

Minéralisation et lessivage d'azote à long terme en présence de cultures intermédiaires : expérimentation et simulations avec le modèle STICS.

Julie Constantin, Nicolas Beaudoin, Bruno Mary

INRA, Unité Agro-Impact, rue Fernand Christ, 02007 Laon Cedex.

Introduction

La Directive Européenne "Nitrate" obligera dès 2012, l'implantation des couverts végétaux, en particulier des Cultures Intermédiaires (CI) pendant les périodes d'interculture. Il est essentiel d'assurer la durabilité de leur efficacité vis à vis du lessivage de nitrate et d'étudier leurs effets sur les autres postes du bilan d'azote à long terme (plusieurs décennies). Or ces effets ne sont pas bien connus. Nos travaux récents ont montré que la répétition de CI pendant une durée de 15 ans permet à la fois de réduire le lessivage du nitrate et de stocker du carbone et de l'azote organique (Constantin et al, 2009). Cela pose trois autres questions : la répétition des CI ne modifie-t-elle pas à terme le potentiel de minéralisation du sol ? Quand le taux de matière organique atteint-il un nouvel état d'équilibre ? Quelles en sont les conséquences sur les pertes d'azote du système ? Ce papier expose les résultats de la thèse de J. Constantin, dont la démarche a associé expérimentation et modélisation.

Matériel et méthodes

L'expérimentation se base sur 3 dispositifs de moyenne durée (13 à 17 ans) incluant des CI sous des pédoclimats variés (Tableau 1).

	Boigneville (Essonne)	Kerlavic (Finistère)	Thibie (Marne)
Période	1991-2007	1994-2007	1990-2007
Précédent	Culture	Prairie	Culture
Rotation	Blé / Orge / Pois	Blé / Maïs	Pois / Blé / Bett (avant 2003) Blé / Orge / Bett (après 2003)
Gestion des résidus	Enfouis	Exportés	Enfouis
Interculture	+CI / -CI	+CI / -CI	+CI / -CI
CI: espèces, fréquence	Moutarde Tous les ans	Ray-grass d'Italie Tous les 2 ans	Radis ou céréale Tous les ans (2 ans/3 dès 2003)
Traitement N	N	N	N / N-
Travail du sol	L / SD	L	L

Tableau 1 : Description des sites expérimentaux

La fréquence et l'espèce de la CI ont varié selon les sites; moutarde chaque année à Boigneville, radis chaque année à Thibie, raygrass tous les 2 ans à Kerlavic. Les 3 sites sont équipés de bougies poreuses

et de lysimètres pour le calcul du lessivage. La minéralisation nette d'azote (M) est calculée par bilan de masse sur le pool azote minéral du sol au pas de temps semestriel. Le bilan considère les stocks d'azote minéral initial (N_i) et final (N_f), la fertilisation minérale (F), la fixation symbiotique (S), les apports atmosphériques (A), l'absorption d'azote par les cultures (U), le lessivage (L), les pertes par voie gazeuse de l'azote du sol (G_S) et de l'engrais (G_F) et de l'immobilisation de l'azote de l'engrais (I_F), selon l'équation :

$$M = N_f - N_i - F - S - A + U + L + G_S + G_F + I_F \quad (1)$$

Le terme S (provenant de la fixation par le pois d'hiver) est estimé à l'aide de la relation proposée par Voisin et al (2002). Seuls les 3 derniers termes n'ont pas été mesurés. Ceci conduit à estimer une minéralisation approchée selon la formule :

$$M_1 = M - G_S - G_F - I_F \quad (2)$$

Si l'on dispose de mesures du coefficient réel d'utilisation de l'azote (ϵ_r) obtenu par marquage ^{15}N de l'engrais, on peut calculer les « pertes » d'azote de l'engrais comme suit :

$$G_F + I_F = (1 - \epsilon_r) F \quad (3)$$

Ces mesures ont été réalisées sur les sites de Thibie et Boigneville. Sur ces 2 sites, nous pouvons calculer un terme M_2 qui s'approche davantage de la minéralisation nette réelle :

$$M_2 = M - G_S \quad (4)$$

« L'extra-minéralisation » nette (ΔM) d'azote due à la CI est la différence de minéralisation nette entre les traitements avec et sans CI :

$$\Delta M = M_{CI} - M_{Témoin} \quad (5)$$

avec $M = M_1$ ou M_2 . Attribuer la différence à la minéralisation de la CI suppose qu'il n'existe pas d'interaction entre ce traitement et les autres facteurs expérimentaux. Cette condition est vérifiée par analyse de variance.

La cinétique d'extra-minéralisation est modélisée par régression linéaire puis avec le modèle STICS. STICS a été calibré sur des données indépendantes et testé sur les données acquises sur les 3 sites. Il est ensuite utilisé pour tester divers scénarios sur 60 ans impliquant une utilisation continue ou un abandon des CI sous climat constant ou changeant (Table 2).

Scenario	Catch crops		Reduced N fertilization		Climate change
	0-X years*	X-60 years	0-X years	X-60 years	
S0	No	No	No	No	No
S1	No	No	No	No	Yes
S2	Yes	Yes	No	No	No
S3	Yes	Yes	No	No	Yes
S4	Yes	Yes	No	Yes	No
S5	Yes	Yes	No	Yes	Yes
S6	Yes	No	No	No	Yes

Table 2: Scenarios simulés sur 60 ans.

*X = durée de la période expérimentale (X=16 à Boigneville et X=13 à Kerlavic et Thibie).

Résultats

L'installation de CI répétées a eu pour conséquence d'augmenter la minéralisation nette d'azote du sol, soit dès la première année (Boigneville), soit à partir de 3-5 ans (Kerlavic et Thibie). Ce résultat confirme des études antérieures (Schröder et al. 1996; Hansen et al. 2000; Torstensson and Aronsson 2000). Nous avons démontré l'existence d'effets cumulatifs significatifs sur l'absorption d'azote et la minéralisation d'azote à Kerlavic (raygrass) et Thibie (radis). En effet nous observons une évolution significative de l'extra-minéralisation annuelle ΔM en fonction du temps (Figure 1a) et de l'extra-minéralisation cumulée $\Sigma \Delta M$ (Figure 1b). Par contre nous n'observons pas d'effet cumulatif à Boigneville (moutarde): la pente est non significativement différente de 0 (Figure 1a) et le cumul est une droite.

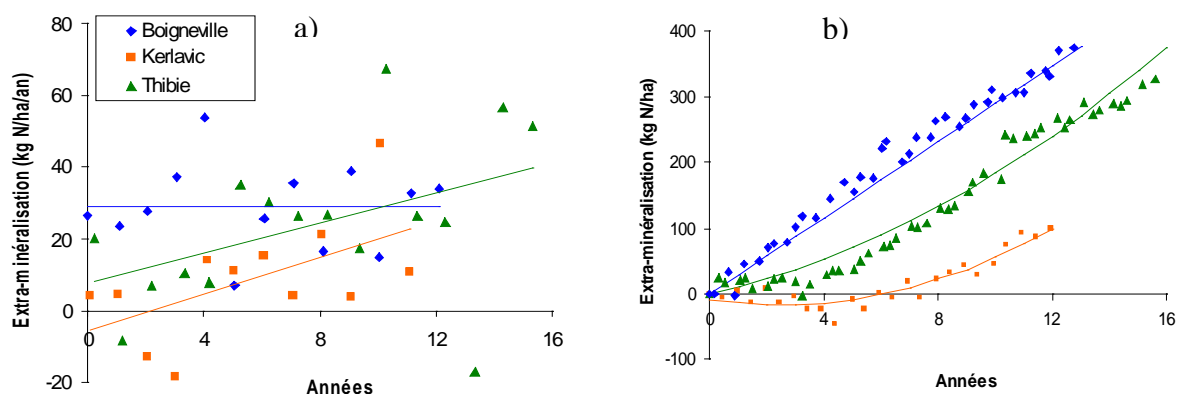


Figure 1 : Evolution de l'extra-minéralisation d'azote des CI en fonction du temps sur les 3 situations (ΔM_1 à Kerlavic, ΔM_2 à Boigneville et Thibie): a) valeurs annuelles avec ajustement par régression linéaire; b) valeurs cumulées depuis le début de l'essai.

A Kerlavic et Thibie, l'accroissement de ΔM_1 est de 2.6 et 2.4 kg N ha⁻¹ an⁻², et l'ordonnée à l'origine est de -7 et 8 kg N ha⁻¹ an⁻¹ respectivement. A Boigneville seule l'ordonnée à l'origine (+29 kg N ha⁻¹ an⁻¹) est significative. Nous avons montré par ailleurs que les cultures intermédiaires répétées restaient efficaces pour réduire la lixiviation de nitrate pendant la durée de l'essai, malgré l'accroissement de la minéralisation d'azote (Constantin et al, 2009).

La différence de cinétique de minéralisation entre les 3 sites peut sembler surprenante car les quantités d'azote incorporées annuellement sont proches (29 à 37 kg N ha⁻¹ an⁻¹). Elle peut s'expliquer par la nature des CI et notamment par leur rapport C/N, ainsi que cela a été montré au laboratoire (Justes et al., 2009). En utilisant le modèle STICS et le paramétrage proposé par ces auteurs, nous avons pu simuler la cinétique d'extra-minéralisation sur les 3 sites (Figure 2).

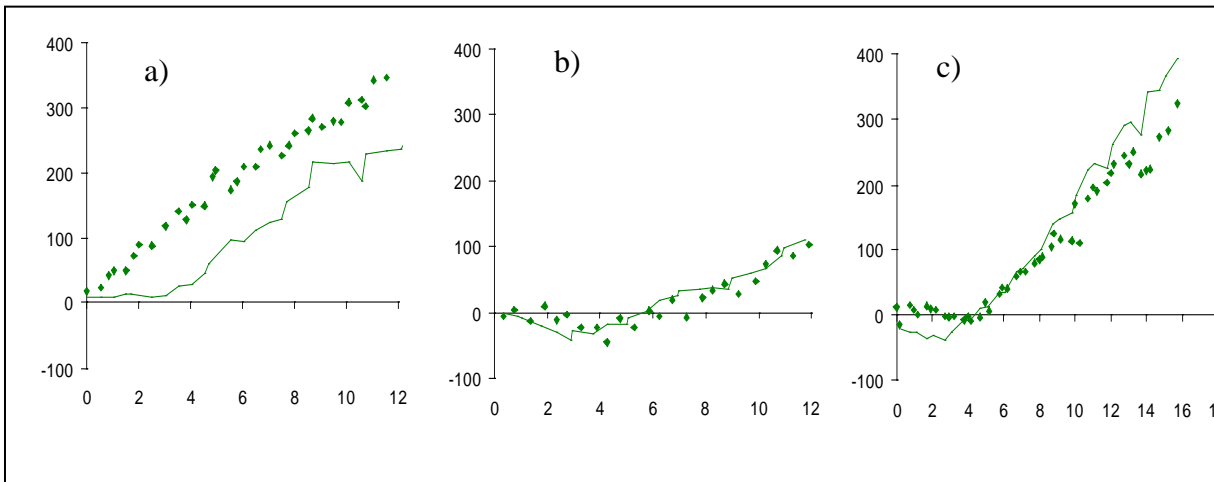


Figure 2 : Extra-minéralisation cumulée d'azote par les CI (kg N ha^{-1}) observée (points) et simulée par le modèle STICS (traits) à a) Boigneville b) Kerlavic et c) Thibie.

Un calage local de la profondeur d'enracinement et de la fraction inerte de l'humus a été requis pour que le modèle STICS reproduise correctement les cinétiques de minéralisation et de lessivage pendant 15 ans sur les traitements sans CI. Le modèle reproduit assez bien les différences entre sites et espèces (Figure 2). Les performances du modèle sont similaires en simulations annuelles et continues avec cependant des propagations d'erreurs des stocks d'eau sur les quantités d'eau drainée en simulation continue. Les performances correctes du modèle nous permettent de tenter de prédire l'impact de scénarios sur 60 ans avec des CI (Figure 3).

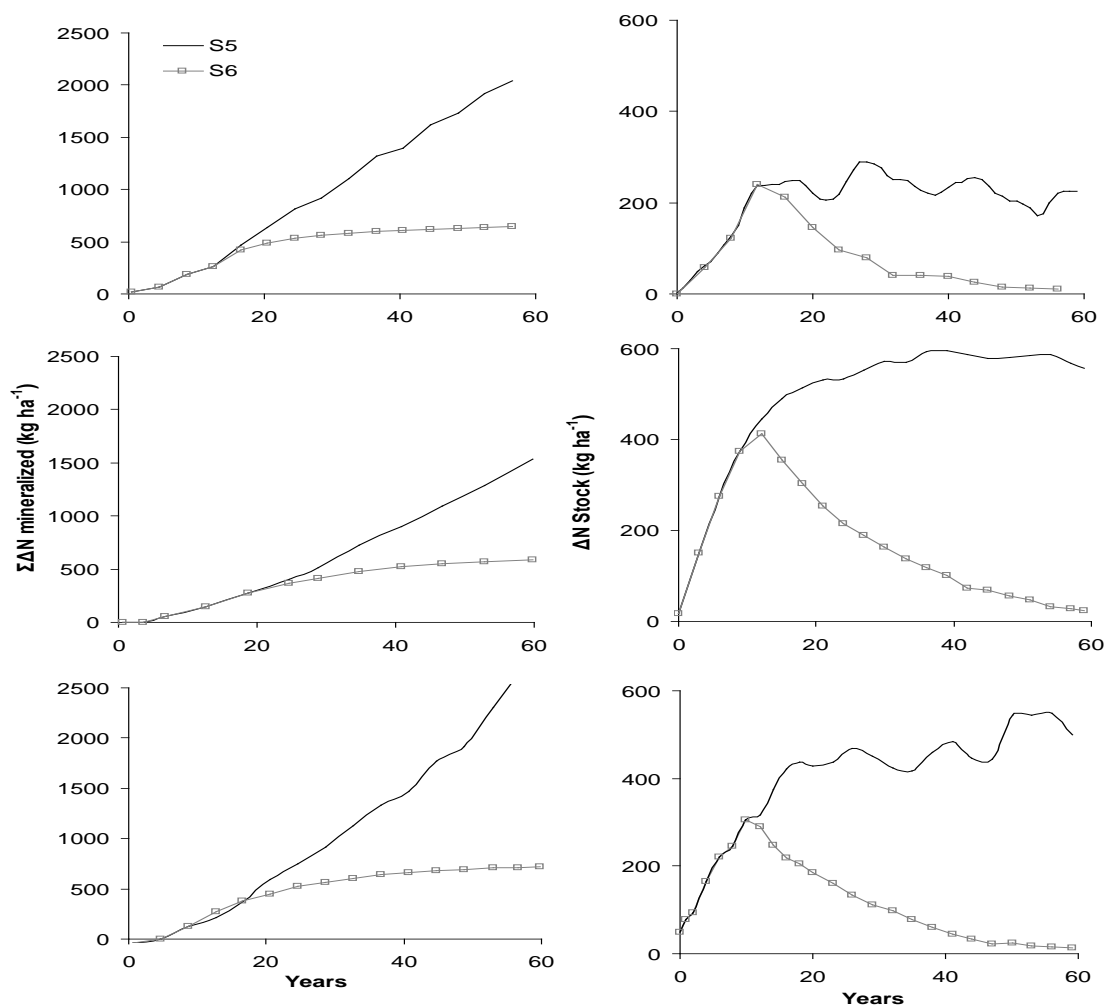


Figure 3 : Evolution de la minéralisation cumulée d'azote due aux CI (graphes de gauche) et de la séquestration d'azote organique dans le sol (graphes de droite) sur 60 ans, sous hypothèse de changement climatique (IPCC A1B). La simulation S5 correspond à des CI répétées et la simulation S6 correspond à un arrêt des CI après 15 ans. Les valeurs sont obtenues par différence avec le scénario S1. a) en haut : Boigneville; b) au milieu : Kerlavic ; c) en bas : Thibie.

Au bout de 60 ans avec CI répétées, la minéralisation cumulée due aux CI atteint 1500 à 2500 kg ha^{-1} selon les sites. Si l'on rapporte cette minéralisation à la quantité d'azote apportée par les CI au moment de leur destruction, on obtient un taux de minéralisation apparent qui est très élevé : il dépasse légèrement les 100% à Boigneville et Thibie et atteint 73% à Kerlavic. Ce supplément s'explique par le fait qu'au cours de la décomposition des résidus de CI, une partie de l'azote minéral du sol est immobilisé par la microflore du sol pour satisfaire ses besoins en azote et se trouve donc incorporé à la matière organique du sol en sus de l'azote contenu dans les résidus de CI.

L'extra-minéralisation cumulée liée aux CI atteint, dans la plupart des cas, une asymptote après environ 25 ans (Figure 3, droite). Ce temps correspond à l'atteinte d'un nouvel équilibre du stock d'azote organique lié aux CI successives qui se stabilise entre 415 et 580 kg N ha^{-1} selon le site considéré (Figure 3, gauche). Le supplément de stock permet de maintenir l'azote organique du sol à son niveau initial à Boigneville et Thibie alors qu'il décroît sans CI et de ralentir sa diminution à Kerlavic.

Le modèle simule que la prise en compte du changement climatique entraîne une légère diminution des stocks d'azote du sol dans 2 sites sur 3 et augmente la minéralisation sur les 3 sites. L'effet des CI sur la minéralisation et le lessivage est peu modifié par le changement climatique.

En ce qui concerne l'impact des CI sur le lessivage de nitrate, le modèle prédit que leur efficacité s'atténue au cours du temps quand la fertilisation azotée est maintenue constante (Figure 4).

La fertilisation peut être réduite de 20, 22 et 24 kg N ha⁻¹ an⁻¹ à Boigneville, Kerlavic et Thibie, en maintenant des rendements quasi égaux à ceux du témoin sans CI.

L'abandon des CI après une quinzaine d'années conduit à lessiver plus d'azote que dans le témoin sans CI, à cause de l'accroissement de la minéralisation lié au supplément d'azote organique du sol formé avec les CI précédentes. Ce supplément de stock se minéralise progressivement entraînant un plus fort lessivage que dans le témoin pendant plusieurs années. Cependant, malgré ce phénomène, l'azote total lessivé reste inférieur dans le cas de CI abandonnées que sans CI pendant 60 ans, à hauteur de 196, 73 et 159 kg N ha⁻¹ à Boigneville, Kerlavic et Thibie,.

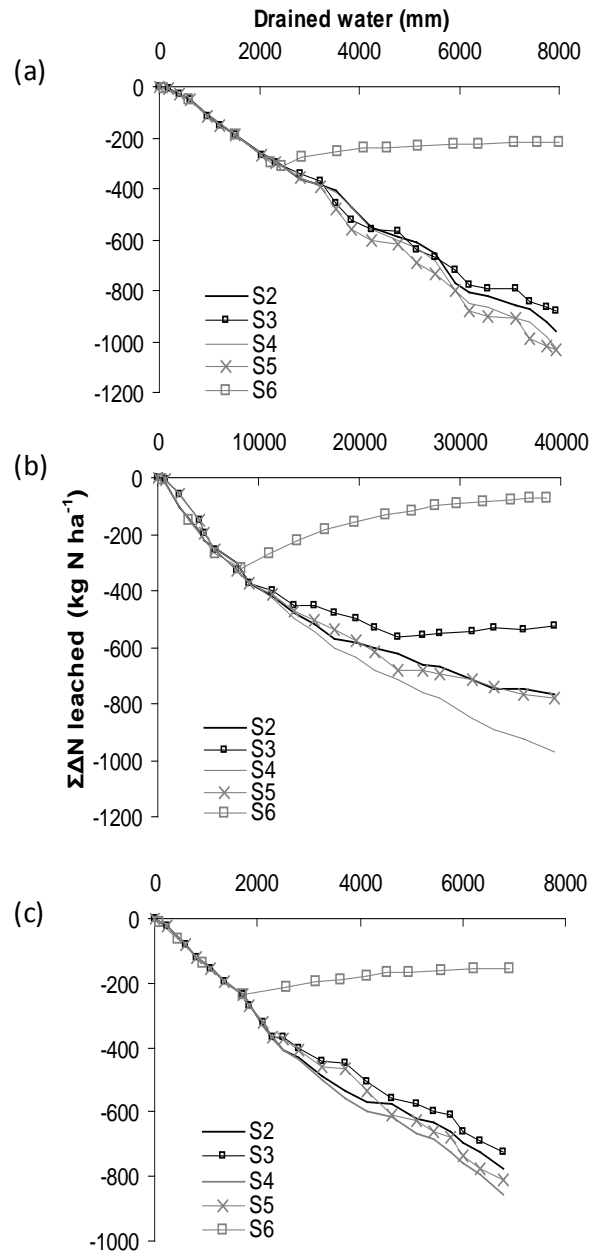


Figure 4 : N lessivé cumulé dû aux CI en fonction du drainage d'eau cumulé, simulé sur 60 ans pour les scénarios S2-S6 à Boigneville (a), Kerlavic (b) et Thibie (c). L'extra N lessivé a été calculé par différence avec le scénario S0 ou S1.

Conclusion

Nous montrons que la minéralisation nette d'azote par le sol s'accroît au cours du temps lorsqu'on pratique des CI répétées, au moins dans 2 sites sur trois. Ce surplus de minéralisation n'entraîne pas de réduction d'efficacité des CI vis-à-vis de la lixiviation du nitrate au cours de la période d'étude (13-17 ans), comme le montrent les données expérimentales et le modèle de simulation. Par contre le modèle simule une réduction de l'efficacité des CI pour le lessivage à plus long terme, à scénario technique constant. A long terme, les CI successives permettent l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre du système au niveau du stock de matière organique du sol et de la minéralisation liée à la CI. A cause de la minéralisation accrue, sans ajustement de la fertilisation, l'efficacité des CI pour la réduction du lessivage de nitrate diminue; il est donc indispensable de réduire les apports. La prévision de l'intensité de ces processus reste cependant tributaire de la qualité de la modélisation qui peut être améliorée, en particulier pour le lessivage d'azote sous CI, les quantités de racines et la détermination de la fraction active de la matière organique du sol en fonction des caractéristiques du sol. Des fréquences d'implantation élevées de CI sont souhaitables pour maintenir leur efficacité dans des contextes pluvieux afin d'éviter les effets adverses sur le lessivage, les années où les CI ne sont pas implantées; une autre solution pouvant consister à exporter les parties aériennes des CI pour limiter cet effet adverse. La présence de ces couverts hivernaux pourrait également limiter les impacts négatifs d'événements climatiques exceptionnels et donc imprévisibles.

Références

- Constantin J, Mary B, Laurent F, Aubrion G, Fontaine A, Kerveillant P, Beaudoin N (2009) Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agric. Ecosys. Envir.* 135: 268-278.
- Hansen EM, Kristensen K, Djurhuus J (2000) Yield parameters as affected by introduction or discontinuation of catch crop use. *Agron. J.* 92: 909-914.
- Justes E, Mary B, Nicolardot B (2009) Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant Soil* 325: 171-185.
- Schröder JJ, VanDijk W, DeGroot WJM (1996) Effects of cover crops on the nitrogen fluxes in a silage maize production system. *Neth. J. Agr. Sci.* 44: 293-315
- Torstensson G, Aronsson H (2000) Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 56: 139-152.
- Voisin AS, Salon C, Munier-Jolain N, Ney B (2002) Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea. *Plant Soil* 243: 31-42.