

Journée de synthèse scientifique

**Réseau Mh
Vers un nouveau
raisonnement de la
fertilisation azotée en
Bretagne ?**

Actes

Février 2016



**AGRICULTURES
& TERRITOIRES**
CHAMBRES D'AGRICULTURE
BRETAGNE

Réseau Mh

Vers un nouveau raisonnement de la fertilisation azotée Mh en Bretagne ?

Actes de la journée
de synthèse scientifique du 23 février 2016
organisée par

les Chambres d'agriculture de Bretagne



INRA Agrocampus Ouest



Rédaction

Laure Beff, INRA AgroCampus UMR 1069 Rennes (*lbeff@rennes.inra.fr*)

Emmanuelle Boscher, Chambres d'agriculture de Bretagne (*emmanuelle.boscher@cotes-d-armor.chambagri.fr*)

Chris Fléchar, INRA AgroCampus UMR 1069 Rennes (*chris.flechard@rennes.inra.fr*)

Anne Guézengar, Chambres d'agriculture de Bretagne (*anne.guezengar@bretagne.chambagri.fr*)

Daniel Hanocq, Chambres d'agriculture de Bretagne (*daniel.hanocq@bretagne.chambagri.fr*)

Yvon Lambert, Chambres d'agriculture de Bretagne (*yvon.lambert@bretagne.chambagri.fr*)

Olivier Manceau, Chambres d'agriculture de Bretagne (*olivier.manceau@bretagne.chambagri.fr*)

Thierry Morvan, INRA AgroCampus UMR 1069 Rennes (*morvan@rennes.inra.fr*)

Responsable de la publication

Olivier Manceau, Chambres d'agriculture de Bretagne (*olivier.manceau@bretagne.chambagri.fr*)

Contact

Catherine Le Saint, Chambres d'agriculture de Bretagne (*pole.agronomie@bretagne.chambagri.fr*)

Impression

Chambre d'agriculture des Côtes d'Armor

Le présent document constitue les actes de la journée de synthèse scientifique "Réseau Mh - Vers un nouveau raisonnement de la fertilisation azotée Mh en Bretagne ?" du 23 février 2016 à Locminé (56).

Prix de vente : 61.00 € TTC

Reproduction et diffusion à un tiers interdites sans autorisation préalable des rédacteurs.

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	5
Les bases actuelles du calcul de la fertilisation des cultures annuelles en Bretagne.....	7
Présentation du réseau Mh.....	15
Les bilans mesurés et leurs composantes.....	21
Les reliquats azotés « entrée » à l'ouverture du bilan : variabilité et prédiction.....	27
Concentrations et dépôts d'ammoniac (NH ₃) atmosphérique dans le réseau Mh.....	35
Effet de l'histoire culturale : élaboration d'un indicateur système.....	39
Synthèse des données sur les sols et sur les indicateurs de minéralisation.....	45
Variabilité du climat et du temps normalisé.....	55
Démarche de modélisation de la minéralisation.....	63
Présentation de la plateforme Web Reseau Mh.....	71
Sol-AID, un futur outil au service des prescripteurs ?.....	75

Introduction

Emmanuelle BOSCHER
Chambres d'agriculture de Bretagne

La qualité de prévision du flux de minéralisation de l'azote de la parcelle au territoire représente un enjeu agronomique, économique et environnemental important. Elle conditionne notamment la réussite des cultures et la maîtrise de risques environnementaux tels que la lixiviation des nitrates dans les sols cultivés.

Depuis plus de 30 ans, l'ensemble des acteurs de la recherche (Chambres d'agriculture, Instituts, INRA) ont produit des références permettant de mieux comprendre la dynamique de l'azote dans les sols et les meilleures techniques pour limiter les fuites.

Néanmoins, ces travaux ont démontré la complexité du déterminisme des flux d'azote et de leur contrôle. En effet, ces flux dépendent d'une multitude de processus biologiques, complexes, interagissant entre eux et dépendants eux-mêmes de facteurs non contrôlés tels que les conditions météorologiques.

1. Le réseau Mh : un projet de recherche-développement sur la minéralisation de la matière organique des sols de l'Ouest

1.1. La mise en place du réseau

Le stock de matière organique dans le sol représente de 6 à 10 tonnes d'azote à l'ha. Le flux d'azote par minéralisation de ce stock, intitulé Mh pour « minéralisation de l'azote de l'humus du sol », le plus important dans l'équation du bilan azoté, est difficile à quantifier. Il peut varier du simple au double (de 100 à 200 kg N/ha/an).

Au niveau national, la formalisation des postes du bilan a évolué dans le temps, intégrant des facteurs liés à la composition des sols (pH, taux d'argile, CaCo₃), à la température, aux pratiques culturales. Toutefois, celle-ci reste inadaptée à la Bretagne du fait de sols présentant des taux de matières organiques élevés, de faible pH (< 6,5), des teneurs en argile faible et un apport régulier de déjections animales. Le formalisme simplifié actuel en Bretagne ayant pris la forme des grilles azote est insuffisant pour estimer le poste Mh.

Il est donc important de mettre en place une démarche d'acquisition de références et un consensus existe entre les partenaires techniques et scientifiques pour convenir que cette démarche constitue une priorité ; l'intégration de nouvelles références sur ce terme devant permettre *in fine* d'améliorer sensiblement le conseil de fertilisation.

Dans ce contexte, les Chambres d'agriculture de Bretagne et l'UMR INRA Agrocampus SAS ont mis en place de 2010 à 2014 un dispositif expérimental nommé « réseau Mh » soutenu par l'Etat, l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, le Conseil régional de Bretagne et les Conseils départementaux 22, 29 et 56. Celui-ci avait pour objectifs de constituer un référentiel régional sur la minéralisation de l'azote des matières organiques humifiées des sols de Bretagne et de mieux comprendre l'importante variabilité qui caractérise les flux de minéralisation afin d'en proposer une modélisation. Le suivi d'un réseau de parcelles représentatif des conditions de sol et de climat de la région Bretagne et de la diversité des situations culturales permet de hiérarchiser les facteurs qui agissent sur la stabilisation de la matière organique des sols et de mieux en appréhender le turn-over.

1.2. Les enjeux autour de l'équilibre de la fertilisation

Dès 1997, une étude du COMIFER démontre sur une culture de blé tendre d'hiver que tout dépassement de la dose optimale technique de fertilisation azotée augmente significativement le reliquat post-récolte et donc les risques de lixiviation de l'azote. Les parcelles du Réseau Reliquats Algues Vertes correctement fertilisées réduisent les risques de lessivage annuel par rapport à des parcelles communes du réseau de 10 à 40 kg N/ha selon la rotation.

A contrario, une fertilisation inférieure à la dose optimale technique sur blé ne permet pas de maximiser le rendement (- 5,7 q/ha de blé pour une sous fertilisation de 40 kg N/ha) et peut impacter le taux de protéines des grains de plus de 1% en moyenne (essai OAD Blé 2015, CRAB) sans pour autant réduire les risques de lessivage par rapport à la dose optimale technique.

La réduction de l'incertitude associée à la préconisation de fertilisation azotée apparaît non seulement comme un enjeu environnemental, mais aussi comme un enjeu de compétitivité des exploitations.

2. Cadre technique des actes

Au cours de cette journée, les partenaires scientifiques s'attacheront à présenter les facteurs influant les composantes du bilan Mh et leur variabilité pour une meilleure connaissance des déterminismes des flux de minéralisation et mettront en évidence une dynamique de flux nommé « extraminéralisation » supplémentaire à la composante « basale » du formalisme du bilan. Ainsi, la compréhension de la variabilité intra et interannuelle permet de proposer des modèles de prédiction de la minéralisation des sols intégrant 3 composantes (le climat, les caractéristiques du sol et l'historique cultural) et d'envisager concrètement le transfert d'un modèle opérationnel dans les outils de conseil de fertilisation.

Les bases actuelles du calcul de la fertilisation des cultures annuelles en Bretagne

Daniel Hanocq

Chambres d'agriculture de Bretagne

Dès le début du siècle dernier, les différents auteurs des manuels d'agriculture avaient déjà clairement établi que l'azote était un facteur limitant essentiel de la productivité des cultures.

Les principales sources d'azote étaient bien identifiées : le produit de la minéralisation par voie biologique de la matière organique du sol, mais aussi la fixation symbiotique par les légumineuses et même les apports atmosphériques non symbiotiques.

Si le flux d'azote mis à disposition des cultures qu'on appellerait aujourd'hui « Mh » était bien connu, les agronomes buttaient déjà sur le problème de sa quantification, notamment par l'analyse de terre : « ... La teneur en azote n'est pas en rapport direct avec la fertilité du sol ... » (R. Braconnier, 1952) et l'expérimentation au champ était proposée « l'analyse chimique doit être complétée et contrôlée par les essais culturaux » (T. Genech de la Louvière (collectif de professeurs d'agriculture), 1941).

En quelque sorte, le programme d'expérimentation « Mh », dont nous voyons aujourd'hui les résultats, était déjà écrit.

1. Notion de bilan prévisionnel

C'est à partir des années 1960 que la notion de bilan prévisionnel de l'azote minéral mis à disposition des cultures a été définie de façon dynamique entre une date d'ouverture et une date de fermeture de ce bilan.

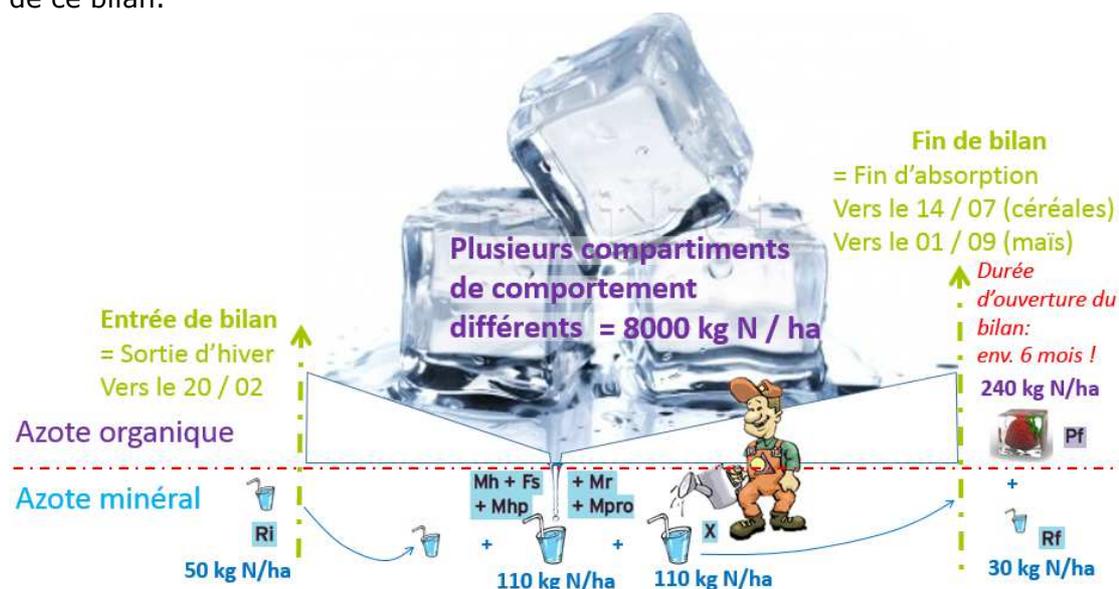


Figure 1. Schéma d'un bilan prévisionnel appliqué à l'exemple d'une culture de blé (80 q/ha) dans un sol breton

La figure 1 met en perspective les ordres de grandeur des différentes formes de l'azote du sol, avec, d'une part, l'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+ principalement) et, d'autre part, l'azote organique. Le bilan est calculé sur l'azote minéral et peut varier assez rapidement dans de fortes proportions au cours d'une année de quelques kilogrammes à quelques dizaines (plus rarement quelques centaines) de kilogrammes. L'azote organique, essentiellement présent sous forme de molécules complexes, est généralement de l'ordre de 6 à 10 tonnes d'azote par hectare en Bretagne.

Le compartiment d'azote organique est en proportion globalement beaucoup plus stable dans le temps. Il peut être de nouveau séparé conceptuellement en plusieurs « compartiments » de comportement très différents quant à leur accessibilité à l'action des macro et microorganismes du sol, et donc, quant à leur rapidité de minéralisation pouvant aller de quelques jours (urée) ou quelques semaines à plusieurs siècles pour les formes les plus stables (humus).

On peut d'ores et déjà noter que le terme « Mh » que nous emploierons souvent, qui résume l'expression « minéralisation de l'azote de l'humus du sol » est relativement impropre car il englobe des formes d'azote beaucoup plus diverses que les matières organiques humifiées stables du sol.

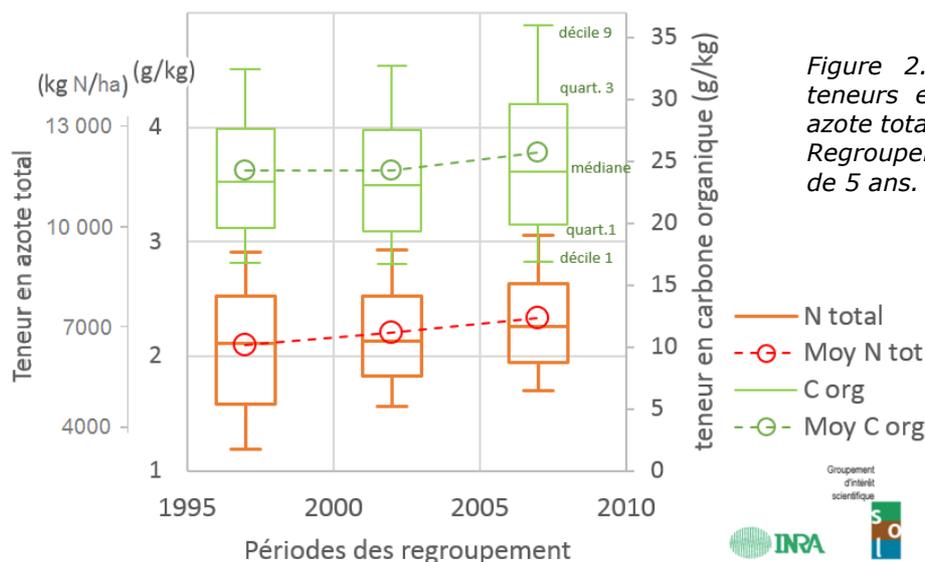
On remarquera que la période d'ouverture du bilan ne correspond qu'à une partie de l'année et que la minéralisation de l'azote du sol se produisant sur cette période est bien loin de représenter la

totalité de la minéralisation annuelle. L'agriculteur devra gérer également la partie hors cycle cultural de cette minéralisation pour en maximiser le recyclage, en concurrence avec la lixiviation ou la dénitrification.

2. Des stocks d'azote importants évoluant lentement

Le stock d'azote total du sol est contenu pour la quasi-totalité dans la matière organique. Environ 1/20^e de la matière organique est de l'azote, même si la mesure de la matière organique d'une terre se fait le plus souvent par dosage du Carbone.

Le carbone et l'azote du sol sont intimement liés (rapport C/N proche de 9 ou 10) et envisager la problématique de la fourniture d'azote par le sol revient à prendre en compte parallèlement la notion de « bilan carbone » du sol qu'on évoque aujourd'hui couramment au sujet du réchauffement climatique.



Chaque hectare contient entre 5 et 10 tonnes d'azote dans son horizon de surface (figure 2). Les horizons inférieurs peuvent aussi contenir des quantités non négligeables d'azote organique qu'il faudrait ajouter à ces stocks.

On ne peut guère interpréter dans le détail ces statistiques de la BDAT quant à leur évolution du fait que les parcelles analysées ne sont pas nécessairement les mêmes d'une période à une autre, ni même pour chacun des paramètres. Néanmoins, on doit considérer par exemple que pour atteindre l'objectif d'une augmentation annuelle de 4‰ du stock de carbone des sols, annoncé lors de la COP21, qui ne semble pas hors de portée, il faudra immobiliser chaque année plusieurs dizaines de kg d'azote par hectare.

A contrario, un strict équilibre du bilan global de l'azote sur les parcelles, associé à des pertes (lixiviation...) qui ne seront jamais nulles, verra décroître plus ou moins rapidement le stock de matière organique et donc de carbone du sol.

L'évolution intrinsèque de la matière organique en place dans les sols ne peut être étudiée que sur des expérimentations de longue durée, compte tenu de la lenteur du phénomène liée à la grande stabilité biologique de la plupart des molécules organiques en cause.

Un très bon exemple peut être observé par le suivi des flux et des stocks d'azote d'une case lysimétrique maintenue en sol nu et non fertilisée pendant 23 ans.

Sur les données de pertes par lixiviation, de pluviométrie et de teneur en azote totale de l'horizon de surface de cette case lysimétrique fournies par J.P. Sévère de la station expérimentale du CATE à St Pol de Léon, nous avons ajusté un modèle simple pour la minéralisation annuelle en la supposant proportionnelle au stock d'azote organique du sol et en appliquant le modèle de Burns pour le calcul de la lixiviation.

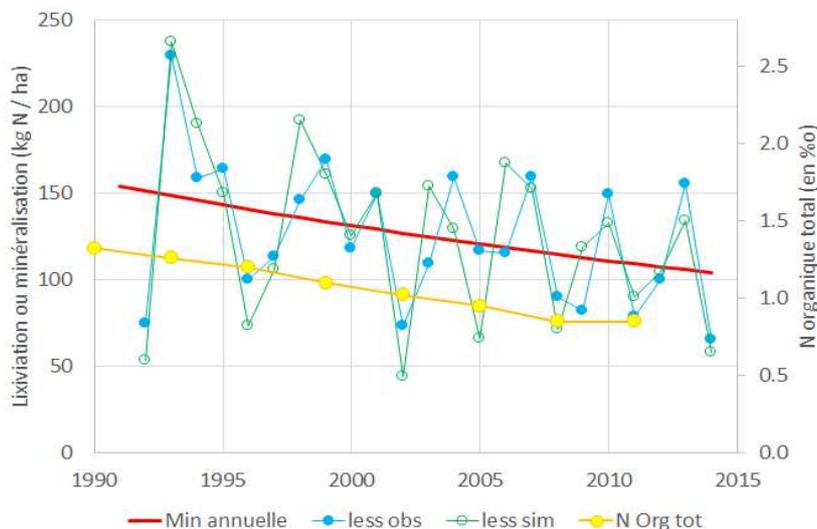


Figure 3. Evolution au cours du temps de la minéralisation annuelle calculée d'un sol de limon nu et non cultivé ni fertilisé en cohérence avec les pertes par lixiviation et l'évolution de la teneur en azote total mesurées

En l'absence d'apports ou de restitutions organiques, la minéralisation annuelle nette décroît avec les années, de même que le stock d'azote du sol (figure 3). Cette évolution est très lente (1 à 2% par an) et l'extrapolation du modèle obtenu nous indique qu'à ce rythme, il resterait encore 5% de la matière organique au bout de 130 ans environ.

Force est donc de constater que les apports à l'origine de la minéralisation de l'azote des sols échappent nécessairement à la mémoire du praticien actuel pour la majeure partie d'entre eux et qu'une approche comprenant l'analyse de certains paramètres du sol sera probablement nécessaire, même si elle n'est pas suffisante, pour prévoir les fournitures d'azote.

En outre, pour un meilleur ajustement du modèle, il a fallu faire intervenir une source extérieure d'azote (d'origine atmosphérique donc, par retombées ou fixation libre) d'une trentaine de kg d'azote par hectare et par an sans laquelle la matière organique semblait d'autant plus facilement minéralisable que le stock diminuait, ce qui est peu vraisemblable.

Ces sources d'azote sont conceptuellement séparée du poste « Mh » dans l'équation actuelle du bilan mais ces données nous montrent que lorsque l'on pratique des mesures de flux en conditions réelles, on prend forcément en compte d'autres sources d'azote que le seul poste « Mh » qu'il n'y aura pas lieu de chercher à rajouter par ailleurs.

3. Formalisation des postes du bilan et premières grilles pratiques d'évaluation du poste « Mh »

On ne peut hélas pas transformer chaque parcelle en case lysimétrique et rien ne permet d'extrapoler de telles observations à d'autres situations agronomiques.

On a ainsi conceptuellement divisée cette minéralisation en plusieurs postes additifs permettant de mieux prendre en compte les différents paramètres connus d'une parcelle dont on savait qu'ils avaient un impact sur les fournitures du sol (figure 4).

Les termes abrégés pour désigner ces différents postes ont maintes fois changé au cours du temps. L'équation du bilan la plus complète et qui correspond le mieux aux grilles de calcul actuelles de la dose d'azote est donnée dans ce tableau.

Il apparaît que l'objectif de mesurer « Mh » seul nécessite soit d'évaluer par ailleurs certains produits de la minéralisation qu'il faudra déduire du solde du bilan, soit de modifier fortement dans la future grille les postes correspondants. Dans ce dernier cas, le terme « Mh » n'est alors plus vraiment approprié.

Postes nommément identifiés dans les grilles azote actuelles	Postes pris en compte lors de la mesure des fournitures du sol par bilan de l'azote	Postes provenant de la minéralisation de la matière organique du sol	
			$bY + Rf + [Pv + Pd] + Pl = Ri + Mh + Mr + Ma + Ap + [Apl + Af] + X$
			bY = besoins du peuplement végétal. Y est le rendement par hectare et b l'azote absorbé par unité de rendement,
			+ Rf = azote minéral à la fermeture du bilan (reliquat d'azote minéral indisponible pour la culture),
			+ [Pv + Pd] = pertes par voie gazeuse (volatilisation et dénitrification),
			+ Pl = pertes par lessivage,
			=
			Ri = azote minéral à l'ouverture du bilan (reliquat d'azote minéral d'hiver),
			+ Mh = minéralisation nette de l'humus du sol,
			+ Mr = minéralisation nette des résidus de récolte du précédent,
			+ Ma = minéralisation nette des amendements organiques,
			+ Ap = arrière-effet d'anciens retournements de prairies,
			+ [Apl + Af] = apports incontrôlés (pluies, fixation non symbiotique)
			+ X = quantité d'azote engrais nécessaire.

Figure 4. Equation complète du bilan prévisionnel de l'azote correspondant aux outils actuels officiels en Bretagne de raisonnement de la dose d'azote et lien avec les flux d'azote mesurables

Dès le début de la méthode du bilan, il a fallu proposer des moyens pragmatiques d'évaluation de la minéralisation du sol (figure 5), sans que les observations agronomiques en Bretagne ne puissent valider en pratique ces propositions.

(a) Contribution de l'humus du sol

Teneur en CaCO ₃	Mh (kg N/ha)
< 20 %	40
> 20 %	20

(b) Contribution de l'humus du sol

Argile \ pH	< 6.5	6.5 < < 7.5	> 7.5
< 12%	40	80	40
> 12%	60	80	60

Figure 5. Premières propositions de mode pragmatique d'évaluation du terme « Mh » au début des années 1980 (a) pour les céréales, (b) pour le maïs

Des facteurs liés au sol tels que le taux de calcaire, le pH ou le taux d'argile sont pris en compte, mais pas le stock d'azote total qu'on ne sait pas interpréter en termes de flux annuel de minéralisation. C'est cette interprétation que les agronomes ont ensuite tenté d'explicitier en proposant des modèles fondés sur le principe : *Minéralisation annuelle = K x stock d'azote total* où « K » dépend de différents facteurs.

D'abord Rémy et Viaux en 1984 ont proposé une formule en ne faisant intervenir que des facteurs d'ordre pédo-climatiques : $K = f(pH, Temp\ moy\ ann, Arg, CaCO_3)$, puis Machet et al. en 1990 dans le cadre du programme « Azobil » développé par l'INRA : $K = f(Temp\ moy\ ann, Arg, CaCO_3) \times fr$ où « fr » est un facteur lié au système de culture et d'élevage (figure 6).

Résidus de récolte	Fréquence d'apports déjections			
	Rien	5 à 10 ans	3 à 5 ans	< 3 ans
Enlevés ou brûlés	0.8	0.9	1	1.1
Enfouis 1 fois / 2	0.9	1	1.1	1.2
Toujours enfouis	1	1.1	1.2	1.3

Figure 6. Facteur « système » multiplicatif proposé par le programme « Azobil » pour pondérer la minéralisation annuelle

A partir des années 1990, les outils pratiques de développement en Bretagne ont repris les propositions nationales basées sur le taux de matière organique (figure 7) bien qu'ils ne correspondaient pas au contexte pédologique régional de taux de matière organique élevés mais très stable pour la plus grande part.

(a)		Minéralisation de l'humus						
		Taux de matière organique						
sols non calcaires	pH	1.5%	2.0%	2.5%		3% et +		
				% argile < 25	% argile > 25	% argile < 25	% argile > 25	
		5	30	40	55	50	60	50
		6	45	60	75	60	90	70
6 et plus	60	80	100	80	120	90		
Sols calcaires > 20 % CaCO ₃		50						
Sols superficiels ou/et à teneur en argile < 10 %		30						

(b)	Teneur en matière organique des sols			
	< 2%	de 2 à 3%	de 3 à 4%	> 4%
pH optimal	40	50	65	75
Sols superficiels ou caillouteux	30			

(c)	Teneur en matière organique des sols		
	< 2%	de 2 à 3%	> 3%
pH optimal	40	50	65
Sols superficiels ou caillouteux	30		

Figure 7. Différents tableaux permettant d'évaluer la contribution de l'humus du sol aux fournitures du sol en fonction du taux de matière organique : (a) CORPEN 1992, (b) Bretagne de 1992 à 1997, (c) Bretagne de 1998 à 2006

4. Problèmes rencontrés et formalisation de la grille actuelle

Si le poste « Mh » devait être évalué sur la base d'une quantification de la matière organique du sol, il existerait une redondance avec les postes « Ma » et « Ap » qui seront d'ailleurs par la suite appelé « Mha » et « Mhp » qui proviennent eux-mêmes de la minéralisation d'un stock de matière organique du sol (figure 8).

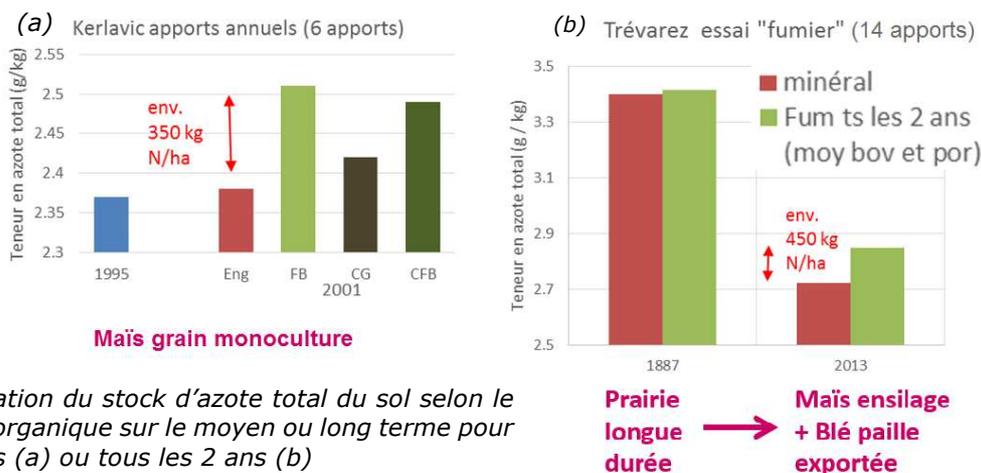


Figure 8. Différentiation du stock d'azote total du sol selon le régime d'entretien organique sur le moyen ou long terme pour des apports annuels (a) ou tous les 2 ans (b)

Alors même qu'un état d'équilibre correspondant aux différents régimes d'apports organiques n'est pas encore atteint, ce qui demanderait encore plusieurs décennies d'apports réguliers, les déjections animales épandues régulièrement ont laissé dans le sol un stock supplémentaire d'azote organique de plusieurs centaines de kg par ha, soit de 5 à 10% du stock total du témoin minéral.

L'effet d'un changement radical du système de culture (destruction en 1987 d'une prairie de longue durée à Trévárez) reste néanmoins prépondérant sur l'évolution de ce stock d'azote.

En plus de ce qui a été dit précédemment, deux autres raisons ont amené à revoir les grilles azote et en particulier le tableau du poste « Mh » :

- de nouveaux travaux sur la fourniture d'azote lors de la destruction de prairies ramènent à 2 ans seulement leur impact en ne tenant compte que de leur effet direct
- un arrêté du 2^{ème} programme d'action « directive nitrates » qui donne une portée réglementaire aux grilles azote et le développement des contrôles avec les litiges qu'ils amènent.

Le schéma de principe décrit sur la figure 9 est la base de cet ajustement. Il suppose en particulier une situation d'équilibre des pratiques actuelles sur plus de 20 ans et en conséquence :

- on retrouve la totalité de l'azote des déjections animales apporté en moyenne interannuelle (aux pertes près à l'épandage) sur les postes « Xa » (effet direct des déjections : disponible pour la première culture) et « Ma »
- le stock de matière organique du sol reste constant
- le terme « Mh » ne provient que des arrières-effets des résidus de cultures et de pâturage.

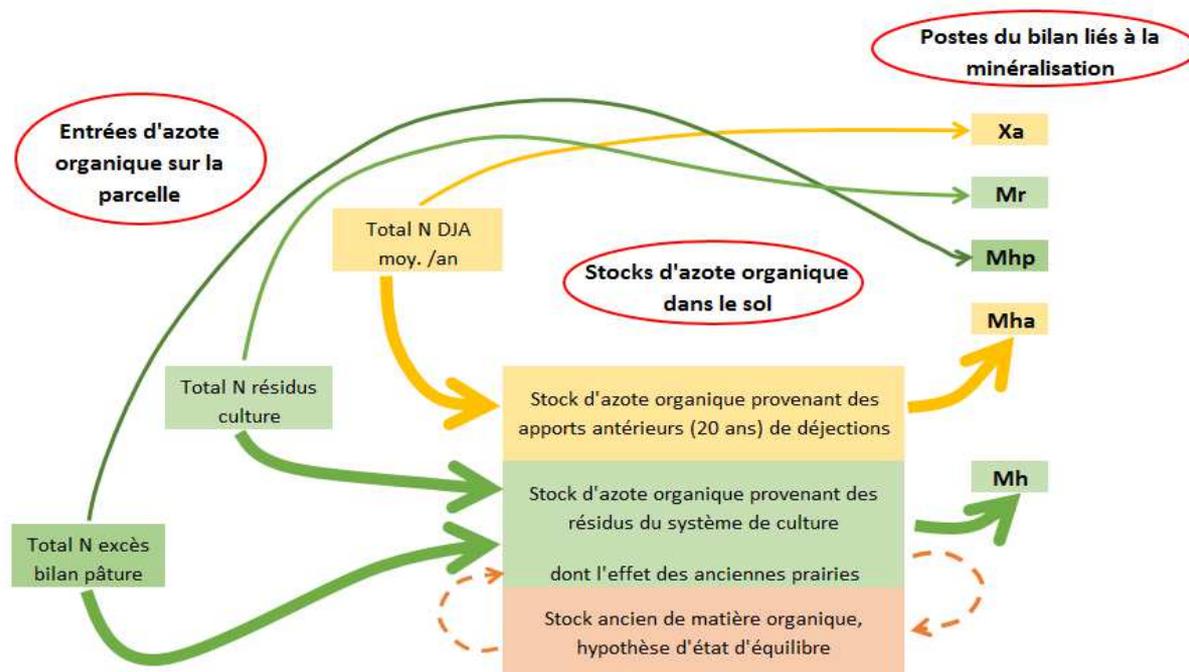


Figure 9. Schéma de principe de paramétrage des postes de fournitures du sol de la grille actuellement utilisée en Bretagne

Figure 10. Tableau de paramétrage du poste « Mh » de la grille actuellement utilisée en Bretagne

Contribution de l'humus du sol et du système de cultures

Système de cultures		kg N/ha
cas général		70
Maïs - Céréales	couverture des sols OU enfouissements réguliers de cannes de maïs ou pailles	80
	couverture des sols et enfouissements réguliers de cannes de maïs ou pailles	90
Prairies pâturées avec 3 pâturages par an	3 années sur 10	90
	5 années sur 10	100
	8 années sur 10	110
Légumes	Système endivier- légumes	70
	Légumes céréales ou lég. Industries	100
	Légumes frais 100 %	125

Ce paramétrage tient compte au mieux du niveau actuel des références agronomiques mais présente néanmoins certains inconvénients que les résultats de l'étude « Mh » pourrait résoudre :

- l'hypothèse de stabilité du stock d'azote organique du sol, si elle est probablement proche de la réalité moyenne (figure 2), n'est pas vérifiée pour toutes les parcelles, dans tous les systèmes de culture
- il n'est pas tenu compte notamment de la nature ancienne (> 20 ans) de l'occupation du sol qui pourrait induire un facteur pédo-géographique
- un seul milieu pédo-climatique est considéré au regard des conditions de minéralisation
- le fait de supposer que le système de culture et de restitution des déjections animales qu'on est capable de décrire à dire d'agriculteurs ou au vue du cahier de fertilisation est stable depuis au moins 20 ans reste une hypothèse extrêmement forte qu'il est impossible de vérifier.

Bibliographie

- Genech de la Louvière T.**, 1941. "Manuel d'Agriculture". Neuvième édition, 1-32
- Gros A.**, 1957. "Engrais, Guide pratique de la fertilisation". Deuxième édition, 111-135
- Braconnier R., Glandard J.**, 1952. "Nouveau Larousse Agricole", 91-107
- Viaux P.**, 1980. "Fumure azotée des céréales d'hiver". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation, N° 43 déc. 1980, 10-26
- Desvignes P.**, 1980. "Fumure azotée du maïs". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation, n°43 déc. 1980, 28-29
- Taureau J.C.**, 1987. "Evaluation de l'offre du milieu en azote, Rappel du mode d'évaluation habituellement retenu". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation azotée et soufrée, n°115 juin 1987, 43-45
- Taureau J.C.**, 1987. "Evaluation de l'offre du milieu en azote, Arrière effet des engrais de ferme et prairies retournées". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation azotée et soufrée, n°115 juin 1987, 58
- Taureau J.C., Ziegler D.**, 1987. "Evaluation de l'offre du milieu en azote, Méthode d'approche des fournitures du sol". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation azotée et soufrée, n°115 juin 1987, 46-47
- Laurent F.**, 1987. "Azote et Maïs, Discussions à partir du modèle du bilan". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation azotée et soufrée, n°115 juin 1987, 126-131
- Ziegler D.**, 1987. "Azote et déjections animales, Valeur azotée des engrais de ferme". In : Perspectives agricoles, Spécial fertilisation azotée et soufrée, n°115 juin 1987, 159-164
- Orsini F.**, 1989. "La fumure azotée se raisonne", "Les sources d'azote", "La fertilisation azotée de quelques cultures". In : Dossier Agronomie partie 1, A la pointe de l'élevage, n°210 oct. 1989, 27-34
- Carlotti B.**, 1992. "Recueil des bases de préconisation de la fertilisation azotée." Ministère de l'agriculture, Ministère de l'environnement, CORPEN (Ed.), 136 pages
- Taureau J.C.**, 1995. "Les bases de calcul de la fertilisation azotée". In : Actes Journée azote, Directive nitrates Ploërmel 31 oct. 1995, 8-17
- Leterme P.**, 1995. "Les difficultés de l'approche de la dose optimale par l'équation du bilan de masse dans l'Ouest". In : Actes Journée azote, Directive nitrates Ploërmel 31 oct. 1995, 18-44
- Simon J.C. et Le Corre L.**, 1992. "Fertilisations annuelles et lessivage de l'azote nitrique." Fourrages, 129, 3-10
- COMIFER**, 1996. "Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles", Comifer Ed. 59 p
- Chambres d'agriculture de Bretagne, Coopératives agricoles de l'Ouest, Négoce Ouest**, 2002. "Le conseil en fertilisation azotée". In Référentiel technique commun des prescripteurs, Charte des prescripteurs de Bretagne, 56 p
- Chambres d'agriculture de Bretagne, Pôle Agronomie**, 2007. "Grille de calcul de la dose d'azote prévisionnelle des céréales". In : Cap Agro oct. 2007, 28-29
- Grall J.**, 2007. "Nouvelles grilles azote". In : Cap Agro oct. 2007, 17
- Besnard A., Laurent F., Hanocq D., Vertès F., Nicolardot B., Mary B.**, 2007. "Effect of timing of grassland destruction on nitrogen mineralization kinetics". In : Grassland Science in Europe, 12, 335-338
- Préfecture du Finistère**, 2001. "Arrêté N°2001-1257 relatif au 2^{ème} programme d'action à mettre en œuvre en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole". In : Recueil spécial des actes administratifs, août 2001, 50 p

Présentation du réseau Mh

Yvon Lambert¹, Thierry Morvan², Laure Beff²

¹Chambres d'agriculture de Bretagne

²INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

1. Les bases de conception du dispositif expérimental

1.1. Les facteurs déterminants du terme Mh

Le formalisme adopté au niveau national par le Comifer (2013) pour prédire la minéralisation de l'azote organique du sol repose sur le modèle suivant :

$$Mh = \underbrace{Km \cdot TNorg \cdot FSyst}_{Vp} \cdot Jn$$

Vp désignant la vitesse potentielle de minéralisation journalière (kg N/ha/jour normalisé) et **Jn** le temps normalisé, correspondant à la conversion du temps calendaire en « équivalents jours » à la température de référence de 15°C et à humidité optimale.

Vp est calculée à partir du stock total d'azote organique du sol (**TNorg**) auquel on applique un coefficient **Km**, paramétré par une fonction qui intègre les teneurs en argile et en calcaire de l'horizon de surface. La minéralisation est ensuite modulée par un coefficient 'système' (**FSyst**) renseigné par l'histoire culturale de la parcelle qui prend en compte le système de culture mais aussi les apports d'effluents effectués.

1.2. Le choix du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a donc été conçu autour des trois facteurs déterminants du terme Mh qui ressortent du formalisme du Comifer, à savoir : les caractéristiques sol, le climat et l'histoire culturale. Le choix d'un réseau de parcelles a donc été retenu de façon à pouvoir intégrer les principaux types de sol ainsi que les gradients climatiques présents sur la région Bretagne.

Une attention particulière a également été portée sur le choix des parcelles pouvoir se mettre dans les meilleures conditions possibles pour étudier l'effet 'système' à partir de situations contrastées. La recherche des parcelles a donc été engagée avec la volonté de dégager, *a priori*, 3 niveaux d'effet 'Système' :

Faible : parcelles exploitées sans apport d'effluent depuis au moins 10 ans

Moyen : parcelles en rotation type maïs/blé avec apport de fumier sur le maïs

Fort : parcelles avec apports annuels d'effluents ou présence de prairies dans la rotation

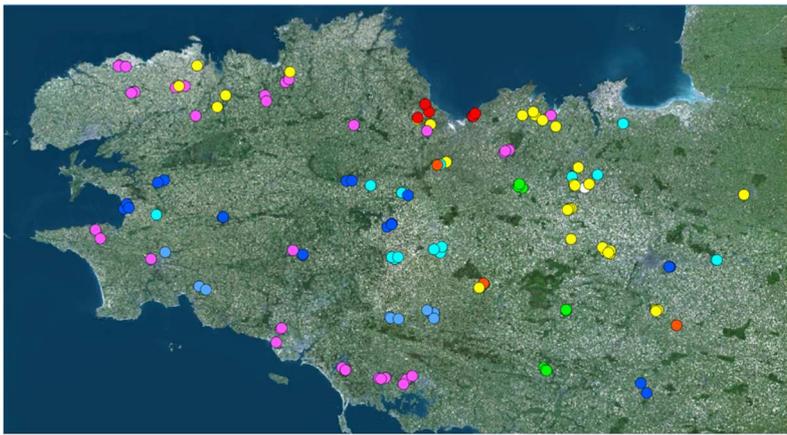
Les 3 parcelles étant situées dans un environnement très proche de façon à pouvoir étudier l'effet 'système' dans un même contexte pédo-climatique.

2. Le réseau Mh (2010-2014)

2.1. Le réseau de parcelles

Le réseau Mh est constitué de 137 parcelles. Une pré-campagne a été effectuée en 2010 avec 75 parcelles avant de prendre sa taille définitive en 2011. Les parcelles du réseau ont été cultivées pendant ces 4 ou 5 années en monoculture maïs ensilage, sans aucune fertilisation azotée et en absence de couverts végétaux.

La répartition des parcelles confère au réseau une bonne représentativité des conditions de sol et de climat de la région Bretagne (carte 1).



Carte 1. Localisation des 137 parcelles du réseau Mh et répartition selon la nature des matériaux parentaux géologiques

2.2. Représentativité des sols du réseau Mh

Toutes les parcelles du réseau ont fait l'objet d'un profil pédologique, méthode tarière. Les classes dominantes sont les suivantes : 36 sols sont développés sur un matériau parental constitué de granite et gneiss, 13 sur micaschistes, 32 sur des limons éoliens et 37 sur schistes (tableau 1).

Tableau 1. Répartition des parcelles du réseau Mh selon les classes de matériaux géologiques parentaux

Code 4C simplifié	Code 4 critères	Description	Effectifs
A	A, B, C, D, E, S, T, Z	autres	1
F	F, R	schiste gréseux et micaschiste	13
G	G, I	granite et gneiss	36
V	H, M, U, V, W	alluvions/colluvions	8
L	L	limon	32
N	N	schiste tendre	16
O	O, P	schiste moyen/dur	21
Q	Q, X	grès dur, quartz et poudingues	4
Y	Y	roches volcaniques	6

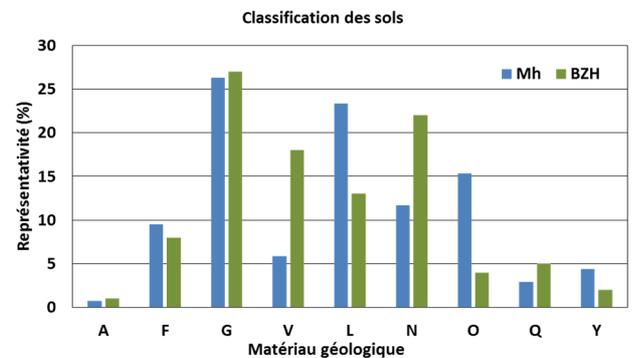


Figure 1. Comparaison à la carte régionale des matériaux géologiques. BDAT (Lacoste et al. 2011)

La comparaison de cette répartition des parcelles du réseau Mh avec la carte régionale des matériaux géologiques (figure 1) nous permet de constater que les parcelles Mh couvrent tous les matériaux géologiques présents en Bretagne. Les micaschistes (F), granites (G), limons (L) et schistes (N, O) sont bien représentés. On peut noter un léger déséquilibre dans les effectifs entre les schistes tendres et schistes durs. Les alluvions (V) sont sous représentées dans le réseau Mh mais ces situations n'étaient pas particulièrement ciblées car souvent en situations hydromorphes.

Les parcelles du réseau Mh sont donc représentatives de la diversité pédologique de la région.

2.3. Diversité des situations culturelles

Le recueil des histoires culturelles de chaque parcelle a été réalisé auprès des agriculteurs avec une volonté de remonter à 15 ans dans le temps. Il nous a permis de bien caractériser, à la fois, le système de cultures mais aussi le mode de gestion des apports d'effluents pour chaque situation.

La figure 2 présente la répartition des successions culturelles du réseau Mh. 67% des parcelles sont conduites en rotation avec des cultures annuelles uniquement. La rotation céréales/maïs, souvent du blé, y est dominante (52% des effectifs). Les rotations en monoculture maïs représentent un nombre non négligeable de situations (30%). Les rotations plus longues qui font intervenir du colza ou des protéagineux sont peu représentées, 15% des effectifs, mais ceci est également le reflet de ce qui se pratique sur la région.

22% des parcelles intègrent une prairie dans leur rotation. Cette prairie, essentiellement pâturée, a une durée de vie de 5 ans et plus. Les prairies de courte durée (2-3 ans) sont nettement moins fréquentes (20% des effectifs) et sont souvent utilisées en fauche.

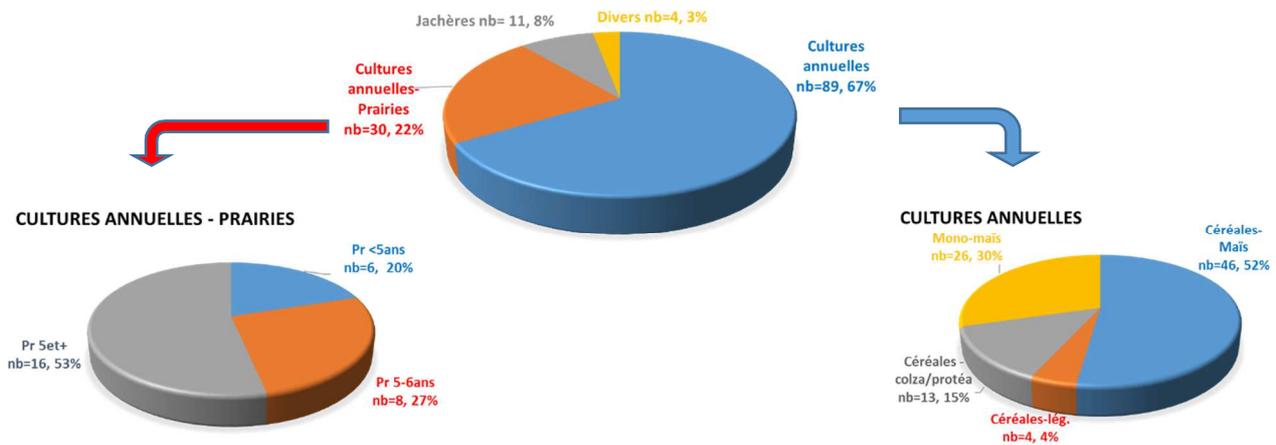


Figure 2. Répartition des successions culturales renseignées pour 134 parcelles du réseau Mh

Parmi les 75 parcelles du réseau Mh qui, historiquement ont reçu des effluents, la majorité d'entre elles (69%) ne reçoivent qu'un seul type d'effluent (figure 3). Ce dernier est pour 58% des cas du fumier de bovins contre 17% seulement en lisier de porcs. Parmi les parcelles qui reçoivent 2 déjections (29%), l'association fumier de bovins et lisier de porcs est la plus fréquente (59% des cas).

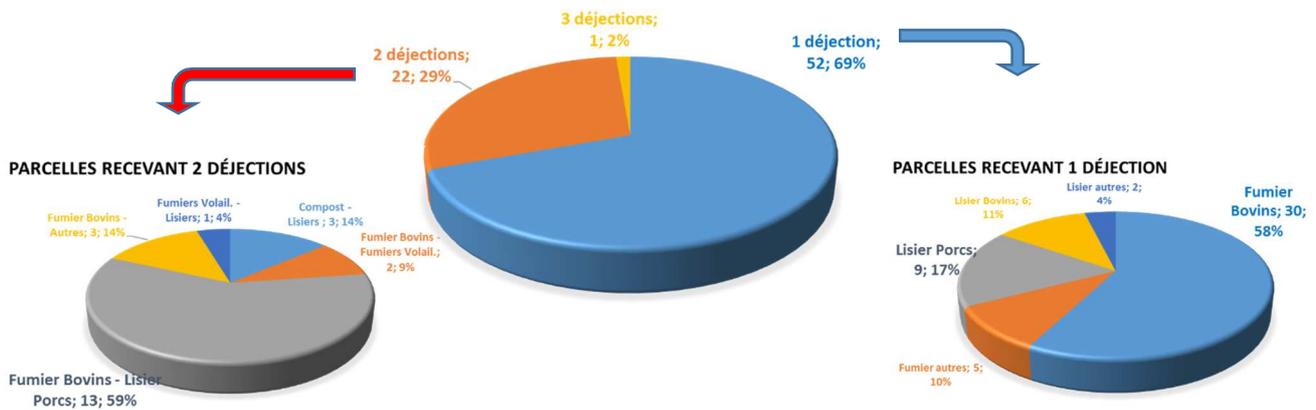


Figure 3. Répartition des pratiques d'épandage des effluents renseignées pour les 75 parcelles du réseau Mh en fertilisation organique

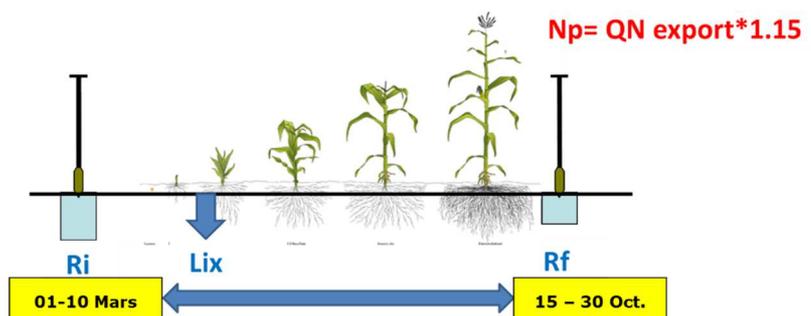
En conclusion, la diversité des situations culturales rencontrées au sein des parcelles du réseau est large et donc très opportune pour l'étude de l'effet 'système'. Cette diversité est également représentative des rotations et des pratiques d'épandage d'effluents rencontrées sur la région.

3. La démarche expérimentale pour déterminer le terme Mh

3.1. Calcul de bilans annuels azotés et mesures de terrain

Le flux de minéralisation nette (**Mn**) a été quantifié par le calcul de bilans azotés annuels d'une culture non fertilisée de maïs fourrage :

$$Mn = (Rf - Ri) + Lix + Np$$



Où **Np** est l'azote absorbé par la culture, **Ri** la quantité de N-NO₃ du sol mesurée début mars sur le profil 0-90 cm, **Rf** le reliquat de N-NO₃ au début de l'automne (Octobre) sur le profil 0-90 cm, **Lix** la lixiviation éventuelle de printemps post Ri estimée par le modèle Stics (Brisson et al., 2008).

L'analyse des données a été réalisée uniquement sur les résultats des 3 dernières années d'expérimentation : 2012, 2013, 2014. Nous pouvons alors considérer que la minéralisation nette Mn calculée à partir des mesures de terrain correspond principalement au flux Mh étudié. En effet, la contribution d'autres compartiments (résidus de culture ou de couverts végétaux, effets à court terme des récents apports d'effluents) peut être considérée comme négligeable à la suite des 2 premières années d'expérimentation.

3.2. Modélisation du climat et variable d'intérêt Vp

Les valeurs de bilan issues des mesures de terrain sont à la fois dépendantes des caractéristiques sol* système mais aussi du climat. D'où la nécessité de revenir sur le formalisme **Mh = Vp . Jn** pour l'interprétation des données de bilan.

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 (plus d'informations dans la présentation sur la variabilité du climat et du temps normalisé). Un jour normalisé correspond à un jour où le sol est à une température de 15°C et à l'humidité à la capacité au champ.

La division des valeurs de bilans considérés comme étant une bonne estimation de Mh, par le nombre de jours normalisés estimé entre les deux dates de reliquats nous permet d'accéder à la variable Vp qui sera notre variable d'intérêt principale pour l'interprétation des résultats.

$$Vp = Mh / Jn$$

Vp : vitesse potentielle de minéralisation exprimée en kg N/ha/Jn

4. Mesures de terrain et démarche qualité

4.1. Dispositif expérimental de base et précision des mesures

Le réseau Mh s'inscrit avant tout dans une démarche scientifique visant à fournir un référentiel sur la minéralisation de la MO des sols de Bretagne. L'ensemble des mesures de terrain ont donc été réalisées avec répétitions de façon à en connaître la précision statistique avant toute démarche d'interprétation.

Le dispositif mis en place au sein d'une parcelle agricole est schématisé à la figure 4.

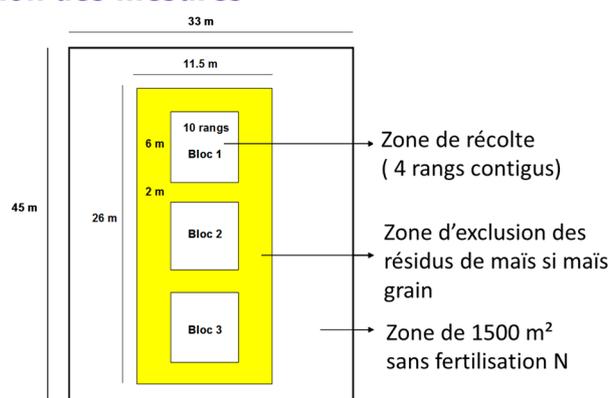


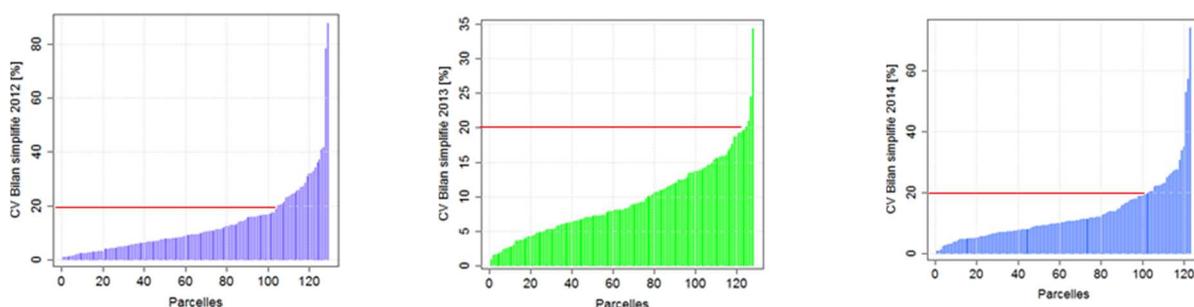
Figure 4. Schéma d'une parcelle expérimentale du réseau Mh

L'évaluation de la précision des composantes du bilan, à partir des coefficients de variation (CV) moyens ou médians (tableau 2), permet de constater que le jeu de données obtenu est de qualité et offre une base intéressante pour une future interprétation. Les CV médians sur les valeurs de bilans simplifiés sont respectivement de 10.9%, 9.3% et 11.7% pour les années 2012, 2013 et 2014. Cette précision repose avant tout sur une qualité des mesures de rendement et en conséquence sur l'estimation de l'azote exporté par la culture. La variabilité expérimentale observée sur les reliquats est plus importante mais reste tout à fait acceptable.

Tableau 2. Coefficients de variation des composantes du bilan

	Ri 0-90cm	Rf 0-90 cm	Rdt maïs	QN exp	Bilan simplifié
Médiane 2014	12.3%	7.9%	6.8%	9.8%	11.7%
Médiane 2013	13.9%	10.1%	7.9%	9.4%	9.3%
Médiane 2012	12.7%	14.3%	8.1%	10.2%	10.9%

Les figures 5a, b, c présentent, pour les 3 années, la répartition des CV obtenus sur les valeurs de bilan. Environ 100 parcelles par an ont un CV inférieur à 20%, ce qui témoigne de la bonne répétabilité et de la haute qualité des mesures.



Figures 5a, b, c. Répartition des valeurs des coefficients de variation des bilans mesurés sur les parcelles du réseau Mh pour les 3 années

4.2. Suivi annuel et qualification des données

Dans un souci permanent d'obtenir des données de terrain de qualité, différents suivis ont été mis en place, à savoir :

- un suivi désherbage rapproché dans la mesure où des parcelles de maïs en situation non fertilisée sont nettement plus sensibles à l'enherbement. Ce fut la principale difficulté dans la conduite de culture
- un contrôle de l'ensemble des analyses de laboratoire et des prélèvements de reliquats. A titre d'exemple, un jalon était posé auprès de chaque trou de prélèvement pour les reliquats de façon à vérifier à la fois le nombre et l'emplacement des trous
- la conservation d'échantillons de maïs en double dans l'attente des résultats pour effectuer des contrôles, si besoin.

Un travail de qualification des données a été réalisé pour effectuer une sélection de parcelles très fiables sur lesquelles l'interprétation finale peut reposer. Cette démarche se fait à 2 niveaux, à travers :

- l'attribution de notations finales traduisant l'indice de confiance lié aux mesures de l'année pour une parcelle donnée
- la construction d'un indice de confiance à la parcelle pluriannuel et présenté dans la présentation intitulée « Démarche de modélisation de la minéralisation ».

Bibliographie

- Comifer.**, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies
- 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. Thèse
- Lemercier B.**, Programme Sols de Bretagne, 2005-2010. Rapport final. Site internet : www.sols-de-bretagne.fr
- Brisson N., Launay M., Mary B. and Beaudoin N.**, 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. INRA, Rd 10, 78026 Versailles Cedex, France, Editions Quae

Les bilans mesurés et leurs composantes

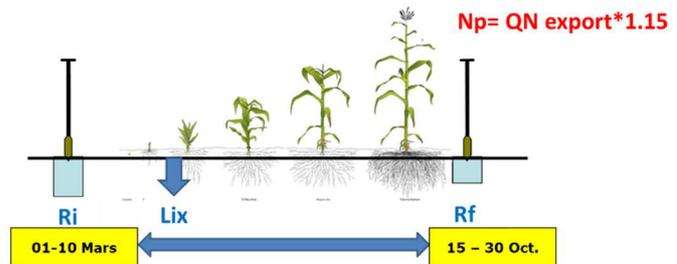
Yvon Lambert¹, Thierry Morvan², Laure Beff²

¹Chambres d'agriculture de Bretagne

²INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

1. Méthodologie de calcul des bilans azotés annuels (rappel)

Le flux de minéralisation nette (**Bilan Mh**) a été quantifié par le calcul de bilans azotés annuels d'une culture non fertilisée de maïs fourrage et ceci, entre 2 dates de reliquats données :



$$\text{Bilan Mh} = (Rf - Ri) + Lix + (QN \text{ export} * 1.15)$$

Les bilans Mh intègrent donc 2 composantes :

Une composante plante ($QN \text{ export} * 1.15$) : elle correspond à l'azote absorbé par la culture. Un premier calcul d'azote exporté par la culture ($QN \text{ export}$) est d'abord réalisé à partir des pesées de récolte mesurées sur le terrain multipliées par les teneurs en matière sèche et en azote des plantes. Un coefficient de 1.15 est alors appliqué à $QN \text{ export}$ pour tenir compte de la partie racinaire.

Une composante sol $(Rf - Ri) + Lix$: elle traduit les variations de stocks d'azote dans le sol entre les 2 dates de reliquats. La lixiviation de printemps y est estimée pour chaque parcelle par le modèle Stics.

Les reliquats entrée (Ri) ont généralement été mesurés sur la 1^{ère} décade de mars de façon à se positionner plutôt en fin de période de lixiviation hivernale et juste avant la reprise significative de minéralisation des sols.

Les reliquats fin (Rf) ont été retardés le plus longtemps possible pour capter au mieux la minéralisation d'automne, sans s'exposer à la période de début de drainage.

2. La gamme de variation des valeurs de bilans Mh

Les valeurs moyennes de bilans sont relativement élevées, respectivement de 158, 160 et 139 kg N/ha pour les années 2012, 2013 et 2014. La moyenne de 2014 est légèrement inférieure du fait d'un nombre de jours plus faible entre les 2 reliquats. Les reliquats d'automne ayant été effectués 15 à 20 jours plus tôt afin de permettre aux agriculteurs de semer une prairie ou une céréale compte tenu de l'arrêt du dispositif (tableau 1).

La distribution des résultats annuels pour l'ensemble des parcelles est tout à fait comparable pour les 3 années (figure 1). Elle fait ressortir une gamme de variation importante des valeurs de bilan. Les valeurs calculées pour le centile 10 vont de 76 à 93 kg N/ha pour atteindre 211 à 251 kg N/ha pour le centile 90, soit un facteur de variation de 3.

Ces premières mesures de terrain viennent donc vérifier notre hypothèse de travail de départ. A savoir, des flux de minéralisation nette pouvant être très différents d'une parcelle à l'autre sur la région Bretagne.

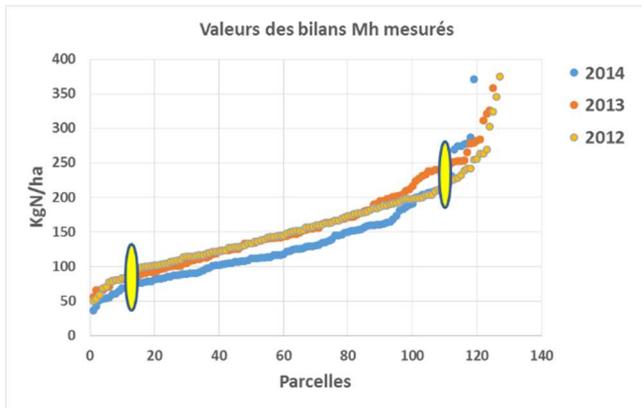


Figure 1. Répartition des valeurs de bilans pour l'ensemble des parcelles et par année

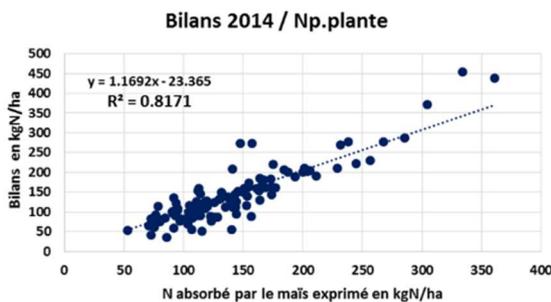
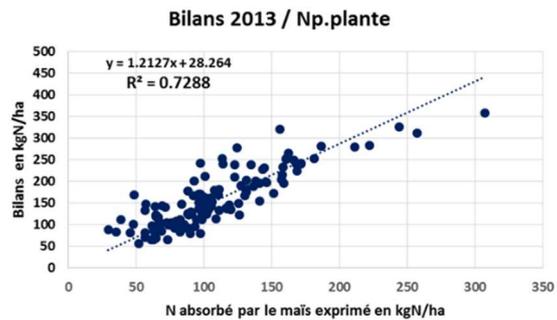
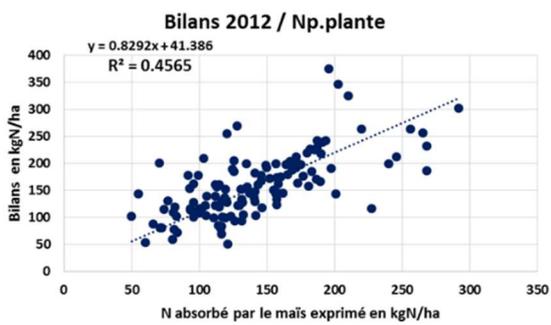
Tableau 1. Valeurs moyennes et variabilité des bilans Mh

Année	Bilan Moyenne	Nb Jcal	Bilan SD	Q10	Q90
2014	139	211	71.4	76	211
2013	160	232	64.8	85	251
2012	158	227	59.1	93	230

3. La composante plante des bilans Mh

3.1. Relation bilan Mh et azote absorbé par les plantes

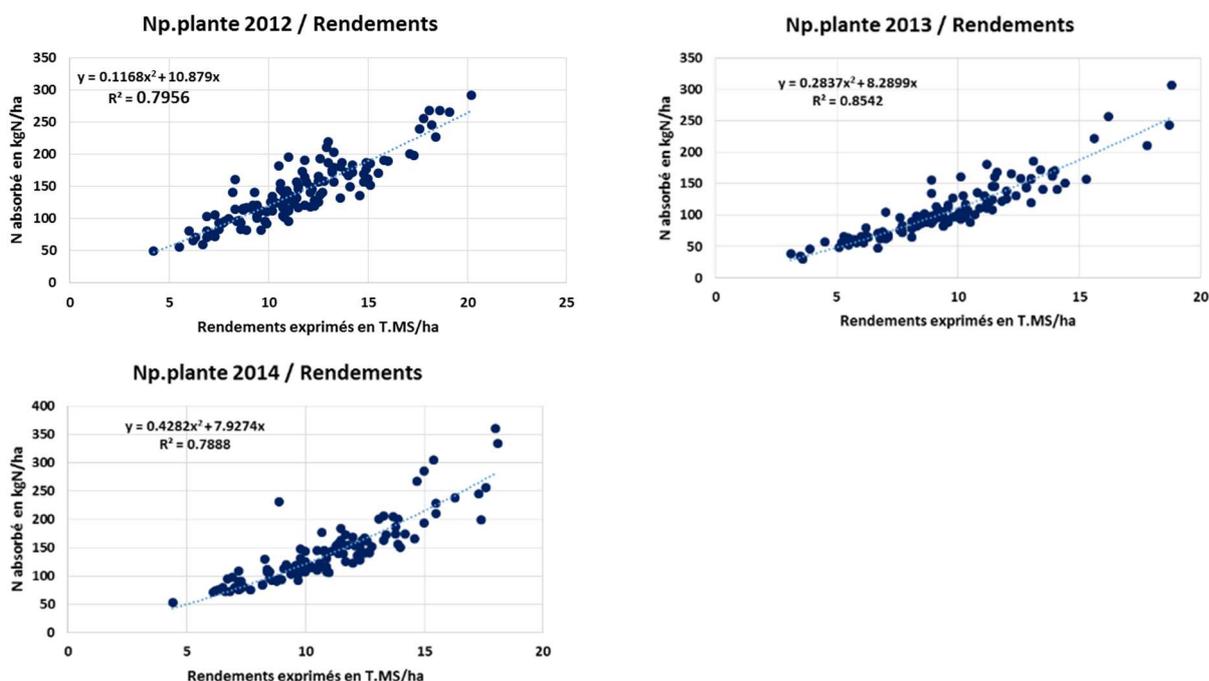
L'azote absorbé par les plantes explique 73 et 82% de la variabilité des Bilans Mh en 2013 et 2014. Par contre, cette part explicative diminue à 46% pour l'année 2012 (figures 2a, b, c). Il en ressort que l'azote absorbé est la composante principale des termes du bilan Mh mais reste insuffisante pour en interpréter la variabilité. Ces résultats justifient pleinement la mesure, en complément, de reliquats pour une meilleure approche du terme Mh.



Figures 2a, b, c. Relation entre les valeurs de bilans Mh et l'azote absorbé par les plantes pour 2012, 2013, 2014

3.2. Relation azote absorbé par les plantes et rendements

L'azote absorbé par le maïs (Np) dépend respectivement à 80, 85 et 79% du rendement de la culture pour 2012, 2013 et 2014 (figures 3a, b, c).



Figures 3a, b, c. Relation entre les valeurs de rendements et l'azote absorbé par les plantes pour 2012, 2013, 2014

Les quantités moyennes d'azote absorbé en 2012, 2013 et 2014 sont respectivement de 142, 109 et 141 kg N/ha et présentent un écart type élevé, à l'image des valeurs de bilan (tableau 2). Les rendements obtenus pour des parcelles conduites sans fertilisation azotée depuis 2010, témoignent d'un niveau de minéralisation des sols élevé mais surtout très variable (tableau 3). Les rendements mesurés vont, pour le centile 10, de 6.1 à 7.4 t MS/ha pour atteindre 13.2 à 15.2 t MS/ha, pour le centile 90.

Tableau 2. Valeurs moyennes et variabilité de l'azote absorbé par la culture (Np)

Année	Np.Moyenne	Np. SD	Q10	Q90
2014	141	58.4	80	206
2013	109	45.6	62	162
2012	142	48.4	83	198

Tableau 3. Valeurs moyennes et variabilité des rendements mesurés

Année	Rdt.Moyenne	Rdt abs. SD	Q10	Q90
2014	10.8	2.83	7.2	14.6
2013	9.5	2.99	6.1	13.2
2012	11.4	3.16	7.4	15.2

4. La composante sol des bilans Mh

Les variations de stocks d'azote dans le sol, (Rf-Ri)+Lix, peuvent représenter plusieurs dizaines de kg N/ha dans le calcul des valeurs de bilan (tableau 4). Leur impact est contrasté selon les années :

- fort en 2013 où le solde moyen est de + 54 kg N/ha. L'ensemble des parcelles fait ressortir un solde positif (figure 4). Le terme Rf, témoin d'une minéralisation d'automne élevée, contribuant largement à ce solde excédentaire
- faible en 2014 où le solde moyen est de + 3 kg N/ha.

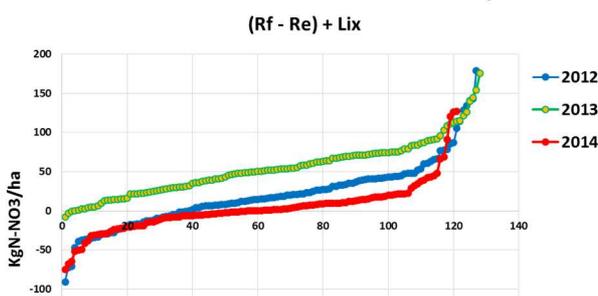


Tableau 4. Valeurs moyennes et variabilité de la composante sol, (Rf-Ri)+Lix, des bilans

Année	Rf-Re+Lix.Moy.	Rf-Re SD	Q10	Q90
2014	3	31.8	-29	35
2013	54	34.7	13	93
2012	20	42.9	22	89

Figure 4. Répartition des valeurs du terme (Rf-Ri)+Lix pour l'ensemble des parcelles et par année

4.1. Les reliquats entrée (Ri)

La figure 5 et le tableau 5 donnent un premier aperçu des valeurs prises par Ri en fonction de l'année ; les valeurs de 2012 étant plus élevées suite à un hiver peu pluvieux. Nous constatons également que la gamme des valeurs mesurées au sein d'une même année est large. Les reliquats entrée font l'objet d'une analyse plus approfondie dans le cadre de la présentation intitulée : « Les reliquats « entrée » : variabilité et prédiction ».

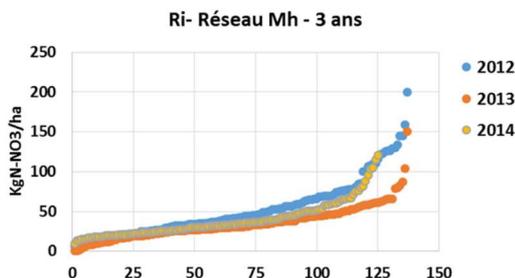


Figure 5. Répartition des valeurs de Ri pour l'ensemble des parcelles et par année

Tableau 5. Valeurs moyennes et variabilité de Ri

Année	Ri.Moy.	Ri SD	Q10	Q90
2014	39	21.6	19	66
2013	35	21.1	12	61
2012	53	36.2	18	109

4.2. La lixiviation de printemps (Lix)

La lixiviation qui peut affecter le reliquat entrée Ri a donc été estimée par le modèle Stics. Elle est directement impactée par les pluies de printemps, lorsque l'humidité du sol est proche de la saturation et qu'il n'y a pas encore de maïs pour prélever l'eau du sol. Les quantités d'azote lessivé ainsi estimées sont variables selon les années. Elles représentent en général moins de 10 kg N/ha pour le printemps 2014 (figures 6 et 7). Par contre pour 2012 où les cumuls de pluie ont régulièrement dépassé les 250 mm de début mars à fin mai, les quantités d'azote perdues peuvent être conséquentes, allant jusqu'à 60 kg N/ha. Les zones Ouest et Sud-Ouest de la région étant les plus exposées de par un niveau de pluviométrie régulièrement plus élevé mais aussi de par la présence de sols filtrants.

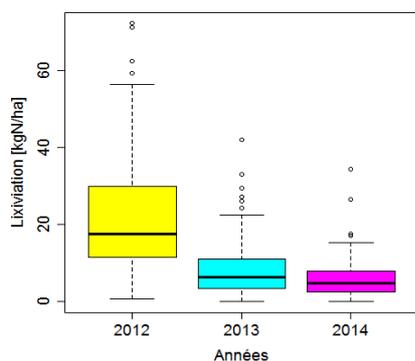


Figure 6. Représentation de la lixiviation estimée par année et de sa variabilité

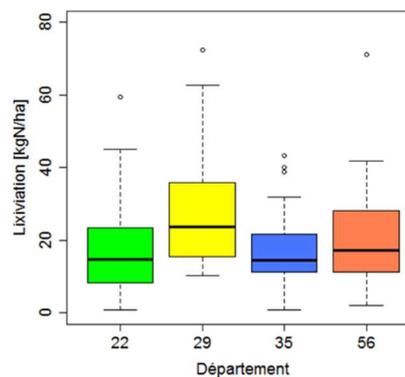


Figure 7. Lixiviation de 2012 par département

4.3. Les reliquats fin (Rf)

Les valeurs de reliquats fin (Rf) mesurées sur les parcelles du réseau Mh témoignent d'une minéralisation d'automne importante des sols de Bretagne. C'est un des enseignements essentiels de ce dispositif (tableau 6).

En 2013, alors que l'ensemble des parcelles du réseau Mh sont conduites sans fertilisation azotée depuis 3 ou 4 ans, la moyenne des reliquats est de 81 kg N-NO₃/ha sur l'ensemble du profil 0-90 cm. Dès que les conditions climatiques redeviennent favorables suite à un retour des pluies en fin d'été, des quantités importantes d'azote peuvent être à nouveau minéralisées, parfois sous forme de flush ; ceci, même sans fertilisation récente sur la culture. Ces résultats situent toute la problématique de la gestion des reliquats de début de drainage sur la région Bretagne.

Les écart types des moyennes sont également élevés et témoignent donc d'une large gamme des valeurs des Rf pour une année donnée et en absence de fertilisation (figure 8).

Les valeurs sont plus faibles pour 2014 dans la mesure où les prélèvements ont été effectués 15 à 20 jours plus tôt.

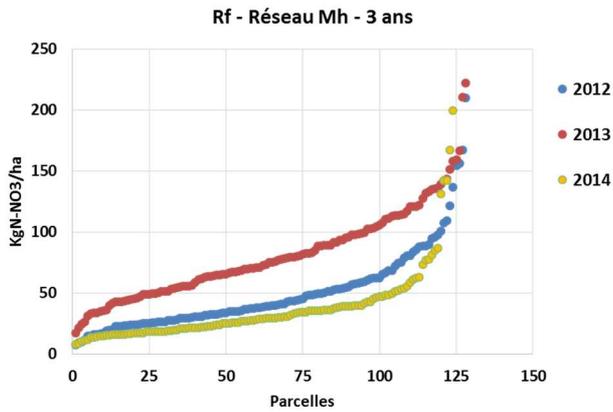
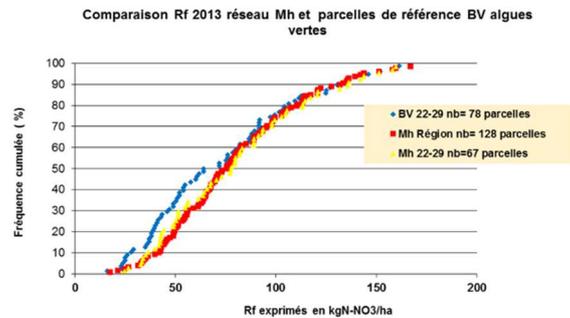
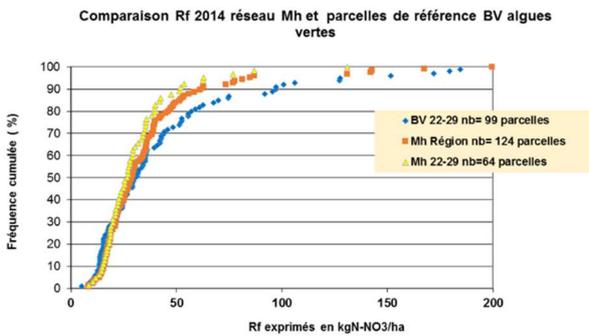


Tableau 6. Valeurs moyennes et variabilité de Rf

Année	Rf.Moy.	Rf SD	Q10	Q90
2014	37	31.8	16	62
2013	81	34.7	42	132
2012	50	42.9	22	89

Figure 8. Représentation des valeurs de Rf pour l'ensemble des parcelles et par année

Pour vérifier la véracité de ces résultats, ils ont été comparés aux reliquats d'automne réalisés dans le cadre des programmes BV algues vertes. Le suivi est effectué à plusieurs dates sur ce dispositif, seule la date de prélèvements similaire a été retenue. Ce sont uniquement les reliquats derrière maïs ensilage des parcelles de référence, donc jugée à l'équilibre de fertilisation, qui ont été mis en comparaison. Il en ressort une cohérence tout à fait intéressante entre les deux approches (figures 9a, b).



Figures 9a, b. Représentation des valeurs de Rf mesurés sur le réseau Mh en comparaison avec les reliquats des parcelles de référence du réseau BV algues vertes pour les années 2013 et 2014

En 2014, les reliquats mesurés sont ceux de la 1^{ère} décade d'octobre. Pour environ 70% des parcelles, les valeurs de reliquats sont similaires. On compare ici des parcelles non fertilisées à des parcelles à l'équilibre de fertilisation. Une différence apparaît sur quelques valeurs plus fortes observées sur le réseau BV algues vertes.

En 2013, avec des reliquats de fin octobre et des valeurs globalement beaucoup plus élevées, le constat est semblable à 2014 même si sur la valeur médiane on observe un écart de valeur de l'ordre de 15 kg N/ha. Par contre, aucune différence n'est observée sur la plage haute des valeurs de reliquats.

Ces résultats du réseau Mh soulignent l'importance du flux de minéralisation d'automne en situation non fertilisée et fixent ainsi un seuil minimum, variable selon les années, en situations de fertilisation équilibrée.

5. Comparaison des bilans Mh_Maïs avec les bases régionales

5.1. Méthode de calcul des bilans Mh_Maïs

La mesure du reliquat Rf a été réalisée entre fin septembre et tout début novembre selon les parcelles et les années. La minéralisation calculée par les bilans Mh intègre donc pour partie un flux de minéralisation qui s'est produit après la fin de l'absorption d'azote par la culture et qui ne peut donc pas être mobilisé par la plante.

Pour être cohérent avec une démarche de prédiction de la fertilisation à apporter sur une culture de maïs, nous avons calculé un bilan qui s'arrête à la période de fin d'absorption d'azote par le maïs. Nous avons retenu la date du 10 septembre pour l'ensemble des parcelles dans le cadre de la démarche présentée.

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

$$\text{Bilan Mh_Maïs} = \text{Bilan Mh} - \text{Rf} + 15$$

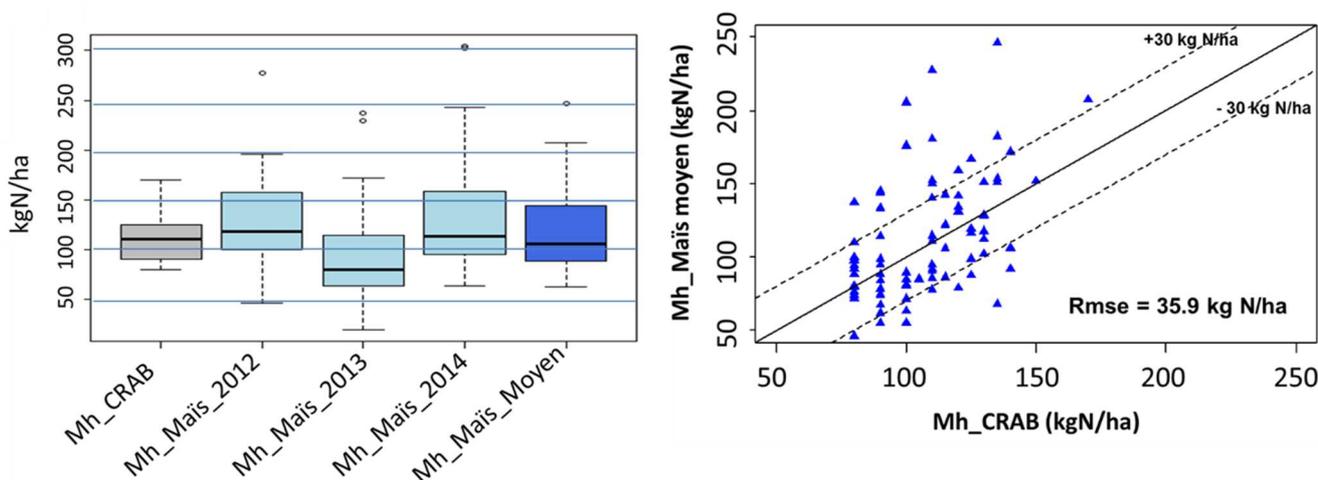
Ce bilan ainsi présenté nécessite de faire des hypothèses sur la valeur du reliquat à la fin de l'absorption d'azote par le maïs, car il n'a pas été mesuré. Nous avons retenu la valeur de 15 kg N-NO3/ha pour cette quantité d'azote non valorisable restant dans le sol. Cette valeur est justifiée par le contexte expérimental et par les mesures de Rf :

- les parcelles n'ont pas été fertilisées pendant plusieurs années consécutives
- 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
- seule la fraction N-NO3 est retenue alors que pour la valeur d'azote non valorisable du sol de 30 kg N/ha présente dans les grilles azote, une part ammoniacale y est incluse.

5.2. Méthode de comparaison et résultats

La démarche consiste à estimer, pour chaque parcelle du réseau, la valeur du terme Mh à partir des grilles azote régionales dans le cadre du calcul d'une dose X prévisionnelle à apporter sur une culture de maïs. Dans le cadre des parcelles du réseau, $Mh = Mhs + Mha$ dans la mesure où les autres compartiments du terme Mh sont nuls, à savoir Mhp et Mr.

Ces valeurs, intitulées Mh_CRAB dans les figures 10a, b, sont alors comparées aux bilans Mh_maïs dont la méthode de calcul a été présentée ci-dessus.



Figures 10a, b. Comparaison des valeurs de Mh_CRAB aux bilans Mh_Maïs des parcelles du réseau Mh

Il en ressort que l'estimation du terme Mh dans les grilles actuelles est équivalente au terme Mh_Maïs_Moyen mesuré sur 3 ans. Des différences peuvent apparaître lorsque la comparaison se fait à l'échelle de l'année ; 2013 faisant apparaître des valeurs mesurées légèrement plus faibles. Dans le cadre d'un travail de prédiction, ces variations interannuelles ne peuvent cependant que difficilement être intégrées. Les résultats du réseau Mh ne vont donc pas impacter le conseil de fertilisation « moyen » à la parcelle.

Par contre, la plage des valeurs prise par Mh_CRAB est bien inférieure à la variabilité mesurée sur le terrain. L'analyse des résultats à la parcelle (figure 10b) fait alors ressortir une imprécision du modèle de prédiction que constituent les grilles azote actuelles de l'ordre de 35 kg N/ha.

C'est donc à travers une meilleure interprétation de cette variabilité des flux de minéralisation mesurés que le dispositif Mh doit nous permettre de construire des modèles opérationnels de prédiction de la fertilisation plus précis et ce, à l'échelle de chaque parcelle.

Les reliquats azotés « entrée » à l'ouverture du bilan : variabilité et prédiction

Anne Guézengar¹, Laure Beff², Yvon Lambert¹, Thierry Morvan²

¹Chambres d'agriculture de Bretagne

²INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

Les reliquats d'azote sortie hiver (RSH) ouvrent le bilan des fournitures d'azote par le sol disponibles pour la culture. Ils sont mesurés à la mi-février en Bretagne depuis 1987. Très élevés dans les années 90, ils pouvaient atteindre les 150 kg N-NO₃⁻/ha. Depuis les années 2000, à la faveur des changements de pratiques de fertilisation et l'apparition de la couverture hivernale des sols, leur niveau s'est considérablement abaissé, pour osciller autour de 30 kg N-NO₃⁻/ha ces dernières années. Il en résulte que le poids de cette mesure dans le bilan permettant le calcul de dose d'engrais azoté a diminué.

Les reliquats d'azote « entrée » du réseau Mh (Ri, à l'ouverture du bilan maïs) mesurés mi-mars ouvrent le bilan des fournitures d'azote par le sol disponibles pour le maïs. Plusieurs facteurs présentés ici expliquent les valeurs mesurées. La connaissance de ces facteurs favorise la mise en œuvre d'une démarche prédictive permettant de restreindre le nombre de mesures nécessaires dans le « réseau régional RSH » pour le conseil en fertilisation des maïs, céréales et colza.

1. Les reliquats « entrée » du réseau Mh : Ri

Les Ri du réseau Mh présentent une forte dispersion en partie explicable à travers 3 facteurs : la pluviométrie hivernale, le potentiel de minéralisation de la parcelle et le niveau du reliquat fin de culture (Rf) de l'année précédente.

1.1. Variabilité inter-annuelle des Ri

En 2012, les Ri du réseau Mh présentent une valeur médiane de 40 kg N-NO₃⁻/ha. 50% des valeurs se situent entre 27 et 60 kg N-NO₃⁻/ha pour une amplitude totale d'un peu plus de 100 kg N-NO₃⁻/ha. Cette forte variabilité observée en 2012 est toujours présente, bien que moindre, les années suivantes. En 2013 et 2014, les Ri se distribuent autour d'une médiane de 30 kg N-NO₃⁻/ha pour une amplitude totale de 50 à 60 kg N-NO₃⁻/ha (figure 1).

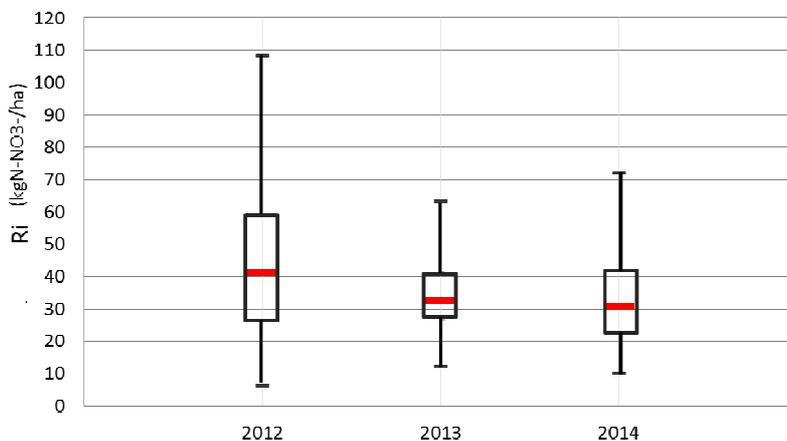


Figure 1. Reliquat d'entrée Ri (kg N-NO₃⁻/ha) 2012, 2013 et 2014 mesuré mi-mars dans le réseau Mh

Les Ri du réseau Mh sont proches des valeurs habituellement observées en Bretagne. Définis à dire d'experts dans les grilles régionales de raisonnement de la fertilisation, les Ri moyens des maïs atteignent 30 kg N/ha en Finistère, 40 kg N/ha en Morbihan et Côtes d'Armor et 50 kg N/ha en Ille-et-Vilaine. Derrière ce zonage administratif se cache l'effet du gradient pluviométrique moyen d'Ouest en Est de la Bretagne.

1.2. Impact de la pluviométrie hivernale

La variabilité interannuelle est liée au contexte climatique. Le niveau des Ri tend à diminuer avec le cumul pluviométrique hivernal, de novembre à février. Le cumul pluviométrique hivernal moyen est de 270 mm en 2012, 350 mm en 2013 et atteint 630 mm en 2014 (figure 2). Au-delà de 600 mm, l'essentiel du profil est lessivé ce qui exclut les forts reliquats.

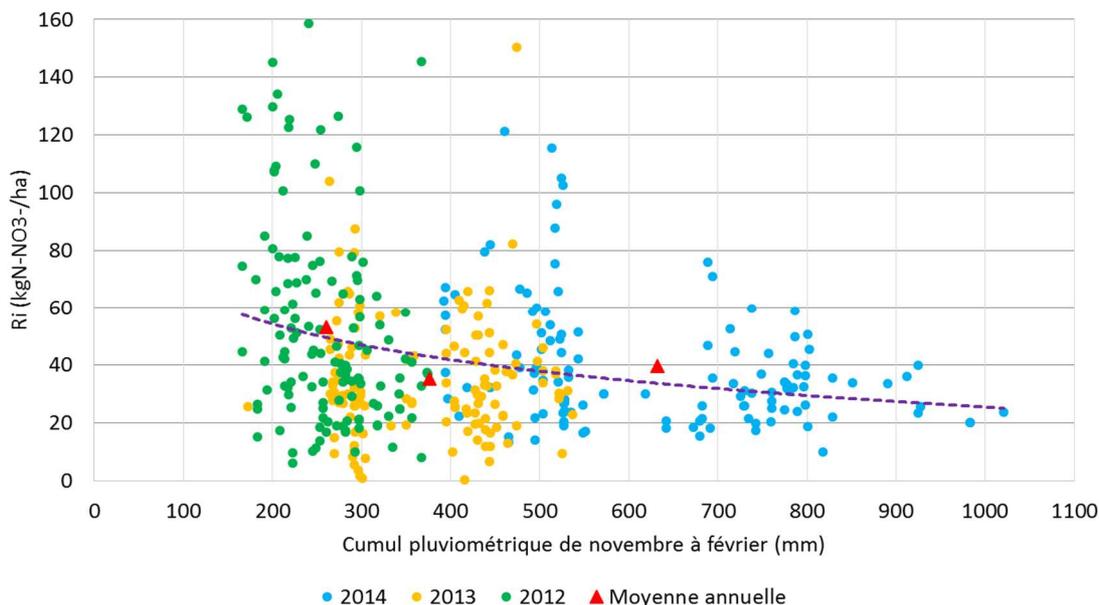


Figure 2. Les Ri du réseau Mh (kg N-NO₃-/ha) selon le cumul pluviométrique hivernal de novembre à février (mm)

Cette relation entre le niveau des Ri et le cumul pluviométrique s'observe au sein d'une même année. En 2014, nous distinguons deux groupes de parcelles, l'un situé dans une zone où le cumul est supérieur à 600 mm (zone A) pour lesquelles la dispersion des Ri est resserrée (10 à 75k kg N-NO₃-/ha) et un groupe de parcelles subissant un cumul pluviométrique inférieur à 600 mm (zone B) dont la gamme de valeurs s'étend de 15 à 120 kg N-NO₃-/ha (figure 2).

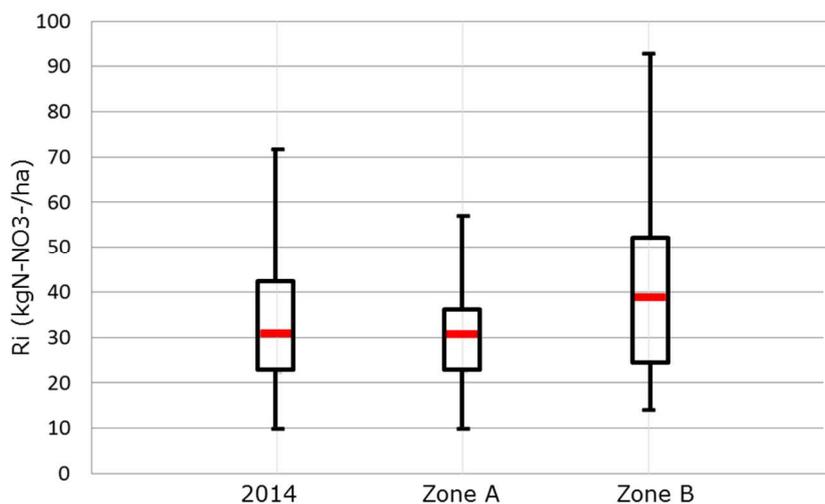


Figure 3. Ri 2014 du réseau Mh (kg N-NO₃-/ha) pour les zones climatiques A et B respectivement de cumul pluviométrique de plus de 600 mm et de moins de 600 mm respectivement de novembre 2013 à février 2014

Ce premier critère d'explication des Ri discrimine la médiane des résultats d'un niveau de 10 kg N-NO₃-/ha entre la zone moins arrosée et la zone plus arrosée. La différence porte sur 15 kg N-NO₃-/ha sur le 3ème quartile et 35 kg N-NO₃-/ha pour le 9e décile (figure 3). L'évaluation des fournitures d'azote par le sol par le formalisme Comifer prend en compte un facteur de minéralisation lié au système de culture dont l'effet sur les Ri doit être intégré.

1.3. Effet du potentiel de minéralisation lié aux restitutions organiques

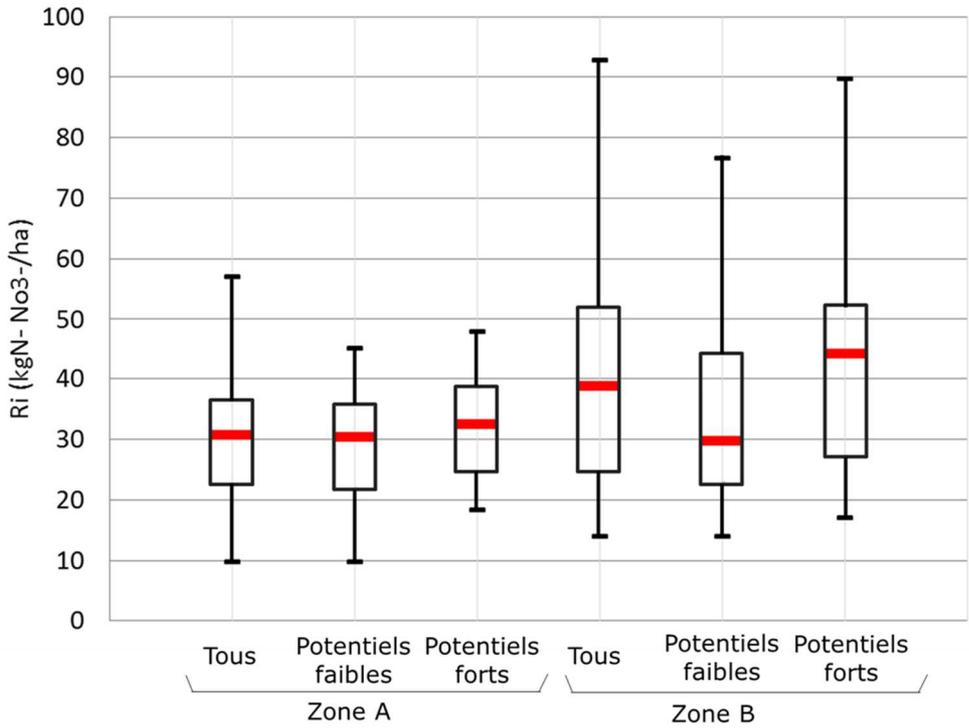


Figure 4. Ri 2014 du réseau Mh (kg N-NO₃-/ha) des zones climatiques A et B respectivement de cumul pluviométrique de plus de 600 mm et de moins de 600 mm respectivement de novembre 2013 à février 2014 selon le potentiel de minéralisation faible (vitesse potentielle de minéralisation $V_p < 0.9$ kg N-NO₃-/ha /JN) ou fort ($V_p > 0.9$ kg N-NO₃-/ha JN)

L'introduction du facteur potentiel de minéralisation impacte peu le niveau des Ri de la zone A. Le lessivage hivernal est tel dans cette zone que l'effet des restitutions organiques passées est gommé. En zone B, l'échantillon à potentiel de minéralisation « fort » présente une médiane supérieure de 15 kg N-NO₃/ha par rapport à l'échantillon de parcelles à faible potentiel (figure 4). Le produit de la minéralisation hivernale voire une part du reliquat fin de culture est toujours présent dans le sol en sortie hiver.

1.4. Relation entre Rf et Ri

Le reliquat fin de culture (Rf, à la fermeture du bilan azoté) est mesuré plus d'un mois après la fin d'absorption du maïs. Pendant cette période, le sol réchauffé se ré-humecte favorisant une forte activité minéralisatrice. En cas de lame drainante faible, une part non négligeable du Rf se retrouve dans le Ri suivant.

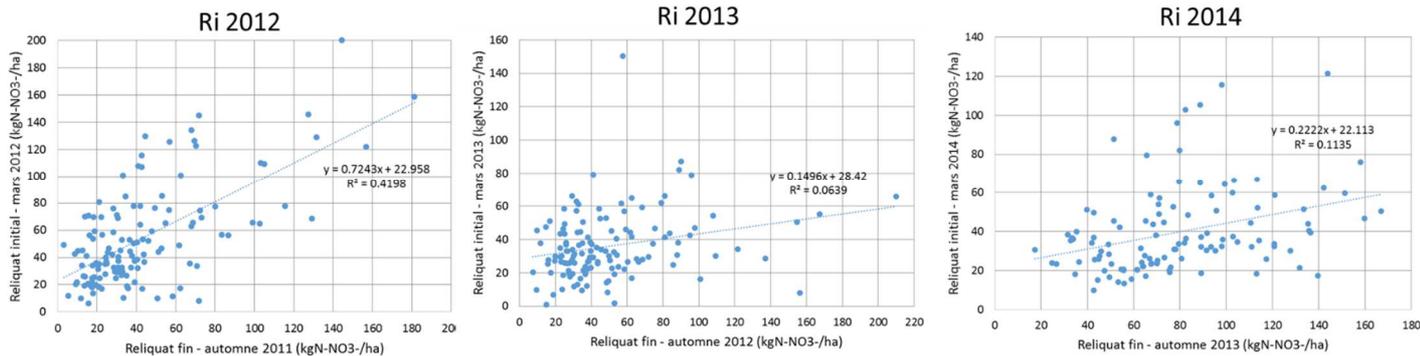


Figure 5. Représentation des Ri 2012, 2013 et 2014 en fonction des Rf de l'automne précédent

La figure 5 montre que la relation entre Ri 2012 et Rf 2011 est plutôt pertinente. Le Rf explique 42% de la variabilité observée. Elle ne l'est plus du tout en 2013 et 2014 (6 et 11 % de la variabilité expliquée respectivement).

2. Prédiction des reliquats « entrée » : démarche du « réseau régional RSH »

Dans le cadre d'une démarche de prédiction du RSH, le climat, les caractéristiques du système de culture influençant le potentiel de minéralisation ainsi que le niveau du Rf d'automne doivent être pris en compte. A cela s'ajoute, l'effet éventuel de l'absorption d'azote par une culture sur l'automne et l'hiver. La superposition temporelle de ces phénomènes nécessite l'utilisation de modèle dynamique d'azote réévaluant la quantité d'azote disponible dans le sol quotidiennement. La démarche présentée ici a été initiée en 2014.

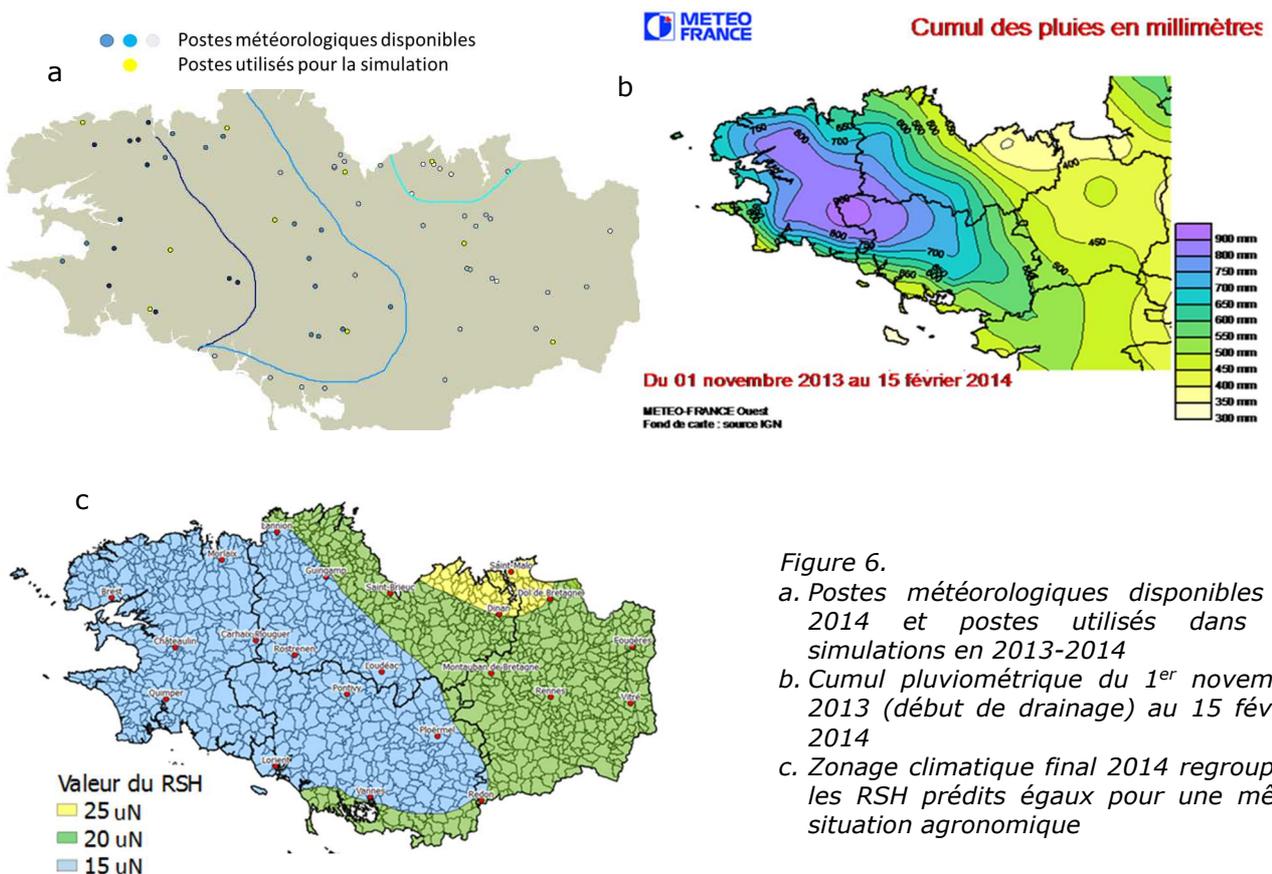
2.1. Syst'N®, un outil de simulation de la dynamique de l'azote dans le sol

Les reliquats d'azote sont évalués grâce à Syst'N®, modèle de simulation dynamique des flux d'azote dans les compartiments sol, plante, air et eau. Syst'N®, développé dans le cadre du RMT Fertilisation & Environnement, est construit à partir de différents modèles déjà existants. Les flux d'azote sont calculés à la parcelle, à partir de données météo journalières, de caractéristiques des sols et de la description du système de culture.

Dans notre cas, la culture et l'interculture précédant le RSH sont simulées afin de prendre en compte les conditions de développement de la culture l'année n-1 ainsi que les conditions de minéralisation de fin de cycle et d'automne/hiver.

2.2. Zonage climatique des RSH

Les simulations sont réalisées à partir de 15 postes météorologiques en Bretagne. La date du début drainage simulée est confrontée aux chroniques piézométriques du BRGM. Les postes climatiques donnant des résultats de RSH proches sont regroupés en « zone climatique ». La carte du cumul pluviométrique entre le début de drainage et le 15 février permet d'affiner le tracé des zones climatiques (figure 6).



2.3. Attribution d'un potentiel de minéralisation à la parcelle

Avec la méthode actuelle, le potentiel de minéralisation des parcelles est défini uniquement à partir de l'historique. Il est calculé à partir de la somme des postes des grilles régionales de raisonnement de la fertilisation. Les contributions du système de culture et de l'humus du sol (Mh), des doses et types de produits organiques épandus régulièrement (Mha), la présence récente de prairies (Mhp) et la contribution des résidus de culture du précédent (Mr) ont été définies pour un climat moyen sur l'ensemble de la Bretagne. Chaque poste peut recouper des situations diverses. Il résulte de cette approche et à titre d'exemple que le potentiel de minéralisation sous un blé de colza d'une parcelle en rotation de grandes cultures recevant 30 m³ de lisier de porc tous les ans est considéré équivalent à celui sous un blé précédé de deux maïs avec une prairie courte dans la rotation et recevant du fumier de bovin 1 an/2. Dans la méthode du bilan, les postes Mh sont constants alors que les conditions de minéralisation ne sont pas identiques entre année, ni au sein de la région. Pour une approche plus fine dans le « réseau RSH », le climat réel annuel est lui pris en compte à travers les simulations dynamiques.

2.4. Suivi hivernal de parcelles « type »

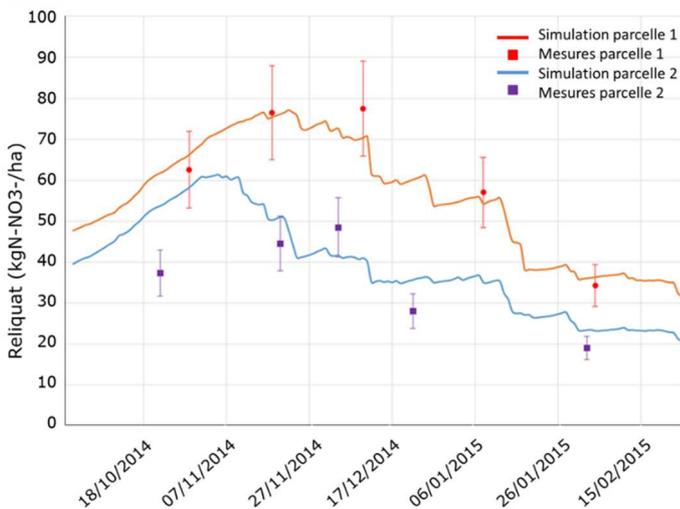


Figure 7. Simulations et mesures de reliquats d'azote de 2 parcelles de blé suivies à l'automne et hiver 2014-2015 :

- 1) Parcelle en rotation Fev/Blé/Mais/Blé avec lisier de bovin (40 m³ ; 1 an/4) et fumier de bovin (10 t ; 1 an/4) au Rheu (35)
- 2) Parcelle en rotation Ma/Blé/Co/Tri avec lisier de porc (35 m³ ; 1 an/2) et fumier de porc (30 t ; 1 an/2) à Crécom (22)

En 2015, 15 parcelles « type » ont été suivies dont 7 en rotation de grandes cultures, 7 en rotation de grandes cultures et pâture et une en rotation de légumes frais et céréales. Ces parcelles sont prélevées régulièrement d'octobre à février pour vérifier que les profils hydriques et nitriques simulés dans Syst'N® sont cohérents avec les observations (figure 7). Le modèle ne réalise pour l'instant pas d'ajustement sur mesures.

Les situations aux plus forts potentiels de minéralisation sont enquêtées en complément des simulations sur la dernière semaine de janvier et la première semaine de février.

Les parcelles sont recherchées selon la typologie suivante :

- 10 parcelles précédent légumes frais entre les zones de St Pol et le Nord-Ouest des Côtes d'Armor ainsi que dans la zone de Dol de Bretagne/Saint Malo
- 5 parcelles précédent légumes industrie entre les zones Concarneau/Erdeven et Pontivy-Baud
- 20 parcelles antéprécèdent prairie
- 20 parcelles identifiées comme ayant un entretien organique fort (note supérieure à 9 dans le tableau 3 de la nouvelle grille de raisonnement de la fertilisation des prairies).

2.5. Confrontation des estimations du RSH maïs 2014 aux Ri 2014 du réseau Mh

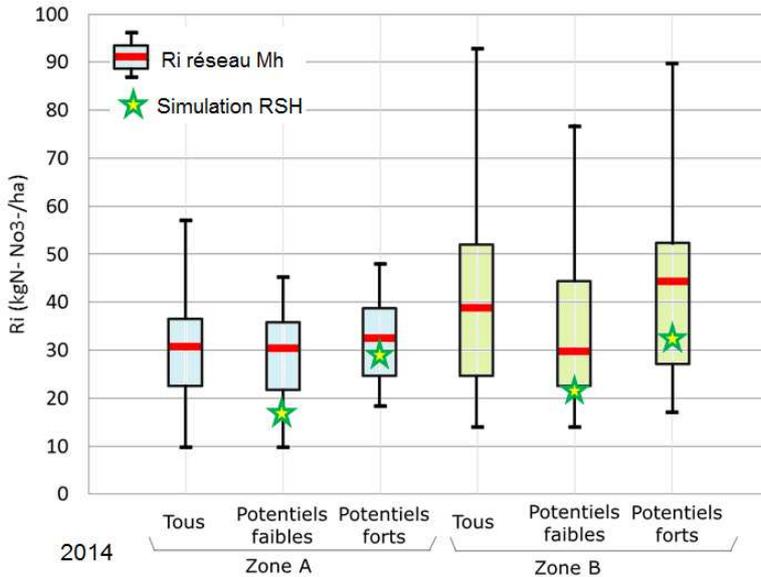


Figure 8. Ri observés au 15 mars 2014 dans le réseau Mh et estimation du RSH au 15 février 2014

Les simulations 2014 sous-estiment le Ri maïs de 10 kg N-NO₃⁻/ha pour les situations à faible potentiel de minéralisation (figure 8). Les données présentées ici ne sont pas corrigées de l'effet de la date de prélèvement mais la hiérarchie des reliquats estimés correspond à celles des observations. Les mesures de Ri réalisées deuxième décennie de mars dans le réseau Mh représente le stock d'azote nitrique dans le sol un mois après l'estimation du réseau régional RSH, donc avec un mois de minéralisation supplémentaire (sols nus). Sur la période du 15 février au 15 mars 2014, le cumul pluviométrique en zone A est compris entre 75 et 100 mm. Il reste inférieur à 70 mm en zone B. Le fond de profil (estimé à moins de 5 kg N/ha sur 60-90 cm au 15 février) lessive sur cette période. Sur cette même période, la minéralisation moyenne s'élèverait à une douzaine de kilogrammes en moyenne (Vp moyenne de 0.8 kg N/ha/JN pour 0.5 JN/jour calendaire).

Le changement de référentiel, issu du réseau Mh, pour l'évaluation des fournitures d'azote par le sol posera la question de la date d'ouverture du bilan dans le cadre du « réseau RSH ».

2.6. Confrontation des estimations du RSH céréales 2015 au réseau de mesure des bassins versants

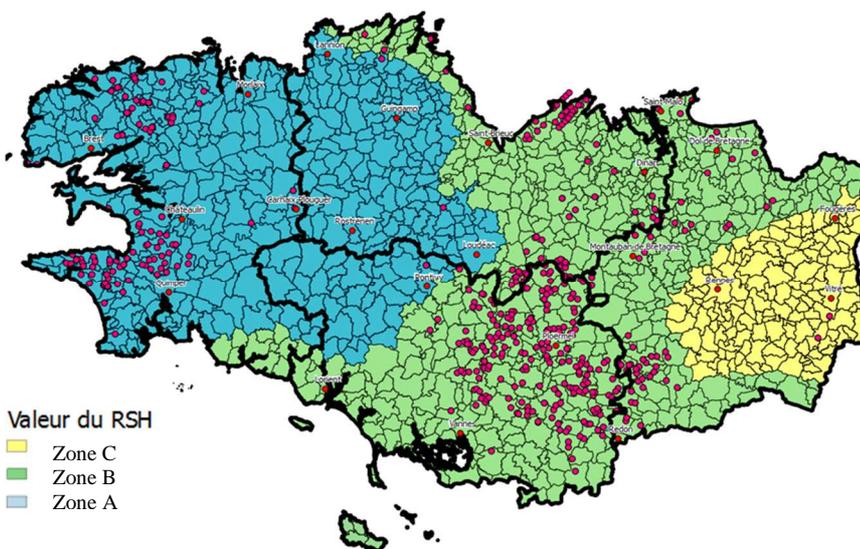


Figure 9. Carte du zonage RSH 2015 et parcelles prélevées dans les campagnes RSH Bassins Versants

Certains Bassins Versants réalisent des campagnes de RSH sur leur territoire. La répartition des parcelles prélevées est hétérogène sur la région. En 2015, l'essentiel des parcelles enquêtées se trouvaient en zone climatiques A et B (figure 9). Selon l'ampleur des campagnes, les prélèvements peuvent s'étaler du 5 janvier au 10 février. Les laboratoires d'analyses, les animateurs et les conseillers complètent les informations liées au prélèvement et à l'historique parcellaire. A partir de ces informations, chaque parcelle est associée à un cas type simulé et la valeur d'analyse (éventuellement corrigée de l'effet de la date de prélèvement) est confrontée aux valeurs estimées au 15/02 (figure 10).

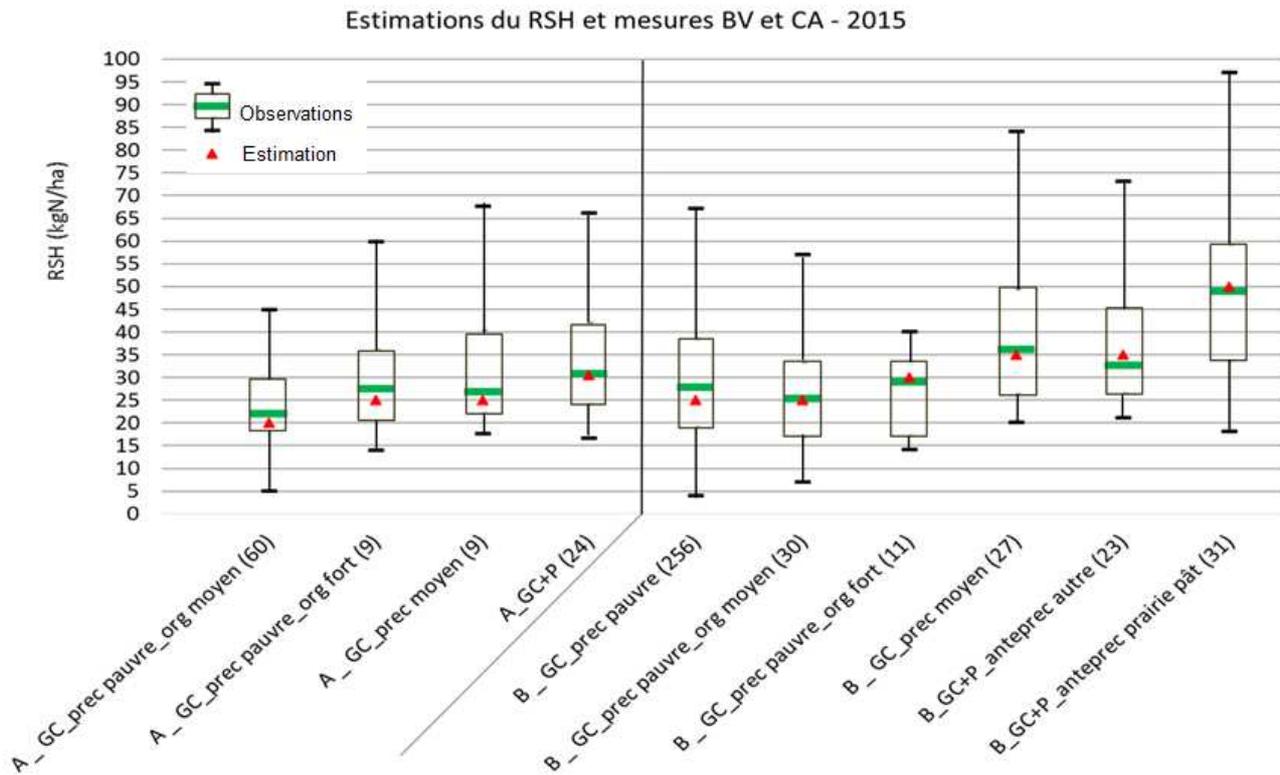


Figure 10. Observation des RSH céréales 2015 dans les Bassins Versants et estimation du réseau régional RSH 2015 selon la zone climatique (A ou B), la rotation (GC : Grandes cultures ; GC+P : Grandes cultures et pâture) ; le précédent (prec) avec des résidus pauvre ou moyennement riche en azote et les apports réguliers de produits organiques (org moyen ou org fort)

La concordance des médianes des observations triées par classe agro-climatique avec les valeurs simulées est très satisfaisante. On observe moins de 5 kg N-NO₃⁻/ha de différence ce qui tend à valider la méthode. Il demeure autour de la médiane une forte variabilité non caractérisée. Environ 50% seulement des parcelles ont une estimation juste du RSH à plus ou moins 10 kg N-NO₃⁻/ha. La réduction de la variabilité pourrait passer par une prise en compte du type de sol, un zonage plus fin des zones pluviométriques... pour atteindre un minimum supposé de 20%, variabilité liée au prélèvement et à l'analyse en laboratoire.

Conclusion

L'analyse des Ri du réseau Mh selon le cumul pluviométrique et l'histoire culturale, critères retenus dans la méthode de prédiction du réseau régional RSH, montre qu'une part de la variabilité reste inexpliquée. Cependant, les résultats issus des simulations sont en moyenne cohérents avec ceux des réseaux de mesures (Ri du réseau Mh et RSH du réseau des Bassins Versants).

La typologie du potentiel de minéralisation fonction de la rotation, du précédent et de l'entretien organique de la parcelle est aujourd'hui cohérente avec les critères des grilles de raisonnement de la fertilisation. Grâce au réseau Mh, une meilleure estimation du potentiel de minéralisation devrait améliorer la qualité des prédictions du RSH.

Bibliographie

- Chambres d'agriculture de Bretagne**, 2014. Réaliser un bon plan de fumure et un cahier de fertilisation. Guide pratique agriculteur, 30
- Comifer**, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies
- Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P.**, 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N. Innovations Agronomiques 21, 59-70

Concentrations et dépôts d'ammoniac (NH₃) atmosphérique dans le réseau Mh

Chris Flechard¹, Thierry Morvan¹, Yvon Lambert²

¹INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²Chambres d'agriculture de Bretagne

1. Contexte

L'ammoniac (NH₃) est de loin la première molécule d'azote réactif (Nr) atmosphérique (i.e. toute forme d'azote autre que le diazote N₂) qui soit d'origine agricole ; NH₃ représente 77% des émissions totales agricoles de Nr, contre 14% pour N₂O et 8% pour NO_x. Par ailleurs, le secteur agricole est responsable de 98% des émissions nationales totales de NH₃ (735 ktonnes/an). Les bâtiments d'élevage et le stockage des déjections contribuent de l'ordre de 2/3 des émissions européennes d'NH₃ et l'épandage des effluents au champ de l'ordre de 1/3. Les émissions sont très variables, tant au niveau du siège d'exploitation qu'au champ et sont contrôlées par les caractéristiques techniques des élevages, les types d'effluents et leurs modalités d'épandages, les techniques culturales, la végétation, le sol et la météorologie.

En tant que précurseur de la « cascade de l'azote » (impacts successifs des différentes formes azotées dans les paysages), l'ammoniac a des conséquences environnementales majeures. Les dépôts secs et humides d'azote réactif réduit (NH₃ et NH₄⁺) sur les (agro-)écosystèmes peuvent localement s'élever à plusieurs dizaines de kg N ha⁻¹ an⁻¹ (notamment près des sources fixes), occasionnant acidification, eutrophisation, perte de biodiversité et émissions indirectes de N₂O. L'ammoniac a été identifié comme polluant atmosphérique prioritaire aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne dès le milieu des années 1980, conduisant à la mise en place de réseaux nationaux d'observation des concentrations et dépôts atmosphériques dans ces deux pays, qui visent à étudier les tendances au long-terme, vérifier des modèles de chimie-transport atmosphérique, évaluer l'impact des changements de pratiques (par ex., le mode d'épandage des lisiers) et venir en appui à la décision politique. D'autres réseaux nationaux voient le jour plus tard au Danemark, en Allemagne, en Suisse, mais il n'existe à ce jour aucun réseau national ou régional en France.

Cependant les concentrations et flux d'NH₃ dans les paysages agricoles sont étudiés à l'INRA (entre autres) dans le cadre de projets de recherche en France, surtout à l'échelle de la parcelle ou du petit paysage, dans le but de comprendre et quantifier i) les émissions (pertes d'azote de l'agro-système), ii) la dispersion dans l'environnement local et iii) les dépôts atmosphériques (entrées d'azote souvent ignorées ou mal quantifiées dans le raisonnement de la fertilisation). Le suivi mis en place, dans le réseau Mh, des concentrations d'NH₃ au moyen de capteurs ALPHA (*Adapted Low-cost Passive High Absorption*) et la modélisation des dépôts secs sur des parcelles de maïs, contribuent à diminuer les incertitudes sur le bilan azoté des systèmes non fertilisés étudiés dans le projet.

2. Méthodes et sites d'étude

Les concentrations en NH₃ ont été mesurées à 2 m au-dessus du sol à proximité immédiate des 11 parcelles suivies (6 parcelles en Ille-et-Vilaine, 5 dans le Morbihan) pendant 1 à 2 ans, au pas de temps mensuel à bi-mensuel (figure 1). Les capteurs passifs ALPHA piègent l'ammoniac de l'air par diffusion moléculaire vers un filtre papier préalablement enduit d'acide citrique, qui est extrait dans l'eau à la fin de la période d'exposition au champ, avant analyse de la teneur en ammonium (NH₄⁺) de l'extrait, dont on déduit la concentration moyenne en NH₃ dans l'air sur la période.

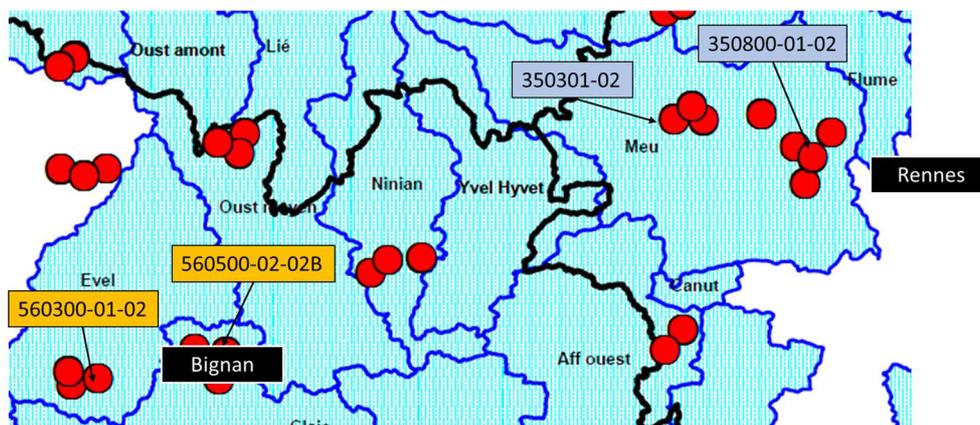


Figure 1. Localisation géographique des 11 parcelles du réseau Mh faisant l'objet d'un suivi de l' NH_3

3. Variabilité spatiale et saisonnière des concentrations atmosphériques en NH_3

Les concentrations moyennes en NH_3 étaient en général plus élevées sur les sites du Morbihan ($4\text{--}10\ \mu\text{g m}^{-3}$) que sur ceux d'Ille-et-Vilaine ($4\text{--}5\ \mu\text{g m}^{-3}$) (figure 2 - droite), reflétant un lien probable avec la densité d'élevages dans les quelques km^2 autour des sites suivis, conformément aux observations faites depuis de nombreuses années dans les réseaux d'Europe du Nord. Pour les mêmes raisons, les concentrations étaient plus homogènes entre sites du 35 qu'entre ceux du 56. On observe, de plus, typiquement des pics de concentrations lors des périodes d'épandages d'effluents du printemps et parfois également en fin d'été ou début d'automne. Cette dynamique saisonnière, observée sur seulement 1-2 ans dans Mh, est très répétable d'année en année, comme le montrent les données d'observations long-terme de deux sites d'ORE en Bretagne (forêt de Fougères-35, ORE F-ORE-T ; et bassin versant de Naizin-56, ORE AGRHYS) (figure 3). Les concentrations en NH_3 des sites Mh-56 sont du même ordre de grandeur que celles observées sur AGRHYS dans un secteur géographique proche avec des densités d'élevage similaires (élevages porcins et avicoles). Les concentrations des sites Mh-35 sont intermédiaires entre les sites du Morbihan et le site « de fond » de la forêt de Fougères, qui est caractérisé par l'éloignement des sources agricoles (du fait de l'étendue de la forêt) et par un environnement de polyculture-élevage laitier moins intensif. Par opposition à l' NH_3 , pour les polluants secondaires que sont HNO_3 et les aérosols NH_4^+ et NO_3^- , les variations à l'échelle régionale sont beaucoup plus faibles, comme le montrent la quasi-superposition des courbes pour les sites de Fougères et AGRHYS (figure 3).

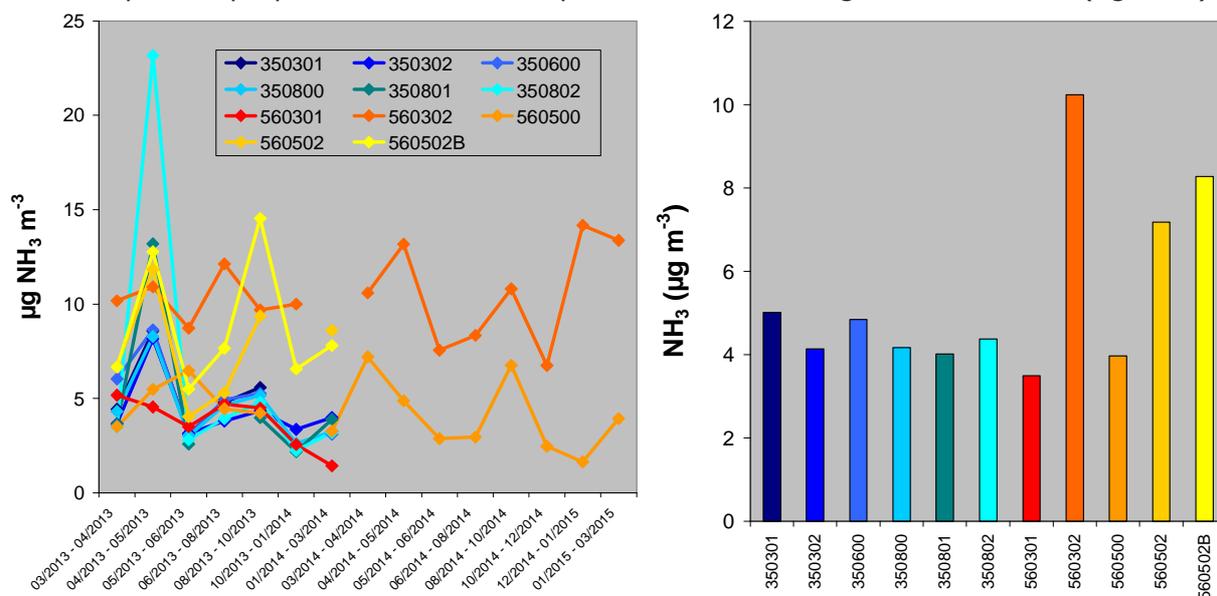


Figure 2. Evolution temporelle des concentrations en NH_3 sur les sites du réseau Mh (gauche) et comparaison des moyennes annuelles (droite)

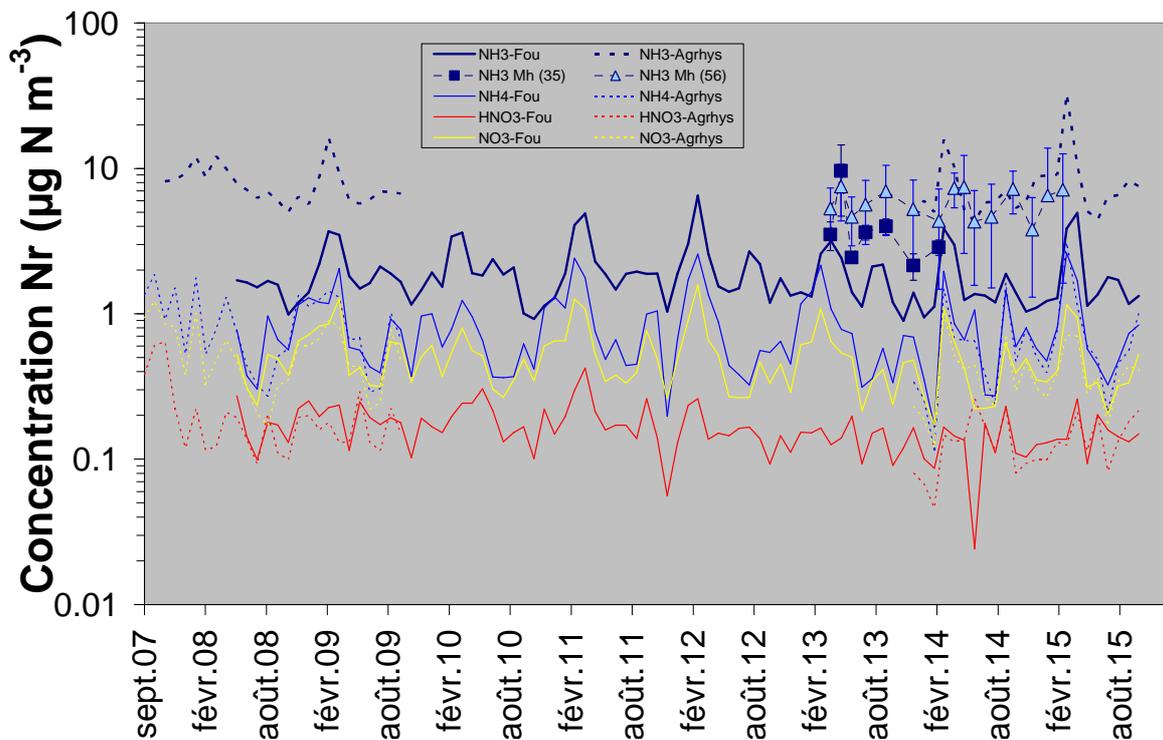


Figure 3. Dynamique des concentrations moyennes en NH_3 sur les sites Mh d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan dans le contexte des observations long-terme sur la forêt de Fougères (35) et l'ORE AGRHYS (56)

4. Modélisation des dépôts secs d' NH_3 et azote réactif

Pour estimer les dépôts secs d'ammoniac, mais aussi des principales autres espèces d'azote réactif Nr dans l'air (gaz HNO_3 et NO_2 , et aérosols NH_4^+ et NO_3^-), cinq modèles de dépôt (CBED, CDRY, EMEP, IDEM, NEU) ont été utilisés, décrivant une large gamme de valeurs par site (marquant l'incertitude) et entre sites (variabilité spatiale) (figure 4 haut). Outre les données sur NH_3 , les données d'entrée des modèles incluent la météorologie, des paramètres décrivant les couverts (hauteur, indice foliaire) et les concentrations des espèces Nr non mesurées sur les sites, mais estimées à partir de concentrations sur d'autres sites de monitoring en Bretagne (Forêt Fougères et ORE AGRHYS). Les valeurs de dépôts secs totaux de N augmentent logiquement avec les concentrations moyennes en NH_3 (figure 2), puisque NH_3 est largement dominant par rapport aux autres espèces de Nr (figure 4 bas). En l'absence de données de mesures véritables des flux de dépôt sur les sites (ce qui requerrait un dispositif très coûteux et complexe), la moyenne (+/- écart-type) des cinq modèles (figure 4 bas) constitue l'estimation la plus réaliste des dépôts de Nr sur ces 11 sites. Ces valeurs moyennes (de 5 à 20 kg N/ha/an) se situent plutôt dans la gamme supérieure des valeurs observées à l'échelle européenne.

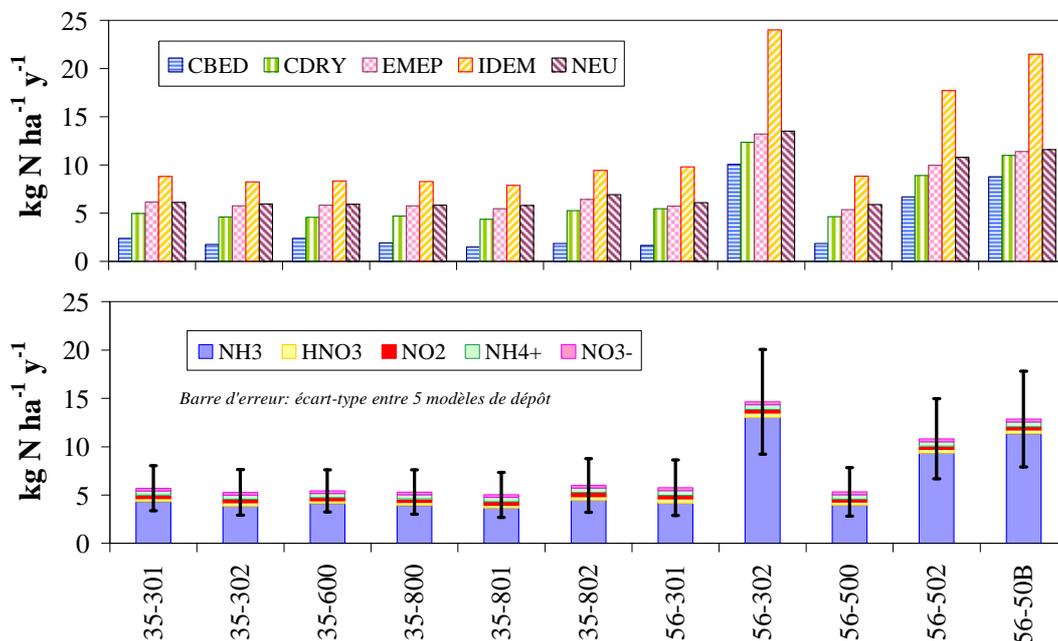


Figure 4. Dépôts secs totaux modélisés au moyen de cinq modèles et contributions des différentes espèces de Nr

Effet de l'histoire culturelle : élaboration d'un indicateur système

Yvon Lambert¹, Daniel Hanocq¹, Thierry Morvan², Laure Beff²

¹ Chambres d'agriculture de Bretagne

²INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

1. L'effet 'système' dans le formalisme Comifer

1.1. Rappel du formalisme du terme Mh

Le formalisme adopté au niveau national par le Comifer (2013) pour prédire la minéralisation de l'azote organique du sol repose sur le modèle suivant :

$$Mh = \underbrace{Km \cdot TNorg \cdot FSyst}_{Vp} \cdot Jn$$

Vp désignant la vitesse potentielle de minéralisation journalière (kg N/ha/Jn) et **Jn** le temps normalisé.

Vp est calculée à partir du stock total d'azote organique du sol (**TNorg**) auquel on applique un coefficient **Km**, paramétré par une fonction qui intègre les teneurs en argile et en calcaire de l'horizon de surface. La minéralisation est ensuite modulée par un coefficient 'système' (**FSyst**) renseigné par l'histoire culturelle de la parcelle qui prend en compte le système de culture mais aussi les apports d'effluents effectués.

1.2. Valeurs du facteur système FSyst

Les apports réguliers de produits organiques (effluents ou résidus de culture) contribuent à modifier sur le long terme le stock d'azote organique du sol. Cette évolution est variable selon la quantité et la nature de ces apports. Les produits à faible C/N se minéralisent rapidement et contribuent peu au stockage d'azote organique, ils ont donc un effet direct fort sur l'azote disponible pour les cultures, contrairement aux produits plus riches en carbone (fumiers, cannes de maïs grain). Ces derniers ont un effet direct faible, voire négatif, de l'azote minéral du sol pouvant être consommé pour la dégradation biologique du carbone.

Le facteur FSyst doit permettre d'appréhender ces aspects et estimer les variations de flux de minéralisation engendrées. Il prend les valeurs suivantes dans le formalisme Comifer :

Tableau 1. Valeurs du facteur système FSyst selon différents systèmes de culture. Azofert, 2005 (INRA)

Fréquence des apports organiques Résidus exogènes de récolte	Jamais	5-10 ans		3-4 ans		1-2 ans		Facteurs multiplicateurs en +	
	Types de produit								
		A	BC	A	BC	A	BC	Retourne-ment prairie	CI
Enlevés-brûlés	0,80	0,95	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,1	En cours d'étude
Enfouis 1 an sur 2	0,90	1,00	0,95	1,05	1,00	1,10	1,02	1,1	
Enfouis tous les ans	1,00	1,05	1,00	1,10	1,02	1,20	1,05	1,1	

Types de produits : A = fumiers et composts (décomposition lente) ; B et C = autres, ainsi que les fumiers de volaille (décomposition rapide). Dans le cas où plusieurs types de produits sont apportés (des A et des BC), alors on privilégie les types A. CI = couverts intermédiaires.

2. L'effet 'système' dans les bases de préconisation régionales

Le formalisme simplifié de la région Bretagne qui prend la forme de grilles azote, intègre l'effet système dans 2 de ces tableaux :

Tableau 2. Contribution des apports organiques des années précédant le semis (Mha).
Grille azote Bretagne pour le maïs. 2013

Fréquence des apports organiques	Nature des apports									
	Fumier bov.	Lisier bov.	Fumier vol.	Lisier vol.	Lisier porc	Fumier porc	Compost lisier porc	Compost fumier bovin et Bœufs	Compost fumier volailles	Compost OM et Compost mûr de
	à 5,5 kg N/t	à 3 kg N/m ³	à 25 kg N/t	à 7 kg N/m ³	à 3,5 kg N/m ³	à 4 kg N/t	à 6 kg N/t	à 6,5 kg N/t	à 20 kg N/t	à 8 kg N/t
	30 t	40m ³	10 t	15 m ³	30 m ³	30 t	30 t	20 t	8 t	30t
tous les ans	70	35	45	20	20	35	80	65	100	125
2 années sur 3	45	25	30	15	15	25	50	40	65	80
tous les 2 ans	35	20	25	10	10	20	40	30	50	60
tous les 3 ans et +	20	15	15	0	0	15	25	20	30	40
Ces valeurs correspondent à des pratiques régulières sur la parcelle.										
Pour un fertilisant donné, si la quantité et la teneur appliquées sont différentes de celles proposées en tête de colonne, il suffit de faire une règle de trois										
Il faut prendre en compte toutes les déjections apportées : en cas d'apports multiples, effectuer la somme des apports individuels ainsi recalculés										

Ce premier tableau propose des valeurs pour le terme Mha qui reprend l'effet à moyen et long terme des apports d'effluents. Comme indiqué dans le commentaire, les valeurs proposées supposent des pratiques régulières d'apports d'effluents sur la parcelle depuis une vingtaine d'années. Il faut également noter que ces valeurs tiennent également compte d'un effet à 2-3 ans des apports d'effluents.

Tableau 3. Contribution de l'humus du sol et du système de cultures (Mhs).
Grille azote Bretagne pour le maïs. 2013

Système de		kg N/ha
Maïs - Céréales	Rotation maïs ensilage et céréales (cipan)	80
	Rotation maïs grain et céréales (cipan)	90
Prairies pâturées avec 3 pâturages par an	3 années de prairie sur 10	90
	5 années de prairie sur 10	100
	8 années de prairie sur 10	110
Légumes	Système endivier et terres de st Malo	70
	Légumes céréales ou lég. Industries	100
	Légumes frais 100 %	110

Ce deuxième tableau complète l'approche système en proposant des valeurs pour le terme Mhs modulé de l'effet lié aux successions culturales enregistrées sur la parcelle. Ces valeurs sont données quel que soit le type de sol et varient de 70 à 110 kg N/ha pour une culture de maïs.

3. Construction d'un indicateur 'système' pour le réseau Mh

La volonté de pouvoir bénéficier d'un indicateur système plus précis que ceux existants afin d'interpréter les variations de V_p calculées, nous a conduit à en construire un. Le fait d'avoir enregistré les histoires culturales de chaque parcelle, avec un objectif de remonter à 15 ans en arrière, nous a également incité à le faire. Ce nouvel indicateur (I_Sys) se présente sous le formalisme simple suivant :

$$I_{Sys} = I_{Cult} + I_{Pro}$$

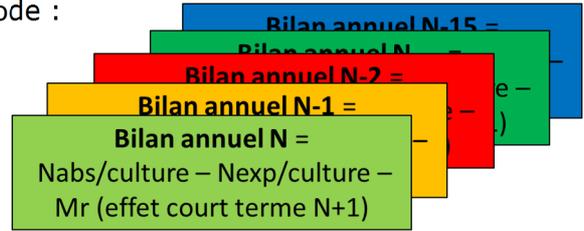
Dans lequel :

- **I_Cult** reprend l'effet système lié aux successions culturales rencontrées sur la parcelle
- **I_Pro** reprend l'effet système lié à la gestion des apports d'effluents sur cette même parcelle.

3.1. Méthode de calcul de l'indicateur 'cultures' (I_Cult) et valeurs

L'indicateur 'cultures' repose sur l'enregistrement des successions culturales renseignées par les agriculteurs. I_Cult est égal à la moyenne des indicateurs annuels azotés calculés pour chaque culture présente dans la rotation sur cette même période :

$$I_Cult = \frac{I_Cult\ n-15 + I_Cult\ n-14 + \dots + I_Cult\ n-1}{Nb\ I_Cult}$$



L'indicateur annuel correspond à un bilan azoté de la culture, calculé de la façon suivante :
 $I_Cult\ n = N\ absorbé/culture - N\ exporté/culture - Mr$

La figure 1 ci-dessous illustre le calcul de I_Cult pour une parcelle en rotation maïs/blé :

350301	culture	rdt	N abs/Urdt	N exp/UN	Mr résidus	N abs	Nexp	Cipan	Bilan
N-1	Me	10	13	11.5	0	130	115	0	15
N-2	B	67	3	2.2	0	201	147.4	30	84
N-3	Me	9	13	11.5	0	117	103.5	0	14
...
...
N-15	Me	11	13	11.5	0	143	126.5	0	17
									46

Indicateur cultures : I_Cult

Figure 1. Exemple de calcul de l'indicateur 'cultures' pour une parcelle en rotation maïs/blé

Les bilans azotés annuels traduisent en fait la quantité d'azote que chaque culture laisse dans le système sol à moyen et long terme en sachant que la fraction la plus labile (Mr) est déduite de ce calcul. A l'échelle d'une succession culturale de 10 à 15 ans, il est ainsi possible de discriminer une gamme de situations culturales où les entrées d'azote sont plus ou moins importantes dans le système.

La gamme des valeurs ainsi calculées pour I_Cult selon les rotations observées au sein du réseau est présentée en figure 2 :

Les rotations en monoculture maïs récolté en ensilage (code 1) présentent les valeurs de I_Cult les plus faibles (médiane à 25 kg N/ha). Le fait de récolter en grains (code 5) fait passer I_Cult à 89 kg N/ha. La rotation dominante maïs ensilage/blé (code 4) prend des valeurs intermédiaires (médiane à 48 kg N/ha). Le fait d'allonger cette rotation en y introduisant des protéagineux ou du colza (code 8) laisse un peu plus d'azote dans le sol.

Les rotations à base de prairies pâturées (code 13) présentent les valeurs de I_Cult les plus élevées (médiane à 117 kg N/ha) mais aussi les plus variables, fonction du rendement. Ces valeurs diminuent progressivement au fur et à mesure que la part d'exploitation de l'herbe en fauche augmente (codes 12 et 11).

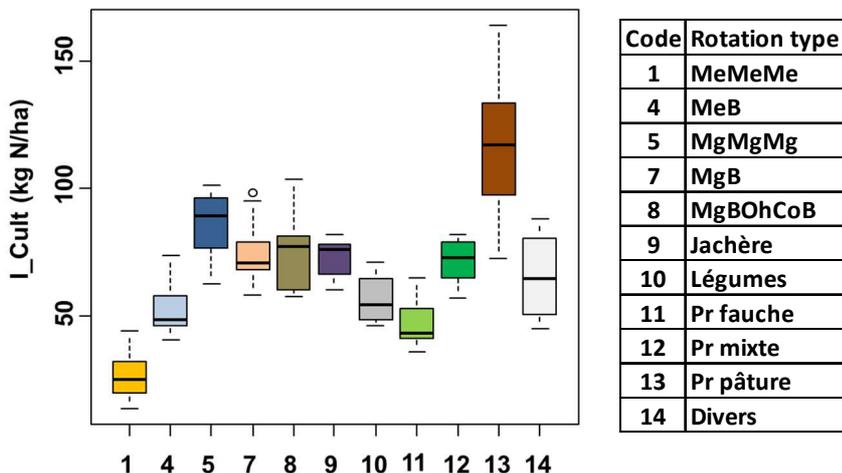


Figure 2. Box-plot pour les valeurs de I_Cult selon les rotations observées sur les parcelles du réseau

3.2. Méthode de calcul de l'indicateur 'Effluents' (I_Pro) et valeurs

L'indicateur I_Pro permet d'estimer le flux de minéralisation nette supplémentaire issu des apports historiques d'effluents. Ce flux est donc dépendant de la nature des effluents (dégradabilité des matières organiques épandues), des quantités épandues mais aussi des fréquences d'apport. Le modèle DSM utilisé, de par son approche dynamique de la minéralisation de chaque effluent après son épandage, permet également d'attribuer un poids plus important et réel aux apports d'effluents les plus récents.

Le calcul de I_Pro est illustré par la figure 3 suivante :

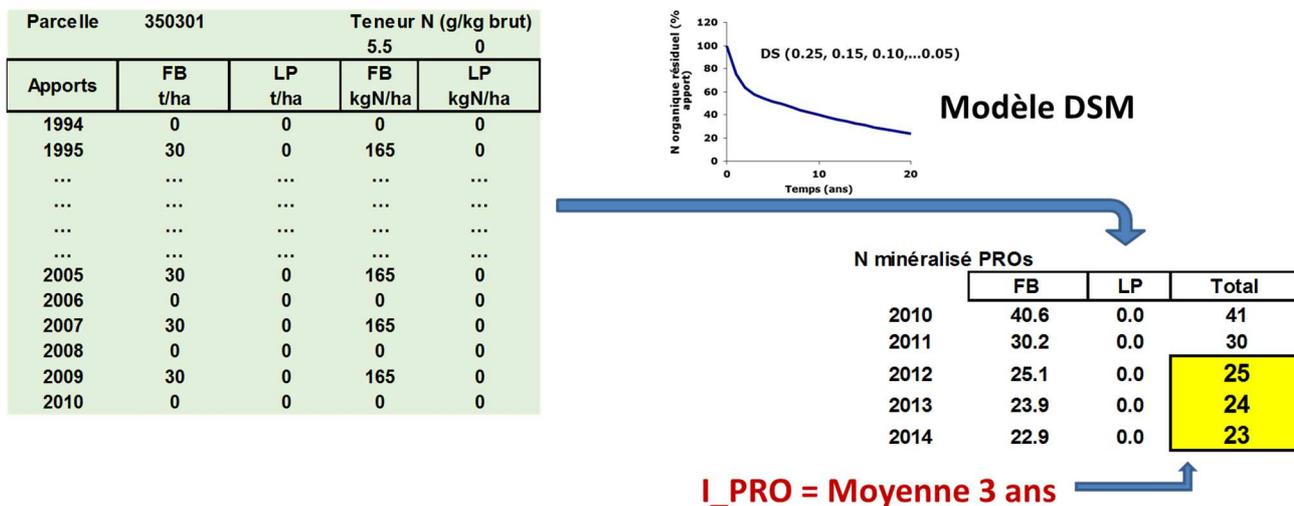


Figure 3. Calcul de I_Pro pour une parcelle en rotation maïs/blé avec apport de 30 t de fumier de bovins sur maïs. La teneur moyenne en azote du fumier est de 5.5 g/kg brut)

L'indicateur I_Pro est donc donné par la valeur moyenne des suppléments de minéralisation calculé par DSM pour les années 2012, 2013 et 2014.

La gamme des valeurs prise par I_Pro est présentée à partir d'une typologie de situations issue de quelques parcelles du réseau (tableau 4). Il en ressort que I_Pro est assez discriminant et prend des valeurs fonction :

- de la fréquence d'apport. Pour un fumier de bovins, I_Pro représente une dizaine de kg N/ha pour des apports tous les 5 ans (parcelles 220101, 350201) mais 50 kg N/ha pour des apports annuels. Avec une rotation maïs/blé, les apports de fumier un an sur deux représentent un flux supplémentaire de minéralisation de l'ordre de 30 kg N/ha (220702, 350501). En apports annuels, I_Pro peut représenter de l'ordre de 80 kg N/ha pour des apports cumulés de fumier de bovins et de lisier de porcs (560101, 221002)
- du type d'effluent épandu. En apports annuels avec du lisier de porcs (220501, 291002), les valeurs de I_Pro sont inférieures d'une vingtaine de kg N/ha comparées à celles calculées avec du fumier de bovins
- des quantités d'N/ha apportées pour un même rythme d'apport et des effluents similaires (221402 comparée à 220501).

Tableau 4. Valeurs de I_Pro calculées pour différentes parcelles du réseau Mh

Parcelle	Fréq. Apports	Rotation	Effluent	Qté kgN/ha	I_Pro
220501	0.93	MgMgMg	LP	115	26.0
291002	1	MgMgB	LP	137	33.2
560101	1	MeMeMe	FB-LP	275	68.4
221002	1	MeMeMe	FB-LP	208	78.0
221402	1	Toutes	LP	70	18.3
560302	0.93	Pr	LB	60	14.2
220702	0.53	MeB	FB	193	28.7
561101	0.47	MeB	FB	137	22.6
350501	0.47	MeB	FB-LP	242	29.2
350801	0.33	MeBPP	FB-LB	124	12.2
220101	0.2	MeBCoOh	FB-FV	159	8.8
350201	0.2	MeMeMe	FB	54	8.0

4. Valeurs et répartition en classes de l'indicateur I_Sys

Rappel : $I_Sys = I_Cult + I_Pro$

L'indicateur I_Sys prend une large gamme de valeurs, allant de 18 à 185 kg N/ha (figure 4). Sa valeur médiane est égale à 75 kg N/ha. Les points situés sur la diagonale correspondent aux parcelles sans apport d'effluent (I_Pro égale à zéro). L'écart des points à la diagonale traduit l'effet système lié à I_Pro.

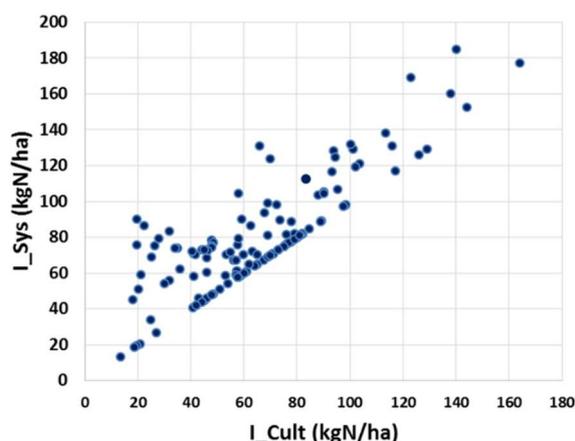


Figure 4. Représentation des valeurs de l'indicateur I_Sys des parcelles du réseau Mh en fonction de I_Cult

Tableau 5. Répartition en classes des valeurs de l'indicateur I_Sys

I_Sys	Valeurs	Nb parcelles
Faible	[14,62]	35
Moyen]62,107]	79
Elevé]107,185]	20

Cette répartition des valeurs nous permet d'établir 3 classes de niveau pour l'indicateur I_Sys, à effectifs variables et selon la méthode des k-means (tableau 5). Ces 3 niveaux de I_Sys (faible, moyen, élevé) seront utilisés dans un premier temps pour l'interprétation des valeurs de bilans mais aussi comme données d'entrée aux différents modèles d'estimation de notre variable d'intérêt, à savoir la Vp des différentes parcelles.

5. L'effet 'système' selon les classes de I_Sys sur les valeurs de bilan

Les parcelles de classe I_Sys élevé présentent des valeurs de bilan significativement supérieures aux 2 autres classes (figure 5). Les écarts moyens de valeurs entre les 2 classes extrêmes (faible et élevé) sont respectivement de 55, 46 et 25 kg N/ha pour les années 2012, 2013 et 2014 (tableau 6).

Les classes de I_Sys moyen et faible ne se distinguent pas statistiquement.

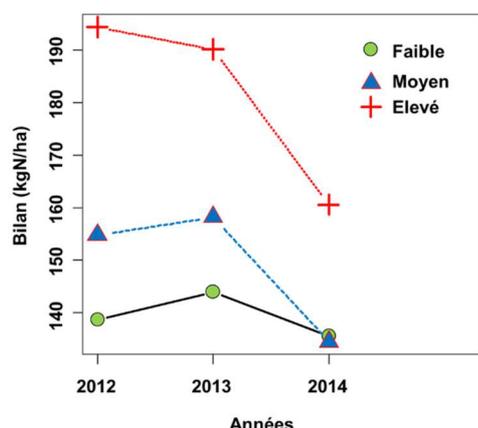


Figure 5. Valeurs de bilan selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys

Tableau 6. Valeurs moyennes des bilans selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys et pour les 3 années

Année	Bilan Moyenne	Bilan SD	I_Sys Faible	I_Sys Moyen	I_Sys Elevé
2014	139	71.4	136	135	161
2013	160	64.8	144	158	190
2012	158	59.1	139	155	194

5.1. L'effet 'système' sur la composante plante des bilans

L'effet 'système' se traduit par une quantité d'azote exportée par les plantes statistiquement supérieure pour les parcelles avec un niveau de I_Sys élevé (figure 6 et tableau 7). Ce supplément provient essentiellement de rendements plus élevés, plus 1.8 t MS/ha en moyenne sur les 3 ans (tableau 8).

Tableaux 7, 8. Valeurs moyennes des QN Export et des rendements selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys et pour les 3 années

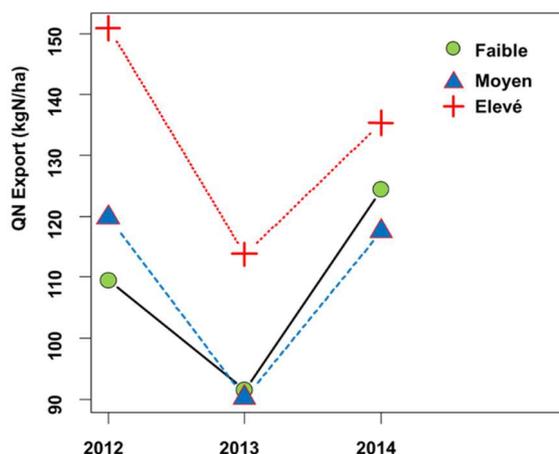


Figure 6. Valeurs de QN Export selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys

Année	QN exp Moyenne	QN exp SD	I_Sys Faible	I_Sys Moyen	I_Sys Elevé
2014	122	50.8	124	118	135
2013	94	39.7	92	90	114
2012	123	42.0	110	120	151

Année	RDT Moyenne	RDT SD	I_Sys Faible	I_Sys Moyen	I_Sys Elevé
2014	10.8	2.83	10.6	10.7	11.3
2013	9.5	2.99	9.3	9.3	11.1
2012	11.4	3.16	10.3	11.5	13.2

5.2. L'effet 'système' sur la composante sol des bilans

L'analyse des reliquats entrée et fin des parcelles de classe I_Sys élevé fait ressortir des flux de minéralisation significativement supérieurs aux 2 autres classes de population (figures 7 et 8).

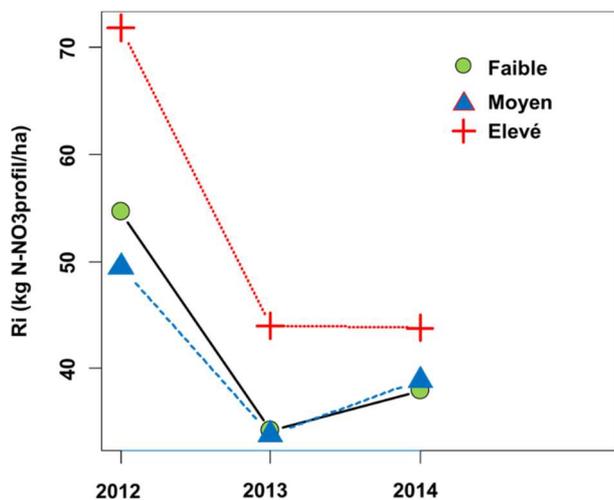


Figure 7. Valeurs des reliquats entrée (Ri) selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys

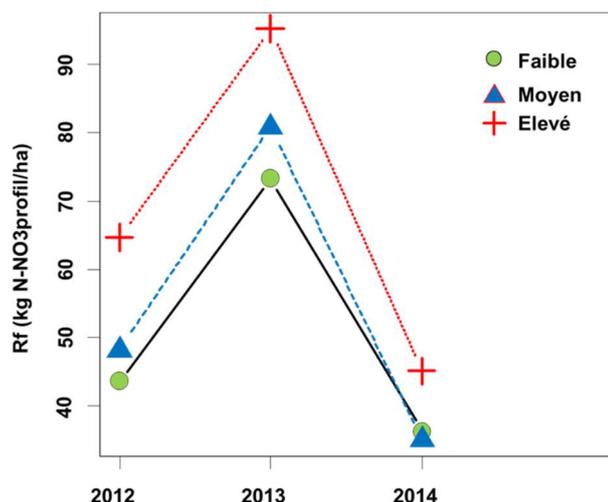


Figure 8. Valeurs des reliquats fin (Rf) selon les 3 classes de niveau de l'indicateur I_Sys

A ce premier niveau d'interprétation des bilans et de compréhension des mesures de terrain, l'indicateur I_Sys apparaît discriminant. Il met en évidence globalement des flux d'azote plus importants pour les parcelles où l'effet 'système' est jugé élevé. Cet indicateur sera une des variables d'entrée dans l'analyse plus avancée de la variabilité des Vp calculées.

Bibliographie

- Comifer., 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies
- Comifer., novembre 2013. Teneurs en azote des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein champ, les principaux fourrages et la vigne
- Grilles azote GREN Bretagne., mars 2013
- CRAB., 2008. Fiches cultures – Légumes de plein champ
- Decau M.L., Delaby L., Roche B., 1997. Fourrages. 151, 313-330

Synthèse des données sur les sols et sur les indicateurs de minéralisation

Thierry Morvan¹, Laure Beff¹, Philippe Germain¹, Rémi Chaussod², Matthieu Valé³,
Mariana Moreira¹, Blandine Lemerrier¹, Yvon Lambert⁴

¹INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²SEMSE

³AUREA

⁴Chambres d'agriculture de Bretagne

Introduction

La minéralisation de l'azote organique du sol résulte de l'activité de biodégradation de la matière organique (MO) exercée par des microorganismes hétérotrophes du sol (bactéries et champignons). Ces microorganismes forment la biomasse microbienne du sol, qui représente 1 à 2% du C total du sol. L'activité de biodégradation de cette biomasse microbienne se traduit par la minéralisation du carbone sous forme de dioxyde de carbone (CO₂) et celle de l'azote organique sous forme d'azote minéral (N ammoniacal et nitrique).

L'activité de la biomasse microbienne est régulée par les facteurs climatiques (cf exposés précédents) et elle est liée aux propriétés des sols et de la MO. La composition de la MO du sol est complexe et très hétérogène, avec la coexistence de molécules qui sont rapidement dégradées (acides organiques, acides aminés, polysaccharides) et de molécules très stables et récalcitrantes à la biodégradation (acides fulviques et humines). D'autre part, la MO interagit avec les constituants minéraux fins du sol pour former des complexes organo-minéraux, qui contribuent significativement à la stabilisation de la MO. L'effet protecteur des argiles vis-à-vis de la biodégradation est connu de longue date et la teneur en argiles est souvent une variable d'entrée des modèles de prédiction de la minéralisation (Comifer 2013). Enfin, le sol est un milieu organisé en agrégats de différentes tailles et cette organisation conditionne l'accessibilité physique de la MO aux microorganismes.

De nombreuses méthodes de caractérisation chimique et de fractionnement granulométrique de la MO ont été développées au cours des dernières années. Ces méthodes aident à la compréhension des processus de stabilisation physico-chimique de la MO, mais n'ont pas à ce jour d'application opérationnelle et n'en connaîtront probablement pas.

Cela explique que l'on ait cherché de longue date à rendre compte de la complexité des processus par la mise au point d'indicateurs chimiques ou biologiques de la minéralisation. Les mesures biologiques reposent sur des incubations de sol en conditions contrôlées de température et d'humidité, en aérobie ou anaérobie. Les méthodes d'extraction chimique ont été développées avant les années 1980 et ont fait l'objet de nombreuses publications. Une méta-analyse réalisée par Ros et al., 2011, a montré que seuls 5 tests, sur les 18 méthodes évaluées, sont de bons prédicteurs de la minéralisation.

Le menu analytique appliqué sur les sols du réseau a eu pour objectifs de mesurer des grandeurs utiles à la compréhension de la variabilité de la minéralisation et de répondre aux objectifs opérationnels du projet. Ce menu a porté sur : i) la caractérisation du compartiment microbien et de la MO du sol, par la mesure de la biomasse microbienne, des teneurs en C et N total et de la répartition de la MO dans les fractions granulométriques, ii) la mesure des variables 'Sol' considérées dans les modèles opérationnels (texture, pH...) et iii) la mesure de 5 indicateurs de la minéralisation sélectionnés à partir de l'analyse bibliographique.

1. Matériel et méthodes

1.1. Protocole d'échantillonnage des sols

Le sol de l'horizon 0-30 cm du sol des 137 parcelles du réseau a été échantillonné en mars 2013. Les échantillons ont été homogénéisés en frais et séparés en deux, avec une partie tamisée en frais à 5 mm et directement envoyée aux laboratoires pour réaliser les mesures d'incubation anaérobie et de biomasse microbienne. Le reste de l'échantillon a été séché à 40°C et tamisé à 2 mm, pour la réalisation des mesures physiques et chimiques.

La densité apparente du sol (DA) et la densité apparente de terre fine (DATf) de l'horizon 0-30 cm ont été déterminées sur toutes les parcelles du réseau. Les prélèvements ont été faits avec une gouge de 8 cm de diamètre (tarière racinaire SDEC).

1.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols

La texture a été déterminée par la mesure de la granulométrie 5 fractions, sans décarbonatation, selon la norme NF X 31-107.

La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée selon la méthode de Metson, suivant la norme AFNOR NF X 31-130 et le pH eau selon la norme NF ISO 10390.

La teneur en MO des sols a été déterminée par calcination à 550°C d'un échantillon de sol de 1 g broyé à 250 µ. Leurs teneurs en C organique et en N total ont été analysées par combustion sèche, sur échantillon de 50 mg de sol broyé à 250 µ, suivant les normes NF ISO 10694 et NF ISO 13878.

Le fractionnement granulométrique de la MO a été réalisé à partir du mode opératoire de Balesdent et al., 1998. Il est fondé sur la quantification de la MO contenue dans 3 fractions : la fraction 200-2000 µ (F1), permettant d'identifier la MO associée aux sables grossiers, la fraction 50-200 µ (F2), correspondant aux sables fins et la fraction 0-50 µ (F3), correspondant à la MO associée aux limons et argiles. La fraction particulaire (**POM** pour Particulate Organic Matter) est égale à la somme des fractions F1 et F2.

1.3. Mesures biologiques

La biomasse microbienne du sol (**Biom**) a été mesurée par la méthode de fumigation extraction, selon la norme AFNOR NF FD ISO 14.240-2, 1997.

La mesure de minéralisation en conditions contrôlées de laboratoire (**Ninc**) a été réalisée selon le mode opératoire adapté de Keeney and Bremner, 1966, et de Schomberg et al., 2009. 20 g de sol frais ont été incubés en anaérobiose, sous eau, pendant 7 jours à 40°C. L'azote ammoniacal a ensuite été extrait dans une solution de KCl. La minéralisation sur 7 jours a été calculée par différence entre la quantité de N extraite à 7 jours et celle extraite sur le sol avant incubation.

1.4. Fractionnements chimiques

Extractions à l'eau à 100°C (IEB)

L'extraction de C et de N à l'eau à 100°C est fondée sur un mode opératoire proposé par Leinweber et al., 1995. Un échantillon de 7 g de sol sec et tamisé à 2 mm a été mis en suspension dans 35 ml d'eau distillée dans des flacons *vial* de 40 ml fermés. Les flacons ont été mis à incuber pendant 1 heure sur des rampes de chauffage à la température de 100°C. L'échantillon a été centrifugé après refroidissement, pour analyse des teneurs en C organique (**IEB_C**) et en azote total (**IEB_N**).

N extractible en solution KCl à chaud (Nfract)

Cette méthode d'extraction a été proposée par Gianello and Bremner, 1986. Un échantillon de 3 g de sol séché et tamisé à 2 mm a été placé dans une solution de 20 ml de KCl 2M. La suspension sol/solution a été incubée pendant 4 heures dans un bain thermostaté à la température de 100°C. La suspension a été filtrée et la teneur en N-NH₄ de la solution analysée en colorimétrie. La quantité de N hydrolysée (**Nfract**) a été calculée par différence entre la quantité extraite et la quantité initiale de N-NH₄ de l'échantillon.

N extractible dans une solution Phosphate-borate (APM)

Cette méthode d'extraction de N dans une solution tampon de phosphate borate a également été proposée par Gianello and Bremner, 1988, et correspond à la mesure d'APM intégrée par InVivo dans son outil Epiclès. Un échantillon de 4 g de sol séché et tamisé à 2 mm a été placé dans une solution tampon de 40 ml phosphate-borate, de pH 11.2. La suspension sol/solution a été ensuite soumise à une distillation directe pendant 8 min et la quantité de N-NH₄ du distillat mesurée par titration. La quantité de N hydrolysée, correspondant à l'**APM**, est égale à la différence entre la quantité totale de N mesurée dans la solution tampon de phosphate borate et la quantité initiale de N-NH₄ de l'échantillon.

2. Résultats

2.1. Texture

Les mesures de la granulométrie de l'horizon 0-30 cm permettent de définir les classes texturales des sols (figure 1). Le réseau comprend principalement des Limon-sablo-argileux (*Lsa*, $n = 43$), des Limon-argilo-sableux (*LAS*, $n = 33$), des Limon argileux (*La*, $n = 20$) et des Limons (*L*, $n = 16$), caractéristiques des sols développés sur schiste et sur limons éoliens. Les classes texturales sableuses (*Sa* ($n = 5$) et *Sal* ($n = 13$)) sont représentées par les sols développés sur granite et gneiss.

Triangle des textures

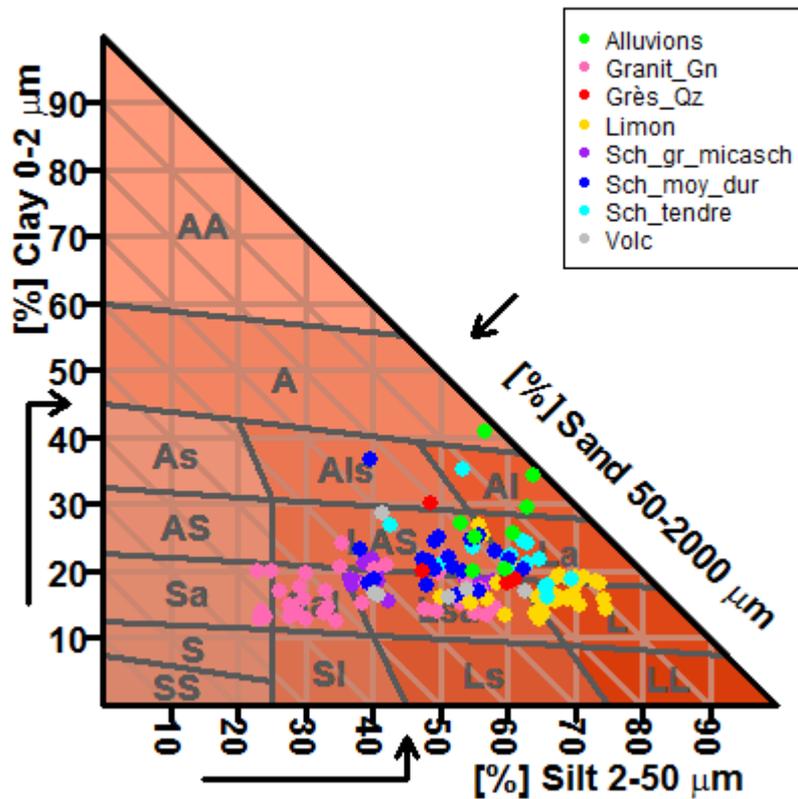


Figure 1. Position des parcelles du réseau Mh dans le triangle textural du GEPPA (France, 1963)

2.2. pH et capacité d'échange cationique (CEC)

La gamme de variation du pH eau est importante, comprise entre 4.8 et 7.9 (figure 2a). Environ 10% des sols sont caractérisés par un pH acide (centile 10 égal à 5.53) ; le pH moyen est égal 6.1 et est caractéristique des sols de l'Ouest. Il ne diffère pas significativement en fonction du matériau parental.

La CEC est faible et varie de 5.5 à 16.4 meq/100g de sol, avec une valeur moyenne de 9.7 meq pour 100 g de sol (figure 2b) Elle 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 et micaschistes et les sols développés sur alluvions.

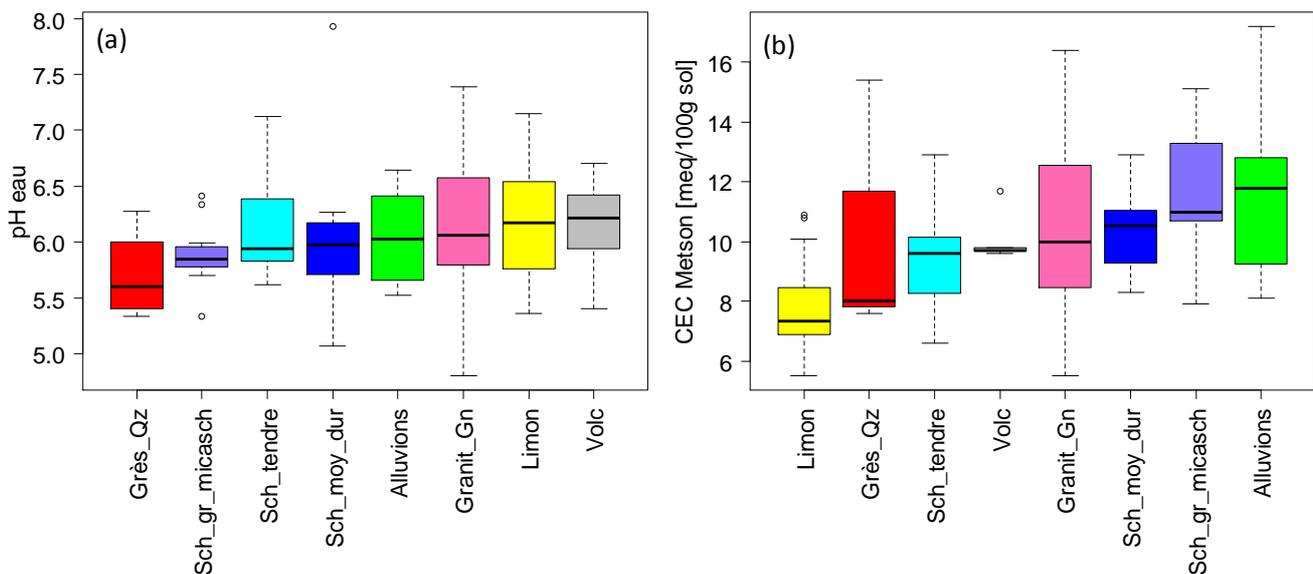


Figure 2. Représentation boxplot du pH (a) et de la CEC (b) en fonction du matériau parental

2.3. Teneurs en MO et en carbone (C)

La figure 3 présente la relation entre les teneurs en MO et en carbone, pour l'ensemble de l'effectif. Ces teneurs sont strictement corrélées ($r = 0.9999$) et indépendantes du type de sol. Le coefficient directeur de la droite de régression entre MO et C est de 1.73 ; il est très proche de la valeur de 1.72 adoptée par les laboratoires pour estimer la MO à partir de la teneur en C.

Les taux de MO des sols du réseau sont compris entre 1.99 % pour le centile 5 et 4.95 % pour le centile 95 (médiane = 3.2 %).

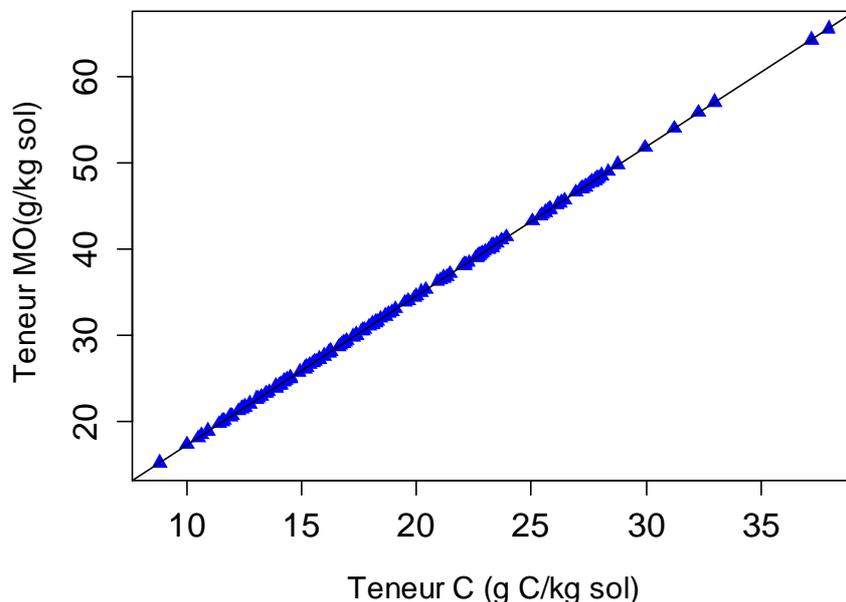


Figure 3. Relation entre teneur C (en g C/kg sol) et teneur en MO (en g/kg sol)

2.4. Teneurs en N, rapport C/N et stock de N de l'horizon 0-30 cm

On observe une forte différenciation des teneurs en N organique par type de matériau parental ($P < 0.001$), avec des teneurs moyennes nettement plus faibles pour les sols développés sur limons. La même différenciation est observée pour le carbone, les teneurs en C et N étant très fortement corrélées ($r = 0.92$). Le rapport C/N des sols varie cependant avec le matériau parental et il est significativement plus élevé pour les sols développés sur granite et gneiss que pour les autres sols ($P < 0.001$).

La gamme des teneurs en N est importante et représentative des sols de l'Ouest, avec une variabilité assez forte des teneurs au sein de chaque type de sol, même pour les sols développés sur limons.

La figure 4 présente les stocks de N de l'horizon 0-30 cm. Ils sont globalement élevés, en moyenne égaux à 6.5 t N/ha (médiane = 6.2 t N/ha) ; les stocks de N des sols développés sur limons et sur substrats volcaniques sont significativement inférieurs à ceux des autres sols ($P < 0.001$).

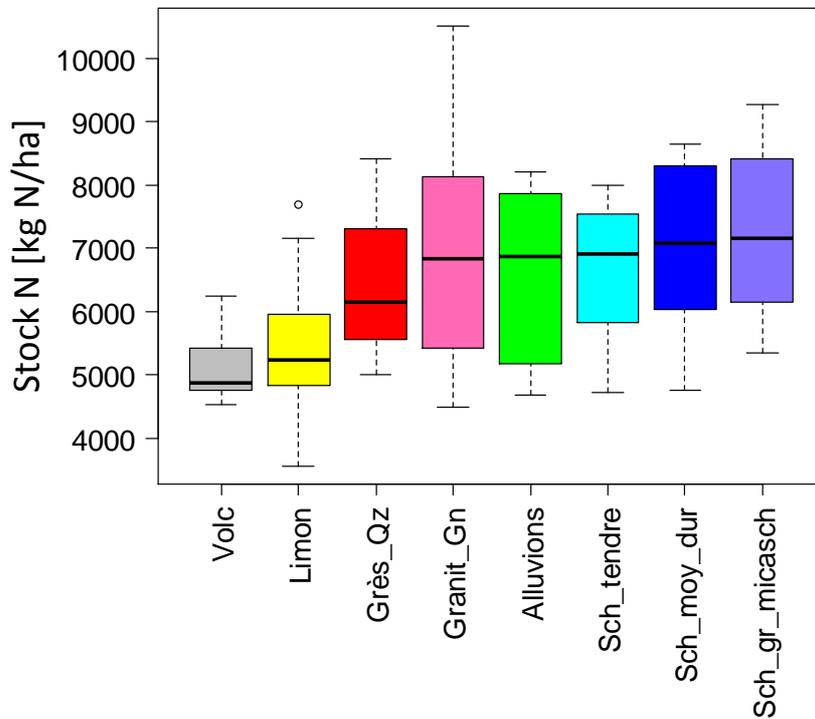


Figure 4. Représentation boxplot des stocks de N de l'horizon 0-30 cm

2.5. Fractionnement granulométrique de la MO

La gamme de variation des différentes fractions, exprimées en % du C, est présentée à la figure 5a. Ces résultats correspondent aux ordres de grandeurs caractéristiques des différentes fractions pour les sols cultivés, avec une fraction F1 qui contient 2 à 8% du C environ, une fraction F2 qui contient 3 à 12% du C et une fraction F3 qui contient 80 à 92% du C total. La fraction particulière POM, correspondant à la somme des fractions F1 et F2, constitue donc un compartiment de taille faible et variable, représentant 7.3 à 20.7% du C total du sol.

Le C/N des différentes fractions correspond également à ce que l'on observe pour les sols cultivés, avec un C/N élevé pour la fraction F1, un rapport C/N intermédiaire pour la fraction F2 et proche de celui du sol pour la fraction F3 (figure 5b).

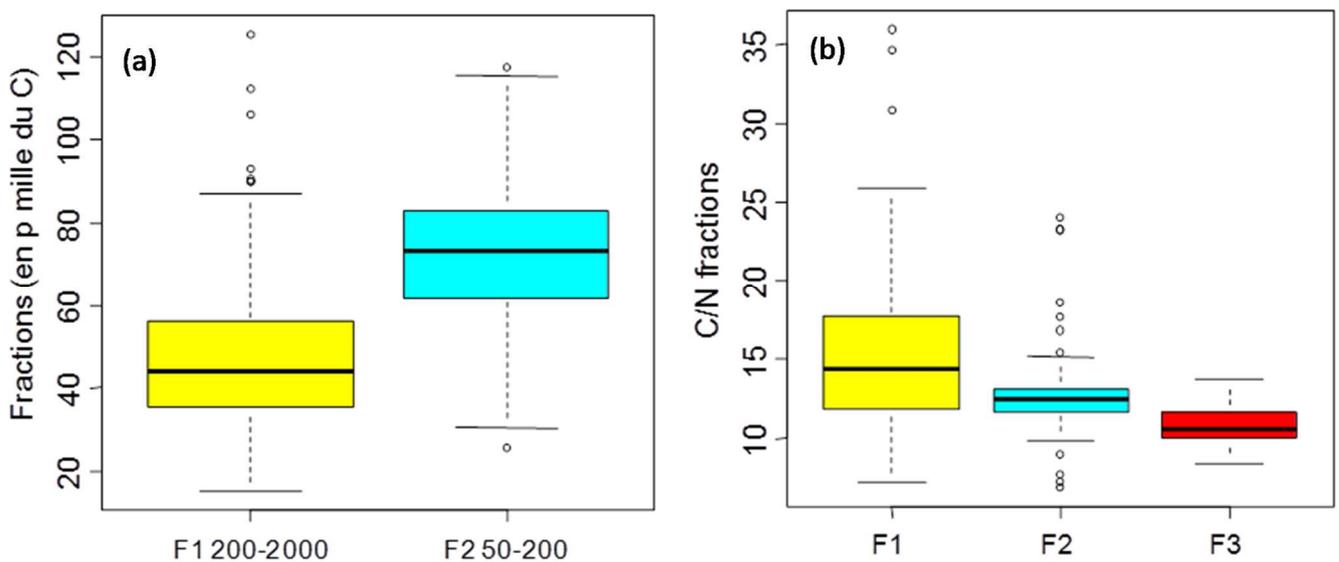


Figure 5. Représentation boxplot de la proportion de C contenue dans les fractions particulières F1 et F2 et du rapport C/N des 3 fractions granulométriques

Les quantités de N contenues dans la fraction particulaire (POM), en kg N/ha, sont présentées à la figure 6. Elles varient significativement en fonction du matériau parental ($P < 0.001$), avec des valeurs faibles mesurées pour les sols sur limons (médiane = 490 kg N/ha) et les plus élevées sur les sols développés sur schistes gréseux et micaschistes (médiane = 880 kg N/ha). Cette fraction particulaire constitue un compartiment de taille modeste (6 à 19% de l'azote total du sol), mais qui joue un rôle significatif sur la minéralisation, du fait de son turn over significativement plus élevé que celui de la MO associée à la fraction fine du sol.

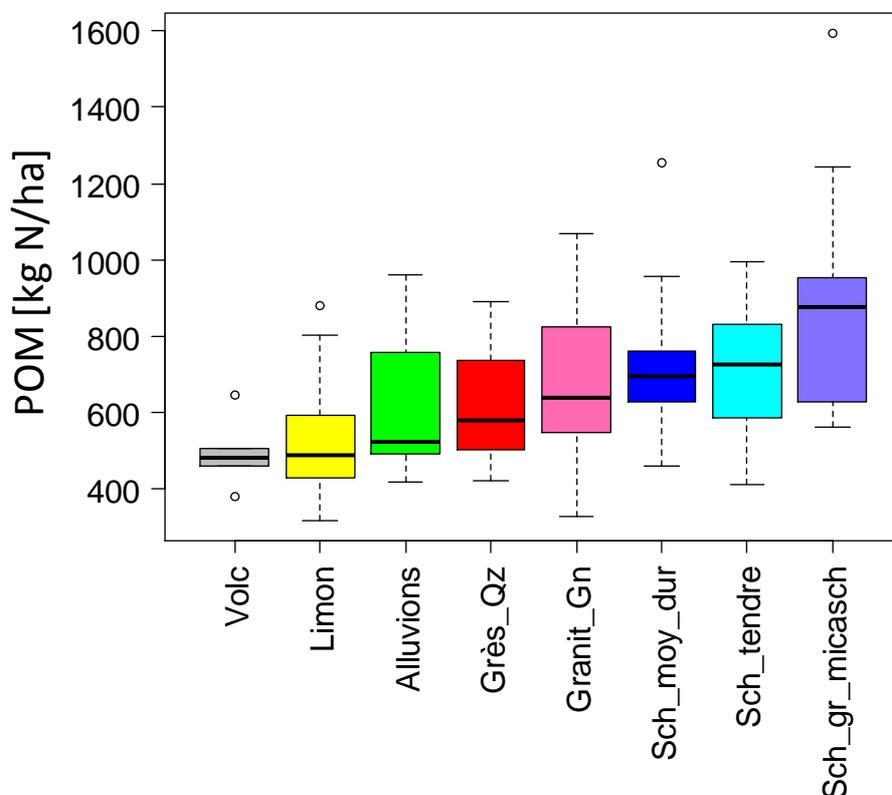


Figure 6. Représentation boxplot des quantités de N contenues dans la fraction particulaire (POM), en fonction du matériau parental

2.6. Des niveaux de biomasse microbienne variables et relativement faibles

La biomasse microbienne du sol est en moyenne égale à 167 mg C/kg sol et varie dans la gamme [120 ; 217] entre le 1^{er} et le 9^{ème} décile. Cette gamme correspond à des niveaux de biomasse relativement faibles, compte tenu des teneurs en C globalement élevées des sols du réseau et des historiques culturaux des parcelles, favorables à l'activité biologique des sols pour une majorité d'entre eux (apports de produits organiques, successions culturales avec prairies).

La figure 7 présente la comparaison des quantités de biomasse microbienne mesurées dans l'horizon 0-30 cm, en fonction du matériau parental. On constate que la biomasse des sols sur schistes gréseux et micaschistes, caractérisés par les stocks de C les plus élevés, est inférieure à celle des sols sur limon, dont les stocks de C sont les plus faibles.

Ce résultat, surprenant en 1^{ère} approche, s'explique par le fait que la proportion de C de la biomasse diffère significativement ($P < 0.001$) avec le matériau parental (tableau 1). Le pourcentage de C microbien est environ 2 fois plus élevé sur limon (1.1% du C total du sol en moyenne) que sur sols développés sur schistes gréseux et micaschistes (0.63% du C total du sol en moyenne) et il est également supérieur à ceux des sols développés sur granite-gneiss et sur schistes. On met donc en évidence un effet de compensation très important des fortes teneurs en C par de faibles taux de biomasse, qui se situent pour les sols développés sur granite et gneiss, schistes gréseux et micaschistes nettement en dessous de la gamme [1 ; 4%] donnée pour les sols cultivés (Sparling, 1992)(Chaussod et al., 1994).

Le taux et les quantités de biomasse microbienne ne sont pas significativement impactés par l'historique cultural à 15 ans.

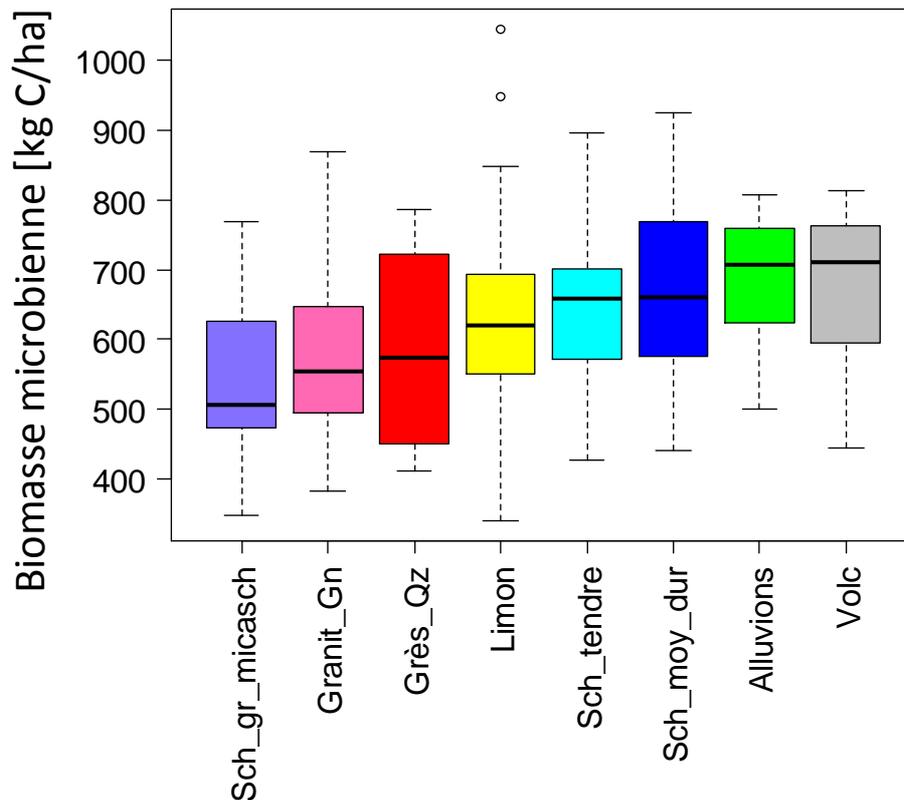


Figure 7. Représentation boxplot des quantités de biomasse microbienne (kg C / ha) en fonction du matériau parental

Tableau 1. Taux de biomasse microbienne (mg C/gC) en fonction du matériau parental (le lettrage associé aux valeurs moyennes indique le résultat du test de comparaison de moyennes réalisé au seuil de probabilité de 5%)

	Taux de biomasse microbienne (mg C/g C)
Volc	12.4 ^c
Limon	11.0 ^c
Alluvions	10.5 ^{bc}
Sch_moy_dur	9.5 ^{bc}
Sch_tendre	9.3 ^{bc}
Grès_Qz	8.8 ^{ac}
Granit_Gn	7.9 ^{ab}
Sch_gr_micasch	6.3 ^a

2.7. Gamme de variation des indicateurs (figure 8)

Les gammes dans lesquelles se situent les valeurs des indicateurs Ninc, Nfract et APM sont cohérentes avec la bibliographie (Curtin and Wen, 1999, Curtin et al., 2006, Jalil et al., 1996, McDonald et al., 2014, Schomberg et al., 2009, Sharifi et al., 2007). L'indicateur IEB_C varie dans une gamme inférieure à celle mesurée par Ros et al. (2011) et Curtin et al. (2006), mais le taux d'extraction du C est comparable en moyenne et en variation aux valeurs calculées par ces 2 auteurs.

L'indicateur à l'eau à 100°C extrait des quantités de C et de N très supérieures à celles des autres indicateurs :

- IEB_C est en moyenne 4.5 fois supérieur à la biomasse microbienne du sol, établissant de manière évidente que la MO extraite n'est composée que pour partie de corps microbiens
- IEB_N est également très supérieur aux indicateurs Ninc, Nfract et APM, dans un rapport compris entre 2.8 et 3.9.

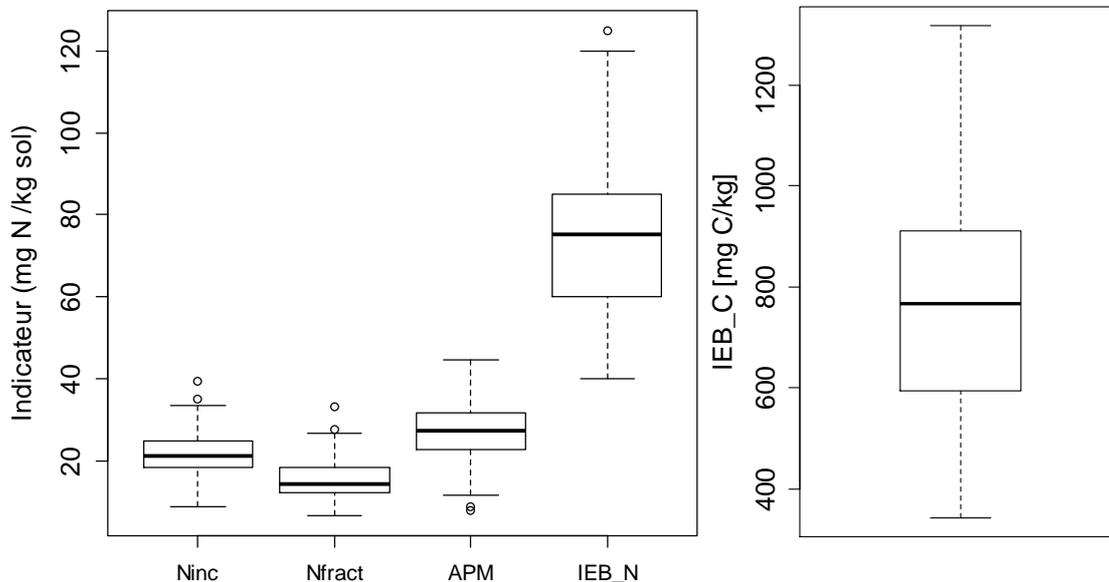


Figure 8. Gamme de variation des indicateurs Ninc (biologique), Nfract, APM, IEB_N et IEB_C (extraction chimique)

2.8. Corrélations entre indicateurs, biomasse microbienne et MO

L'étude des corrélations entre les différents indicateurs et avec les caractéristiques de la MO du sol permet de voir dans quelle mesure ces indicateurs apportent des informations semblables et de caractériser leur complémentarité.

Le cercle des corrélations du 1^{er} plan factoriel de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée sur les indicateurs et les teneurs en C et N du sol est présenté à la figure 9.

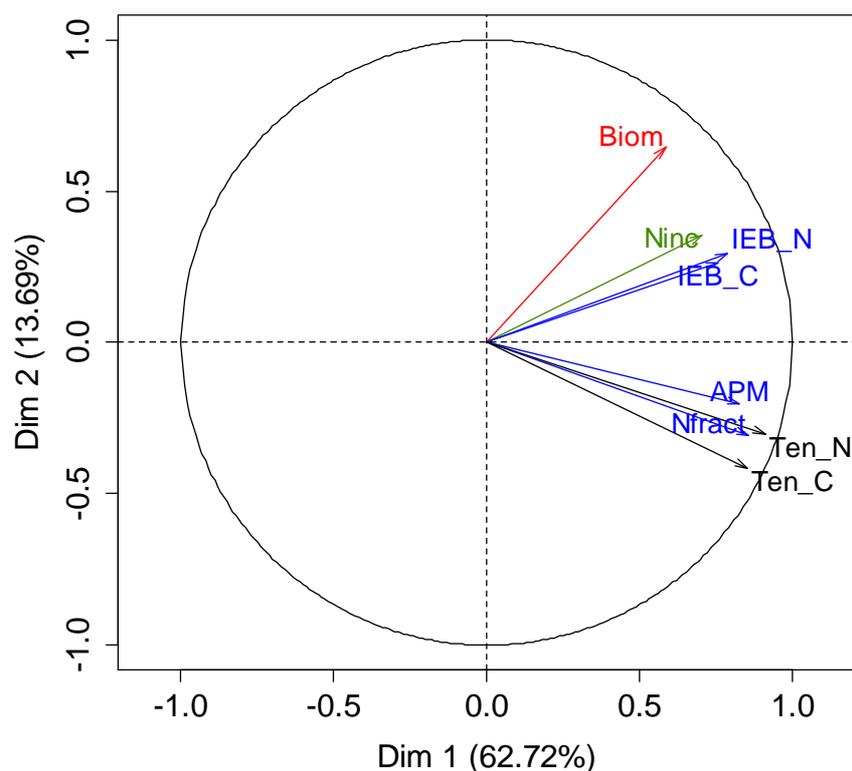


Figure 9. Cercle des corrélations du 1^{er} plan factoriel de l'ACP conduite sur les indicateurs (en mg C/kg sol ou en mg N/kg sol) et sur les teneurs en C et N du sol

Les indicateurs et les teneurs en C et N sont bien représentés dans le 1^{er} plan factoriel, qui explique 76% de la variabilité totale. Toutes les grandeurs se situent dans la même partie du plan ; elles sont donc positivement corrélées, ce qui est attendu, puisque ces grandeurs sont identifiées par la bibliographie comme des indicateurs de la minéralisation. L'axe 2 oppose la biomasse microbienne, l'indicateur biologique Ninc et l'IEB aux indicateurs Nfract et APM. Ces 2 derniers indicateurs sont très corrélés aux teneurs en C et N du sol.

Les corrélations entre indicateurs varient de 0.38 à 0.70. Les corrélations les plus élevées sont mesurées entre Nfract et APM ($r = 0.70$) et IEB_ N et Nfract ($r = 0.57$).

Les corrélations entre les indicateurs et la teneur en C et N du sol sont élevées et très hautement significatives ($P < 0.001$), à l'exception de Biom ($r = 0.24$, $P < 0.05$, entre Biom et la teneur en C). La teneur en C et N des sols explique donc une part significative de la variabilité des valeurs des indicateurs, avec des corrélations comprises dans la gamme [0.50 ; 0.85] selon les indicateurs.

Les indicateurs sont donc significativement corrélés entre eux et avec les teneurs en C et N du sol, mais les niveaux des corrélations sont relativement modérés. Chaque indicateur apporte donc des informations différentes et que l'on peut supposer complémentaires pour la prédiction de la minéralisation au champ.

Conclusion

Le projet Mh a permis de constituer une base de données importante sur les propriétés et caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols. Cette base de données, nécessaire à la compréhension du rôle joué par le sol sur la minéralisation de l'azote, complète les connaissances sur les sols acquises au niveau régional dans le cadre du RMQS et du programme Sols de Bretagne. Elle apporte aussi des résultats originaux sur le fractionnement de la MO et les indicateurs de minéralisation.

Les échantillons de sol des 137 parcelles prélevées en 2013 sont conservés en pédothèque. Cela permettra d'enrichir la base de données par de nouvelles mesures réalisées dans le cadre d'autres programmes de recherche et de poursuivre la valorisation des données acquises durant le projet Mh.

Remerciements

Ces mesures sur les sols ont été réalisées dans le cadre d'un partenariat avec les laboratoires SEMSE et AUREA et d'une collaboration avec le groupe InVivo, pour la mesure par le laboratoire Galys de l'indicateur APM. Nous tenons à les en remercier.

Bibliographie

- Balesdent J., Besnard E., Arrouays D. and Chenu C.**, 1998. "The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence." *Plant and Soil* 201(1), 49-57
- Chaussod R., Zuvia M., Breuil M.C. and Hetier JM.**, 1994. "Microbial biomass and organic matter status of tropical soils: example of a 'Llanos' soil of Venezuela under different cropping systems." *Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie* 27(1), 59-67
- Comifer**, 2013. "Calcul de la fertilisation azotée: Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : Cultures annuelles et prairies" Groupe Azote Comifer, 159
- Curtin D. and Wen G.**, 1999. "Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential." *Soil Science Society of America Journal* 63(2), 410-415
- Curtin D., Wright C.E., Beare M.H. and McCallum F.M.**, 2006. "Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability." *Soil Science Society of America Journal* 70(5), 1512-1521
- Gianello C. and Bremner J.M.**, 1986. "COMPARISON OF CHEMICAL METHODS OF ASSESSING POTENTIALLY AVAILABLE ORGANIC NITROGEN IN SOIL." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 17(2), 215-236
- Gianello C. and Bremner J.M.**, 1988. "A RAPID STEAM DISTILLATION METHOD OF ASSESSING POTENTIALLY AVAILABLE ORGANIC NITROGEN IN SOIL." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19(14), 1551-1568
- Jalil A., Campbell C.A., Schoenau J., Henry J.L., Jame Y.W. and Lafond G.P.**, 1996. "Assessment of two chemical extraction methods as indices of available nitrogen." *Soil Science Society of America Journal* 60(6), 1954-1960
- Keeney D.R. and Bremner J.M.**, 1966. "A chemical index of soil nitrogen availability." *Nature* 211(5051), 892-893
- Leinweber P., Schulten H.R. and Korschens M.**, 1995. "HOT-WATER EXTRACTED ORGANIC-MATTER - CHEMICAL-COMPOSITION AND TEMPORAL VARIATIONS IN A LONG-TERM FIELD EXPERIMENT." *Biology and Fertility of Soils* 20(1), 17-23
- Loiseau P., Chaussod R. and Delpy R.**, 1994. "Soil microbial biomass and in situ nitrogen mineralization after 20 years of different nitrogen fertilization and forage cropping systems." *European Journal of Agronomy* 3(4), 327-332
- McDonald N.T., Watson C.J., Lalor S.T.J., Laughlin R.J. and Wall D.P.**, 2014. "Evaluation of Soil Tests for Predicting Nitrogen Mineralization in Temperate Grassland Soils." *Soil Science Society of America Journal* 78(3), 1051-1064
- Ros G.H., Temminghoff E.J.M. and Hoffland E.**, 2011. "Nitrogen mineralization: a review and meta-analysis of the predictive value of soil tests." *European Journal of Soil Science* 62(1), 162-173
- Schomberg H.H., Wietholter S., Griffin T.S., Reeves D.W., Cabrera M.L., Fisher D.S., Endale D.M., Novak J.M., Balkcom K.S., Raper R.L., Kitchen N.R., Locke M.A., Potter K.N., Schwartz R.C., Truman C.C and Tyler D.D.**, 2009. "Assessing Indices for Predicting Potential Nitrogen Mineralization in Soils under Different Management Systems." *Soil Science Society of America Journal* 73(5), 1575-1586
- Sharifi M., Zebarth B.J., Burton D.L., Grant C.A. and Cooper J.M.**, 2007. "Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil." *Soil Science Society of America Journal* 71(4), 1233-1239
- Sparling G. P.**, 1992. "RATIO OF MICROBIAL BIOMASS CARBON TO SOIL ORGANIC-CARBON AS A SENSITIVE INDICATOR OF CHANGES IN SOIL ORGANIC-MATTER ." *Australian Journal of Soil Research* 30(2), 195-207

Variabilité du climat et du temps normalisé

Laure Beff¹, Yvon Lambert², Thierry Morvan¹

¹INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²Chambres d'agriculture de Bretagne

1. Le climat du réseau Mh

Pendant la durée du projet Mh, nous avons observé une variabilité du climat entre les différentes années (variabilité interannuelle) et entre les parcelles (variabilité inter-parcelle). Afin de calculer correctement Mh, il est donc nécessaire de considérer cette variabilité climatique, ce qui est généralement réalisé grâce aux jours normalisés (Jn).

1.1. Les caractéristiques climatiques des années 2012, 2013 et 2014

La figure 1 présente la variabilité de quatre grandeurs climatiques (température moyenne, pluie cumulée, évapotranspiration cumulée et rayonnement moyen) entre le 1^{er} mars et le 31 octobre de 2012, 2013 et 2014, qui sont les 3 années principalement utilisées dans l'analyse des données. Nous observons une variabilité interannuelle de ces grandeurs climatiques, avec :

- une température moyenne plus importante en 2014. La médiane de la température moyenne des différentes parcelles est près de 1°C plus importante en 2014 (14.5°C), alors qu'elle est similaire en 2012 (13.7°C) et 2013 (13.8°C)
- une pluie cumulée plus importante en 2012 (médiane = 569 mm) et plus faible en 2013 (médiane = 463 mm) alors qu'en 2014, elle est intermédiaire (médiane = 499 mm). Cette différence entre années est notamment due au printemps pluvieux de 2012
- une évapotranspiration potentielle (ETP) plus faible en 2012 qu'en 2013 et 2014
- un rayonnement moyen plus élevé en 2012 et plus faible en 2013

Nous observons également une variabilité des grandeurs climatiques entre les parcelles pour une année donnée. Cette variabilité est représentée sur la figure par la taille de la boîte à moustaches ("boxplot"). Cette variabilité entre les parcelles se traduit par exemple par une pluie cumulée du 1^{er} mars au 31 octobre 2012 allant du simple au double (de 400 mm à 800 mm) entre la parcelle ayant reçu le moins de pluie et celle en ayant reçu le plus.

La variabilité climatique interannuelle et inter-parcelle observée met en évidence l'importance de considérer le climat de chaque parcelle et de chaque année lors de l'analyse de Mh.

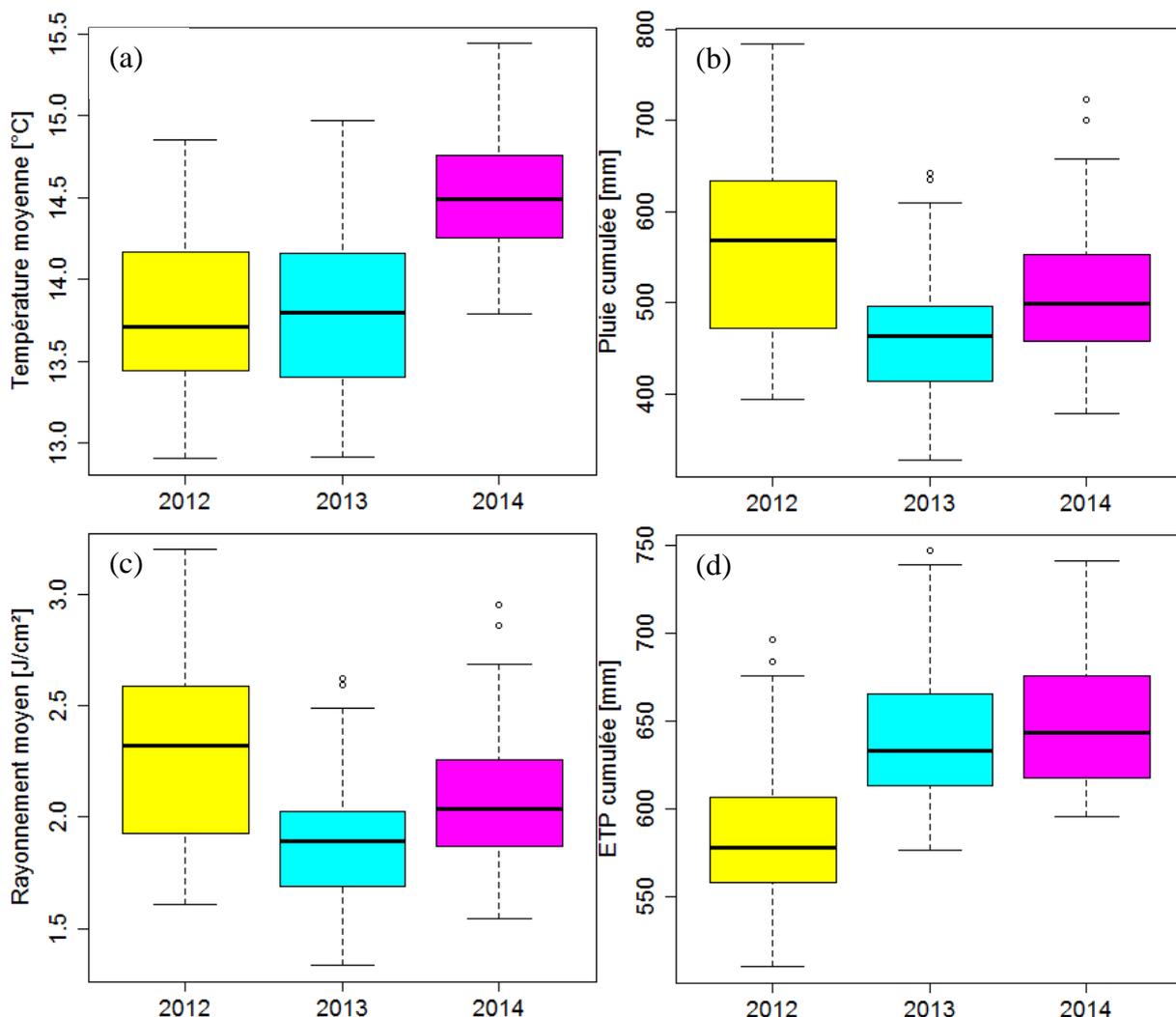


Figure 1. Variabilité climatique entre les années entre le 1^{er} mars et le 31 octobre avec (a) la température moyenne, (b) la pluie cumulée, (c) le rayonnement moyen et (d) l'ETP cumulée

1.2. La variabilité du climat entre les parcelles du réseau Mh

Afin d'illustrer la variabilité du climat des parcelles du réseau Mh, des cartes reprenant les principales grandeurs climatiques ont été réalisées avec comme exemple l'année 2013. Ces cartes représentent pour chaque parcelle la pluie cumulée (figure 2), la température moyenne (figure 3) et le rayonnement moyen (figure 4) entre les dates de reliquat initial (Ri) et de reliquat fin (Rf) de l'année 2013.

La figure 2 montre qu'en 2013, la pluie cumulée entre Ri et Rf a été plus faible au Nord qu'au Sud de la Bretagne. Bien qu'il existe une gradation Nord-Sud, certaines parcelles du Sud Morbihan et Finistère ont une pluie cumulée proche de ce qui est observé dans le Nord de la Bretagne. La pluie cumulée passe du simple au double entre le minimum (276 mm) et le maximum (594 mm) présentant la grande amplitude de pluie cumulée pouvant être observée sur les parcelles du réseau Mh. Toutefois, les parcelles très proches (triplettes), ont une pluie cumulée quasiment égale.

La figure 3 présente la variabilité de la température moyenne entre les différentes parcelles du réseau Mh. La température est généralement plus faible au Nord-Ouest et au centre de la Bretagne alors que la température est généralement plus élevée au Sud et à l'Est. La différence de température entre le maximum (15.2°C) et le minimum (13.4°C) est de plus de 1.5°C. Comme pour la pluie, nous observons une grande amplitude de température moyenne entre les parcelles.

Le rayonnement moyen (figure 4) est généralement plus faible au Nord-Ouest et à l'Est et plus élevé au Sud de la Bretagne. Comme pour la pluie cumulée et la température moyenne, la variabilité de rayonnement moyen est également relativement important entre les parcelles du réseau Mh, avec un minimum de 15.1 J/cm² et un maximum de 17 J/cm².

La variabilité climatique des parcelles du réseau sera considérée en introduisant les données météo de chaque parcelle dans le modèle STICS (Brisson et al., 2008) pour calculer la lixiviation et le nombre de jours normalisés.

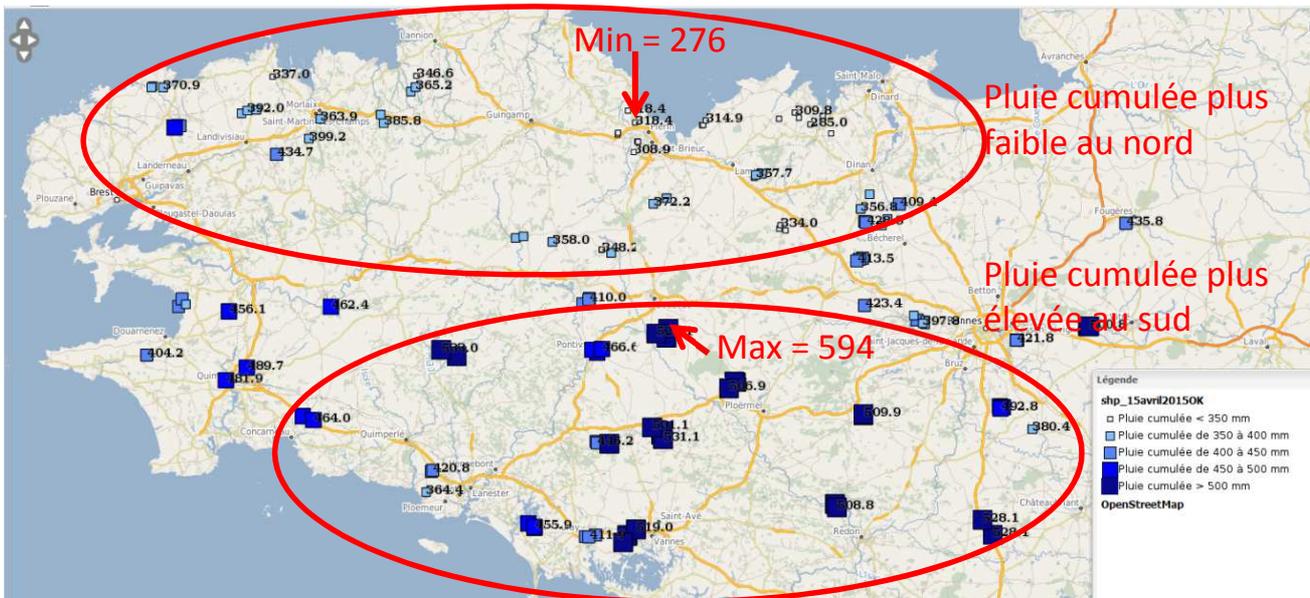


Figure 2. Carte de la variabilité de la pluie cumulée des parcelles du réseau Mh sur la période Ri – Rf en 2013. Les carrés sont positionnés à l'emplacement des parcelles. La taille et la couleur des carrés donnent la gamme de pluie cumulée dans laquelle se retrouve chaque parcelle (valeurs des gammes reprises dans la légende). La pluie cumulée de chaque parcelle est notée en noir à côté des carrés représentant les parcelles

Températures moyennes plus faibles au nord-ouest et au centre

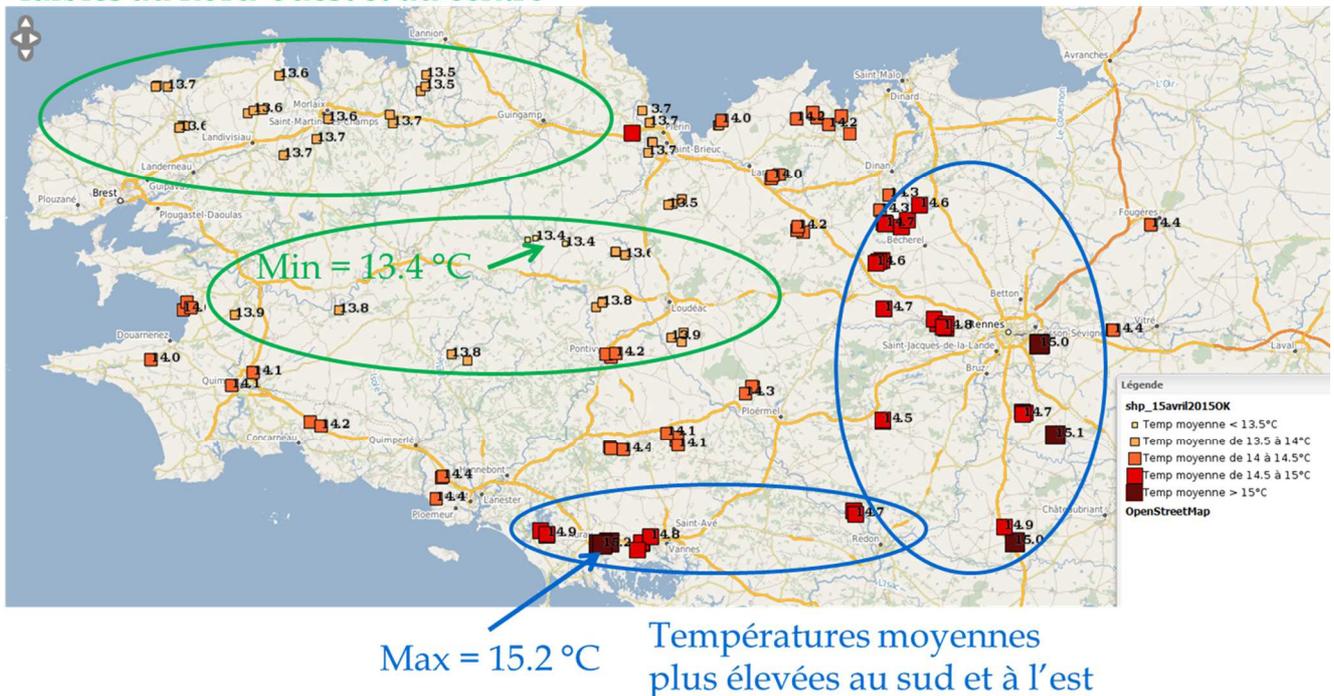


Figure 3. Carte de la variabilité de la température moyenne des parcelles du réseau Mh sur la période Ri – Rf en 2013. Les carrés sont positionnés à l'emplacement des parcelles. La taille et la couleur des carrés donnent la gamme de la température moyenne dans laquelle se retrouve chaque parcelle (valeurs des gammes reprises dans la légende). La température moyenne de chaque parcelle est notée en noir à côté des carrés représentant les parcelles

Rayonnement moyen plus faible au nord-ouest et à l'est

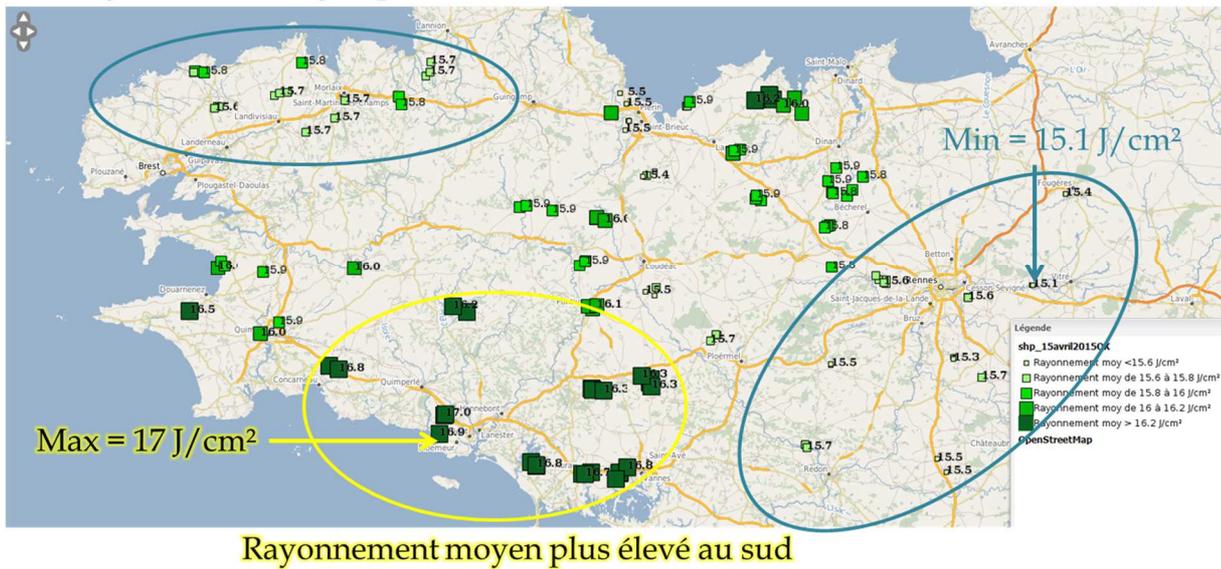


Figure 4. Carte de la variabilité du rayonnement moyen des parcelles du réseau Mh sur la période Ri – Rf en 2013. Les carrés sont positionnés à l'emplacement des parcelles. La taille et la couleur des carrés donnent la gamme du rayonnement moyen dans laquelle se retrouve chaque parcelle (valeurs des gammes reprises dans la légende). Le rayonnement moyen de chaque parcelle est noté à noir en côté des carrés représentant les parcelles

1.3. Impact du climat sur les variables d'intérêt

Les termes du bilan Mh vont être influencés par le climat. La minéralisation de l'azote est impactée par l'humidité et la température du sol. En effet, lorsque la température du sol est faible et/ou lors d'un stress hydrique, la minéralisation est ralentie par rapport à la situation de référence (température du sol de 15°C et humidité du sol à la capacité au champ). L'humidité du sol dépend des pluies et de l'évapotranspiration, mais également des caractéristiques du sol, telles que la profondeur du sol, son humidité à capacité au champ et au point de flétrissement, sa pierrosité, sa texture...

D'autres composantes du bilan sont également influencées par la météo. La lixiviation sera directement impactée par les pluies, surtout par les pluies de printemps, lorsque l'humidité du sol est proche de la saturation et qu'il n'y a pas encore de maïs pour prélever l'eau du sol. La figure 5 représente la variabilité de la lixiviation entre Ri et Rf de 2012, 2013 et 2014. Nous observons que la lixiviation de 2012 (médiane = 17.7 kg N/ha) est nettement supérieure à celle de 2013 (médiane = 6.3 kg N/ha) et 2014 (médiane = 4.7 kg N/ha). La lixiviation de 2012 peut atteindre plus de 60 kg N/ha pour certaines parcelles. Cette différence de lixiviation entre les parcelles est due à la variabilité de la pluie mais également aux propriétés des sols de chaque parcelle. L'impact du climat sur les grandeurs qui impactent directement Mh souligne l'importance de considérer le climat dans la compréhension et l'analyse de Mh.

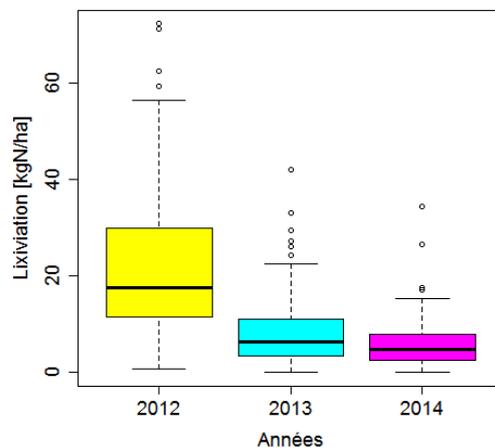


Figure 5. Lixiviation en kg N/ha entre Ri et Rf de 2012, 2013 et 2014

2. Le temps normalisé (Jn)

Afin de considérer l'effet du climat dans le calcul de Mh, nous avons calculé les jours normalisés pour toutes les parcelles du réseau et pour toutes les années.

2.1. Mode de calcul de Jn

Nous avons calculé le temps normalisé (J_n) avec le modèle STICS (Brisson et al., 2008), ce qui permet d'extraire l'effet du climat du flux de minéralisation. Le calcul de J_n est la somme sur la période de mesure, *i.e.* entre R_i et R_f , du produit de la fonction température et de la fonction humidité calculé chaque jour. L'équation de J_n comprend donc une fonction température, dépendant de la température du sol, et une fonction humidité influencée par l'humidité du sol (θ) et les humidités caractéristiques du sol (θ_{CC} = humidité à la capacité au champ et θ_{PF} = humidité au point de flétrissement). Dans le calcul de J_n , les interactions entre la température et l'humidité ne sont pas prises en compte. J_n est calculé par l'équation suivante :

$$J_n = \sum_{\Delta t} \underbrace{\left[Q_{10} \left(\frac{T - T_{ref}}{10} \right) \right]}_{FT} \underbrace{\left[g_{PF} + (1 - g_{PF}) \left(\frac{\theta - \theta_{PF}}{\theta_{CC} - \theta_{PF}} \right) \right]}_{FHum}$$

avec $Q_{10} = 3.17$; $g_{PF} = 0.2$

θ_{CC} = humidité à la capacité au champ (% MS)

θ_{PF} = humidité au point de flétrissement (% MS)

Par rapport à une situation de référence (température et humidité constante),

- une diminution de l'humidité du sol (due à l'évapotranspiration) va induire une diminution de la fonction humidité. Cela se traduit, si la température du sol reste constante, par une diminution de J_n par rapport à la situation de référence
- si c'est la température du sol qui diminue et que l'humidité reste constante, la fonction température diminuera et impliquera également une diminution de J_n
- à l'opposé, si la température du sol augmente, J_n augmentera
- l'humidité du sol ne pouvant pas dépasser un certain seuil (saturation en eau du sol), la fonction humidité est bornée et ne permet donc qu'une augmentation limitée de J_n si la température reste constante.

La valeur de J_n et donc sa variation suite à l'état du sol, impactera directement le calcul de Mh. La température et l'humidité du sol évoluant en même temps et donnant parfois des effets opposés sur Mh, il est judicieux d'utiliser le modèle STICS pour calculer J_n .

2.2. Evaluation et validation de la simulation de la dynamique de l'humidité du sol par le modèle STICS

L'humidité et la température du sol sont des facteurs clés pour déterminer Mh. Comme il est difficile de mesurer en continu ces grandeurs sur toutes les parcelles du réseau Mh, elles ont été simulées grâce au modèle STICS à partir de la météo observée sur la parcelle, des propriétés des sols, de l'itinéraire technique et du groupe de précocité de la variété de maïs.

Afin d'évaluer la qualité de la dynamique de l'humidité du sol simulée par STICS, nous avons mis en place un suivi de l'humidité du sol. La teneur en eau du sol a été mesurée bimensuellement sur 19 parcelles (8 en 2013 et 11 en 2014) entre mai et octobre sur les deux premiers horizons (0-30 cm et 30-60 cm) de sol. Ces mesures au champ ont été comparées aux simulations réalisées avec STICS.

La figure 6 présente pour une parcelle (350100) l'évolution de l'humidité du sol obtenue avec STICS et celle mesurée au champ. Nous observons une relativement bonne correspondance (RMSE = 2.7 pour l'horizon n°1 et RMSE = 1.2 pour l'horizon n°2) entre les résultats de la simulation et les mesures au champ. Cela indique que le paramétrage du sol a été correctement réalisé et que le modèle simule de façon acceptable l'évolution de l'humidité du sol. Les résultats pour les autres parcelles ne sont pas montrés mais ils permettent tous de conclure que la dynamique de l'eau est correctement simulée avec STICS et notre paramétrage.

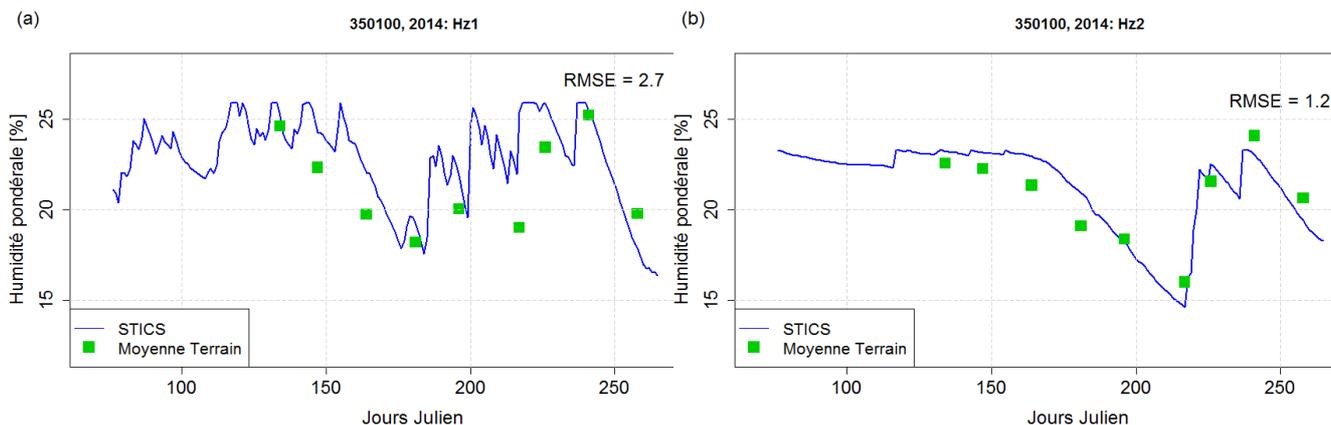


Figure 6. Comparaison de la teneur en eau du sol de la parcelle 350100 mesurée en champ et simulée avec STICS pour l'horizon n°1 (a) et l'horizon n°2 (b). La ligne bleue représente l'évolution de l'humidité prédite avec STICS. Les carrés verts représentent l'humidité moyenne mesurée sur chaque horizon de 30 cm de profondeur pendant la saison culturale du maïs

2.3. Gamme de variation de Jn

La figure 7 présente les Jn de chaque année entre R_i et R_f . Nous observons que les Jn de 2014 sont généralement les plus élevés alors qu'en 2013, les Jn sont, pour la plupart des parcelles, inférieurs aux Jn des autres années. Les faibles Jn de 2013 sont principalement dus aux faibles précipitations (figure 1), surtout pendant l'été. En 2014, la température de R_i à R_f est la plus élevée des 3 années et les pluies sont relativement importantes (figure 1). De plus, c'est principalement la répartition des pluies au cours de l'année qui influence Jn. En effet, en 2014, il y a eu régulièrement des événements pluvieux, ré-humectant le sol, ce qui augmente la fonction humidité et donc Jn par rapport aux deux autres années présentant des stress hydriques pendant l'été notamment.

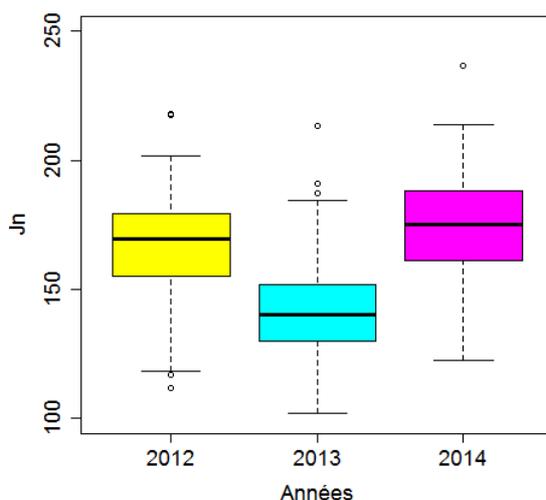


Figure 7. Temps normalisé (Jn) des différentes années (jaune = 2012, cyan = 2013, magenta = 2014). La taille des boxplot indique la variabilité de Jn entre les différentes parcelles du réseau pour chaque année

2.4. Comment considérer le climat dans une approche opérationnelle ?

La principale difficulté pour considérer le climat dans une approche opérationnelle de prédiction de Mh, est qu'il n'est pas connu à l'avance. Il n'est donc pas possible de calculer à l'avance les Jn réels de l'année. Nous avons donc calculé des Jn "prévisionnels" pour chaque parcelle. Comme Mh est utilisé pour calculer la dose d'engrais nécessaire aux cultures, ces Jn "prévisionnels" ont été calculés sur la période où la minéralisation de l'azote est valorisable par le maïs. Pour les parcelles du projet Mh, ce calcul a été réalisé en deux étapes :

1. Calcul avec STICS des Jn sur la période où la minéralisation de l'azote est valorisable par le maïs (Jn_Maize) pour chaque année de 2011 à 2014. La période considérée va du R_i (fixé au 1^{er} mars) à la fin d'absorption de l'azote par le maïs (fixée au 10 septembre (Castillon 2000))
2. Moyenne des Jn_Maize pour ces 4 années de mesure (Jn_Maize_Moy)

Ces Jn_Maize_Moy sont considérés comme les Jn "prévisionnels" de chaque parcelle.

La figure 8 présente les Jn_Maize_Moy de 65 parcelles du projet Mh. On observe des zones où ces Jn sont relativement élevés (dans le Morbihan par exemple) et d'autres où les Jn sont plus faibles (dans le Nord des Côtes d'Armor par exemple). Toutefois, certaines parcelles très proches ont des Jn_Maize_Moy relativement éloignés (exemple de 2 parcelles d'Ille-et-Vilaine). Cela témoigne de la diversité des caractéristiques pédologiques (Stock d'azote, pierrosité, humidité à capacité au champ et au point de flétrissement, texture...) de parcelles parfois proches. Le tableau 1 présente des propriétés des sols de ces 2 parcelles. Nous observons que leur type de sol est différent, ce qui se traduit notamment par des valeurs nettement différentes de stock N, humidité au point de flétrissement (Hpf), pH et texture. Si nous considérons que ces 2 parcelles ont la même Vp égale à la moyenne ($V_{p_{moy}} = 0.83 \text{ kg N/ha/Jn}$), ces différences de Jn peuvent conduire à des différences de 19 kg N/ha sur la période où la minéralisation N est valorisable par le maïs, ce qui représente environ 15% de la minéralisation sur cette période.

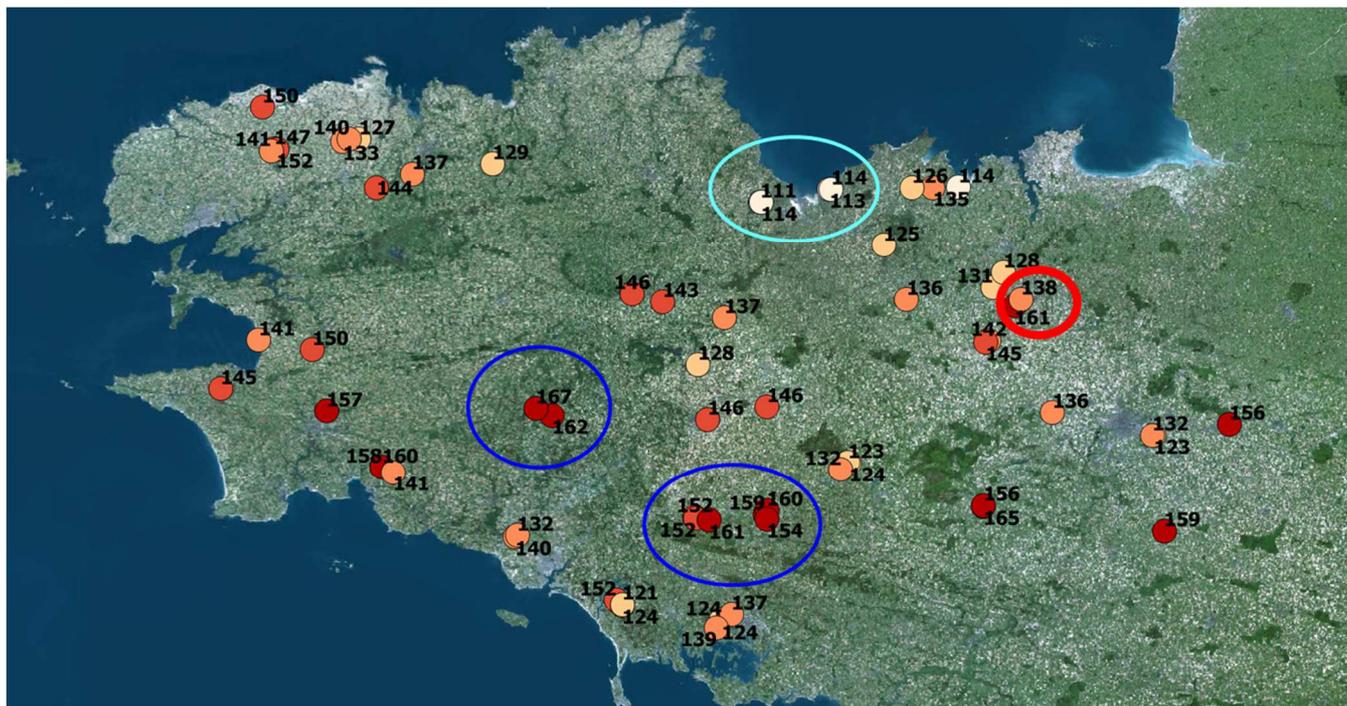


Figure 8. Carte des Jn_Maize moyen sur 4 ans (2011 – 2014) de 65 parcelles du projet Mh. Les Jn_Maize correspondent aux Jn obtenus par STICS pour la période où la minéralisation de N est valorisable par le maïs. Les points les plus clairs correspondent aux parcelles ayant les Jn_Maize moyen les plus faibles et les points les plus foncés correspondent aux parcelles ayant les Jn_Maize moyen les plus élevés. Les valeurs de Jn_Maize_Moy sont écrites à côté des points

Tableau 1. Propriétés de sol et Jn_Maize de 2 parcelles proches géographiquement et présentant un Jn_Maize bien différent

Parcelle	221202	221200
Jn_Maize	138	161
Type de sol	Limon	Alluvions
Stock N [kgN/ha]	3550	5821
Hpf [$g_{eau}/100g_{sol}$]	7.94	14.9
pH	5.81	7.83
Argile [g/kg]	164	390

Cette variabilité des Jn_Maize_Moy montre l'importance de considérer le climat (via le temps normalisé) et les propriétés des sols dans le calcul de Mh. Le Comifer propose une valeur de 110 Jn pour toute la Bretagne sur la même période. Cette valeur de Jn est sous-estimée pour la plupart des parcelles et peut conduire à des erreurs de calcul de Mh de 25 kg N/ha en moyenne et pouvant dépasser pour certaines parcelles 50 kg N/ha.

Conclusion

La variabilité climatique observée dans le projet Mh montre une variabilité interannuelle et intra-parcelle de la pluie, de la température, du rayonnement et de l'évapotranspiration. La minéralisation de l'azote étant impactée par l'humidité et la température du sol, il est essentiel d'extraire l'effet du climat du flux de minéralisation. Cela est réalisé en considérant les jours normalisés dans le calcul de Mh ($Mh = Vp \cdot Jn$). Le calcul de Jn doit être réalisé pour chaque parcelle car il dépend de la météo mais également des propriétés des sols de chaque parcelle. Considérer le même Jn pour toute la Bretagne comme suggéré par le Comifer peut conduire à des erreurs de calcul de Mh de 25 kg N/ha en moyenne et pouvant dépasser pour certaines parcelles 50 kg N/ha sur la période où la minéralisation N est valorisable par le maïs.

Bibliographie

Brisson N., Launay M., Mary B. and Beaudoin N., 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

Démarche de modélisation de la minéralisation

Laure Beff¹, Thierry Morvan¹, Benjamin Louis¹, Yvon Lambert²

¹INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²Chambres d'agriculture de Bretagne

Introduction

L'approche proposée actuellement au niveau national (Comifer 2013) pour prédire le flux de minéralisation Mh 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. L'objectif de la démarche de modélisation a été (i) de questionner et d'évaluer le formalisme fondé sur ces 3 composantes et (ii) de construire un modèle prédictif de la minéralisation et (iii) d'évaluer ce modèle dans le cadre d'une utilisation prévisionnelle.

1. Matériel et méthodes

1.1. 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, allant de 0 à 4, 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 (note globale de la parcelle = 2, 3 ou 4). 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.

1.2. 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 Mn mesurée par le bilan N correspond au flux Mh. Dans ce contexte, nous avons appliqué pour les données de ces 3 années le formalisme suivant :

$$Mn_{\text{année}} \approx Mh_{\text{année}} = Vp \cdot Jn_{\text{année}} \quad (1)$$

Jn étant calculé par STICS

Nous avons cependant constaté que l'application de ce formalisme ne conduisait pas à calculer des valeurs proches de Vp, 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 Vp.Jn, 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 (2), avec V_p et $Em_{\text{année}}$ pour inconnues :

$$Mn_{\text{année}} = V_p \cdot Jn_{\text{année}} + Em_{\text{année}} \quad (2)$$

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 ($Bilan_{\text{année}}/Jn_{\text{année}}$) 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 considérée 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 a 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 : $Em_{\text{année}} = Bilan_{\text{année}} - V_{p_{\text{moy}}} \cdot Jn_{\text{année}}$, 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.

1.3. 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...). 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).

2. Résultats

2.1. Gamme de variation de V_p et corrélations avec les grandeurs sol et l'historique cultural

Les V_p calculées sur les 65 parcelles sélectionnées pour l'analyse des données se situent entre 0.34 et 1.61 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Jn}^{-1}$ et la valeur moyenne est de 0.83 $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Jn}^{-1}$. Cette gamme de V_p est similaire à celle obtenue par Valé (2006) sur sol nu.

Plusieurs variables sont significativement corrélées à V_p , mais aucune corrélation ne permet d'expliquer une part de variabilité importante de V_p . Tous les indicateurs de minéralisation sont hautement significativement corrélés à V_p . 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 V_p . L'indicateur système (I_{Sys}) est également très hautement significativement corrélé à V_p ($r = 0.43$), 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 1 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.

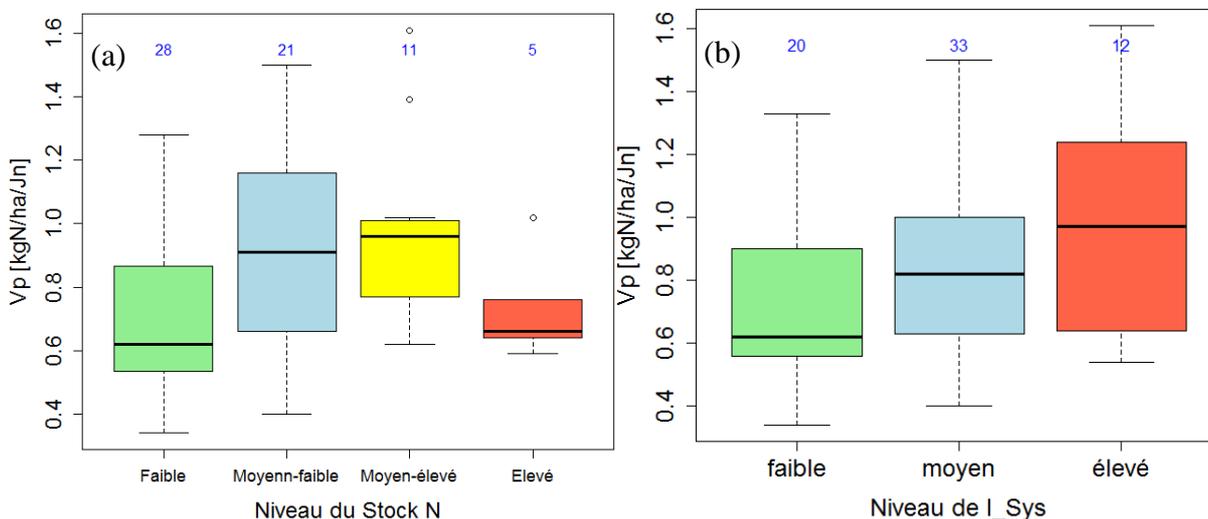


Figure 1. Boxplot de la variabilité de Vp en fonction (a) du niveau du stock N (faible $\leq 5\ 920$ kg N/ha, moyenn-faible : entre 5 920 et 7 400 kg N/ha, moyen-élevé : entre 7 400 et 8 640 kg N/ha et élevé $> 8\ 640$ kg N/ha) et (b) du niveau de I_Sys (faible ≤ 62 kg N/ha, moyen : entre 62 et 107 kg N/ha et élevé : > 107 kg N/ha)

2.2. Evaluation du module de calcul de Vp du Comifer

La figure 2 (a) présente la comparaison de la prédiction de Vp obtenue par le formalisme proposé par le Comifer avec les Vp calculées sur le réseau Mh. Nous observons que malgré les corrélations significatives de Vp avec F_{syst} et avec le stock N, le formalisme proposé par le Comifer ne donne pas une prédiction satisfaisante de Vp (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).

2.3. Elaboration d'un modèle prédictif (GAM)

Ce modèle prédictif de Vp 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 Vp et l'ensemble des variables explicatives, à l'exception d'une relation polynomiale de degré 2 entre Vp et la variable CEC/Arg. Ce modèle permet de prédire correctement Vp : le R^2 entre Vp mesurée et Vp 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 Vp est 2.1 fois plus petite que la variabilité de Vp. Sur la figure 2 (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 Vp et la prédiction est de 0.4 kgN.ha⁻¹.Jn⁻¹ et correspond à la parcelle ayant une Vp de 1.39.

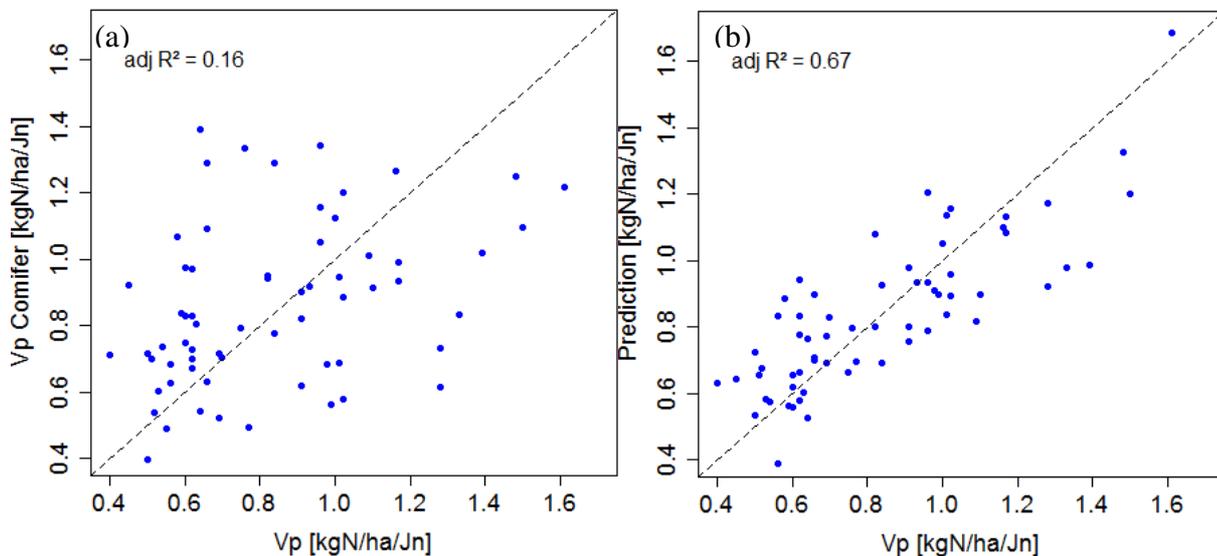


Figure 2. Comparaison de V_p avec la prédiction obtenue (a) avec le modèle Comifer et (b) avec notre modèle prédictif décrit ci-dessus. La valeur du coefficient de détermination ajusté ($adj R^2$) est écrite sur chaque figure

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.

Ce modèle, appelé modèle complet, requiert des propriétés des sols parfois difficiles à obtenir (i.e. Biomasse microbienne, fractionnement granulométrique de la MO...). Dans une optique de prédiction opérationnelle de Mh, nous avons réalisé d'autres modèles de prédiction : (i) un modèle contenant uniquement l'indicateur système, comme dans l'approche de préconisation régionale avec les grilles (Modèle I_Sys), (ii) un modèle contenant uniquement des propriétés des sols relativement accessibles et l'indicateur système (Modèle Sol-I_Sys) et (iii) un modèle contenant des propriétés des sols relativement accessibles, l'indicateur système et un indicateur de la minéralisation (Biom ou APM). Le tableau 1 présente les variables utilisées dans chaque modèle ainsi que la valeur des indices statistiques utilisés pour déterminer la qualité prédictive de chaque modèle. Le modèle permettant la meilleure prédiction de V_p est le modèle complet ($R^2 = 0.67$). A l'opposé, un modèle construit uniquement avec l'indicateur système, comme dans les bases de préconisation régionale (BPR), donne une mauvaise prédiction de V_p . Ajouter des propriétés des sols à ce modèle ne permet pas d'améliorer la prédiction de V_p de manière suffisante. La mobilisation de données d'indicateurs de la minéralisation est indispensable. Ces résultats rejoignent ceux Alvarez and Steinbach (2011) et de Valé (2006). Alvarez and Steinbach (2011) modélisent la minéralisation ($R^2 = 0.77$) 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 V_p proposé par Valé (2006) ($R^2 = 0.76$) 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 50 μm et la vitesse d'incubation des sols en aérobie.

Nous avons retenu comme modèle opérationnel celui réalisé à partir de l'indicateur système, de propriétés du sol et de l'APM. Nous avons choisi cet indicateur de minéralisation car il est plus facile à mesurer que Biom et relativement stable dans le temps.

Tableau 1. Comparaison des différents modèles de prédiction de V_p grâce à différents indices statistiques : R^2 ajusté, la MSEP et le RPIQ. Les variables utilisées dans chaque modèle sont également indiquées

Modèle	Variables	R^2 ajusté	MSEP	RPIQ
I_Sys	I_Sys	0.16	0.074	1.51
Sol + I_Sys	I_Sys, Sf, Sg, C/N	0.34	0.065	1.61
Sol + I_Sys + APM	I_Sys, Sg, Ten_N, CEC/Arg, APM	0.5	0.049	1.86
Sol + I_Sys + Biom	I_Sys, Sg, C/N, Hcc, P Olsen, pH, Biom	0.6	0.044	1.96
Complet	I_Sys, Sf, Lf, CEC/Arg, POM_gN, APM, Biom	0.67	0.038	2.1

2.4. 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 conduits 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 d'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 3 (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 complet (figure 3 b) et par le modèle opérationnel (figure 3 c) présentés dans la section précédente, ainsi qu'avec la prédiction donnée par les BPR (figure 3 d).

Les résultats montrent que la prédiction de la minéralisation avec le modèle complet 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. La prédiction de Mh_Maize avec le modèle opérationnel (figure 3 c) est acceptable (R^2 ajusté = 0.48) en regard de la complexité des processus influençant Mh et est nettement supérieure à la prédiction réalisée avec les BPR (R^2 ajusté = 0.22).

Nous concluons qu'un modèle renseigné par un indicateur de la minéralisation, par l'indicateur Système (I_Sys) et par des caractéristiques physico chimiques facilement accessibles (teneur en N, texture et CEC), constitue un modèle correct et pouvant être utilisé dans une approche opérationnelle.

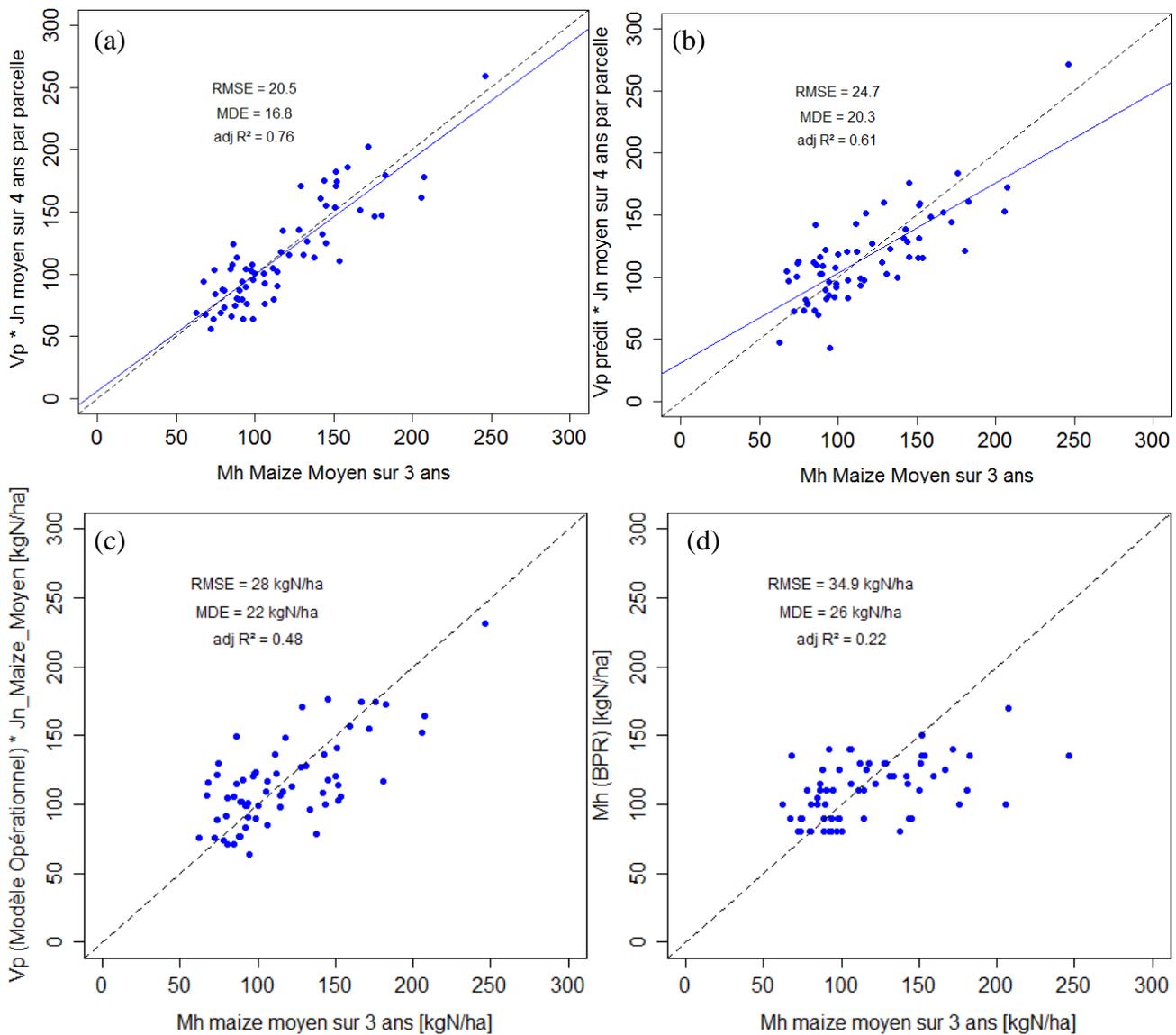


Figure 3. Comparaison entre Mh_Maize moyen sur 3 ans (Mh déterminée sur la période d'absorption du maïs) et Vp multiplié par Jn, avec les Jn moyen sur 4 ans pour chaque parcelle et Vp correspondant (a) aux Vp des parcelles, (b) aux Vp prédites par le modèle complet, (c) aux Vp prédites par le modèle opérationnel. La figure (d) présente la comparaison de Mh_Maize moyen avec les bases de préconisation régionale (BPR). Sur chaque figure, nous retrouvons les valeurs de RMSE, MDE (moyenne des écarts en absolu) et R^2 ajusté

Conclusion

La répétition des mesures de minéralisation au champ durant plusieurs années consécutives a constitué l'un des points forts de la démarche expérimentale mise en œuvre sur le réseau Mh. Elle a permis de questionner le formalisme $Mh=Vp.Jn$ et de montrer que la minéralisation nette mesurée au champ ne pouvait dans certaines conditions s'expliquer que par la prise en compte d'un processus supplémentaire dit "d'Extra minéralisation" (Em). La minéralisation Mh est donc la combinaison d'une composante basale ($Vp.Jn$) et d'un terme d'Extra-minéralisation.

Nous avons également montré que la composante basale ($Vp.Jn$) permet de prédire correctement la minéralisation de l'azote valorisable par le maïs (Mh_Maize). Nous avons dès lors réalisé une démarche de modélisation permettant de prédire Vp. 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 l'indicateur de l'effet système et la mesure d'un indicateur de minéralisation 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.

Bibliographie

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

Comifer, 2013. "Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : Cultures annuelles et prairies", Groupe Azote Comifer, 159

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

Présentation de la plateforme Web Réseau Mh

Laure Beff¹, Thierry Morvan¹, Yvon Lambert², Hervé Squividant¹

¹INRA/AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²Chambres d'agriculture de Bretagne

1. C'est quoi la plateforme "Web Réseau-Mh" ?

La plateforme "Web Réseau-Mh" est une application web sur laquelle les résultats du projet Mh sont librement et gratuitement visualisables.

La plateforme web est accessible à l'adresse suivante :

<http://geowww.agrocampus-ouest.fr/portails/?portail=mh>

L'**objectif de "Web Réseau-Mh"** est de permettre aux agriculteurs, conseillers, scientifiques... de visualiser facilement les principaux résultats du projet Mh et cela en quelques clics. Les données mises à disposition sont par exemple l'indicateur de l'histoire culturale, le bilan azoté moyen ou des propriétés du sol.

"*Web-Réseau Mh*" respecte les règles de la directive européenne INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community). Il s'agit de règles qui rendent l'application compatible nationalement et internationalement. Grâce à sa compatibilité avec la directive INSPIRE, les cartes présentes dans "*Web-Réseau Mh*" sont disponibles sur les catalogues régionaux et nationaux de manière automatique.

2. Comment la plateforme "Web Réseau-Mh" a pu voir le jour ?

La plateforme "*Web-Réseau Mh*" a pu voir le jour suite à des développements récents en informatique et en spatialisation des données, notamment grâce au logiciel "*geOrchestra*". "*geOrchestra*" est l'architecture de données spatiales. Il s'agit d'une plateforme open source, libre, modulaire et interopérable qui permet de développer des infrastructures spatiales.

L'UMR-SAS (INRA – AgroCampus) a été dans les 1^{ers} à utiliser "*geOrchestra*" et faire du développement sur cette architecture dans le monde de la recherche. Ils ont développé "*GéoSAS*", une infrastructure de données spatiales basée sur "*geOrchestra*". "*GéoSAS*" comprend un visualiseur, de nombreux styles et divers outils permettant de visualiser des données. "*GéoSAS*" contient les données et les métadonnées de la plateforme web Réseau Mh.

La plateforme "*Web-Réseau Mh*" est hébergée sur "*GéoSAS*", utilise des outils présents sur "*GéoSAS*" et contient les données et résultats du projet GP5-Mh.

3. Présentation de la plateforme "Web Réseau-Mh"

La plateforme "*Web-Réseau Mh*" permet de visualiser la position des parcelles du projet Mh et des classes de valeurs pour 5 grandeurs définies sur des cartes préétablies (figure 1). Il est facile de changer la grandeur affichée en cliquant sur l'icône correspondant à la grandeur désirée :

- Bilan N : Bilan en azote moyen entre le reliquat entrée (Ri) et le reliquat fin (Rf) des années 2012, 2013 et 2014 [kg N/ha]
- Type Sol : Classification simplifiée indiquant le matériau parental de la parcelle (F = schiste gréseux et micaschiste, G = granite et gneiss, V = alluvions/colluvions, L = limon, N = schiste tendre, O = schiste moyen/dur, Q = grès dur, quartz et poudingues, Y = roches volcaniques, A = autres)
- Teneur MO : Teneur en matière organique de l'horizon 0-30 cm en g C/kg_{sol}.
- Biom : Biomasse microbienne du sol en mg C/kg_{sol} mesurée par fumigation-extraction
- I_Sys : Indicateur de l'histoire culturale (effet système) incluant les rotations et les apports de PRO sur 15 ans en kg N/ha.

Les données de la plateforme sont accessibles selon deux modes : découverte et expert. Le mode découverte est intuitif et simple à utiliser. Le mode Expert présente de nombreuses fonctionnalités, telles que interroger les couches, connaître les valeurs de toutes les grandeurs présentes dans Web Réseau Mh, ajouter de nouvelles couches cartographiques...

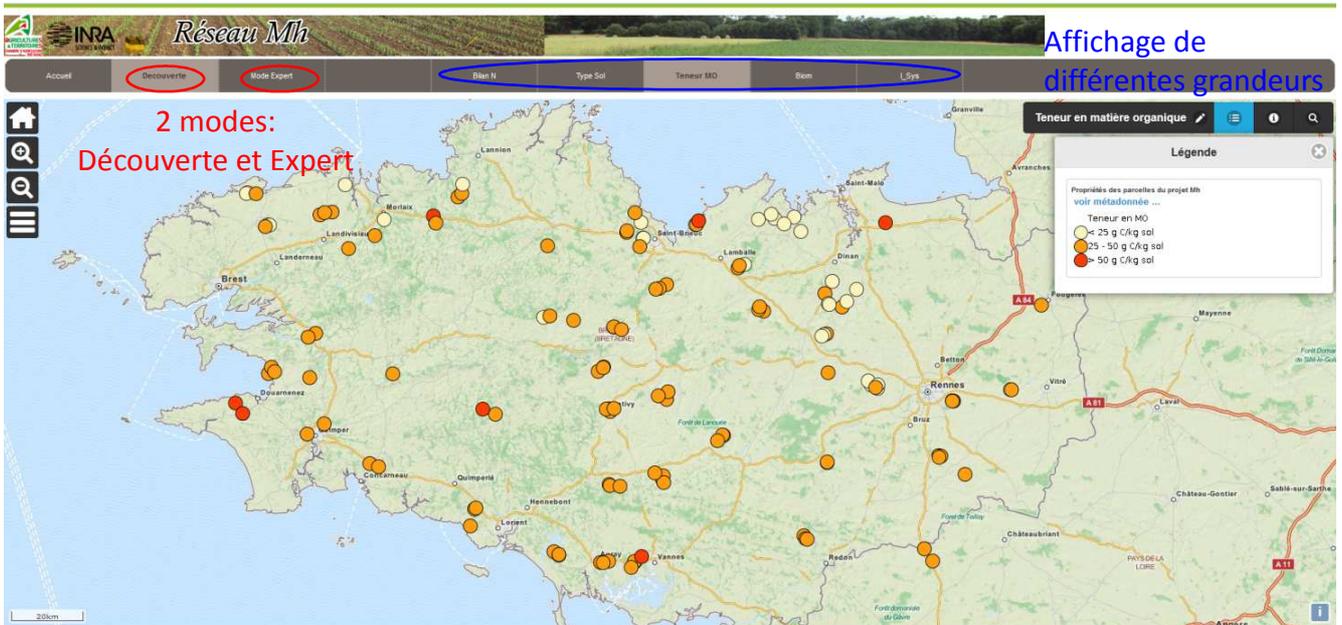


Figure 1. Présentation de la plateforme "Web Réseau Mh". L'ellipse bleue entoure les différentes grandeurs pouvant être affichées. Les ellipses rouges entourent les 2 modes existants : découverte et expert

3.1. Le mode découverte

Le mode découverte est intuitif et facile d'utilisation (figure 2). Il est possible d'utiliser des outils simples pour agrandir ou rétrécir la zone cartographique affichée (zoom) ou pour changer la carte de fond. La légende s'ajoute facilement en cliquant sur l'icône correspondante.

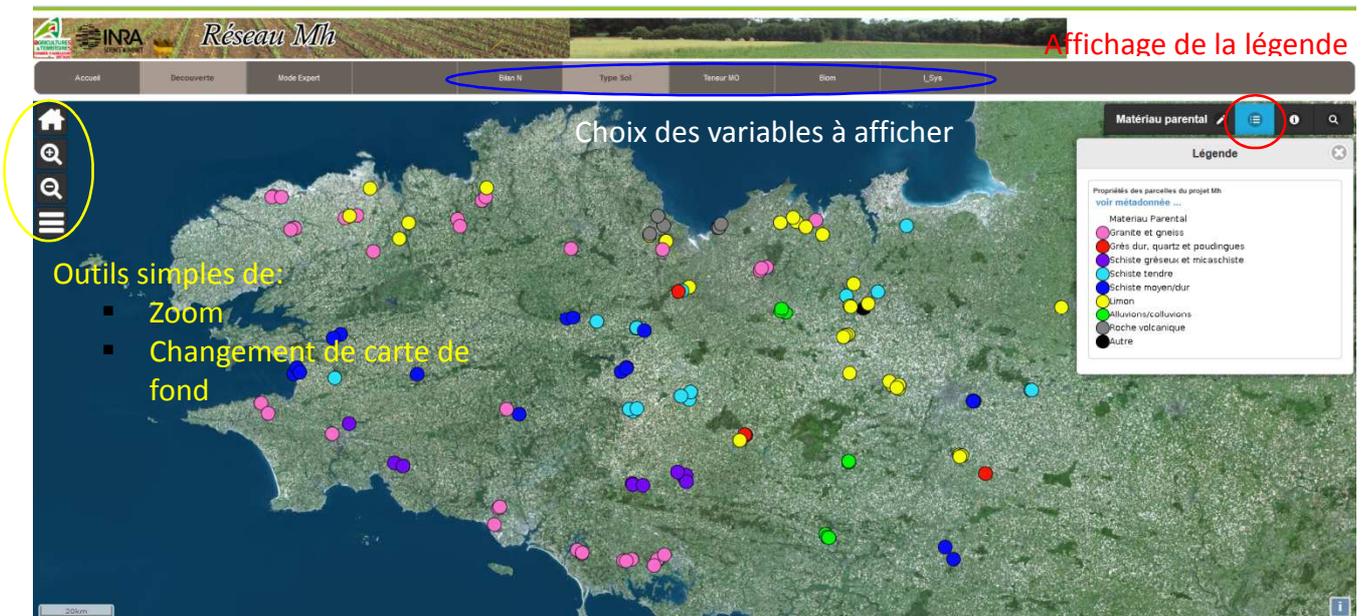


Figure 2. Présentation du mode découverte de "Web Réseau Mh". L'ellipse jaune entoure les outils simples du mode découverte (zoom et changement de carte de fond). Le cercle rouge entoure l'icône permettant d'afficher la légende

Interroger une parcelle dans le mode découverte

Lorsque l'on clique sur une parcelle (interrogation), cette parcelle est identifiée par une flèche orange et une photo du profil de sol de cette parcelle s'affiche (figure 3).

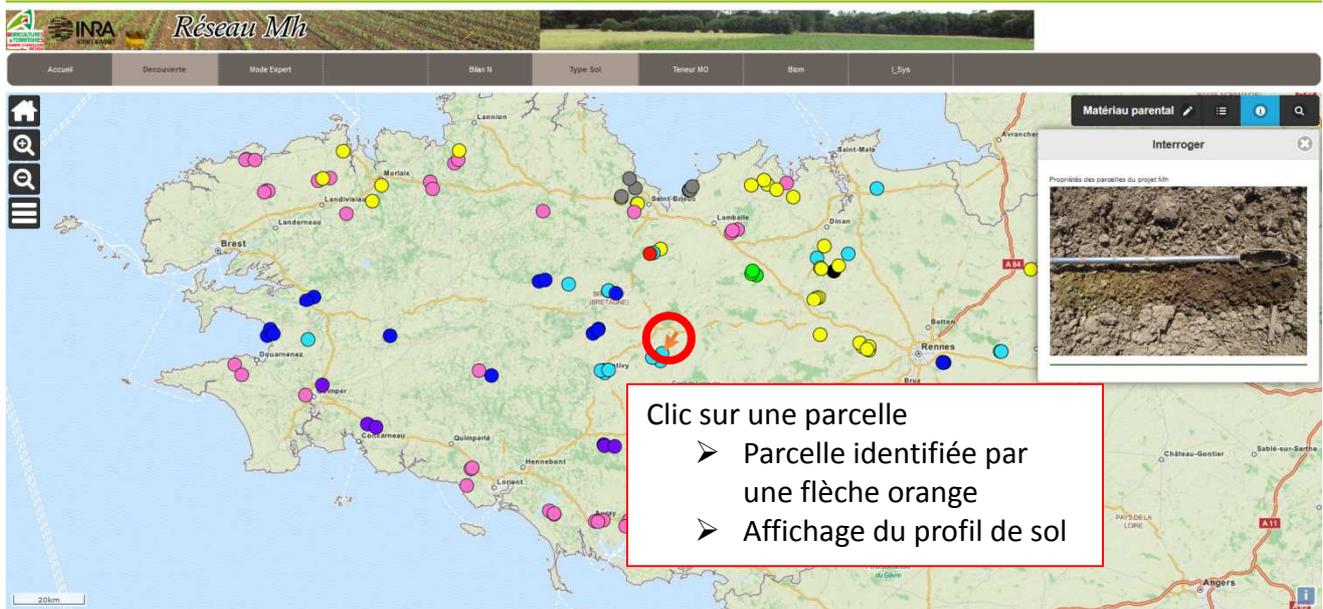


Figure 3. Explication de l'interrogation d'une parcelle avec le mode découverte. Pour chaque interrogation de parcelle, le profil de sol est affiché

3.2. Le mode Expert

Le mode expert présente plus de fonctionnalités que le mode découverte (figure 4). En plus de l'affichage de la légende et des zooms, il possède des outils de calcul (distance, surface, contour d'un bassin versant), affiche le type de sol... Il permet également d'ajouter ou de supprimer des couches cartographiques et de gérer son espace de travail.

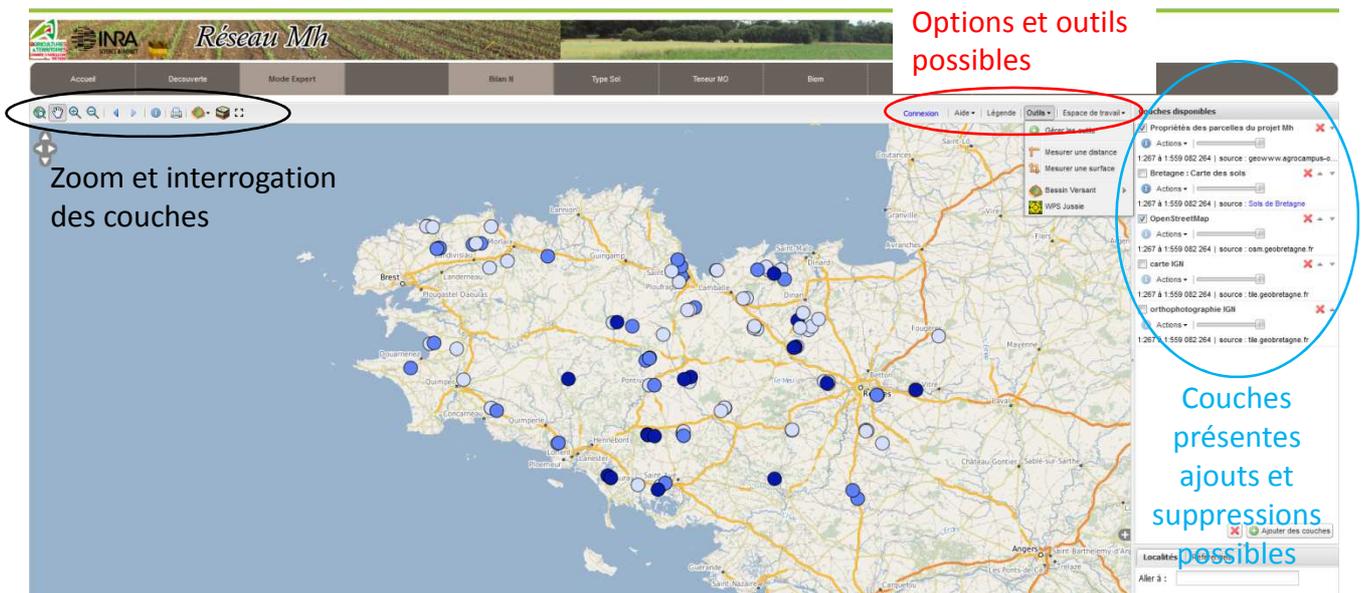
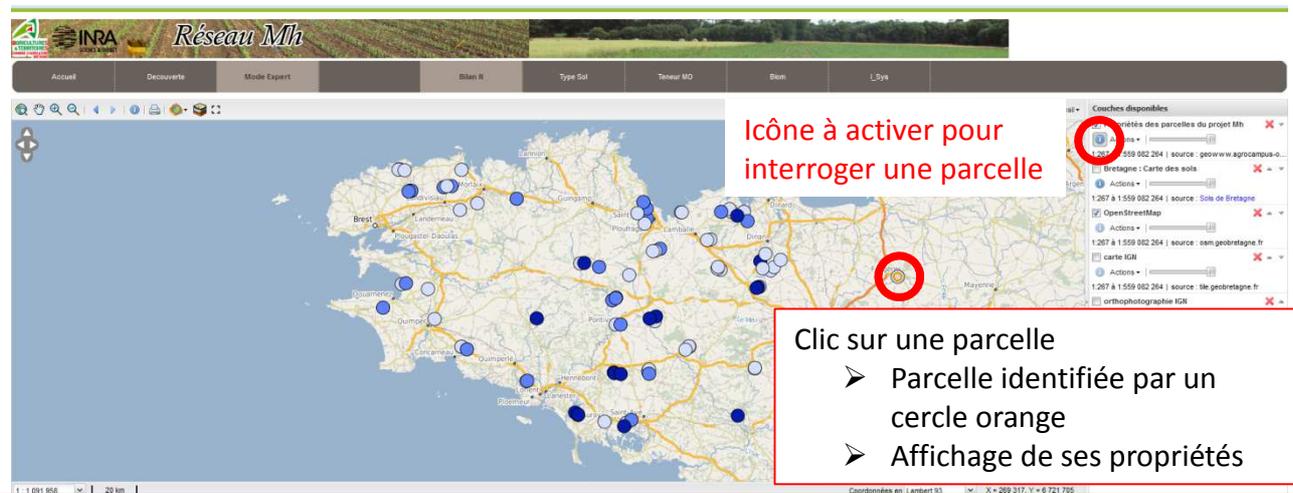


Figure 4. Présentation du mode expert de "Web Réseau Mh". L'ellipse noire entoure les outils de mode expert (zoom, interrogation d'une couche, calcul du contour d'un bassin versant, affichage du type de sol, etc.). L'ellipse rouge entoure les différents outils (légende, outils de mesure, espace de travail...). L'ellipse bleue présente la possibilité d'ajouter ou de supprimer des couches

Interroger les parcelles avec le mode Expert

Pour interroger une parcelle dans le mode expert (figure 5), il est nécessaire d'activer l'icône . Lorsqu'on clique ensuite sur une parcelle, elle est identifiée par un cercle orange et ses propriétés sont affichées dans un tableau sous la carte. Il est ainsi possible de visualiser toutes les propriétés des parcelles du projet Mh.



icône à activer pour interroger une parcelle

Clic sur une parcelle

- Parcelle identifiée par un cercle orange
- Affichage de ses propriétés

Parcelle	Commune	Dep	MatGeol	Cl_Text	Arg	Lf	Lg	Sf	Sg	DA_H1	DAH_H1	DA_H2
350100	Lécoussaie	35	L	L	158	247	443	102	50	1.4	1.37	1.49

Figure 5. Explication de l'interrogation d'une parcelle avec le mode expert.
Pour chaque interrogation de parcelle, ses propriétés sont affichées dans un tableau sous la carte

4. Les métadonnées

Les métadonnées sont des informations qui décrivent le contenu des données, augmentant ainsi la compréhension et la visibilité des données (accès via différents moteurs de recherche). Dans le cas de Web Réseau Mh, il s'agit des informations qui vont permettre de comprendre les données présentées et disponibles.

Les principales informations des métadonnées sont :

- un résumé du projet et des données disponibles
- une description et les unités des données présentes dans la table attributaire
- les droits d'accès aux données
- le lien vers les données
- les personnes à contacter

Les métadonnées sont disponibles via le catalogue de GéoSAS ou à partir du mode "Expert" du visualiseur. Pour y accéder à partir du visualiseur, il suffit de cliquer sur "Actions" puis "Afficher les métadonnées".

Conclusion

"Web Réseau-Mh" est une plateforme web permettant de visualiser les résultats du projet Mh. Elle respecte la directive européenne INSPIRE la rendant compatible avec d'autres visualiseurs régionaux ou nationaux. Elle est disponible gratuitement et librement. N'hésitez donc pas à la consulter et à l'interroger.

<http://geowww.agrocampus-ouest.fr/portails/?portail=mh>

Sol-AID, un futur outil au service des prescripteurs ?

Laure Beff¹, Thierry Morvan¹, Hervé Squvidant¹, Rodéric Bera¹,

Blandine Lemerancier¹, Yvon Lambert²

¹INRA/ AgroCampus – UMR 1069 Rennes

²Chambres d'agriculture de Bretagne

Introduction

Les résultats du "*projet Mh*" montrent que la minéralisation de l'azote (N) des matières organiques (MO) humifiées du sol couvre une large gamme de valeurs. Il s'avère que les bases de préconisation régionales actuelles (grilles GREN), basées sur une approche simplifiée de la minéralisation, ne permettent pas de prédire cette variabilité. Il est donc proposé de les remplacer par un modèle qui prend en compte l'effet des caractéristiques du sol, de l'histoire culturale et des conditions climatiques sur la minéralisation, alors que les bases régionales ne prennent en compte que l'un de ces 3 déterminants (histoire culturale).

L'adoption de ce modèle se traduira donc par une complexification du calcul de la minéralisation, par rapport à la situation actuelle, et sa mise en œuvre par l'ensemble des prescripteurs ne sera possible que si l'on met à leur disposition un outil leur permettant de faire le calcul de la minéralisation dans de bonnes conditions d'estimation des variables du modèle.

Ce projet nommé "**Sol-AID**", aura pour objectif d'assurer la conversion opérationnelle des résultats et devrait débuter au printemps 2016, pour une durée de 4 ans.

Nous présentons dans ce document les objectifs, l'architecture de l'outil et ses atouts pour d'autres applications que le calcul de la minéralisation des sols.

1. Sol-AID : une application indispensable pour le nouveau calcul de la minéralisation des sols de Bretagne

Le nouveau mode de calcul de la minéralisation des sols en Bretagne reprend le formalisme proposé au niveau national par le Comifer (Comifer 2013) : $Mh = Vp \cdot Jn$, où Vp correspond à la vitesse de minéralisation potentielle et Jn au nombre de jours normalisés sur la période pendant laquelle l'azote fourni par le sol peut être utilisé par la culture.

Le paramétrage de Vp résulte de la démarche de modélisation appliquée aux données du "*Projet Mh*" (voir présentation "Démarche de modélisation de la minéralisation"). Il est différent du paramétrage proposé par le Comifer et donc spécifique aux sols de l'Ouest de la France. Les variables d'entrée du modèle sont : la texture de l'horizon de surface, sa teneur en N total, sa capacité d'échange cationique (CEC), l'information sur l'histoire culturale des 15 dernières années (successions culturales et apports de produits organiques) et la mesure de l'indicateur de minéralisation APM.

Le calcul du temps normalisé requiert l'utilisation du modèle STICS (Brisson et al., 2008). Ce modèle doit être renseigné par certaines propriétés du sol telles que son épaisseur, les humidités caractéristiques à capacité au champ et au point de flétrissement, la densité apparente des différents horizons. Il est également nécessaire de disposer de données météorologiques journalières (pluie, température, rayonnement, évapotranspiration potentielle).

La majorité des prescripteurs ne disposent ni des bases de données climatiques nécessaires, ni de la maîtrise de STICS, pour calculer le temps normalisé. De plus, il est nécessaire d'estimer précisément les propriétés du sol requises comme variables d'entrée du modèle.

Idéalement, ces caractéristiques du sol (texture, CEC...) et l'indicateur APM sont renseignés par l'analyse du sol réalisée sur la parcelle. Ces conditions idéales d'utilisation du modèle, pour lesquelles toutes les variables d'entrée sont renseignées par l'analyse, ne seront remplies au début que sur un pourcentage relativement faible de l'ensemble des parcelles agricoles.

En l'absence de données d'analyse sur la parcelle, l'utilisation du modèle de prédiction de Mh ne sera alors possible qu'à la condition de pouvoir le renseigner avec des valeurs estimées suffisamment précises des propriétés du sol. Il est donc nécessaire de mettre en place une démarche spécifique qui sera développée dans le cadre du "**projet Sol-AID**" et rendue possible par les

avancées récentes dans le domaine de la cartographie des sols de Bretagne et des connaissances sur leurs propriétés (www.sols-de-bretagne.fr).

2. Objectifs du projet Sol-AID

Le "**projet Sol-AID**" poursuivra plusieurs objectifs :

- le 1^{er} objectif sera de **mettre à disposition des prescripteurs les valeurs des variables d'entrée du modèle** requises pour le calcul de la minéralisation (J_n , valeurs estimées des caractéristiques du sol et de l'APM en l'absence d'analyses réalisées sur la parcelle). Les valeurs estimées du reliquat sortie hiver, nécessaires pour renseigner le plan prévisionnel de fertilisation et issues du réseau CRAB, seront également intégrées dans l'outil
- le 2^{ème} objectif sera de proposer **une dynamisation du conseil** sur la période précédant les apports de fertilisants sur les cultures. Il s'agira de calculer en temps réel l'effet des conditions climatiques de l'année sur la minéralisation et sur le risque de pertes par lixiviation, sur la période de fin d'hiver – début du printemps. Cette démarche innovante permettra donc de calculer un terme correctif sur la fertilisation prévisionnelle, conduisant à majorer ou minorer la dose de fertilisant calculée par le PPF
- le 3^{ème} objectif consistera à faire une **évaluation expérimentale de la qualité du conseil** réalisée avec Sol-AID. Cette étape d'évaluation apportera les éléments de validation indispensables pour justifier et fonder sa mise en œuvre opérationnelle. Elle permettra également si besoin de faire un calage et une adaptation de l'application.

3. Organisation du projet

Le projet Sol-AID sera organisé en 2 parties :

- **l'élaboration d'un outil disponible sur une application Web**, comprenant les volets suivants :
 - un volet SOL permettant de renseigner le type de sol de la parcelle et de donner les valeurs par défaut des paramètres sol requis pour calculer M_h
 - un volet CLIMAT permettant le calcul du temps normalisé (J_n)
 - un volet HISTOIRE CULTURALE pour le calcul de l'indicateur système
 - un volet INFORMATIQUE correspondant au développement d'une application web et d'un service web WPS
- **l'évaluation et la validation expérimentale de l'outil :**
 - par la mise en place sur 3 années consécutives d'un réseau d'une vingtaine d'essais 'courbes de réponse' à l'azote
 - par la détermination des conditions optimales d'utilisation de l'indicateur APM.

4. Elaboration de l'outil Sol-AID

4.1. Le volet Sol

Pour calculer correctement M_h , il est nécessaire de connaître plusieurs propriétés des sols. Une partie de ces propriétés des sols est couramment donnée par l'analyse de sol réalisée pour le conseil agronomique (teneur en N organique, CEC, texture), mais d'autres sont plus complexes à obtenir (humidités caractéristiques des différents horizons du profil de sol, densité apparente de terre fine...). Nous avons prévu, dans Sol-AID, **de donner des valeurs de référence par type de sol pour toutes les propriétés des sols nécessaires au calcul de M_h** . L'estimation de certaines propriétés des sols découlera du programme "*Sols de Bretagne II*", dans lequel des fonctions de pédotransfert¹ ont été établies pour prédire les humidités caractéristiques à la capacité au champ (H_{cc}) et au point de flétrissement (H_{pf}) ainsi que la densité apparente de terre fine (DA_{TF}), par horizon de sol et pour tous les types de sols rencontrés en Bretagne (320 unités typologiques). Les autres propriétés des sols seront estimées dans Sol-AID à partir des bases de données du réseau M_h et de Sols de Bretagne.

Les propriétés des sols sont propres à chaque type de sol. Or la cartographie régionale des sols réalisée dans le cadre de "*Sols de Bretagne I*" permet d'identifier pour chaque parcelle l'Unité Cartographique de Sol, UCS, (440 UCS en Bretagne) à laquelle elle appartient. Chaque UCS regroupe plusieurs UTS (Unité Typologique de Sol) dont les limites ne sont pas identifiées. Pour

¹ Les fonctions de pédotransfert ont pour objectif d'estimer des propriétés des sols difficilement accessibles à partir d'informations facilement disponibles. Elles sont basées sur des relations statistiques entre des variables explicatives et des variables à expliquer.

déterminer le type de sol, i.e. l'UTS la plus probable, il est nécessaire de mettre en place une démarche qui reposerait sur **des clés d'identification simples**, pouvant être renseignées par des non spécialistes et permettant de déterminer le (ou les) UTS probables à partir de l'UCS comme entrée géographique. Ces clés de détermination ont été construites pour l'instant sur une zone du Nord-Est de l'Ille-et-Vilaine correspondant au plateau de Fougères et au pays du Coglais (exemple présenté à la figure 1). **Nous proposons d'étendre la démarche à l'ensemble des UCS de la Bretagne dans le cadre de Sol-AID et de valider ces clés d'identification avec les prescripteurs de la fertilisation azotée.**

Chaque UTS est décrite par une fiche descriptive reprenant les principales caractéristiques du type de sol, qui intéressent l'agriculteur, et à laquelle ils pourront se référer pour comparer leurs résultats d'analyse de sol (via Sols de Bretagne). Un exemple est présenté à la figure 2. Ces fiches ont été réalisées dans le cadre de "Sols de Bretagne II" et seront disponibles très prochainement sur le site du programme.

Toutes les propriétés des sols, la définition des types de sols et les résultats des analyses des agriculteurs seront stockés dans la base de données SOL de Sol-AID. Les données appartenant aux agriculteurs (résultats d'analyses de terre...) seront disponibles uniquement via un accès réservé.

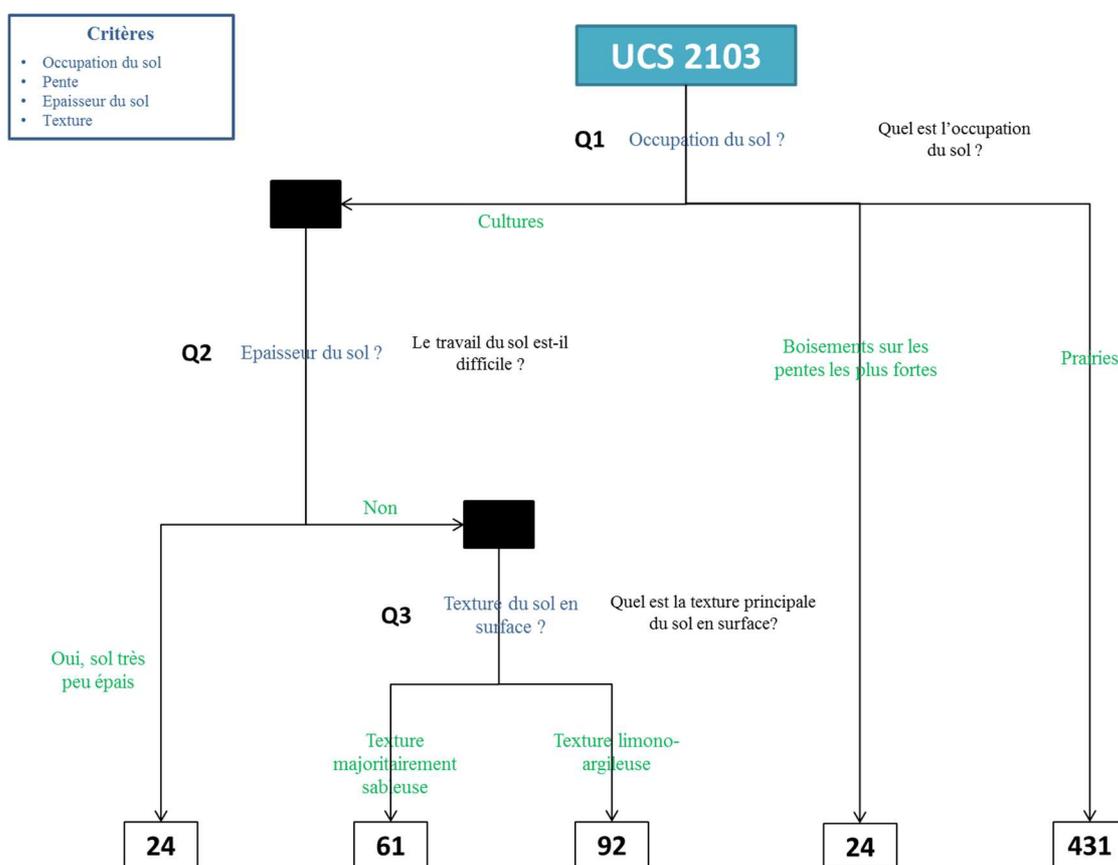


Figure 1. Exemple de clé de détermination permettant de définir l'UTS (Unité Typologique de Sol) à partir de l'UCS (Unité cartographique de Sol). Source : Sols de Bretagne (<http://www.sols-de-bretagne.fr/>)

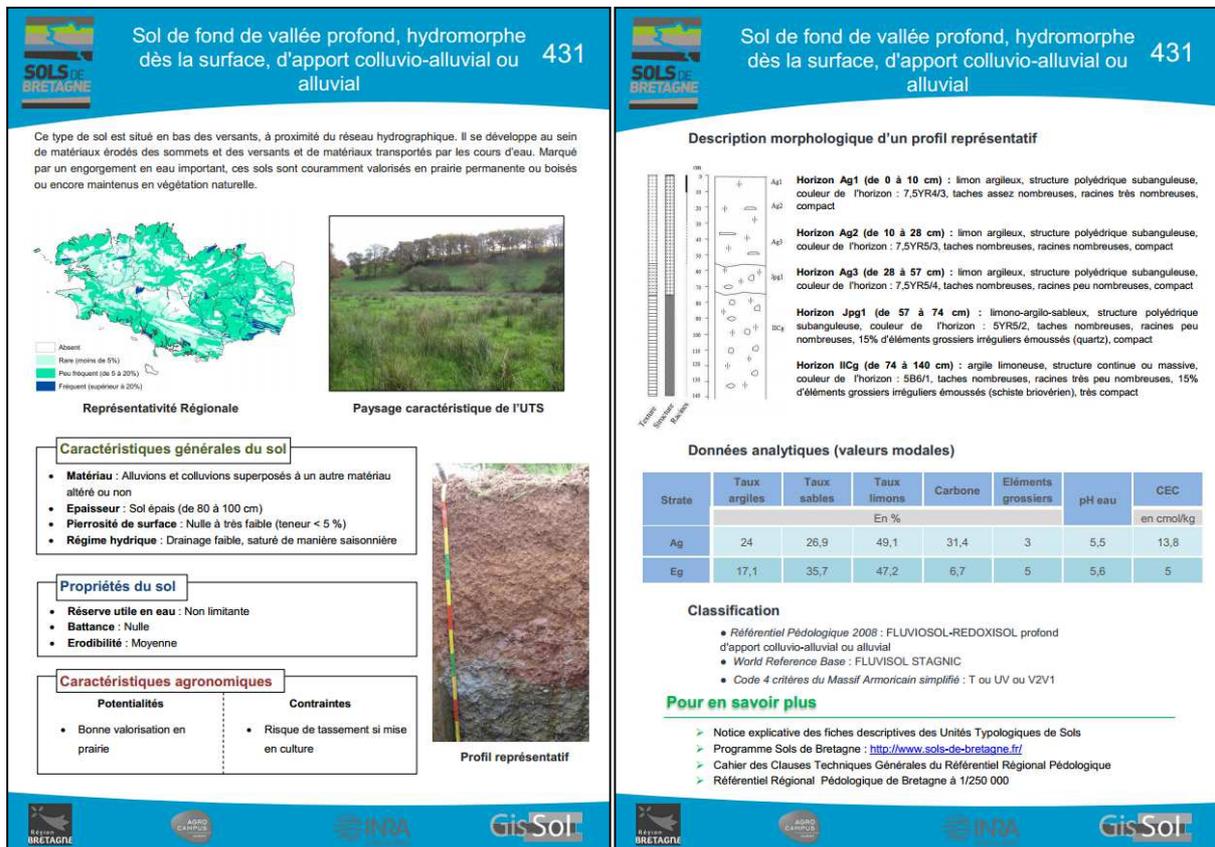


Figure 2. Exemple d'une fiche de sol, reprenant (à gauche) la description de l'UTS et de ses caractéristiques et (à droite) la description d'un profil de sol et des données analytiques, horizon par horizon, auxquelles les agriculteurs peuvent se référer. Source : Sols de Bretagne (<http://www.sols-de-bretagne.fr/>)

4.2. Le volet Climat

Le calcul de J_n est complexe et nécessite des informations sur (i) des propriétés des sols, (ii) la culture de l'année (information fournie par l'agriculteur) et (iii) des données météo.

Depuis une dizaine d'années, la CRAB acquiert des données météo sur une trentaine de stations réparties au sein de la Bretagne. Ces données météo seront mobilisées dans Sol-AID afin de calculer les J_n prévisionnels des différentes parcelles. Dans une optique de prédiction, il n'est en effet pas possible de connaître à l'avance la météo de l'année et un J_n prévisionnel sera donc calculé. Pour cela, plusieurs étapes seront nécessaires :

1. **réaliser un zonage climatique** permettant de rattacher chaque parcelle aux données météo des différentes stations. Une analyse géostatistique (des séquences climatiques) nous permettra de définir des zones homogènes pour les grandeurs climatiques qui nous intéressent et de déterminer le contour des zones climatiques
2. **calcul des J_n de chaque parcelle pour chaque année de données météo avec le modèle STICS.** Le calcul des J_n dans le modèle STICS est un calcul journalier, qui dépend de la dynamique de la température et de l'humidité du sol influencées par les pluies, la température et l'évapotranspiration. Il doit donc être réalisé indépendamment pour chaque année et chaque parcelle et ne peut être calculé à partir des données météo moyennes de plusieurs années
3. **détermination du J_n prévisionnel par la moyenne des J_n des différentes années pour une parcelle.** Ce J_n prévisionnel est unique pour chaque parcelle. En effet, deux parcelles situées dans la même zone climatique n'auront généralement pas les mêmes J_n prévisionnels car ils dépendent des propriétés des sols, propres à chaque parcelle.

Le J_n prévisionnel sera introduit dans le calcul de M_h délivré aux prescripteurs et servira donc à l'élaboration du plan prévisionnel de fumure (PPF).

4.3. Le volet histoire culturelle

Les résultats du projet M_h ont montré le rôle important de l'histoire culturelle (apports de produits organiques, successions culturales et rendements moyens des cultures) sur la minéralisation. Cet effet de l'histoire culturelle est pris en compte par un indicateur (I_{Sys}), fondé sur la synthèse des données sur les 15 dernières années sur les successions culturales et sur les apports de produits organiques (type, fréquence et dose). Il est en outre important d'intégrer l'information sur la

conduite culturale des parcelles sur 15 ans, car nous avons constaté que sa pertinence diminue lorsqu'il est calculé sur une durée inférieure.

L'histoire culturale à 5 ans est relativement facile à obtenir : les agriculteurs s'en souviennent généralement et elle est souvent renseignée dans les outils des prescripteurs de la fertilisation. Il sera donc aisé de récupérer cette information et de l'introduire dans Sol-AID. Il est par contre assez rare de disposer de l'historique cultural au-delà de 5 ans. Nous développerons donc un questionnaire sur les pratiques culturales généralement réalisées par l'agriculteur et permettant de reconstruire l'histoire culturale sur 15 ans. Pour l'élaboration de ce questionnaire, nous nous fonderons sur les démarches développées dans d'autres outils, tels que Territ'Eau. Ce questionnaire sera également créé en partenariat avec des prescripteurs de la fertilisation azotée et sera testé sur un groupe d'agriculteurs.

4.4. Le volet informatique

Sol-AID sera un outil d'aide à la prescription disponible sur **une application web** et avec son **site internet** dédié. Il consistera en un **portail web** sur lequel les données seront disponibles et cartographiées et en un **service de calcul interopérable conforme au standard WPS**². Ce service web WPS permettra de réaliser aisément des passerelles avec les différents outils des prescripteurs et avec les portails cartographiques Sols de Bretagne et Mh.

Sol-AID sera un outil hybride au niveau des sources avec (i) des données publiques provenant notamment des projets Sols de Bretagne et Mh et (ii) des données privées collectées auprès des agriculteurs. Afin d'assurer **la confidentialité des données privées, celles-ci seront sécurisées et uniquement disponibles via un accès réservé.**

Sol-AID sera un outil ergonomique, open source, libre d'accès et disponible partout sur le web.

² Le Web Processing Service (WPS) est un standard de l'Open Geospatial Consortium (OGC). Il est conçu pour normaliser les appels et réponses de services de traitements de données SIG sur le Web. Le WPS est un standard de l'OGC depuis 2005. La version actuelle a été publiée en 2007. Le WPS est conçu pour travailler avec des données géospatiales mais peut très bien supporter tout type de données. Le WPS permet de déployer, publier et utiliser tout type de traitements SIG (simple ou complexe) normalisés et interopérables. Source : <http://www.reseau.eaufrance.fr/geotraitements/content/le-web-processing-service-wps-en-quelques-mots> consulté le 10 décembre 2012.

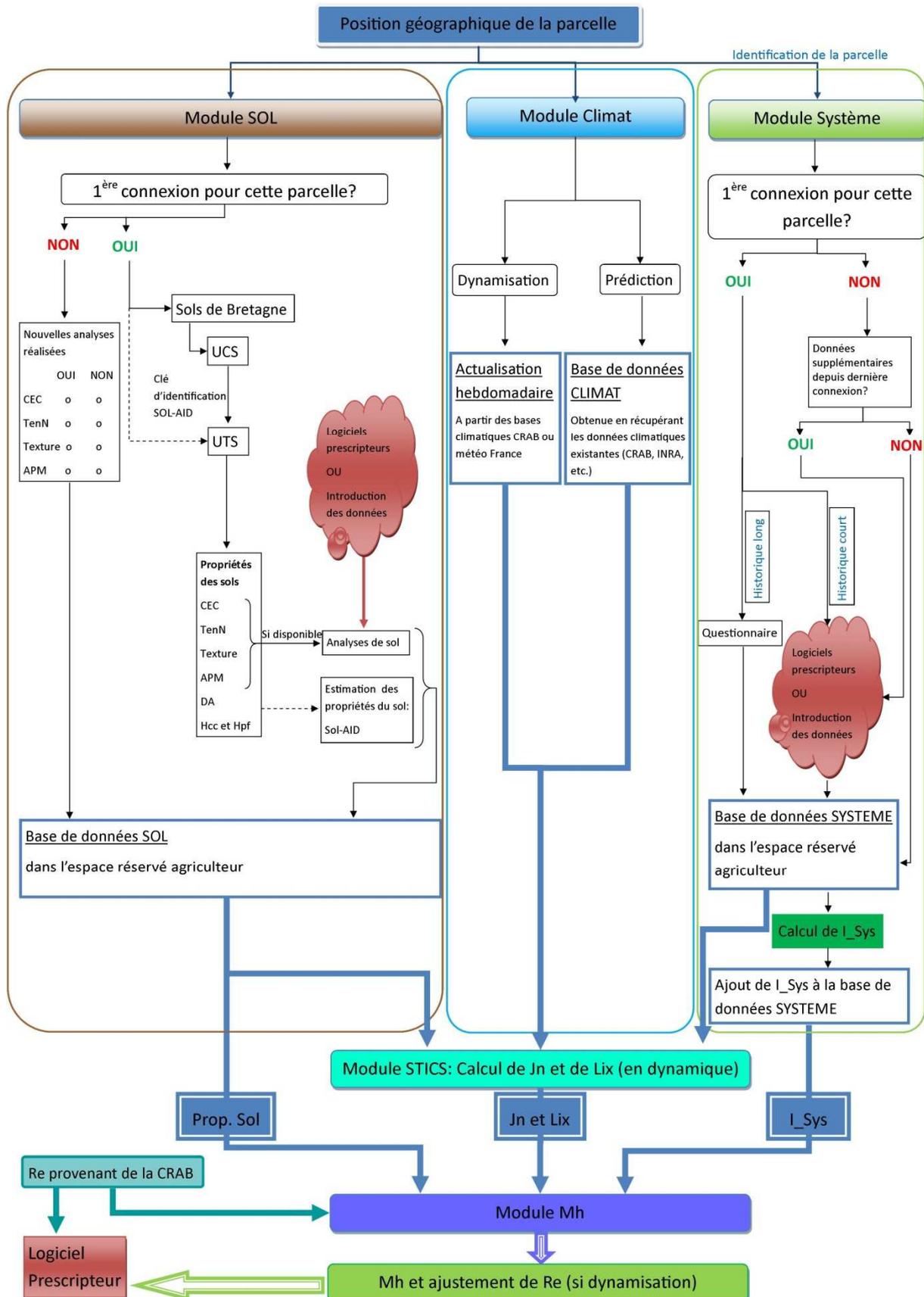


Figure 3. Schéma fonctionnel de Sol-AID reprenant les différents modules de calcul, les bases de données créées et les étapes permettant in fine de donner au prescripteur la valeur de Mh pour chaque parcelle et un ajustement éventuel de Ri

5. Evaluation et validation expérimentale de l'outil

Un des objectifs du projet Sol-AID est d'évaluer expérimentalement la qualité du conseil réalisé avec l'outil. Pour cela, des expérimentations au champ seront réalisées avec :

- la mise en place sur 3 années consécutives d'un réseau d'une vingtaine **d'essais "courbes de réponse" à l'azote** qui permettront de comparer la fertilisation optimale avec la dose de fertilisant calculée avec l'utilisation de Sol-AID
- la mise en place sur 3 années consécutives de **mesures d'APM** sur différentes parcelles afin de déterminer les facteurs influençant cette mesure et de définir les conditions les plus optimales pour réaliser les mesures d'APM à introduire dans Sol-AID.

6. Quelles autres utilisations de Sol-AID ?

6.1. Sol-AID : un fort potentiel pour d'autres applications

L'élaboration de l'outil Sol-AID va permettre d'acquérir une expérience dans le domaine d'outils 'intégrateurs', qui pourra être valorisée pour développer des applications dans d'autres domaines. Parmi les applications possibles, nous envisageons :

- le calcul du risque environnemental à l'échelle de l'exploitation. Les bases de données sur le sol et le climat intégrées à Sol-AID et l'encodage dans l'outil du modèle STICS permettront de calculer le risque de lixiviation du nitrate sur les parcelles de l'exploitation, en fonction des caractéristiques des sols (profondeur, humidités caractéristiques...), de la culture et de la conduite agronomique
- l'estimation du risque d'érosion du sol, fondé sur la prise en compte des propriétés de surface des sols, du climat et de la topographie
- l'amélioration significative du calcul de l'indice de sécheresse, actuellement calculé par Météo France sur la base d'une même réserve en eau utile (RU) de tous les sols, à l'échelle de la Bretagne (100 mm). Grâce à l'information sur les unités typologiques de sol (UTS) intégrée dans Sol-AID, il sera possible de prendre en compte la variation de la RU des sols et calculer ainsi un indice de sécheresse plus proche de la réalité.

L'organisation de Sol-AID en module et en web-service rendra aisée la mise en œuvre de ces applications.

6.2. Sol-AID : un outil pour mettre en place un nouveau raisonnement de la fertilisation des cultures et complémentaire des outils de pilotage innovants en plein essor

Les nouveaux outils utilisant la télédétection, par exploitation d'images satellitaires (application Farmstar Expert) ou réalisées par des drones (Mes Dron'im@ges, prestation développée par les Chambres d'agriculture en partenariat avec Airinov), connaissent un essor important pour le pilotage de la fertilisation azotée (650 000 ha couverts en France en 2014 par le système Farmstar Expert). Ces outils d'aide à la décision établissent un diagnostic sur le développement et l'état de nutrition azotée de la culture à certains stades clés : entrée et sortie hiver pour le colza, fin montaison pour le blé. Ils permettent d'ajuster, voire de proposer une modulation intra-parcellaire du dernier apport d'azote, mais ils ne font qu'affiner la dose de fertilisant et ne se substituent en aucune manière au calcul prévisionnel de la fertilisation. Ils sont donc strictement complémentaires.

Les capteurs utilisés mesurent la réflectance du couvert végétal, à partir de laquelle on calcule différents indicateurs, tels que la biomasse végétale et la teneur en chlorophylle de la plante. Ces mesures ne suffisent pas à elles seules à établir le diagnostic des besoins en N de la culture. Les données doivent en effet être converties par des modèles agronomiques qui requièrent des données météo et des données sur les sols et les variétés (figure 4).

La performance du diagnostic réalisé par ces applications est donc directement dépendante de la qualité des modèles agronomiques, elle-même liée à la qualité des informations données sur les sols et sur la minéralisation. Sol-AID permettra de mieux renseigner ces modèles agronomiques et de contribuer significativement à la qualité du conseil établi par ces approches innovantes.

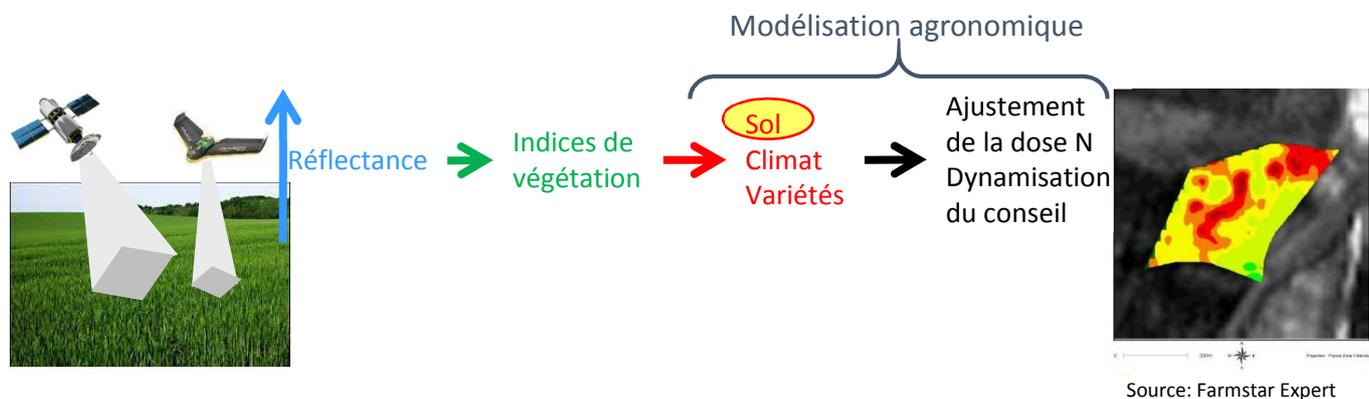


Figure 4. Principe de calcul d'ajustement de la dose N et de dynamisation du conseil à partir de mesures réalisées par des drones ou des satellites

En résumé

L'élaboration de l'outil Sol-AID sera réalisée par un partenariat entre l'INRA et la CRAB. Cet outil mettra à disposition des prescripteurs les informations qui leur seront nécessaires pour le calcul de la fertilisation azotée et sa dynamisation. Sans Sol-AID, les résultats du projet Mh pourront très difficilement être transférés dans les outils des prescripteurs.

Nous proposons donc de construire un outil d'aide à la prescription, disponible sur une application Web et en open source, dont l'ergonomie sera étudiée pour une prise en main immédiate. L'élaboration de cet outil est rendue possible grâce aux avancées récentes et importantes des connaissances acquises sur les sols dans le cadre des programmes Sols de Bretagne et du projet Mh et aux développements récents en informatique et en spatialisation des données.

Sol-AID est donc un outil dédié à l'amélioration du raisonnement de la fertilisation azotée, mais il pourra être valorisé pour d'autres applications, telles que l'approche du risque environnemental. Il aidera également l'agriculteur à mieux prendre en compte les caractéristiques des sols de son exploitation et affiner leur utilisation agronomique.

Bibliographie

- Brisson N., Launay M., Mary B. and Beudoin N.**, 2008. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model. INRA, Rd 10, 78026 Versailles Cedex, France, Editions Quae
- Comifer**, 2013. "Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales : Cultures annuelles et prairies " Groupe Azote Comifer, 159

Les travaux conduits et leur diffusion bénéficient du soutien financier de



Côtes d'Armor
le Département

