

Juin 2019
volume n°9 / numéro 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Gestion de la fertilisation

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.
Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.
Contact : afa@inrae.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45
Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agricultures, Cirad
Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad
Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénieure à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistante éditoriale

Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément (voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

7 AVANT-PROPOS

7 Avant-propos

A. MESSÉAN Président de l'AFA et O. RÉCHAUCHÈRE Rédacteur en chef

9 Éditorial

O. RÉCHAUCHÈRE et M.H. JEUFFROY, coordonnateurs du numéro



11 ENTREE EN MATIERE / PREAMBULE / CONTEXTE GLOBAL

13 De la fertilisation des cultures à la cascade de l'azote

P. CELLIER

19 ECLAIRAGES SUR LA GESTION ACTUELLE DE LA FERTILISATION DES CULTURES

21 Comparaison de la multifonctionnalité relative aux flux azotés induits par dix cultures de légumineuses

Maé GUINET - Bernard NICOLARDOT - Anne-Sophie VOISIN

31 Gestion de l'azote sur le blé biologique en Île-de-France

Charlotte GLACHANT

41 Rappels réglementaires sur l'utilisation des engrais et amendements organiques en agriculture biologique

Blaise LECLERC

43 LES NOUVELLES APPROCHES DE LA FERTILISATION

45 50 ans de méthode du Bilan : progrès passés et limites actuelles

Jean-Marc MEYNARD et Marie-Hélène JEUFFROY

55 Une nouvelle approche de la fertilisation des cultures

G. LEMAIRE

65 APPI-N : une nouvelle approche pour le raisonnement de la fertilisation azotée du blé

Marie-Hélène JEUFFROY, Clémence RAVIER, Arthur LENOIR, Jean-Marc MEYNARD

75 Mise au point du pilotage intégral de l'azote avec le modèle de culture CHN : approche « CHN-conduite »

B. SOENEN, M. BONNEFOY, C. DELPECH, B. PIQUEMAL, P. DESCAZEUX, F. DEGAN, F. LAURENT

87 Évaluation de la disponibilité et la gestion du phosphore dans les agrosystèmes : avancées scientifiques et techniques

Alain MOLLIER, Pascal DENOROY, Christian MOREL

99 Penser la gestion de l'azote autrement : témoignage sur le BAC du Tremblay-Omonville

Marine GRATECAP

105 Nouvelle approche de la fertilisation azotée pour répondre à de nouveaux enjeux : « revaloriser l'expertise agronomique des conseillers et des agriculteurs ».

Entretien avec Bertrand OMON

Comparaison de la multifonctionnalité relative aux flux azotés induits par dix cultures de légumineuses

Comparison of multifunctionality relative to nitrogen fluxes induced by ten legume crops

Maé GUINET* - Bernard NICOLARDOT* - Anne-Sophie VOISIN*

* Agroécologie, AgroSup Dijon, INRA, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France - 17 rue Sully - 21000 Dijon (France) - courriel : anne-sophie.voisin@inrae.fr - Tel. +33 (0)3 80 69 36 34

Résumé

Les légumineuses sont à l'origine de fonctions uniques et/ou complémentaires à celles d'autres groupes d'espèces (céréales, oléagineux) sur lesquelles reposent des services écosystémiques relatifs à l'azote. Pourtant, le choix des légumineuses à graines selon leur aptitude à fournir ces services écosystémiques reste difficile compte tenu du manque de références sur une diversité d'espèces. Au cours d'une succession culturale de deux ans (légumineuse – blé), cinq flux azotés et plusieurs traits de plantes considérés comme explicatifs de ces flux azotés ont été mesurés, afin de dresser le profil fonctionnel de dix espèces de légumineuses à graines. Il s'agissait de comprendre les synergies et les antagonismes entre les flux azotés et entre les traits de plantes explicatifs de ces flux. La caractérisation et la distinction des espèces de légumineuses quant à leur aptitude à délivrer des services écosystémiques relatifs à l'azote permet d'aider au choix des espèces selon les objectifs attendus.

Mots clés : légumineuses à graines, services écosystémiques, traits de plantes, profil fonctionnel, Bourgogne

Abstract

Legumes deliver unique and/or complementary functions to those of other groups of species (cereals and rich-oil crops), which support many ecosystem services related to nitrogen. However, the choice of grain legumes according to their ability to provide those ecosystem services remains difficult due to a lack of references for a diversity of species. During a two year succession (legume – wheat), five nitrogen fluxes and several explanatory plant traits of these fluxes were measured in order to establish the functional profile of ten grain legumes. The objective was to better understand the synergy and trade-off between the different nitro-

gen fluxes and hence the explanatory plant traits. The characterization and the distinction of grain legumes according to their ability to deliver ecosystem services assist the choice of legumes species according to the intended objectives.

Key words: grain legumes, ecosystem services, plant traits, functional profile, Burgundy

Introduction

L'essor d'une agriculture durable nécessite de maximiser la production de biens agricoles reposant sur des services écosystémiques, c'est-à-dire les avantages socio-économiques retirés par l'homme de son utilisation durable des fonctions écologiques des écosystèmes, afin de limiter le recours aux intrants de synthèse tels que les fertilisants azotés (Tibi and Therond, 2017).

La fourniture de services écosystémiques repose notamment sur la réintroduction de la biodiversité spatiale et temporelle (Isbell et al., 2011) dans les agrosystèmes. En effet, la diversité des espèces constitutives des écosystèmes agricoles est à l'origine de différentes fonctions résultant de processus écologiques, et sur lesquelles reposent un certain nombre de services écosystémiques.

Les légumineuses sont à l'origine de fonctions uniques et/ou complémentaires avec d'autres cultures, et ont dans ce sens un rôle prépondérant à jouer dans la fourniture de services écosystémiques relatifs à l'azote, notamment lors de leur réintroduction dans des systèmes de culture majoritairement composés de céréales et/ou d'oléagineux. En effet, les légumineuses permettent d'assurer la production de biens agricoles grâce à la production de graines riches en protéines. Elles permettent également de fournir des services de fourniture d'azote aux cultures grâce à l'acquisition d'azote pendant la croissance des légumineuses via le processus de fixation symbiotique et grâce à la fourniture d'azote à la culture suivante via le processus de minéralisation de leurs résidus de culture plus ou moins riches en azote. Néanmoins, des impacts négatifs liés à l'azote peuvent également résulter de l'introduction des légumineuses dans les systèmes de culture. La plus faible capacité des légumineuses à prélever l'azote minéral du sol par rapport aux céréales (Hauggaard-Nielsen et al., 2001) ainsi que la désynchronisation entre l'apport d'azote au sol par les résidus de légumineuses et les besoins en azote de la culture suivante, peuvent générer des risques de pertes d'azote par lixiviation pendant la culture des légumineuses et/ou après leur récolte durant la période automne-hiver.

Compte tenu de l'existence d'une diversité des légumineuses à graines, l'un des enjeux consiste à caractériser les espèces selon leur capacité à remplir les fonctions associées aux services recherchés afin d'aider aux choix des espèces les plus appropriées selon les usages recherchés (Damour et al., 2014) et d'adapter la gestion de l'azote dans les systèmes de culture dans lesquels des légumineuses sont cultivées. Il s'agit ainsi d'identifier les synergies ou les antagonismes entre les différentes fonctions associées aux légumineuses, afin de déterminer l'aptitude des différentes espèces de légumineuses à fournir simultanément plusieurs services tout en limitant les potentiels impacts négatifs (Bennett et al., 2009).

Cependant, la mesure systématique des différents flux azotés (indicateurs des fonctions azotées) induits par les espèces légumineuses dans différentes conditions environnementales peut être fastidieuse et coûteuse en moyens et en temps, surtout lorsqu'un grand nombre d'espèces sont comparées. Pour pallier à ces limites, les espèces peuvent être décrites par leurs « traits » considérés comme déterminants dans l'obtention des fonctions (Garnier and Navas, 2012). Les traits de plantes sont communément définis comme toutes caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques mesurables à l'échelle individuelle, de la cellule à l'organisme entier, sans référence à l'environnement ou tout autre niveau d'organisation (Violle et al., 2007). Les espèces peuvent donc être caractérisées et classées selon une combinaison d'attributs de traits similaires (valeurs prises pour chaque trait mesuré dans un environnement et à un temps donné), utilisés comme prédicteurs de fonctions de l'écosystème et des services écosystémiques ou impacts négatifs qui en découlent.

Dans cette étude, nous nous intéressons simultanément à cinq flux d'azote, engendrés par les cultures de légumineuses et aux traits de plantes ou propriétés du couvert (équivalent des traits mesurés à l'échelle du couvert) déterminants dans l'obtention de ces flux. Il s'agit de caractériser la multifonctionnalité relative à l'azote pour dix espèces de légumineuses à graines, à l'échelle d'une succession culturale de deux ans (légumineuse suivie d'un blé).

Matériels et Méthodes

Expérimentations mobilisées

Deux essais bisannuels ont été mis en place au domaine expérimental de Bretenière de l'INRA de Dijon, afin de quantifier les flux d'azote induits par les légumineuses et mesurer certaines propriétés du couvert. Le site est caractérisé par un sol de type argilo calcaire ($\approx 45\%$ d'argile) avec une profondeur de 60 cm (± 15 cm). Neuf espèces de légumineuses ont

été cultivées en 2014 et 2016 en l'absence de fertilisation azotée et semées en mars : féverole (cv. Espresso), lentille (cv. Anicia), lupin (cv. Feodora), pois (cv. Kayanne), vesce commune (cv. Candy), ou en mai : haricot (cv. Flavert), pois chiche (cv. Twist en 2014 et Vulcano en 2016), soja (cv. Sultana 000), et vesce de Narbonne (cv. Clara) selon la physiologie des espèces (Figure 1). En 2016, une dixième espèce, le fenu-grec (cv. Fenu-fix), a également été semée en mars. Toutes les légumineuses ont été inoculées au semis avec une souche de *Rhizobium* spécifique pour assurer la fixation symbiotique. Afin de comparer les flux azotés induits par les légumineuses à ceux de céréales, deux céréales ont également été semées en 2014 et 2016 ; de l'orge (cv. Irina) en mars et du sorgho (cv. Quebec) en mai. Une fertilisation azotée raisonnée a été appliquée aux deux céréales (orge : 135 kg N ha⁻¹ en 2014 et 75 kg N ha⁻¹ en 2016, sorgho 100 kg N ha⁻¹ en 2014 et 2016). Une fois les graines récoltées, les résidus de culture de légumineuses et céréales ont été broyés et enfouis dans le sol. Les graines n'ont cependant pas été récoltées pour la vesce de Narbonne en 2014 et 2016 et pour le pois chiche en 2014, du fait de conditions climatiques non favorables à la production de graines pour ces espèces. Ces situations seront considérées par la suite comme « engrais verts ». A l'automne, un blé d'hiver (cv. Rubisko), conduit sans fertilisation azotée, a été semé à la suite de tous les précédents légumineuses et céréales (Figure 1). Le blé a ensuite été récolté en juillet de l'année suivante (2015 et 2017). Afin de réduire au maximum les facteurs limitants la croissance des cultures, les précédents légumineuses et céréales ainsi que le blé suivant ont été irrigués quand nécessaire afin de limiter le stress hydrique. De même, les adventices ont été désherbées manuellement tout au long des essais et un traitement insecticide (Kara Zeon) a été appliqué sur les cultures précédentes en 2014 et 2016. Afin d'observer l'architecture des racines et la dynamique de leur développement au cours du temps, les dix mêmes espèces de légumineuses ont été cultivées en rhizotrons, au sein de la plateforme INRA de phénotypage 4PMI de Dijon.



Figure 1 : Photos des parcelles des précédents légumineuses et céréales en 2014 (A) et du blé suivant en 2015 (B).

Flux azotés mobilisés

Plusieurs flux azotés induits par les dix légumineuses et les deux céréales ont été quantifiés à l'issue des deux d'expérimentations au champ (Figure 2). Il s'agit de :

- La quantité d'azote exportée par les graines (QN_graines), qui caractérise la production de biens agricoles via le processus d'accumulation d'azote dans les graines. Ce flux a été mesuré à maturité des légumineuses et des céréales en 2014 et 2016 ;

- La quantité d'azote dans les parties aériennes des légumineuses issue du processus de fixation symbiotique (QNdfa), à l'origine du service de « fourniture d'azote » aux légumineuses. Ce flux a été mesuré à maturité des légumineuses en 2014 et 2016 ;

- La quantité totale d'azote dans les parties aériennes du blé non fertilisé (QN_blé) cultivé après les légumineuses et céréales, rend compte du service de « fourniture d'azote » au blé suivant. Ce flux a été mesuré à maturité du blé en 2015 et

2017. La quantité d'azote dans le blé ne renseigne pas directement la quantité d'azote issue de la minéralisation des résidus de légumineuses et céréales. Cependant, le blé n'étant pas fertilisé en azote, elles permettent de révéler les différences entre les espèces de légumineuse en tant que précédent, car les différences de quantités d'azote dans le blé entre modalités proviennent en partie du processus de minéralisation de l'azote des résidus des précédents légumineuses et céréales ;

- La quantité d'azote minéral du sol prélevée par les légumineuses et les céréales durant leur cycle (QNdfsol) rend compte de la capacité des légumineuses à valoriser l'azote du sol. Cette quantité a été considérée comme un indicateur de la quantité d'azote minéral non lixiviée pendant leur culture, à l'origine du service de « régulation de la qualité de l'eau vis-

à-vis de l'azote ». Ce flux a été mesuré à maturité des légumineuses et des céréales en 2014 et 2016. Pour les céréales, l'azote minéral issu du sol (QNdfsol) a été distingué de l'azote issu du fertilisant (QNdf_ferti). Pour y parvenir une modalité avec les mêmes céréales non fertilisées en azote a été utilisée. La quantité d'azote issue du fertilisant (QNdf_ferti) a été calculée comme étant la différence entre la quantité totale d'azote dans les céréales fertilisées et la quantité d'azote dans les céréales non fertilisées ;

- La quantité d'azote lixiviée (QN_lixivée) entre la récolte des précédents légumineuses et céréales, et la récolte du blé l'année suivante caractérise l'impact négatif de « pollution de l'eau par les nitrates ». La quantité d'azote lixiviée a été estimée par modélisation avec le modèle STICS pour les dix précédents légumineuse et les deux céréales fertilisées en azote, et pour les deux expérimentations au champ.

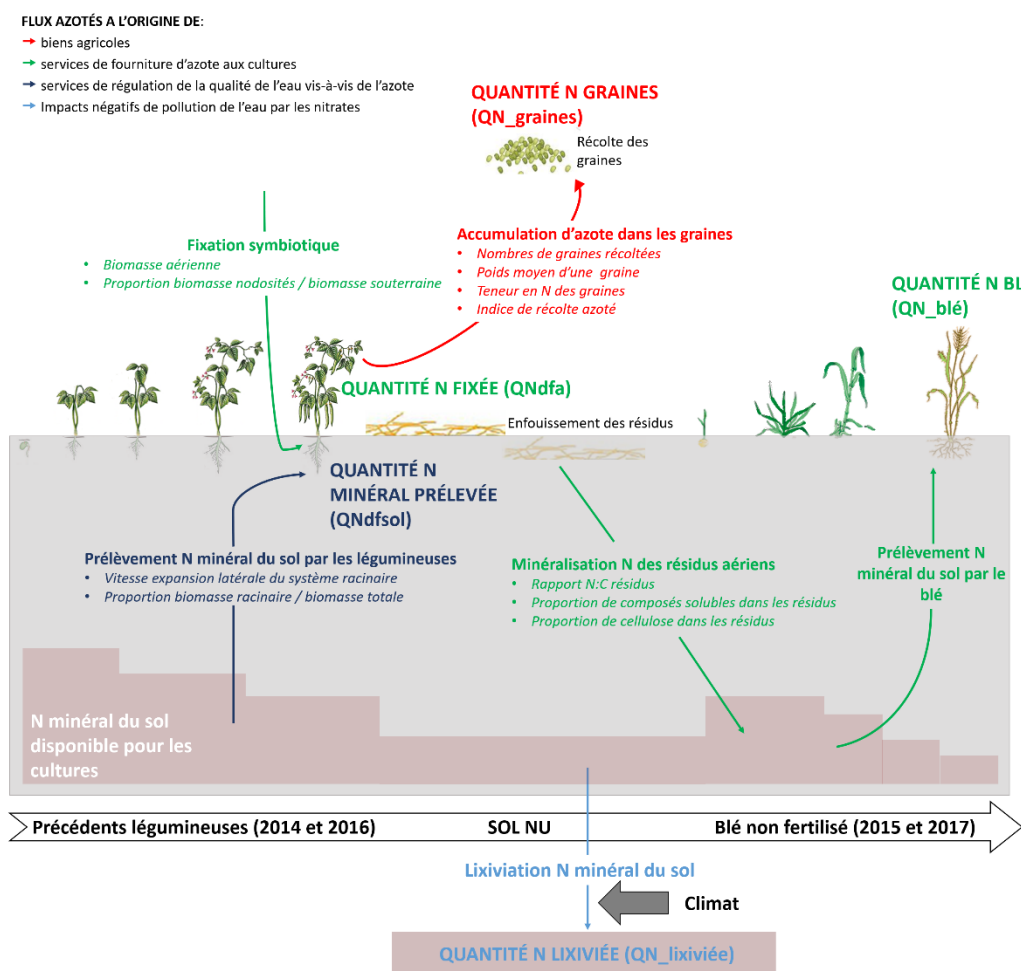


Figure 2 : Représentation des flux azotés à l'origine de la fourniture de services écosystémiques et d'impacts négatifs relatifs à l'azote au cours d'une succession culturale de deux ans (légumineuse – blé). Les flux azotés (MAJUSCULE EN GRAS) sont ici considérés comme des indicateurs des fonctions qui résultent de processus (minuscule en gras). Le niveau du flux azoté varie selon les valeurs de traits de plantes et de propriétés du couvert (minuscule en italique).

Traits de plantes et propriétés du couvert associés aux flux d'azote

A l'issue des deux expérimentations au champ et de l'essai en rhizotron, plusieurs traits de plantes et propriétés du couvert, considérés comme déterminants pour l'obtention des flux azotés, ont été mesurés pour les dix espèces de légumineuses. Au champ, des prélèvements aériens ont été effectués à maturité des légumineuses. Pour l'expérimentation en

rhizotron, des images du système racinaire ont été prises au cours du temps afin de suivre la croissance racinaire. Vingt-sept jours après le semis, les plantes ont été prélevées et les parties aériennes, les racines et les nodosités ont été séparées afin de déterminer les biomasses sèches des différents organes.

Propriétés du couvert associées aux flux azotés à l'origine de la production de biens agricoles

Des propriétés de couvert supposées comme déterminantes pour la production de graines riches en protéines ont été mesurées (Figure 2). La quantité d'azote dans les graines de légumineuses varie selon l'accumulation en carbone et en azote de la plante dans les graines. Deux propriétés du couvert ont été considérées comme déterminantes pour l'accumulation en carbone dans les graines par la plante, à savoir le nombre de graines récoltées par unité de surface et le poids moyen d'une graine récoltée. Deux autres propriétés du couvert ont été considérées comme déterminantes pour l'investissement en azote dans les graines par la plante par rapport aux parties végétatives (pailles) : la teneur en azote des graines et l'indice de récolte azoté, défini comme le rapport entre la quantité d'azote des graines et la quantité d'azote totale des parties aériennes à la récolte.

Traits de plantes et propriétés du couvert associés aux flux azotés à l'origine de services de fourniture d'azote aux cultures

La demande en azote pour la croissance est souvent identifiée comme déterminante pour la quantité d'azote fixée par les légumineuses (Anglade et al., 2015). Ainsi, la biomasse sèche aérienne a été mesurée au champ à maturité afin de caractériser la demande en azote du couvert (Figure 2). Un trait de plante supplémentaire, mesuré sur les plantes cultivées en rhizotrons, a également été sélectionné. Il s'agit du rapport biomasse nodulaire sur la biomasse souterraine totale (racines + nodosités) qui renseigne sur le compromis de répartition de biomasse entre les deux organes d'acquisition de l'azote chez les légumineuses : les racines (organe de prélèvement de l'azote minéral du sol) et les nodosités (organes de la fixation symbiotique).

Plusieurs propriétés des résidus aériens sont considérées comme explicatives des différences de minéralisation de l'azote (Kumar and Goh, 2000). La minéralisation de l'azote des résidus de légumineuses a été considérée comme déterminante pour comprendre les quantités d'azote dans le blé suivant à maturité. Trois caractéristiques biochimiques des résidus aériens de légumineuses ont été retenues pour expliquer les différences de minéralisation des résidus aériens et donc des quantités d'azote dans le blé suivant (Figure 2) : le rapport azote/carbone, la proportion de composés solubles et la proportion de cellulose.

Traits de plantes associées aux flux azotés à l'origine de services de régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis de l'azote

La capacité de prélèvement de l'azote minéral du sol par les cultures de légumineuses module la quantité d'azote minéral laissée dans le sol et susceptible d'être perdue par lixiviation. La capacité de prélèvement de l'azote minéral peut varier selon la capacité du système racinaire à explorer le volume de sol. La vitesse d'expansion latérale du système racinaire, a été retenue comme particulièrement explicative des différences de prélèvement de l'azote minéral du sol entre les espèces de légumineuses (Guinet et al., 2018) (Figure 2). Un trait de plante supplémentaire mesuré en rhizotron a été considéré. Il s'agit du rapport biomasse racinaire sur biomasse totale qui

renseigne sur l'investissement de la biomasse dans les racines.

Traits de plantes et propriétés du couvert modulant potentiellement la lixiviation de l'azote

La quantité d'azote lixiviée après la récolte des légumineuses varie selon les conditions climatiques (précipitations qui entraînent l'azote minéral non utilisé vers les aquifères) mais également selon la quantité d'azote minéral du sol disponible après la récolte des légumineuses. La quantité d'azote minéral disponible varie selon le reliquat azoté après la récolte des légumineuses (potentiellement modulé par la capacité des légumineuses à prélever l'azote minéral du sol pendant leur cycle) et selon la minéralisation de l'azote des résidus de légumineuses. Ainsi au-delà des conditions climatiques, les traits de plantes et propriétés du couvert identifiés ci-dessus comme déterminants dans le prélèvement d'azote minéral et dans la minéralisation des résidus de culture sont également considérés déterminants pour les quantités d'azote lixiviées après la récolte des légumineuses.

Calcul du solde azoté apparent

Le solde azoté apparent renseigne sur la modification du stock azoté du sol après une culture de légumineuse. Il a été calculé comme la différence entre la quantité d'azote biologique (N_2) fixée dans les parties aériennes via le processus de fixation symbiotique (QNdfa) et la quantité d'azote exportée par les graines de légumineuses (QN_graines). Un solde apparent positif traduit une entrée d'azote issu de la fixation symbiotique dans le système de culture. Le solde azoté apparent a été calculé sur les campagnes 2014 et 2016.

Résultats

Variabilité des flux azotés induits par les légumineuses et les céréales

Une comparaison entre les dix légumineuses et les deux céréales a été effectuée à partir de la mesure des différents flux azotés induits par ces cultures au cours des deux expérimentations au champ (Figure 3). En général les légumineuses exportent plus d'azote dans les graines par rapport aux céréales (QN_graines) et génèrent de plus grandes quantités d'azote dans le blé suivant (QN_blé). Au contraire, les légumineuses ont tendance à prélever de plus faibles quantités d'azote minéral du sol (QNdfsol). Les légumineuses se distinguent également des céréales par leur mode de nutrition azotée puisque leurs besoins azotés sont comblés par la fixation symbiotique (QNdfa) tandis que les besoins azotés des céréales sont compensés par le prélèvement d'azote apporté par fertilisation (QNdf_ferti). Ces résultats confirment les services relatifs à l'azote fournis par les légumineuses par rapport aux céréales (production de graine riches en azote, diminution du recours aux intrants azotés pendant et après leur culture). D'autre part, la plus faible capacité des légumineuses à prélever de l'azote minéral pendant leur cycle par rapport aux céréales peut engendrer de plus grands risques de pertes d'azote par lixiviation lors de l'insertion de légumineuses dans les systèmes de culture (même si dans notre étude aucune différence significative n'a été observée pour

les quantités d'azote lixiviées (QN_lixiviée) après les précédents légumineuses par rapport aux précédents céréales). Il existe par ailleurs une grande variabilité pour chacun des flux azotés étudiés, au sein des dix espèces de légumineuses et des deux expérimentations (Figure 3). La quantité d'azote dans les graines (QN_graines) et la quantité d'azote fixée (QNdfa) présentaient la plus grande variabilité. En effet, les valeurs de QN graines étaient comprises entre 59 et 371 kg N ha⁻¹ (en pour les espèces de légumineuses avec production de graines) et les valeurs de QNdfa variaient entre 39 et 417 kg N ha⁻¹. La quantité d'azote dans blé suivant (QN_blé) était par contre beaucoup moins variable entre les différents précédents légumineuses et les deux expérimentations avec des valeurs comprises entre 50 kg et 112 kg N ha⁻¹.

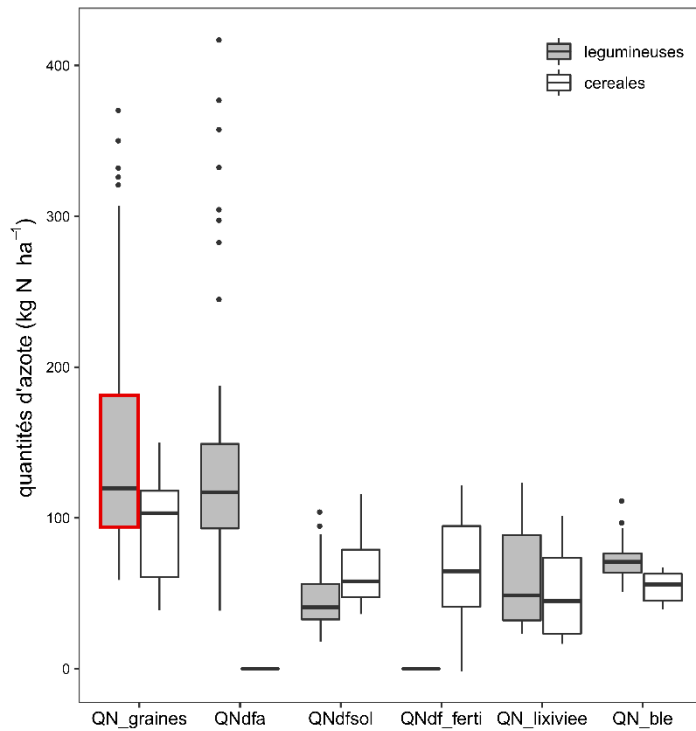


Figure 3 : Variabilité des flux azotés induits par les dix espèces de légumineuses et les deux céréales fertilisées. Le cadre rouge indique que seules les légumineuses avec une production de graines ont été prises en compte

La suite de cette étude s'est focalisée sur l'analyse des différences entre les dix espèces de légumineuses en termes de flux azotés. Pour y parvenir une analyse de Redondance (RDA) a été réalisée afin d'évaluer les synergies et les antagonismes entre les flux azotés et déterminer les traits de plantes et propriétés du couvert les plus explicatifs de ces flux azotés. La Figure 4A indique que sur les deux premiers axes, les traits et propriétés expliquent 66.1 % de la variabilité totale (respectivement, 47.3 et 18.8 % pour les axes 1 et 2).

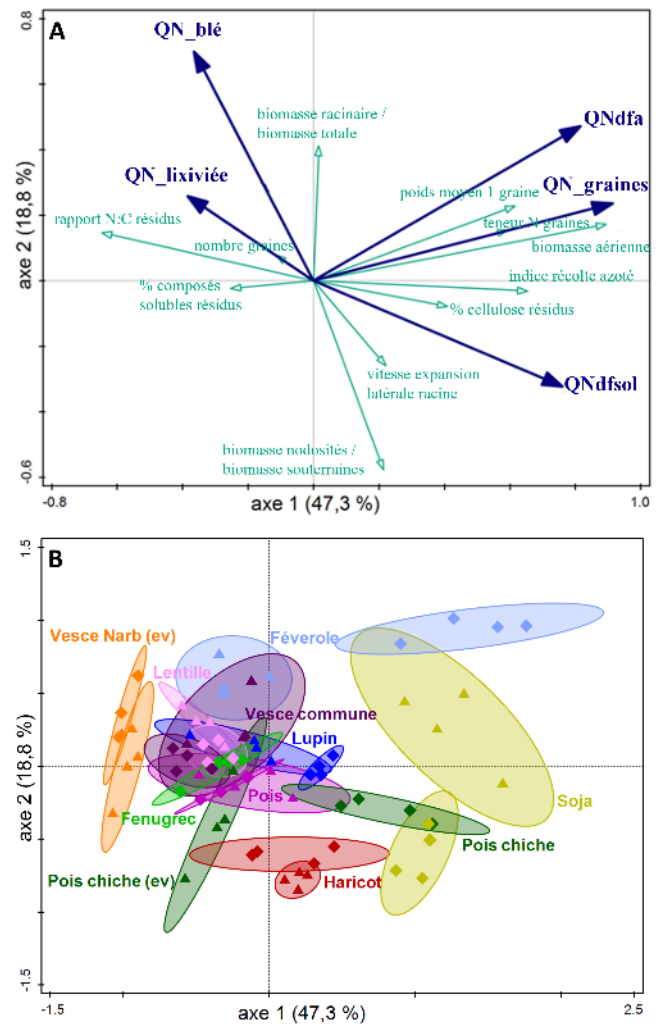


Figure 4 (A) : Représentation des variables de l'analyse de redondance (RDA) afin d'identifier les relations entre les flux azotés (variables de réponses : flèches épaisses bleues foncées) et les traits de plantes et propriétés du couvert (variables explicatives : flèches fines bleues claires). (B) : Projection des individus sur l'analyse de redondance. Les ellipses représentent les intervalles de confiance à 95 % pour chacune des espèces et chaque année de culture des légumineuses : 2014 (▲) ; 2016 (◆). Les espèces pour lesquelles il n'y a pas eu de production de graines sont indiquées par (ev : engrais vert).

Synergie entre la production de graines et la fixation symbiotique de l'azote

Les résultats de la RDA mettent en avant une forte corrélation positive entre la quantité d'azote dans les graines de légumineuses (QN_graines) et la quantité d'azote des parties aériennes des légumineuses issue de la fixation symbiotique (QNdfa) (Figure 4A). Les flux QN_graines et QNdfa sont aussi positivement corrélés avec la biomasse aérienne, la teneur en azote des graines, le poids moyen d'une graine et l'indice de récolte azoté.

Ces relations indiquent que la quantité d'azote dans les graines de légumineuses dépend dans un premier temps de la croissance (biomasse aérienne) de la plante. En effet, le niveau de croissance définit la demande azotée et donc la capacité de la plante à accumuler de l'azote. Sur la base des variations entre espèces et années, une relation positive entre la biomasse aérienne à maturité et la quantité d'azote fixée a été mise en évidence, avec en moyenne 25 kg N fixés par

tonne de matière sèche aérienne (Figure 5). Par conséquent, compte tenu du rôle majeur joué par la croissance aérienne en tant que déterminant de l'activité fixatrice, l'amélioration des facteurs limitant la croissance est essentiel afin d'augmenter les quantités d'azote fixé tel que souligné par Crews and Peoples (2004). Cela passe notamment par la présence dans le sol de souches de *Rhizobium* spécifiques aux différentes espèces de légumineuses.

Par ailleurs, la quantité d'azote dans les graines dépend également de la part d'azote remobilisée des parties végétatives vers les graines durant la phase de remplissage des graines en fin de cycle. Les résultats de la RDA indiquent que l'indice de récolte azoté est d'autant plus grand que la teneur en azote des graines et la taille des graines sont importantes (Figure 4A).

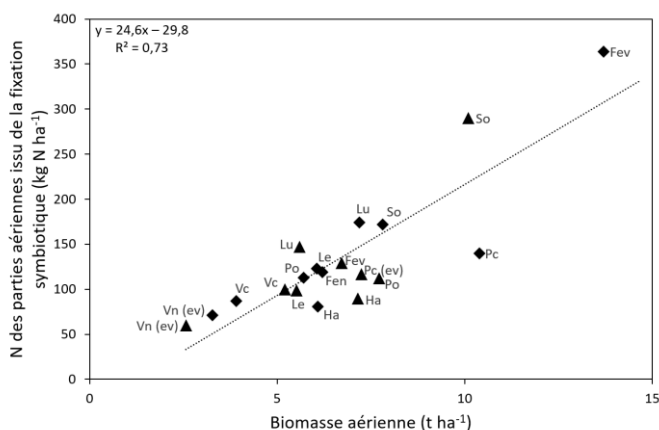


Figure 5 : Relation entre la quantité d'azote des parties aériennes issue de la fixation symbiotique et la biomasse aérienne (A) mesurées au champ à maturité pour dix espèces de légumineuses et deux années de culture : 2014 (▲) ; 2016 (◆). Les espèces de légumineuses sont identifiées par les abréviations suivantes : fenugrec (Fen) ; féverole (Fev) ; haricot (Ha) ; lentille (Le) ; lupin (Lu) ; pois (Po) ; pois chiche (Pc) ; soja (So) ; vesce commune (Vc) ; vesce de Narbonne (Vn). Les espèces pour lesquelles il n'y a pas eu de production de graines sont indiquées par (ev : engrais vert)

Apport d'azote symbiotique au système de culture

Il est intéressant de raisonner en termes de solde azoté pour le sol en étudiant la part relative de la quantité d'azote fixée (QNdfa) par rapport à la quantité d'azote dans les graines de légumineuses (QN_graines). Le solde azoté apparent permet ainsi d'estimer la quantité d'azote apportée au sol par le processus de fixation symbiotique et d'identifier les différences entre les espèces de légumineuses (tableau 1).

En 2014, le solde azoté apparent moyen était de 10 kg N ha⁻¹ avec des valeurs comprises entre -37 et +117 kg N ha⁻¹. Les plus fortes valeurs ont été mesurées pour le pois chiche et la vesce de Narbonne (en moyenne +89 kg N ha⁻¹) du fait de l'absence de production de graines tandis que des valeurs négatives ont été mesurées pour le soja, le haricot le lupin et le pois (en moyenne -28 kg N ha⁻¹). La féverole, la vesce commune et la lentille avaient un solde azoté apparent proche de 10 kg N ha⁻¹. En 2016, le solde azoté apparent moyen était de +13 kg N ha⁻¹ avec des valeurs comprises entre -44 et +48 kg N ha⁻¹. Hormis le soja et le pois chiche, le reste des légumineuses avaient

en 2016 un solde azoté apparent supérieur en moyenne de 23 kg N ha⁻¹ par rapport à celui de 2014.

Le solde azoté est augmenté dans les situations dans lesquelles la fixation symbiotique est favorisée par de faibles reliquats azotés au semis des légumineuses ou par de forts niveaux de croissance, tel qu'indiqué par la relation entre la biomasse aérienne et la quantité d'azote fixée (Figure 5). En 2016 une plus grande proportion d'azote était issue de la fixation symbiotique par rapport à 2014 (en moyenne 75 % en 2016 et 69 % en 2014) et explique en partie les plus grandes valeurs de soldes azotés mesurées en 2016 par rapport à 2014.

De forts niveaux de fixation symbiotique ne sont cependant pas suffisants pour assurer un solde azoté apparent positif. En 2016, les plus fortes valeurs de solde azoté apparent découlent également de plus faibles indices de récolte azoté par rapport à 2014 (en moyenne 58 % en 2016 et 64 % en 2014). Du fait de la récolte de graines, contrairement à 2014, le pois chiche présentait un solde azoté apparent négatif en 2016. Les très grandes valeurs d'indice de récolte azoté, mesurées pour le lupin et le soja lors des deux années d'expérimentation ont conduit à des valeurs négatives de soldes azotés apparents.

Pour un niveau de fixation symbiotique donné, il existe donc un antagonisme entre la maximisation du transfert d'azote dans les graines et la restitution d'azote au sol. Notre étude ne prend cependant pas en compte l'azote issu de la fixation symbiotique et accumulé dans les parties souterraines car elle est difficile à quantifier. Pourtant, lorsque celles-ci sont prises en compte, le solde azoté est augmenté (Anglade et al., 2015).

Antagonisme entre les quantités d'azote minéral prélevées par les légumineuses et les quantités d'azote lixiviées après leur récolte

La quantité d'azote minéral du sol prélevée par les légumineuses (QNdfsol) est positivement corrélée avec la proportion de biomasse des nodosités sur la biomasse souterraine, à la vitesse d'expansion latérale du système racinaire et à la biomasse aérienne (Figure 4A). Il existe cependant une corrélation négative entre, d'une part le flux QNdfsol, et d'autre part la quantité d'azote lixiviée après la récolte des légumineuses (QN_lixiviée). Cette dernière relation indique que les légumineuses, avec une grande capacité de prélèvement d'azote minéral, limitent non seulement le risque de lixiviation pendant le cycle des légumineuses, mais également après leur récolte, en limitant le reliquat azoté à la récolte et donc les quantités d'azote minéral susceptibles d'être lixiviées après leur récolte.

La relation positive établie entre la biomasse aérienne et la quantité d'azote minéral du sol prélevée par les légumineuses (QNdfsol) suggère que l'accumulation d'azote via le prélèvement d'azote minéral dépend du niveau de croissance de la plante qui définit les besoins azotés.

La relation positive entre la quantité d'azote minéral du sol prélevée par les légumineuses et la proportion de biomasse nodulaire par rapport à la biomasse souterraine totale peut sembler étonnante. En effet, ce trait est plutôt assimilé au coût en carbone nécessaire au fonctionnement des nodosités aux dépens des racines (Voisin et al., 2003). Cependant, une très grande allocation de biomasse aux nodosités représente

un fort coût carboné pour la plante, limitant à la fois le développement des racines et des parties aériennes (Bourion et al., 2007). Ainsi, nous faisons l'hypothèse qu'en présence d'azote minéral dans le sol, les plantes pour lesquelles les nodosités engendrent un coût carboné important, favorisent au maximum le prélèvement d'azote minéral via le développement des racines, limitant ainsi le recours à la fixation symbiotique coûteuse en énergie pour la plante.

Contrairement à la vitesse d'expansion latérale du système racinaire, aucune relation n'a été établie entre le prélèvement

d'azote minéral par les légumineuses et la proportion de biomasse de la plante allouée aux racines. La biomasse totale ne donne pas d'indication sur l'architecture racinaire qui détermine en partie la capacité de prélèvement des nutriments du sol tel qu'indiqué par Garnett et al. (2009). Ainsi, pour une même proportion de biomasse allouée aux racines, la zone d'exploration racinaire ainsi que la densité racinaire peuvent fortement varier selon les espèces (Dunbabin et al., 2003) et moduler la capacité de prélèvement de l'azote minéral.

	N total des parties aériennes (kg N ha ⁻¹)		N des parties aériennes issu de la fixation symbiotique : QNd _{fa} (kg N ha ⁻¹)		N des parties aériennes issu du prélèvement de l'azote minéral du sol : QNd _{fsol} (kg N ha ⁻¹)		N des graines : QN _{graines} (kg N ha ⁻¹)		% Nd _{fa} des parties aériennes (%)		Indice de récolte azoté (%)		Solde N apparent (kg N ha ⁻¹)	
Année 2014														
Pois chiche (ev)	161	(30)	117	(20)	41	(12)	0	(0)	73	(4)	0	(0)	117	(20)
Vesce de Narbonne (ev)	94	(23)	60	(15)	30	(9)	0	(0)	64	(3)	0	(0)	60	(15)
Féverole	177	(17)	129	(14)	45	(6)	116	(12)	73	(3)	66	(2)	13	(7)
Vesce commune	144	(19)	100	(10)	43	(10)	91	(12)	69	(3)	63	(1)	9	(4)
Lentille	139	(15)	99	(11)	39	(5)	93	(11)	71	(2)	67	(2)	6	(3)
Pois	158	(19)	112	(15)	44	(9)	130	(14)	71	(4)	82	(2)	-17	(5)
Lupin	188	(24)	147	(16)	38	(10)	168	(21)	78	(3)	89	(1)	-21	(7)
Haricot	159	(7)	90	(12)	69	(6)	126	(4)	56	(5)	79	(1)	-36	(9)
Soja	360	(23)	290	(36)	67	(25)	327	(20)	81	(7)	91	(1)	-37	(27)
Année 2016														
Pois chiche	227	(18)	140	(10)	84	(9)	167	(16)	62	(1)	74	(4)	-27	(12)
Vesce de Narbonne (ev)	112	(28)	71	(20)	39	(9)	0	(0)	64	(3)	0	(0)	71	(20)
Féverole	426	(52)	364	(47)	58	(6)	316	(45)	86	(1)	74	(2)	48	(4)
Vesce commune	115	(11)	87	(9)	27	(3)	62	(5)	75	(1)	54	(5)	25	(7)
Fenugrec	148	(20)	119	(15)	29	(6)	93	(18)	80	(1)	63	(5)	26	(6)
Lentille	153	(8)	123	(8)	29	(4)	93	(13)	80	(3)	61	(6)	30	(6)
Pois	147	(23)	113	(20)	31	(3)	88	(17)	77	(2)	60	(3)	25	(3)
Lupin	217	(12)	174	(9)	39	(2)	177	(10)	80	(2)	82	(1)	-4	(1)
Haricot	146	(27)	81	(17)	65	(10)	99	(23)	55	(2)	68	(4)	-19	(6)
Soja	257	(11)	172	(15)	82	(6)	216	(6)	67	(3)	84	(3)	-44	(15)

Tableau 1 Origine et répartition de l'azote dans les parties aériennes des légumineuses et quantification du solde azoté apparent. Le solde azoté apparent a été calculé de la manière suivante : Solde azoté apparent = quantité d'azote des parties aériennes issue de la fixation symbiotique (QNd_{fa}) – quantité d'azote dans les graines exportées à la récolte (QN_{graines}). Les valeurs correspondent aux moyennes des 4 répétitions ± (écart-type).

Relation entre la quantité d'azote du blé suivant et les autres flux azotés

La quantité d'azote prélevée par le blé suivant (QN_{blé}) est dé-corrélée de la quantité d'azote dans les graines de légumineuses (QN_{graines}) et de la quantité d'azote fixée dans les parties aériennes (QNd_{fa}) (Figure 4A). Ainsi, l'exportation d'une grande quantité d'azote par les graines de légumineuses n'implique pas nécessairement de faibles quantités d'azote dans le blé suivant. De même, de grandes quantités d'azote fixées par les légumineuses n'engendrent pas systématiquement de grandes quantités d'azote dans le blé suivant. Cependant, une relation positive a pu être établie entre la quantité d'azote dans le blé suivant et le solde azoté apparent pour le sol, qui prend en compte la part relative de la

quantité d'azote dans les graines de légumineuses par rapport à la quantité d'azote fixée (Figure 6). Ainsi, en absence de fertilisation azotée, l'enrichissement du sol en azote issu du processus de fixation symbiotique est corrélé avec la quantité d'azote dans le blé suivant. Malgré un solde azoté apparent très élevé, le précédent pois chiche en 2014 présente de bien plus faibles quantités d'azote dans le blé suivant par rapport à la valeur prédite par la relation moyenne. Il existe au contraire un clair antagonisme entre la quantité d'azote dans le blé suivant (QN_{blé}) et la quantité d'azote minéral prélevée pendant le cycle des légumineuses (QNd_{fsol}) (Figure 4A). La capacité de prélèvement d'azote minéral par les légumineuses peut en effet impacter à deux niveaux le stock d'azote du sol potentiellement disponible pour le blé

suivant. Tout d'abord, la quantité d'azote minéral prélevé durant le cycle des légumineuses réduit directement le reliquat azoté à la récolte des légumineuses, à condition que l'azote minéral du sol non prélevé n'ait pas été lixivié durant le cycle des légumineuses. Par ailleurs, de faibles capacités de prélèvement de l'azote minéral du sol augmentent les quantités d'azote à fixer nécessaires pour combler les besoins azotés subsistants. Le solde azoté apparent est par conséquent augmenté.

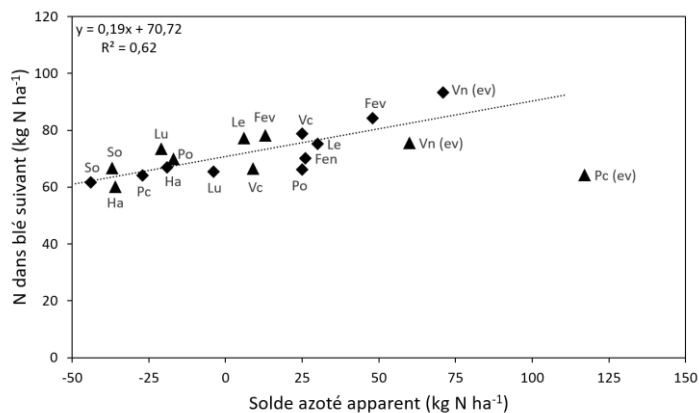


Figure 6 : Relation entre la quantité d'azote dans le blé suivant et le solde azoté apparent des précédents légumineuses. Légumineuses cultivées en 2014 et suivies par une culture de blé récoltée en 2015 (▲) ; Légumineuses cultivées en 2016 et suivies par une culture de blé récoltée en 2017 (◆). Les espèces de légumineuses sont identifiées par les abréviations suivantes : fenugrec (Fen) ; féverole (Fev) ; haricot (Ha) ; lentille (Le) ; lupin (Lu) ; pois (Po) ; pois chiche (Pc) ; soja (So) ; vesce commune (Vc) ; vesce de Narbonne (Vn). Les espèces pour lesquelles il n'y a pas eu de production de graines sont indiquées par (ev : engrais vert). La régression linéaire a été établie pour les deux expérimentations et l'ensemble des espèces de légumineuses sauf pour le précédent pois chiche en 2014.

Une relation positive entre la quantité d'azote dans le blé (QN_{blé}) et la quantité d'azote lixiviée après la récolte des légumineuses (QN_{lixiviée}) a été établie (Figure 4A). Cette relation indique paradoxalement que les espèces de légumineuses après lesquelles les plus grandes pertes d'azote par lixiviation ont été calculées ont également engendré les plus grandes quantités d'azote dans le blé suivant. La lixiviation de l'azote minéral du sol après la récolte des légumineuses intervient essentiellement pendant la période automne-hiver. En effet, pendant cette période les précipitations sont fréquentes et le prélèvement d'azote minéral par le blé est faible du fait d'une faible croissance. Cependant, même si une part de l'azote minéral du sol est lixivié pendant la période automne-hiver, une part de l'azote (organique) des résidus de culture et du sol reste disponible pour le blé suivant grâce à des processus azotés qui interviennent plus tard dans le cycle du blé. En effet, au printemps, l'augmentation des températures favorise la minéralisation de l'azote du sol et des résidus des précédents légumineuses. Pendant cette même période, les besoins en azote du blé sont importants suite à la reprise de végétation après l'hiver. Ainsi, au printemps, les forts besoins en azote du blé induisent le prélèvement de l'azote issu de la minéralisation du sol et des résidus de légumineuses, ce qui limite la lixiviation de cet azote minéral.

Multifonctionnalité des légumineuses

A partir de la projection des individus sur le plan factoriel de l'analyse de redondance (axes 1 et 2), il est possible de caractériser le profil fonctionnel des différentes espèces de légumineuses selon leurs traits ou propriétés, et selon le niveau de flux azotés qu'elles induisent (Figure 4B). La féverole a été caractérisée par une forte quantité d'azote exportée par les graines (QN_{graines}) et par une grande quantité d'azote fixée (QN_{dfa}) notamment en 2016 du fait d'une biomasse aérienne élevée et d'un grand indice de récolte azoté (Figure 4B). Cette espèce avait aussi tendance à engendrer de grandes quantités d'azote dans le blé suivant (QN_{blé}). Par contre de relativement grandes quantités d'azote ont été perdues par lixiviation (QN_{lixiviée}) après la récolte de la féverole notamment en 2014. Le haricot, le pois chiche (avec production de graines) et le soja ont été caractérisés par de fortes capacités à prélever l'azote minéral du sol pendant leur cycle (QN_{dfsol}). Ces trois espèces ont notamment été caractérisées par une grande vitesse d'expansion latérale du système racinaire. Le haricot est également caractérisé par une forte biomasse nodulaire par rapport à biomasse souterraine totale (39 % comparé à 14 % en moyenne pour les autres espèces). De grandes quantités d'azote ont également été fixées (QN_{dfa}) et exportées dans les graines (QN_{graines}) par le soja, notamment en 2014. De plus, après la culture de ces trois espèces de légumineuses, peu d'azote a été perdu par lixiviation (QN_{lixiviée}). En revanche, le haricot, le pois chiche et le soja avaient tendance à engendrer de relativement faibles quantités d'azote dans le blé suivant (QN_{blé}). La vesce de Narbonne a engendré des quantités d'azote exportées dans les graines (QN_{graines}) nulles et de faibles quantités d'azote fixées (QN_{dfa}) ainsi que de faibles quantités d'azote minéral prélevées pendant son cycle (QN_{dfsol}). De grandes quantités d'azote ont été perdues par lixiviation après la culture de la vesce de Narbonne (QN_{lixiviée}). Par contre, cette espèce a engendré de grandes quantités d'azote dans le blé suivant, du fait notamment d'un faible rapport azote / carbone des résidus. Le fenugrec, la lentille, le lupin, le pois et la vesce commune ont été caractérisés par une situation intermédiaire avec des valeurs moyennes pour l'ensemble des cinq flux azotés. Ainsi les antagonismes et les décorrélations qui existent entre certains flux azotés limitent la fourniture simultanée des flux azotés par les différentes espèces de légumineuses.

Conclusion

A partir de l'étude simultanée des flux azotés engendrés par les légumineuses et des traits de plantes ou propriétés du couvert déterminants de ces flux, dix espèces de légumineuses à graines ont été classées selon leurs profils fonctionnels relatifs à des fonctions azotées. Ainsi, la caractérisation des espèces de légumineuses à graines par une combinaison de valeurs de traits de plantes ou de propriétés du couvert permet d'évaluer leur potentiel à délivrer des fonctions relatives à l'azote et des services écosystémiques qui en découlent. L'établissement de ces profils fonctionnels aide ainsi au choix des espèces de légumineuses selon les objectifs recherchés dans un environnement donné, et adapter en conséquence la gestion de l'azote dans les systèmes de culture. La vesce de Narbonne, la féverole, le fenugrec, la lentille, la

vesce commune et ont été identifiées comme de bons précédents permettant de maximiser la quantité d'azote dans le blé suivant. Au contraire le haricot, le soja et le pois chiche sont de bien moins bons précédents culturels mais permettent une bonne valorisation de l'azote minéral du sol et limitent ainsi les risques de lixiviation pendant et après leur culture. Les plus grandes quantités d'azote fixées et exportées dans les graines ont été mesurées pour la féverole et le soja. Dans cette étude, les profils fonctionnels ont été établis dans la région de Bourgogne. Ainsi, la caractérisation des mêmes légumineuses à graines dans d'autres conditions environnementales pourrait demander une réévaluation des valeurs de traits et nécessiter l'intégration de nouveaux traits adaptés aux nouvelles contraintes environnementales de la situation considérée. Pour autant, les deux expérimentations aux conditions climatiques contrastées ont permis de distinguer des profils fonctionnels entre les dix espèces de légumineuses relativement stables entre les années étudiées. Par ailleurs, les impacts négatifs induits par certaines cultures de légumineuses dans certaines conditions climatiques peuvent être compensés par la mise en place de pratiques agricoles adéquates. Les associations légumineuses-céréales (Carton *et al.*, 2018; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009) ou l'implantation de couverts après la culture des légumineuses (Plaza-Bonilla *et al.*, 2015) peuvent notamment limiter les pertes par lixiviation pendant et après les cultures de légumineuses qui présentent les plus grands risques.

Références

- Anglade, J., Billen, G., and Garnier, J. (2015). Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* **6**, 1-24.
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., and Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecol. Lett.* **12**, 1394-1404.
- Bourion, V., Laguerre, G., Depret, G., Voisin, A.-S., Salon, C., and Duc, G. (2007). Genetic variability in nodulation and root growth affects nitrogen fixation and accumulation in pea. *Ann. Bot.* **100**, 589-598.
- Carton, N., Naudin, C., Piva, G., Baccar, R., and Corre-Hellou, G. (2018). Differences for traits associated with early N acquisition in a grain legume and early complementarity in grain legume-triticale mixtures. *Aob Plants* **10**, ply001.
- Crews, T. E., and Peoples, M. B. (2004). Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agric. Ecosyst. Environ.* **102**, 279-297.
- Damour, G., Dorel, M., Quoc, H. T., Meynard, C., and Risède, J.-M. (2014). A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. *Eur. J. Agron.* **52**, 218-228.
- Dunbabin, V., Diggle, A., and Rengel, Z. (2003). Is there an optimal root architecture for nitrate capture in leaching environments? *Plant Cell Environ.* **26**, 835-844.
- Garnett, T., Conn, V., and Kaiser, B. N. (2009). Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants. *Plant Cell Environ.* **32**, 1272-1283.
- Garnier, E., and Navas, M.-L. (2012). A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **32**, 365-399.
- Guinet, M., Nicolardot, B., Revellin, C., Durey, V., Carlsson, G., and Voisin, A.-S. (2018). Comparative effect of inorganic N on plant growth and N₂ fixation of ten legume crops: towards a better understanding of the differential response among species. *Plant Soil* **432**, 207-227.
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., and Jensen, E. S. (2001). Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops—a field study employing ³²P technique. *Plant Soil* **236**, 63-74.
- Hauggaard-Nielsen, H., Gooding, M., Ambus, P., Corre-Hellou, G., Crozat, Y., Dahlmann, C., Dibet, A., Von Fragstein, P., Pristeri, A., and Monti, M. (2009). Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crop. Res.* **113**, 64-71.
- Isbell, F., Calcagno, V., Hector, A., Connolly, J., Harpole, W. S., Reich, P. B., Scherer-Lorenzen, M., Schmid, B., Tilman, D., and Van Ruijven, J. (2011). High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* **477**, 199.
- Kumar, K., and Goh, K. M. (2000). Crop residues and management practices: effect on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield and nitrogen recovery. *Adv. Agron.* **68**, 197-319.
- Plaza-Bonilla, D., Nolot, J. M., Raffaillac, D., and Justes, E. (2015). Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: field evidence and model simulations. *Agric. Ecosyst. Environ.* **212**, 1-12.
- Tibi, A., and Therond, O. (2017). "Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. une contribution au programme EFSE. Synthèse du rapport d'étude." Inra (France).
- Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., and Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**, 882-892.
- Voisin, A. S., Salon, C., Jeudy, C., and Warembourg, F. R. (2003). Root and nodule growth in *Pisum sativum* L. in relation to photosynthesis: Analysis using ¹³C-labelling. *Ann. Bot.* **92**, 557-563.