

Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations

Françoise Vertès¹, Marie-Hélène Jeuffroy², Gaëtan Louarn³,
Anne-Sophie Voisin⁴, Eric Justes⁵

1 : INRA, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Agrocampus Ouest, F-35000 Rennes ;
Francoise.Vertes@rennes.inra.fr

2 : INRA, Agronomie UMR211, AgroParisTech, F-78850 Thiverval Grignon

3 : INRA, UR4 URP3F, BP6, F-86600 Lusignan

4 : INRA, UMR 1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon

5 : INRA, UMR1248, AGIR, Univ Toulouse, INPT ENSAT, F-31326 Castanet Tolosan, France

Résumé

Les légumineuses permettent i) de produire des matières premières riches en protéines et en énergie, essentiellement pour des débouchés en alimentation animale ou humaine, ii) en utilisant la fixation symbiotique comme une voie d'entrée de l'azote dans les systèmes de production agricole, en alternative à l'emploi d'engrais industriels, et iii) de diversifier les espèces végétales cultivées. Cet article présente les principales rotations impliquant des légumineuses et des éléments de connaissances sur leurs rôles, direct et indirect, dans les flux d'azote des cultures et prairies (fixation, transferts, arrière-effets), tant au niveau agronomique que pour l'évaluation environnementale. L'intégration des effets directs et indirects des légumineuses à l'échelle de l'exploitation et des rotations incite à renforcer les recherches sur leur potentiel d'utilisation pour des systèmes de production en accord avec les principes d'agro-écologie largement promus à l'heure actuelle pour une agriculture productive et durable

Remerciements : Les auteurs de cet article ont largement utilisé la synthèse *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, issue d'un collectif d'experts coordonné par Anne Schneider (UNIP-CETIOM) et Christian Huyghe (INRA), et remercient vivement ces derniers pour l'autorisation de valoriser des éléments avant la parution de l'ouvrage aux éditions Quae (sous presse).

Introduction

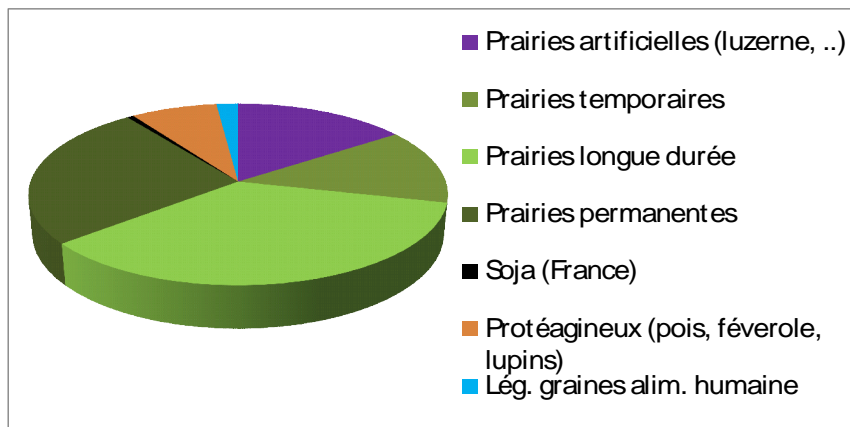
Les légumineuses permettent i) de produire des matières premières riches en protéines et en énergie, essentiellement pour des débouchés en alimentation animale ou humaine, ii) en utilisant la fixation symbiotique comme une voie d'entrée de l'azote dans les systèmes de production agricole, en alternative à l'emploi d'engrais industriels, et iii) de diversifier les espèces végétales cultivées (SCHNEIDER *et al.*, 2015). Ces trois caractéristiques confèrent aux systèmes incluant des légumineuses une amélioration des performances agronomiques et environnementales. En apportant azote symbiotique et diversité fonctionnelle, les légumineuses peuvent contribuer à deux enjeux de taille pour la France et l'Europe : améliorer la durabilité de l'agriculture et l'autonomie protéique des systèmes alimentaires. Elles constituent l'un des importants leviers d'action mobilisables dans le cadre d'une démarche agroécologique de développement de l'agriculture. Malgré ces intérêts (JENSEN *et al.*, 2003), les légumineuses ont largement régressé en France, depuis 20 ans pour les légumineuses à graines et depuis 50 ans pour les fourragères (SCHNEIDER *et al.*, 2015).

Pour l'EU-27, la fixation symbiotique des cultures agricoles fait entrer environ 1 million de tonnes (Mt) d'azote par an dans le cycle de l'azote réactif¹, en plus des 0,3 Mt dus à la fixation symbiotique

¹ On entend par azote réactif (Nr) tous les composés azotés biologiquement, photochimiquement ou radiativement actifs dans l'atmosphère et la biosphère terrestre et aquatique. Nr inclut donc les formes de l'azote réduites (par ex. ammoniac [NH₃] et ammonium [NH₄⁺]) ou oxydées (par ex. oxyde d'azote [NO_x], acide nitrique [HNO₃], protoxyde d'azote [N₂O], et nitrate [NO₃⁻]) et les formes organiques (par ex. urée, amines, protéines et acides nucléiques).

des milieux naturels (*via* les légumineuses sauvages, les bactéries libres des sols ou les cyanobactéries dans les océans), à côté des 11 Mt d'azote apportés par les engrais industriels azotés (*European Nitrogen Assessment, SUTTON et al., 2011*). En France, les légumineuses font entrer 0,52 millions de tonnes d'azote annuellement par la fixation (DUC *et al., 2010*), pour l'essentiel *via* les légumineuses fourragères des prairies (principalement trèfle blanc, trèfle violet et luzerne, Figure 1). Le soja importé correspond à une fixation symbiotique de 0,26 Mt, tandis que les engrais chimiques azotés représentent 2,1 Mt. Les quantités d'azote fixé représentent seulement 5 % de la production totale de protéines en France (estimations de l'ASCO Allenvi CVT, 2014).

Figure 1 : Part estimée des principaux types de couverts avec légumineuses en culture pure (prairies artificielles, protéagineux) ou associée (prairies temporaires et permanentes) dans la fixation symbiotique par la SAU française (d'après SCHNEIDER et HUYGHE, 2015).



L'objectif principal de cet article est de caractériser l'intérêt des légumineuses pour la fertilité des sols, en particulier la fourniture d'azote aux rotations qui les incluent. L'essentiel des légumineuses en France étant destiné à l'alimentation animale, les différents types de légumineuses concernées par les systèmes fourragers et l'alimentation animale sont considérés ici, pour répondre à deux questions : Quelle est la place des légumineuses dans les successions culturales qui composent les systèmes fourragers ? Quels sont leurs effets directs et leurs arrière-effets sur la nutrition azotée des cultures suivantes et la fertilité des sols ?

1. Rotations avec des légumineuses et bilans d'azote dans les systèmes fourragers

On distingue 3 grands types de légumineuses, correspondant à trois grands types de fonctions :

- les légumineuses à graines (pois, féverole, lupin, soja, lentille, pois chiche, haricot) : exploitées en priorité pour leurs graines riches en protéines, en culture monospécifique (cas le plus répandu) ou en association avec des non-légumineuses (méteils) ;
- les légumineuses fourragères prairiales : exploitées par fauche ou/et pâturage, pour la production de biomasse riche en matière azotée ; majoritairement pérennes, elles peuvent s'intégrer dans des rotations de cultures de rente, avec un temps de culture s'étalant sur 2 à 5 ans soit en culture monospécifique dans les prairies dites « artificielles » (comme la luzerne, le trèfle violet ou le sainfoin), soit semées en association avec des non-légumineuses (graminées le plus souvent) dans les prairies dites « temporaires » bi- ou multispécifiques ou des prairies de plus de 6 ans dites « permanentes » ;
- les légumineuses non récoltées (pois, vesce, lentille, féverole, lupins, trèfles, gesses) : exploitées uniquement pour des services écosystémiques de soutien et de régulation, en cultures intermédiaires (présentes entre deux cultures de rente) souvent en mélange avec des non-légumineuses, ou en couverts associés à une culture de rente pendant au moins une partie de son cycle.

1.1. Assolement et rotations avec légumineuses, répartition en France

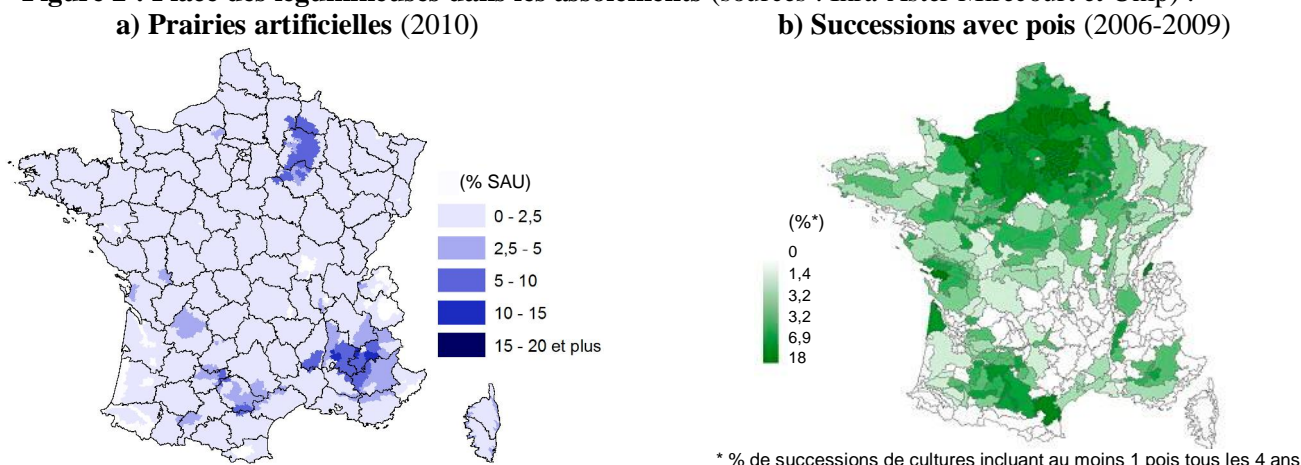
Les successions dans lesquelles les légumineuses sont insérées sont variées et ont évolué au cours des trente dernières années. Durant les années 1980, les légumineuses fourragères (luzerne, prairies à base de légumineuses) faisaient partie de successions longues intégrant 2 ou 3 années de prairies dans une rotation de 5 à 10 ans, comprenant des espèces variées : blé, orge, colza, betterave, maïs. Les légumineuses à graines, et en particulier le pois, majoritaire, se retrouvaient dans des successions de cultures de 5, voire 6 ans. Le premier blé après pois, initialement suivi d'une céréale secondaire, a été progressivement remplacé par un deuxième blé. Durant la décennie 1990,

les successions à base de pois se déroulaient principalement sur 4 ou 5 ans, avec la betterave ou le colza en tête de rotation. Depuis les années 2000, les successions dominantes sont des rotations sur 4 ans, fréquemment de type « betterave ou colza – blé – légumineuse – blé ». Depuis 1992, les surfaces en pois sont en régression et le colza est devenu la principale tête de rotation (sauf en périphérie de régions d'élevage). La féverole fait son apparition, remplaçant le pois dans les mêmes successions (colza – blé – féverole – blé). Une étude plus précise sur trois régions françaises entre 2006 et 2011 (enquêtes Pratiques culturelles, Ministère de l'agriculture) indique que les légumineuses annuelles se retrouvent dans des successions de 5 - 6 ans en alternance avec une autre tête de rotation devant deux céréales à paille, la tête de rotation étant principalement le colza en Bourgogne, le tournesol en Midi-Pyrénées, le maïs ou le colza en Pays de la Loire. On observe également la présence de la légumineuse dans des successions de 3-4 ans, placée devant au moins deux céréales à paille.

Actuellement, la majorité des légumineuses annuelles et pluri-annuelles, en culture mono-spécifique, font partie des systèmes de grandes cultures à base de céréales, principalement en conventionnel, alors que les légumineuses fourragères et prairiales de plus de 2 ans sont largement associées à des systèmes de production incluant un atelier d'élevage, avec prédominance de ruminants. Dans tous les cas, les légumineuses à graines représentent moins de 2 % de la surface agricole utile en France. Entre 1983 et 2013, les zones de production des protéagineux se sont déplacées en France, depuis le « grand Nord-Ouest », zone traditionnelle de culture, vers la « zone intermédiaire », zone de polyculture-élevage allant de la Lorraine au Poitou-Charente en passant par le sud du Bassin parisien et qui représente aujourd'hui près de 50 % de la sole cultivée.

Après avoir vu ses surfaces divisées par 10 au cours du XX^e siècle, la luzerne connaît un regain d'intérêt depuis 2000, avec un développement lent en culture pure ou en mélange, essentiellement pour des fourrages conservés, dans les zones de polyculture-élevage de l'ouest, du centre et de l'est de la France (outre la Champagne où elle reste cultivée en zone céréalière pour une valorisation en bouchons de luzerne déshydratée ou bottes haute densité, Figure 2a). Le trèfle a connu un regain d'intérêt dans les prairies temporaires de l'Ouest dès les années 70-80 (POCHON, 1981) et environ 75 % des prairies temporaires sont maintenant semées en association graminées - légumineuses (JULIER *et al.*, 2014).

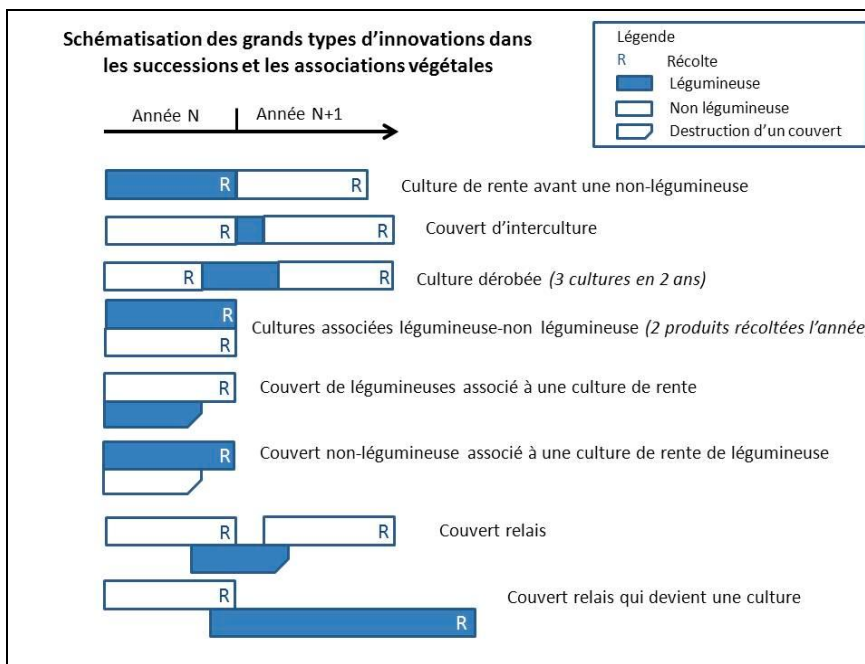
Figure 2 : Place des légumineuses dans les assolements (sources : Inra-Aster Mirecourt et Unip) :



On trouve actuellement une plus forte proportion de légumineuses, par rapport aux cultures majoritaires non légumineuses de l'exploitation, dans les systèmes performants à bas niveau d'intrants (PETIT *et al.*, 2012) et en agriculture biologique (FONTAINE *et al.*, 2012). Dans ces deux types de systèmes reposant sur des principes agroécologiques, en comparaison aux systèmes conventionnels, davantage dépendants de l'usage d'intrants de synthèse (engrais azotés et pesticides), ces espèces jouent un rôle pivot. La fonction « plante de service » est par ailleurs présente dans les successions de production avec portes-graines (*cf.* RAVENEL *et al.*, 2015, cet ouvrage).

On rencontre une grande diversité de modes d'insertion des légumineuses dans les systèmes de culture aujourd'hui (Figure 3), en relation directe avec leur rôle important dans l'orientation agroécologique des systèmes de culture (et avec le respect des réglementations directive Nitrates). Cette variété de modes de culture est favorisée par la grande diversité des espèces disponibles, caractérisées par différents traits permettant cette adaptation.

Figure 3 : Schématisation des différents modes d'insertion des légumineuses dans les successions et les associations végétales (d'après SCHNEIDER *et al.*, 2015).



1.2. Bilans d'azote sous quelques légumineuses types

La réalisation de bilans azotés du sol, à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation (on parle alors de « balance globale azotée » ou BGA) permet de calculer un solde d'azote égal à la différence entre des apports au sol et des sorties du sol. Il y a plusieurs façons de calculer des bilans (OENEMA *et al.*, 2003) selon que l'on considère le sol comme une « boîte noire » ou comme un système incluant des flux internes comme le turn-over minéralisation-immobilisation (RECOUS *et al.*, 2015, cet ouvrage). Comme nous cherchons à préciser si les légumineuses enrichissent ou appauvrissent le sol en azote, les bilans présentés ici intègrent dans les apports :

- l'azote apporté par les engrais minéraux ;
- celui des épandages de produits organiques (effluents animaux ou autres, déjections au pâturage) connu de façon souvent moins précise ;
- la fixation symbiotique, calculée à partir de la biomasse de légumineuse et d'un taux de fixation de référence (VOISIN et GASTAL, 2015 ; ANGLADE *et al.*, 2015) ;
- les restitutions d'azote de la légumineuse au sol par les résidus de culture (JEUFFROY *et al.*, 2015) et par rhizodéposition (FUSTEC *et al.*, 2010) ;
- l'azote apporté par les dépôts atmosphériques (cartes EMEP Corinair).

et dans les exportations : l'azote prélevé par les plantes soit la biomasse totale élaborée x la teneur en azote. Une partie est exportée (les graines, la biomasse fourragère fauchée) et une partie restituée au sol.

Le calcul du bilan est complété par la connaissance des quantités présentes de nitrate et ammonium (NO₃ et NH₄) aux moments où l'on ouvre puis ferme le calcul de bilan, l'azote minéral du sol contrôlant en partie la fixation symbiotique. Le solde du bilan correspond à l'ensemble des pertes d'azote par voie gazeuse (ammoniac, protoxyde d'azote) et dans l'eau (lixiviation de nitrate), modulé par un éventuel stockage ou déstockage d'azote dans les matières organiques du sol (MOS).

Le calcul est appliqué à trois cas types de légumineuses : le pois et la luzerne en cultures pures (Tableau 1) et les prairies ray-grass - trèfle blanc pâturées (Tableau 2), impliquées dans quelques rotations importantes identifiées précédemment :

- en exploitation de grandes cultures avec ou sans élevage associé (ou voisin) : rotations de 4 ans de type colza - blé - orge - pois (fermes granivores ou grandes cultures) et rotations de 7-8 ans (fermes de polyculture-élevage dans le Calvados) de type luzerne 3 ans - céréales-CIPAN 2 ans - mélange céréale-protéagineux - céréale ;

- en exploitation d'élevage herbivore, en particulier bovin laitier : rotations de 7-8 ans avec des prairies temporaires (4-6 ans) de graminées-trèfle blanc - maïs - blé et rotations prairies mixtes de fauche 2-4 ans puis 3-4 ans de grandes cultures (maïs, céréales, colza).

Tableau 1 : Calculs de bilans d'azote sol (kg N/ha) sur des parcelles non fertilisées, à fourniture N du sol élevée ou faible. Le N restitué au sol comprend pour le pois les pailles + cosses + racines et rhizodéposition et pour la luzerne les racines et rhizodéposition. Les productions du pois (moyenne de 7 années de mesures, MAHIEU, 2007) et de la luzerne sont respectivement de 55 q/ha (3,8 % N) et 13 t MS/ha (3,8 % N), d'après VOISIN *et al.* (2015).

Culture	N sol	N total plantes	N fixé (%fixation)	N prélevé	N exporté grain* ou fourrage	Enrichissement du sol <i>via</i> fixation (= N fixé - N exporté)	N restitué sol = solde du bilan
Pois	Fort	333 (70 % aér.)	195 (60 %)	130	173	195-173 = 22	152
Pois	Faible	333 (70 % aér.)	280 (86 %)	45	173	280-173 = 107	152
Luzerne	Fort	455 (82 % aér.)	437 (88 %)	18	375	62	80
Luzerne	faible	455 (82 % aér.)	400 (96 %)	55	375	25	80

*semences déduites

Comme la nutrition azotée des légumineuses bascule de la fixation à l'assimilation en fonction de l'azote minéral disponible dans le sol, ce phénomène de régulation de l'entrée d'N réactif dans le système aboutit globalement à une meilleure utilisation de l'azote du sol qu'avec les cultures fertilisées. Lorsque la fixation est active, elle correspond à une entrée d'azote réactif permettant un enrichissement net apparent du sol qui peut atteindre une centaine de kg N par ha (avant-dernière colonne du tableau). Dans tous les cas, les restitutions au sol, pendant la vie de la légumineuse ou consécutives à sa destruction, dépendent de la croissance des plantes et de leur gestion : pour une même biomasse produite, l'azote restitué au sol est considéré ici comme équivalent (dernière colonne du tableau). Néanmoins, on sait que la voie de nutrition azotée affecte le rapport biomasse aérienne / biomasse racinaire ainsi que la rhizodéposition, mais l'état des connaissances est insuffisant pour fournir des références opérationnelles quantifiant ces effets (FUSTEC *et al.*, 2010 par exemple).

Dans le cas de prairies temporaires de ray-grass pur fertilisé (250N) ou associé au trèfle blanc (0N), les flux et bilans d'azote du sol sont quantifiés en comparant des zones qui ont reçu, ou pas, des déjections animales (350 kg N sous forme de pissats) au printemps (Tableau 2, d'après VERTES *et al.*, 1997).

Tableau 2 : Bilans d'azote en prairies recevant ou pas des pissats de bovins (Iysimètres, INRA Quimper).

Prairie \ quantité N (kg/ha/an)	N engrais	N pissat	N exporté	N fixé aérien	Solde du bilan sol
RGA pur	250	350	380		+220
RGA pur	250	0	235		+15
RGA-TB	0	350	432	52	-30
RGA-TB	0	0	282	112	-170

Contrairement aux données sur les légumineuses pures, où la voie de nutrition n'affectait pas la biomasse produite, les données mesurées sous prairies avec ou sans légumineuses montrent un effet azote majeur à la fois sur la biomasse aérienne produite et sur les quantités d'azote fixé (Tableau 2). Les soldes de bilans apparaissent négatifs pour les associations car le trèfle associé, représentant 40 % (sans déjection) et à peine 20 % de la biomasse après apport d'un pissat au printemps, ne peut fixer tout l'azote nécessaire à la nutrition du couvert mixte. Le taux de fixation annuel du trèfle passe de 90 % (sans déjection) à 57 % (avec déjection), l'azote fixé représentant respectivement 40 vs 12 % de l'azote total exporté.

Dans tous les cas, la fixation symbiotique est régulée par les légumineuses, valorisant l'acquisition d'azote minéral moins coûteuse en énergie pour la plante : en présence de quantités importantes d'azote dans le sol, quelle qu'en soit l'origine (reliques Nminéral sol, apport d'engrais, apport Ndéjections), celui-ci est utilisé et limite les entrées nouvelles d'N par fixation symbiotique. A l'inverse,

lorsque peu d'azote minéral est disponible, les légumineuses assurent leur nutrition en azote par la fixation symbiotique, ce qui permet quasiment la même production de biomasse et de protéines qu'en situation d'azote du sol non limitant (VOISIN *et al.*, 2015). L'entrée d'azote réactif au sol *via* la fixation est alors plus importante que lorsqu'il y avait déjà du N sol disponible.

La partie suivante de cet article s'attache à préciser les facteurs de variabilité de certains postes clés utilisés pour calculer ces soldes, et les conséquences pratiques pour l'intégration et la gestion des légumineuses dans les rotations fourragères.

2. Quelques éléments sur les effets directs et arrière-effets Azote des légumineuses dans quelques rotations fourragères

2.1. La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

Rappelons que la fixation symbiotique est le processus biologique qui permet de convertir l'azote de l'air (N₂) en azote minéral (NH₃) assimilable par les organismes vivants pour constituer les molécules organiques (notamment les protéines). Cette symbiose s'effectue chez les légumineuses grâce à des bactéries du sol (*Rhizobium*) intégrées au sein d'excroissances spécifiques des racines, les nodosités. Ce processus biologique permet d'assurer tout ou partie des besoins en azote des légumineuses, selon les espèces et selon les conditions de milieu. Le Tableau 3 récapitule les taux de fixation moyens de quelques légumineuses ainsi que des valeurs indicatives de quantité d'azote fixé par ha et par an (d'après ANGLADE *et al.* (2015) et VOISIN *et al.* (2015)). Remarquons que, selon les auteurs, les coefficients de passage du N aérien au N total fixé varient parfois de près de 40 % (postes considérés, incertitudes sur les mesures des biomasses aériennes, racinaires, sur la rhizosphère, méthodes de quantification), mais qu'ils s'accordent sur des coefficients supérieurs en plantes pérennes fourragères vs légumineuses annuelles à graines et aussi sur un coefficient plus élevé pour le trèfle blanc dû à ses tiges en partie souterraines (stolons).

Tableau 3 : Taux de fixation moyens des principales légumineuses cultivées à destination animale en France, et coefficients de passage du N fixé aérien au N fixé total pour les légumineuses prairiales et à graines (d'après ANGLADE *et al.*, 2015 ; PEOPLES *et al.*, 2009 ; VOISIN *et al.*, 2015).

Espèce	Taux de fixation moyen (%)	N fixé (kg N/tonne biomasse aérienne)	Coefficient de passage du N aérien au N total fixé
Luzerne	70-80	20	1,4 à 1,7 (trèfle blanc)
Trèfle violet	80-90	26	
Trèfle blanc (association)	80-95	31	
Féverole, lupin	70-80	20	1,2 à 1,3
Soja	65-70	18	
Pois	60-65	18	
Haricot	40	15	

La quantification de l'azote souterrain fixé par les légumineuses est encore difficile à réaliser, car biomasse souterraine et émissions d'exsudats racinaires sont difficiles à quantifier (FUSTEC *et al.*, 2010). Le coefficient de passage du N fixé aérien au N fixé total varie selon les espèces, les sols et les conditions de croissance, dont la disponibilité en N minéral du sol. Les valeurs ci-dessus, qui proviennent de synthèses récentes, donnent des ordres de grandeur plus que des valeurs de référence absolues. En résultante, ceci correspond à des quantités d'azote entré dans le système sol - plante par fixation symbiotique de quelques dizaines (50-130 kg N/ha pour les légumineuses à graines) à plusieurs centaines de kg par ha (150-200 kg N/ha pour du trèfle blanc en association bien pourvue en trèfle, 300 à 500 pour des luzernières ou peuplements de trèfle violet très productifs, par ex. RASMUSSEN *et al.*, 2012).

Au-delà de la production de la légumineuse elle-même, l'entrée d'azote par fixation alimente directement les éventuelles plantes associées. Les transferts directs *via* la rhizosphère peuvent être quasi nuls (méteils) ou atteindre quelques dizaines de kg fournis aux graminées (LOUARN *et al.*,

2015). Le transfert d'azote de la légumineuse aux plantes associées peut aussi se faire au travers de la minéralisation rapide des tissus aériens ou racinaires riches en N de la légumineuse (FUSTEC *et al.*, 2010) ou du recyclage *via* les déjections animales (processus important en prairies pâturées). Les connaissances sont encore trop limitées pour une quantification opérationnelle au champ.

Quelques rappels sur les facteurs de régulation de la fixation :

- L'azote minéral dans le sol : comme évoqué dans la première partie, le taux de fixation ($N_{fixé}/N_{total}$ plante) est relié négativement à l'azote minéral du sol, de façon linéaire pour les légumineuses annuelles à graines et les fourragères en monoculture, et de façon plus variable pour les associations, en particulier pâturées (VOISIN *et al.*, 2015). Ce taux peut diminuer très rapidement, en quelques jours, par exemple pour le trèfle blanc recevant un pissat au pâturage (ou chez le pois recevant de l'azote minéral, NAUDIN *et al.*, 2011) et revenir à une valeur élevée en quelques semaines lorsque le sol s'est appauvri, la graminée associée et/ou la légumineuse ayant prélevé l'N minéral disponible. La fixation symbiotique est ainsi un processus réversible mais coûteux en énergie pour les légumineuses, contribuant en partie à leur moindre productivité (GOSSE *et al.*, 1986 ; VOISIN *et al.*, 2002) par rapport aux céréales.

- Les facteurs pédoclimatiques : en plus des nitrates, la température et l'état hydrique du sol influent sur l'état et le fonctionnement des nodosités et des bactéries, avec des niveaux de sensibilité variables selon les espèces : des températures faibles (inférieures à 6°C) limitent la fixation symbiotique ; la croissance des légumineuses fixatrices est ainsi plus tardive que celle de plantes assimilatrices en début de printemps. La sensibilité des nodosités à l'engorgement en eau du sol ou au dessèchement du sol amoindrit également les performances (et la pérennité) des légumineuses les plus cultivées. Il faut ainsi choisir les bonnes espèces ou combinaisons d'espèces en fonction des conditions pédoclimatiques (et les parcelles favorables à la culture ou à la pérennité des légumineuses) et, pour les prairies, en fonction également des modes d'exploitations prévus (fauche vs pâturage). De nombreux documents sont disponibles pour guider ces choix (SCHNEIDER *et al.*, 2015, sites web d'ARVALIS-Institut du végétal, de Multisward par exemple).

- Les facteurs biotiques : la fixation symbiotique est conditionnée à la présence de bactéries symbiotiques efficaces dans le sol. Les bactéries sont généralement présentes dans le sol, mais pour certaines espèces (comme le soja, lorsqu'aucune inoculation récente n'a été réalisée pour la luzerne ou le lupin) ou dans certains types de sols (pH trop acide pour le lupin ou la luzerne), une inoculation peut s'avérer bénéfique. Nous ne détaillerons pas ici la limitation plus ou moins directe de la fixation par des agents pathogènes ou des ravageurs comme les larves de sitones qui s'attaquent aux nodosités ou le champignon *Aphanomyces* qui provoque une pourriture du système racinaire, le lecteur intéressé pouvant se référer à VOISIN *et al.* (2015). Enfin, les légumineuses à graines présentent également une faible compétitivité par rapport aux adventices, qui limitent la croissance, et donc, indirectement, la fixation symbiotique (CORRE-HELLOU et CROZAT, 2005).

2.2. Arrière-effets : décomposition des résidus et cinétiques de minéralisation post destruction

Dans les successions culturales incluant des légumineuses à graines, seules les graines sont exportées et une part importante de la plante reste au sol. Pour les légumineuses fourragères, la majeure partie des parties aériennes est régulièrement récoltée et le niveau des exportations dépend du type d'exploitation (très élevé en fauche, faible en pâture). La mise en culture de prairies mixtes ou artificielles s'accompagne d'un apport massif de résidus végétaux lors de la destruction du couvert, dont la cinétique de décomposition va varier en fonction du rapport C/N des tissus non exportés et des conditions climatiques (en particulier températures et humidité du sol). Le Tableau 4 récapitule quelques mesures réalisées après des cultures de pois (JEUFFROY *et al.*, 2015), de luzerne (JUSTES *et al.*, 2001) et des associations ray-grass - trèfle blanc (VERTES *et al.*, 2007).

Des exemples de cinétiques de minéralisation sont illustrés en Figure 4. La Figure 4a illustre les cinétiques de minéralisation des résidus végétaux de prairies de ray-grass anglais monospécifique ou associé au trèfle blanc. Ces résidus, à C/N autour de 15-18, fournissent entre 15 et 30 kg N/ha, ce qui correspond à 30 % environ de leur azote et contribuent pour 20 à 30 % à la minéralisation totale mesurée dans les sols. La spécificité des légumineuses est une minéralisation nette rapide et toujours positive, comparée aux cinétiques des graminées, qui s'explique par un C/N plus faible pour les résidus de légumineuses, 15-18 vs 20-28 pour les graminées, et leur plus grande dégradabilité

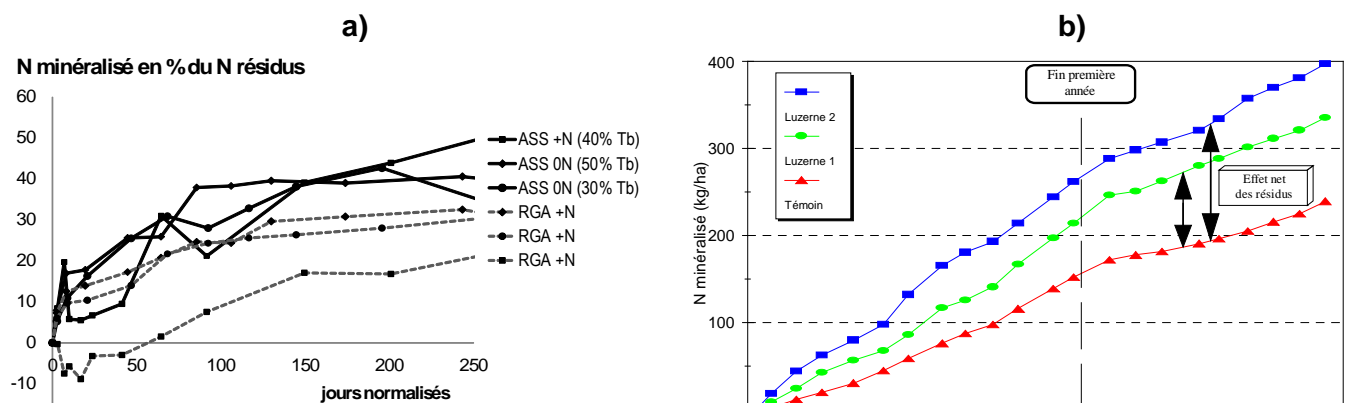
(résidus plus riches en cellulose et plus pauvre en lignine que les résidus de graminées). Cette décomposition rapide explique que le mode d'utilisation (fauche vs pâturage) des prairies influe peu sur la minéralisation post destruction, contrairement aux prairies de graminées pures pour lesquelles un coefficient réducteur de 0,7 (1 fauche) à 0,4 (toujours fauché) s'applique pour intégrer l'effet prairies dans les calculs de fertilisation (COMIFER, 2013).

Tableau 4 : Composition en carbone et azote des résidus de légumineuses lors de la destruction des couverts et quantités de C et de N apportées au sol (écarts types entre parenthèses).

Organes	Matière sèche (t/ha)	Teneur en N (% MS)	Ratio C/N	Apports N (kg/ha)	Apports C (kg/ha)
Pois	4,1	1,22	24	50	1200
Luzerne : Racines	5,5	1,55	29,3	85	2500
Luzerne : Collets (aérien < 6 cm, non récolté)	3,1	1,97	22,7	61	1400
Luzerne : Total 1 (enfouie sans repousse)	9,6	1,68	26,9	150	4000
Luzerne : Feuilles+Tiges (> 6 cm de hauteur)	1,5	4,52	10,1	68	690
Luzerne : Total 2 (enfouie avec repousse)	11,1	2,09	21,7	230	5000
Ray-grass non fertilisé : racines + collet	7,2				
Ray-grass non fertilisé : aérien	3,2				
Ray-grass non fertilisé : total	10,4	1,3	29,2	100 - 150	3000 - 4000
Ray-grass fertilisé : racines + collet	8,8 (1,8)				
Ray-grass fertilisé : aérien	1,9 (0,6)				
Ray-grass fertilisé : total	10,7 (0,8)	1,9 (0,3)	20,5 (2,3)	150 - 250	3500 - 6000
Ass.RGA-trèfle blanc : racines+collets+stolons	5,0 (0,6)				
Ass.RGA-trèfle blanc : aérien (feuilles)	1,7 (0,8)				
Ass.RGA-trèfle blanc : total	6,7 (0,6)	2,1 (0,3)	18,0 (1,9)	100 - 150	2000 - 3000

La Figure 4b illustre la minéralisation totale mesurée dans le sol après destruction d'une luzerne. La minéralisation du sol est continue, sans arrêt durant l'hiver, avec un total de 240 kg N/ha pour le sol témoin et de 330 et 400 kg N/ha respectivement pour les luzernes 1 et 2, due à la libération d'azote provenant des résidus de luzerne. L'effet « résidu » est beaucoup plus élevé que celui des prairies ray-grass - trèfle précédentes, et l'équivalent fertilisant azote peut aller jusqu'à 100-150 kg N/ha pour le maïs suivant la destruction de la luzerne. La minéralisation provient pour environ 60 % de la décomposition des résidus dans les 18 mois suivant la destruction (vs 30 % pour les prairies mixtes, dans un délai plus court de 3 à 6 mois), le reste de l'azote minéralisé provenant de la « minéralisation basale » de l'humus et de celle des matières organiques cumulées dans le sol durant la vie de la prairie (« effet prairies »).

Figure 4 : Cinétiques de minéralisation (a) des résidus de ray-grass anglais pur ou d'association ray-grass - trèfle blanc en conditions contrôlées (sol incubés en laboratoire à 15°C et humidité optimale, VERTÈS *et al.*, 2007) et b) minéralisation cumulée des 3 traitements expérimentaux luzerne (JUSTES *et al.*, 2001).



L'arrière-effet d'une luzernière de 3-4 ans est significatif pendant 2 à 3 ans, ce qui n'est pas observé après destruction de prairies courtes (2-3 ans) de graminées, dont l'arrière-effet est considéré comme significatif pendant 1 an seulement (COMIFER, 2011).

Dans les deux cas, la fourniture d'azote par le sol due à « l'effet prairie » (c'est-à-dire en plus de la minéralisation basale de l'humus du sol) est de l'ordre de 150 à plus de 300 kg/ha l'année suivant la destruction, avec une cinétique qui semble plus linéaire pour la luzerne que pour les prairies pâturées mono ou bispécifiques où, à une première phase de minéralisation élevée pendant 4-6 mois, succède une deuxième phase à minéralisation plus lente (VERTES *et al.*, 2007 ; BESNARD *et al.*, 2007 ; RASMUSSEN *et al.*, 2012). Ajoutées à la minéralisation basale du sol, ces quantités permettent de produire un maïs ou une betterave fourragère à haut rendement sans apport d'azote. Les cinétiques rapides laissent présager des fuites élevées d'azote en cas de destruction automnale sans culture capable de prélever de telles quantités d'azote.

L'insertion d'une culture de pois ou d'un mélange céréales - légumineuses à graines dans des rotations céréalières permet de réduire la fertilisation azotée de la culture suivante, de l'ordre de 20 à 60 kg N/ha selon les cultures, pour des rendements généralement égaux ou un peu plus élevés. Ce gain de rendement serait lié à un meilleur fonctionnement de la culture suivant le pois, en partie dû à une meilleure qualité sanitaire des cultures suivantes (meilleure structure du sol, moins de maladies, surtout d'origine tellurique, grâce à l'alternance des familles botaniques).

Si la fourniture d'azote à la culture suivante présente un intérêt fertilisant évident (base du *ley-farming* anglais), les flux d'N minéralisés s'avèrent plus ou moins faciles à valoriser selon les choix de rotations, augmentant parfois sensiblement les risques de lixiviation à court terme. Lorsque la culture de légumineuse pérenne est détruite en été-automne pour implanter un colza ou une céréale, les risques de lixiviation durant l'automne suivant sont accrus par rapport à des rotations purement culturales. Pour les rotations légumineuses à graines - cultures, la réduction des risques de lixiviation passe par :

- la couverture du sol à l'automne avec une CIPAN avant le semis de céréales ;
- l'implantation d'un colza après le pois ;
- le remplacement de la légumineuse pure par un pois - céréale, qui engendre moins de reliquats post-récolte qu'un pois pur.

De même pour les rotations fourragères incluant 3-4 ans de luzerne ou 5-6 ans de prairies d'association graminées-légumineuses, les choix de la période de destruction et de la culture suivante sont essentiels pour limiter les fuites de nitrate. Choisir une culture de printemps à forte capacité d'absorption (betterave fourragère, maïs avec CIPAN sous couvert, céréale de printemps) permet de limiter les pertes d'azote (MORVAN *et al.*, 2000), sous réserve d'éviter des destructions tardives (avril) qui engendrent généralement des reliquats N sol très élevés en automne et peu gérables (récolte trop tardive pour implanter une CIPAN efficace, blé en implantation peu absorbant). Les destructions d'été avant colza se sont avérées relativement peu performantes dans les essais conduits, la prairie constituant un médiocre précédent pour cette crucifère (pour des raisons mal connues).

Des tentatives innovantes sont explorées par des paysans herbagers expérimentateurs (LERAY, 2014) ou en système biologique (FIORELLI *et al.*, 2015, ce colloque), qui testent l'intérêt d'intercaler entre une destruction au printemps et la céréale d'hiver un mélange avoine + tournesol + luzerne + crucifères, avec une efficacité variable. D'autres essais concernent l'implantation d'une culture (maïs ou blé) sans détruire totalement la prairie, avec un succès encore aléatoire.

D'autres bénéfiques résultent de l'insertion d'une culture de légumineuse, dont la rupture des cycles des pathogènes caractéristiques des grandes cultures dominantes des rotations. Par ailleurs, l'insertion d'une famille botanique différente, l'allongement de la rotation, l'alternance des cycles des cultures de printemps et d'hiver, la couverture du sol permise par les couverts pluriannuels ou non récoltés (CIPAN), ainsi que les décalages de dates de semis permis par ces cultures facilitent le contrôle des adventices les plus fréquentes des rotations actuelles (en particulier leur destruction par des faux-semis). L'insertion de légumineuses, qu'elles soient annuelles ou pérennes, facilite donc la maîtrise des maladies et des adventices, tout en limitant le recours aux pesticides, à l'échelle de la rotation. Non liés directement à la fertilité des sols, ces effets des légumineuses aboutissent également à une meilleure production globale sur les rotations et à des meilleures performances environnementales.

Concernant l'intérêt à long terme des légumineuses sur l'évolution de la matière organique des sols (MOS), il semble que la rhizosphère spécifique des légumineuses (grâce à leur symbiose) soit un élément clé qui influence la qualité des sols et donc les conditions des cultures suivantes, mais qui reste à investiguer plus largement. L'importance quantitative de la rhizodéposition est en particulier mal connue et probablement très sous-évaluée dans l'état actuel des connaissances (MAHIEU, 2007 ; FUSTEC, 2010) et pourrait expliquer une partie des difficultés à modéliser l'évolution des MOS en rotations fourragères (VERTES et MARY, 2014).

2.3. Evaluation sur quelques rotations types des quantités d'intrants azotés mises en jeu et fuites d'azote

L'évaluation des flux d'azote mis en jeu à l'échelle de la rotation, et en particulier des pertes d'azote, est au cœur de plusieurs outils d'aide à la décision, dont l'outil Syst'N (PARNAUDEAU *et al.*, 2011) basé sur une approche de modélisation à l'échelle de la France. Ce logiciel est en cours de paramétrage pour les légumineuses et, en attendant qu'il soit totalement opérationnel et validé, d'autres outils d'évaluation moins élaborés ont été proposés, basés sur des références locales, de l'expertise et de la modélisation. Le Tableau 5, proposé par la Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charente en 2010, illustre une comparaison qualitative des effets de cultures intermédiaires ou de CIPAN, avec ou sans légumineuses, intercalées dans des rotations, sur les risques de lixiviation et sur la production des cultures suivantes.

Tableau 5 : Effets de cultures intermédiaires et CIPAN avec ou sans légumineuses sur la régulation de l'azote minéral du sol (effet piège à nitrate, diminution de la lixiviation hivernale) et sur le rendement des cultures suivantes (Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charente 2010). Les quantités de N mises en jeu sont de l'ordre de 10-20 kg N/ha pour un symbole smiley.

Appellation	Description	Piégeage de l'azote avant la période de drainage	Diminution du risque de lessivage tardif	Biomasse produite (t de MS/ha)	Quantité d'azote stocké (N en kg/ha)	Quantité d'azote restituée (N en kg/ha)	Effet sur le rendement de la culture suivante	
							gain de rendement	taux protéique
Classique	Cultures intermédiaires, monospécifiques ou plurispécifiques, sans légumineuses	😊😊😊	😊😊	😊😊	😊😊	😊 à 😊	😞 à 😊	😞 à 😊
Légumineuse pure	Cultures intermédiaires, monospécifiques ou plurispécifiques, à base de légumineuses pures	😊 à 😊	😞 à 😊	😊	😊😊	😊😊	😊 à 😊😊😊	😊😊
Association	Mélange de 2 espèces au minimum dont au moins une appartient à la famille des légumineuses et au moins une autre appartient à une famille classique	😊😊	😊 à 😊	😊😊😊	😊😊😊	😊😊	😊 à 😊😊😊	😊 à 😊

Légende : 😞 : défavorable 😊 : aucun effet ou limité 😊 : favorable à très favorable

Il existe peu de résultats de recherche quantifiant des bilans cumulés sur des rotations incluant des légumineuses. Quelques exemples récents illustrent la complexité du sujet : FIORELLI (ce colloque) indique que, pour une même rotation de 8 ans incluant 3 ans de luzerne - dactyle, des céréales et un méteil céréale - protéagineux, rotation conduite en agriculture biologique sur la ferme expérimentale INRA de Mirecourt (Vosges), les bilans cumulés varient très fortement d'une parcelle à une autre en fonction du type de sol tandis que, culture par culture, les bilans sont sensiblement moins variables, avec des soldes de bilans sols négatifs sous luzerne - dactyle, faibles sous blé, un peu plus élevés sous céréales de printemps et maximaux pour le mélange céréales - protéagineux.

Une approche par modélisation (ANGLADE *et al.*, 2015), appliquée à une rotation culturale de 9 ans en exploitation biologique d'Ile de France, indique un faible surplus d'azote de 12 kg N/ha/an (sans compter les dépôts atmosphériques), variant de + 5 à + 30 selon l'organisation de la succession, avec des bilans successivement positifs et négatifs, par exemple (en kg N/ha) :

Bilan = + 300N cumulé sur les 3 ans de luzerne – 95N (blé 0N) – 40N (triticale 50N)
 – 90N (Tournesol 0N) + 27N (Pois) – 76N (blé 0N) – 17N (orge 50N)

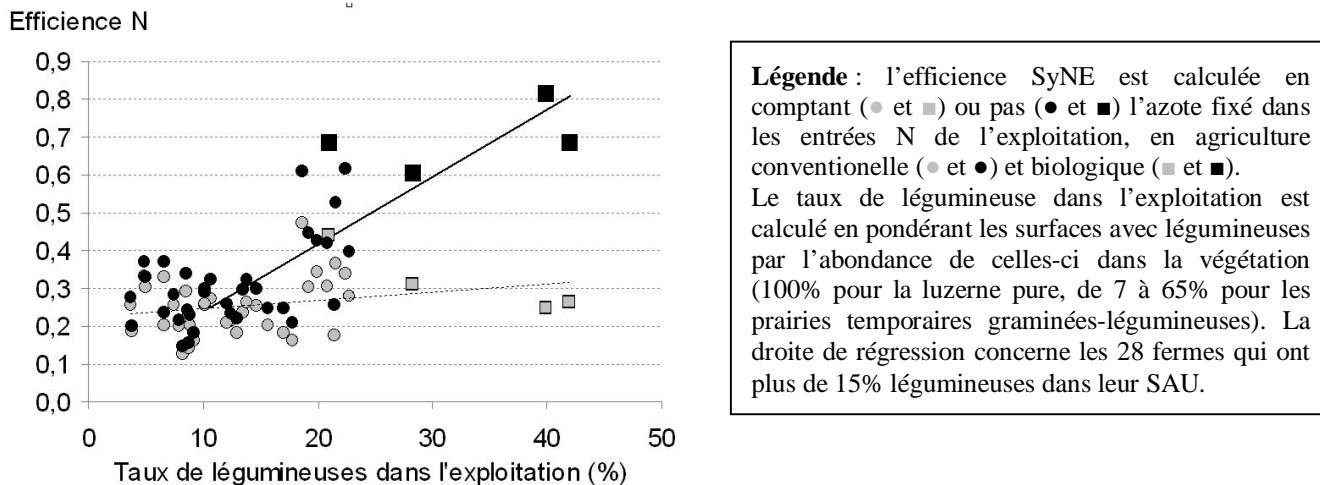
Notons que JEUFFROY *et al.* (2015) n'ont pas montré de différence significative entre des successions blé - colza incluant ou pas un pois (Casdar 7-175).

Ces approches se développent avec l'amélioration des modèles (dont l'outil Syst'N en cours de développement). Les références obtenues peuvent être utilisées par exemple pour le raisonnement des rotations et de la fertilisation, pour tester l'effet de divers scénarios sur les risques de pertes d'azote, ou pour rentrer dans des outils d'évaluation multicritère de la durabilité des exploitations et des systèmes de production.

2.4. Effet de légumineuses fourragères (luzerne, prairies d'association) sur l'efficacité systémique d'utilisation de l'azote à l'échelle de l'exploitation

La fixation symbiotique permet d'assurer la production de protéines par les légumineuses et les plantes non fixatrices associées ou suivantes, *via* l'apport au sol de rhizodépôts riches en N (nodosités, exudats), de résidus de plantes également riches en N (racines et tissus aériens) et *via* la restitution directe des déjections au pâturage. GODINOT *et al.* (2014) ont testé l'hypothèse d'une augmentation d'efficacité systémique d'utilisation de l'azote (SyNE²) avec la part des légumineuses dans les systèmes de production, sur un réseau de 38 fermes laitières productrices de luzerne (adhérentes à une coopérative de déshydratation/séchage de luzerne).

Figure 5 : Effet du taux de légumineuses dans l'exploitation sur l'efficacité d'utilisation de l'azote pour les 38 fermes laitières de la Coopédome (35) (d'après GODINOT *et al.*, 2014).



L'augmentation de la part des légumineuses dans la SAU des exploitations, et donc de l'entrée d'N par fixation symbiotique (luzerne pure, associations graminées - trèfle blanc) dans les entrées totales, n'améliore pas significativement l'indicateur SyNE. Celui-ci est relié principalement à la part des grandes cultures dans les sorties d'N, car les cultures ont une efficacité de transformation de l'azote quasi double (60-70 %) de celle des animaux (10-45 %). En revanche, si le calcul est fait en rapportant le même azote exporté de l'exploitation (produits animaux et végétaux) à l'azote acheté

² L'indicateur classique NUE (N Use Efficiency) = N exporté (produits végétaux et animaux)/N importé (engrais, aliments, fixation...) est corrigé i) d'un biais algébrique en déduisant des entrées les sorties de même type, ii) en intégrant les impacts « azote » (contribuant aux impacts eutrophisation, acidification et changement climatique) liés aux intrants N pour mettre à égalité les aliments importés vs autoconsommés et iii) en intégrant les changements éventuels de teneur en N organique du sol. Le lecteur intéressé se référera à la publication détaillée.

(engrais et aliments) sans intégrer la fixation, cette nouvelle « efficacité » augmente linéairement ($r^2 = 0,63$) avec le taux de légumineuses quand il dépasse environ 15 % de légumineuses dans la SAU (Figure 5). Pour les plus faibles taux de légumineuses, l'efficacité d'utilisation de l'azote varie entre 0,15 et 0,37, en lien avec la part respective des produits végétaux et animaux dans les exportations d'N. Les 4 fermes biologiques de ce réseau, dont la principale source d'azote réactif est la fixation symbiotique, arrivent ainsi à valoriser sous forme de produits utiles 60 à 80 % de l'azote qu'elles achètent, soit une « efficacité » de 0,6 à 0,8.

Ce calcul un peu théorique exprime l'autonomie en intrants azotés de l'exploitation et intègre la réduction des importations d'engrais et d'aliments protéiques. Celle-ci est permise par l'autonomie de nutrition N des légumineuses et par leurs arrière-effets (détaillés précédemment) permettant de diminuer la fertilisation N des cultures suivantes (et donc les achats d'engrais). Le lecteur intéressé pourra se reporter à THIEBEAU *et al.* (2010) et VERTES *et al.* (2010) pour une évaluation multicritère des bénéfices environnementaux consécutifs à la substitution d'une partie des entrées d'azote par des légumineuses.

Au-delà de cette illustration proposée à l'échelle de l'exploitation, plusieurs auteurs se sont intéressés aux conséquences, sur les flux d'azote, d'une généralisation de l'usage des légumineuses à l'échelle du territoire (par exemple BILLEN *et al.* (2009), PEYRAUD *et al.* (2014)), montrant un potentiel d'atténuation des émissions d'azote. PELLERIN *et al.* (2013) ont proposé une quantification de la réduction de GES, en particulier de N_2O , liée à un accroissement de la part des légumineuses en France et du bénéfice associé, de l'ordre de 300 euros par t CO_2 évitée. De telles études prospectives attestent de l'intérêt croissant porté à la place des légumineuses dans une agriculture plus agroécologique : l'ouvrage *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, coordonné par Anne SCHNEIDER (UNIP) et Christian HUYGHE (INRA) (sous presse aux éditions Quae), apporte sa contribution à la diffusion des connaissances sur les légumineuses. Il reste néanmoins nécessaire de renforcer l'élaboration et la mise à disposition d'outils (techniques, environnementaux et socio-économiques) d'aide à la décision multicritère pour une meilleure intégration des légumineuses dans les systèmes de production végétaux et animaux.

Conclusions

Les légumineuses, en particulier les pérennes fourragères, produisent une biomasse élevée riche en protéines sans intrants azotés, avec une qualité plus stable dans le temps que les graminées pures. La quantité d'azote et la composition des résidus de légumineuses disponibles en post-destruction à l'échelle de la rotation sont variables selon les espèces, les exportations réalisées (graines / parties aériennes) et les restitutions effectuées (pâturage). La composition des résidus affecte la dynamique de décomposition et donc la fourniture d'azote minéral pour la/les cultures suivantes.

En prélevant l'azote minéral du sol quand celui-ci est abondant, les légumineuses peuvent contribuer à la limitation des fuites de nitrates sur l'ensemble de la rotation. Toutefois, une attention particulière doit être portée sur la gestion des flux de minéralisation consécutifs à leur destruction, pour limiter les risques de lixiviation de nitrate dans les eaux.

L'intégration des effets directs et indirects des légumineuses à l'échelle de l'exploitation (ou du territoire) et des rotations incite à renforcer les recherches sur leur potentiel d'utilisation pour des systèmes de production en accord avec les principes d'agroécologie largement promus à l'heure actuelle pour une agriculture productive et durable.

Références bibliographiques

- ANGLADE J., BILLEN G., GARNIER J. (2015) : "Relationship for estimating N_2 fixation in legumes: incidence for N balances of legume-based cropping systems in Europe", *Ecosphere*, vol. 6 (2) sous presse.
- BESNARD, A., LAURENT, F., HANOCQ, D., VERTÈS F., NICOLARDOT B., MARY B. (2007) : "Effect of timing of grassland destruction on nitrogen mineralization kinetics", *Permanent and temporary grasslands: Plant, Environment and Economy*, A. de Vliegler, L. Carlier (eds.), *Grassland Science in Europe*, 12, 335-338.
- 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, 3/4, 234-246.

- COMIFER (2011, réactualisé en 2013) : *Calcul de la fertilisation azotée : guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales pour les cultures annuelles et les prairies* ; <http://www.comifer.asso.fr>
- CORRE-HELLOU G., CROZAT Y. (2005) : "N₂ fixation and N supply in organic pea (*Pisum sativum* L.) cropping systems as affected by weeds and pea weevil (*Sitona lineatus* L.)", *Europ J Agronomy*, 22 (4), 449-458.
- DUC G., MIGNOLET C., CARROUÉE B., HUYGHE C. (2010) : "Importance économique passée et présente des légumineuses : rôle historique dans les assolements et facteurs d'évolution", *Innovations Agronomiques*, 11, 1-24.
- FIORELLI J.L., M. GODFROY, J.M. TROMMENSCHLAGER, D. FOISSY, C. THIERY, X. COQUIL (2015) : "Les pratiques d'entretien de la fertilité des sols dans le système de polyculture-élevage de l'expérimentation-système de Mirecourt : premiers éléments de résultats", *Actes des Journées AFPP 2015*, ce document.
- FONTAINE L., FOURRIÉ L., GARNIER J.F., MANGIN M., COLOMB B., CAROF M., AVELINE A., PRIEUR L., QUIRIN T., CHAREYRON B., MAURICE R., GLACHANT C., GOURAUD J.P. (2012) : "Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques", *Innovations Agronomiques*, 25, 27-40.
- FUSTEC J., LESUFFLEUR F., MAHIEU S., CLIQUET J.B. (2010) : "Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review", *Agron. Sustain. Dev.*, 30, 57-66.
- GODINOT O., CAROF M., VERTÈS F., LETERME P. (2014) : "SyNE: an improved indicator to assess nitrogen use efficiency of farming systems", *Agricultural Systems*, 127, 41-52.
- GOSSE G., VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER M., ALLIRAND J.M., LEMAIRE G. (1986) : "Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal", *Agronomie*, 6 (1), 47-56.
- JENSEN E.S., HAUGGAARD-NIELSEN H. (2003) : "How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? ", *Plant Soil*, 252, 177-186.
- JEUFFROY M-H., BIARNÈS V., COHAN J.P., CORRE-HELLOU G., GASTAL F., JOUFFRET P., JUSTES E., LANDÉ N., LOUARN G., PLANTUREUX S., SCHNEIDER A., THIÉBEAU P., VALANTIN-MORISON M., VERTÈS F. (2015) : "Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales", *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, A. Schneider, C. Huyghe (coord.), Editions Quæ, 104-164, sous presse.
- JULIER B., LOUARN G., GASTAL F., SURAULT F., SAMPOUX J.-P., MAAMOURI A., FERNANDEZ L. (2014) : "Les associations graminées - légumineuses prairiales. Comment sélectionner des variétés pour accroître leur productivité et faciliter leur conduite? ", *Innovations Agronomiques*, 40, 61-72.
- JUSTES E., THIÉBEAU P., CATTIN G., LARBRE D., NICOLARDOT B. (2001) : "Libération d'azote après retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes", *Perspectives Agricoles*, 264, 22-26.
- LERAY F. (ALLEZARD V., HUYGHE C., VERTÈS F.) (2014) : "Un groupe d'agriculteurs innove pour renouveler les prairies en limitant les fuites d'azote. Foisonnement de l'innovation agricole", *Fourrages*, 217, 37-46.
- LOUARN G., PEREIRA-LOPÈS E., FUSTEC J., MARY B., VOISIN A.S., CESAR DE FACCI CARVALHO P., GASTAL F. (2015) : "The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality", *Plant and Soil*, DOI 10.1007/s11104-014-2354-8
- MAHIEU S., FUSTEC J., FAURE M.L., CORRE-HELLOU G., CROZAT Y. (2007) : "Comparison of two ¹⁵N labelling methods for assessing nitrogen rhizodeposition of pea", *Plant and Soil*, 295, 193-205.
- MORVAN T., ALARD V., RUIZ L. (2000) : "Intérêt environnemental de la betterave fourragère", *Fourrages*, 163, 315-322.
- NAUDIN C., CORRE-HELLOU G., VOISIN A.S., OURY V., SALON C., CROZAT Y., JEUFFROY M.H. (2011) : "Inhibition and recovery of symbiotic N₂ fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure", *Plant and Soil*, 346, 275-287.
- OENEMA O., KROS H., DE VRIES W. (2003) : "Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies", *European Journal of Agronomy*, 20, 1/2, 3-16.
- PARNAUDEAU V., REAU R., DUBRULLE J. (2011) : "Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel Syst'N", *Innovations Agronomiques*, 21, 59-70.
- PELLERIN S., BAMIÈRE L., ANGERS D., BÉLINE F., BENOÎT M., BUTAULT J.-P., CHENU C., COLNENNE-DAVID C., DE CARA S., DELAME N., DOREAU M., DUPRAZ P., FAVERDIN P., GARCIA-LAUNAY F., HASSOUNA M., HÉNAULT C., JEUFFROY M-H., KLUMPP K., METAY A., MORAN D., RECOUS S., SAMSON E., SAVINI I., PARDON L. (2013) : *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Expertise collective INRA*, <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Etude-Reduction-des-GES-en-agriculture>

- PEOPLES M.B., BROCKWELL J., HERRIDGE D.F., ROCHESTER I.J., ALVES S., URQUIAGA S., BODDEY R.M., DAKORA F.D., BHATTARAI S., MASKEY S., SAMPET C., RERKASEM B., KHAN D.F., HAUGGAARD-NIELSEN H., JENSEN E.S. (2009) : "The contribution of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems", *Symbiosis*, 48, 1-17.
- PETIT M.S., REAU R., DEYTIEUX V., SCHAUB A., CERF M., OMON B., GUILLOT M.N., OLRÉ P., VIVIER C., PIAUD S., MINETTE S., NOLOT J.M. (2012) : "Systèmes de culture innovants : une nouvelle génération de réseau expérimental et de réseau de compétences", *Innovations Agronomiques*, 25, 99-123.
- PEYRAUD J.L., CELLIER P., DONNARS C., VERTÈS F. (coord.) (2014) : *Réduire les pertes d'azote en élevage*, éd. Quæ, coll Matière à débattre & décider, 115 p.
- POCHON A. (1981) La prairie temporaire à base de trèfle blanc. 25 années de pratique. Collection Témoignages, ITEB-Technipel
- RASMUSSEN J., SØEGAARD K., PIRHOFER-WALZL K., ERIKSEN J. (2012) : N₂-fixation and residual N effect of four legume species and four companion grass species. *European Journal Agronomy* 36, 66-74
- RAVENEL C., DENEUBOURG F., PATEAU Y., CASALS M.L., COSTE F., HELLOU G. (2015) : "Semis de fétuque élevée sous couvert de légumineuses : impact sur les fournitures en azote pour la graminée fourragère porte-graine", *Actes des Journées AFPP 2015*, cet ouvrage.
- RECOUS S., CHABBI A., VERTÈS F., THIEBEAU P., CHENU C. (2015) : "La fertilité des sols : quels processus impliqués, quelles interactions sous l'influence des pratiques culturales ?", *Actes des Journées AFPP 2015*, cet ouvrage.
- SCHNEIDER A., HUYGHE C. (coord.) (2015) : *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, éd. Quæ, sous presse.
- SUTTON M.A., HOWARD C.M., ERISMA J.W., BILLEN G.H., BLEEKER A., GRENNFELT P., VAN GRINSVEN H., GRIZZETTI B. (2011) : *The European Nitrogen Assessment – Sources, effects and policy perspectives*, ed. Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-00612-6, 612 p.
- THIEBEAU 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.
- VERTÈS F., HATCH D., VELTHOF G., TAUBE F., LAURENT F., LOISEAU P., RECOUS S. (2007) : "Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations", A. de Vliegler, L. Carlier (eds.), *Permanent and temporary grassland: Plant, Environment and Economy. Grassland Science in Europe*, 12, 227-246.
- VERTÈS F., JEUFFROY M.H., JUSTES E., THIEBEAU P., CORSON M. (2010) : "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*, 11, 25-43.
- VERTÈS F., MARY B. (2014) : "Part of grassland in ley-arable rotations is a proxy for predicting long term soil organic matter dynamics", *Proc. of the 18th Nitrogen Workshop*, 30 June -3 July, 2014, Lisboa, 347-348.
- 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.
- VOISIN A.S., SALON C., MUNIER-JOLAIN N.G., NEY B. (2002) : "Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.)", *Plant and Soil*, 242, 251-262.
- VOISIN A.S., GASTAL F. (2015) : "Nutrition azotée et fonctionnement agro-physiologique spécifique des légumineuses", *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, A. Schneider, C. Huyghe (coord.), éd. Quæ, sous presse.

Sites à consulter

<http://www.legumefutures.eu>
<http://www.multisward.eu/Access-rapide/Livres-numeriques/Grasslands-and-herbivore-production-in-Europe-and-effects-of-common-policies>
<http://www6.inra.fr/ciag/>
www.arvalisinstitutduvegetal.fr/
<http://idele.fr/>
<http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Cultures-intermediaires>