

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

F. Vertès¹, M.-H. Jeuffroy², G. Louarn³, A.-S. Voisin⁴, E. Justes⁵

Les atouts des légumineuses (fixation symbiotique, diversité fonctionnelle...) leur permettent de contribuer à la fertilité des sols, à l'amélioration de la durabilité de l'agriculture et de l'autonomie protéique des systèmes alimentaires. Il convient donc de mieux connaître leurs rôles, directs et indirects, dans les flux d'azote des rotations.

RÉSUMÉ

Les légumineuses fourragères (en culture pure ou dans des couverts multispécifiques) représentent une grande part des apports azotés symbiotiques. La diversité d'implication des légumineuses dans les rotations est considérable. Des bilans d'azote du sol sont présentés pour plusieurs espèces de légumineuses ; ils varient selon de nombreux facteurs (type de couvert, autres sources d'azote...). Lorsque la fixation est active, elle peut représenter un apport d'une centaine d'unités d'azote. On connaît mieux maintenant les rôles des légumineuses dans les flux d'azote sous cultures et prairies (fixation, arrière-effets...) mais il faut poursuivre les recherches pour intégrer ces effets à l'échelle de l'exploitation, du territoire et des rotations afin de développer des pratiques et systèmes de production productifs et durables.

SUMMARY

Legume use in temporary pastures: supplying nitrogen in crop-rotation systems

Forage legumes (by themselves or as one of several cover crop species) supply a large percentage of the nitrogen fixed by symbiotic bacteria. Legumes can be incorporated into crop-rotation systems in a variety of ways. We provide a summary of the soil nitrogen levels associated with several legume species; levels vary depending on several factors (e.g., cover type, other nitrogen sources). Actively occurring fixation can yield as many as about 100 units of nitrogen. We now have a better understanding of the direct and indirect roles played by legumes in nitrogen flows in crop and pasture systems (e.g., fixation, carryover effects). However, additional research is needed to show how these dynamics play out at the level of the farm, crop-rotation structures, and region so that productive and sustainable practices and systems can be put into place.

Les légumineuses présentent trois qualités : elles 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 agricoles, en alternative à l'emploi d'engrais industriels de synthèse, ce qui permet ainsi (iii) de diversifier les espèces végétales cultivées. Ces 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 différents intérêts, les légumineuses ont largement régressé en France, depuis 20 ans pour les légumineuses à graines et depuis 50 ans pour les fourragères (SCHNEIDER et HUYGHE, 2015).

AUTEURS

1 : INRA, UMR 1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Agrocampus Ouest, F-35000 Rennes ; Françoise.Vertes@rennes.inra.fr

2 : INRA, Agronomie UMR 211, AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon

3 : INRA, UR4 UR3F, BP 6, F-86600 Lusignan

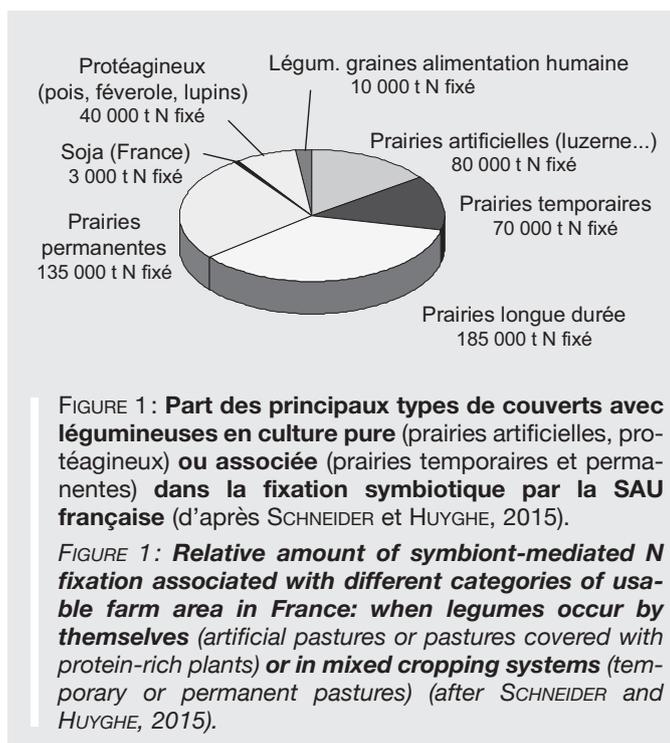
4 : INRA, UMR 1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon

5 : INRA, UMR 1248, AGIR, Université de Toulouse, INPT ENSAT, F-31326 Castanet-Tolosan

MOTS CLÉS : Agriculture durable, arrière-effet, autonomie, azote, bilan d'azote, efficacité de l'azote, fertilisation azotée, fertilité du sol, fixation symbiotique de l'azote, France, légumineuse, prairie, rotation culturale, sol, système de culture, système fourrager.

KEY-WORDS : After-effects, crop succession, crop system, forage system, France, grassland, legume, nitrogen, nitrogen balance, nitrogen efficiency, nitrogen fertilisation, self-sufficiency, soil, soil fertility, sustainable agriculture, symbiotic nitrogen fixation.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Vertès F., Jeuffroy M.H., Louarn G., Voisin A.S., Justes E. (2015) : "Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations", *Fourrages*, 223, 221-232.



Pour l'Europe (UE-27), la fixation symbiotique des cultures agricoles fait entrer environ 1 million de tonnes d'azote par an dans le **cycle de l'azote réactif**¹, en plus des 0,3Mt dus à la fixation symbiotique 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 par fixation, 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 0,26Mt, tandis que les engrais chimiques azotés représentent 2,1 Mt (DUC *et al.*, 2010). Les quantités d'azote fixé représentent seulement 5% de la production totale de protéines végétales en France (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. En France, l'essentiel des légumineuses étant destiné à l'alimentation animale, les différents types de légumineuses concernées sont considérés pour répondre aux 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 sur la fertilité des sols ?

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).

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

On désigne par « systèmes fourragers » tous les systèmes de cultures, annuelles, pluriannuelles ou pérennes, dont les produits sont destinés à l'alimentation des animaux. On distingue trois grands types de légumineuses, correspondant à **trois grands types de fonctions** :

- **les légumineuses à graines** (pois, féverole, lupins, soja...): exploitées surtout pour leurs graines riches en protéines, en culture monospécifique (cas le plus répandu) ou en association avec des non-légumineuses (méteils);

- **les légumineuses fourragères et 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 en association avec des non-légumineuses (graminées le plus souvent) dans les prairies dites « temporaires » bi ou multispécifiques (de 1 à 5 ans), de longue durée (plus de 6 ans) dites « permanentes » ou réellement permanentes (prairies non semées en montagne, sur sols peu cultivables...);

- **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.

■ 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 était initialement suivi d'une céréale secondaire ; celle-ci a été progressivement remplacée par un 2^e 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 régions d'élevage et périphérie). La féverole fait son apparition, remplaçant le pois dans les mêmes

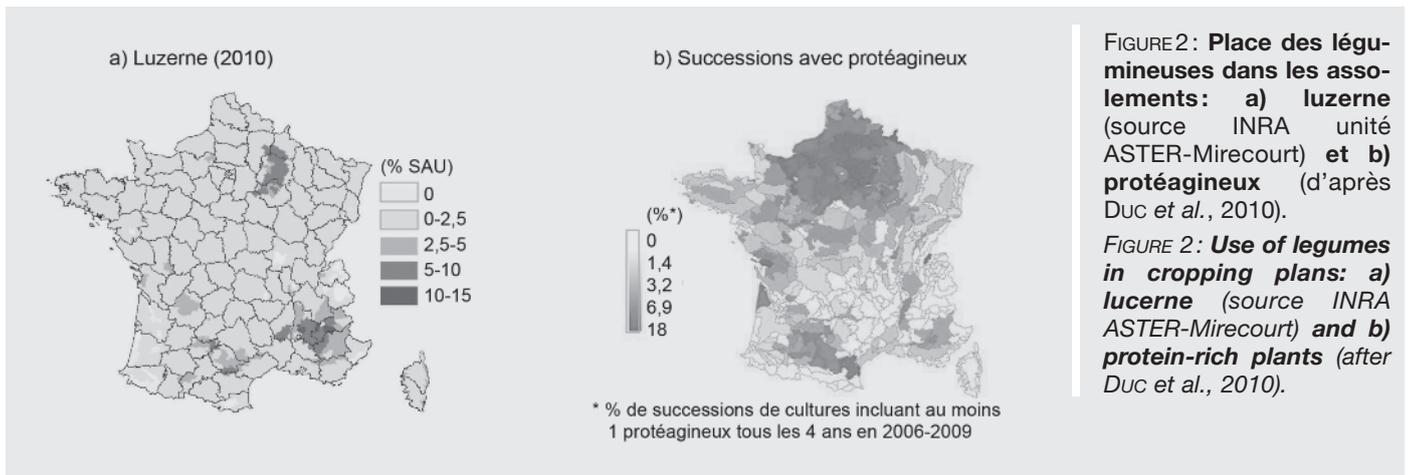


FIGURE 2: **Place des légumineuses dans les assolements: a) luzerne** (source INRA unité ASTER-Mirecourt) **et b) protéagineux** (d'après Duc et al., 2010).

FIGURE 2: **Use of legumes in cropping plans: a) lucerne** (source INRA ASTER-Mirecourt) **and b) protein-rich plants** (after Duc et al., 2010).

successions (colza– blé– féverole– blé). Une étude plus précise (JEUFFROY *et al.*, 2015) sur trois régions françaises entre 2006 et 2011 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, l'autre 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 (devant au moins deux céréales à paille) dans des successions de 3-4 ans.

Actuellement, la plupart des légumineuses annuelles et pluriannuelles en couverts monospécifiques font partie des systèmes de grandes cultures, à base de céréales majoritairement en agriculture conventionnelle, 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 soit moins de 500 000 ha.

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 » (du nord au centre), 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 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 2 a). Le trèfle blanc 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 (CAPITAINE *et al.* 2008; JULIER *et al.*, 2014).

On trouve actuellement une **plus forte proportion de légumineuses**, par rapport aux cultures majoritaires

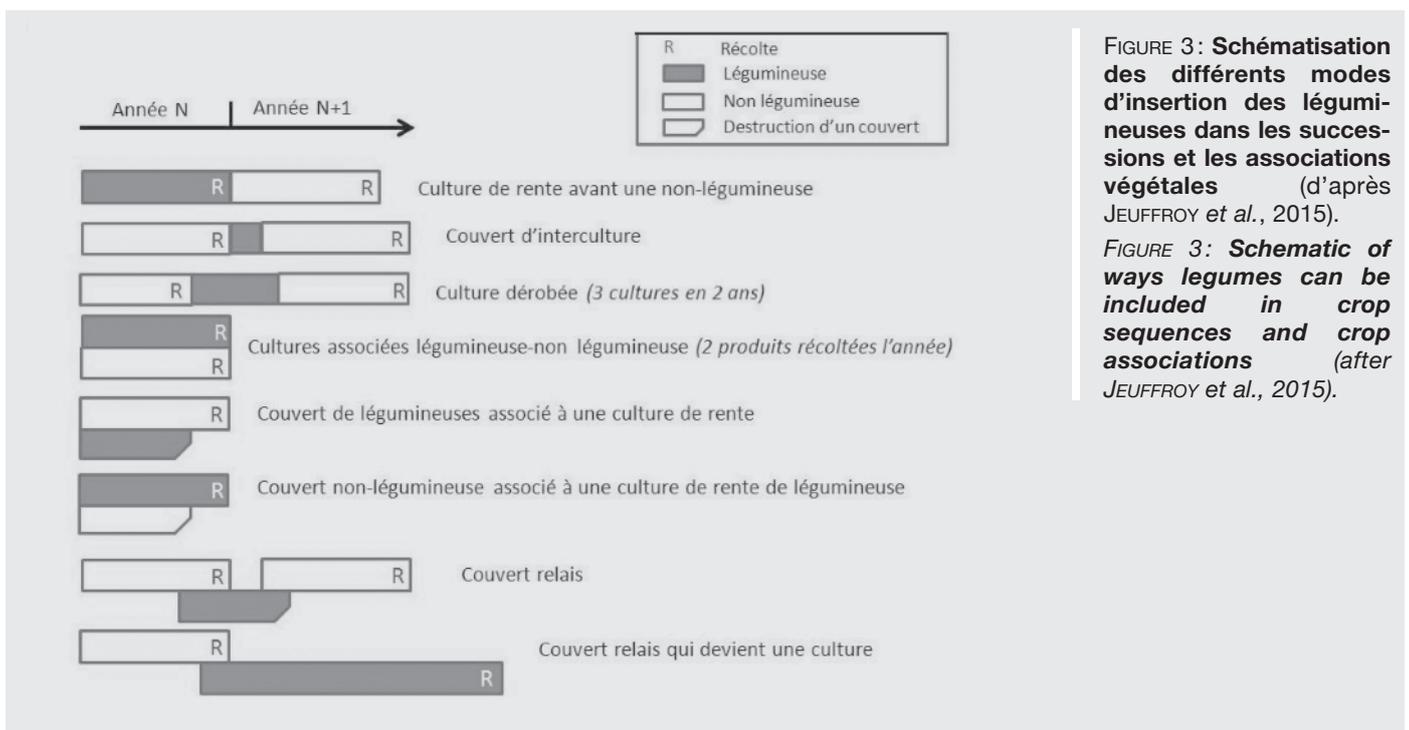


FIGURE 3: **Schématisme des différents modes d'insertion des légumineuses dans les successions et les associations végétales** (d'après JEUFFROY *et al.*, 2015).

FIGURE 3: **Schematic of ways legumes can be included in crop sequences and crop associations** (after JEUFFROY *et al.*, 2015).

non légumineuses de l'exploitation, **dans les systèmes performants à bas niveau d'intrants** (DE MARGUERIE *et al.*, 2013; PETIT *et al.*, 2012) et en agriculture biologique (FONTAINE *et al.*, 2012) comparés aux systèmes conventionnels. 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 de « plante de service » est par ailleurs présente dans les successions de production avec porte-graines (*cf.* RAVENEL *et al.*, 2015).

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 majeur dans l'orientation agroécologique des systèmes de cultures (et avec le respect des réglementations de la directive Nitrates). Cette variété de modes de culture est favorisée par la grande diversité des espèces disponibles, caractérisées par des traits divers, permettant cette adaptation.

■ 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, 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 (NO_3 et NH_4) 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 **3 cas types de légumineuses : le pois et la luzerne en culture pure et les prairies ray-grass - trèfle blanc pâturées**, 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 élevant des granivores, exploitations en grandes cultures) et rotations de 7-8 ans (par exemple fermes de polyculture-élevage typiques du Calvados) du type : luzerne 3 ans - céréales-CIPAN 2 ans - mélange céréale-protéagineux - céréale ;

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

Comme la nutrition azotée des légumineuses, surtout en culture pure, bascule de la fixation symbiotique à l'assimilation des nitrates en fonction de la quantité d'azote minéral disponible dans le sol, ce phénomène de régulation de l'entrée d'azote réactif dans le système aboutit globalement à une meilleure utilisation du N 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 en azote (avant dernière colonne du tableau 1 qui peut atteindre

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

* Le N restitué au sol comprend, pour le pois, les pailles + cosses + racines et la rhizodéposition et, pour la luzerne, les racines et la rhizodéposition.
** Les productions du pois (moyenne 7 années mesures, MAHIEU *et al.*, 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 GASTAL (2015). La part de la biomasse aérienne dans la biomasse totale est indiquée entre parenthèses.
*** Semences déduites

TABLEAU 1 : **Calculs de bilans d'azote du sol sur des parcelles non fertilisées selon le niveau de fourniture N du sol (élevé ou faible).**

TABLE 1 : **Assessment of soil N balance for unfertilised parcels with different natural soil N levels (high or low).**

(kg N/ha/an)	N engrais	N déjections	N exporté	N fixé aérien	Solde du bilan sol
Ray-grass anglais pur	250	350	380		+220
Ray-grass anglais pur	250	0	235		+15
Ray-grass anglais - trèfle blanc	0	350	432	52	-30
Ray-grass anglais - trèfle blanc	0	0	282	112	-170

TABLEAU 2: Bilans N de prairies recevant ou pas des déjections animales (lysimeètres, INRA Quimper).

TABLE 2: **Assessment of N balance** (based on lysimetric measurements, INRA Quimper) for pastures treated with manure or left untreated.

une centaine de kg/ha. 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, à faible ou forte fixation symbiotique, celle-ci étant considérée inversement proportionnelle à la disponibilité en azote minéral (dernière colonne du tableau). Néanmoins, on sait que la voie de nutrition azotée affecte le rapport biomasse aérienne / biomasse racinaire et 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 (250kg N) ou associé au trèfle blanc (0kg N), les flux et bilans d'azote du sol sont quantifiés en comparant des zones qui ont reçu, ou pas, des déjections animales (350kg N) au printemps (tableau 2, d'après VERTÈS *et al.*, 1997)

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 présentées dans le tableau 2 montrent **un effet azote majeur à la fois sur la biomasse (aérienne) produite et sur les quantités d'azote fixé**. 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 récolté en fourrage.

Dans tous les cas, **la fixation symbiotique est régulée par les légumineuses**, valorisant l'acquisition d'azote minéral disponible dans le sol, voie moins coûteuse en énergie pour la plante: en présence de quantités importantes d'azote dans le sol, quelle qu'en soit l'origine (reliquats en N minéral du sol, apport d'engrais ou par les déjections), celui-ci est utilisé et limite les entrées nouvelles d'azote 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 minéral du sol non limitant. L'entrée d'azote réactif au sol *via* la fixation symbiotique est alors plus importante que lorsqu'il y avait déjà de l'azote disponible dans le sol.

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 de l'azote des légumineuses dans les rotations fourragères

■ 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 leurs 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

Espèce	Taux de fixation moyen (%)	N fixé (kg N/t de biomasse aérienne)	Coefficient de passage du N aérien au N total
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 1,4
Soja	65-70	18	
Pois	60-65	18	
Haricot	40	15	

TABLEAU 3: Taux de fixation moyen et coefficient de passage du N fixé aérien au N fixé total des principales légumineuses cultivées pour l'élevage en France (d'après ANGLADE *et al.*, 2015; PEOPLES *et al.*, 2009; VOISIN et GASTAL, 2015).

TABLE 3: **Average fixation levels, as well as the ratio of fixed N to available gaseous N for the primary legume species grown for livestock farming in France** (after ANGLADE *et al.*, 2015; PEOPLES *et al.*, 2009; VOISIN and GASTAL, 2015).

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 GASTAL, 2015). Remarquons que, selon les auteurs, les **coefficients de passage du N aérien au N total fixé** varient parfois de près de 40% (selon les postes considérés, les incertitudes sur les mesures des biomasses aériennes, racinaires, et sur la rhizosphère, et selon les méthodes de quantification), mais qu'ils s'accordent sur des coefficients **supérieurs en plantes pérennes fourragères** par rapport aux légumineuses annuelles à graines **et aussi** sur un coefficient plus élevé **pour le trèfle blanc** dû à ses tiges en partie souterraines (stolons).

La quantification de l'azote souterrain provenant des légumineuses est encore difficile à réaliser : les émissions d'exsudats racinaires et les biomasses de racines sont difficiles à quantifier (FUSTEC *et al.*, 2010) et la proportion $N_{\text{souterrain}} / N_{\text{aérien}}$ 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 grandeurs plus que des valeurs de référence absolues. En résultante, ceci correspond sur une base annuelle à des quantités d'azote entré dans le système sol - plante par fixation symbiotique allant de quelques dizaines de kg par hectare (50-130kg pour les légumineuses à graines) à plusieurs centaines (150-200kg N/ha pour du trèfle blanc dans une association bien pourvue en trèfle, 300 à 500kg N/ha pour des luzernières ou peuplements de trèfle violet très productifs).

Au-delà de la croissance de la légumineuse elle-même, **l'entrée d'azote par fixation symbiotique 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 (FUSTEC *et al.*, 2010). 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 (LOUARN *et al.*, 2015) ou du recyclage *via* les déjections animales (processus important en prairies pâturées, LEDGARD, 1991). Si les transferts apparents (par rapport à une même non-légumineuse en pur recevant les mêmes apports d'azote) permettent depuis longtemps une bonne quantification des ordres de grandeur et des différences entre cultures, en revanche les voies de transfert et leur importance relative restent, elles, difficiles à quantifier pour une utilisation opérationnelle.

Rappelons quelques éléments essentiels 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 au N 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 (VOISIN et GASTAL, 2015). Dans le cas des associations pâturées, 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 / mois lorsque le sol s'est appauvri, la graminée associée et/ou la légumineuse ayant prélevé l'azote minéral disponible. Dans le cas des associations fauchées, des apports modérés d'azote minéral (jusqu'à 150kg N/ha) ne réduisent pas ou peu le taux de fixation lorsque la proportion de graminées est supérieure à 30% (NYFELER *et al.*, 2011). La concurrence de la graminée pour l'azote du sol maintient dans ces conditions un environnement favorable à de forts taux de fixation. 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; JENSEN *et al.*, 2003; 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 bactéries, avec des niveaux de sensibilité variables selon les espèces : des températures faibles (inférieures à 6°C) limitent la fixation symbiotique, et la croissance des légumineuses fixatrices est ainsi plus tardive en début de printemps que celle de plantes qui assimilent l'azote. 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, à la pérennité de légumineuses) et, pour les prairies, en fonction également des modes d'exploitation prévus (fauche *vs* pâturage). De nombreux documents sont disponibles pour éclairer ces choix (SCHNEIDER et HUYGHE, 2015, sites web d'Arvalis et 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 GASTAL (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).

■ 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

	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	1 200
Luzerne*					
- Racines	5,5	1,55	29,3	85	2 500
- Collets (aérien < 6 cm, non récolté)	3,1	1,97	22,7	61	1 400
- Total 1 (enfouï sans repousse)	9,6	1,68	26,9	150	4 000
- Feuilles+Tiges (> 6 cm de hauteur)	1,5**	4,52	10,1	68	690
- Total 2 (enfouï avec repousse)	11,1	2,09	21,7	230	5 000
Prairies*					
- 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	3 000 - 4 000
- 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	3 500 - 6 000
- Ray-grass anglais - trèfle blanc : racines +collets+stolons	5,0 (0,6)				
- Ray-grass anglais - trèfle blanc : aérien	1,7 (0,8)				
Ray-grass anglais - trèfle blanc : total	6,7 (0,6)	2,1 (0,3)	18,0 (1,9)	100 - 150	2 000 - 3 000

* Les données concernent une luzernière de 2-3 ans et des prairies de 5-6 ans ; écarts types entre parenthèses
** petite repousse après la dernière exploitation

TABLEAU 4: **Composition en carbone et azote des résidus de légumineuses lors de la destruction des couverts et quantités C et N apportées au sol.**

TABLE 4: **Levels of C and N in legume residues following cover crop harvesting and the quantities of C and N added to the soil.**

légumineuses fourragères, la majeure partie des organes aériens 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 (VERTÈS *et al.*, 2007).

Des exemples de cinétiques de minéralisation sont illustrés en figure 4. La figure de gauche illustre les cinétiques de minéralisation des résidus végétaux de prairies monospécifiques ou mixtes ray-grass anglais - 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 pures, ce 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 cel-

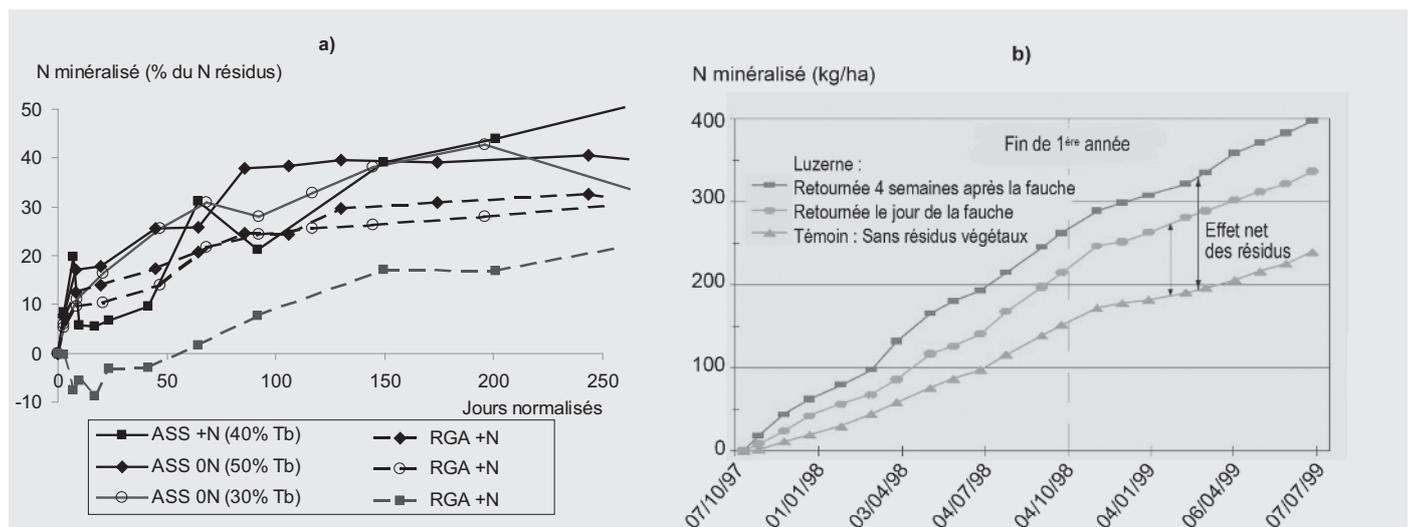


FIGURE 4: **Cinétiques de minéralisation a) des résidus de ray-grass anglais pur ou d'association ray-grass - trèfle blanc en conditions contrôlées (sol incubés en laboratoire à 15°C et humidité optimale, VERTÈS *et al.*, 2007) et b) du sol après destruction de luzerne (JUSTES *et al.*, 2001).**

FIGURE 4: **Mineralisation dynamics of a) residues from perennial ryegrass monocultures and ryegrass-white clover associations under controlled conditions (soil samples kept at 15°C and optimal humidity in the lab, VERTÈS *et al.*, 2007) and b) soil samples after the luzerne was harvested (JUSTES *et al.*, 2001).**

lulose et plus pauvres 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'arrière-effet de la destruction des prairies dans les calculs de fertilisation (COMIFER, 2013). Notons que, dans des rotations à forte charge organique (Flandres, Pays-Bas), REHEUL *et al.* (2015) observent des minéralisations d'azote similaires après destruction de prairies pâturées ou fauchées. La figure de droite illustre la minéralisation totale mesurée dans le sol après destruction de la luzerne et montre un effet «résidu» beaucoup plus élevé que celui des prairies ray-grass - trèfle précédentes, de l'ordre d'une centaine de kg/ha sur 2 ans. **Après une luzerne (2-3 ans), 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 sous forme particulière (0,2 à 2 mm), relativement plus abondantes sous prairies comparées aux cultures («effet prairies»).

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 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 sur l'année suivant la destruction**, avec une cinétique qui semble plus linéaire, sur la durée d'observation, pour la luzerne que pour les prairies pâturées (mono ou bi-spécifiques) pour lesquelles à une première phase de minéralisation élevée pendant 4-6 mois succède une deuxième phase à minéralisation plus lente (VERTÈS *et al.*, 2007; BESNARD *et al.*, 2007; RASMUSSEN *et al.*, 2012). Rajoutées 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'azote minéralisé 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 planter un colza ou une céréale, les risques de lixiviation durant l'automne suivant sont accrus par rapport à des rotations de cultures annuelles. 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 (culture intermédiaire piège à nitrate) avant le semis de céréales;
- l'implantation d'un colza après le pois;
- le remplacement de la légumineuse pure par l'association avec une céréale qui engendre moins de reliquats post-récolte.

De même, pour les rotations fourragères incluant 3-4 ans de luzerne ou 5-6 ans d'associations graminée - légumineuse, **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 planter une CIPAN efficace, blé en cours d'implantation, qui absorbe peu). 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, dans SCHNEIDER et HUYGHE, 2015); elles 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 de la culture suivante (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 de 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

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

☹ ☹ : les quantités d'azote concernées sont de l'ordre de 10 à 30 kg/ha.

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 (VÉRICEL, 2010, Chambre d'Agriculture Poitou-Charente).

TABLE 5: Effects of intermediate crops and catch crops (with or without legumes) on the levels of mineral N in the soil (nitrate capture, reduction of leaching during the winter) and on the yield of the subsequent crops grown (VÉRICEL, 2010, Chambre d'Agriculture Poitou-Charente).

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 de meilleures performances environnementales.

Concernant l'intérêt à long terme des légumineuses sur l'évolution de la matière organique des sols, 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 *et al.*, 2007; FUSTEC *et al.*, 2010) et pourrait expliquer une partie des difficultés à modéliser l'évolution des MOS en rotations fourragères (VERTÈS et MARY, 2014).

■ Evaluation, sur quelques rotations types, des quantités d'intrants azotés mis 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 d'Agriculture Poitou-Charente, 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.

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 (dans SCHNEIDER et HUYGHE, 2015) indique que pour une même rotation de 8ans, incluant 3ans de luzerne - dactyle, des céréales et un méteil céréale - protéagineux, conduite en agriculture biologique sur la ferme expérimentale de Mirecourt, 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 élevé sous céréales de printemps et maximal pour le mélange céréales - protéagineux. Une approche par modélisation (ANGLADE *et al.*, 2015) appliquée à une rotation culturale de 9ans en exploitation biologique d'Ile-de-France indique un faible excédent de bilan de 12kg N/ha/an (sans compter les dépôts atmosphériques), variant de +5 à +30 selon l'organisation de la succession ; les bilans annuels sont successivement positifs et négatifs, par exemple (en kgN/ha): +300 (cumulé sur 3ans de luzerne) -95 (blé 0N) -40 (triticale 50N) -90 (tournesol 0N) +27 (pois) -76 (blé 0N) -17 (orge 50N). Notons que

JEUFFROY *et al.* (2015) n'ont pas montré de différences significatives entre des successions blé - colza incluant ou pas un pois.

Ces approches s'affinent avec le développement des modèles (dont Syst'N, en cours de test). 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 systèmes de production.

■ Effet de légumineuses fourragères sur l'efficacité systémique d'utilisation de N 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 (exsudats), de résidus de plantes également riches en N (nodosités, 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) parmi lesquelles nous avons considéré les 24 ayant plus de 10% de légumineuses dans leur surface agricole (figure 5). La part des légumineuses dans la SAU des exploitations, au premier rang desquelles la luzerne (essentiellement en culture pure) et le trèfle blanc en mélange avec des graminées prairiales, améliore peu l'indicateur SyNE, qui augmente surtout avec la part des grandes cultures dans les sorties d'azote, car les cultures ont une efficacité de transformation de l'azote quasi double (60-70%) de celle des animaux (10-45%). Si, en revanche, le calcul est fait en rapportant l'azote produit sur l'exploitation (produits animaux et végétaux exportés) à l'azote acheté (essentiellement sous forme d'engrais et aliments) au lieu de l'azote entrant dans le système, l'efficacité augmente linéairement avec le taux de légumineuses à partir d'une proportion de légumineuses dans la SAU de 15% environ. Les 4 fermes biologiques de ce réseau, dont la principale source d'azote réactif est la fixation symbiotique, arrivent ainsi à « produire » 60 à 80% de l'azote qu'elles consomment soit une efficacité de 0,6 à 0,8. En dessous de 15-17% 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'azote.

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 sur l'azote 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 (détails dans GODINOT *et al.*, 2014)

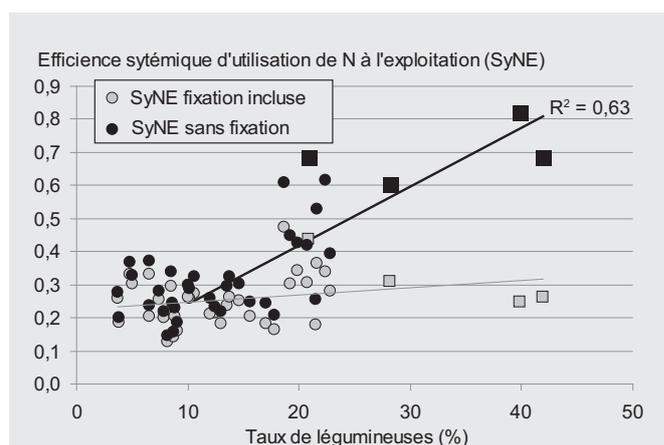


FIGURE 5: **Efficacité d'utilisation de l'azote (NUE = sorties N / entrées N) pour les 24 fermes laitières de la Coopédome dont les taux de légumineuses sont supérieurs à 10%.**

FIGURE 5: **Efficiency of nitrogen use (NUE = N output/N input) on the 24 dairy farms in the Coopédome cooperative whose pasture legume cover exceeded 10%.**

Cette augmentation de l'efficacité systémique calculée à une échelle pluri-annuelle dans une exploitation agricole intégrerait un effet direct de la fixation symbiotique (qui permet de réduire les importations d'engrais et aliments protéiques) et un effet indirect lié à l'apport N des résidus de cultures de légumineuses pour les cultures suivantes («ou effet précédent» cf. ci-dessous), qui permet également de réduire globalement les achats d'engrais. Il est en revanche peu pertinent de calculer l'indicateur «bilan apparent d'azote à l'exploitation» (SIMON *et al.*, 1992) en excluant la fixation symbiotique; en effet, de même que pour l'indicateur SyNE calculé avec la fixation, le taux de légumineuses n'influence pas significativement le solde de bilan dans le réseau de fermes laitières intensives étudiées.

Au-delà de cette illustration proposée à l'échelle de l'exploitation, des auteurs (par exemple BILLEN *et al.*, 2009; PEYRAUD *et al.*, 2014) se sont intéressés aux conséquences sur les flux d'azote d'une généralisation de l'usage des légumineuses à l'échelle de territoire, montrant un potentiel d'atténuation des émissions de GES associé à un bénéfice (de l'ordre de 300€/tCO₂ évité). 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) (2015), 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 d'aide à la décision multicritère (techniques, environnementaux et socio-économiques) 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 est variable selon les espèces, les exportations réalisées (graines / parties aériennes) et les restitutions effectuées (pâturage). La composition des résidus affecte la dynamique de décomposition pour la / les cultures suivantes.

Prélevant l'azote du sol quand celui-ci est abondant, ce sont des cultures qui absorbent les nitrates du sol; elles contribuent 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 éviter les risques de lixiviation dans le milieu.

L'intégration de leurs effets directs et indirects 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.

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

Remerciements : Les auteurs de cet article ont largement utilisé la synthèse Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables coordonnée par Anne Schneider (UNIP) 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 (juillet 2015).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANGLADE J., BILLEN G., GARNIER J. (2015): "Relationship for estimating N₂ 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 grassland: Plant, Environment and Economy*, A. de Vliegler et 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 and Environment*, 133, 3/4, 234-246.
- CAPITAINE M., PELLETIER P., HUBERT F. (2008): "Les prairies multispécifiques en France: histoire, réalités et valeurs attendues", *Fourrages*, 194, 123-136.
- 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.
- 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.), éd. Quae, 104-164. 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.
- LEDGARD S.F. (1991): "Transfer of fixed nitrogen from white clover to associated grasses in swards grazed by dairy cows, estimated using N dilution methods", *Plant and Soil*, 131, 215-223.
- LERAY F. (2014): "Un groupe d'agriculteurs innove pour renouveler les prairies en limitant les fuites d'azote. Foisonnement de l'innovation agricole", Alléard V., Huyghe C. et Vertès F., *Fourrages*, 217, 37-46.
- LOUARN G., PEREIRA-LOPÈS E., FUSTEC J., MARY B., VOISIN A.-S., CESAR DE FACCIÓ 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*, 389 (1-2), 289-305.
- 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.
- de MARGUERIE A., DENIS E., MIALON A., DESCHAMPS D. (2013): "Vers une MAE 'Systèmes de culture économes en intrants'", *Innovations Agronomiques*, 30, 219-235.
- 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.

- NYFELER D., HUGUENIN-ELIE O., SUTER M., FROSSARD E., LÜSCHER A. (2011): "Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources", *Agric Ecosyst Environ.*, 140 (1-2), 155-163.
- 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.
- 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., OLRY 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. Quae, coll Matière à débattre & décider, 115 p.
- POCHON A. (1981) : *La prairie temporaire à base de trèfle blanc*, éd. CEDAPA-ITEB (5^e édition, complétée en 2012), CEDAPA.
- 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., DENEUFBOURG 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", *Fourrages*, 224, à paraître.
- RECOUS S., CHABBI A., VERTÈS F., THIÉBEAU P., CHENU C. (2015): "La fertilité des sols: quels processus impliqués, quelles interactions sous l'influence des pratiques culturales?", *Fourrages*, 223, cet ouvrage, 189-196.
- REHEUL D., COUGNON M., DE CAUWER B., SWANCKAERT J., PANNECOUCQUE J., D'HOSE T., VAN DER NEST T., DE CAESTECKER E., VAES C., PEETERS A., BAERT J., DE Vlieghe A. (2015): "Production potential of grassland and fodder crops in high-output systems in the low countries in north-western Europe and how to deal with the limiting factors", *Grassland and Forage in high output dairy farming systems*, van den Pol-van Dasselaar A. et al. eds., *Grassland Science in Europe*, 20, 139-150.
- SCHNEIDER A., HUYGHE C. (coord.) (2015): *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, éd. Quae, 512 p.
- SIMON J.C., LE CORRE L. (1992): "Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole: méthodologie, exemples de résultats", *Fourrages*, n°129, 79-94.
- 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*, éd. Cambridge University Press, 612 p.
- VÉRICEL G. (2010): *Mieux gérer l'interculture pour un bénéfice agronomique et environnemental. Légumineuses, comment les utiliser comme cultures intermédiaires ?*, Chambre Régionale d'Agriculture Poitou-Charente, 24 p.
- VERTÈS F., MARY B. (2014): "Part of grassland in ley-arable rotations is a proxy for predicting long term soil organic matter dynamics", *Proc. 18th Nitrogen Workshop*, 30 June - 3 July, 2010, 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.
- 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 Vlieghe et L. Carlier eds., *Permanent and temporary grassland: Plant, Environment and Economy*, *Grassland Science in Europe*, 12, 227-246.
- VOISIN A.S., GASTAL F. (2015): "Nutrition azotée et fonctionnement agrophysiologique spécifique des légumineuses", *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, A. Schneider, C. Huyghe (coord.), éd. Quae,
- 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.

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/> (par exemple volumes 11 (2010) sur les légumineuses et 40 (2014) sur les associations)

www.arvalisinstitutduvegetal.fr/ et <http://idele.fr/>



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



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

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

Association Française pour la Production Fourragère