

Minéralisation de l'azote des sols (Ouest) : résultats du projet "Mh"

T. Morvan¹, L. Beff¹, Y. Lambert²,

N. Beaudoin³, B. Mary³, M. Valé⁴, R. Chaussod⁵, B. Louis¹, J. Grall², D. Hanocq², P. Germain¹, J.P. Cohan⁶

¹INRA-Agrocampus, UMR 1069, Rennes, France ; ²Chambre d'agriculture de Bretagne, France ; ³INRA, UR1158, Agro-Impact, site de Laon, France ; ⁴SAS laboratoire, Ardon, France ; ⁵SEMSE, Vieuvigne, France ; ⁶ARVALIS, Institut du végétal, France.

Contacts : morvan@rennes.inra.fr et lbeff@rennes.inra.fr

Introduction

La qualité de prévision du flux de minéralisation de l'azote de la matière organique (MO) du sol représente un enjeu agronomique, économique et environnemental important. Elle conditionne notamment la réussite de la fertilisation des cultures et la maîtrise de risques environnementaux tels que la lixiviation des nitrates dans les sols cultivés. Le flux de minéralisation de l'azote humifié du sol (Mh) est la composante la plus importante du bilan de minéralisation, comparativement aux autres composantes (résidus de culture, effets des apports de produits organiques...), et elle est paradoxalement celle qui est la moins bien estimée. Actuellement, l'approche adoptée au niveau national (Comifer 2013) pour prédire le flux de minéralisation repose sur un modèle qui intègre l'effet de trois composantes : le climat, les caractéristiques des sols et l'historique cultural. Toutefois, l'évaluation de ce modèle par différentes approches expérimentales au champ et au laboratoire a mis en évidence la qualité moyenne des prédictions pour les sols de l'Ouest de la France.

Dans ce contexte, la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) et l'UMR INRA Agrocampus SAS ont mis en place de 2010 à 2014 un réseau nommé "*réseau Mh*". Celui-ci a pour objectifs (i) de constituer un référentiel régional sur la minéralisation de l'azote (N) des MO humifiées du sol en Bretagne, et (ii) de mieux comprendre l'importante variabilité qui caractérise les flux de minéralisation dans les sols cultivés.

Ce réseau de 130 parcelles a été construit pour être représentatif de la diversité régionale des sols, du climat et des histoires culturales, très diversifiées en Bretagne. La minéralisation a été estimée sur ces parcelles par la mesure pendant 4 à 5 années consécutives du bilan d'azote (N) réalisé entre mars et octobre sur une culture de maïs non fertilisé en N.

Pour interpréter les données, un ensemble de mesures ont été réalisées sur les sols : caractérisation physico-chimique, mesures d'indicateurs de minéralisation et fractionnement granulométrique de la matière organique.

L'analyse des données présentée dans le cadre de cette communication est centrée sur le formalisme utilisé dans certains outils opérationnels pour calculer le flux Mh, et validé par le Comifer (Comifer 2013). La minéralisation Mh sur une période est calculée par le produit d'une vitesse potentielle de minéralisation (V_p), fonction de certaines caractéristiques du sol et d'un coefficient 'Système', et du nombre de jours normalisés (J_n) calculés sur cette période. Le formalisme ' $V_p.J_n$ ' est également utilisé dans le modèle STICS (Brisson et al. 2008).

Cette communication a pour objectifs de présenter une synthèse des résultats obtenus sur le "*réseau Mh*". Nous faisons état de la modification du formalisme que nous avons adoptée pour interpréter ces mesures, et proposer des valeurs réalistes de vitesses potentielles de minéralisation V_p . Nous présentons ensuite (i) l'évaluation de la pertinence du formalisme et du paramétrage du modèle 'Comifer' appliqué à V_p , (ii) une démarche de modélisation permettant de construire un modèle prédictif, et (iii) l'évaluation prédictive de ce modèle dans le cadre d'une utilisation prévisionnelle.

Matériel et méthodes

Description du réseau Mh

Le "réseau Mh", constitué de 130 parcelles réparties sur l'ensemble de la Bretagne, a été suivi pendant 5 ans, de 2010 à fin 2014. Les parcelles du réseau ont été cultivées en monoculture de maïs ensilage, sans fertilisation azotée depuis 2010 (pour 62 parcelles) ou 2011 (pour les 68 autres), et laissées en sol nu pendant l'hiver. Le réseau a été conçu pour être représentatif de la diversité régionale des sols, des successions culturales et des pratiques agricoles. Parmi les parcelles du réseau, 28 ont des prairies dans leur rotation, 9 ont été en jachère, 4 ont des légumes dans leur rotation et 89 sont en cultures annuelles.

Les parcelles ont été choisies pour être représentatives de la diversité pédologique de la région : 27 sols sont développés sur un matériau parental constitué de granite, 13 sur micaschiste, 42 sols sur schistes (15 sur schistes tendres et 27 sur schistes durs), 40 sols sur des limons éoliens (22 sur limon profond et 18 sur limon moyennement profond), et 8 sols sont des sols de fonds de vallée développés sur alluvions.

Détermination de Mh

La minéralisation (Mn) a été quantifiée par la mesure des composantes du bilan azoté (N) d'une culture non fertilisée de maïs fourrage :

$$Mn = Rf - Ri + Np + Lix \quad (1)$$

où Np est l'azote absorbé par la culture, Ri la quantité de N minéral du sol mesurée début mars sur le profil [0 ; 90 cm], Rf le reliquat de N minéral au début de l'automne (octobre) sur le profil [0 ; 90 cm], Lix la lixiviation du nitrate estimée par modélisation (STICS (Brisson et al. 2008)). Toutes ces composantes du bilan ont fait l'objet de 3 répétitions, chaque parcelle expérimentale étant divisée en 3 blocs.

L'effet du climat sur la durée du bilan a été modélisé par le modèle STICS pour convertir les jours calendaires en jours normalisés (Jn , correspondant à la conversion du temps calendaire en "équivalents jours" à la température de référence de 15°C et à humidité optimale). La vitesse potentielle de minéralisation Vp est égale au rapport entre le flux de minéralisation et les jours normalisés. L'analyse des données a été réalisée sur les résultats des 3 dernières années de l'expérimentation, permettant de considérer que la minéralisation nette Mn calculée par le bilan N correspond principalement au flux Mh , la contribution d'autres compartiments (résidus de culture, effets des apports récents de produits organiques) pouvant être considérés comme faibles et négligeables, après les deux premières années de l'expérimentation.

Estimation de la minéralisation entre la date d'ouverture du bilan (Ri) et la fin d'absorption de N par la culture.

La mesure du reliquat Rf a été réalisée entre fin septembre et fin octobre selon les parcelles et les années. La minéralisation calculée par le bilan N intègre donc pour partie un flux de minéralisation qui s'est produit après la fin de l'absorption de N par la culture, et qui ne peut donc pas être mobilisé par la plante. Dans l'optique du raisonnement de la fertilisation N, le prescripteur cherche à prédire l'offre en N du sol entre la sortie de l'hiver (date de mesure de Ri) et la fin d'absorption de N par la culture, qui se situe début septembre (Castillon 2000). Nous avons adopté la date du 10 septembre dans le cadre de la démarche présentée.

Nous avons estimé ce terme de minéralisation "valorisable" par la culture, noté Mh_Maize , à partir de la relation suivante :

$$Mh [Ri ; Rf] = Mh_Maize + Mh_p.a \quad (2)$$

$Mh_p.a$ correspondant à la minéralisation post absorption et est égale à $Rf - Rfa$ (Reliquat fin absorption).

Le calcul de ces deux composantes du bilan nécessite de faire des hypothèses sur la valeur du reliquat à la fin de l'absorption de N par le maïs (Rfa), car ce reliquat n'a pas été mesuré. Nous avons retenu la valeur de 15 kg N-NO₃/ha pour Rfa , justifiée par le contexte expérimental et par les mesures de Rf : (i) la culture n'a pas été fertilisée pendant plusieurs années consécutives, ce qui s'est traduit par une forte demande en N de la plante, confirmée par les faibles valeurs d'indice de nutrition azoté (INN) calculées à la récolte, et (ii) les reliquats (Rf) de la campagne 2014, mesurés plus tôt que les 2

années précédentes, de fin septembre à début octobre, ont été faibles (moyenne de 31 kg N-NO₃/ha), avec une valeur de 1^{er} décile égale à 16 kg.

Calcul d'un indicateur de l'historique cultural (indicateur Système)

Nous avons repris le formalisme du facteur système Fsyst (Comifer 2013) pour élaborer un indicateur de l'historique cultural prenant en compte les 2 composantes suivantes : (i) l'effet de la succession culturale, qui détermine les niveaux de restitution de N par les cultures, et (ii) l'effet des apports répétés de produits organiques.

Nous avons donc construit 2 indicateurs :

- L'indicateur I_Cult, qui intègre l'effet de la succession culturale et du mode de gestion des résidus de culture. Il est renseigné par les informations données par l'agriculteur sur les 15 dernières années, et son mode de calcul repose sur des bilans apparents annuels de l'azote : les restitutions de N au sol sont estimées par différence entre l'azote absorbé et l'azote exporté (tableau de références Comifer (2013b)). Le niveau de rendement moyen des cultures est intégré dans le calcul, et l'indicateur I_Cult correspond à la moyenne des restitutions annuelles sur la période considérée.
- L'indicateur I_PRO, qui prend en compte l'effet des apports de produits organiques des 15 dernières années sur la minéralisation. Cet indicateur est calculé par application du modèle DSM (Bouthier et al. 2011) sur le passé organique de la parcelle. DSM est un modèle dynamique, qui prend en compte l'effet de l'année d'apport, la dose d'apport et la teneur en N du produit organique pour calculer le supplément de minéralisation N résultant de l'histoire organique pour les années qui nous intéressent, *ie* les 3 dernières années de suivi du réseau (2012, 2013 et 2014). L'indicateur I_PRO est donné par la valeur moyenne des suppléments de minéralisation calculé par DSM pour ces 3 années (2012 à 2014).

L'indicateur I_Sys, exprimé en kg N/ha, est calculé par la somme des 2 indicateurs I_Cult et I_PRO. I_Sys varie de 14 à 185 kg N/ha, et sa valeur médiane est égale à 75 kg N/ha.

Les propriétés des sols

Caractérisation de la MO des sols du réseau Mh (horizon 0-30 cm)

La teneur en MO a été déterminée par calcination à 550 °C, et leurs teneurs en C organique et en N total ont été analysées par combustion sèche. La gamme des teneurs en MO, C et N est importante et représentative des sols de l'Ouest (de 1.5 à 7.9 % pour la teneur en MO), avec une différenciation nette des teneurs en N organique en fonction du matériau parental (sols sur granite ≈ sols sur schistes > sols sur limons).

Le fractionnement granulométrique de la MO a été réalisé selon le mode opératoire de Balesdent et al. (1998) . Ce fractionnement permet de quantifier la proportion de MO contenue dans la fraction 200-2000 μ (sables grossiers), 50-200 μ (sables fins), et 0-50 μ (MO associée aux limons et argiles). La fraction particulaire (POM pour Particulate Organic Matter) est égale à la somme des fractions 200-2000 μ et 50-200 μ. Les résultats obtenus correspondent aux ordres de grandeurs caractéristiques des différentes fractions pour les sols cultivés, avec une fraction 200-2000 μ qui contient 2 à 8 % du C environ, une fraction 50-200 μ qui contient 3 à 12 % du C et une fraction 0-50 μ qui contient 80 à 92 % du C total. La fraction particulaire est généralement exprimée par g de N (POM_gN) ou par g de C (POM_gC).

Propriétés physico-chimiques des sols

La texture a été déterminée par la mesure de la granulométrie 5 fractions. Le réseau comprend principalement des limons (L), des Limon-sablo-argileux (Lsa) et des Limon-argilo-sableux (LAS) caractéristiques des sols développés sur schiste et sur limons éoliens. Les classes texturales sableuses (Sa et Sal) sont représentées par les sols développés sur granite.

La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée selon la méthode de Metson. Elle varie de 5.5 à 16.4 cmol/kg sol, avec une valeur médiane égale à 9.3 cmol/kg sol, et une valeur moyenne de 9.7 cmol/kg de sol. La CEC varie significativement en fonction du matériau parental (P<0.001), avec des valeurs de CEC très faibles mesurées sur les sols développés sur limons, et des valeurs comparativement plus élevées pour les sols sur granite, micaschistes et sur alluvions.

La gamme de variation du pH eau est importante, comprise entre 4.8 et 7.9. Environ 10 % des sols sont caractérisés par un pH acide (centile 10 égal à 5.53) ; le pH médian est égal 6.0, caractéristique des sols de l'Ouest. Il ne diffère pas significativement en fonction du matériau parental.

Les densités apparentes et de terre fine de l'horizon de surface, nécessaires aux calculs de stocks et au paramétrage de STICS, ont été mesurées sur toutes les parcelles du réseau. Les densités des horizons inférieurs ont été mesurées sur 37% des parcelles pour l'horizon n°2 (30 – 60 cm) et sur 21% des parcelles pour l'horizon n°3 (60 – 90 cm) et ont été estimées pour les autres parcelles.

Mesures d'indicateurs de la minéralisation

6 indicateurs de minéralisation ont été sélectionnés à partir de l'analyse bibliographique :

- 2 indicateurs biologiques, donnés par la mesure de minéralisation de N au laboratoire, en conditions anaérobies (*Ninc*), et par la mesure de biomasse microbienne vivante du sol quantifiée par fumigation-extraction (*Biom*),
- 4 indicateurs chimiques, issus de l'extraction de l'azote (N) à chaud dans du KCl 2M (*Nfract*), de l'extraction de N dans une solution tampon de phosphate borate (*APM*), et de l'extraction à l'eau à 100°C de C, de N et de la DCO (*IEB_C* et *IEB_N*).

Les gammes dans lesquelles se situent les valeurs des différents indicateurs sont cohérentes avec la bibliographie. Les taux d'extraction de C pour les indicateurs *Biom* et *IEB_C* et de N pour les autres indicateurs varient significativement entre indicateurs, selon le classement suivant : *IEB_C* >> *Biom*, et *IEB_N* >> *APM* > *Ninc* > *Nfract*.

Les indicateurs sont significativement corrélés entre eux, notamment entre les indicateurs *Nfract* et *APM* ($r = 0.70$), mais les corrélations sont comprises entre 0.29 et 0.59 entre les autres indicateurs. Chaque indicateur apporte donc des informations différentes et probablement complémentaires pour la prédiction de la minéralisation au champ.

Analyse des données

Qualification des données et sélection d'un effectif de 65 parcelles

L'analyse des données a été réalisée sur un effectif de 65 parcelles pour lesquelles les mesures de laboratoire et les données de l'expérimentation au champ pour les 3 dernières années ont été de très grande qualité.

La qualification des données de l'expérimentation au champ a été basée sur un arbre de décision comportant plusieurs nœuds : (i) un 1^{er} nœud à 2 branches relatif à la maîtrise du désherbage sur les parcelles expérimentales, (ii) un 2^{ème} nœud à 3 branches relatif au développement de la culture (vigueur, homogénéité du peuplement...), (iii), un 3^{ème} nœud à 2 branches, intégrant la précision du bilan N mesurée par son coefficient de variation. Cette démarche de qualification conduit à attribuer à la parcelle une note comprise entre 0 (mauvais) à 3 (excellent), pour chaque année. Une note globale a ensuite été attribuée à partir des notes annuelles pour qualifier l'essai sur les 3 dernières années prises en compte pour l'analyse de données.

Les 65 parcelles retenues pour l'analyse de données sont issues de cette démarche de qualification. La représentativité de la diversité régionale, tant au niveau de la répartition géographique, du matériau parental que de l'historique cultural, est conservée avec cet effectif.

Formalisme appliqué à la minéralisation mesurée au champ par les bilans N

L'analyse des données a été réalisée sur les 3 dernières années de l'expérimentation (2012, 2013, 2014), afin de pouvoir considérer que la minéralisation nette M_n mesurée par le bilan N correspond au flux M_h . Dans ce contexte, nous avons appliqué pour les données de ces 3 années le formalisme suivant :

$$M_n\text{_{année}} \approx M_h\text{_{année}} = V_p \cdot J_n\text{_{année}} \quad (3)$$

J_n étant calculé par STICS

Nous avons cependant constaté que l'application de ce formalisme ne conduisait pas à calculer des valeurs proches de V_p , entre années, pour une parcelle donnée, sur une proportion importante de l'effectif. Une 1^{ère} hypothèse a consisté à remettre en cause le calcul du temps normalisé par STICS. Cette hypothèse a été rejetée suite à (i) l'analyse de sensibilité des paramètres "sol" du modèle et (ii) la comparaison satisfaisante du modèle avec les données d'un suivi dynamique de l'humidité du sol

réalisé sur 19 parcelles du réseau. Ces 2 démarches permettent de conclure que l'on peut accorder une bonne confiance dans le calcul du temps normalisé par le modèle.

L'analyse comparée des bilans N des 3 années a *in fine* conduit à modifier le formalisme appliqué à la minéralisation, en considérant qu'elle est bien déterminée pour sa composante principale par un terme égal au produit $V_p \cdot J_n$, que l'on peut appeler la composante "basale", mais qu'il faut dans certaines situations, pour certaines années, introduire un terme supplémentaire, nommé "Extra minéralisation" (Em). Les déterminants et la dynamique de ce flux (Em) sont différents de ceux de la 1^{ère} composante : forte intensité, déclenchement par des modifications importantes et rapides des variables environnementales, telles que la réhumectation d'un sol après une période prolongée de stress hydrique (flush de minéralisation), et dépendance de la présence d'un compartiment de MO rapidement biodégradable.

Le formalisme que nous avons alors appliqué est donné par la relation (4), avec V_p et $Em_{\text{année}}$ pour inconnues :

$$Mn_{\text{année}} = V_p \cdot J_n_{\text{année}} + Em_{\text{année}} \quad (4)$$

La démarche d'estimation de V_p et Em comporte plusieurs étapes, ayant pour objectifs de déterminer les situations pour lesquelles nous considérons que les flux d'extra minéralisation sont significatifs. De manière résumée, les différentes étapes d'estimation de V_p et d' Em sont :

- (i) Application d'un t-test ($P = 0.1$) sur le bilan de chaque année pour tester l'hypothèse d'égalité du bilan normalisé ($Bilan_{\text{année}}/J_n_{\text{année}}$) à la valeur du bilan normalisé moyen des 3 années. Ce test permet de déterminer si l'on peut considérer qu'il y a eu de l' Em pour une des 3 années et si le bilan normalisé moyen peut être considéré comme étant un bon estimateur de la V_p de la parcelle.
- (ii) S'il y a présence d' Em pour une des 3 années (rejet de l'hypothèse d'égalité du test précédent), nous réalisons un second t-test ($P = 0.05$) pour tester l'hypothèse d'égalité du bilan normalisé au plus petit bilan normalisé des 3 années. Ce test d'égalité des moyennes réalisé pour chaque année séparément nous indique les valeurs de bilan normalisé à considérer pour estimer V_p . Lorsque l'hypothèse d'égalité est rejetée, on considère qu'il y eu de l' Em et on exclut le bilan normalisé de cette année du calcul de V_p
- (iii) La valeur finalement retenue pour V_p est la moyenne $V_{p_{\text{moy}}}$ des bilans normalisés pour lesquels on a conclu à l'absence d' Em
- (iv) L'extra minéralisation est alors estimée par la relation suivante : $Em_{\text{année}} = Bilan_{\text{année}} - V_{p_{\text{moy}}} \cdot J_n_{\text{année}}$, pour les situations pour lesquelles on a considéré qu'il y avait Em .

La composante Em a été identifiée sur 28 parcelles en 2012, 29 parcelles en 2013 et 8 parcelles en 2014. La vitesse potentielle V_p a été estimée à partir des bilans normalisés de 3 années pour 20% de l'effectif, de 2 années pour 57% de l'effectif, et de 1 année pour 23% des parcelles.

Méthode utilisée pour la modélisation de V_p

La méthode statistique GAM (Generalized Additive Model (Wood 2006)) a été retenue pour la démarche de modélisation. Cette méthode permet d'obtenir un modèle additif dont les variables peuvent être sous forme linéaire ou non linéaire (quadratique, polynômiale, spline, etc). La démarche de sélection des variables explicatives et de la réponse entre la variable à prédire et ces variables explicatives (linéaire ou polynomiale) est basée sur une démarche statistique visant à obtenir le modèle donnant le plus petit MSEP. Le MSEP (Mean Square Error of Prediction) est égal à l'erreur moyenne de prédiction du modèle. Ce critère est calculé par application de la démarche du "Leave One Out" : l'erreur de prédiction est calculée pour chaque individu par l'écart entre la valeur mesurée et la prédiction donnée par le modèle paramétré sans cet individu. Le MSEP correspond donc à l'écart quadratique moyen de prédiction sur toutes les situations où l'on souhaite appliquer le modèle. La démarche du "Leave One Out" correspond à une démarche de validation interne du modèle, qui permet aussi d'éviter le sur-ajustement du modèle aux données. Nous avons en outre vérifié que les variables choisies n'étaient pas corrélées entre elles par le calcul du critère statistique VIF (Variance Inflation Factor).

Résultats

Le climat

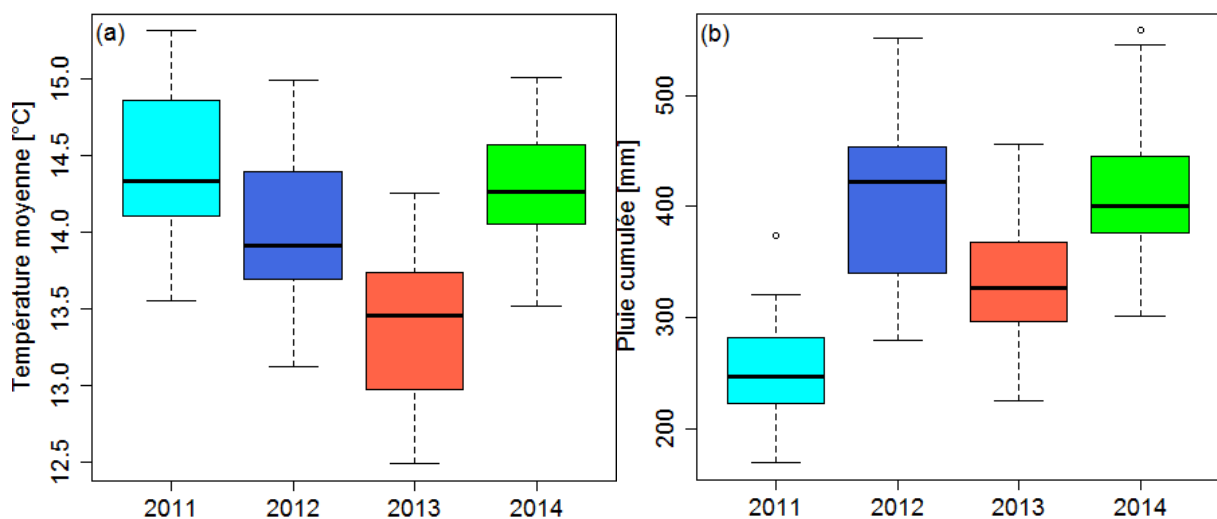
La Figure 1 présente la variabilité des grandeurs climatiques (température moyenne, pluie cumulée), l'évolution de l'humidité d'une parcelle modélisée par STICS, et la distribution des Jn entre le 1^{er} mars et le 10 septembre (période de minéralisation valorisable par le maïs) de 2011 à 2014. Nous observons une variabilité interannuelle importante de ces grandeurs climatiques, avec :

- une température moyenne plus importante en 2011 et 2014 avec une médiane égale 14.3°C par rapport à 2012 (médiane = 13.9°C) et 2013 (médiane = 13.5°C).
- une pluie cumulée plus importante en 2012 (médiane = 422 mm) et nettement plus faible en 2011 (médiane = 247 mm) alors qu'en 2013 (médiane = 326 mm) et 2014 (médiane = 401 mm), elle est intermédiaire. Cette différence entre années est notamment due au printemps pluvieux de 2012 et au printemps sec de 2011.

Entre le 1^{er} mars et le 10 septembre, nous avons obtenu des Jn plus faibles en 2013 (médiane = 119) qu'en 2012 (médiane = 149) et 2014 (médiane = 160). Ce classement des Jn (2013 < 2012 < 2014) reflète la météo de ces 3 années, avec la température et les précipitations faibles de 2013 donnant de plus petites valeurs de Jn qu'en 2014 où la température et les pluies cumulées étaient plus élevées. Cette variabilité des Jn entre les années montre la nécessité d'une étude fréquentielle climatique dans le cadre d'un travail de conseil prévisionnel.

La médiane de la moyenne de Jn est égale à 140, alors que la valeur donnée par le Comifer dans sa calculatrice d'aide aux calculs de Mh (Comifer and Arvalis 2012) est égale à 111 pour du maïs (frein hydrique = 0.49). Cette valeur de 111 jours normalisés pour cette période correspond à la plus faible valeur de la moyenne des Jn que nous avons calculée pour les 4 années. Cette différence entre la valeur de Jn obtenue avec la calculatrice du Comifer et le Jn moyen obtenus sur les parcelles du réseau Mh peut notamment être dûe aux données météo considérées pour réaliser le calcul de Jn. La station météo de référence utilisée pour déterminer Jn dans la calculatrice du Comifer se situe à Rennes alors que dans le réseau Mh, les données météo étaient obtenues à la parcelle.

Les différences de précipitations conduisent à une dynamique contrastée de l'évolution de l'humidité du sol entre les différentes années, mais également entre les différentes parcelles en fonction des propriétés du sol de celles-ci, notamment selon leur réserve en eau utile. Pour la parcelle présentée à la Figure 1 (c), le déficit hydrique est bien marqué en 2011 et plus tardif en 2012 et 2013. Ce déficit hydrique prononcé en 2011 conduit à une large gamme de Jn (médiane = 127) couvrant la gamme de Jn des autres années et reflétant notamment la potentialité des sols à retenir l'eau. Le temps normalisé, qui intègre l'effet de l'humidité et de la température du sol de la couche minéralisante (l'horizon 0-30), varie d'une parcelle à l'autre en fonction de la météorologie locale et des propriétés du sol de chaque parcelle. La figure 1 (d) met en évidence une variabilité inter-parcellaire importante de la moyenne des Jn, du même ordre de grandeur que la variabilité des années 2012, 2013 et 2014.



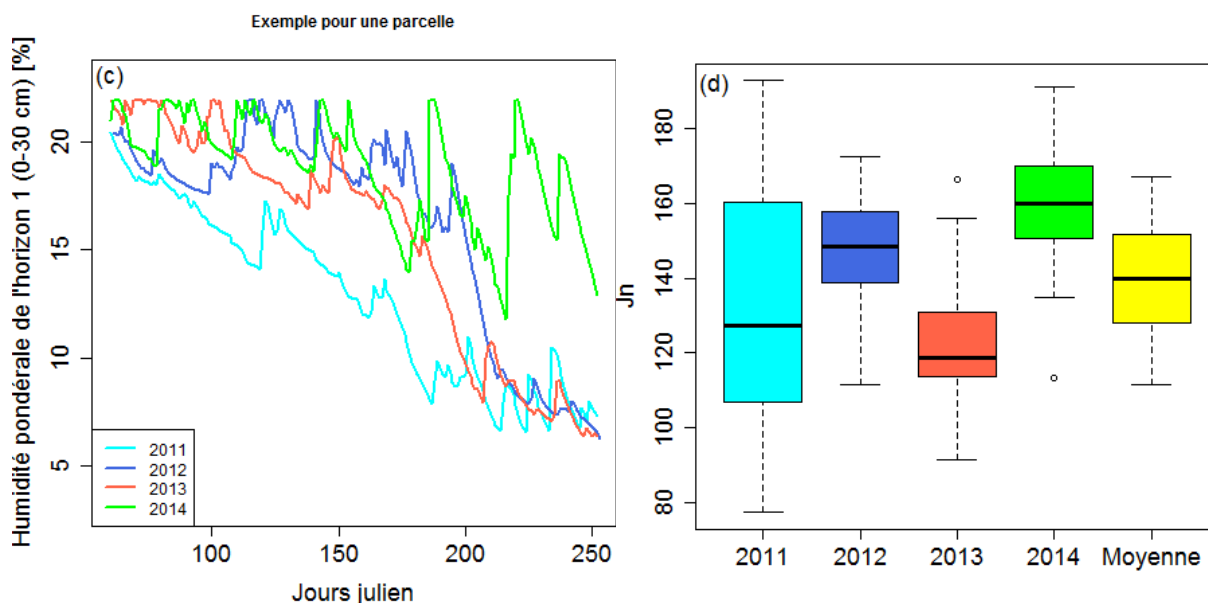


Figure 1 : Boxplot pour les 65 parcelles du réseau Mh de (a) la température moyenne, (b) la pluie cumulée, (d) du temps normalisé (Jn) entre le 1^{er} mars et le 10 septembre de 2011 à 2014. Pour le temps normalisé (d), un boxplot reprend la moyenne des Jn par parcelles pour les 4 années. La figure (c) donne l'évolution de l'humidité des 4 années pour une parcelle du réseau Mh.

Gamme de variation de Vp et corrélations avec les grandeurs sol et l'historique cultural

Les Vp calculées sur les 65 parcelles sélectionnées pour l'analyse des données se situent entre 0.34 et 1.61 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹ et la valeur moyenne est de 0.83 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹. Cette gamme de Vp est similaire à celle obtenue par Valé (2006) sur sol nu.

Plusieurs variables sont significativement corrélées à Vp, mais aucune corrélation ne permet d'expliquer une part de variabilité importante de Vp. Tous les indicateurs de minéralisation sont hautement significativement corrélés à Vp. La corrélation la plus élevée, obtenue avec APM, est de 0.45, ce qui indique que la part de variabilité expliquée par cet indicateur n'est que de 20.3 %, bien insuffisant pour expliquer la variabilité de Vp. L'indicateur système (I_Sys) est également très hautement significativement corrélé à Vp (r = 0.43), au même niveau que les indicateurs de minéralisation ayant le coefficient de corrélation le plus élevé.

Vp est également significativement corrélée aux 2 variables importantes du formalisme proposé par le Comifer, le coefficient F_{syst} (r = 0.29, p-value = 0.02) et le stock de N organique du sol (r = 0.26, p-value = 0.03). La Figure 2 présente la variabilité de Vp en fonction du niveau du stock N et d'I_Sys. Vp augmente en fonction du niveau du stock N jusqu'au niveau moyen-élevé. Nous observons une augmentation de Vp avec le niveau d'I_Sys, ce qui signifie que l'apport de PRO ou la présence de prairies dans la rotation agissent significativement sur Vp.

Les variables étudiées prises isolément n'expliquent donc qu'une part relativement faible de la variabilité de Vp. Il est dans ce contexte nécessaire de mettre en place une démarche d'analyse multivariée pour mieux expliquer la variabilité de la minéralisation, en considérant notamment des variables non corrélées entre-elles.

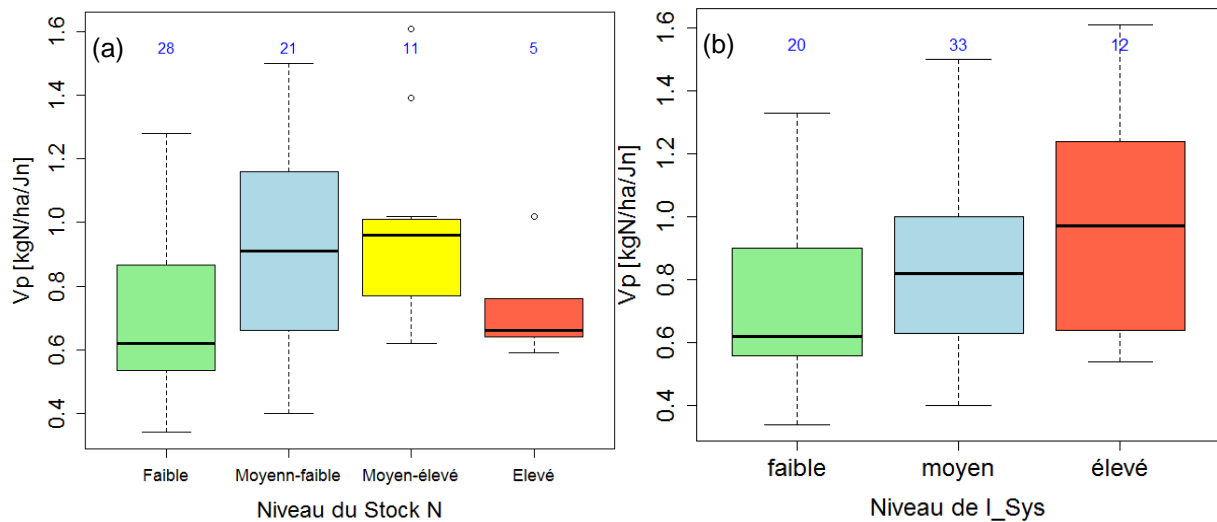


Figure 2 : Boxplot de la variabilité de V_p en fonction (a) du niveau du stock N (faible \leq 5920 kgN/ha, moyenn-faible : entre 5920 et 7400 kgN/ha, moyen-élevé : entre 7400 et 8640 kgN/ha et élevé $>$ 8640 kgN/ha) et (b) du niveau de I_Sys (faible \leq 62kgN/ha, moyen : entre 62 et 107 kgN/ha et élevé : $>$ 107 kgN/ha).

Evaluation du module de calcul de V_p du Comifer

La Figure 3 (a) présente la comparaison de la prédiction de V_p obtenue par le formalisme proposé par le Comifer avec les V_p calculées sur le réseau Mh. Nous observons que malgré les corrélations significatives de V_p avec F_{syst} et avec le stock N, le formalisme proposé par le Comifer ne donne pas une prédiction satisfaisante de V_p (R^2 ajusté = 0.16) pour ces parcelles (dispersion importante des points autour de la droite 1 : 1). Le remplacement du coefficient F_{syst} par l'indicateur I_Sys, et une démarche d'optimisation du paramétrage du modèle ne conduisent pas à une amélioration significative de sa qualité prédictive (résultats non présentés).

Elaboration d'un modèle prédictif (GAM)

Ce modèle prédictif de V_p intègre (i) 2 indicateurs de minéralisation (la biomasse microbienne du sol par fumigation-extraction (Biom) et le N minéralisable obtenu par extraction avec un tampon phosphate borate (APM)), (ii) l'indicateur de l'historique culturel (I_Sys), (iii) des propriétés du sol (texture et CEC) et (iv) la fraction particulaire de la MO (POM_gN). Nous observons des relations linéaires entre V_p et l'ensemble des variables explicatives, à l'exception d'une relation polynomiale de degré 2 entre V_p et la variable CEC/Arg. Ce modèle permet de prédire correctement V_p : le R^2 entre V_p mesurée et V_p prédite est de 0.67 et le MSE, égal à 0.038, est relativement faible. Le RPIQ qui correspond à l'interquartile divisé par la racine carrée du MSE est égal à 2.1. Cela signifie que l'erreur commise sur la prédiction de V_p est 2.1 fois plus petite que la variabilité de V_p . Sur la Figure 3 (b), nous observons que les points suivent relativement bien la droite 1 : 1 ; 48% (31 parcelles) des points se trouvent dans l'intervalle ± 0.1 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹ et 75% (41 parcelles) des points sont compris dans l'intervalle ± 0.2 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹. L'écart maximum entre V_p et la prédiction est de 0.4 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹ et correspond à la parcelle ayant une V_p de 1.39.

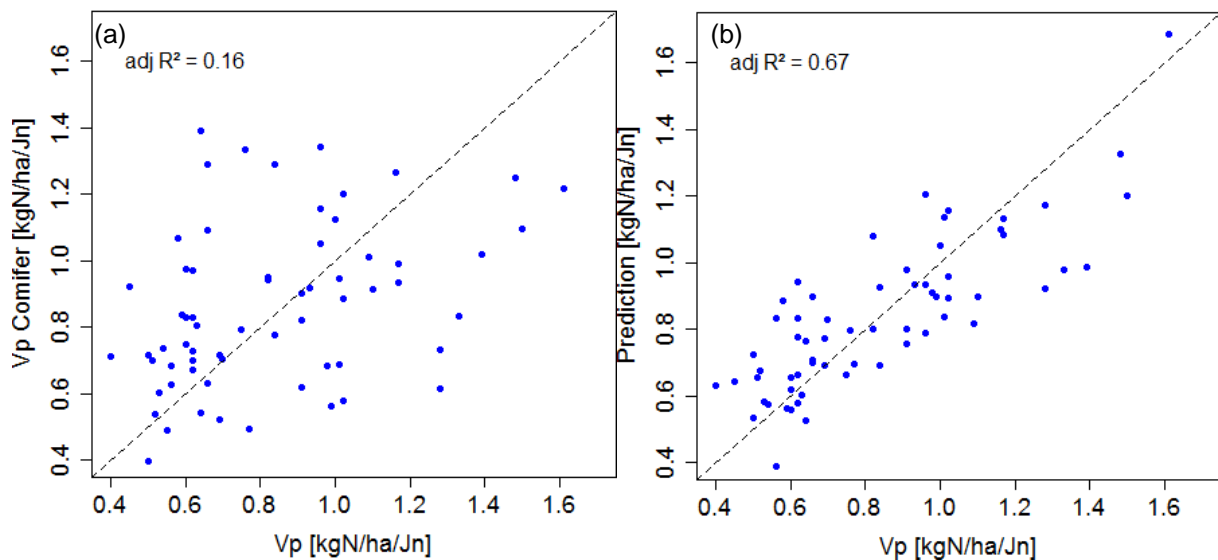


Figure 3 : Comparaison de Vp avec la prédiction obtenue (a) avec le modèle Comifer et (b) avec notre modèle prédictif décrit ci-dessus. La valeur du coefficient de détermination ajusté (adj R²) est écrite sur chaque figure.

Cette démarche de modélisation confirme que la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique du sol est bien déterminée par l'histoire culturale et par des caractéristiques du sol et de la MO. Elle montre également que des indicateurs du statut biologique du sol (biomasse microbienne) et de la minéralisation (APM) apportent une information complémentaire et non redondante. La mobilisation de données d'indicateurs est même indispensable : la qualité prédictive d'un modèle établi uniquement avec les caractéristiques physico-chimiques du sol et l'indicateur Système (I_sys) est médiocre (R² = 0.34) avec notre jeu de données.

Ces résultats rejoignent ceux Alvarez and Steinbach (2011) et de Valé (2006). Alvarez and Steinbach (2011) modélisent la minéralisation (R² = 0.77) avec les variables explicatives suivantes : la teneur en N minéral du sol, la teneur initiale en résidus de culture, l'azote potentiellement minéralisable obtenu par incubation, le rapport entre la teneur en N organique et la teneur en argile et limon. Le modèle prédictif de Vp proposé par Valé (2006) (R² = 0.76) contient des propriétés des sols (teneur en argile, C_{org}, N_{org}, P Olsen), le stock d'azote sur les 30 premiers cm de sol, le rapport C/N de la fraction de la MO supérieure à 50µm et la vitesse d'incubation des sols en aérobie.

Evaluation du modèle pour le calcul prévisionnel de Mh

L'objectif du prescripteur est de donner la meilleure prédiction possible de la minéralisation pour la période pendant laquelle l'azote fourni par le sol peut être valorisé par la culture. Dans l'optique d'une utilisation du modèle pour le calcul prévisionnel de la fertilisation, c'est donc la minéralisation donnée par le terme Mh_Maize que nous cherchons à prédire. Nous cherchons d'autre part la meilleure prédiction possible de la minéralisation moyenne d'une parcelle donnée, et la variable d'intérêt que nous avons considérée pour l'évaluation du modèle est donc la moyenne sur les 3 années de la minéralisation mesurée sur cette parcelle. Enfin, pour évaluer la qualité prédictive du modèle dans le contexte de calcul prévisionnel, *ie* que le climat est inconnu au moment du calcul, nous avons calculé la minéralisation avec les Jn moyens donnés par le climat des 4 années (2011, 2012, 2013, 2014), correspondant aux données disponibles.

L'analyse des bilans N nous a conduit à ajouter la composante Em à la minéralisation ; ce flux est mis en évidence sur un nombre relativement important de parcelles en 2012 et 2013. Ce terme est difficile à prédire, car si ses déterminants sont connus, il n'existe pas de modèle permettant de le quantifier, et il est également très difficile à positionner dans le temps.

Nous avons fait une 1^{ère} étape d'analyse, consistant à voir si l'adoption d'un formalisme simplifié, fondé sur le calcul de la minéralisation par le produit Vp.Jn, *ie* sans prise en compte et calcul de Em, permet de prédire correctement la minéralisation Mh_Maize. Nous avons donc comparé la minéralisation Mh_Maize moyenne sur les 3 années avec la prédiction de la minéralisation issue du produit de la vitesse potentielle de minéralisation de chaque parcelle par la moyenne des Jn sur les 4 années climatiques. Le résultat de cette comparaison est présenté à la figure 6 (a) et montre la bonne qualité prédictive du modèle utilisé avec ce formalisme simplifié. Cela s'explique par 2 hypothèses : (i) l'Em se produit le plus souvent en fin de cycle et sur la période post absorption (flush automnal après

la réhumectation des sols), (ii) l'Em ne se produit pas chaque année, et se trouve donc "diluée" à l'échelle des 3 années. Ce résultat nous conforte donc dans l'utilisation du formalisme simplifié Vp.Jn pour la prédiction opérationnelle.

Une 2^{ème} étape a consisté à comparer la minéralisation moyenne Mh_Maize sur 3 ans avec le flux moyen calculé avec les valeurs de Vp prédites par le modèle présenté dans la section précédente. Le résultat, présenté à la figure 6(b), montre que la prédiction de la minéralisation est relativement bonne, avec une part de variance expliquée par le modèle supérieure à 60 %, et une valeur de RMSE de 24.7 kg N/ha.

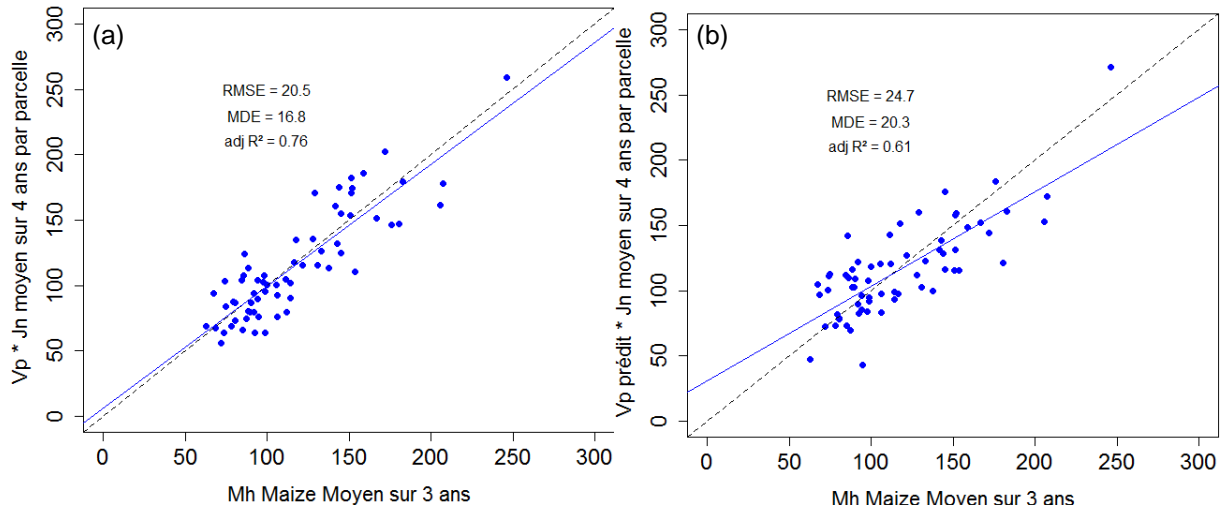


Figure 4: Comparaison entre Mh_Maize (Mh déterminée sur la période d'absorption du maïs) et Vp multiplié par Jn, avec les Jn moyen sur 4 ans pour chaque parcelle et Vp correspondant (a) aux Vp des parcelles et (b) aux Vp prédites par notre modèle. Sur chaque figure, nous retrouvons les valeurs de RMSE, MDE (moyenne des écarts en absolu) et R² ajusté.

Nous concluons que ce modèle est correct dans le cadre d'une utilisation prédictive. Toutefois, ce modèle ne peut être considéré comme opérationnel car il requiert la mesure de 2 indicateurs et la détermination de la fraction particulaire de la MO. Un modèle renseigné par un seul des 2 indicateurs du modèle précédent (Biom ou APM), par l'indicateur Système (I_Sys) et par des caractéristiques physico chimiques facilement accessibles (teneur en N, texture et CEC) constitue un bon compromis. La prédiction de Mh Maize par un tel modèle est acceptable (R² ajusté = 0.48) en regard de la complexité des processus influençant Mh.

CONCLUSION

Les résultats présentés résultent de l'aboutissement d'une démarche expérimentale fondée sur une mesure de la minéralisation au champ et la caractérisation des propriétés des sols permettant d'en expliquer la variabilité. La répétition du protocole durant plusieurs années consécutives constitue l'originalité et le point fort de cette démarche. Elle a permis *in fine* (i) de se placer dans les meilleures conditions possibles d'estimation de la minéralisation des MO humifiées du sol, et d'atteindre l'objectif d'élaboration d'un référentiel régional, et (ii) de questionner le formalisme adopté en France pour modéliser ce flux (Comifer 2013). L'analyse des données a en effet montré que ce formalisme s'applique aux données du "réseau Mh", mais elle montre également que la minéralisation nette mesurée au champ ne peut dans certaines conditions s'expliquer que par la prise en compte d'un processus d'extra minéralisation.

La démarche de modélisation de Vp confirme que les facteurs déterminants sont bien liés à l'histoire culturale et à certaines propriétés des sols. Nous montrons également que la prise en compte d'indicateurs de minéralisation est indispensable pour obtenir une qualité prédictive correcte de Vp et de la minéralisation valorisable par le maïs. D'un point de vue opérationnel, l'utilisation d'un modèle requérant la mesure d'un indicateur et de caractéristiques physico-chimiques du sol assez facilement accessibles peut être considérée comme réaliste. Il est clair cependant que l'accompagnement du prescripteur sera nécessaire pour l'aider à estimer les données requises sur le sol et le climat, et renseigner un tel modèle.

Remerciements

Nous remercions tous les financeurs et nos partenaires qui ont permis la concrétisation et la réussite du projet Mh. Cette étude a été financée par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, le Conseil Régional de Bretagne, les Conseils Départementaux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan, dans le cadre du GP5, et par la DRAAF. Le partenariat avec les laboratoires SEMSE, SAS Laboratoire et LCA a participé à la réalisation d'une base de données contenant de nombreuses analyses de sol. Une collaboration avec InVivo a permis la mesure et l'évaluation d'un indicateur de minéralisation (APM).

Références bibliographiques

Alvarez, R. and H. S. Steinbach (2011). "Modeling Apparent Nitrogen Mineralization under Field Conditions Using Regressions and Artificial Neural Networks." Agronomy Journal **103**(4): 1159-1168.

Balesdent, J., E. Besnard, D. Arrouays and C. Chenu (1998). "The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence." Plant and Soil **201**(1): 49-57.

Bouthier, A., T. Morvan, R. Trochard and J. Grall (2011). Valeur azote à court moyen et long terme des produits résiduels organiques issus d'élevages. 10ème rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, Reims.

Brisson, N., M. Launay, B. Mary and N. Beaudoin (2008). Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. INRA, Rd 10, 78026 Versailles Cedex, France, Editions Quae.

Castillon, P. (2000). "Pertes d'azote dans le systèmes de culture à base de maïs ensilé: Causes et remèdes." Fourrages **163**: 283-291.

Comifer (2013). Calcul de la fertilisation azotée: Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. . Cultures annuelles et prairies. Paris La Défense Cedex, France, Comifer: 159.

Comifer (2013b). "Teneurs en azote des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne: Tableau de référence 2013." Groupe Azote Soufre: 4.

Comifer and Arvalis (2012). Aide aux calculs de Mh selon les références diffusées par le Comifer.

Valé, M. (2006). Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol *in situ*, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes, Institut national polytechnique de Toulouse: 199.

Wood, S. N. (2006). Generalized additive models: an introduction with R. Boca Raton, Florida, U. S. A., Chapman Hall/CRC.