

Fourniture en azote de résidus issus de différentes espèces légumineuses étudiées en conditions contrôlées au laboratoire

Filipe COSTA LIMA

Réalisé sous la direction de Bernard NICOLARDOT, enseignant-chercheur à AgroSup Dijon

Juin 2015

Fourniture en azote de résidus issus de différentes espèces légumineuses étudiées en conditions contrôlées au laboratoire.

Mots clés : Légumineuses, fixation biologique, association symbiotique, services écosystémiques, cycle de l'azote, résidus de culture.

Travail réalisé comme stage obligatoire de fin de cours dans la spécialisation Agronomie et Environnement, par Filipe COSTA LIMA, élève ingénieur de l'Université Fédérale du Recôncavo de la Bahia, brésilien en échange international à l'AgroSup Dijon.

Dijon, juin 2015.

Résumé

Pour faire face à la diversité des changements globaux, un profond changement des systèmes agricoles est nécessaire. Il apparaît indispensable d'accroître l'efficacité d'utilisation des ressources et la résilience des agroécosystèmes face à une augmentation des aléas climatiques, à la raréfaction de certaines ressources, à l'occurrence de stress biotiques et abiotiques et aux changements économiques. Cette recherche d'efficacité et de résilience passe par une intensification écologique via la valorisation des services écosystémiques, en particulier les services d'approvisionnement et de régulation. Au sein des systèmes de culture, les légumineuses jouent un rôle prépondérant dans l'obtention de services écosystémiques, grâce notamment à la fixation symbiotique, à leurs effets sur les cultures suivantes de la rotation, et à leurs intérêts nutritionnels pour l'alimentation animale et humaine. Le travail proposé dans le cadre du stage contribue à la quantification de services écosystémiques attendus des légumineuses au sein des systèmes de culture. La quantification des flux d'azote impliqués pendant la culture de 10 espèces de légumineuses est en cours et est réalisée au moyen d'une expérience en parcelles expérimentales (domaine d'Epoisses à Dijon). L'objectif principal du stage consiste à étudier la fourniture d'azote des espèces étudiées au champ et en conditions contrôlées. Les principales tâches réalisées dans ce stage sont : suivi de la décomposition des résidus de culture au champ (données acquises) et de l'utilisation de l'azote par une culture de blé (données à acquérir) ; mise en place d'une incubation en conditions contrôlées pour étudier la décomposition potentielle de 10 espèces légumineuses (lupin, pois, féverole, vesce commune, lentille, vesce, Fénugrec, vesce de Narbonne, soja, pois chiche, haricot) en comparaison à des espèces non fixatrices (orge, sorgho) ; suivi de la dynamique du carbone et de l'azote afin de calculer la minéralisation potentielle du C et N des espèces étudiées en conditions contrôlées.

Sumário

1. Introduction.....	5
2. Revue Bibliographique	6
2.1. L'importance de l'azote.....	6
2.2. Les avantages de l'utilisation des légumineuses	7
2.3. Etat de lieu de l'utilisation des légumineuses en France	8
2.4. La décomposition des résidus de légumineuses	10
2.5. Cycle de l'azote.....	13
2.5.1. La fixation biologique	13
2.5.2. La minéralisation	13
2.5.3. Pertes en azote.....	14
3. Matériels et Méthodes.....	15
3.1. Sol.....	15
3.2. Résidus de culture	16
3.3. Traitements	16
3.4. Suivi de la dynamique de l'azote minéral du sol	17
3.5. Suivi des émissions de carbone par le sol	17
3.6. Détermination de l'azote minéral du sol.....	17
3.7. Expression des résultats obtenus.....	18
3.8. Analyses statistiques	18
4. Résultats	19
5. Discussion	23
6. Conclusion	24
7. Références bibliographiques	25

1. Introduction

L'agriculture actuelle fait face à plusieurs questions quant à son modèle de production. En effet, celui-ci affecte fortement le cycle naturel de l'environnement et des espèces qu'il abrite. La principale motivation de ce modèle est d'assurer l'alimentation de la population mondiale qui représente déjà plus de 7 milliards d'habitants, en intensifiant ainsi l'exploitation des ressources naturelles.

Cette intensification cause beaucoup de problèmes et des limitations pour continuer à exploiter les ressources qui sont essentielles et limitées. De ce fait, produire n'est plus l'unique préoccupation. Il faut désormais produire de façon plus durable, et donc préserver les ressources naturelles en développant une relation harmonieuse entre l'agriculture et l'environnement.

La simplification des rotations et des variétés et l'usage intensif de pesticides, ont réduit la survie et la diversité chez différents organismes microbiens, animaux, végétaux associés à la parcelle cultivée. Or, dans les rotations ou les cultures en associations, les protéagineux d'hiver ou printemps peuvent potentiellement servir d'habitat ou de réserve nutritionnelle pour différents d'organismes associés, et l'on peut faire l'hypothèse que le développement de ces cultures notamment en conduites intégrées ou d'agriculture biologique puisse conduire à une plus grande diversité de la microflore et microfaune du sol, préserver des insectes auxiliaires et pollinisateurs, et contribuer à la diversité des espèces végétales cultivées et adventices en grande culture (Duc et al, 2011).

Pour cela, un changement est nécessaire par rapport aux modèles connus de l'agriculture. Par exemple, en utilisant des approches alternatives qui peuvent apporter des avantages dans l'exploitation tout en préservant l'environnement, qui permettrait ainsi développer une agriculture durable. Ces approches alternatives doivent répondre en plus des demandes de production, des besoins nutritionnels aux cultures, en particulier l'azote, qui est le nutriment étudié dans cette recherche.

Pour pouvoir réaliser des changements aux modèles d'exploitations, il est nécessaire tout d'abord d'étudier ces approches alternatives destinées à maintenir la productivité et la qualité des exploitations. Le développement d'approches alternatives utilisant les espèces légumineuses pour faire entrer de l'azote dans les systèmes de culture, réduisant ainsi les coûts économiques liés aux engrais azotés (qui sont fortement utilisés dans l'agriculture mais également les coûts environnementaux), sera abordé dans cette recherche qui a comme objectif le développement de ces alternatives.

2. Revue Bibliographique

2.1. L'importance de l'azote

L'azote a une importante contribution dans la productivité des cultures des systèmes agricoles. Il est utilisé par les végétaux sous forme ionique, tel que les ions nitrate ou ammonium, et il est l'élément central pris en compte dans les processus de transformation du cycle biochimique de l'azote et qui concerne tous les compartiments de l'environnement (sol, eau, atmosphère).

De tous les éléments nutritifs, l'azote est celui qui est le plus difficile à gérer en fertilisation. Mais en même temps, il est l'élément nutritif le plus important pour la croissance des cultures et les niveaux de rendements. En effet, c'est principalement l'azote qui détermine le développement de la plante et des racines et qui stimule l'absorption optimale des autres éléments nutritifs du sol. Si l'azote est limitant pour la nutrition des cultures, les autres éléments nutritifs sont donc moins absorbés dans la plante (N'Dayegamiye, 2007).

L'azote contribue à la formation des acides aminés, protéines, ADN, ARN et d'autres structures cellulaires. Malgré qu'il soit l'élément le plus abondant de l'air atmosphérique, (78% de l'air est composé de l'azote), les animaux et les plantes ne sont pas capables de le métaboliser sous sa forme moléculaire, c'est-à-dire de le prendre directement de l'air.

L'assimilation de l'azote atmosphérique sous sa forme moléculaire pour les plantes légumineuses est réalisée grâce aux bactéries fixatrices (du genre *Rhizobium*). Avant d'être absorbé, l'azote est prélevé de l'air et transformé en ammoniac soluble dans l'eau, il peut ainsi être utilisé par les plantes. Il existe également des bactéries non fixatrices et quelques algues bleues (cyanobactéries) présentes dans le sol qui peuvent fixer l'azote. Dans ce cas l'ammonium libéré lors de la fixation peut être transformé en nitrate dans le sol, forme qui est alors disponible pour les végétaux.

Les ressources en azote de la planète sont pratiquement illimitées grâce au réservoir atmosphérique (N_2). Pourtant l'azote est, après l'eau, le principal facteur limitant la croissance des végétaux. En effet, pour être utilisable par les végétaux, l'azote doit être présent sous forme minérale (NH_4^+ et NO_3^-), qui peut être apporté selon 2 voies : la fixation biologique de l'azote et l'apport d'azote sous forme organique (effluents animaux...) ou minérale par les engrais de synthèse produit industriellement (Revellin, 2012)

Le recours aux engrais azotés a quasiment décuplé entre 1960 et 2000, pour atteindre 88 millions de tonnes par an dans le monde. Des projections prévoient l'usage de 120 millions de tonnes en 2040 (Vance, 2001 in Mbengue, 2010). Cependant, toutes cultures confondues, il est estimé qu'environ 50 % de cet azote épandu n'est pas absorbé mais en partie lixivié, causant de graves problèmes environnementaux tel que l'eutrophisation des milieux aquatiques (Vance, 2001 in Mbengue, 2010).

Les engrais azotés sont donc fortement utilisés dans les exploitations agricoles produisant selon un mode conventionnel, et ce dans toutes les situations pédoclimatiques.

Outre la fourniture pour la croissance des plantes, ils peuvent être également la source de pertes gazeuses notamment par volatilisation ou dénitrification.

2.2. Les avantages de l'utilisation des légumineuses

L'insertion des légumineuses dans les systèmes de cultures est une alternative très intéressante aussi bien pour la durabilité des exploitations agricoles que pour la préservation des différents compartiments de l'environnement. En effet, elles contribuent énormément à fertilité des sols en ayant des effets sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, et ce au-delà du simple rôle de nutriment vis-à-vis de végétaux. L'insertion des légumineuses dans les systèmes de culture rend nombre de services écosystémiques et notamment les services liés à la fourniture de l'azote.

Les légumineuses ont une énorme importance dans la fixation biologique de l'azote. Une fois qu'elles sont en association symbiotique avec les bactéries fixatrices, l'azote pourra être disponible à travers du processus de fixation réalisé par celles-ci. Ces associations symbiotiques permettent de rendre disponible une grande quantité de nutriments aux végétaux. Selon Mbengue (2010), il est estimé que la fixation symbiotique dues aux légumineuses cultivées représente environ 60 millions de tonnes d'azote fixé par an, soit presque autant que la quantité d'engrais azotés épandue pendant la même période.

L'intérêt des légumineuses est double. D'une part, elles possèdent un taux de protéines élevé (17 à 25%, voire 36% à 44% pour le soja et le lupin). Ainsi, elles ont un rôle important dans l'alimentation humaine (dans beaucoup de pays, elles remplacent les protéines animales) mais aussi dans l'alimentation animale, en particulier pour les porcs et les volailles. D'autre part, elles fixent l'azote de l'air et, à ce titre, sont très avantageuses pour l'agriculteur dans la mesure où la fertilisation azotée est très coûteuse car les engrais azotés sont synthétisés en utilisant les ressources énergétiques fossiles, l'utilisation des engrais azotés étant importante dans les pays développés (Pointereau, 2001).

En plus de leurs qualités nutritionnelles, l'utilisation en rotation des cultures légumineuses permet de faire entrer de l'azote dans les sols qui peut être ensuite utilisé par les cultures non légumineuses. Ce service permettrait ainsi d'économiser plus de 200 à 300 millions de dollars US d'engrais azotés au Etats-Unis (Graham and Vance, 2003 in Mbengue 2010). Cet argument économique souligne l'importance des légumineuses une fois de plus.

L'introduction de légumineuses au sein d'une succession culturale ou en association dans les prairies génère plusieurs effets positifs sur l'environnement, à commencer par une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces plantes, capables de capter l'azote de l'air et apportant de la diversité végétale, favorisent les économies d'intrants à l'échelle des rotations : principalement des engrais azotés, mais aussi des produits phytosanitaires (ADEME, 2015).

Au-delà de cet aspect agronomique, certaines espèces de plantes non cultivées et d'arbres de la famille des légumineuses sont aussi d'un grand intérêt dans les écosystèmes

naturels en permettant la colonisation de milieux pauvres en azote grâce à cette capacité symbiotique (Mbengue, 2010).

L'insertion des légumineuses dans l'agriculture apporte aussi des contributions quant à réduction de l'utilisation de la fertilisation azotée et, indirectement, des émissions des gaz à effet de serre provoquées par la fabrication et l'épandage d'engrais.

De plus, elles restituent en partie cet élément nutritif aux cultures suivantes ou associées. Leur présence dans les rotations, lorsqu'elles remplacent des cultures très fertilisées, permet donc de diminuer de façon conséquente l'utilisation d'engrais minéraux azotés qui représentent 63% des fertilisants apportés aux cultures. La réduction de l'épandage de ces engrais induite par l'insertion de légumineuses dans les systèmes de culture en France est estimée à 216 millions de tonnes (Mt), soit 10 % de la consommation totale annuelle (Développement Durable, 2010).

2.3. Etat de lieu de l'utilisation des légumineuses en France

Malgré tous ces avantages rendus par l'utilisation des légumineuses, l'agriculture française a réduit brusquement son utilisation à la suite de l'introduction des cultures céréalières depuis les années 1960.

En définitive, différents éléments ont conduit à se désintéresser des légumineuses fourragères malgré les intérêts agronomiques et alimentaires qu'elles présentent. Il s'agit notamment des logiques d'amélioration continue de la productivité, de la simplification du travail, et de la sécurisation des rendements, du contexte de prix bas des engrais minéraux azotés et du différentiel de prix favorable à l'utilisation des tourteaux de soja, qui a été largement induit par les mécanismes de soutien de la PAC et par les régimes de protection aux frontières de l'Union européenne (Développement Durable, 2010).

La production de légumineuses n'a jamais été aussi réduite en France. En 2007, ces cultures occupaient seulement 632 000 ha. Elles ont fortement régressé, notamment les légumineuses fourragères, puisqu'au début des années 1960 elles représentaient au total 3,5 millions (ha), soit 19 % des terres arables (Développement Durable, 2010).

En 2012 les légumineuses cultivées seules représentaient moins de 3% des surfaces arables en France (...). Par comparaison, ces cultures occupent entre 10 et 25% des surfaces en Amérique du Nord et en Asie. Cette réduction est due aux des choix politiques ces dernières années qui ont donné la priorité à l'autosuffisance en céréales et à l'export en Europe (ADEME, 2015).

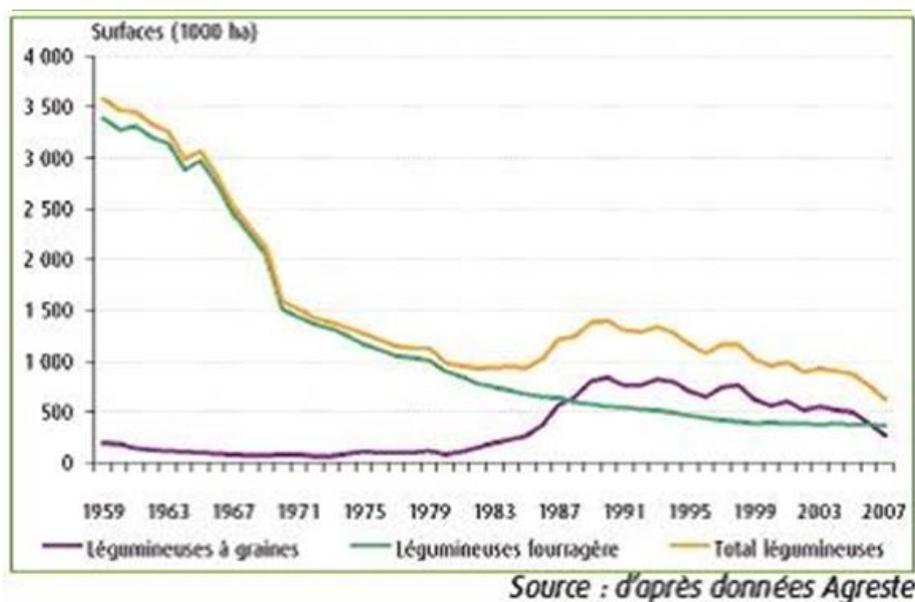


Figure 1 : Evolution de la culture de légumineuses en France.

Les associations céréales-légumineuses pourraient contribuer au développement d'une agriculture qui concilie productivité et haute valeur environnementale. Bien qu'elles connaissent un regain d'intérêt, ces associations sont toutefois encore peu cultivées en France (Corre-Hellou et al, 2013). Celles-ci sont une bonne alternative pour la réintroduction des cultures légumineuses dans l'agriculture française.

On estime qu'il y a environ 19 325 espèces de légumineuses dans la nature allant des grands arbres à des herbes minuscules et éphémères. Entre ces nombreuses espèces, l'étude conduite dans l'UMR Agroécologie lors du programme ANR Legitimes a concerné 10 espèces de légumineuses (lupin, pois, féverole, vesce commune, lentille, fénugrec, vesce de Narbonne, soja, pois chiche, haricot).

Les légumineuses étudiées rendent des services pour l'agriculture et leur implantation est nécessaire si l'on souhaite valoriser au maximum l'azote fixé. Implantées comme culture de rotation, ces légumineuses peuvent rendre des services aux cultures suivantes. En effet, une fois le couvert détruit, une certaine quantité d'azote sera disponible pour la culture qui suit, lors de la minéralisation des composés organiques contenus dans les résidus de culture. Ainsi, on estime à 30 % en moyenne le taux de restitution en azote pour la culture qui suit par rapport à la quantité d'azote absorbée par les cultures (pièges à nitrates) (Le Souder et Labreuche, 2007).

2.4. La décomposition des résidus de légumineuses

La disponibilité de l'azote dépend de la qualité du résidu de culture qui est restitué au sol qui va influencer à la fois la quantité d'azote libérée et la cinétique de minéralisation. Pour qu'un produit organique (par exemple effluent d'élevage, résidu de culture) puisse fournir de l'azote à un couvert végétal, il est nécessaire de synchroniser la libération de l'azote de ce produit et la demande de la culture en place et d'intérêt économique. S'il manque cette synchronie, il y aura de pertes d'azote affectant la qualité des ressources en eau ou de l'air.

La décomposition des résidus est contrôlée par l'interaction de trois groupes de variables : les états du milieu avec les conditions climatiques (température et humidité du sol) et les caractéristiques physico-chimiques du sol, la qualité (composition biochimique, rapport C/N) du substrat qui détermine sa dégradabilité, et la nature de la communauté microbienne qui assure la décomposition, les macro et microorganismes (Heal et al., 1997 ; Correia & Andrade, 1999 in Gama-Rodrigues, 2007).

La vitesse de dégradation dépend de la nature des matières organiques enfouies, mais également de la disponibilité en azote. Les microorganismes ont en effet besoin d'azote pour dégrader le carbone : lorsque les résidus à décomposer présentent un rapport C/N (rapport entre la quantité de carbone total et la quantité d'azote total) faible, les microorganismes ne prélèvent pas d'azote dans le milieu mais au contraire une partie de l'azote non utilisée par la microflore du sol sera libérée dans le milieu sous forme minérale. Par contre, lorsqu'une quantité importante de résidus à C/N élevé est enfouie, les microorganismes prélèvent de l'azote dans le sol pour métaboliser le carbone organique du résidu. Dans certaines conditions, ils peuvent donc devenir concurrents du peuplement végétal cultivé qui utilise lui aussi les ressources en azote minéral du sol (phénomène de « faim d'azote »). Le rapport C/N est également utilisé pour caractériser l'évolution des matières organiques dans le sol. Le carbone est perdu par minéralisation plus rapidement que l'azote de sorte que le rapport C/N diminue au cours du temps et tend vers une valeur caractéristique des humus formés dans différentes conditions. Ainsi, dans les sols cultivés, il tend vers 10 alors qu'il tend vers 40 pour les tourbes (Roger-Estrade, 2004).

Les légumineuses ont un rapport C/N faible et, par conséquent, une vitesse de décomposition rapide se traduisant par une libération très rapide de l'azote (Aita et Giacomini, 2003). Si un couvert végétal n'est pas présent lors de la décomposition de tels résidus, l'azote peut être perdu. Pour éviter ces pertes il est donc nécessaire de bien gérer la période après l'enfouissement de ces résidus notamment en implantant un couvert végétal (culture principale ou culture piège à nitrates).

En utilisant des légumineuses associées avec des graminées, les résidus de cultures ont un rapport C/N plus élevé par rapport aux seules résidus de légumineuses, comme Ranells & Wagger (1996) ont démontré en leurs travaux, ce qui peut limiter les pertes de l'azote lors de leurs décomposition (Aita et Giacomini, 2003).

Le processus de décomposition des résidus comprend l'humification et la minéralisation des éléments présents dans le résidu. L'humification est une incorporation de composés

organiques dans la matière organique du sol sous l'action de l'activité microbienne, entre autres. Cet azote provisoirement rendu non disponible pour les plantes peut être de nouveau minéralisé. La minéralisation correspond à la décomposition des molécules organiques sous des formes simples et solubles, qui servent de nutriments pour les microorganismes et les plantes (par exemple transformation de l'azote organique en azote minéral) mais qui peuvent être également perdus lors de processus de lixiviation.

Il y a aussi le processus d'accumulation, qui dans certaines conditions (pH, anaérobiose...) concerne les matières organiques échappent à l'activité biologique, c'est-à-dire qui ne sont ni minéralisées, ni humifiées mais qui évoluent très lentement et s'accumulent dans le milieu ; elles alimentent un cycle géologique (tourbe, charbon, ...) mais ne participent pas réellement à la fertilité du sol. Cela concerne également les matières organiques fossiles (charbons) que l'on peut également trouver dans les sols.

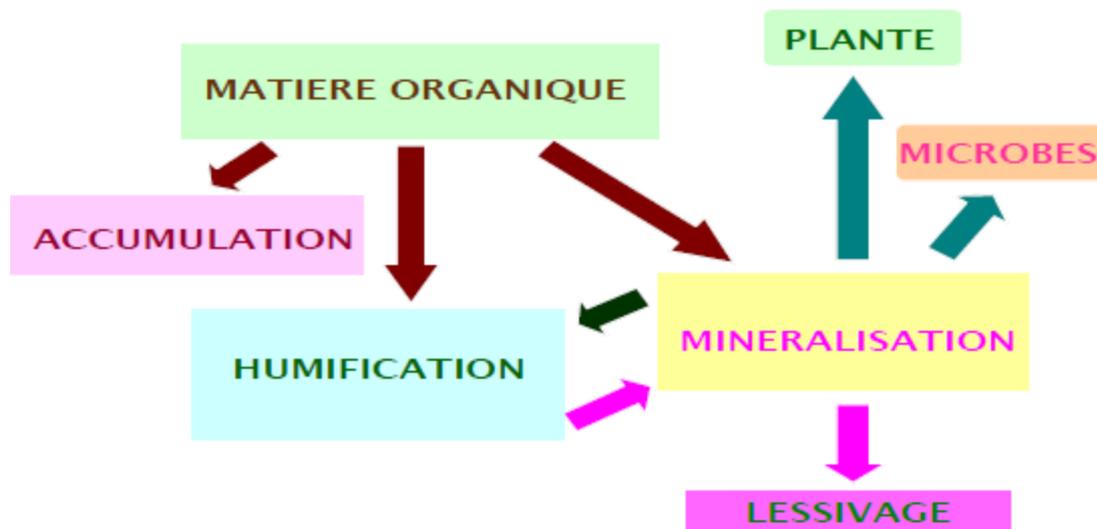


Figure 2 : Le comportement de la matière organique.

Tableau 1 : Décomposition de différents résidus de culture et disponibilité de l'azote dans le sol ou pour la culture suivante

Références	Localisation	Type de sol	Période de suivi	Cultures	Taux de décomposition des résidus	Taux d'azote disponibilisé/minéralisé
Aita & Giacomini 2003	Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brésil	Argisol Rouge Dystrophique Sableux	20 semaines	Avoine	66,4 %	31,4 %
				Vesce commune	52,3 %	51,9 %
				Navet	66,3 %	15,3 %
Doneda <i>et al.</i> , 2012	Nã-o-Me-Toque, Rio Grande do Sul – Brésil	Latosol Rouge Dystrophique	24 semaines	Seigle	39,4 %	136,9 kg h ⁻¹ (moyenne pour les deux espèces ensembles)
				Avoine	55,3 %	
				Pois	46,9 %	190,3 kg h ⁻¹ (moyenne pour les deux espèces ensembles)
				Navet	52,9 %	
Matos <i>et al.</i> , 2008	Araponga et Pedra Dourada, Minas Gerais - Brésil	Latosol Rouge-Jaune	20 semaines	Arachide		153,5 mg kg ⁻¹
				Calopogonium		202,1 mg kg ⁻¹
				Luzerne brésilienne		144 mg kg ⁻¹
				Mucuna pruriens		125,2 mg kg ⁻¹
Abera <i>et al.</i> , 2011	Hawassa - Ethiopie	Andosol et Alfisol	20 semaines	Haricot		54 %
				Haricot de l'Angola		49 %
Fosu <i>et al.</i> , 2007	Nyankpala - Ghana	Luvisol Ferrique	20 semaines	Crotalaire	91%	90%
				Pois mascate	80%	80%
				<i>Callopogonium mucunoides Desv.</i>	80%	80%
Mayer <i>et al.</i> , 2004	Nord-ouest de l'Allemagne	Cambisol Eutrique	24 semaines	Fève		47%
				Pois		33%
				Lupin		45%
Odhiambo, 2010	Limpopo, Afrique du Sud	Trois sols de texture variable entre 62, 20 et 12% d'argile.	16 semaines	Pois mascate		25,6% (moyenne pour les trois sols)
				<i>Lablab purpureus</i>		40,6% (moyenne pour les trois sols)
				Crotalaire		56,3% (moyenne pour les trois sols)

On peut observer dans le tableau les résultats issus de différents travaux publiés dans la littérature qui ont eu pour objectif de suivre et quantifier la minéralisation de l'azote provenant de résidus de légumineuses. Les données ont permis d'évaluer différents types de légumineuses et de les comparer, parfois, avec autres types de cultures de couverture qui ont aussi une contribution pour la fourniture de l'azote dans le sol ou pour la culture suivante.

Les espèces légumineuses ont bien fourni de l'azote dans les essais, comme prévu dans la littérature, mais aussi elles ont souffert une plus vite décomposition de ses résidus par rapport aux cultures non légumineuses, étant un problème pour la couverture et protection du sol, au-delà de fournir l'azote, parfois, avant des besoins de la culture suivante. La rapide

décomposition des résidus de légumineuses est provoquée par le rapport C/N faible qu'elles ont. De cette façon, il est important de cultiver les légumineuses en association avec des cultures qui aient une décomposition moins rapide de leurs résidus.

2.5. Cycle de l'azote

L'azote du sol présente plusieurs voies d'évolution : la fixation biologique, la minéralisation, la dénitrification, la volatilisation ammoniacale et immobilisation.

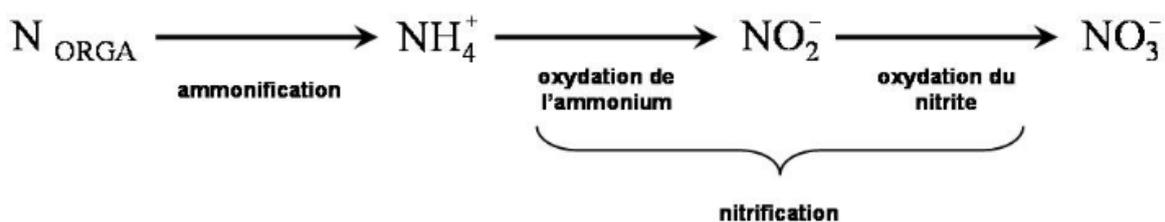
2.5.1. La fixation biologique se présente comme la transformation de N_2 de l'atmosphère en ammoniac et son intégration directe dans le métabolisme de la plante. Cette fixation s'agit d'un processus par lequel l'azote est pris de sa forme moléculaire normale et relativement inerte (N_2) dans l'atmosphère et converti en composés d'azote (comme ammoniac, nitrate et dioxyde d'azote).

Dans ce cadre, deux groupes de microorganismes sont responsables de la fixation et, qu'on peut partager en deux modes :

- Fixation symbiotique, dont le rhizobium, comme organisme symbiotique, agit dans les racines des plantes ;
- Fixation non symbiotique, apanage des Clostridium (anaérobie), Azotobacter (aérobie).

Après fixation, l'azote moléculaire aboutit à la formation de substances azotées organiques qui, une fois au sol, subissent la minéralisation.

2.5.2. La minéralisation est le processus de transformation de l'azote organique en azote minérale (nitrique et ammoniacal). Ce processus est réalisé en trois étapes : l'ammonification, l'oxydation de l'ammonium et l'oxydation du nitrite (les deux dernières étapes font parties de la nitrification).



L'ammonification est la transformation de l'azote organique en ammonium (NH_4^+) sous l'action de micro-organismes hétérotrophes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie car, elles n'ont pas la capacité d'oxyder le NO_2^- en NO_3^- . Cette forme est transitoire et sera transformé ensuite en azote nitrique.

La nitrification se réalise en deux étapes par des bactéries autotrophes et certains champignons (Costa et al., 2006; Wrage et al., 2001) : (i) Oxydation par les bactéries nitrosantes (Nitrosomonas, Nitrosococcus) réalisant la nitrosation :



(ii) Oxydation par des bactéries nitrifiantes (Nitrobacter, Nitrococcus) réalisant la nitratisation :

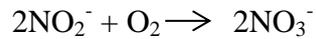
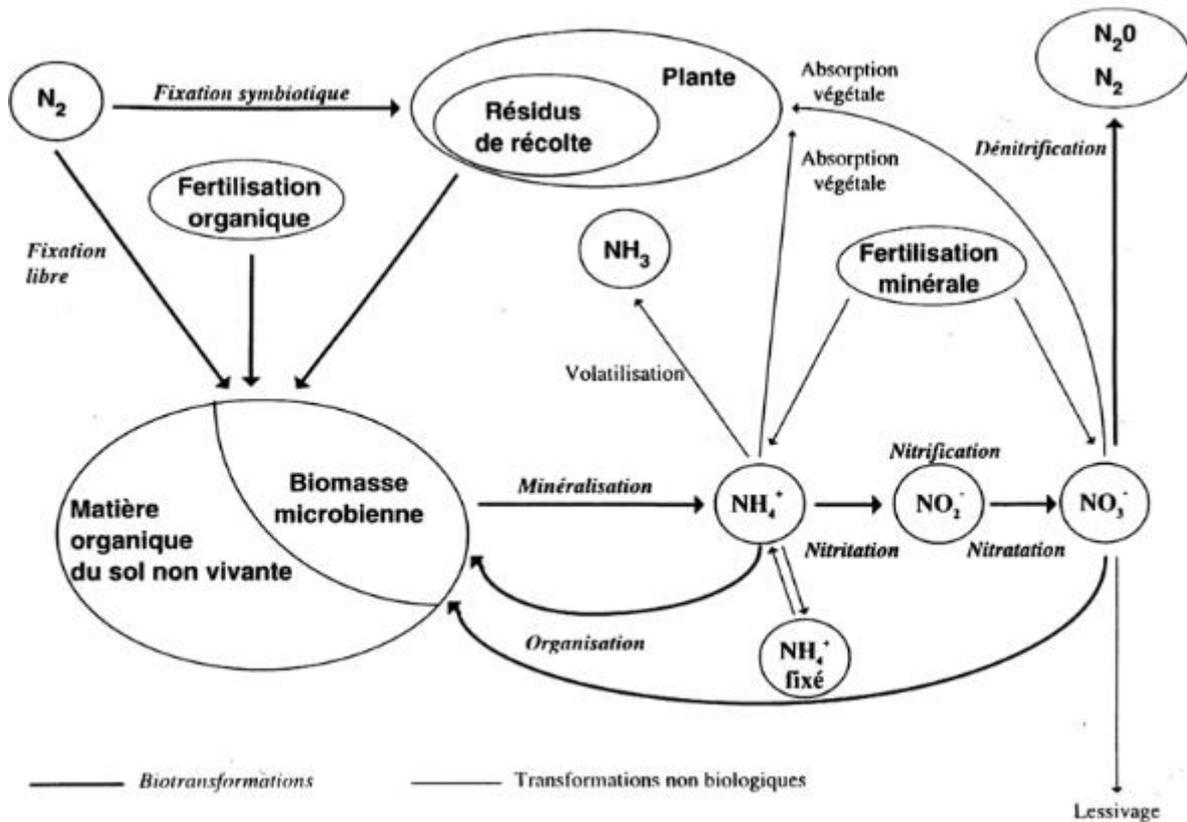


Figure 3 : Le cycle de l'azote (Nicolardot *et al.*, 1997).



2.5.3. Pertes en azote

L'azote est l'élément minéral le plus important pour la production de nombreux systèmes agricoles dans le monde. Une préoccupation par rapport à cet élément, qui représente une charge importante pour l'agriculteur, est qu'il subit par fois des pertes et, qui par conséquent, vient polluer les cours d'eau, les nappes souterraines et l'atmosphère, au-delà d'engendrer des pertes économiques aux agriculteurs.

Il existe trois formes des pertes :

2.5.3.1. Perte par volatilisation ammoniacale, étant la transformation de l'azote sous forme d'ammonium en ammoniac qui est volatilisé. La volatilisation est souvent la principale voie de perte d'azote lorsque des amendements riches en azote comme l'urée sont appliqués au sol. Elle se produit lorsqu'il y a accumulation d'azote ammoniacal près de la surface du sol, surtout après l'application des engrais azotés, comme par exemple l'urée.

2.5.3.2. Perte par lixiviation, qui représente l'entraînement d'éléments minéraux dissous dans l'eau du sol. Elle est provoquée par le drainage naturel, car l'ion nitrate, très soluble, a une grande affinité pour l'eau.

Les paramètres influant sur ce phénomène de lixiviation sont la quantité d'azote minéral (NO_3^-), sa répartition dans le profil et la quantité d'eau drainée. A cela il faut ajouter l'effet de la matrice du sol, qui dans certains sols tropicaux a pour effet de retenir les nitrates dans les horizons superficiels lorsque la filtration de l'eau dans ce sol n'est pas possible si non difficile.

Le risque de lixiviation est plus élevé dans les sols sableux, dont la texture favorise le transfert rapide de l'eau.

2.5.3.3. Perte par dénitrification. Celles-ci résultent d'un processus de réduction microbienne par lequel les nitrates (et accessoirement les nitrites) sont réduits à l'état de produits gazeux qui sont ainsi perdus pour le sol. Il s'agit d'une succession de réductions des oxydes d'azote (NO_3^- , NO_2^- , N_2O , NO) jusqu'au stade de l'azote moléculaire (N_2).

La dénitrification est effectuée par un nombre restreint de genres bactériens (*Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Spirillum*, *Bacillus*, bactéries hétérotrophes), il s'agit de bactéries anaérobies très répandues dans les sols, dont la présence n'est pas limitante.

Les pertes de l'azote dans les systèmes de production agricole est une question des plus préoccupantes et dans ce cadre il faut développer des alternatives qui puissent réduire ce problème dans l'agriculture.

A partir de ces informations, on peut donc réfléchir sur une alternative qui puisse aider les agriculteurs pour réduire dépenses par rapport à l'acquisition des engrais azotés, l'environnement avec moins des impacts provenant de systèmes intensifs d'exploitation, en développant ainsi une agriculture plus harmonieuse entre l'homme et l'environnement.

3. Matériels et Méthodes

3.1. Sol

Le sol utilisé pour l'incubation est un sol calcisol argileux, avec les caractéristiques suivantes : argile ($< 2 \mu\text{m}$) = 425 g kg^{-1} , limons fins (2 à $20 \mu\text{m}$) = 317 g kg^{-1} , limons grossiers (20 à $50 \mu\text{m}$) = 198 g kg^{-1} , sables fins (50 à $200 \mu\text{m}$) = 38 g kg^{-1} , sables grossiers (200 à $2000 \mu\text{m}$) = 22 g kg^{-1} , C organique = 19.3 g kg^{-1} , N total = 1.69 g kg^{-1} , pH eau = 7.31, CaCO_3 total $< 1 \text{ g kg}^{-1}$, CEC Metson = $23.4 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$. Le sol a été prélevé sur une parcelle

du domaine expérimental INRA (Bretenière), puis a été tamisé humide à 6 mm et a ensuite conservé au frais.

3.2. Résidus de culture

Les résidus de cultures sont issus d'une expérimentation au champ impliquant 12 espèces : dix espèces légumineuses (pois, lupin, féverole, lentille, soja, pois chiche, haricot, fenugrec, vesce de Narbonne, vesce commune) et deux espèces non légumineuses (sorgho, orge). Les cultures de pois, lupin, féverole, lentille, vesce commune et orge ont été semées le 3 mars 2014 et soja, pois chiche, haricot, vesce de Narbonne, fenugrec et sorgho le 5 mai 2014. Les résidus végétaux des différentes espèces (parties aériennes et racines) ont été collectés à la récolte des cultures : 1^{er} juillet (pois), 11 juillet (lentille, vesce), 15 juillet (orge), 25 juillet (féverole), 1^{er} août (lupin), 4 septembre (haricot), 5 septembre (soja, vesce de Narbonne, fenugrec, sorgho) et 16 septembre (pois chiche). Les différents résidus végétaux ont été séchés à 80°C puis broyés à 1 mm. Chaque résidu plante entière (parties aériennes + racines) a été ensuite reconstitué en considérant le ratio parties aériennes/racines mesuré à la date de floraison de chaque espèce, les ratios mesurés à la récolte intégrant déjà une probable décomposition du système racinaire au champ (le 26 juin pour pois, lupin, féverole, lentille, vesce commune, orge, le 21 juillet pour soja, pois chiche, haricot, vesce de Narbonne, fenugrec et le 28 juillet pour le sorgho). Les teneurs en C et N des résidus ont été déterminées à l'aide d'un analyseur élémentaire Flash 2000 après broyage à 80 µm. Les teneurs en carbone et azote des résidus étudiés sont présentés dans le *tableau 2*.

3.3. Traitements

13 traitements ont été considérés (4 répétitions par traitement) : 12 résidus plante entière correspondant aux 12 espèces considérées dans l'essai au champ et un témoin sans apport de résidus. Pour chaque traitement avec apport de résidus, les mélanges sol + résidus ont été effectués sur la base de 8 g de résidu sec (80°C) par kg de sol équivalent sec, soit 200 mg de résidus sec pour des échantillons de 25 g de sol équivalent sec. Pour le suivi de la dynamique de l'azote minéral du sol, les mélanges sol + résidus ou sol sans apport de résidus ont été placés dans des pots en polyéthylène de 60 mL. Pour chaque échantillon, a été ajouté au départ de l'incubation, 0.5 mL d'azote sous forme de KNO₃ permettant d'apporter 60 mg N kg⁻¹ sol équivalent sec, afin que la décomposition des résidus s'effectue en conditions non limitantes en azote. Les pots ont ensuite été placés dans des bocaux en verre de 2 L où a été placé un piège à CO₂ (30 mL NaOH 1M), les pièges étant renouvelés régulièrement au cours de l'incubation afin d'éviter la saturation de la soude (Figure 1). Pour la mesure du CO₂ émis par le sol, les échantillons avec ou sans apport de résidus et avec apport d'azote minéral (60 mg N kg⁻¹ sol équivalent sec) ont été placés dans des fioles à plasma de 250 mL (Figure 2).

Dans chaque fiole à plasma, a été placé un piège à CO₂ constitué par un flacon à scintillation contenant 10 mL NaOH 0.25 M, les pièges étant renouvelés périodiquement. Bocaux et fioles à plasma ont ensuite été incubés à l'obscurité à 28° C pendant 168 jours, l'humidité de départ (33.5 g de sol humide pour 25 g de sol sec, soit une humidité de 34%) a été contrôlée et maintenue constante par apport d'eau désionisée.

Tableau 2 : Teneurs en azote et en carbone des résidus utilisés pour l'incubation en conditions contrôlées.

Espèces	% N	% C	Rapport C/N
Lupin	0.69	47.81	69.7
Orge	0.63	46.16	73.2
Pois	0.72	46.68	64.6
Féverole	1.37	46.87	34.2
Vesce commune	1.55	46.47	28.6
Lentille	1.46	46.59	31.9
Fenugrec	2.53	46.53	18.4
Vesce de Narbonne	3.40	46.39	13.6
Soja	0.93	44.58	47.8
Pois chiche	2.03	47.49	23.4
Haricot	1.46	41.89	28.8
Sorgho	0.88	44.24	50.0

3.4. Suivi de la dynamique de l'azote minéral du sol

L'azote minéral du sol a été mesuré après 0, 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140 et 168 jours d'incubation à partir des pots incubés dans les bocaux hermétiques de 2 L, 4 échantillons étant alors prélevés par date et par traitement. Pour chaque répétition, l'échantillon de terre avec ou sans résidu est transféré dans un sachet en polyéthylène où sont ajoutés 100 mL de KCL 1 M.

Les sacs sont ensuite soudés et agités pendant une heure à température ambiante. Après 2 h de décantation, 10 mL de surnageant sont ensuite prélevés puis stockés avant analyse à -20°C.

3.5. Suivi des émissions de carbone par le sol

La mesure du CO₂ dégagé par le sol a été effectuée pour les échantillons placés dans les fioles à plasma de 250 mL. Les prélèvements ont été effectués pour les dates suivantes : 3, 7, 10, 14, 28, 42, 56, 84, 112, 140 et 168 jours. A chaque date de prélèvement, les flacons à scintillation faisant office de piège à CO₂ (4 répétitions par traitement) sont prélevés, bouchés et remplacés par un nouveau piège (10 mL de NaOH 0.25 M). Les pièges prélevés sont ensuite stockés avant analyse dans une enceinte en absence de CO₂ dans l'atmosphère.

3.6. Détermination de l'azote minéral du sol

Les concentrations en azote minéral du sol (N-NO₃⁻, N-NH₄⁺), ont été déterminées par une méthode d'analyse colorimétrique séquentielle au moyen d'un analyseur Biosed Global

240 (Random access analyser, Axflow). L'analyseur est paramétré et calibré avec une gamme de 0 à 10 mg N L⁻¹ de N-NH₄Cl et de 0 à 30 mg N-KNO₃ dans une matrice KCL 1 M. Le principe des méthodes sont les suivants : Les ions nitrate sont réduits en ions nitrite par l'hydrazine en condition basique et catalysés par le cuivre. Les ions nitrite réagissent ensuite avec le sulfanilamide pour former avec le N-1-naphtyl-éthylène diamine, un complexe violet dont son absorbance a été mesuré à 546 nm (Kamphake et al., 1967); la détermination de l'azote ammoniacal est basée sur la formation d'un complexe coloré entre l'ion ammonium, le salicylate de sodium et le chlore en milieu alcalin, catalysé par le nitroprussiate de sodium, l'absorbance de ce complexe étant mesurée à 620 nm (Krom, 1980).

3.7. Expression des résultats obtenus

Les valeurs obtenues d'ions ammonium et celles des ions nitrate suite au dosage colorimétrique sont exprimées en mg L⁻¹. Les quantités d'ammonium ou nitrate du sol sont ensuite exprimées mg N kg⁻¹ de sol sec selon la formule suivante :

$$\text{N-NH}_4^+ \text{ ou N-NO}_3^- \text{ (mg N kg}^{-1} \text{ sol sec)} = \frac{[(\text{mgL}^{-1} \text{ échantillon}) - (\text{mgL}^{-1} \text{ blanc})] * [100\text{mL KCl} + \text{mL eau sol}] * 1000}{1000 * 25}$$

avec mL eau du sol (g) = poids de sol sec incubé (25 g) x taux d'humidité (34%).

Les quantités d'azote minéral du sol (mg N kg⁻¹ sol sec) sont ensuite obtenues en sommant les quantités d'azote ammoniacal et nitriques. Pour représenter graphiquement les résultats, les données ont été calculées de la façon suivante :

- Pour chaque traitement, la quantité d'azote minéral présente dans le sol au départ de l'incubation (date = 0 jour) a été soustraite aux quantités d'azote dans le sol présentes dans le sol aux dates suivantes (7, 14, 28 et 56 jours) ;
- Pour les traitements avec résidus, les quantités d'azote dans le sol présentes dans le sol témoin aux dates 7, 14, 28 et 56 jours sont soustraites aux quantités d'azote dans le sol présentes dans le sol avec résidus aux dates correspondantes.

Cette façon de procéder permet de représenter graphiquement la dynamique de l'azote induite par la décomposition du résidu sans prendre en compte la dynamique de l'azote liée à la décomposition de la matière organique du sol, toutes les dynamiques ayant par ailleurs une valeur commune au démarrage de l'incubation (0 mg N kg⁻¹ sol sec).

3.8. Analyses statistiques

Les tests statistiques ont été effectués avec le logiciel R (R core team, 2015) en utilisant un seuil de signification de 5%. La comparaison des quantités d'azote minéral du sol induite par la décomposition des résidus pour chaque date a été effectuée au moyen d'un test d'analyse de variance. Le nombre de réplication étant faible, un test non paramétrique a été utilisé (tests de Kruskal-Wallis). Des tests a posteriori non paramétriques (test Nemenyi) ont également été réalisés par la suite dans le but de pouvoir déterminer significativement les traitements ayant une fourniture en azote semblable et/ ou différente. La relation entre le rapport C/N des résidus et la quantité d'azote minérale induite par la décomposition des

résidus a été établie pour chaque date au moyen d'un test de corrélation de Pearson après vérification des conditions d'application que sont la normalité des données pour les variables rapport C/N et fourniture d'azote minéral des résidus de végétaux. La nature de la relation a ensuite été calculée au moyen du logiciel Excel (Microsoft ® Office Excel, 2010), et est représentée par une équation trouvée qui a permis d'obtenir un coefficient le plus élevé (*i.e.* relation logarithmique).

4. Résultats

Les résultats concernant le suivi de la minéralisation du carbone des résidus n'étant pas disponibles, ils ne seront donc pas présentés dans le rapport. Concernant la dynamique de l'azote du sol, seuls les premiers 56 jours d'incubation seront présentés dans ce rapport.

La minéralisation nette de l'azote dans le témoin sans apport de résidus représente 13.5 mg N kg⁻¹ sol sec. Les quantités minéralisées pendant cette période sont provenues de la dégradation de la matière organique endogène du sol.

Avec l'exception des résidus de vesce de Narbonne et de Fenugrec, tous les résidus de culture induisent une organisation de l'azote minéral du sol dans les premiers jours d'incubation. Par la suite, différents types de comportement sont observés pour la fourniture d'azote provenant de la décomposition des résidus. Parmi les espèces végétales étudiées, deux groupes sont distingués (*Figure 4*) :

- Les résidus des espèces qui induisent une minéralisation nette de l'azote minéral du sol tout le reste de l'incubation (fenugrec, vesce commune, vesce de Narbonne, lentille, haricot, pois chiche, soja) ;
- les résidus des espèces qui continuent d'induire une organisation de l'azote minéral (lupin, orge, sorgho, pois, féverole).

Du début de l'expérience au jour 56, il est ainsi possible de déterminer la tendance des espèces à fournir le plus d'azote au milieu que sont le fenugrec, la vesce de Narbonne et le pois chiche et des espèces à fournir le moins que sont l'orge, le sorgho et le lupin (*Figure 4*).

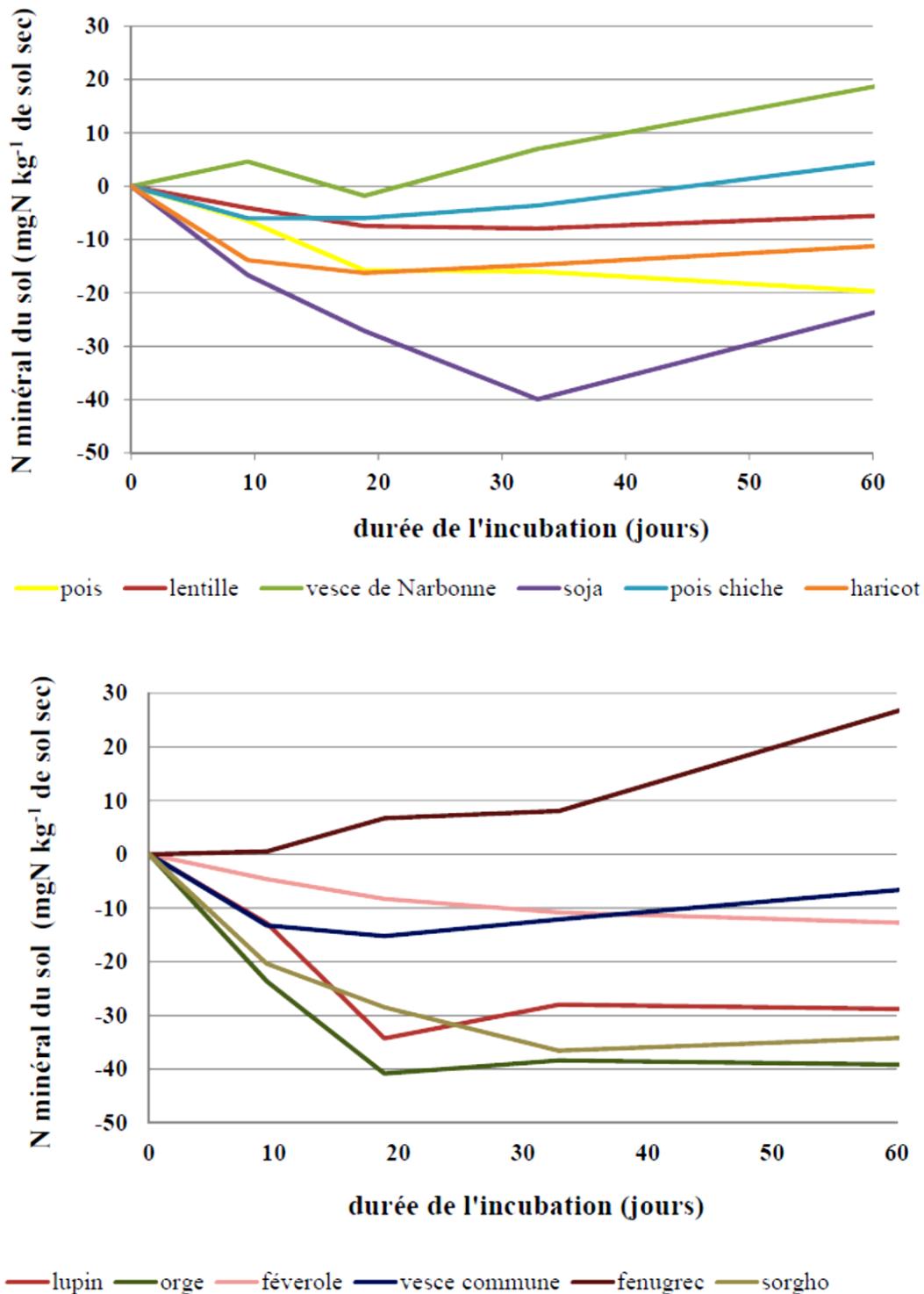


Figure 4 : Evolution de la quantité d'azote minéral du sol induite par la décomposition des résidus de culture comparée. Le témoin est représenté fictivement par l'axe des abscisses ($y = 0$).

Les résultats des tests statistiques montrent que, pour chaque date de prélèvement, il y a des différentes quantités d'azote minéral présente dans le sol et induite par la décomposition du sol selon les traitements (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Résultats des tests statistiques Kruskal-Wallis de la quantité d'azote minéral du sol (mg N kg⁻¹ de sol) induite par la décomposition des résidus (12 résidus de culture).

Date d'incubation	Chi ²	P	Ddl
Jour 7	37.25	0.0001	11
Jour 14	42.04	1.592e ⁻⁰⁵	11
Jour 28	43.879	4.694e ⁻⁰⁶	11
Jour 56	45.082	4.694e ⁻⁰⁶	11

Figure 5 : Représentation des tests a posteriori de Nemenyi pour chaque jour de prélèvement (fen = fenugrec, vn = vesce de Narbonne, pc = pois chiche, le = lentille, fev = féverole, vc = vesce commune, p = pois, h = haricot, so = soja, sg = sorgho, lu = lupin, o = orge). Les quantités moyennes d'azote

Jour 7 :

vn fen le fev pc p lu vc h so sg o

Jour 14 :

fen vn pc le fev vc p h so sg lu o

Jour 28 :

fen vn pc le fev vc h p lp sg o so

Jour 56 :

fen vn pc vc le h fev p so lu sg o

minéral du sol induites par la décomposition des différents résidus réunies par un trait commun ne sont pas différentes au seuil de 5%.

Les tests à posteriori de Nemenyi ont permis ensuite de mettre en évidence les différences significatives entre traitements pour chaque date d'incubation. La **Figure 5** représente le classement des moyennes. Celles-ci varient quelque peu entre dates et certaines moyennes peuvent appartenir à plusieurs ensembles. Deux ensembles se démarquent particulièrement, ce sont les valeurs extrêmes avec d'une part le groupe 1 (vesce de Narbonne, fenugrec) et d'autre part le groupe 2 (orge, sorgho).

Ensuite, les tests de corrélation de Pearson (**Tableau 4**) ont permis de mettre en évidence la significativité de la relation entre l'effet des résidus végétaux sur la quantité d'azote minéral du sol induite par leur décomposition dans le sol et le rapport C/N des résidus,

et ce pour chaque date de prélèvement. Le **Tableau 4** met en évidence une relation très hautement significative ($p \approx 0.001$) entre les deux variables pour 3 des dates et moyennement significative ($p = 0.01$) pour le premier prélèvement (jour 7). Les valeurs négatives du coefficient r montrent par ailleurs que plus le rapport C/N est élevé plus la quantité d'azote présente dans le sol et induite par la décomposition du résidu est faible (**Tableau 4** et **Figure 6**). Le lien entre les 2 variables a pu être ensuite représenté graphiquement par une relation logarithmique (**Figure 6**), confirmant d'une part que plus le rapport C/N est élevé plus la quantité d'azote présente dans le sol et induite par la décomposition du résidu est faible. Les coefficients d'ajustement relativement élevés (**Tableau 4**) révèlent que l'équation choisie représente bien la relation entre les 2 variables.

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques de corrélation de Pearson entre le rapport C/N des résidus et la quantité d'azote minéral présente dans le sol induite par la dégradation des différents résidus végétaux.

Temps	P	r	R ²
Jour 7	0.01	-0.68	0.55
Jour 14	0.00028	-0.87	0.74
Jour 28	0.00157	-0.81	0.73
Jour 56	0.00020	-0.87	0.86

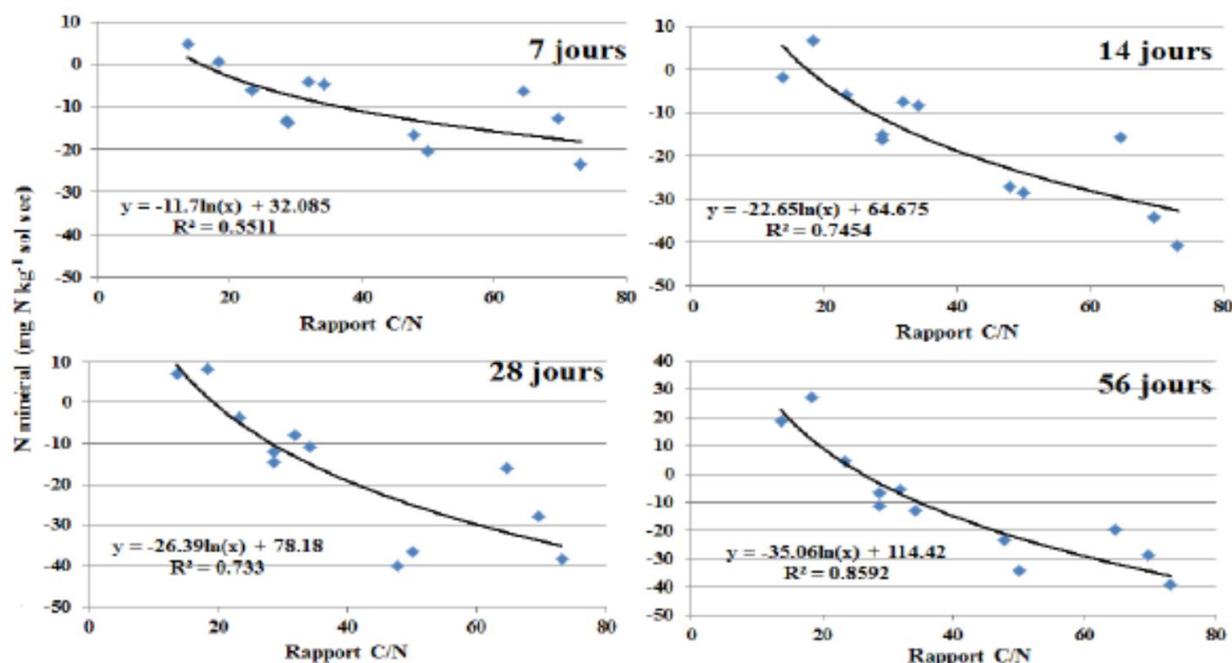


Figure 6 : Relation entre la quantité d'azote minéral présente dans le sol induite par la décomposition des résidus végétaux et leur rapport C/N à différentes dates d'incubation.

5. Discussion

Il est possible d'observer la variation des dynamiques de minéralisation de l'azote du sol induites par la décomposition des résidus végétaux d'une espèce à l'autre. Même si l'analyse de variance montre une différence de l'effet « résidu » pour les premières dates d'incubation, le classement des moyennes effectué à posteriori montre tout de même peu de différence entre les résidus des différentes espèces. Ce résultat peut s'expliquer en partie par le fait que les résultats ne concernent que la première partie de l'incubation, la durée totale prévue de l'incubation étant de 168 jours.

Les résidus de vesce de Narbonne et Fenugrec induisent une minéralisation nette de l'azote dès le début de l'incubation, la minéralisation représentant respectivement 7 et 13.4 % de l'azote apporté par les résidus à 56 jours d'incubation. Tous les autres résidus induisent une phase d'organisation nette où l'azote minéral présent dans le sol décroît. Ensuite, il y a de nouveau une augmentation de la quantité d'azote minéral du sol pour la plupart des résidus. Cette augmentation correspond à une minéralisation nette de l'azote, comme le résultat de la dégradation de l'azote par les micro-organismes.

Selon Justes *et al.* (2009) le processus de décomposition des résidus de culture peut être mis en évidence en 2 phases : i) une phase de minéralisation rapide où sont décomposés les composés organiques simples (lipides, protéines, sucres) et ii) une phase de minéralisation lente où sont décomposés les éléments plus complexes, riches en carbone qui sont progressivement incorporés dans la matière organique stable du sol.

Comme déjà vu, la vitesse de la décomposition des résidus est contrôlée par l'interaction de trois groupes de variables : les états du milieu avec les conditions climatiques (température et humidité du sol) et les caractéristiques physico-chimiques du sol, la qualité (composition biochimique, rapport C/N) du substrat qui détermine sa dégradabilité, et la nature de la communauté de décomposition (les macro et microorganismes) (Heal *et al.*, 1997 ; Correia & Andrade, 1999 in Gama-Rodrigues, 2007).

Avec cette étude, il a été possible de déterminer le rapport C/N des résidus et constater qu'il existe une relation statistique forte entre le rapport C/N des résidus et la quantité d'azote présente dans le sol induite par la décomposition des résidus, et ce pour toutes les dates de prélèvement. Le rapport C/N est inversement proportionnel à l'induction de l'azote minéralisé : plus le rapport C/N du résidu est faible plus la décomposition des résidus induit une plus forte quantité d'azote minéralisée dans le sol.

Durant le processus d'organisation, la biomasse du sol assimile l'azote minéral dans le même temps que l'oxydation des substrats carbonés. Les processus peuvent s'expliquer de la façon suivante en considérant que la biomasse microbienne a un faible rapport C/N (voisin de 8) (Nicolardot *et al.*, 1997) : 1) Si les résidus de culture décomposés par la biomasse microbienne ont un rapport C/N élevé (comme pour les pailles d'orge et de sorgho), les faibles quantités d'azote organique contenues dans les résidus sont insuffisantes pour satisfaire les besoins de la microflore pour assimiler le carbone organique, les micro-organismes puisant dans le stock d'azote minéral du sol pour compléter et satisfaire leurs besoins qui induit alors

une organisation nette de l'azote minéral du sol ; 2) par contre, lorsque le rapport C/N des résidus est faible (cas les résidus de fenugrec et vesce de Narbonne) et donc que la quantité d'azote organique contenue dans les résidus est supérieure aux besoins d'azote des micro-organismes pour décomposer le carbone, alors l'excès d'azote organique dégradé est libéré dans le sol sous forme minérale lors de la décomposition des résidus, ce qui induit une minéralisation nette de l'azote dans le sol (Nicolardot *et al* 1997). Les résultats montrent que les résidus de cultures qui induisent une minéralisation nette la plus élevée, sont les mêmes qui ont un rapport C/N très bas (comme par exemple les résidus de fenugrec). Le contraire est observé avec les résidus qui ont le rapport C/N le plus élevé, une fois qu'ils montrent la plus grande organisation nette (les résidus d'orge et sorgho, les espèces non légumineuses).

Les résultats permettent de savoir quels les résidus ont une fourniture potentielle d'azote. Seuls les résidus issus des cultures de fenugrec, vesce de Narbonne et pois chiche induisent une fourniture nette de l'azote, représentant 3 à 14 % de l'azote apporté à 56 jours d'incubation. Pour les autres résidus, il faut poursuivre l'incubation pour différencier ceux qui vont apporter une fourniture positive de ceux qui vont plutôt induire une organisation de l'azote. Par rapport aux résidus des espèces non légumineuses, pour le moment, il est perçu qu'elles sont les espèces qui ne fournissent pas d'azote et les espèces légumineuses peuvent offrir un service de fourniture d'azote plus important que les espèces non légumineuses.

6. Conclusion

Par rapport l'objectif de notre étude qui était de quantifier la fourniture en azote de différentes espèces légumineuses comparés à ceux issus de cultures non légumineuses sur la dynamique de l'azote minéral du sol, on peut conclure que la dynamique de l'azote obtenue après incorporation des résidus de légumineuses est de même nature que celle obtenue pour d'autre résidus de culture et que les quantités d'azote minéralisées sont fortement reliées au rapport C/N des résidus. Cette conclusion n'est que partielle, car l'étude n'est pas encore terminée et les résultats ont été obtenus après 56 jours d'incubation. Donc, jusqu'à la fin de l'étude on aura d'autres résultats pour évaluer et ainsi conclure l'étude sur la fourniture en azote rendue pour les légumineuses aux systèmes de production agricoles.

7. Références bibliographiques

- Abera, G., Wolde-Meskel, E., & Bakken, L. R. (2012). Carbon and nitrogen mineralization dynamics in different soils of the tropics amended with legume residues and contrasting soil moisture contents. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 51-66.
- ADEME (2015). Cultiver des légumineuses pour réduire l'utilisation d'intrants de synthèse. 11p. Agriculture et environnement : Des pratiques clefs pour la préservation du climat, des sols et de l'air, et les économies d'énergie. Fiche n° 5.
- Aita, C., and Giacomini, S. J. (2003). Crop residue decomposition and nitrogen release in single and mixed cover crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27.4 : 601-612.
- Corre-Hellou, G. *et al* (2013). Associations céréale-légumineuse multi-services. *Innovations Agronomiques*, 30 : 41-57.
- Costa E., Perez J., Kreft J.U. (2006) Why is metabolic labour divided in nitrification? *Trends in Microbiology*, 14, 213-219.
- DEVELOPPEMENT DURABLE (2010). Avantages environnementaux et économiques d'une relance des légumineuses en France – Le Point, n° 40, janvier 2010.
- Doneda, Alexandre. *et al* (2012). Biomass and decomposition of cover crop residues in monoculture and intercropping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36.6 : 1714-1723.
- Duc G. ; Jeuffroy M.H. ; Tivoli B (2011). Les légumineuses protéagineuses pour améliorer les bilans environnementaux en grandes cultures : principaux travaux de l'INRA qui ont accompagné la naissance de la filière et les perspectives. *Innovations Agronomiques* 12, 157-180.
- Fosu, M., Kühne, R. F., & Vlek, P. L. (2007). Mineralization and microbial biomass dynamics during decomposition of four leguminous residues. *Journal of biological sciences*, 7, 632-637.
- Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Brito, E.C. (2007). Decomposition and nutrient release from cover crop residues in passion-fruit plantation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 1421-1428.
- Justes E, Mary B, Nicolardot B (2009) Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil : parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and soil* 325 : 171-185.
- Kamphake LJ, Hannah SA, Cohen JM (1967) Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. *Water Research* 1 : 205-216.
- Krom MD, Berner RA (1980) The diffusion coefficients of sulfate, ammonium, and phosphate ions in anoxic marine sediments¹. *Limnology and Oceanography* 25 : 327-337.
- Le Souder, C. ; Labreuche, J. (2007). Planter une légumineuse à l'interculture. *Perspectives agricoles* ; n° 333, 63-65, avril 2007.

- Matos, Eduardo da Silva, et al (2008). Green manure in coffee systems in the region of Zona da Mata, Minas Gerais: characteristics and kinetics of carbon and nitrogen mineralization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32.5 : 2027-2035.
- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E. S., Schloter, M., & Heß, J. (2004). Turnover of grain legume N rhizodeposits and effect of rhizodeposition on the turnover of crop residues. *Biology and Fertility of Soils*, 39, 153-164.
- Mbengue, M. (2010). Perception et transduction du signal bactérien facteur Nod dans l'établissement de la symbiose rhizobium-légumineuse: recherche et caractérisation de partenaires du LysM-RLK LYK3, un récepteur putatif des facteurs Nod chez *Medicago truncatula* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- N'Dayegamiye, Adrien (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. In Colloque sur l'azote, CRAAQ-OAQ. Québec. 11 p.
- Nicolardot B, Mary B, Houot S, Recous S (1997) La dynamique de l'azote dans les sols cultivés. In : Lemaire G, Nicolardot B (eds) Maitrise de l'azote dans les agrosystèmes. INRA Edition, Paris, pp 87-103.
- Odhiambo, J. J. (2010). Decomposition and nitrogen release by green manure legume residues in different soil types. *African Journal of Agricultural Research*, 5, 090-096.
- Pointereau, P. (2001). Légumineuses : quels enjeux écologiques ? *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* n°44, 69-72, octobre 2001.
- Ranells, N.N. & Wagger, M.G. Nitrogen release grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agron. J.*, 88:777-782, 1996.
- Revellin, C (2012). Les symbioses fixatrices d'azote. Presented at Alliances au pays des racines - 14^e Colloque Scientifique de la Société d'Horticulture de France, Paris, FRA.
- Roger-Estrade, J. Gestion des peuplements végétaux et des ressources du milieu : Gestion des états physique et chimique. AgroparisTech, Enseignement d'agronomie, 2009, 60 p.
- R Core Team (2015) R : A language and environment for statistical computing version 3.1.3. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL, <http://www.Rproject.org/>
- Wrage N, Velthof GL, van Beusichem ML, Oenema O (2001) Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 1723-1732.