

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. Constantin⁴, N. Beaudoin³, F. Laurent¹

Comment maintenir l'état de nutrition azotée des cultures à un niveau compatible avec les objectifs de production tout en limitant les impacts environnementaux des fertilisants azotés ? Dans l'ouest de la France, diverses pratiques d'implantation de couverts intermédiaires et/ou d'apports de fertilisants organiques se sont répandues. Il est important d'en évaluer les effets.

RÉSUMÉ

L'impact pluriannuel de l'insertion de couverts intermédiaires de ray-grass d'Italie dans une rotation maïs - blé de l'Ouest a été évalué pendant 14 et 12 ans dans deux essais (Kerlavic et Bignan, avec ou sans apport de lisier). L'évolution de la production du maïs et du blé, des doses d'azote optimales, des dynamiques de minéralisation de l'azote organique du sol, et du stockage de C et de N organique dans le sol ont été étudiées. L'effet à long terme du couvert intermédiaire peut être positif dans certaines situations ; il est lié à son niveau de croissance et donc aux quantités de N absorbé puis restitué au sol. Les effets annuels sur la fourniture d'azote aux cultures suivantes sont variables et ne peuvent donc améliorer à court terme l'autonomie azotée des systèmes de culture.

SUMMARY

Changes in nitrogen availability and in carbon and nitrogen soil stores in a wheat-forage maize rotational system: results from two long-term experiments

Is there a way to provide crops with enough nitrogen (N) to meet production objectives while simultaneously limiting the environmental effects of N fertilisers? At sites in western France, we studied the multiyear impacts of using Italian ryegrass as a catch crop in a wheat-maize rotational system. A 14-year and a 12-year experiment were conducted; in the latter, the effects of a liquid-manure treatment were examined. We analysed changes in maize and wheat yields, optimal levels of added N, nitrogen mineralisation dynamics, and soil stores of organic C and N. In some cases, the catch crop had a positive long-term effect; the plant's relative impact depended on its level of growth and, therefore, the amount of N it absorbed and subsequently returned to the soil. Making N available to succeeding crops had variable annual effects; consequently, it may not be helpful in reducing the nitrogen dependence of crop systems over the short term.

La possibilité de maintenir l'état de nutrition azotée des cultures à un niveau compatible avec les objectifs quantitatifs et qualitatifs du producteur est un enjeu majeur (COHAN *et al.*, 2011a). 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 (SUTTON *et al.*, 2011) 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

AUTEURS

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, F-29393 Quimperlé

3 : INRA unité AGRO-IMPACT Laon, F-02000 Laon

4 : INRA UMR AGIR Toulouse, F-31326 Castanet-Tolosan

MOTS CLÉS : Azote, Bretagne, carbone, culture dérobée, expérimentation longue durée, fertilisation organique, lessivage, lisier, production fourragère, ray-grass d'Italie, sol.

KEY-WORDS : Brittany, Carbon, catch crop, forage production, italian ryegrass, leaching, long-duration experiments, Nitrogen, organic fertilisation, slurry, soil.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Cohan J.P., Besnard A., Hanocq D., Moquet M., Constantin J., Beaudoin N., Laurent F. (2015) : "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", *Fourrages*, 223, 197-204.

d'implantation de couverts intermédiaires à base d'espèces non légumineuses sont largement répandues. De nombreuses références scientifiques permettent d'affirmer que l'insertion de couverts intermédiaires entraîne 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 du sol (JUSTES *et al.*, 2012). L'évaluation de l'impact de ces divers 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 importante pour orienter les systèmes de culture vers une plus grande 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 dans les deux sites de Kerlavic (Finistère) et Bignan (Morbihan).

1. Matériel et méthodes

■ Les dispositifs

En Bretagne, **l'impact des couverts intermédiaires dans la succession maïs fourrage - blé tendre d'hiver a été étudié sur deux expérimentations de longue durée.** Deux modalités de gestion de l'interculture étaient comparées : 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.

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).

L'expérimentation de **Bignan** (56, ARVALIS) s'est déroulée de 1993 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 a aussi été étudié** en facteur croisé avec la gestion de l'interculture, que ce soit dans la modalité maintenue en sol nu ou dans celle avec RGI (la date d'apport correspondait au début de croissance du RGI ou juste avant son semis selon les années). Les quantités d'azote total apporté par le lisier à chaque apport ont varié de 125 à 250 kg N_{total} /ha, comportant généralement plus de 80 % d'azote ammoniacal. Les deux dernières années d'essai ont été implantées en orgé de printemps (résultats sur la production des couverts et des cultures 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.

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 90 cm de profondeur (à l'aide de lysimètres et de bougies poreuses pour l'essai de Kerlavic et du couplage entre les mesures de stock d'azote minéral du sol et le 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 courbes annuelles de réponse à l'azote pour l'essai de Bignan (la courbe de réponse comprenait une modalité sans apport d'engrais azoté).

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

Sur l'essai de Bignan les dispositifs en courbes de réponse du rendement à l'azote 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** (R_{Opt} , valeur du plateau) **et la dose d'engrais azoté optimale** (N_{Opt} , dose d'azote nécessaire et suffisante à l'atteinte du plateau).

■ Etude des dynamiques de l'azote et du carbone

Les **fournitures d'azote au maïs par le couvert intermédiaire** ont été évaluées par l'établissement du bilan apparent d'azote du système sol - plante dressé entre la sortie de l'hiver et la récolte des cultures selon la méthode utilisée notamment par COHAN *et al.* (2011b). L'effet 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 R_{semis}), puis un effet sur la **quantité d'azote minéralisé par les résidus de couvert restant à décomposer** (M_{RCI}). 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.

Sur les deux essais, la **dynamique pluriannuelle 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).

Les **vitesses potentielles de minéralisation de l'azote organique humifié du sol** ont été calculées 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 contenu en azote minéral du sol a été réalisé par prélèvements 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)

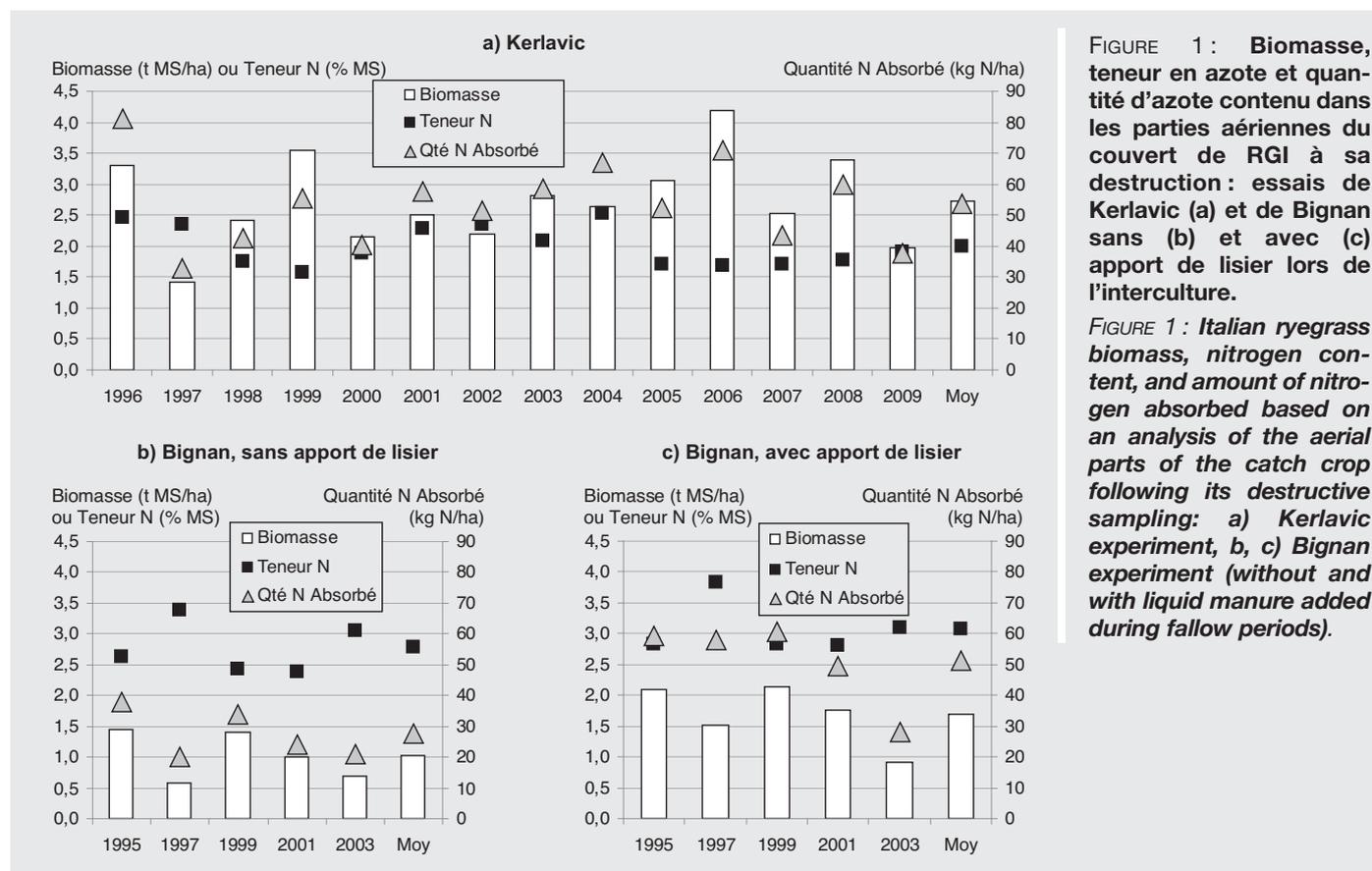


FIGURE 1 : Biomasse, teneur en azote et quantité d'azote contenu dans les parties aériennes du couvert de RGI à sa destruction : essais de Kerlavic (a) et de Bignan sans (b) et avec (c) apport de lisier lors de l'interculture.

FIGURE 1 : Italian ryegrass biomass, nitrogen content, and amount of nitrogen absorbed based on an analysis of the aerial parts of the catch crop following its destructive sampling: a) Kerlavic experiment, b, c) Bignan experiment (without and with liquid manure added during fallow periods).

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 VALÉ (2006). Les potentiels de minéralisation C et N d'échantillons prélevés sur 30 cm sur le site de Bignan en fin d'essai (2006) ont été mesurés au sein du laboratoire de l'INRA de Quimper. Ces incubations ont été réalisées durant 292 jours à 15°C avec une humidité massique de 25 %.

Sur le site de Kerlavic, les **teneurs et les stocks d'azote et de carbone organiques** ont été mesurés à plusieurs occasions en 2007 et 2008 par l'INRA, conjointement à la mesure de la densité apparente 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 stocks). Sur le site de Bignan, il a été procédé à des prélèvements sur 30 cm 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. Les échantillons du site de Bignan ont aussi fait l'objet d'une analyse en fractionnement granulométrique de la matière organique dans le même laboratoire.

■ Analyses statistiques générales

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel R (version 3.1.3; R CORE TEAM, 2015). 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

■ Croissance des couverts intermédiaires

À la destruction du RGI au mois de février, celui-ci affichait une croissance moyenne des parties aériennes de 2,7 t MS/ha sur le site de Kerlavic et de 1,0 et 1,7 t MS/ha sur le site de Bignan respectivement pour les modalités sans et avec apport de lisier (figure 1). Compte tenu des teneurs en azote mesurées dans les parties aériennes, le couvert a absorbé la même quantité moyenne d'azote (environ 50 kg N/ha) à Kerlavic et à Bignan sur la modalité avec lisier. En revanche, le couvert de la modalité sans lisier de Bignan affiche un niveau d'absorption plus faible (27 kg N/ha). La comparaison des indices de nutrition azotée du RGI entre les modalités avec et sans lisier de l'essai de Bignan montre qu'un des facteurs limitants de la croissance du couvert sur ce site était la disponibilité en azote minéral du sol (INN moyens de 0,63 et 0,74 respectivement pour les modalités sans et avec lisier). Cette contrainte a été levée par les apports de lisier.

■ Dynamique de lixiviation du nitrate

L'analyse des dynamiques de lixiviation du nitrate apporte plusieurs enseignements (figure 2 et tableau 1) : i) quel que soit le site d'expérimentation, **l'introduction de couvert intermédiaire réduit de 30 à 40 % ce flux**, ii) **l'épandage de lisier lors de l'interculture sans implantation de couvert augmente le transfert de 60 %** sur le site de Bignan, et iii) **l'implantation de couvert**

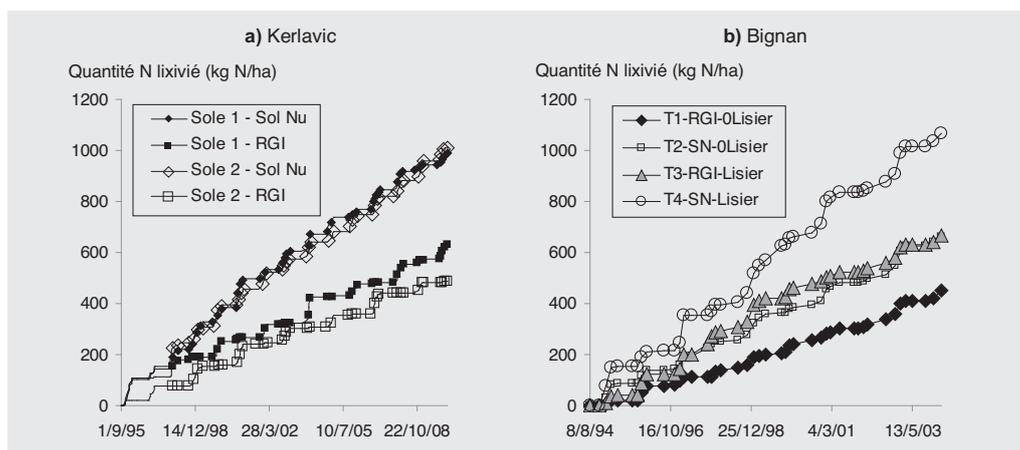


FIGURE 2 : Pertes cumulées de nitrate par lixiviation sur toute la durée des essais : a) essai de Kerlaviac, b) essai de Bignan.

FIGURE 2 : Cumulative loss of nitrate to leaching over time in the two experiments: a) Kerlaviac experiment, b) Bignan experiment.

Essai	Bignan ⁽¹⁾				Kerlaviac ⁽¹⁾	
	T1-RGI-0Lisier	T2-SN-0Lisier	T3-RGI-Lisier	T4-SN-Lisier	SN	RGI
Cumul sur la durée de l'essai :						
- lame drainante (mm)	5 207	5 383	5 531	5 207	8 875	8 451
- Lixiviation NO ₃ ⁻ (kg N/ha)	450***	662	669 ns	1 065***	1 004	558***
- Teneur NO ₃ ⁻ (mg NO ₃ ⁻ /l)	38,2	54,5	53,6	90,6	50,1	29,2

1 : Les valeurs du site de Bignan sont issues de simulation par le modèle LIXIM (MARY et al., 1999) paramétré avec des mesures régulières de stocks d'azote minéral et d'humidité du sol lors de l'interculture. Les valeurs du site de Kerlaviac sont issues de mesures réalisées sur des lysimètres et des bougies poreuses. Tests statistiques selon une comparaison par modèles emboîtés par rapport à la modalité T2 (pour Bignan) ou SN (pour Kerlaviac, moyennes des 2 soles). *** : p < 0,01 ; ** : p < 0,05 ; * : p < 0,1 ; ns : non significatif

TABLEAU 1 : Lame drainante, lixiviation du nitrate et teneur en nitrate dans les eaux à 90 cm de profondeur. Données cumulées sur toute la durée des essais de Kerlaviac (15 ans) et Bignan (10 ans).

TABLE 1 : Soil drainage, nitrate leaching, and nitrate levels in waters 90 cm below the surface. Cumulative data for the entirety of the Kerlaviac (15 years) and Bignan (10 years) experiments.

permet de corriger l'impact de l'apport de lisier en ramenant la lixiviation au niveau de celle d'une interculture conduite sans couvert et sans apport de lisier.

Rendements et doses d'engrais azoté optimaux

Le tableau 2 regroupe l'ensemble des analyses réalisées sur le rendement et la dose d'engrais azotés optimaux pour les deux essais.

Sur l'essai de Bignan, en prenant comme référence la modalité T2 (sol maintenu nu en interculture et sans apport de lisier), on constate que la simple introduction d'un couvert détruit au mois de février (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'effet 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. En complément de cette analyse, l'étude de l'évolution du rendement des parcelles sans apports d'azote démontre un effet significatif positif des modalités T3 (RGI et lisier, p < 0,0001) et T4 (sol nu et lisier, p = 0,045 ; figure 3).

Sur l'essai de Kerlaviac, le rendement moyen du maïs est affecté positivement par l'introduction de RGI, alors que celui du blé n'est pas affecté. Ainsi, l'introduction d'un RGI détruit tardivement semble influencer de manière différente

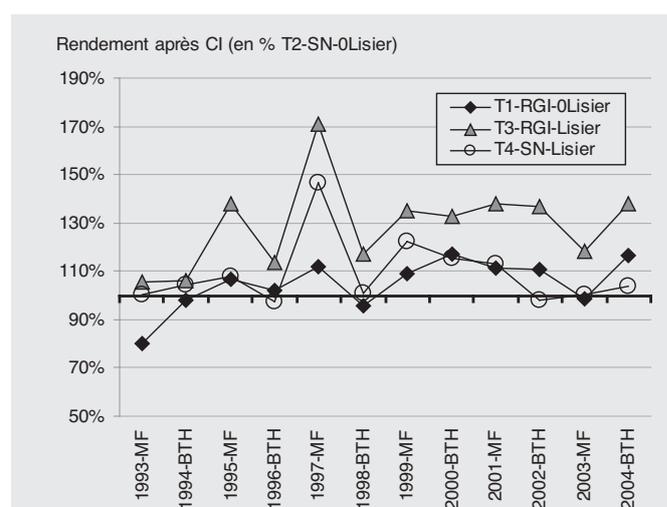


FIGURE 3 : Evolution dans le temps du rendement des cultures sans fertilisation azotée minérale sur le site de Bignan (en % de la modalité T2-SN-0Lisier).

FIGURE 3 : Changes in time to yield for crops that received no mineral nitrogen fertilizer in the Bignan experiment (expressed as a % of the T2-SN-0Lisier treatment).

Essai		Bignan ⁽¹⁾				Kerlavic ⁽¹⁾		
		T1-RGI-0Lisier	T2-SN-0Lisier	T3-RGI-Lisier	T4-SN-Lisier	SN	RGI	
Maïs	R _{Opt}	13,0**	13,5	14,3*	13,7ns	Rdt	12,7	13,2**
Maïs	N _{Opt}	212 ns	204	197 ns	203 ns			
Blé	R _{Opt}	95,4 ns	96,5	97,2 ns	95,7 ns	Rdt	65,6	65,0 ns
Blé	N _{Opt}	219 ns	226	199**	212*			

1 : R_{Opt} : rendement optimal (maïs, en t MS/ha ; blé (15 % humidité), en q/ha). N_{Opt} : dose N optimale (kg N/ha).
 Rdt : rendement mesuré sur l'essai de Kerlavic (maïs, en t MS/ha ; blé (15 % humidité), en q/ha).
 Tests statistiques de comparaison de moyennes par rapport à la modalité T2 (pour Bignan) ou SN (pour Kerlavic).
 ** : p < 0,05 ; * : p < 0,1 ; ns : non significatif

TABLEAU 2 : **Production des cultures et dose d'engrais azoté optimaux.** Moyennes sur la durée des essais de Kerlavic (15 ans) et Bignan (10 ans).

TABLE 2 : **Optimal crop yields and nitrogen fertilizer amounts** (averaged over the entire experimental periods of the Kerlavic (15 years) and Bignan (10 years) experiments).

le rendement du maïs selon 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 apporter quelques clefs de compréhension. A noter que les rendements obtenus en maïs fourrage sont proches des statistiques de pratiques agricoles connues (cf. EVEILLARD *et al.*, cet ouvrage). En revanche, les doses d'azote optimales calculées à Bignan sont supérieures aux doses actuellement pratiquées, en raison à la fois de la méthode statistique employée, qui se base sur l'accession au 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 résiduels organiques, notamment des fumiers.

■ Fourniture d'azote au maïs par le couvert intermédiaire

La figure 4 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 n'est pas significativement différent de 0 (+1 kg N/ha; p=0,85) en situation sans apport de lisier à l'interculture (biomasse 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 (biomasse 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**

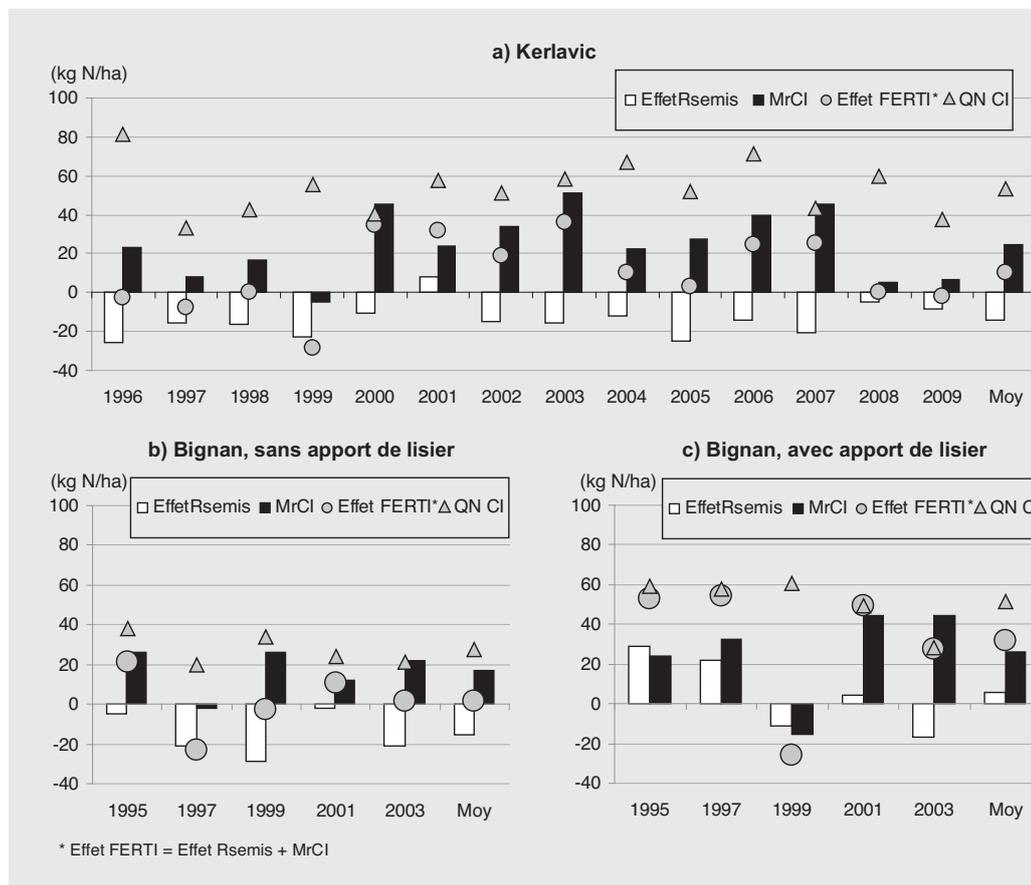


FIGURE 4 : **Fournitures d'azote au maïs (Effet FERTI) par le couvert de RGI : essais de Kerlavic (a) et de Bignan sans (b) et avec (c) apport de lisier lors de l'interculture.**

FIGURE 4 : **Nitrogen made available to the maize crops (Effet FERTI) by the Italian ryegrass catch crop: a) Kerlavic experiment, b, c) Bignan experiment (without and with liquid manure added during fallow periods).**

Essai	Bignan ⁽¹⁾				Kerlavic ⁽¹⁾	
	T1-RGI-0Lisier	T2-SN-0Lisier	T3-RGI-Lisier	T4-SN-Lisier	SN	RGI
QN min (kg N/ha)	89 ns	81	119***	90 ns	137	138 ns
Vp (kg N/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 : QN min : mesuré sur sol nu en fin d'essai et ramené à la durée de suivi la plus courte de l'essai ; JN : Jour Normalisé
 Tests statistiques de significativité de la pente de la régression linéaire : *** : p < 0,01, ** : p < 0,05, * : p < 0,1

TABLEAU 3 : Quantités d'azote minéralisé (QN min) sur environ 1 année et vitesses potentielles de minéralisation de l'azote organique correspondantes (Vp).

TABLE 3 : Amount of inorganic nitrogen produced via mineralisation (QN min) over about one year's time and the potential speed of the conversion process (Vp).

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 azoté au semis du maïs non compensé par la minéralisation de l'azote organique du couvert après sa destruction, et engendrant ainsi peu ou pas de fourniture d'azote supplémentaire pour cette culture. Cette situation d'effet neutre à pénalisant à court / moyen terme d'un couvert intermédiaire de non-légumineuse en situation de lixiviation 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).

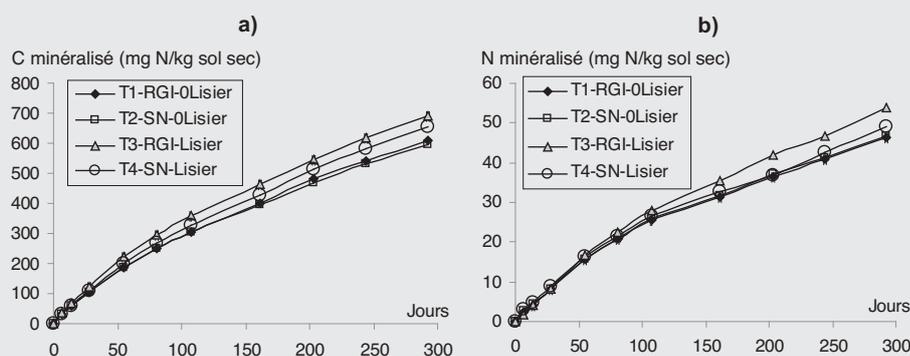
■ Dynamique pluriannuelle de minéralisation de l'azote organique

L'étude de la dynamique pluriannuelle de minéralisation de l'azote organique a été réalisée sur le site de **Kerlavic** par CONSTANTIN *et al.* (2011). Cette étude a mis en évidence que, au-delà des effets annuels directement imputables à la minéralisation des résidus restitués, l'im-

plantation de couvert intermédiaire avait généré un accroissement annuel de la minéralisation de l'azote organique du sol d'environ 2,6 kg N/ha.an (p < 0,01). L'analyse des dynamiques de minéralisation cumulées sur le site de **Bignan** indique que **seule la modalité T3-RGI-Lisier se démarque significativement des 3 autres sur le cumul de quantité d'azote minéralisé** (p = 0,0015 selon une comparaison par modèles emboîtés). En revanche, au-delà du simple cumul des effets annuels des pratiques culturales sur la minéralisation de l'azote organique, aucun autre supplément de minéralisation de l'azote organique du sol n'a été mis en évidence en utilisant la même méthode de calcul que CONSTANTIN *et al.* (2011).

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

Le tableau 3 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. Un tel effet sur la minéralisation basale du sol n'a pas été mis en évidence dans l'étude des dynamiques pluriannuelles de minéralisation de l'azote organique (*cf.* ci-dessus), pouvant indiquer un manque de sensibilité de ce calcul pour répondre à la question. Sur le site de Kerlavic, les suivis



(Dans les 2 cas, seule la modalité T3-RGI-Lisier se distingue significativement des autres (p = 0,0217 pour le carbone et p = 0,0759 pour l'azote organique selon une comparaison par modèles emboîtés). Pour le carbone, la tendance affichée par la modalité T4-SN-Lisier n'est pas significative (p=0,138))

FIGURE 5 : Cinétiques de minéralisation en incubation a) du carbone et b) de l'azote organique du sol sur le site de Bignan.

FIGURE 5 : Mineralisation dynamics measured in the laboratory for a) organic carbon and b) organic nitrogen using samples from the Bignan site.

Essai	Bignan			
	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 C ; $p=0,6437$ pour N

TABEAU 4 : Teneurs et stocks de carbone et d'azote organiques du sol sur l'horizon 0-30 cm du site de Bignan en fin d'essai (2006).

TABLE 4 : Soil content and stores of organic carbon and nitrogen at the Bignan site at the end of the experiment (2006, soil horizon=0 to 30 cm).

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. ci-dessus).

Les études en incubation du site de Bignan (figure 5) indiquent que seule la modalité T3-RGI-Lisier se distingue des autres en termes de dynamique de minéralisation du carbone et de l'azote ($p=0,0217$ pour le carbone et $p=0,0759$ pour l'azote organique selon une comparaison par modèles emboîtés). Ce résultat est cohérent avec les suivis de minéralisation de l'azote au champ.

■ Teneurs et stocks d'azote et de carbone organiques du sol en fin d'essai

Sur le site de Kerlavec, les mesures ont permis de montrer 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 4), 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 %. Sur ce même site, la répartition du carbone du sol dans les différentes fractions granulométriques de la matière organique n'est pas modifiée par les pratiques culturales appliquées (données non présentées).

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). Des effets significatifs ont pu être mis en évidence, bien que la fréquence de retour du couvert ne soit que d'une année sur deux. Pour le site de Kerlavec, l'introduction de couvert intermédiaire suffit à provoquer ces modifications. 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, et donc aux quantités d'azote restituées par minéralisation après destruction. Au-delà de la réduction de la lixiviation du nitrate et, dans certains cas, d'un stockage accru de carbone et d'azote organique dans le sol, 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. Néanmoins, quand il est significatif, la faible ampleur de l'effet « fertilisant » moyen de l'implantation d'un RGI, hors contexte d'apports de produits résiduels organiques lors de l'interculture, démontre que cette pratique ne peut être considérée comme un levier majeur d'amélioration à court terme de l'autonomie des systèmes de culture vis-à-vis des engrais azotés. Pour atteindre ce but *via* l'implantation de couvert intermédiaire, il sera probablement nécessaire de recourir à des couverts à base de légumineuses. Cela passera notamment par l'utilisation de mélanges légumineuses / non-légumineuses afin d'assurer conjointement des objectifs de limitation de la lixiviation du nitrate et de fourniture d'azote significative à la culture suivante (COHAN *et al.*, 2014 ; JUSTES *et al.*, 2012 ; TRIBUILLOIS, 2014).

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F., "La fertilité des sols dans les systèmes fourragers", les 8 et 9 avril 2015

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- COHAN J.P., LAURENT F., LELLAHI A. (2011a) : "Fertiliser les cultures : concilier efficacité technique et défis environnementaux", *DEMETER*, 269-327.
- COHAN J.P., LAURENT F., CHAMPOLIVIER L., LIEVEN J., DUVAL R., MORIN P. (2011b) : "Effet des couverts intermédiaires sur la fourniture d'azote à la culture suivante", *Cultures intermédiaires – Impacts et conduite*, éd. ARVALIS-CETIOM-ITB-ITL, 44-61.
- COHAN J.P., LABREUCHE L., BOUTHIER 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., KERVILLANT 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.
- VEILLARD P., FORAY S., LE SOUDER C. (2015) : "Progrès des pratiques de fertilisation organique et minérale dans un cadre réglementaire contraint", *Fourrages*, 223, 173-178.

- 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 J.P., 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 éd., 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 (2015) : *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna (Austria) ; <http://www.R-project.org/>
- SUTTON M.A., HOWARD C.M., ERISMAN J.W., BILLEN G., BLEEKER A., GRENNFELT P., VAN GRINSVEN H. ET GRIZZETTI B. (2011) : *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, Cambridge University Press.
- TOMASSONE R., DERVIN C. (1993) : *Comment interpréter les résultats d'une régression non linéaire*, ITCF Editions, p 109.
- TRIBOUILLOIS H. (2014) : *Caractérisation fonctionnelle d'espèces utilisées en cultures intermédiaires et analyse de leurs performances en mélanges bi-spécifiques pour produire des services écosystémiques de gestion de l'azote*, thèse INRA/INP Toulouse, 215 p.
- 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.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33.01.30.21.99.59 – Fax : +33.01.30.83.34.49 – Mail : afpf.versailles@gmail.com

Association Française pour la Production Fourragère