



HAL
open science

Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation

Francoise Vertès, Marie-Helene Jeuffroy, Eric Justes, P. Thiébeau, Michael S. Corson

► To cite this version:

Francoise Vertès, Marie-Helene Jeuffroy, Eric Justes, P. Thiébeau, Michael S. Corson. Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovations Agronomiques*, 2010, 11, pp.25-44. hal-01173243

HAL Id: hal-01173243

<https://hal.science/hal-01173243>

Submitted on 31 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation.

Vertès F.¹, Jeuffroy M.-H.², Justes E.³, Thiébeau P.⁴, Corson M.¹

¹ INRA UMR SAS, 65 rue de Saint Briec, F-35042 Rennes Cedex.

² INRA UMR Agronomie INRA-AgroParistech, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon.

³ INRA UMR AGIR, Auzeville - BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex.

⁴ INRA UMR-FARE614, 2 esplanade R. Garros, F-51686 Reims Cedex 2.

Correspondance : Francoise.Vertes@rennes.inra.fr

Résumé

Les légumineuses constituent une famille très importante de plantes à fleurs, herbacées ou arborées, les Fabaceae, dont l'une des propriétés majeures est qu'elles peuvent former un partenariat (association symbiotique) avec une classe de bactéries (*Rhizobium sp.*) capables de fixer l'azote atmosphérique inerte (N₂) pour le transformer en azote biologiquement utile (réactif). Cet azote est ensuite mis à la disposition du reste de l'écosystème par une diversité de circuits de recyclage, via le sol ou les déjections animales. Les légumineuses sont cultivées en peuplements purs ou en associations, pour leur biomasse herbacée ou leurs graines, dans des rotations culturales ou des prairies de durées diverses. Cet article a pour objectifs de faire une revue des bénéfices environnementaux liés à l'azote, de préciser les risques de pertes de nitrate à l'échelle de la parcelle et d'eutrophisation à l'échelle de l'exploitation agricole qui leur sont associés, et de dessiner quelques conclusions quant à leur place possible dans des systèmes de production durables.

Mots-clés : Légumineuses, culture pure, culture associée, fixation symbiotique, azote, intérêt environnemental, eutrophisation.

Abstract: To understand and maximize environmental benefit of legumes due to nitrogen at crop, rotation and farm levels

Legumes are an important family of flowering plants, grasses or trees in the Fabaceae family. One of their major properties is the ability to develop a symbiosis with bacteria (*Rhizobium spp.*) to fix atmospheric nitrogen (N₂) and to transform it into biologically useful (reactive) nitrogen. This nitrogen is then available to the rest of the ecosystem through a range of recycling systems, via the soil or animal manure. Legumes are grown in pure stands or in mixtures, for herbaceous biomass or seeds, in crop rotations or in grasslands with various durations. This paper aims to review environmental benefits associated with nitrogen, to clarify the risk of nitrate losses at the plot level and eutrophication at the farm level associated with them. Some conclusions about their possible role in sustainable production systems are drawn.

Keywords: grain legumes, forage legumes, pure stands, forage mixture, nitrogen, symbiotic fixation, eutrophication

Introduction : Légumineuses et azote

Les légumineuses constituent une famille très importante de plantes à fleurs, herbacées ou arborées, les Fabaceae, représentée par plus de 340 espèces en France et 7 000 dans le monde. Leurs deux signes distinctifs majeurs sont que leurs graines se forment à l'intérieur de gousses, et qu'elles peuvent former un partenariat (association symbiotique) avec une classe de bactéries (*Rhizobium sp.*) capables de fixer l'azote atmosphérique inerte (N₂) pour le transformer en azote biologiquement utile (réactif). Les bactéries de type *Rhizobium* du sol infectent les racines des légumineuses et induisent la formation de nodosités, qui fournissent abri et énergie aux bactéries, lesquelles fournissent de l'azote à la plante hôte.

Cet azote est ensuite mis à la disposition du reste de l'écosystème par une diversité de circuits de recyclage : décomposition des organes végétaux morts, recyclage par les déjections des animaux (pâturage ou épandage). Pendant des millénaires, les légumineuses ont ainsi apporté une contribution majeure à la fourniture de l'azote essentielle pour des écosystèmes terrestres naturels et cultivés « Une culture de lupin engraisse les champs et

les vignes, nous l'avons dit ; aussi, loin d'avoir besoin de fumier, il tient lieu du meilleur engrais. La vesce aussi engraisse les champs » (Pline l'Ancien). « Les fèves engraissent les terres où elles auront été semées et recueillies, y laissant quelque vertu agréable aux froments qu'on y fait par après » (Olivier de Serres, 1605). Leur autonomie de nutrition azotée leur permet de fonctionner comme des plantes pionnières de milieux pauvres en éléments nutritifs, voire arides (beaucoup de légumineuses utilisent l'eau efficacement). Ces caractéristiques sont importantes pour le développement de systèmes agricoles durables et les plus connues sont les suivantes (par exemple, Crew et Peoples, 2004) :

- associé à leur capacité à fixer l'azote, les légumineuses ont des concentrations élevées de protéines dans les feuilles et les graines et constituent une source de protéines de grande valeur,
- les légumineuses constituent une excellente tête de rotations ou un bon engrais vert dans certains systèmes agricoles. En exploitation de grande culture, elles peuvent assurer l'entretien organique des sols contribuant à préserver leur structure et leur fertilité,
- exploitées localement, elles participent à la diversification de la production agricole avec des avantages pour la biodiversité, pour l'hébergement de prédateurs d'insectes (lutte antiparasitaire) pour le contrôle de mauvaises herbes envahissantes ou nocives dans les cultures suivantes.

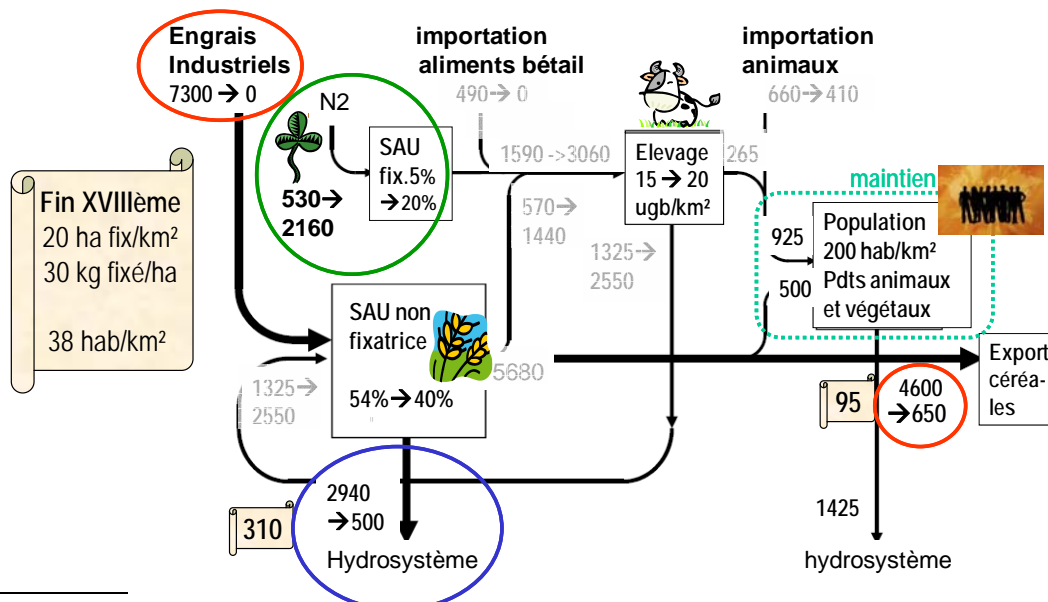
Rappelons que les fabacées comprennent :

- les légumineuses à graines, essentielles pour la nutrition humaine (haricot sec, fève, lentille, pois sec, pois chiche, haricot vert, haricot à écosser, petits pois) et animales (fève, pois protéagineux, féverole, soja, lupin),
- les légumineuses prairiales destinées aux herbivores, au pâturage et/ou en fourrages conservés (incluant déshydratés), en peuplement pur (prairies artificielles de trèfle violet, luzerne, sainfoin, lotier, minette, trèfle incarnat) ou fourrages cultivés en dérobé (vesce, trèfle incarnat), en prairies complexes (semées ou naturelles) : trèfles, vesce, sainfoin, lotier, luzerne,
- les arbustes des landes (genêts, ajoncs, ...) et les arbres tels les robiniers, acacias.

L'ensemble de ces peuplements couvrait en France près de 7 millions d'hectares en 1960, réduits à environ 3.3 en 2000. En considérant les surfaces cultivées en 1999 et une fixation moyenne de 150 kg N par ha de légumineuses, on peut calculer une entrée d'azote globale dans l'écosystème cultivé d'environ 500 000 tonnes d'azote. La baisse des surfaces de légumineuses à graines entre 1992 (700 000 ha environ) et 2009 (150 000 ha environ) a fait perdre presque 100 000 tonnes d'N fixé pour les agrosystèmes.

Billen et al (2009) a caractérisé l'évolution des sources d'azote dans le bassin de la Seine (Figure 1) : les surfaces fixatrices sont passées de 25% de la surface totale de ce bassin au milieu du XIXème siècle, apportant 1500 t d'N dans l'écosystème cultivé (fixation moyenne de 60 kgN/ha SAU), à 5% en 2005, fixant 530 t d'azote tandis que les engrais industriels en apportent alors 7300 t.

Figure 1 : Flux d'azote dans le bassin de la Seine, sans la situation actuelle (2005) et dans un scénario « tout bio », d'après Billen et al (2009). Flux d'azote en kg N / km² /an



Dans un scénario où la fixation symbiotique se substitue aux engrais (par exemple lors du passage en agriculture biologique), cet auteur recalcule une surface en légumineuses représentant 20% du territoire, et la fixation de 2160 t d'azote. Dans ce scénario, permettant de satisfaire les besoins locaux en produits agricoles (mais réduisant de 85% les exportations de céréales hors du bassin de la Seine), les pertes vers l'hydrosystème seraient divisées par 6.

Dans un contexte de demande croissante en protéines, de raréfaction des ressources non renouvelables, de nécessité de préserver l'environnement (qualité des eaux, air et sols) et d'instabilité économique, un renouveau d'intérêt des agriculteurs et des pouvoirs publics s'exprime pour les légumineuses (Cavallès, 2009): elles pourraient redevenir un élément clé d'une agriculture écologiquement intensive et plus autonome, intégrant la minimisation des coûts de production et l'enjeu environnemental croissant. Augmenter l'autonomie azotée, qui réduit ou évite l'achat d'engrais minéraux et de concentrés en protéines pour l'alimentation animale, est l'une des réponses possibles.

Il s'agit donc à la fois d'interroger les possibilités des légumineuses à répondre aux différents enjeux agronomiques (production, qualité, fertilité) et de performances écologiques, et de préciser quelles combinaisons de choix et de modalités de conduite sont les plus performantes dans un contexte d'utilisation donné. Cet article a pour objectifs de faire une revue des bénéfiques environnementaux liés à l'azote à l'échelle de la parcelle agricole, et de préciser les risques d'eutrophisation à l'échelle de l'exploitation agricole qui leur sont associés, afin de mieux connaître leur place possible dans des systèmes de production durables. Thiébeau et al. (2010) analysent les autres enjeux environnementaux, concernant notamment l'énergie et le changement climatique.

1- Flux d'azote annuels à l'échelle de la parcelle

Dans cette première partie, nous rappellerons des connaissances sur la nutrition azotée des légumineuses, pures ou associées avec des graminées, et sur le lien entre gestion des couverts et pertes par lixiviation de nitrate.

1-1 Nutrition azotée

La nutrition azotée des légumineuses fait intervenir deux voies d'acquisition de l'azote : la fixation de l'azote atmosphérique par les nodosités et l'assimilation de l'azote minéral du sol par les racines. Consommatrice d'assimilat carbonés, la mise en place et le fonctionnement des nodosités exercent une certaine compétition avec le reste de la plante (Louarn et al., 2010).

Relation biomasse – azote : comme chez beaucoup d'espèces, la nutrition azotée des légumineuses peut être analysée à l'aide de la courbe critique reliant la teneur en N (N_{crit}) des parties aériennes des plantes et leur biomasse aérienne. Pour les légumineuses à graines, cette courbe a été paramétrée par Ney et al. (1997) pour le pois et validée par Vocanson et al. (2005). Pour cette culture, l'équation de la courbe, valide entre 1t/ha de matière sèche aérienne (MS_{aer}) et le début du remplissage des graines, s'écrit :

$$\%N_{crit} = 5,08 * MS_{aer}^{-0,32}, \text{ avec } MS_{aer} \text{ en t/ha}$$

Pendant le remplissage des graines, l'accumulation d'N dans les graines riches en protéines compense la diminution de teneur en azote des organes végétatifs, conduisant à une teneur en N constante des parties aériennes.

Le diagnostic de la nutrition des prairies (hors légumineuses) est basé sur l'indice de nutrition azotée, calculé en référence à la relation qui lie la teneur en azote à la biomasse aérienne en situation de nutrition non limitante (Lemaire et Salette, 1984), soit :

$$\%N_{crit} = 4,8 * MS_{aer}^{-0,32}$$

Cruz et Soussana (1997) montrent que l'utilisation de la biomasse totale du mélange conduit à la surestimation de l'indice de nutrition N de la graminée. Rappelons que l'INN rapporte la teneur en azote mesurée dans les plantes à leur teneur « non limitante ». Cruz et al. (2006) proposent, pour diagnostiquer la disponibilité en azote du sol, d'appliquer un facteur correctif selon l'équation :

$$INN_{\text{biomasse aérienne totale}} - INN_{\text{graminée}} = 0,69 * \% \text{ légumineuses dans la biomasse aérienne}$$

Fixation symbiotique : l'estimation de la fixation d'azote atmosphérique est souvent réalisée à partir d'une mesure de la quantité d'N total contenue dans les parties aériennes de la culture et d'une mesure du pourcentage d'N issu de la fixation, ce dernier étant quantifié grâce à des méthodes isotopiques basées sur la différence d'enrichissement naturel en ^{15}N du sol et de l'air ou en utilisant des marquages ^{15}N (Carlsson et Huss-Danell, 2003). Ainsi, à partir de valeurs moyennes d'N accumulé dans les parties aériennes du pois de 280 kg/ha (résultats de Vocanson (2006) pour 4 variétés, 3 dates de semis d'automne et de printemps, 2 lieux et 2 années) ou 220 kg/ha (Naudin et al., 2010), on peut estimer à environ 180-200 kg/ha d'N fixé par cette culture. Les légumineuses prairiales peuvent atteindre des taux de fixation symbiotique très élevés, fréquemment plus de 80 - 85% (Hansen et al., 2002) voire 98% (Vertès et al., 1995). Ces taux de fixation importants assurent leur autonomie de nutrition dans un contexte d'association avec des graminées (mélanges semées) ou d'intégration à des cortèges floristiques très divers (prairies permanentes et prairies naturelles), et assurent également la nutrition de l'ensemble du peuplement dès que le taux de légumineuses dépasse 20-25% de la biomasse présente. Les quantités d'azote fixées atteignent alors 150 kg/ha/an à plus de 250 kg/ha/an, ce qui permet des productions équivalentes à celles de graminées pures recevant ces niveaux de fertilisation azotée.

Mais ces estimations ne tiennent pas compte de l'N contenu dans les parties racinaires, ni des rhizodépôts. La rhizodéposition correspond à l'ensemble des débris racinaires et des exsudats racinaires d'une plante au cours de son cycle. Dans le cas du trèfle blanc dont la biomasse de tiges rampantes (ou stolons) doit être prise en compte dans le calcul de la fixation, la quantité d'N fixée est actuellement calculée selon l'équation suivante : $N_{\text{fixé}} = \text{Biomasse aérienne de trèfle} \times N\% \text{ trèfle} \times \% \text{ fixation} \times 1.3$, avec un taux de fixation standard de 85%. Différentes méthodes de mesure mises en œuvre en conditions contrôlées montrent que l'azote contenu dans les parties souterraines de la plante et dans les rhizodépôts serait de l'ordre de 30% à 40% de l'azote total de la plante entière pour le pois (Mahieu et al., 2007). En faisant l'hypothèse que la part de l'N souterrain provenant de la fixation est similaire aux parties aériennes, la quantité d'N fixé devrait alors être accrue de 30 à 40% pour la plupart des légumineuses, voire doublée comme le propose Unkovich et al. (2010) pour le pois chiche, la luzerne et le trèfle blanc, à partir d'hypothèses sur les flux de C et N dans les racines et la rhizodéposition partiellement issues de modélisation, et qui restent à vérifier en conditions au champ.

Les aléas : Sans facteur limitant important, les légumineuses ajustent généralement leur accumulation d'azote à leur croissance, conduisant à une nutrition azotée optimale. Cependant, en parcelles agricoles, la fixation peut être affectée par (i) la présence d'azote minéral dans le sol (Voisin et al., 2002), ii) des stress hydriques, limitant l'activité des nodosités situées dans les couches superficielles du sol, (iii) des tassements du sol, réduisant le nombre de nodosités dans l'horizon compacté, et donc favorisant les nodosités dans le lit de semences, ce qui les rend plus sensibles à un léger stress hydrique, et favorise un arrêt précoce de la fixation, et (iv) des sitones (*Sitona lineatus* L.) dont les larves rongent les nodosités et les adultes consomment les folioles de la plante (en particulier lorsqu'elles sont difficilement maîtrisables, en agriculture biologique).

Fixation et fertilisation : en situation optimale de nutrition azotée, la fixation d'N atmosphérique s'ajuste à la disponibilité d'N minéral dans le sol, et l'assimilation racinaire peut compléter, voire remplacer la fixation d'azote atmosphérique. Chez le pois, en moyenne, la part de l'N accumulé dans la plante à la récolte qui provient de la fixation avoisine les 75-80% lorsque la quantité d'N minéral dans la couche labourée au semis ne dépasse pas 50 kg/ha. Lorsque le pois est cultivé en association avec une graminée (blé ou orge), cette part d'N fixée augmente de 10% à 20% (Naudin et al., 2010 ; Bedoussac et Justes, 2010). Cet effet est lié à la différence de pénétration des racines dans le sol, plus rapide chez la céréale. Ainsi, cette dernière explore avant le pois les horizons du sol et utilise l'N minéral, au détriment du pois. Finalement, de telles associations optimisent la fixation chez la légumineuse. Ainsi, il n'est pas utile de fertiliser les légumineuses à graines comme le pois ou la fève dont la fixation symbiotique est efficace. Pour d'autres espèces comme le soja il peut être nécessaire d'enrober les graines de bactéries de type *Rhizobium* au semis afin d'avoir une nodulation suffisante et une fixation symbiotique efficace, en particulier dans les sols où les bactéries sont peu nombreuses (sol n'ayant que peu ou pas reçu cette plante durant les dernières années de culture).

Les recommandations de fertilisation dans les prairies mixtes (Comifer, 2011) intègrent de façon simplifiée l'abondance des légumineuses dans le couvert : au dessus de 30% (ce qui correspond à une dominance visuelle de la légumineuse en fin de printemps), l'autonomie azotée de la prairie est assurée et les apports déconseillés. En dessous de ces teneurs (entre 10 et 30%), le calcul de la dose N à apporter est soustrait d'une quantité d'N fixé proportionnelle au taux de légumineuses, tandis que l'apport de la fixation est négligeable, en prairies semées, en dessous de 10% de trèfle. Il faut noter que la proportion de légumineuses dans les prairies, en

particulier semées, varie généralement avec le temps, de façon intra-annuelle sous l'effet des conditions de températures et d'alimentation en eau (avec un développement maximal du trèfle en fin de printemps – été) et entre années sous l'effet de nombreux facteurs : climatiques, liés à la gestion (par exemple déclin de la légumineuse après piétinement des animaux et compaction de sols peu portants), et à la disponibilité en azote du sol, qu'elle soit pilotée par des apports fertilisants ou résulte du recyclage de l'azote fixé.

Stockage de carbone et azote : sans développer ici les liens entre cycles de l'azote et carbone en prairies (Alvarez et al., 1998), des études ou synthèses récentes (De Deyn et al., 2009 ; Unkovich et al., 2010 ; Lüscher et al., 2011) montrent qu'en prairies pérennes, la présence de légumineuses (trèfle ou lotier) augmente le stockage de N et C dans les sols comparé à des peuplements de graminées. Dans une moindre mesure, la rhizodéposition des cultures telles que les pois permet un bilan légèrement positif et le stockage d'azote et de carbone organique dans les sols (Unkovich et al., 2010).

1-2 Gestion et lixiviation d'ions nitrate

Nous illustrerons pour quelques exemples les risques de lixiviation des ions nitrate associés aux légumineuses, en lien avec leur gestion.

Le pois : La quantité d'N minéral restant dans le sol après récolte du pois est un indicateur du risque de lixiviation de nitrate pendant l'hiver suivant la culture. Ces risques sont généralement plus élevés après légumineuse qu'après une céréale si du drainage hivernal se produit. Vocanson (2006) a comparé ces quantités en fonction de la date de semis et du niveau de compaction du sol. Dans trois expérimentations sur 4, la date de semis n'a eu aucun effet sur la valeur d'N minéral post-récolte (Tableau 1), la valeur étant plus élevée dans le cas d'un semis d'octobre pour la 4^{ème}. Dans la majorité des cas (à l'exception d'une situation), le compactage du sol n'a pas eu d'effet sur le reliquat post-récolte.

Tableau 1 : Quantité d'N minéral dans le sol à la récolte du pois (kgN.ha⁻¹) selon l'expérimentation, la structure du sol et la date de semis. Pour chaque expérimentation, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes à P<0.05

Expérimentation	Semis début octobre	Semis mi novembre		Semis fin février-début mars	
	Sol non compacté	Sol non compacté	Sol compacté	Sol non compacté	Sol compacté
Grignon, 2002-2003	30 ^b	33 ^b	44 ^a	28 ^b	29 ^b
Grignon 2003-2004	78 ^a	72 ^a	58 ^b	53 ^b	52 ^b
Mons, 2002-2003	<i>non mesuré</i>	41 ^b	64 ^a	49 ^b	53 ^{ab}
Mons, 2003-2004	86 ^{ab}	70 ^b	100 ^a	63 ^b	76 ^b

Les luzernières : En région Champagne-Ardenne, où se situe une forte production de luzerne pure (environ 70 000 ha), la luzerne est généralement semée en été, après une orge d'hiver, pour être exploitée durant les 2 années suivantes. Dans ce système de culture, la luzerne représente aussi un moyen de sauvegarde contre la pollution des eaux, soit directement pour son rôle épurateur des ions nitrate (Beaudoin et al., 1992), soit de façon indirecte car elle limite les effets polluants des monocultures céréalières (Talamucci, 1994). En effet, comme le pois, la luzerne peut prélever l'azote du sol avant d'utiliser l'azote fourni par sa symbiose avec *Rhizobium meliloti*. La raison physiologique de ce comportement n'est pas élucidée complètement, mais semble principalement lié au coût énergétique qu'induit le fonctionnement de la symbiose pour la plante (Thiébeau et al., 2003). En culture associée de luzerne avec un pois protéagineux, la luzerne montre son aptitude à piéger l'azote que la culture de pois commence à libérer avant sa récolte, et qui, dans un assolement traditionnel, se retrouverait hors de portée des racines de la céréale suivante, avant la période de lessivage hivernal (Muller et al., 1993 ; Thiébeau et Larbre, 2002). L'illustration de ces qualités est donnée par Spallacci et al. (1996) qui parlent de la luzerne comme étant une plante « nitratophage », et son absorption importante de nitrate peut contribuer, avec des limites, à résoudre les problèmes de gestion d'effluents riches en azote de l'industrie agro-alimentaire ou des éleveurs par des épandages raisonnés (Muller et Ledain, 1992 ; Thiébeau et al., 2004b).

La prairie d'association graminée – trèfle blanc : Pour des pratiques de fertilisation raisonnée, de très faibles pertes sont observées sous prairies fauchées grâce à l'aptitude du couvert, permanent, à prélever l'azote disponible dans le sol (jusqu'à plus de 400 kg/ha/an en conditions climatiques favorables). En prairies pâturées, les concentrations locales d'azote minéral sous les pissats dépassent les capacités de prélèvement des plantes, et sont à l'origine des pertes (Vertès et al., 1997 ; Leterme et al., 2003). Le meilleur indicateur de lixiviation de nitrate sous prairies, avec ou sans légumineuses, est le chargement animal (Simon et al., 1997 ; Vertès et al., 2007 ; Eriksen et al., 2010). A l'échelle de la parcelle et de l'année, les figures 2a et 2b intègrent les données de plusieurs dispositifs expérimentaux européens, où était mesuré l'azote lixivié sous des prairies, avec ou sans légumineuses, selon différentes modalités de conduite (fertilisation, chargement) (Vertès et al., 1997 ; Oet al., 2000 ; Wachendorf et al., 2004 ; Eriksen et al., 2004 ; de Vliegheer et al., 2007 ; Ledgard et al., 2009).

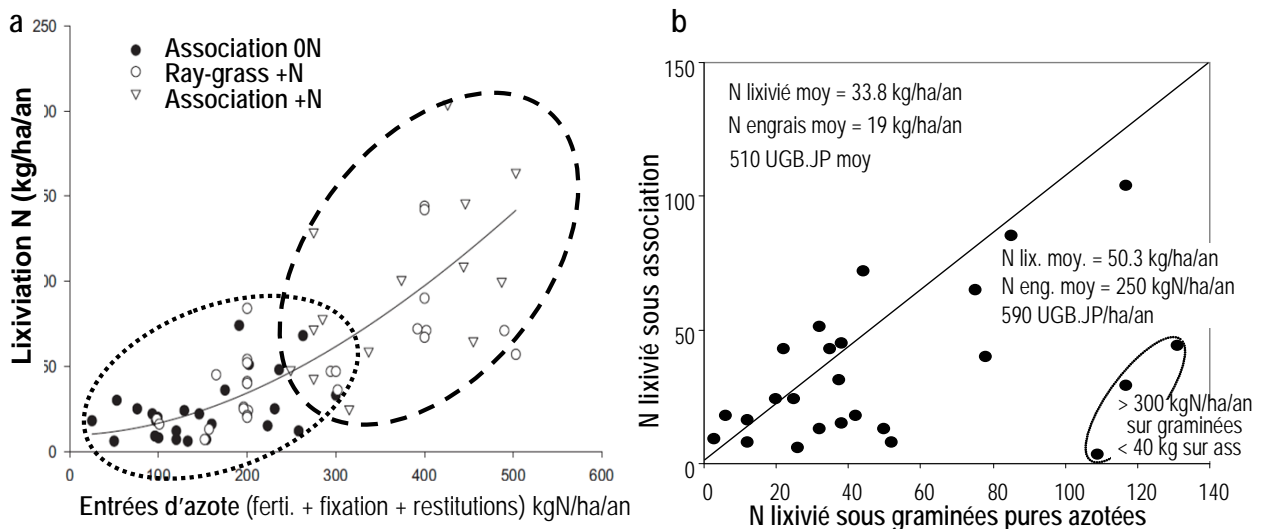


Figure 2 : Lixiviation de nitrate (exprimé en kg N/ha) sous graminées pures et sous association. **2a** : effet des apports totaux d'azote sur l'azote lixivié sous ray-grass pur fertilisés et sous associations ray-grass – trèfle blanc, fertilisées ou non (d'après Eriksen et al., 2010). **2b** : comparaison d'un ensemble d'essais européens (F, UK, NZ, DK) où chaque point représente la moyenne de plusieurs années de mesures expérimentales.

La relation entre quantités totales d'N apportées au sol (incluant les restitutions au pâturage) et la lixiviation de nitrate ne fait pas apparaître d'effet significatif de la présence de légumineuses (Figure 2a, d'après la récente synthèse d'Eriksen et al., 2010). La compilation de plusieurs essais européens (Figure 2b) montre des pertes en nitrate légèrement inférieures sous associations graminées-trèfle, le nombre de jours de pâturage en étant le principal facteur explicatif, avec 510 j/an en moyenne sur association contre 590 j/an en graminées pures fertilisées. Le pouvoir tampon des associations ne permet qu'une faible réduction des pertes (5 à 10 %), expliquée par trois mécanismes principaux de régulation : à court terme avec la diminution de la fixation (Vertès et al., 1995 ; Hutchings et al., 2007 ; Eriksen et al., 2004), et la capacité de la graminée associée, dont l'indice de nutrition est généralement faible (Cruz et al., 2006 ; Loiseau et al., 2001a), à prélever l'azote des pissats (Vertès et al., 1997), à plus long terme avec la diminution de la quantité de trèfle, moins compétitif pour l'accès à la lumière que la graminée en cas de niveau de fertilisation élevé. Schwimming et Parsons (1996) ont mis en évidence le rôle des interactions entre taux de trèfle et disponibilité en azote du sol pour expliquer et modéliser l'évolution cyclique du taux de trèfle souvent observée sur 3-4 ans dans les prairies d'association (Loiseau et al., 2001b).

Sous peuplement prairiaux très dominé par les légumineuses ou sous légumineuses pures, les pertes peuvent être élevées. Des résultats issus de mesures en cases lysimétriques (Loiseau et al., 2001a; Vertès, non publié) indiquent, pour des contextes à lame drainante élevée (plus de 400 mm), des pertes de 60 à 90 kg N/ha sous trèfle blanc pur en simulation de pâturage (apports de pissats). Lorsque la légumineuse pure est fauchée, les pertes seront plus ou moins régulées par la diminution de la fixation, relayée par l'assimilation d'azote minéral du sol (de façon analogue à la luzerne), qui permet à la plante d'immobiliser tout ou partie de l'azote minéral disponible.

1-3 Les cultures annuelles associées pour la régulation des flux et la maîtrise des risques

Lorsque le pois est associé à une culture de céréale, la quantité d'N restant dans le sol après récolte est en moyenne plus faible que celle observée après un pois pur, et proche de la valeur observée après un blé pur non fertilisé (Figure 3). Ce résultat a été observé sur le réseau expérimental mis en place lors du programme ADAR-202, comparant, dans plusieurs lieux en France et pendant plusieurs années. Il peut être relié à la meilleure utilisation de l'N minéral du sol observée dans une association légumineuse-céréale (méteil par exemple) par rapport à une culture de légumineuse pure.

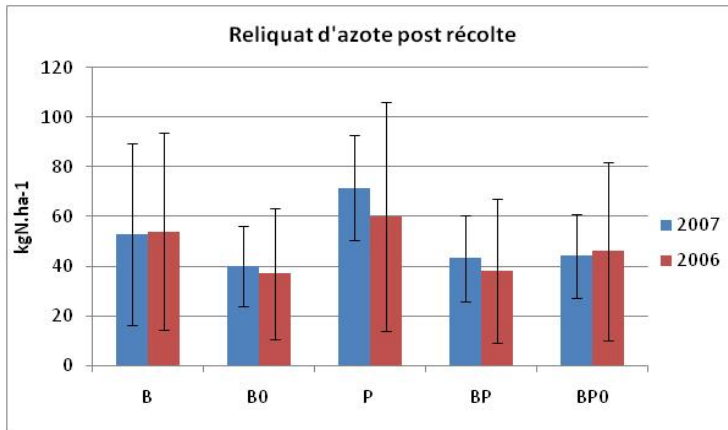


Figure 3 : Reliquats d'azote minéral mesuré sur 90 cm à la récolte : moyenne de l'ensemble des essais « associations » réalisés en 2006 et 2007 (Yvelines, Eure, Vosges, Deux-Sèvres, Vienne). B=blé pur ; B0= blé pur non fertilisé ; P=pois pur ; BP= associations blé-pois fertilisée ; BPO= association blé-pois non fertilisée.

2- Les flux d'azote dans les successions de cultures

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux montrent que la disponibilité en azote après un précédent cultural de légumineuse est supérieure à celle d'autres précédents non légumineuses (par exemple, Jensen et Hauggaard-Nielsen, 2003 ; Crews et Peoples, 2004). Les bénéfices agronomiques et les risques de pertes liés à l'azote seront ici considérés à l'échelle de la rotation, plus pertinente pour quantifier les bénéfices et maîtriser les risques, puis proposer des pistes de conception de systèmes de cultures durables.

2-1 Disponibilité en azote après légumineuse à graines

Nous nous proposons d'illustrer cette disponibilité en azote plus élevée après légumineuse à graines à partir de résultats issus de systèmes de culture du Sud de la France car peu de références existent pour ces conditions pédoclimatiques. Une expérimentation « système de culture » avec des objectifs de rendement modérés compatibles avec des systèmes à « bas niveau d'intrants chimiques » a été conduite de 2004 à 2010 à l'INRA de Toulouse-Auzeville (Justes et al., 2009 ; 2010). Cette expérimentation a comparé 6 systèmes de culture correspondant à 3 rotations croisées à 2 modes de gestion de l'interculture, avec ou sans culture intermédiaire (Tableau 2). La disponibilité en N et les risques de fuite de nitrate dû aux légumineuses à graines, comme le pois, ont été évalués sur 6 années consécutives où la culture de blé dur a été utilisée comme révélatrice de l'azote disponible provenant de la légumineuse à graines précédente.

Tableau 2 : Description des 3 rotations et de 2 modes de gestion de l'interculture de l'essai « système de culture » de l'INRA de Toulouse-Auzeville (2004 - 2010). Chaque culture de la rotation est présente chaque année (répétition climatique). L'essai comporte ainsi 18 parcelles (9 parcelles séparées en deux zones avec et sans culture intermédiaire).

Rotation	Culture 1	Interculture 1	Culture 2	Interculture 2	Culture 3	Interculture 3
LG0 = Sans légumineuse	Sorgho	Sol nu Repousses	Tournesol	Sol nu Vesce	Blé dur	Sol nu Vesce-Avoine
LG1 = Une légumineuse	Tournesol	Sol nu Moutarde	Pois hiver	Sol nu Moutarde	Blé dur	Sol nu Vesce-Avoine
LG 2 = Deux légumineuses	Soja	Sol nu Moutarde	Pois printemps	Sol nu Moutarde	Blé dur	Sol nu Moutarde

La contribution en azote pour un blé dur suivant une culture de pois d'hiver ou de printemps a été comparée à celle du blé dur après un précédent tournesol, ainsi que le niveau du reliquat d'azote minéral (REH = reliquat entrée hiver) après ces trois précédents culturaux, pour évaluer les risques de lixiviation de nitrate. L'efficacité de cultures intermédiaires (CI) pour réduire la concentration en nitrate de l'eau de drainage a été évaluée par des mesures faites avec des bougies poreuses installées à 125 cm dans le sol. Les CI, semées fin août à mi-septembre, sont détruites fin octobre à début novembre, juste avant le semis du blé dur. Les résultats obtenus sur les 6 ans sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Essai « système de culture » de l'INRA de Toulouse-Auzeville (2004 à 2010) : Reliquat N minéral au semis du blé dur (0-120 cm), quantités d'azote absorbé (parties aériennes) par le témoin sans azote (ON) et fertilisé, dose d'engrais calculée a priori par bilan d'azote, rendement et teneur en protéines du blé dur, après 3 précédents culturaux (pois hiver, pois de printemps et tournesol) et de 2 modes de gestion de l'inter-culture. Les valeurs correspondent à la moyenne (écart-type entre parenthèses) des 6 années

Précédent cultural	Reliquat N min au semis Blé (kg N/ha)	N absorbé Blé ON (kg N/ha)	Engrais apporté (kg N/ha)	N absorbé Blé fertilisé (kg N/ha)	Rendement grains 15% (q/ha)	Teneur protéines (%)
Pois hiver	90 (38)	81 (15)	120 (26)	177 (33)	63.2 (10)	13.6 (0.5)
Pois hiver & moutarde	30 (22)	75 (7)	145 (19)	172 (36)	61.8 (7.4)	13.4 (0.9)
Pois printemps	75 (35)	80 (15)	117 (19)	166 (34)	62.0 (8.1)	13.6 (0.6)
Pois printemps & moutarde	29 (17)	60 (13)	139 (18)	161 (53)	56.7 (11.1)	13.8 (0.9)
Tournesol	35 (17)	46 (6)	166 (14)	160 (28)	59.2 (7.9)	13.5 (1)
Tournesol & vesce-avoine	22 (10)	47 (10)	166 (14)	157 (32)	59.1 (9.3)	13.4 (0.7)

Comme attendu, la disponibilité en azote est en moyenne nettement plus élevée après un pois (hiver et printemps) qu'après un tournesol, comme l'indique la quantité d'azote absorbé par le blé dur non fertilisé (témoin ON). Cette différence de disponibilité en azote, en moyenne de l'ordre de 35 kg N/ha (Figure 4), est en grande partie expliquée par un reliquat d'azote minéral « entrée hiver » (mesuré au semis du blé dur), nettement plus élevé après pois. Le reliquat d'N minéral mesuré à la récolte du pois (fin juin – début juillet) est plus élevé d'environ 10 kg N/ha comparé à ceux du blé dur (mi-juillet) ou du tournesol (mi-septembre, résultat non montré). A cela, s'ajoute une minéralisation nette du sol (et sans doute des rhizodépôts) supérieure de l'ordre de 25 kg N/ha par rapport à une culture non légumineuse entre la récolte du pois et le semis du blé dur, qui correspond à une période où la vitesse de minéralisation peut être élevée. Par ailleurs, l'incorporation des résidus de récolte de pois induit une plus faible organisation nette d'azote minéral du sol que celle des résidus de tournesol ou de pailles de céréales, car leur teneur en azote est plus élevée (et leur rapport C/N plus faible).

Le reliquat d'azote minéral mesuré en sortie d'hiver (début mars) sous la culture de blé dur est en conséquence toujours supérieur après pois mais la différence entre précédents s'est réduite : le blé dur a absorbé de l'azote et une partie du N minéral a pu être lixivié (Figure 4). Pour un même objectif de rendement (objectif de 60 q/ha à 13.5% de protéines dans l'essai), la dose d'engrais calculée par bilan et épandue après pois a donc été réduite pour tenir compte de cette différence entre les deux types de précédents (pois et tournesol). Malgré cela, si la teneur en protéines des grains est de même niveau, le rendement du blé dur est quasiment toujours inférieur après le tournesol (en moyenne de l'ordre de 3 q/ha), car l'efficacité de l'engrais après tournesol est plus faible (résultat non montré).

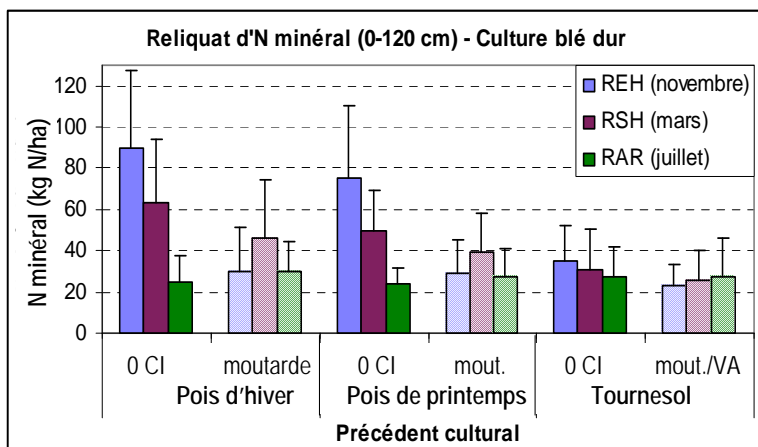


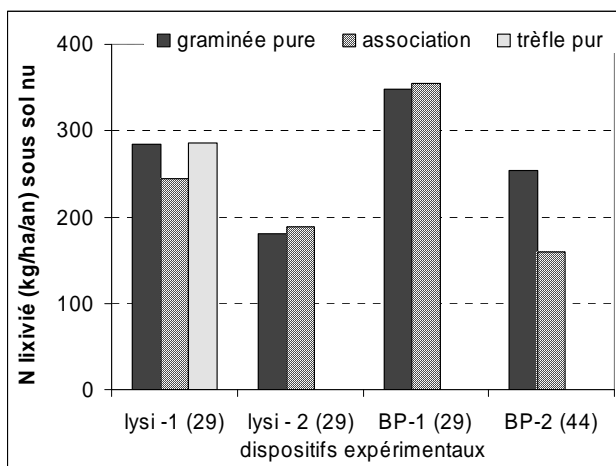
Figure 4 : Reliquat d'azote minéral mesuré sur 120 cm de sol (REH = reliquat entrée hiver ; RSH = reliquat sortie hiver ; RAR = reliquat après récolte) après 3 précédents culturaux et 2 modes de gestion de l'interculture : avec (moutarde ou vesce/avoine) ou sans (0 CI) culture intermédiaire. Résultats de l'essai « systèmes de culture » (INRA Auzeville, 2005-2010).

Toutefois, le reliquat d'azote minéral mesuré à la récolte du blé dur n'est pas différent entre les 3 précédents culturaux, indiquant une très bonne utilisation de l'azote minéral disponible par le blé dur dans l'ensemble du profil de sol de 120 cm. La disponibilité plus élevée d'azote après pois ne semble donc pas se manifester significativement au-delà de la culture du blé dur (résultat non montré).

Le même type de résultats a été observé sur colza après pois : le colza valorise très bien le reliquat d'azote minéral après pois et la biomasse produite à l'automne permet de densifier le couvert (Schneider et al., 2010).

2-2 Rotations prairies – cultures

En situation de prairies temporaires de courte durée, avec ou sans légumineuses, Ledgard et al. (2009) ont mesuré des pertes annuelles d'azote modérées : 45 à 60 kg/ha sous orge/pois, blé et betterave succédant à 2.5 années d'association pâturée. En revanche, la destruction de prairies en place depuis plus longtemps (4-7 ans et plus), entraîne une minéralisation d'azote élevée, qui se rajoutant à la minéralisation basale de l'humus atteint fréquemment 200 à plus de 400 kg d'azote (Vertès et al., 2007), difficilement valorisés par les cultures suivantes (Morvan et al., 2002). La quantité de biomasse détruite lors de la mise en culture d'une prairie d'association est généralement inférieure de 20 % à celle d'une prairie de graminées pures, mais les quantités d'azote restituées



au sol ne sont pas significativement différentes, du fait des teneurs en N plus élevées (Laurent et al., 2004). La minéralisation d'azote est très élevée après les deux types de couverts (Figure 5), mesurée dans plusieurs dispositifs de lysimètres ou bougies poreuses, maintenus en sol nu après la destruction des couverts (Laurent et al., 2004). Les quantités minéralisées ne sont pas significativement différentes entre peuplements.

Figure 5 : Quantités d'azote lixiviées sous sol nu durant l'hiver suivant la destruction de prairies de ray-grass fertilisé, trèfle et association non fertilisés, sous 4 dispositifs expérimentaux équipés de lysimètres (lysi) ou de bougies poreuses (BP), en Finistère et Loire-Atlantique, d'après Laurent et al., 2004).

La différence la plus significative (non illustrée) est l'absence d'arrière-effet de la fauche sur la minéralisation post-destruction pour les couverts graminée – trèfle, qui peut s'expliquer par la plus grande dégradabilité des résidus de trèfle (rapports C/N inférieurs).

Les travaux réalisés sur la luzerne (Muller et al., 1993) montrent qu'au moment de la destruction d'une luzernière, l'azote contenu dans les parties de la plante restées au sol (collets et pivots racinaires notamment) sera libéré progressivement au cours des mois suivants, avec environ 90 kg d'azote minéralisé dus aux résidus de luzerne, sur environ 18 mois (Justes et al., 2001a et b).

2-3 Les cultures intermédiaires pour limiter les risques de lixiviation post légumineuses

La plus forte disponibilité en azote après le pois (hiver ou printemps), qui se manifeste notamment par un reliquat d'azote minéral du sol « entrée hiver » élevé (Figure 4), constitue un risque de lixiviation de nitrate accru les années caractérisées par un drainage hivernal élevé. Durant l'expérimentation menée à l'INRA de Toulouse présentée précédemment (Justes et al., 2010), le drainage a été particulièrement variable entre années, avec des niveaux de drainage, et donc des pertes d'azote nitrique, faibles ou nuls durant les hivers 2005 et 2007. Toutefois pour les autres années, le drainage a induit des pertes par lixiviation significatives –entre 5 et 25 kg N/ha – mais qui restent modérées, comparées à des situations de forts drainages observées plus au nord de l'Europe (Justes et al., 2009). Les mesures de concentration en nitrate dans les bougies poreuses ont clairement montré que lorsque la lixiviation se produit, le « précédent pois » restitue de l'eau de drainage sous la culture de blé dur à une concentration nettement plus élevée qu'après tournesol, presque systématiquement supérieure à 50 mg NO₃/L et parfois très largement (Figure 6).

Cela confirme la nécessité d'implanter une culture intermédiaire piège à nitrate après une légumineuse à graines comme le pois et avant une culture de blé (tendre d'hiver ou dur) pour réduire la lixiviation d'azote nitrique et les concentrations en nitrate de l'eau drainée durant l'hiver suivant.

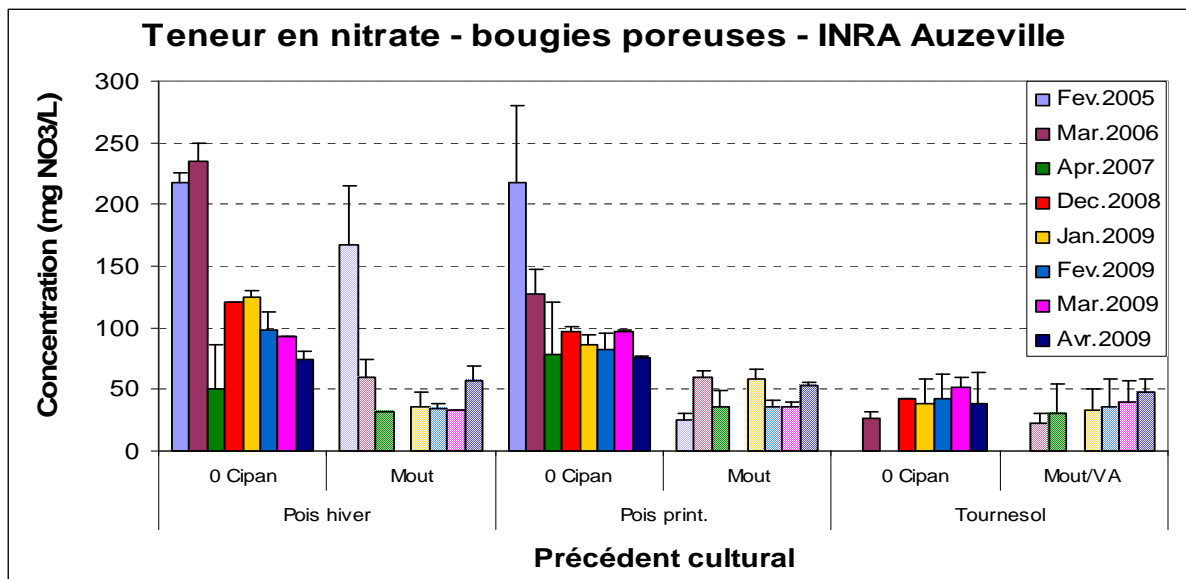


Figure 6 : Teneur en nitrate mesurée dans les bougies poreuses à 125 cm sous la culture du blé dur implantée après 3 précédents culturaux et 2 modes de gestion de l'interculture (sans ou avec Cipro ; mout = moutarde ; VA = vesce-avoine). Résultats 2004 -2009 sur l'essai « système de culture » de l'INRA d'Auzeville.

Le blé dur n'a pas la capacité d'absorber tout l'azote minéral disponible dans le sol à l'automne. Les résultats indiquent que la culture intermédiaire (moutarde) a été particulièrement efficace pour réduire le reliquat d'azote minéral en « entrée hiver » : la moutarde a absorbé en moyenne, en seulement 2 à 3 mois de croissance, 85 et 79 kg N/ha (± 35 et 14 kg N/ha respectivement) après pois d'hiver et de printemps. Cette crucifère a une bonne efficacité pour absorber l'azote minéral du sol en automne sous le climat de la région de Toulouse. En conséquence, la teneur en nitrate de l'eau de drainage a été réduite de 20 à 50% en fonction des années et a été généralement inférieure ou de l'ordre de 50 mg NO₃/L (Figure 6). Cet effet de la culture intermédiaire observé après pois n'a pas été retrouvé après une culture de tournesol, qui a absorbé tout l'azote minéral disponible sur l'ensemble du profil de sol à la récolte en septembre, laissant ainsi un faible reliquat « entrée hiver » dans le sol. La forte capacité d'absorption d'azote de la moutarde (Dorsainvil, 2002 ; Thiébeau et Justes, 2004a) peut également être utilisée pour gérer les effluents d'agro-industries épandus à l'automne, sous réserve de s'assurer de la levée de la culture intermédiaire avant épandage (Muller et Ledain, 1992 ; Dorsainvil et al., 2002).

Par ailleurs, les résultats indiquent que l'implantation d'une culture intermédiaire avant le pois d'hiver ou de printemps a permis de réduire le reliquat d'azote minéral à la récolte du pois en moyenne de 11 kg N/ha (24 ± 9 kg N/ha en moyenne avec culture intermédiaire avant pois, contre 35 kg N/ha ± 21 kg N/ha). Cette différence est due notamment par la réduction du reliquat des horizons profonds de 60 à 120 cm (résultats non montrés). Ceci peut s'expliquer par un enracinement du pois qui se développe moins en profondeur et est moins dense comparé au blé dur ou au tournesol.

Ces résultats démontrent que, pour accroître la valorisation de l'azote issu de la fixation symbiotique et de la minéralisation nette du sol et des résidus de récolte, il convient de raisonner la gestion de l'azote à l'échelle du système de culture pour limiter les pertes de nitrate, ce qui constitue la première étape d'économie d'azote et donc d'énergie en agriculture. Ainsi, l'implantation de cultures intermédiaires après, mais aussi avant, une culture de pois doit faire partie de la stratégie à mettre en œuvre tout autant que de raisonner la succession des cultures de vente.

2-4 Des légumineuses en culture intermédiaire comme « engrais vert »

En systèmes d'Agriculture de Conservation, ayant opté pour un abandon de la charrue au profit de techniques simplifiées de travail du sol (TCS) ou complet dans le cadre du semis direct (SD), les agriculteurs se révèlent

pionniers en terme d'utilisation *a minima* d'engrais de synthèse. En l'absence d'élevage fournissant des effluents riches en azote, ils cherchent à exploiter au mieux la période d'inter-culture pour favoriser l'entrée d'azote dans leurs systèmes de culture, en semant des couverts comprenant une forte proportion de légumineuses telles que le pois (protéagineux et fourrager), la vesce, la féverole, le trèfle (incarnat, de Perse, d'Alexandrie), la lentille, la gesse.

Askegaard et Eriksen (2007) ont comparé les effets, sur l'orge de printemps suivante, de 9 cultures dérobées : cinq légumineuses (trèfles blanc, violet et de Perse, minette, lupin), un ray-grass anglais, une chicorée, un radis fourrager et un mélange seigle-vesce. Sur un sol peu fertile, l'incorporation des cultures dérobées légumineuses a permis une augmentation très significative de la production de céréale (équivalent de 100 et 120 kg N/ha pour les trèfles violet et blanc), valeurs largement supérieures à la quantité d'azote dans la biomasse totale des trèfles. Ces auteurs soulignent l'intérêt des légumineuses comme cultures dérobées source d'azote pour la culture suivante, et la nécessité de mieux quantifier la rhizodéposition et les effets cumulatifs de cultures dérobées.

2-5 Adapter les successions de cultures

Meilleure valorisation des successions Pois – colza – blé : nous avons vu précédemment que le pois contribue de manière significative à la nutrition N de la culture suivante, en laissant un reliquat d'N minéral élevé dans le sol après récolte et grâce à la minéralisation du sol avec des résidus riches en azote qui induisent moins d'organisation nette que ceux des autres espèces, notamment les céréales (Valé, 2006). Ceci permet de réduire de 20 à 60 kg/ha la dose d'N à appliquer sur un blé précédent pois par rapport à un blé précédent paille. Malheureusement, les pratiques des agriculteurs ne reflètent pas toujours les écarts de doses de fertilisation N recommandées selon le précédent par les outils de préconisation, comme cela a pu être observé en Picardie (Schneider et al., 2010).

Le principal impact environnemental négatif du pois est lié au risque de lixiviation pendant l'hiver suivant (cf précédemment). Pour pallier ce problème, et pour éviter d'implanter une CIPAN, une succession pois-colza a été expérimentée pendant plusieurs années dans différents lieux en France, dans le cadre du programme CASDAR 7-175. Dans l'ensemble des situations, non seulement la dose d'azote optimale apportée sur le colza suivant le pois a été réduite (en moyenne de 40 kg/ha) par rapport à un colza de blé, avec un rendement du colza très légèrement augmenté (en moyenne de 1 q/ha). Cette succession apparaît donc comme une solution supplémentaire pour gérer les fuites d'N après pois, et permet d'accroître la valorisation de l'azote laissé par le pois dans le sol.

Introduction de la luzerne dans une succession blé/betterave : elle permet de réduire la lixiviation de nitrate, avec une diminution à la fois des quantités d'eau drainées et de leur concentration annuelle moyenne en azote nitrique (Figure 7), comme l'ont montré Muller et al. (1993) en cases lysimétriques.

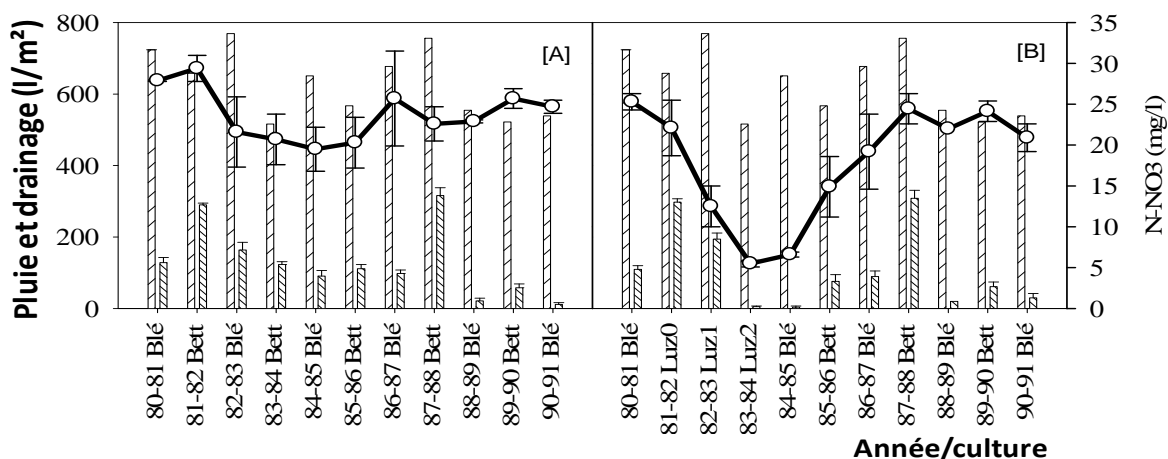


Figure 7 : Impact de l'introduction d'une culture de luzerne [B] dans un assolement Blé-Betterave [A] sur la concentration en nitrate de l'eau drainée sous les différentes cultures des cases lysimétriques de Chalons durant 11 ans (d'après Müller et al., 1993).

Cette teneur passe de 25,5 mg N-NO₃/L (soit 113 mg NO₃/L) en première année à 5,8 mg N-NO₃/L (soit 26 mg NO₃/L) après introduction de la luzerne dans la rotation. Compte tenu du délai de migration des ions nitrates en

sols de craie (50 cm/an au-delà du premier mètre de sol) et de la consommation en eau de la luzerne qui réduit les quantités d'eau drainées, l'effet direct de la luzerne s'observe surtout en troisième et quatrième années. C'est seulement 4 ans après le retournement de la luzerne que le niveau des pertes annuelles redevient comparable à celui des lysimètres en rotation blé-betterave. La présence de luzerne dans la succession culturale se traduit donc par une diminution de la pression en azote sur la parcelle pendant sa période de présence et les trois années qui suivent, à la fois en tant que couverture végétale pluriannuelle et grâce à sa capacité de prélèvement de l'azote minéral du sol. Sur dix ans, la concentration moyenne de l'eau drainée est de 20,8 (± 0.2) mg de N-NO₃/L (soit 92 mg NO₃/L) dans la succession incluant trois années de luzerne semée au printemps, tandis qu'elle est de 27,2 (± 2.6) mg de N-NO₃/L (soit 120 mg NO₃/L) dans la rotation blé-betterave (Muller et al., 1993).

Mise au point d'implantation de luzerne sous couvert de pois protéagineux : Le pois protéagineux est une culture qui laisse un reliquat d'azote minéral à la récolte parfois élevé et qui est sensible aux fortes pluies (orages d'été), plaquant le couvert végétal au sol peu avant sa récolte mécanique rendue plus difficile. Associer la luzerne à un semis de pois présenterait 3 intérêts : i) absorber l'azote minéral du sol et réduire les risques de lixiviation, ii) éviter, grâce au port dressé de la luzerne, que le pois ne soit plaqué au sol en cas de fortes pluies, limitant les pertes de grains au champ, et iii) réaliser un seul travail du sol pour implanter deux cultures principales, la luzerne étant exploitée pendant les deux années suivantes en culture pure.

La mise au point de cette technique d'association a été réalisée au cours de quatre campagnes d'expérimentation, conduites de 1990 à 1993 en Champagne-Ardenne (Thiébeau et Larbre, 2002). Le pois et la luzerne sont semés le même jour, le pois en premier parce qu'il nécessite une profondeur de semis (4 cm) plus importante que la luzerne (2 cm). La meilleure combinaison de densité de semis, minimisant l'incidence de la concurrence entre espèces, est le semis du pois (type « afila ») à 130 grains/m² associé à 20 kg/ha de luzerne : par rapport à un pois en culture pure, les rendements du pois de l'association sont en diminution de 5 à 10%, soit 3 à 5 quintaux/ha pour ces essais. Au moment de la moisson, la luzerne dépasse les pois et un aspect vert domine. Il n'est donc pas rare que l'agriculteur appréhende cette étape, mais ses craintes se dissipent dès les premiers mètres parcourus avec la moissonneuse. Souvent, la moisson est facilitée par la présence d'un ravageur des cultures, le sitone, dont l'action se montre temporairement auxiliaire de l'agriculteur. Néanmoins le contrôle de cette population sera réalisé dès la moisson pour protéger les repousses de luzerne.

Les pailles de l'association peuvent être valorisées par un atelier d'élevage sur l'exploitation, avec des valeurs fourragères intéressantes : 0,72-0,75 UFL /kg MS, 87-123 g PDIN /kg MS et 87-105 g PDIE g/kg MS, supérieures de 7 à 15% à celles des pois purs, et comparables à un foin de prairie naturelle de plaine de qualité moyenne. La repousse de la luzerne fournira, selon les conditions climatiques, un appoint fourrager de 1,5 à 2 t MS/ha entre mi-septembre et mi-octobre, puis sera exploitée comme une luzerne adulte dès l'année suivant son implantation. Cette technique permet également de réduire la quantité d'azote minéral dans les sols (Tableau 4).

Tableau 4 : Stocks d'azote minéral (kgN/ha) cumulés sur les horizons 0-60 cm et 0-100 cm sous les cultures pures de pois et de luzerne, et sous l'association pois+luzerne, mesuré après la dernière exploitation de la luzerne l'année de semis.

	0-60 cm	0-100 cm
Pois pur	64,3	91,2
Pois + Luzerne	22,6	48,6
Luzerne pure	19,8	30,2

Réduction d'intrants azotés pour le blé : Toujours dans le domaine de l'agriculture de conservation, des techniques sont actuellement testées pour rechercher l'itinéraire le mieux adapté à une réduction d'intrants azotés et des pertes. A l'image de ce qui a été réalisé sur associations de graminées fourragères-légumineuses, montrant que l'on pouvait diviser par deux la fertilisation azotée de l'association par rapport à une même culture de graminée seule (Guy, 1989 ; Lavoine et Pérès, 1993), le semis d'une légumineuse sous couvert de blé est utilisé afin de réduire les apports d'azote sur la céréale. Le blé d'hiver est mis en place de manière conventionnelle à l'automne, et la luzerne est semée dans le blé en fin d'hiver, au moment du premier apport d'azote sur blé. Elle va s'installer et végéter sous le couvert de céréale jusqu'à la moisson (grain et paille), suffisamment bien implantée pour se développer alors et absorber l'azote issu de la minéralisation estivale et automnale. Comme pour la technique du semis sous couvert de pois, la luzerne fournit un appoint fourrager d'environ 2 t MS/ha, selon les conditions climatiques, entre la mi-septembre et la mi-octobre, sans pénaliser

semble-t-il le rendement en blé si la pluviométrie printanière est suffisante. Dans ce système, la luzerne est détruite en sortie d'hiver/ début du printemps afin de mettre en place la culture de printemps, mais elle peut être conservée plus longtemps. Son rôle est donc bien d'introduire de l'azote dans le système de culture, tout en limitant les pertes de nitrate par lixiviation. Cette technique est testée depuis plusieurs années dans un réseau d'agriculteurs en Agriculture Biologique adoptant les techniques culturales simplifiées (TCS) dans la région lyonnaise (en relation avec l'ISARA, J.F. Vian). Des techniques de semis sous divers types de couvert végétal permanent, ont également été mises en œuvre par Carof et al. (2007) et Celette et al., (2010), et donnent des résultats comparables. Des travaux en cours s'attachent à la bonne maîtrise des relations de compétition - synergie entre les différents couverts et cultures.

3- Bénéfices liés à l'azote en exploitation agricole

Deux approches de caractérisation et quantification des bénéfices liés à l'azote peuvent être utilisées à l'échelle de l'exploitation agricole : les expérimentations systèmes et des approches globales de type 'Analyse du Cycle de Vie' (ACV) évaluant l'impact lié à l'eutrophisation.

3-1 Expérimentations systèmes

Nous centrons cette partie sur les systèmes de production laitiers, qui impliquent de façons très diverses des légumineuses prairiales (et parfois à graines), et qui ont fait l'objet d'assez nombreux travaux (Laws et al., 2001 ; Alard et al., 2002 ; Peeters et al., 2005 ; Bossuet et al., 2006 ; Andrews et al., 2007 ; Ledgard et al., 2009 ; Eriksen et al., 2010). Si les comparaisons à l'échelle parcellaire n'ont pas fait apparaître de bénéfice déterminant, en termes de lixiviation, des prairies graminées – légumineuses comparées à des prairies de graminées fertilisées gérées de façon équivalente (à l'exception de la luzerne, généralement fauchée), leur intérêt dans les systèmes de production a été étudié depuis leur renouveau il y a plus de 20 ans. Les divers auteurs cités ont comparé les flux d'azote dans des expérimentations systèmes comprenant des proportions faibles ou élevées de légumineuses. A titre d'exemple, le Tableau 5 indique les principales entrées et sorties d'azote en Nouvelle-Zélande et en Europe.

	Nouvelle Zélande ON	Nouvelle Zélande 410N	Fermes Europe *
Entrées d'azote			
Fixation	170 (90 à 220)	50 (25 à 135)	10 à 140
Engrais + effluents aliments	0	410	0 à 280
	0	41	6 à 490
Sorties d'azote			
Produits animaux + végétaux	78 (68 à 83)	114 (90 à 135)	20 à 130
Pertes par lixiviation	30 (12 à 74)	130 (110 à 150)	15 à 65
Pertes par volatilisation	15 (15 à 17)	68 (47 à 78)	20 à 80
Autres pertes (dénitrification..)	3 à 7	13 à 34	10 à 40
Excédent de bilan	92	387	10 à 460
Efficacité d'utilisation du N	0.46	0.23	0.22 0.36

Tableau 5 : Bilans apparents d'azote à l'exploitation et principales pertes dans des expérimentations systèmes en Nouvelle Zélande (Ledgard et al., 2009) et Europe* (d'après Vertès et al., 2002 ; Simon et al., 2000 ; Bossuet et al., 2006). L'efficacité d'utilisation de l'azote est le calcul : N produits agricoles/ N entrées)

La réduction des excédents de bilans due au remplacement de graminées très fertilisées par des associations graminées-trèfle blanc non ou peu fertilisées (en azote) s'accompagne d'une réduction de la production (comme on l'avait noté dans la simulation de Billen et al., 2009 présentée en introduction), mais aussi d'une forte réduction des pertes vers l'eau ou sous forme gazeuse, et d'une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote. Selon les conditions de marché (des intrants et des produits) et les caractéristiques des élevages, les performances économiques des exploitations plus autonomes avec des légumineuses pourront être supérieures ou inférieures à celles des exploitations plus consommatrices d'engrais azotés (Journet et al., 2002 ; Chatellier et al., 2009). Des suivis de réseaux d'exploitations et des programmes de recherches en cours (PSDR Laitop, ANR Acassya, CASDAR Systèmes laitiers innovants) permettront de mieux préciser les combinaisons de choix

technico-économiques les plus performants sur le plan des pertes en nitrates, et plus globalement sur les 3 piliers de la durabilité.

3-2 Approche globale de l'impact d'eutrophisation (ACV)

Le dernier chapitre de cet article extrait l'impact d'eutrophisation, d'une méthode d'évaluation environnementale multicritère qui est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Méthodologie : L'ACV est une approche qui quantifie des impacts environnementaux des systèmes agricoles en plusieurs catégories d'impacts potentiels (ex., eutrophisation, acidification ; Haas et al., 2000), qui peuvent avoir lieu sur une exploitation (dits « directs ») et/ou être dus à la production et au transport des intrants dans la ferme (dits « indirects ») depuis l'extraction des matières premières. Pour évaluer l'influence des cultures de légumineuses dans un assolement sur l'impact eutrophisation, nous avons réalisé des ACV exploratoires sur des fermes conventionnelles (i.e., non-biologiques) types : 2 fermes de grandes cultures et 3 fermes d'élevage laitier. Rappelons que l'impact « eutrophisation » exprime les pertes de phosphore (qui est l'unité de référence) et d'azote, sous forme de fuites de nitrate et de dépôts d'ammoniac. En élevage laitier, les émissions d'ammoniac contribuent pour moitié aux impacts eutrophisation et acidification.

Les assolements des 2 types de fermes de grande culture ont été établis à partir des données statistiques du CDER de Champagne avec les cultures suivantes : blé, escourgeon, orge, maïs graine, pois, féverole, colza, tournesol, betterave, et luzerne (Tableau 6).

Taux légum.	Total SAU	blé	escourgeon	orge	maïs graine	pois	féveroles	colza	tournesol	betteraves	luzerne
Bas	157,6	53,4	9,0	34,3	3,6	1,0	0,2	24,3	1,4	23,1	7,3
Haut	169,2	50,5	8,5	29,5	0,9	7,4	0,4	19,5	0,9	25,3	26,2

Tableau 6. Surface par culture (ha) dans les fermes types de grande culture d'après les données du CDER de Champagne.

Un type a été construit avec 6 % de surface en cultures légumineuses (« bas »), l'autre avec 20 % (« haut »). Les caractéristiques des fermes d'élevage types ont été établis à partir des données d'un échantillon des exploitations laitières des réseaux ETRE et BIO en Bretagne évaluées avec l'outil EDEN (van der Werf et al., 2009). 7 à 10 fermes de ces réseaux ont été utilisées pour établir 3 types, représentant les principaux systèmes fourragers locaux : maïs herbe avec 35% maïs dans la surface fourragère principale (SFP) et herbagers (moins de 10% de maïs dans la SFP) avec peu ou beaucoup de trèfle blanc dans les prairies (Tableau 7). L'assolement des fermes « herbe légumineuses (+) » a été utilisé pour les fermes « herbe légumineuses (-) » pour réduire les différences dans les résultats dues à l'assolement, et la production des prairies a été fixée au niveau moyen de 5,8 t MS/ha/an dans tous les types. Le nombre d'animaux est commun aux trois types : 54 vaches laitières et 30 génisses, mais les niveaux de production individuelle varient largement de 7756 l lait/VL/an pour le type maïs-herbe à 5838 l lait/VL/an pour les 2 types herbagers, valeurs moyennes de 6 à 10 fermes de chaque type identifié dans l'échantillon. Par contre, les caractéristiques du cheptel (rations ; bâtiments ; épandage d'effluents ; achats d'engrais minéraux, concentrés, céréales, et fourrages ; ventes de céréales et fourrages ; phytosanitaires utilisées ; consommation d'énergie et plastiques) ont été tirées de une ou deux fermes de chaque type dans l'échantillon et éventuellement ajustées par rapport à l'assolement.

Type	Total SAU	blé	SFP		% lég. dans prairies	Lait vendu par an
			herbe	maïs		
maïs herbe	54,4	7,9	27,6	18,9	3	384570 l
herbe lég -	61,6	5,9	51,7	4,0	10	262950 l
herbe lég +	61,6	5,9	51,7	4,0	30	262950 l

Tableau 7. Surface par culture (ha), pourcentage de matière sèche des légumineuses dans l'herbe, et quantité de lait vendu des fermes types d'élevage laitier

L'impact eutrophisation (en kg équivalent PO₄) est exprimé par ha de SAU pour les fermes de grande culture et par ha de surface globale pour les fermes laitières, qui représentent la SAU de la ferme plus l'estimation de la surface nécessaire pour produire les intrants. Le calcul des émissions et impacts potentiels pour les fermes de grande culture a été fait avec le logiciel SimaPro 7.2.4 (PRé Consultants, 2008), qui contient une base de

données (INRA, UMR SAS de Rennes) sur les itinéraires techniques, les gestions, les rendements, et les émissions de chacune des cultures en France. Cette base de données fait appel à d'autres bases de données, telle que « ecoinvent 2.0 » (Frischknecht et al., 2007), pour estimer les émissions dues à d'autres activités telles que la fabrication d'engrais, la construction de bâtiments, et le transport. Le calcul des émissions et impacts potentiels pour les fermes d'élevage a été fait avec l'outil EDEN-E.

Résultats et Discussion

Pour les fermes de grande culture, les résultats préliminaires de l'analyse indiquent une légère diminution (-7 %) de l'impact d'eutrophisation par ha d'exploitation pour la ferme avec plus de surface en légumineuses (Tableau 8). Ce résultat est en accord avec des résultats de Nemecek et al. (2008), qui ont évalué des rotations avec légumineuses avec l'ACV. Les impacts par ha de culture dans l'assolement sont aussi dans la même gamme que les résultats de Nemecek et al. (2008)). Pour l'impact d'eutrophisation des cultures, les postes liés aux émissions au champ sont de loin les plus importants.

Tableau 8. Impacts potentiels d'eutrophisation (kg équivalent PO₄ /ha SAU) de chaque type de ferme de grande culture, avec contribution par culture (lignes 1-2) puis par poste (aux émissions de NO₃ et PO₄, principalement) par ha de culture.

Impact eutrophisation	Ferme entière	Blé	escourgeon	orge	maïs grain	Pois	féverole	colza	tournesol	betterave	luzerne
BAS	29,4	7,9	1,0	3,6	1,7	0,2	0	8,4	0,2	5,8	0,6
HAUT	27,2	6,9	0,9	2,8	0,4	1,6	0,1	6,2	0,1	5,9	2,1
Postes											
au champ		20,8	15,8	15,3	66,7	32,4	33,4	48,7	21,7	33,0	7,6
engrais N		0,8	0,6	0,4	0,6			0,4	0,3	0,7	
engrais P					4,1	2,0	1,3	3,6	1,5	5,0	5,4
engrais K					0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,2
Diesel		0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,9	0,3	0,4	0,2
Machines		0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,1
Pesticides		0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Semences		0,6	0,5	0,0		1,7	1,1	0,0	0,1	0,0	0,1
Total		23,3	17,8	16,3	72,4	36,9	36,6	54,2	24,1	39,8	13,6

Pour les fermes d'élevage laitier, les fermes des types herbe légumineuses « (-) » et « (+) » ont eu des impacts d'eutrophisation par ha global supérieur de 7% et inférieur de 18%, respectivement, à celle de la ferme type « maïs herbe » (Tableau 9).

Tableau 9. Impacts potentiels d'eutrophisation (kg équivalent PO₄) 1) par 1 ha de SAU (surfaces directe et indirecte) pour les 3 fermes types d'élevage laitier, avec contribution par poste. et 2) par tonne de lait produit

Type	Ferme	Intrants utilisés					Excrétion animaux				
		machines	agents énergétiques	Engrais	aliments et fourrages achetés	Pesticides+ plastiques	bâtiment + stockage	épandage	pâturage	résidus de récolte	autres
maïs herbe /ha	30,8	0,05	0,69	0,95	6,19	0,01	3,34	1,33	2,58	0,00	15,68
herbe lég.- /ha	32,9	0,04	0,86	1,14	1,14	0,00	2,79	1,10	3,12	0,00	22,73
herbe lég. + /ha	25,4	0,04	0,90	0,48	0,01	0,00	2,91	1,15	3,25	0,00	16,68
maïs herbe / t lait	4,0	0,01	0,09	0,12	0,81	0,00	0,44	0,17	0,34	0,00	2,05
herbe lég.- / t lait	6,1	0,01	0,16	0,21	0,21	0,00	0,52	0,21	0,58	0,00	4,24
herbe lég. + / t lait	4,5	0,01	0,16	0,09	0,00	0,00	0,52	0,21	0,58	0,00	2,98

La réduction de l'impact eutrophisation pour la ferme herbe lég+ est liée aux émissions moindres de NO₃ au champ (comprises dans « autres ») et à la réduction des achats d'aliments. Si les données sont exprimées par rapport au lait produit, la hiérarchie s'inverse avec la ferme maïs-herbe légèrement inférieure à la ferme herbe lég+, tandis que le système herbe lég- apparaît le moins performant sur cet impact. Rappelons que ces calculs ne fournissent pas une indication directe des pertes par lixiviation, même si les flux de N contribuent à plus de 85% de l'impact dans ces systèmes de production types. Les conclusions seraient par ailleurs modifiées si l'on tenait compte du stockage de carbone et azote dans les prairies. Les résultats récents du programme Casdar « systèmes laitiers innovants » (non publié) ont comparé les valeurs obtenues en tenant compte ou pas de ce stockage de matière organique, et trouvé une réduction de l'impact eutrophisation dans les fermes en systèmes herbagers de près de 30% en moyenne, contre moins de 10% pour les systèmes maïs-herbe.

Ces résultats des ACV exploratoires montrent les bonnes performances des fermes herbagères autonomes en azote (type herbe -lég +), et la forte relation entre impacts d'eutrophisation et émissions au champ des cultures, soit sur la ferme elle-même, soit pour produire les intrants tels que les aliments et fourrages. Ces analyses montrent aussi l'influence des caractéristiques choisies pour des fermes types sur les estimations d'impact et l'importance des hypothèses de calcul et des unités de référence.

Conclusions

La liste des questions à instruire, concernant les bénéfices agronomiques et environnementaux des légumineuses en lien avec l'azote, est vaste, et l'état des connaissances présenté ici est forcément incomplet. Des résultats connus depuis longtemps sont confirmés par des travaux de recherche récents qui permettent de mieux quantifier l'intérêt de légumineuses, pures ou en association pour réduire la dépendance des systèmes de culture vis-à-vis des intrants chimiques azotés, en réduisant simultanément les pertes de nitrates (par exemple Crews and People, 2005). La conception et mise au point de systèmes de cultures innovants s'appuient à la fois sur des enquêtes en réseaux d'exploitations, des dispositifs expérimentaux et de la modélisation, et des préconisations de gestion sont également disponibles pour minimiser les risques de lixiviation de nitrate, dans différentes successions culturales, concernant en particulier l'usage de cultures intermédiaires ou l'adaptation de successions de cultures.

Les propriétés émergentes liées au changement d'échelle ont été illustrées à moyen terme sur des successions culturales diverses, et pour les systèmes d'élevage laitier à l'échelle de l'exploitation, montrant l'intérêt des légumineuses sur l'impact potentiel d'eutrophisation de systèmes de production recherchant la durabilité au travers de l'autonomie protéique. Le renouveau des légumineuses se confirme prometteur sur ce plan.

La seule prise en compte de l'azote entraîne une évaluation très partielle des bénéfices (ou inconvénients) consécutifs à l'augmentation des cultures de légumineuses. D'autres impacts environnementaux liés aux liens entre cycles du carbone et de l'azote, et à la compétition entre les plantes et la gestion des équilibres entre espèces en cultures associées sont également à prendre en compte. Les économies d'azote et l'adoption de systèmes de production plus autonomes en azote ont également des incidences économiques. La nouvelle intégration des légumineuses en grandes cultures et en élevage doit s'accompagner d'évaluations multicritères à l'échelle des systèmes de production et de travaux pour optimiser les successions de culture et leurs itinéraires techniques.

Références bibliographiques

Alard V., Béranger C., Journet M. (eds), 2002. A la recherche d'une agriculture durable : étude de systèmes herbagers économes en Bretagne. INRA Editions, Collection Espaces ruraux, 337 p.

Alvarez G., Chaussod R., Loiseau P., Delpy R., 1998. Soil indicators of C and N transformations under pure and mixed grass-clover swards. *European Journal of Agronomy* 9, 157-172

Andrews, M., Scholefield, D., Abberton, M. T., et al., 2007. Use of white clover as an alternative to nitrogen fertiliser for dairy pastures in nitrate vulnerable zones in the UK: productivity, environmental impact and economic considerations. *Annals of Applied Biology* 151, 11-23

Askegaard M., Eriksen J., 2007. Growth of legume and nonlegume catch crops and residual-N effects in spring barley on coarse sand. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170, 773-780

- Beaudoin N., Denys D., Muller J.C., Monbrun M.D., Ledain C., 1992. Influence d'une culture de luzerne sur le lessivage de nitrate dans les sols de Champagne-Crayeuse. *Fourrages* 129, 45-57.
- Bedoussac L., Justes E., 2010. The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. *Plant and Soil* 330, 19-35.
- Billen G., Thieu V., Garnier J., Silvestre M., 2009. Modelling the N cascade in regional watersheds: the case study of the Seine, Somme and Scheldt rivers. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 234-246
- Bossuet I., Chambaut H., Le Gall A., Raison C., 2006. Etude de la répartition de l'excédent d'azote dans les fermes expérimentales laitières de l'Arc Atlantique. *Systèmes laitiers et environnement dans l'espace atlantique. Projet Green Dairy*, Rapport de synthèse, pp 69-95
- Carlsson G., Huss-Danell K., 2003. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant and Soil* 253, 353-372
- Carof M., de Tourdonnet S., Saulas P., Le Floch D., Roger-Estrade J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 347-356
- Cavallès E., 2009. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéines : quels bénéfices environnementaux ? www.Développement-durable.gouv.fr, 42 p.
- Celette F., Goulevant G., Amosse C., David C., 2010. Associating wheat crop and undersown forage legumes in organic agriculture: Incidence of forage legumes species. *Agro2010, XI ESA Congress*, Montpellier, 29 august-3 September 2010
- Chatellier V., Guesdon J.C., Guyomard H., Perrot C., 2009. L'application française du bilan de santé de la PAC : un transfert limité pour l'élevage, mais une réévaluation pour l'herbe. 16^{ème} Rencontres Recherche Ruminants, Paris, 8-9 décembre, 8 p.
- COMIFER 2011. Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales - Cultures annuelles et prairies. sous presse
- Crews T.E., Peoples M.B., 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 102, 279-297
- Crews T.E., Peoples M.B., 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72, 101-120
- Cruz P., Soussana J.F., 1997. Diagnosis of the nitrogen status in crops. In: G. Lemaire (Ed.), *Mixed crops*, Springer-Verlag, pp 130-144
- Cruz P., Jouany C., Theau J-P., Petibon P., Lecloux E., Duru M., 2006. L'utilisation de l'indice de nutrition azotée en prairies naturelles avec présence de légumineuses. *Fourrages* 187, 369-376
- Deyn, G. B. de; Quirk, H.; Yi Zou; Oakley, S.; Ostle, N. J.; Bardgett, R. D., 2009. Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility. *Journal of Ecology (Oxford)* 97, 864-875
- Dorsainvil F., 2002. Evaluation, par modélisation, de l'impact environnemental des modes de conduite des cultures intermédiaires sur les bilans d'eau et d'azote dans les systèmes de culture. Thèse de doctorat, INA-PG, 124 p. +annexes.
- Dorsainvil F., Thiébeau P., Justes E., 2002. Are catch crops an efficient way to prevent nitrate leaching and favour nitrogen availability for the next main crop in the case of organic product application in summer. *Proceedings of VII ESA Congress*, 15-18 July 2002. Spain (SP), 489-490.
- Eriksen J., Ledgard S., Luo J., Schils R., Rasmussen J., 2010. Environmental impacts of grazed pastures. *Grassland Science in Europe* 15, 880-890
- Eriksen J., Vinther F.P., Soegaard K., 2004. Nitrate leaching and N₂-fixation in grasslands of different composition, age and management. *Journal of Agricultural Science* 142, 141-151
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., 2007. Overview and Methodology. Final report ecoinvent data v2.0, No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

- Guy P., 1989. Essais multilocaux d'associations trèfle violet – graminée. *Fourrages* 117, 29-47.
- Haas G., Wetterich F., Geier U., 2000. Life cycle assessment framework in agriculture on the farm level. *International Journal of Life Cycle Assessment* 5, 345-348.
- Hansen E. M., Høgh-Jensen H., Djurhuus J., 2002 Biological nitrogen fixation in a grazed perennial grass/clover ley and correlation with herbage and soil variables. *European Journal of Agronomy* 16, 309-320
- Hutchings N., Olesen J.E., Petersen B.M., Berntsen J., 2007. Modelling spatial heterogeneity in grazed grassland and its effects on nitrogen cycling and greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 153–163
- Jensen E.S. & Hauggaard-Nielsen H. (2003). How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil* 252, 177–186.
- Journet M., Alard V., 2002. Le compromis économique, environnemental et social. In : V. Alard, C. Béranger et M. Journet (Eds.), *A la recherche d'une agriculture durable. Etude de systèmes herbagers économes en Bretagne*, INRA Editions, Paris, pp 209-216
- Justes E., Thiébeau P., Cattin G., Larbre D., Nicolardot B., 2001a. Libération d'azote après retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles* 264, 22-26.
- Justes E., Thiébeau P., Nicolardot B., 2001b. N release from lucerne residues: comparison of field and incubation data. *Proceedings of the 11th Nitrogen Workshop*, 9-12 September 2001, Reims, France, INRA, 111-112.
- Justes E, Hauggaard-Nielsen H., Bedoussac L., Corre-Hellou G., Jeuffroy M-H., Nolot J-M., Jensen E-S, 2009. Designing and evaluating prototypes of arable cropping systems with legumes sole cropping or intercropping aimed at improving N use efficiency in low inputs farming systems. *Proceeding FST Monterey* 2009.
- Justes E., Nolot J-M., Raffailac D., Hauggaard-Nielsen H. and Jensen ES., 2010. Designing and evaluating prototypes of arable cropping systems with legumes aimed at improving N use efficiency in low input farming. In *Proceedings of AGRO2010, Congress of the European Society for Agronomy (ESA)*, 29 August-3 September 2010, Montpellier, France.
- Laurent F., Kerveillant P. Besnard A., Vertès F., Mary B., Recous S., 2004. Effet de la destruction de prairies pâturées sur la minéralisation de l'azote : approche au champ et propositions de quantification. Synthèse de 7 dispositifs expérimentaux. *Rapport Arvalis - INRA - Chambres d'agriculture de Bretagne*, 76 p
- Lavoine M., Pérès M., 1993. Intérêt des associations fourragères graminée-luzerne pour économiser la fumure azotée. *Fourrages* 134, 205-210.
- Laws J. A., Pain B. F., Jarvis S. C., Scholefield D., 2000. Comparison of grassland management systems for beef cattle using self-contained farmlets: effects of contrasting nitrogen inputs and management strategies on nitrogen budgets, and herbage and animal production. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 80, 243-254
- Ledgard, S.; Schils, R.; Eriksen, J.; Luo, J. 2009. Environmental impacts of grazed clover/grass pastures. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 48, 209-226
- Lemaire G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4, 423-440.
- Leterme P., Barré C., Vertès F., 2003. The fate of 15N from dairy cow urine under pasture receiving different rates of N fertiliser. *Agronomie* 23, 609-616
- Loiseau P, Soussana J-F., Louault F., Delpy R., 2001b. Soil N contributes to the oscillations of the white clover content in mixed swards of perennial ryegrass under conditions that simulate grazing over five years. *Grass and Forage Science* 56, 205-217
- Loiseau P., Carrère P., Lafarge M., Delpy R., Dublanche J., 2001a. Effect of soil-N and urine-N on nitrate leaching under pure grass, pure clover and mixed grass/clover swards. *European Journal of Agronomy* 14, 113–121

- Louarn G., Corre-Hellou G., Fustec J., Lô-Pelzer E., Julier B., Litrico I., Hinsinger P., Lecomte C., 2010. Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses. *Innovations Agronomiques* 11, 79-99
- Lüscher A., Soussana J-F., Huguenin-Elie O., 2011. Role and impacts of legumes in grasslands for high productivity and N gain from symbiotic N₂ fixation. In : Lemaire G., Hodgson J et Chabbi A., (Eds.) *Grassland productivity and ecosystem services*", CAB, à paraître
- Mahieu S., Fustec J., Faure M.L., Corre-Hellou G., Crozat Y., 2007. Comparison of two N-15 labelling methods for assessing nitrogen rhizodeposition of pea. *Plant and Soil* 295, 193-205
- Muller J.C., Ledain C., 1992. Epandage des eaux résiduaires des industries alimentaires et agricoles et valorisation agronomique en Champagne-Ardenne : évolution des idées et solutions techniques. *IAA*, juillet-août, 531-536
- Muller J.C., Denis D., Thiébeau P., 1993. Présence de légumineuses dans la succession de cultures : Luzerne et pois cultivés purs ou en association, influence sur la dynamique de l'azote. In : Decroux J. et Ignazi J.C (Eds.), *Matières organiques et Agricultures. Congrès GEMAS-COMIFER*, Blois, pp 83-92
- Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Research* 119, 2-11. doi:10.1016/j.fcr.2010.06.002
- Nemecek T, von Richthofen J.S., Dubois G., Casta P, Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28, 380-393.
- Ney B., Doré T., Sagan M., 1997. The nitrogen requirement of major agricultural crops : Grain Legumes. In : G. Lemaire (Ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer-Verlag, Heigelberg, pp. 107-118.
- Peeters A.; Parente G., Le Gall A., 2006. Temperate legumes: key-species for sustainable temperate mixtures. *Grassland Science in Europe* 13, 205-220
- PRé Consultants, 2008. Introduction to LCA with SimaPro 7. <http://www.pre.nl/download/manuals/SimaPro7IntroductionToLCA.pdf>
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., De Chezelles E., Jeuffroy M.H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. OCL, sous presse
- Schwinning, S., Parsons A.J, 1996. Analysis of the coexistence mechanisms for grasses and legumes in grazing systems. *Journal of Ecology (Oxford)* 84, 799-813
- Simon J.C., Jacquet A., Le Corre L., Pages J., 2000. Typologie des bilans d'azote de divers types d'exploitation agricole: recherche d'indicateurs de fonctionnement. *Agronomie* 20, 175-195
- Simon J.C., Vertès F., Decau M.L., Le Corre L., 1997. Les flux d'azote au pâturage. I- Bilans à l'exploitation et lessivage d'azote sous prairies. *Fourrages* 151, 249-262.
- Spallacci P., Ceotto E., Papini R., Marchetti R., 1996. Lucerne as a nitrate scavenger for silty clay soil manured with pig slurry. *Proceedings of 4th ESA Congress*, 492-493.
- Talamucci P., 1994. Lucerne role in farming systems, technical itineraries and managements for different uses in diverse physical and socio-economic environments. Management and breeding of perennial lucerne for diversified purposes. Coll. EUCARPIA/FAO, Lusignan, France, 4-8 sept. 6-17.
- Thiébeau P., Larbre D., 2002. Luzerne sous couvert de pois protéagineux : un seul travail du sol pour implanter deux cultures principales. *Cultivar* 524, 28-30.
- Thiébeau P., Parnaudeau V., Guy P. 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? *Courrier de l'Environnement de l'INRA* 49, 29-46. (<http://www.inra.fr/dpenv/thieb49.htm>)
- Thiébeau P., Justes E., 2004a. Effect of N status on leaf area index and radiation use efficiency of white mustard (*Sinapis alba* L.). *Proceedings of VIII ESA Congress*, 11-15 July 2004. Copenhagen (DK), 461-462
- Thiébeau P., Larbre D., Usunier J., Cattin G., Parnaudeau V., Justes E., 2004b. Effect of regular pig slurry spreading on the forage production of lucerne (*Medicago sativa* L.) and on soil N dynamics. *Proceedings of VIII ESA Congress*, 11-15 July 2004. Copenhagen (DK), 463-464.

- Thiébeau P., Lô-Pelzer E., Klumpp K., Corson M., Hénault C., Bloor J., de Chezelles E., Soussana J.F., Lett J.M., Jeuffroy M.H., 2010. Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole. *Innovations Agronomiques* 11, 45-58
- Unkovich M.J., Baldock J., Peoples M.B., 2010. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant and Soil* 329, 75-89
- 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.
- van der Werf H.M.G., Kanyarushoki C., Corson M.S., 2009. An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 3643-3652.
- Vertès F., Soussana J.F., Louault F. 1995. Utilisation de marquages ¹⁵N pour la quantification de flux d'azote en prairies pâturées. In : Utilisation des isotopes stables pour l'étude du fonctionnement des plantes, Ed. INRA, Paris, Les Colloques 70, 265-275
- Vertès F., Simon J.C., Le Corre L., Decau M.L., 1997. Les flux d'azote au pâturage. II- Etude des flux et de leurs effets sur le lessivage. *Fourrages* 151, 263-280
- Vertès F., Journet M., Alard V., Etesse A., 2002. Les systèmes de production. Le pâturage et les pertes d'azote. In : V. Alard, C. Béranger et M. Journet (Eds.), A la recherche d'une agriculture durable. Etude de systèmes Herbagers économes en Bretagne, INRA Editions, Paris, pp 115-144
- Vertès F., Simon J.C., Laurent F., Besnard A., 2007a. Prairies et qualité de l'eau Evaluation des risques de lixiviation d'azote et optimisation des pratiques. *Fourrages* 192, 423-440.
- Vertès F., Hatch D., Velthof G., Taube F., Laurent F., Loiseau P., Recous S., 2007b. Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland Science in Europe* 12, 227-246
- Vliegheer A. de, Carlier L., 2007. The effect of the age of grassland on yield, botanical composition and nitrate content in the soil under grazing conditions. *Grassland Science in Europe* 12, 51-54.
- Vocanson A., Munier-Jolain N., Ney B., 2005, Courbe de dilution. In : Munier-Jolain N., Biarnès V., Chaillet I., Lecœur J., Jeuffroy M.H. (Eds), *Agrophysiologie du Pois*, coll. : Mieux Comprendre, 81-86
- Vocanson A., 2006. Evaluation ex ante d'innovations variétales en pois d'hiver (*Pisum sativum* L.) : approche par modélisation au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole. Thèse de Doctorat, INAPG, Paris, 250p. +annexes.
- Voisin A.S., Salon C., Munier-Jolain N., Ney B., 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic fixation of pea. *Plant and Soil* 243, 31-42.
- Wachendorf M., Buchter M., Trott H., Taube F., 2004. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. II. Impact of defoliation system and nitrogen input on nitrate leaching losses. *Grass and Forage Science* 59, 56-68.