

13^{es} Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, 2017, Nantes

Effets des produits résiduels organiques sur le statut acido-basique du sol

A. Bouthier¹, P. Cambier², B. Félix-Faure³, S. Houot²

¹ ARVALIS Institut du végétal, Saint Pierre d'Amilly F-17700 a.bouthier@arvalis.fr

² UMR INRA – AgroParisTech ECOSYS, 78850 Thiverval-Grignon

³ Laboratoire GALYS, 1 impasse de Lisieux, 31300 Toulouse

1. Introduction

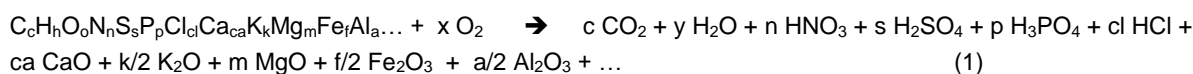
La gestion des produits résiduels organiques (PRO) recyclés en agriculture s'appuie principalement sur leur valeur fertilisante azotée, phosphatée et potassique ainsi que leur valeur amendante organique alors que leur effet sur le statut acido-basique du sol n'est pas pris en compte. Pourtant il apparaît dans les résultats de nombreuses expérimentations de longue durée, tant en France (Bouthier, 2012) qu'à l'étranger (Cai, 2015 ; Eghball, 2002 ; Parham, 2002 ; Wahlen, 2000 ; Zeng, 2017), que la plupart des PRO tendent à augmenter le pH des sols et pourraient se substituer pour partie aux apports d'amendements minéraux basiques. Mais les données collectées sur ces expérimentations ne permettent pas d'expliquer la variabilité importante de ces effets selon le type de produit et le contexte agropédoclimatique. Il est ainsi difficile d'évaluer leur valeur neutralisante et de prédire leur effet sur le pH, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu, plus grande que dans le cas d'apports d'amendement minéraux.

Néanmoins des tentatives d'estimation d'une valeur neutralisante (VN) des PRO ont été réalisées en se basant sur une approche de type bilan de protons réalisé à l'échelle du système sol-plante. Ainsi Julien et al (2007) ont estimé une VN pour des fumiers et lisiers de bovins, sous plusieurs hypothèses de valorisation de l'azote de ces produits, montrant qu'à l'exception du lisier de porcs dont l'azote serait mal valorisé, les deux types d'effluents ont un effet neutre ou alcalinisant. Mais faute d'avoir été confrontés à des situations réelles, la validité et la robustesse de ces modèles ne sont pas connues.

Cette communication s'inscrit dans la continuité de ces travaux et a pour objectif d'étudier la faisabilité d'une prédiction des effets à moyen/long terme d'un scénario d'apport de PRO sur le statut acido-basique (SAB) des sols amendés. Pour se faire, les concepts et équations visant à quantifier la VN des PRO, issus principalement des communications d'André Turpin (2015), ainsi que de la communication de Julien et al. 2007, ont été confrontés aux données expérimentales de 2 essais au champ de longue durée d'applications de PRO bien documentés.

2. Notions de chimie des sols pour expliquer les effets potentiels des PRO sur le statut acido-basique du sol

Les notions qui sont présentées font référence à un effet potentiel des PRO sur le sol en considérant dans un premier temps le système « PRO et sol » (sans plante). Les PRO sont conventionnellement représentés par une (macro)molécule de formule chimique issue des analyses en éléments totaux. C'est bien sûr une formule moyenne suivant des hypothèses les plus simplificatrices et ne reflétant pas leur caractère hétérogène. Les indices (coefficients stœchiométriques) des éléments dans la (macro)molécule correspondent aux proportions en moles, déduites des proportions en masse des bulletins d'analyse. En faisant l'hypothèse que tout est minéralisé en conditions aérobies, et donc oxydé, on écrit la réaction (1), en associant du côté des produits, les éléments qui forment des cations à O²⁻ et les éléments qui forment des anions à H⁺ :



y se déduit aisément des indices de la molécule, ainsi que x en dernier lieu.

Cette réaction (1) exprime l'hypothèse de minéralisation/solubilisation totale aérobie sous une forme très pratique pour établir les équivalences en CaO (exprimant la VN), grâce aux indices ca, k, n, s, etc. Les produits de la réaction sont transitoires et le choix d'oxydes et d'acides est une option parmi d'autres. En effet, HNO₃ ou CaO ne vont pas subsister dans le sol et une partie du Ca pourrait produire CaSO₄ par exemple, mais cela n'influencera pas le résultat final. Ce qui importe vis-à-vis du SAB est le devenir des produits oxydés du 2^e membre de l'équation (1).

Une 2^e hypothèse simplificatrice est que les produits restent dans le sol amendé, sauf CO₂ qui sort vers l'atmosphère. Alors i) l'acide fort HNO₃ se dissocie totalement au pH du sol et donne 1 proton, ii) H₂SO₄ et le triacide H₃PO₄ et ses anions ont un devenir plus complexe évalué ci-dessous, iii) les produits alcalins CaO, MgO, K₂O, Na₂O, que l'on suppose se dissoudre entièrement produisent 2 OH⁻, et neutralisent 2 protons. Il en découle qu'une mole de Ca dans les PRO, ou de Mg, ou 2 moles de K, ou 2 moles de Na, donnent en valeur neutralisante une mole de CaO, soit 0,0561 kg CaO.

Les majeurs Fe et Al sont écrits ici pour mémoire, tant que l'on reste dans des milieux non acides (pH>5,5), car les oxydes formés y sont insolubles et n'influencent pas sur le SAB.

H₂SO₄ et H₃PO₄ vont céder des proportions variables de H⁺ selon le pH du sol et les possibilités d'adsorption et de précipitation. André Turpin (citation cours, 2015) admet les valeurs suivantes de dissociation libérant les protons de ces acides :

	Sol de pH eau < 5.5	Sol de pH eau > 5.5
1 H ₂ SO ₄ donne	1.5 H ⁺	2 H ⁺
1 H ₃ PO ₄ donne	0.8 H ⁺	2.5 H ⁺

L'hypothèse 2 signifie aussi qu'il n'y a pas de volatilisation de NH₃, de H₂S...et pas de dénitrification et de désulfatation, phénomènes qui conduiraient à une diminution du nombre de H⁺ cédés. Ainsi en appliquant cette équation 1 à la composition d'un PRO, et sous ces deux hypothèses, on peut calculer l'effet potentiel d'un PRO sur le statut acido-basique du sol.

Le calcul peut ensuite être adapté en prenant en compte le fait qu'en général, une partie seulement de la matière organique du PRO est minéralisée et que le complément est stocké dans le sol. La proportion de MO susceptible d'être stockée est estimée par le paramètre ISMO (indice de stabilité des matières organiques) calculé à partir des résultats de la composition biochimique du PRO et la fraction de carbone minéralisée après 3 jours d'incubation (Lashermes et al., 2009). Par ailleurs, les PRO contiennent une fraction minérale variable, en particulier des carbonates, mais le fait de séparer dans l'équation (1) le calcium sous forme de CaCO₃ et celui contenu dans la macromolécule organique, ne change pas le résultat en terme de VN. Mais une fraction d'éléments majeurs qui serait localisée dans des minéraux insolubles aux échelles de temps agronomiques (feldspaths), devrait en principe être soustraite au calcul des VN.

Julien et al. (2007) ont considéré le système plus large « PRO-sol-plante » et proposé un modèle d'estimation de l'effet d'un PRO sur le SAB du sol qui repose encore sur l'équation (1) pour la transformation du PRO dans le sol. Ils font ensuite l'hypothèse que l'azote et le soufre bien valorisés par la culture ont un effet nul sur le SAB du système. Par contre si l'azote est mal valorisé et qu'une partie des nitrates et sulfates issus de la minéralisation est lixiviée, chaque mole de NO₃⁻ lixiviée produit 1 H⁺ et celle de SO₄²⁻, 1.5 ou 2 H⁺ selon le pH du sol. Le calcul de l'effet sur le SAB du sol prendrait donc en compte la fraction d'azote et de soufre du PRO lixiviée.

La plante peut aussi être prise en compte directement lorsqu'on connaît les exportations par les récoltes des principaux cations et anions. La neutralité électrique des échanges sol-plante implique un flux de protons de la plante vers le sol, qui peut ainsi s'exprimer, en mole/ha (Turpin, 2015) :

$$H^+ \approx (2 Ca + 2 Mg + K + Na)_{abs} - (Cl + 2 S + x P)_{abs} + (NH_4^+ - NO_3^-)_{abs} \quad (2)$$

où l'indice abs signifie absorbé (du sol vers la plante), -x désigne la charge négative de P, S étant supposé assimilé sous forme de sulfate. L'équation (2) peut être simplifiée, perdre une inconnue, si l'on suppose que l'azote assimilé sous forme NH₄⁺ est négligeable.

3. L'effet des PRO sur le pH mesuré dans les essais de longue durée.

La synthèse récente des résultats de l'ensemble des dispositifs expérimentaux français de longue durée des 30 dernières années, disposant de modalités avec épandages réguliers de différents types d'effluents d'élevages bruts ou compostés (Tableau 1), a permis d'apprécier les effets des apports organiques sur le pH eau de la couche de sol dans laquelle ils étaient incorporés. Les essais ont été le plus souvent conduits dans l'ouest de la France sur des sols neutres ou acides dans des contextes de polyculture-élevages avec des rotations à base de maïs fourrage et blé ou de prairies temporaires. Les produits organiques le plus souvent testés étaient des fumiers et des lisiers de bovins et des lisiers de porcs. Les protocoles principalement orientés vers l'étude de la valeur fertilisante azote des effluents d'élevages sont différents selon les essais. Les produits organiques apportés seuls ou complétés par une fertilisation azotée minérale étaient comparés à une modalité de référence qui était selon les cas, soit non fertilisée soit en fertilisation minérale exclusive. Une majorité d'essais (tableau 1) comparait des apports de PRO complétés ou non par une fertilisation azotée minérale, à une modalité référence recevant une fertilisation azotée à base d'Ammonitrate dont la dose était restrictive ou optimisée.

Dans tous ces essais, les PRO étudiés ont montré par rapport à la référence des effets significativement positifs, parfois nuls sur le pH eau du sol. Certains essais qui comparaient plusieurs types de produits dont la dose était ajustée pour apporter une même quantité d'azote total, permettent de conclure à :

- Une absence de différences significatives de pH entre fumiers bruts et compostés qu'ils proviennent d'élevages bovins, porcins ou de volailles, ni entre fumiers issus d'élevage de porcs et de bovins.
- Une augmentation de pH plus marquée avec les fumiers de bovins et de porcs que les fumiers de volailles
- Dans des essais où plusieurs doses étaient comparées, un effet alcalinisant de fumiers compostés de bovins ou de porcins, proportionnel à la dose appliquée.

Tableau 1 : bilan des effets pH de 5 essais avec apports réguliers d'effluents d'élevages (FB, FP, FV : fumiers bruts de bovins, porcins et volailles, CB, CP et CV : fumiers compostés de bovins, porcins et volailles, LB et LP : lisiers de bovins, de porcs)

Site (département), organisme réalisateur	Type de sol	Années début et fin	Rotation	Produits testés	pH eau initial	Ecart de pH (PRO – témoin) en fin d'essai
La Jaillière (44) ARVALIS	Limon argileux sur schiste	1995-2005	Maïs-fourrage blé	CB, CP, CV, FB, FP, FV	6.6	+0.3 à 0.4
			Prairie temporaire	CB, CP, CV, FB, FP, FV	6.7	+ 0.6 à 1.1 (sur 10 cm)
Le Rheu (35) ARVALIS	Limon profond	1995-2005	Monoculture de maïs fourrage	CB, CP, FB, FP	6.5	0 à 0.4
Jeu les Bois (36) OIER des Bordes	Sable limoneux sur grès	1998-2008	Colza blé	FB, CB, FV, LP	5.6	0 à 0.25
			Prairie temporaire	FB, CB, FV, LP	6.2	0 à 0.2
La Jaillière (44) ARVALIS	Limon argileux sur schiste	1983-1992	Prairie temporaire	FB, LB	6.7	+0.8 à 1.2 (sur 10 cm)
Mauron (56) INRA, CA56, ARVALIS	Limon argileux sur schiste	1975-1981	Maïs – Ray - grass d'Italie	LP	6.5	+ 0.7 à 0.8

Par ailleurs les résultats des 2 essais avec lisiers de porcs ont montré qu'apporté seul ou complété par une fertilisation minérale optimisée, le lisier n'acidifiait pas les sols contrairement à une idée encore largement répandue. Au contraire, le pH du sol est plus élevé après apport de lisier qu'avec une fertilisation minérale optimisée à base d'Ammonitrate,

L'effet d'autres types de PRO que des effluents d'élevage a été évalué sur 2 autres dispositifs de longue durée :

- 3 composts d'origine urbaine et un fumier de bovins sur le dispositif Qualiagro à Feucherolles (78) de 1998 à 2013.
- 4 composts végétaux utilisés en agriculture biologique et un fumier de bovins sur le site de la Sérail de 1995 à 1999.

Sur ces deux essais où les apports des différents composts, ajustés pour apporter une dose équivalente de carbone organique, étaient comparés à une modalité sans apport organique, le constat en matière d'effet pH est identique à celui réalisé sur les essais avec effluents d'élevages.

Parmi tous ces essais, quelques-uns disposent d'analyses chimiques complètes de tous les produits organiques apportés ainsi que d'analyses chimiques sur le sol et les cultures, et peuvent être utilisés en vue de tester les modèles théoriques.

4. Deux essais valorisés pour tester des modèles de calcul de la VN des PRO

4.1. Les essais au champ retenus

Compte tenu des paramètres nécessaires au calcul d'effet sur le SAB du sol, seulement deux expérimentations de longue durée bien documentées en matière d'analyses de composition chimique des différents PRO appliqués, de paramètres physico-chimiques de la couche arable et de composition chimique des récoltes, ont fait l'objet d'une étude plus approfondie des effets des PRO sur le statut acido-basique du sol : le dispositif QualiAgro de l'INRA et VEOLIA localisé à Feucherolles (78) en luvisol limoneux profond de 1998 à 2013 et le dispositif d'ARVALIS sur le site de La Jaillière (44) en brunisol limono argileux sur altérite de schiste de 1996 à 2005.

La Jaillière

Six types de PRO issus d'élevages, fumiers de bovins bruts (FB) ou compostés (CB), fumiers de porcins bruts (FP) ou compostés (CP), fumiers de volailles bruts (FV) ou compostés (CV) ont été apportés tous les ans à une dose calée sur un objectif d'apport d'azote total identique entre PRO mais variable selon la culture réceptrice.

Ces modalités, sans fertilisation azotée minérale, ont été comparées à un témoin sans apport de PRO recevant une fertilisation azotée minérale légèrement inférieure à la dose calculée par la méthode du bilan. Ce dispositif a été dédoublé en 2 sous essais: le premier avec une rotation maïs fourrage et blé, pailles enlevées, recevant respectivement une dose d'azote total par les PRO de 100 et 200 kg N/ha et le second avec une prairie de longue durée de ray-grass anglais (RGA) recevant une dose d'azote total par les PRO de 200 kg N/ha. L'essai en maïs blé est travaillé à 25 cm par une machine à bêcher tous les ans et les produits sont apportés juste avant le travail du sol réalisé peu de temps avant le semis des cultures. Sur prairie, les effluents sont épandus à l'automne après la dernière coupe. Une analyse chimique du sol a été réalisée sur chaque parcelle élémentaire de l'essai en début et fin d'essai. La teneur en N, P, K, Ca, Mg des parties végétales exportées ont été analysées tous les ans pour chaque modalité. La composition des PRO épandus a été analysée également tous les ans.

Qualiagro

Quatre types de PRO, un fumier de bovins (FUM), un compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR), un compost de biodéchets (BIO) et un compost de déchets verts et de boues de station d'épuration (DVB), ont été épandus tous les 2 ans sur une rotation maïs grain-blé à une dose calée sur un apport de 4 t/ha de carbone organique. Ces traitements ont été comparés à un témoin ne recevant pas de PRO. Ce dispositif (4 blocs de répétition des traitements) a été dédoublé en 2 sous essais selon le niveau de fertilisation azotée minérale : fertilisation minimale (les modalités avec PRO ne recevant pas ou très peu de fertilisation azotée minérale) ou fertilisation optimale (les modalités avec PRO recevant une fertilisation azotée minérale ajustée en fonction de l'apport efficace de l'azote du PRO). Les PRO sont apportés tous les 2 ans à l'automne sur chaume de blé et enfouis par le labour dans les 25 premiers centimètres de sol. Une analyse physico-chimique du sol (teneurs en C, N, P, K, Ca, Mg, Al, Fe...) est réalisée dans l'horizon de labour de chaque parcelle élémentaire avant chaque apport de PRO. Les parties végétales exportées ont été également analysées tous les ans pour chaque modalité ainsi que les PRO épandus à chaque apport.

4.2. Calcul d'une VN des PRO à partir des effets sur le pH

En vue d'exprimer en équivalents VN apportés l'effet observé des PRO sur le pH des couches travaillées, cet effet pH des PRO a d'abord été calculé de la manière suivante :

$$\text{Effet pH d'un PRO} = (\text{pH final}_{\text{PRO}} - \text{pH initial}_{\text{PRO}}) - (\text{pH final}_{\text{témoin sans PRO}} - \text{pH initial}_{\text{témoin sans PRO}}).$$

Ce calcul a été conduit à partir des moyennes des 3 ou 4 blocs de chaque essai, pour les 6 PRO du sous-essai maïs-blé, les 6 mêmes PRO sur le sous-essai en prairie temporaire de La Jaillière, pour les 4 PRO du sous-essai fertilisé et les 4 mêmes PRO du sous-essai non ou très peu fertilisé de l'essai QualiAgro. Pour l'essai QualiAgro et le sous-essai en maïs-blé de La Jaillière, le pH a été mesuré sur la couche 0-25 cm dans laquelle étaient enfouis les PRO chaque année. Pour le sous-essai en prairie de La Jaillière, où le pH a été mesuré en fin d'essai sur deux horizons (0-10 cm et 10-25 cm), la VN a été calculée sur chaque horizon puis cumulée sur la couche 0-25 cm.

Parmi les différents modèles d'estimation du besoin de bases pour atteindre un pH donné, le modèle de Rémy cité dans Coppenet et al. (1986) mis au point dans les limons du Nord de la France a été retenu. Ce modèle nécessite les variables d'entrée suivantes : teneur en argile (%_oARG) et en matière organique (%_oMO), masse de terre fine (MTF) en tonnes par hectare et s'écrit :

$$\text{Besoin en base en kg VN/ha} = 55 \cdot 10^{-6} * (\%_{\text{o}}\text{ARG} + 5 * \%_{\text{o}}\text{MO}) * (\exp(\text{pH}_s/1,5) - \exp(\text{pH}_i/1,5)) * \text{MTF}$$

Avec : pH_s = pH souhaité (final), pH_i = pH initial.

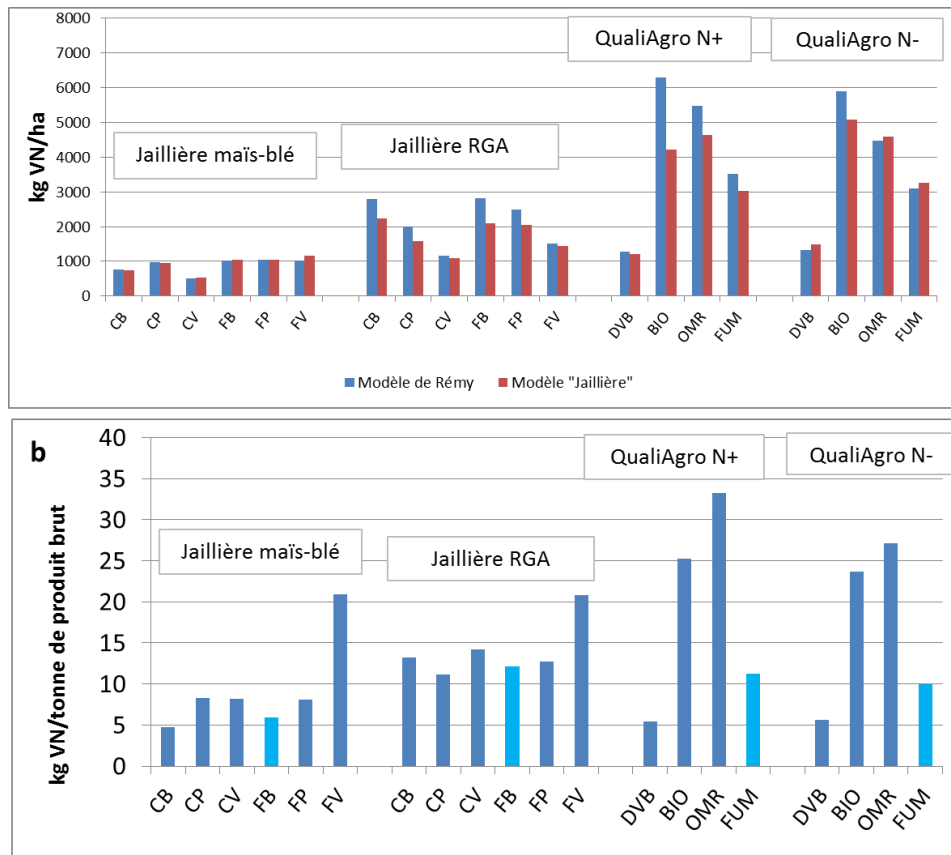
Le pH final a pris en compte la variation de pH sur le témoin sans apport de PRO et s'écrit :

$$\text{pH}_s = \text{pH final}_{\text{PRO}} - (\text{pH final}_{\text{témoin sans PRO}} - \text{pH initial}_{\text{témoin sans PRO}}).$$

Un autre modèle, basé sur le taux de saturation de la CEC Metson, n'a pas pu être utilisé car il est inapplicable à des taux de saturation supérieurs à 100%, ce qui était le cas de certaines modalités des essais.

Sur le site de La Jaillière, une expérimentation chaulage réalisée entre 2009 et 2012 sur une parcelle voisine de l'essai PRO, sur le même type de sol, a permis d'ajuster un modèle local de besoin de bases, alternatif à celui de Rémy. Cet essai qui comportait plusieurs modalités d'apports de différents amendements minéraux basiques carbonatés a fait l'objet d'un suivi du pH et de la teneur en carbonates résiduels selon une méthode normalisée mise au point par le laboratoire SADEF (Baliteau et al., 2013), pendant 18 mois après les amendements. L'ensemble des points montrant l'écart de pH des différentes modalités amendées par rapport au témoin s'ajuste linéairement en fonction de la quantité de carbonates dissous (égale à la quantité de carbonates apportée moins la quantité de carbonate résiduels), avec un coefficient de régression de 0.73. Cette relation de régression linéaire a donc également été utilisée pour évaluer la VN des différents PRO sur le site de La Jaillière, et testée sur le site de Feucherolles. Les résultats de ces calculs sont présentés sur **la figure 1a**. On constate que les valeurs obtenues selon ce modèle de régression et celui de Rémy sont très proches sur les deux sites.

Figure 1: (a) Valeurs neutralisantes apportées par les PRO calculées à partir des écarts de pH et du modèle de Rémy ou d'une régression linéaire construite à partir des résultats d'un essai chaulage de La Jaillière (modèle « Jaillière ») (b) Valeur neutralisante par tonne de produit brut calculée à partir du modèle de Rémy.



Les VN rapportées par tonne de produit brut des PRO varient entre 5 pour le compost de fumier de bovins sur l'essai maïs-blé de La Jaillière à 32 pour le compost d'OMR complété par une fertilisation minérale de Qualiagro (figure 1b). La fertilisation azotée minérale complémentaire distinguant les deux sous-essais de Qualiagro ne semble pas avoir d'effet sur la VN des PRO apportés. Sur La Jaillière, la VN des PRO diffère selon le contexte agronomique dans lequel ils ont été apportés, la VN étant plus faible pour le sous-essai en maïs-blé. Le fumier de bovins présent dans les 2 essais, montre des VN différentes selon les essais, proches entre l'essai QualiAgro et celui de La Jaillière en prairie temporaire.

4.3. Calcul de la part du carbone organique (CO) apporté par les PRO, stockée dans le sol en fin d'essai.

La quantité de CO des PRO stockée dans le sol a été calculée selon la formule ci-dessous.

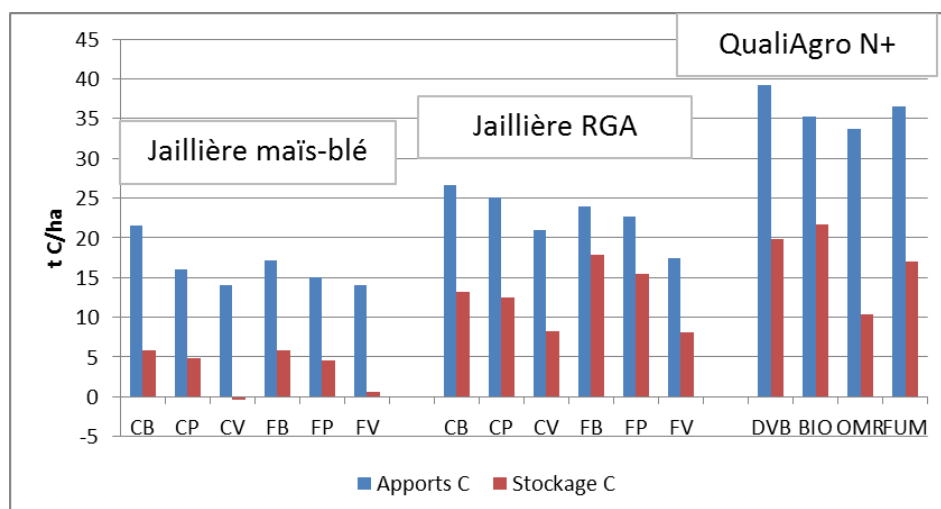
Quantité de CO du PRO stockée dans le sol = (Stock CO final PRO – stock CO initial PRO) – (stock CO final témoin sans PRO – stock CO initial témoin sans PRO).

Le calcul de ce stock au niveau de la couche de sol amendée par les PRO fait intervenir sa teneur en CO et sa masse de terre fine. La première a été analysée dans chaque parcelle élémentaire en début et fin d'essai sur les deux essais. La seconde a été calculée à partir de mesures de densité apparente réalisées à l'échelle de chaque modalité en fin d'essai à La Jaillière, dans chacun des traitements au cours du suivi de l'essai Qualiagro. Les calculs de stocks de C ont été réalisés en considérant des quantités de terre équivalentes tout au long de l'essai et dans tous les traitements. Pour l'essai en prairie de La Jaillière où les PRO n'ont pas été incorporés, le calcul du stock a néanmoins été réalisé sur 0-10 et 10-25 cm et cumulé sur 0-25 cm, car des variations de teneur en CO entre début et fin d'essai étaient significatives sur ces deux horizons.

Les quantités de carbone stockées en fin d'essai sont présentées dans la figure 2. La part de CO des PRO stockée varie beaucoup selon les sites et les produits. Elle apparaît plus élevée (40 à 70 %) sur le sous-essai en prairie de La Jaillière et sur Qualiagro que sur le sous-essai maïs-blé de La Jaillière (5 à 30 %). Des valeurs anormalement faibles sont observées pour les fumiers bruts ou compostés de volailles (5%) et sont probablement

en lien avec les faibles quantités de CO apportées par ces produits qui conduisent à un niveau de stockage du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les mesures.

Figure 2 : Quantités de carbone organique apportées et stockées dans le sol



4.4. Calcul de la fraction de N apporté perdue par lixiviation

Le calcul de l'azote lixivié a été réalisé selon des méthodes différentes sur les deux essais. Sur l'essai Qualiagro, des lysimètres installés à 45 cm de profondeur, ont permis de mesurer durant 7 années les flux d'eau et de nitrate transférés en dessous de 45 cm. Les anions SO_4^{2-} ou S total, selon les techniques analytiques mises en œuvre, ont également été mesurés, moins exhaustivement que NO_3^- . Une seule parcelle par modalité du sous-essai +N était équipée. A partir de ces mesures, la quantité d'azote nitrique lixivié cumulée sur l'ensemble de la durée de suivi de l'essai a été estimée.

Sur l'essai de La Jaillièrre, la quantité d'azote nitrique lixivié a été calculée chaque année, par application du modèle LIXIM® sur la période de drainage et la mesure du stock d'azote minéral du sol, sur 90 cm de profondeur en début et fin de période de drainage hivernal.

Les fractions d'azote lixivié par rapport à l'azote total apporté par les PRO et par l'engrais minéral dans Qualiagro varient entre 23 et 37 % en moyenne sur la durée du suivi des essais en maïs blé. Ces valeurs relativement élevées sont liées au fait que le sol était nu entre blé et maïs et à la profondeur de récolte des eaux (45 cm) dans Qualiagro. Dans le sous-essai en prairie temporaire de la Jaillièrre, la fraction d'azote apporté par les PRO et lixiviée varie de 7 à 12 %.

5. Résultats : les effets simulés par les différents modèles

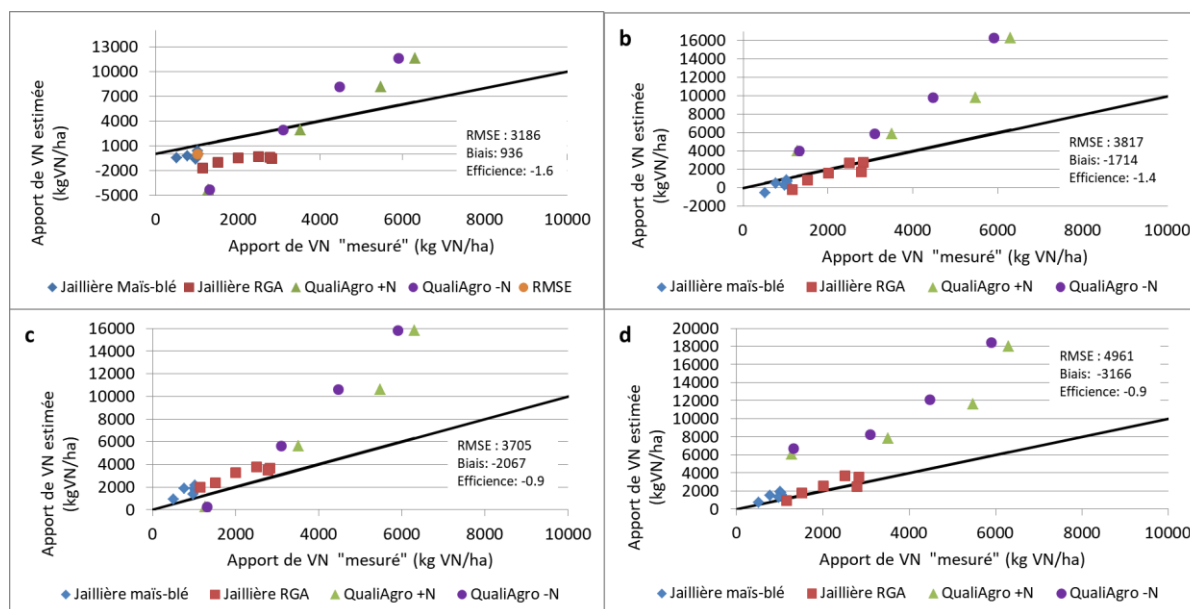
La confrontation des VN déduites des mesures de terrain ($VN_{mesurée}$) et des VN estimées par les modèles ($VN_{estimée}$) calculé selon l'hypothèse de minéralisation totale des composés du PRO ($VN_{estimée1}$), montre que les $VN_{estimée1}$ surestiment de manière importante les $VN_{mesurée}$ pour 2 composts de Qualiagro et les sous estiment pour tous les PRO de La Jaillièrre ainsi que le compost DVB de Qualiagro. Seule la VN du traitement FB de QualiAgro est bien estimée. Le classement des PRO est cohérent entre les $VN_{mesurée}$ et $VN_{estimée1}$ à QualiAgro, mais pas sur La Jaillièrre, néanmoins les valeurs de VN y sont faibles. Si on compare le $VN_{estimée1}$ du fumier de bovins épandu sur La Jaillièrre à celui de Qualiagro, on constate un effet acidifiant du premier et alcalinisant du 2nd, qui correspond à une teneur moyenne en N et S plus élevées et K et Ca plus faibles du 1^{er} par rapport au 2nd.

Un second mode de calcul des VN ($VN_{estimée2}$) a été comparé aux VN issues des mesures, basé sur une minéralisation partielle de l'azote et du soufre organique des PRO. La minéralisation partielle est déduite de la part de CO des PRO stockée dans le sol en fin d'essai en faisant l'hypothèse que carbone, azote et soufre organique des PRO sont stockés dans les mêmes proportions. Les $VN_{estimée2}$ montrent des résultats cohérents avec les $VN_{mesurée}$ sur La Jaillièrre, alors que celles des 4 PRO de Qualiagro sont surestimées tout en conservant un classement des VN calculés des PRO cohérent avec ceux issus des mesures.

Un troisième mode de calcul $VN_{estimée3}$ s'appuie sur la méthode proposée par Julien et al. en 2007, considérant que seule la part du N organique et du NH_3 des PRO lixiviée a un effet acidifiant. Selon ce mode de calcul les VN sont généralement surestimées sauf pour le compost DVB.

Un quatrième mode de calcul ($VN_{estimée4}$) retrace des apports de VN par les PRO minéralisés ($VN_{estimée2}$) les exportations de N, P, K, Ca, Mg des cultures, en considérant que l'exportation de N et P a un effet alcalinisant (absorption de NO_3^-) et celle de K, Ca et Mg a un effet acidifiant. Les autres éléments non dosés n'ont pas été pris en compte. Ce mode de calcul permet un bon ajustement des VN estimées aux VN calculées à partir des mesures de pH pour les essais de la Jaillière mais surestime les VN pour les essais de Qualiagro.

Figure 3 : comparaison entre VN « mesurée » et VN estimées par le modèle $VN_{estimée1}$ (figure 3a), $VN_{estimée2}$ (3b), $VN_{estimée3}$ (3c) et $VN_{estimée4}$ (3d).



6. Discussion

Les modèles testés reposent sur certaines hypothèses qui peuvent s'avérer non vérifiées au moins en partie, en raison de plusieurs sources d'incertitudes.

- La nature et la composition de la MO des PRO évoluent sans doute lorsqu'elle s'incorpore à la MO du sol, on ne sait pas à quel point cela invalide le modèle 2, basé sur un coefficient de minéralisation identique pour C, N et S.
- Les PRO contiennent une fraction minérale non négligeable, le calcium (généralement le plus important des cations d'acidité négligeable) contenu dans des carbonates doit rester inclus dans le calcul des équivalents CaO mais le calcium contenu dans des feldspaths difficile à quantifier, n'est pas dissout en quelques décennies et devrait être soustrait du Ca total du PRO. Tous les modèles testés sont concernés. Le dosage de carbonate de calcium réalisé sur l'essai QualiAgro révèle une variabilité importante de la part du calcium associé au carbonate par rapport au calcium total. Ce dosage pourrait constituer un complément utile pour affiner l'estimation de la VN liée à cet élément.
- Il faudrait encore multiplier les équivalents CaO par un facteur inférieur à 1 représentant la lixiviation de l'anion hydrogencarbonate (HCO_3^-), qui exporte une partie des équivalents CaO apportés. La lixiviation de cet anion mesurée sur le site de QualiAgro montre qu'elle peut être importante. Les modèles 3 et 4 peuvent être concernés par cette source d'incertitude.
- l'acidité apportée par le phosphore des PRO reste difficile à évaluer, dépendant dans les réactions retenues de la proportion de phosphore adsorbé sur des oxydes (qui produirait entre 0 et 1 H^+) et de celui précipité avec le calcium (qui produirait près de 3 H^+ par mole de phosphore minéralisé). De plus on suppose la faible solubilité du phosphore des PRO qui est en majeure partie sous forme minérale. Tous les modèles testés sont concernés.
- la lixiviation de l'anion sulfate n'a pas été prise en compte. Le sulfate lixivié n'est un traceur d'acidification que si le sulfate provient d'une oxydation du soufre organique contenu dans les PRO. Les analyses des PRO sur les deux essais ne concernant que le soufre total, il est difficile de quantifier l'acidification à partir de la lixiviation de sulfate. Le modèle 3 est concerné. Mais cette source d'incertitude est probablement faible, vu les faibles quantités de soufre dans les PRO hormis certains types de PRO comme le compost DVB.

- le bilan acido-basique calculé à partir des exportations en N, P, K, Ca, Mg par les récoltes fait l'hypothèse que l'azote est entièrement absorbé sous forme nitrique alors que pour certaines espèces et dans certaines conditions, l'azote peut aussi être absorbé sous forme de NH_4^+ . Par ailleurs ce bilan n'a pas pris en compte le soufre et le chlore non systématiquement dosés. Ces sources d'incertitudes concernent le modèle 4.

7. Conclusions

L'analyse approfondie des deux expérimentations de longue durée de La Jaillière et Qualiagro a permis de mettre en évidence une grande diversité des VN des PRO avec une VN des composts d'ordure ménagères résiduelles et de biodéchets plus importante, que celle des composts de déchets verts + boues et des effluents d'élevages. La VN des fumiers de bovins étudiés sur les deux essais se situe dans une fourchette de 5 à 10 kg de VN/tonne de produit brut.

L'utilisation des différents modèles qui prennent toujours en compte la composition des PRO montre que celle-ci est un facteur explicatif de la VN des PRO, mais pas le seul. Ainsi, une teneur plus élevée en N tend à baisser la VN alors qu'à l'inverse une teneur plus élevée en cations d'acidité négligeable (Ca, Mg et K) tend à l'augmenter.

Les résultats des deux sous-essais de QualiAgro qui se différencient par une fertilisation azotée minérale optimale ou restrictive, montrent que la fertilisation azotée minérale n'impacte pas la valeur neutralisante des PRO, tant que sa dose reste inférieure ou égale à la dose optimale.

Parmi les modèles testés, aucun ne se révèle globalement satisfaisant. Mais le modèle 4 qui prend en compte à la fois la composition des produits et le contexte agricole (système de culture, rotation, gestion des pailles) via l'exportation par les récoltes, mérite d'être testé sur d'autres essais de longue durée et sous diverses hypothèses de forme d'azote absorbé.

Remerciements : Qualiagro est un des sites du SOERE-PRO (système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement) depuis 2010, faisant partie depuis 2012 de l'Infrastructure Scientifique ANAEE-France. A ce titre, il a bénéficié d'un soutien financier d'ALLENVI et de l'ANR. Il a été mis en place en 1998 dans le cadre d'un partenariat entre l'INRA et Veolia Recherche et Innovation.

Références :

- Baliteau J.Y., Bouthier A., Gaumont F.X., Le Roux C. Utilisation de la méthode d'analyse des carbonates résiduels pour étudier le devenir au champ des amendements minéraux basiques carbonatés. 11èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse – 20 et 21 novembre 2013 – COMIFER - GEMAS
- Bouthier A., Houot S., 2012 – Les produits organiques agissent souvent comme des amendements basiques. Perspectives Agricoles n° 387, pp42-44
- Cai Z.J., Wang B., Xu M., Zhang H., He X., Zhang Lu., Gao Z., 2015 - Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. J Soils Sediments 15:260–270
- Coppenet M., Ailliot B., Cariou G., Colomb B., Darre J., Haut R. 1986 Etat calcique des sols et fertilité : le chaulage. COMIFER. Editions ACTA
- Eghball B. 1999 – Liming effects of beef cattle feedlot manure or compost. Soil Science Plant Anal., 30(19&20), 2563-2570
- Eghball B. 2002 – Soil properties as influenced by phosphorus and nitrogen-based manure and compost applications. Agron. J. 94: 128-135
- Julien JL. 2007 - Effet des effluents d'élevage sur le statut acido-basique d'un sol : approche par le bilan de protons. Actes colloque COMIFER-GEMAS de Blois.
- Parham J.A., Deng S.P., Raun W.R., Johnson G.V., 2002 – Long-term cattle manure application in soil. I. Effect on phosphorus levels, microbial biomass C and dehydrogenase and phosphatase activities. Biol. Fertil. Soils 35: 328-337
- Rémy J.C., Marin-Lafèche A., 1974 - L'analyse de terre: réalisation d'un programme automatique. Annales Agronomiques, 25 (4), 607-632
- Turpin A. Bref résumé des causes de l'évolution du pH et du Statut Acido-Basique (SAB) des sols 2015. Cours de chimie des sols ENFA Toulouse
- Whalen J.K., Chang C., Clayton G.W., Carefoot J.P., 2000 - Cattle Manure Amendments can increase the pH of acid soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 962-966
- Zeng M., De Vries W., Bonten L.T.C., Zhu Q., Hao T., Liu X., Xu M., Shi X., Zhang F., Shen J., 2017 - Model-Based Analysis of the Long-Term Effects of Fertilization Management on Cropland Soil Acidification. Environ. Sci. Technol. 2017, 51: 3843–3851