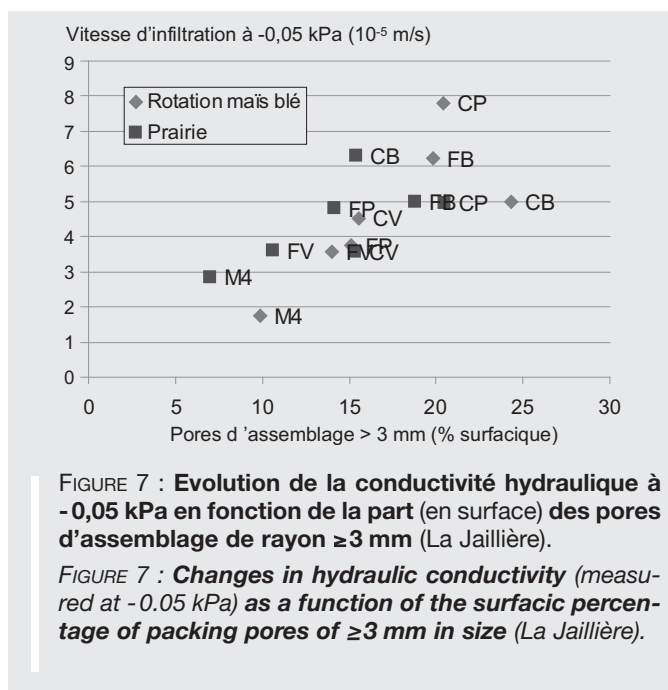
Il faut se garder d'imputer ces effets sur le pH aux seuls apports de fumiers ou composts. Les traitements organiques qui n'étaient pas complétés par une fertilisation azotée minérale ont vu leur rendement fortement limité par une alimentation azotée insuffisante, ce qui n'est pas le cas de la modalité en fertilisation minérale qui a reçu chaque année une dose d'azote minéral 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 Jeu-les-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 (10, 33 et 1600 kPa correspondant à des pF (log10 du potentiel en valeur absolue, 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 conductivité hydraulique 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, bas), 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 7.

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 important.

Conclusions

Après dix 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. Toutefois le supplément de stockage par tonne de C et N apporté diffère selon le site (plus élevé sur La Jaillière). L'effet du système de culture n'est mis en évidence que sur les apports de C et N organiques les plus élevés 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 apports des modalités en fertilisation minérale étaient inférieurs ou égaux 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, conductivité hydraulique), les modifications du statut organique du sol avec les apports d'engrais de ferme ont surtout eu un effet sur la conductivité hydraulique de la couche labourée, en lien avec une macroporosité d'origine biologique plus importante.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,
"La fertilité des sols dans les systèmes fourragers",
les 8 et 9 avril 2015

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", *Mineral versus organic fertilization conflict or synergism?*, Neve S., Salomez J., Van den Bossche A., Haneklaus S., Van Cleemput O., Hofman G., Schnung E. (eds), 16th Int. Symp. of the Int. Scientific Centre of Fertilizers (CIEC), 16-19 septembre 2007, Ghent (Belgique), 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.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère