

Evolution des fournitures d'azote et du stockage de l'azote et du carbone du sol dans les rotations fourragères maïs - blé de deux essais de longue durée

J.-P. Cohan¹, A. Besnard¹, D. Hanocq², M. Moquet¹, J. Constantin³,
N. Beaudoin³, F. Laurent¹

1 : ARVALIS-Institut du végétal ; Station expérimentale de La Jaillière, F-44370 La Chapelle-Saint-Sauveur ;
jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr

2 : Chambre d'Agriculture du Finistère

3 : INRA unité AGRO-IMPACT Laon

Résumé

L'impact pluriannuel de l'insertion de couverts intermédiaires de RGI dans une rotation maïs - blé de l'Ouest de la France a été évalué dans deux dispositifs d'essais de longue durée. L'un a été conduit durant 13 ans par la CRAB et ARVALIS-Institut du végétal sur la station expérimentale de Kerlavic (29), l'autre pendant 10 ans par ARVALIS à Bignan (56). L'étude de l'évolution de la production et de la dose d'azote optimales du maïs et du blé, des dynamiques de minéralisation de l'azote organique du sol, et du stockage d'azote organique et de carbone dans le sol a mis en évidence que i) l'introduction de couvert pouvait dans certaines situations agir positivement à long terme sur tous ces critères, ii) que l'effet à long terme du couvert était relié à son niveau de croissance et donc aux quantités d'azote capté puis restitué sous forme organique au sol et iii) qu'au-delà des effets à long terme, les effets annuels sur la fourniture d'azote aux cultures suivantes étaient variables, notamment en fonction des quantités d'azote nitrique lixivié en absence de couvert.

Introduction

La possibilité de maintenir l'état de nutrition azoté des cultures à un niveau compatible avec les objectifs quantitatifs et qualitatifs du producteur est un enjeu majeur. Le contexte économique fluctuant (rapport coût des engrais/prix de vente des récoltes) et les impacts environnementaux potentiels des apports de produits azotés sur les aquifères et l'atmosphère poussent à concevoir des systèmes de culture optimisant les pratiques d'apports. Dans le contexte des rotations fourragères de l'ouest de la France, les pratiques conjointes ou pas d'apports de produits résiduels organiques et d'implantation de couverts intermédiaires à base d'espèces non légumineuses sont largement répandues. De nombreuses références scientifiques permettent d'affirmer que ceux-ci entraînent toujours une réduction de la lixiviation d'azote nitrique par rapport à un sol laissé nu en automne tout en rendant d'autres services écosystémiques potentiels, dont le stockage de matière organique (JUSTES *et al.*, 2012). Evaluer l'impact de ces itinéraires techniques sur la fourniture d'azote aux cultures et, de manière concomitante, sur le stockage d'azote et de carbone organique du sol, est particulièrement important pour orienter les systèmes de culture vers plus d'autonomie vis-à-vis des engrais azotés. Deux dispositifs expérimentaux de longue durée portés par ARVALIS-Institut du végétal et la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) ont permis de réaliser l'étude de ces pratiques. Cet article se propose de faire le point sur les principales conclusions tirées à l'issue de plusieurs années d'essais.

1. Matériel et méthodes

– Les dispositifs

L'impact des couverts intermédiaires dans la succession maïs fourrage - blé tendre d'hiver a été étudié sur deux expérimentations de longue durée conduites en Bretagne. Des mesures régulières de

la quantité d'azote absorbé par les cultures, du stock d'azote minéral du sol et un suivi des quantités d'azote lixivié (à l'aide de lysimètres et de bougies poreuses pour l'essai de Kerlavic et du couplage mesure de stock d'azote minéral du sol - modèle INRA LIXIM (MARY *et al.*, 1999) pour l'essai de Bignan) ont permis de reconstituer les flux d'azote sol-plante sur toute la durée des essais. La production des cultures a aussi été suivie, à dose unique d'engrais azoté minéral pour l'essai de Kerlavic, et selon un protocole en courbe de réponses à l'azote tous les ans pour l'essai de Bignan.

Dans chacun des deux sites expérimentaux, deux modalités étaient comparées concernant la période d'interculture de la succession blé - maïs : l'une avec un couvert de ray-grass d'Italie (RGI) systématiquement inséré entre le blé et le maïs, semé en septembre et détruit au mois de février suivant, l'autre laissant le sol nu au cours de l'interculture. Les principales caractéristiques des sites sont décrites ci-après :

- L'expérimentation de Kerlavic (29, CRAB/ARVALIS) est restée en place de 1995 à 2010, implantée en sol de limon sur arène granitique (lame drainante annuelle moyenne de 615 mm). La sole de maïs et la sole de blé étaient présentes tous les ans. Les modalités sont désignées par les termes SN (pour sol nu lors de l'interculture) et CI (pour couvert intermédiaire). Selon les années, la production de RGI a varié entre 1,4 à 4,2 t MS/ha pour des quantités d'azote absorbé dans les parties aériennes allant de 33 à 81 kg N/ha. Les quantités moyennes d'azote nitrique lixivié furent de 39 et 71 kg N/ha/an sur les traitements CI et sol nu respectivement.

- L'expérimentation de Bignan (56, ARVALIS) s'est déroulée de 1995 à 2006, implantée en sol de limon sablo-argileux (lame drainante annuelle moyenne de 535 mm). L'apport de lisier de porcs lors de l'interculture (apport à l'époque du début de croissance du RGI ou juste avant son semis selon les années d'essais) a aussi été étudié, que ce soit dans la modalité maintenue en sol nu ou dans celle avec RGI. Les quantités d'azote total apporté par le lisier à chaque apport ont varié de 125 à 250 kg Ntotal/ha, comportant généralement plus de 80 % d'azote ammoniacal. Selon les années et l'apport ou non de lisier, la production de RGI s'est échelonnée de 0,5 à 3,1 t MS/ha pour des quantités d'azote absorbé dans les parties aériennes comprises entre 20 et 102 kg N/ha. Il faut noter que l'apport de lisier entraîne en moyenne le doublement de la croissance du RGI lors de l'interculture. Les deux dernières années d'essai ont été implantées en orge de printemps (résultats non exploités dans cet article). Les modalités de cet essai sont numérotées de 1 à 4 : T1_RGI_0Lisier, T2_SN_0Lisier, T3_RGI_Lisier, T4_SN_Lisier. Les quantités moyennes d'azote nitrique lixivié sur ces traitements furent respectivement de 45, 66, 67 et 106 kg N/ha par an.

- Analyses des rendements et des doses d'engrais azotés optimaux

Les dispositifs en courbes de réponses à l'azote de l'essai de Bignan ont été analysés grâce à un formalisme en quadratique-plateau (MAKOWSKI *et al.*, 1999) ajusté par minimisation de la somme des carrés des écarts. Cet ajustement permet de déterminer pour chaque modalité et chaque année le rendement optimal (Ropt, valeur du plateau) et la dose d'engrais azoté optimale (Nopt, dose d'azote nécessaire et suffisante à l'atteinte du plateau).

- Evaluation des fournitures d'azote au maïs par le couvert intermédiaire

Les fournitures d'azote au maïs ont été évaluées par bilan apparent d'azote du système sol-plante établi entre la sortie de l'hiver et la récolte des cultures selon la méthode utilisée notamment par COHAN *et al.* (2011). L'impact du couvert intermédiaire sur la fourniture d'azote est décomposé en deux postes additifs exprimés en kg N/ha : tout d'abord un effet sur le stock d'azote minéral au semis du maïs (effet Rsemis), puis un effet sur la quantité d'azote minéralisé par les résidus de couvert restant (MrCI). C'est la somme de ces deux postes qui constitue « l'effet Fertilisant » du couvert intermédiaire. Dans le cas de ces deux essais de longue durée, la comparaison entre les traitements intègre les effets cumulatifs de la minéralisation des résidus enfouis antérieurement et de la partie organique des apports de lisier.

- Evolution pluriannuelle de la dynamique de minéralisation de l'azote organique

Sur les deux essais, la dynamique de minéralisation de l'azote organique du sol a été calculée par l'élaboration d'un bilan d'azote date à date selon la méthode décrite par CONSTANTIN *et al.* (2011).

– Evaluation en fin d'essai de la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique humifié du sol

Les vitesses potentielles de minéralisation de l'azote organique humifié du sol ont été évaluées en fin d'essai par le maintien en sol nu de toutes les modalités pendant plusieurs mois. Sur cette période, un suivi régulier de l'évolution du stock d'azote minéral du sol a été réalisé par prélèvement successifs sur trois horizons (0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm). Les profils obtenus ont été analysés grâce au modèle LIXIM (MARY *et al.*, 1999) pour en déduire les quantités d'azote minéralisé date à date et la vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique humifié du sol (exprimée en kg N/ha/jour normalisé), selon la méthode décrite par VALE (2006).

– Evolution des teneurs et des stocks de N et de C organique du sol

Sur le site de Kerlavic, les teneurs et les stocks d'azote et de carbone organique ont été évaluées par l'INRA conjointement à la densité apparente à plusieurs occasions en 2007 et 2008 sur la profondeur de travail du sol, à masse de terre équivalente selon la méthode présentée dans CONSTANTIN *et al.* (2010) pour le calcul de stock. Sur le site de Bignan, il a été procédé à des prélèvements en fin d'essai en 2006, ainsi qu'une mesure de densité apparente. Les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire de l'INRA de Quimper.

– Analyses statistiques générales

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel R (version 3.1.2 ; R CORE TEAM 2014). Les comparaisons de moyennes ont été réalisées selon la méthode des couples (échantillons appariés). Les comparaisons de modèles linéaires ont été réalisées selon la méthode des modèles emboîtés (TOMASSONE et DERVIN, 1993).

2. Résultats et discussions

– Rendements et doses d'engrais azoté optimaux

Le Tableau 1 regroupe l'ensemble des analyses réalisées sur le rendement et la dose d'engrais azoté optimaux sur les deux essais. En prenant comme référence la modalité T2 (sol maintenu nu en interculture et sans apport de lisier), on constate sur l'essai de Bignan que la simple introduction d'un couvert (modalité T1) pénalise le rendement du maïs. Le rendement du blé n'est pas affecté, de même que la dose N optimale moyenne pour les 2 cultures. L'application de lisier sans implantation de RGI (modalité T4) semble avoir peu d'influence sur le rendement et la dose N optimaux des deux cultures. Enfin, la double introduction (RGI et lisier, modalité T3) fait baisser significativement la dose N optimale sur blé et agit positivement sur le rendement du maïs. Sur l'essai de Kerlavic, le rendement moyen du maïs est affecté positivement par l'introduction de RGI. Le rendement du blé n'est pas influencé. Ainsi, l'introduction d'un RGI semble influencer de manière différente le rendement du maïs, que l'on applique du lisier ou non lors de l'interculture à Bignan ou que l'on change de contexte pédoclimatique (passage de Bignan à Kerlavic). L'étude des flux d'azote correspondant à ces changements de pratiques devraient nous apporter quelques clefs de compréhension. A noter que

Tableau 1 – Production et dose d'engrais azoté optimaux.

Essais	Bignan (56)				Kerlavic (29)		
	Modalités ⁽¹⁾	T1_RGI_0Lisier	T2_SN_0Lisier	T3_RGI_Lisier	T4_SN_Lisier	SN	RGI
		Moyenne sur la durée de l'essai ⁽²⁾					
Maïs	ROpt	13,0**	13,5	14,3*	13,7ns	Rdt	12,7 13,2**
Maïs	NOpt	212 ns	204	197 ns	203 ns		
Blé	Ropt	95,4 ns	96,5	97,2 ns	95,7 ns	Rdt	65,6 65,0 ns
Blé	Nopt	219 ns	226	199**	212*		

1 : ROpt : rendement optimal (t MS/ha pour le maïs et q/ha (15% H.) pour le blé). NOpt : dose d'engrais azoté optimale (kg N/ha). Rdt : rendement mesuré sur l'essai de Kerlavic (t MS/ha pour le maïs et q/ha (15% H.) pour le blé).

2 : Tests statistiques de comparaison de moyennes par rapport à la modalité T2 (pour Bignan) ou SN (pour Kerlavic).

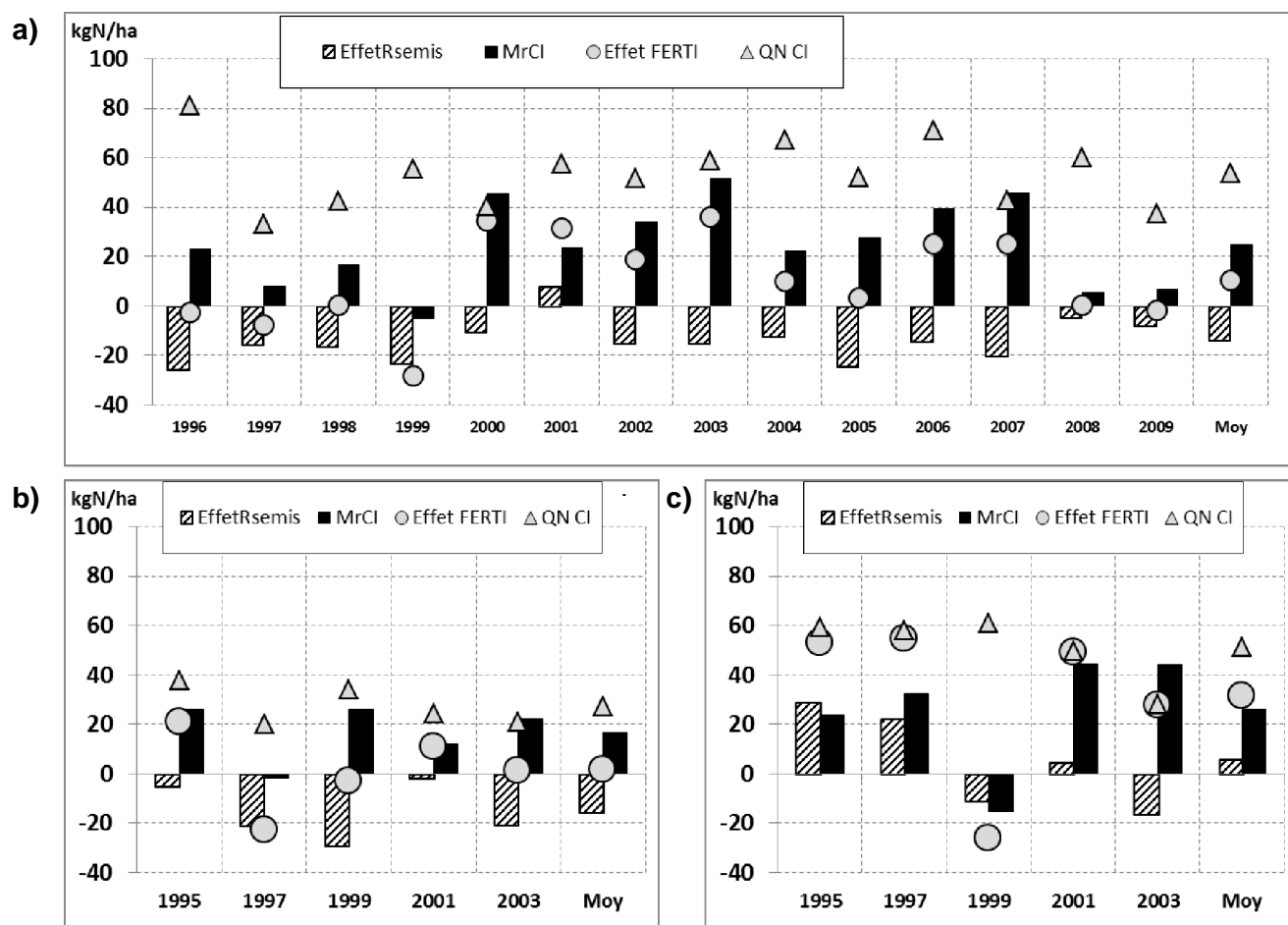
** p < 0,05 ; * p < 0,1

les rendements obtenus en maïs fourrage sont proches des statistiques de pratiques agricoles connues (cf. EVEILLARD *et al.*, 2015, ce colloque). En revanche, les doses d'azote optimales calculées sont largement au-dessus des doses pratiquées actuellement, en raison à la fois de la méthode statistique employée, qui se base sur l'accession du rendement maximal potentiel de la parcelle, et parce que les situations expérimentales testées sont différentes des pratiques usuelles qui incluent le plus souvent des apports importants de produits résiduaux organiques, notamment des fumiers.

- Fourniture d'azote au maïs par le couvert intermédiaire

La Figure 1 détaille l'évolution au cours du temps des fournitures d'azote permises par l'introduction du couvert intermédiaire de RGI sur le maïs suivant. Sur l'essai de Kerlavic, l'effet fertilisant moyen est de + 10 kg N/ha ($p = 0,06$) pour des biomasses de couverts comprises entre 1,4 et 4,2 t MS/ha selon les années. Sur l'essai de Bignan, il est de + 1 kg N/ha ($p = 0,85$) en situation sans apport de lisier à l'interculture (biomasses de couvert de 0,5 à 2,3 t MS/ha), et de + 32 kg N/ha ($p = 0,10$) avec apport de lisier à l'interculture (biomasses de couvert de 0,9 à 3,1 t MS/ha). Ces calculs sont cohérents avec les comparaisons de rendement et de dose N optimaux présentées plus haut. Le couvert de RGI est susceptible d'accroître le rendement et/ou de diminuer la dose N optimale dans des situations où les pertes de nitrate par lixiviation sont importantes : site de Kerlavic avec une lame drainante de grande ampleur ou site de Bignan avec une lame drainante plus faible mais un stock d'azote minéral enrichi par un apport de lisier à l'automne. A Bignan, sans apport de lisier, les pertes par lixiviation en sol nu sont moins importantes que l'immobilisation temporaire de l'azote dans le couvert, induisant un effet négatif significatif sur le reliquat au semis du maïs et engendrant ainsi peu ou pas de fourniture d'azote supplémentaire pour cette culture. Cette situation d'effet neutre à pénalisant d'un couvert intermédiaire de non-légumineuse en situation de lixiviation

Figure 1 – Fournitures d'azote au maïs par le couvert de RGI : a) essai de Kerlavic (29), b) essai de Bignan (56) sans apport de lisier lors de l'interculture, c)- essai de Bignan (56) avec apport de lisier lors de l'interculture.



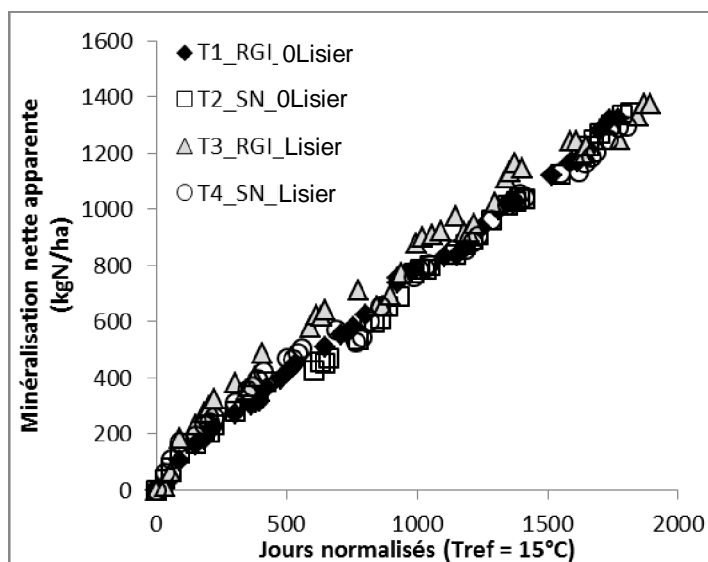
QN CI = quantité d'azote (kgN/ha) présente dans les parties aériennes du couvert de RGI au moment de sa destruction

d'ampleur faible à moyenne a déjà été mise en évidence dans de nombreux autres dispositifs à travers la France (COHAN *et al.*, 2014 ; JUSTES *et al.*, 2012).

- Dynamique pluriannuelle de minéralisation de l'azote organique

L'étude de la dynamique pluriannuelle de minéralisation de l'azote organique a été réalisée par CONSTANTIN *et al.* (2011) sur le site de Kerlavic. Cette étude a mis en évidence que, au-delà des effets annuels directement liés à la minéralisation des résidus restitués, l'implantation de couvert intermédiaire avait généré un accroissement annuel de la minéralisation de l'azote organique du sol d'environ de 2,6 kg N/ha/an ($p < 0,01$). L'analyse des dynamiques de minéralisation sur le site de Bignan (Figure 2) indique que seule la modalité T3 RGI_Lisier se démarque des 3 autres sur ce critère ($p = 0,0015$ selon une comparaison par modèles emboîtés).

Figure 2 – Dynamique cumulée de minéralisation de l'azote organique du sol sur le site de Bignan (56) de 1994 à 2004.



- Vitesse potentielle de minéralisation de l'azote organique humifié du sol en fin d'essai

Le Tableau 2 reprend les résultats obtenus suite à l'évaluation de la minéralisation de l'azote organique du sol pendant un an de suivi en sol nu à la fin des essais. Pour le site de Bignan, il apparaît que seule la modalité T3 RGI_Lisier se distingue sur ce critère. Sur le site de Kerlavic, les suivis ne mettent pas en évidence de différence statistiquement significative entre les modalités avec ou sans couvert intermédiaire. Ceci est cohérent avec le faible accroissement supplémentaire de la minéralisation mis en évidence par les suivis pluriannuels (+ 2,6 kg N/ha/an, *cf.* paragraphe précédent).

Tableau 2 – Quantités d'azote minéralisé sur environ 1 année en sol nu en fin d'essai et vitesses potentielles de minéralisation de l'azote organique correspondantes.

Essais	Bignan (56)				Kerlavic (29)	
	T1_RGI_0Lisier	T2_SN_0Lisier	T3_RGI_Lisier	T4_SN_Lisier	SN	RGI
QN min (kgN/ha)⁽¹⁾	89 ns	81	119***	90 ns	137	138 ns
Vp (kgN/ha/JN)	0,57 ns	0,54	0,71***	0,63 ns	0,64	0,68 ns
Durée du suivi (j)	412	412	412	363	341	341

1 : ramené à la durée de suivi la plus courte de l'essai. Tests statistiques de significativité de la pente de la régression linéaire.
 *** : $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

- Teneurs et stocks d'azote et de carbone organique du sol en fin d'essai

Sur le site de Kerlavic, les mesures ont permis de déterminer que l'implantation une année sur deux d'un couvert intermédiaire de RGI pendant 13 ans avait engendré un stockage supplémentaire de carbone de 4,3 t C/ha ($p < 0,01$) sur 30 cm de profondeur et un stockage supplémentaire d'azote organique de 0,32 t N/ha ($p < 0,1$) (données reprises de CONSTANTIN *et al.*, 2010).

Sur le site de Bignan (Tableau 3), la modalité T3 RGI_Lisier se détache en tendance des autres modalités, même si la densité de prélèvement (un prélèvement par répétition) ne permet pas de mettre en évidence de différence statistiquement significative au seuil de 5 %.

Tableau 3 – Teneurs et stocks de carbone et d’azote organique du sol sur l’horizon 0-30 cm du site de Bignan en fin d’essai (2006).

Essai	Bignan (56)				
	Modalités	T1_RGI_0Lisier	T2_SN_0Lisier	T3_RGI_Lisier	T4_SN_Lisier
Teneur C (g/kg)		17,00	17,50	18,34	17,71
Stock C (t/ha)		65,52	67,47	70,69	68,27
Teneur N (g/kg)		1,52	1,42	1,52	1,50
Stock N (t/ha)		5,84	5,47	5,86	5,78

Analyse de variance sur les teneurs : $p = 0,08022$ pour le carbone ; $p = 0,6437$ pour l’azote

Conclusion

L’analyse de l’ensemble des résultats nous indique que les pratiques permettant d’engendrer les restitutions les plus importantes d’azote et de carbone au sol sont à même de modifier les dynamiques de ces deux éléments (stockage N et C et dynamique de minéralisation de l’azote organique humifié). Pour le site de Kerlavic, l’introduction de couvert intermédiaire suffit à provoquer cet effet. Pour le site de Bignan, c’est seulement la pratique combinée d’un couvert intermédiaire et d’un apport de lisier lors de l’interculture qui engendre un effet significatif. Cette différence d’effet d’un couvert intermédiaire entre les sites est probablement liée aux différences de niveau de croissance du couvert entre les essais, ainsi qu’aux différences de quantité d’azote nitrique soustraite à la lixiviation. L’impact positif de ces pratiques est aussi visible sur la production des cultures, en termes de production et/ou de modification de la dose optimale d’engrais azoté à apporter.

Références bibliographiques

- COHAN J.P., LAURENT F., CHAMPOLIVIER L., LIEVEN J., DUVAL R., MORIN P., 2011. Effet des couverts intermédiaires sur la fourniture d’azote à la culture suivante. In «Cultures intermédiaires – Impacts et conduite» Ed. ARVALIS-CETIOM-ITB-ITL ; pp. 44-61.
- COHAN J.P., LABREUCHE L., BOUTHER A., JUSTES E. 2014. Leguminous cover-crops effects compared to non-leguminous on nitrate leaching and nitrogen supplying to the succeeding corn and spring barley. 18th N Workshop – Lisbon, Portugal, 30th June-3rd July 2014.
- CONSTANTIN J., MARY B., LAURENT F., AUBRION G., FONTAINE A., KERVEILLANT P., BEAUDOIN N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135, 268-278.
- CONSTANTIN J., BEAUDOIN N., LAURENT F., COHAN J.P., DUyme F., MARY B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. *Plant and Soil*, 341, 137-154.
- JUSTES E, BEAUDOIN N, BERTUZZI P, CHARLES R, CONSTANTIN J, DÜRR C, HERMON C, JOANNON A, LE BAS C, MARY B, MIGNOLET C, MONTFORT F, RUIZ L, SARTHOU JP, SOUCHÈRE V, TOURNEBIZE J 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d’eau et d’azote, autres services écosystémiques. Rapport d’étude, INRA (Ed.) France. 70 p.
- MAKOWSKI D., WALLACH D., MEYNARD J.M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agronomy Journal*, 91, 377-385.
- MARY B., BEAUDOIN N., JUSTES E., MACHET J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.
- R CORE TEAM (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- TOMASSONE R., DERVIN C., 1993. Comment interpréter les résultats d’une régression non linéaire. ITCF Editions, p 109.
- 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 ENSAT/INRA, 182 p.