

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica

Titouan BARAËR
Agronomie, Productions Végétales, Environnement
2013

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica

Minéralisation dans les sols et transferts d'azote

Titouan BARAËR
Agronomie, Productions Végétales, Environnement
2013



Maitre de stage : Dr. VAN DEN MEERSCHÉ Karel

Tuteur Cirad : Dr. HARMAND Jean Michel

Tutrice pédagogique :

Dr. VASSAL-COURTAILLAC Nathalie

« L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'équipe pédagogique de VetAgro Sup qui m'a permis de poursuivre la formation d'ingénieur dans une dimension internationale, qui s'achève par cette expérience professionnelle au sein du CIRAD.

Je remercie également vivement Nathalie Vassal-Courtaillac, tutrice de stage à VetAgro Sup.

Un remerciement spécial à mes colocataires pour l'ambiance chaleureuse régnant dans la maison. Egalement à toutes les personnes rencontrées au CATIE.

Au sein du CATIE, c'est à Douglas, Carlos et Patricia, téméraires techniciens et responsable du laboratoire d'analyse de sols respectivement, que je dis un grand merci. Mais aussi à Alexis, Luis Romero et ses ouvriers pour leur aide efficace lors du travail de terrain, à Maria pour m'avoir aidé à trier les racines. N'oublions surtout pas Elias de Melo, responsable du projet Cafnet, pour son savoir total sur les parcelles expérimentales où l'étude a été menée.

Au sein du CIRAD le plus grand remerciement va à l'équipe proche, à savoir Bernd Zeller, Olivier Rousard et Hélène Guillemain pour la partie administrative.

Bien évidemment à Jean Michel Harmand, directeur adjoint de l'UMR Eco&Sols, pour avoir accepté ma candidature à ce stage et Karel van den Meersche, maître de stage et chercheur au sein du CIRAD, pour m'avoir aidé du début à la fin du projet. Je les remercie pour l'aide apportée quant à la révision de ce mémoire.

Enfin, à ma famille et à mes proches pour leurs nouvelles.

Résumé

Une remise en question de la durabilité des systèmes de monoculture caféières ont poussé à l'étude avancée des systèmes agroforestiers. La compréhension des processus régissant le cycle de l'azote (N) en leur sein est un facteur clé pour leur durabilité.

La présente étude porte sur deux aspects :

1) Analyse explicative du taux de minéralisation, de la minéralomasse aérienne des caféiers et de la colonisation racinaire de sols permutés dans six parcelles (peuplements) de caféiers à Turrialba (Costa Rica). Ces systèmes diffèrent par l'arbre d'ombrage (*Terminalia amazonia*, *Erythrina poeppigiana* et *Abarema idiopoda*, aucun) et le mode de gestion agronomique (organique ou conventionnel).

Les rendements, corrélés aux biomasses caféières et aux minéralomasses, ne sont pas expliqués par les taux de minéralisation. Ces derniers sont en partie dépendants de l'arbre d'ombrage et/ou du mode de gestion agronomique. L'explication multi-variable des taux est une piste d'avenir.

2) Expérimentation d'une méthode d'identification des flux d'azote dans les associations Érythrine (*Erythrina poeppigiana*) et caféier (*Coffea arabica* var. *caturra*) via le marquage de la plante fixatrice au ^{15}N .

Après marquage au ^{15}N -nitrate du tronc de l'Érythrine (1 g ^{15}N), un signal fort a été observé dans le houppier. Le marquage des racines est plus incertain. Les sols et les caféiers présentent des valeurs de transfert depuis l'arbre d'ombrage faibles, démontrant l'existence d'un flux entre l'arbre et le caféier. Aussi, cette technique de marquage est réalisable pour obtenir des résidus de branches et feuilles dont on pourra suivre le devenir de l'azote après leur décomposition.

Mots clés : Minéralisation, marquage ^{15}N , agroforesterie, *Coffea arabica*, *Erythrina poeppigiana*, azote, Costa Rica

Abstract

Coffee production is one of the most developed economic sectors in Costa Rica. Problems related to sustainability of monoculture, often intensive systems, lead to advanced study of agroforestry systems (AFS). A good understanding of processes governing nitrogen (N) cycle in AFS is a key factor of their sustainability.

This study deals with two topics:

1) An explanatory analysis of mineralization rates, N- & C-mass of the aerial part of coffee plants and root colonization in permuted soils of four coffee plots in Turrialba, Costa Rica differing by the shade tree (*Terminalia amazonia*, *Erythrina poeppigiana* and *Abarema idiopoda*, none) and treatment (organic or conventional).

Yields, correlated to aerial coffee biomasses and N accumulation, are not explained by soil N mineralization rates. Those are partly explained by the shade tree and/or the agricultural management. Multivariable modeling remains to be done.

2) The experiment of a nitrogen fluxes qualification method in *Erythrina* (*E. poeppigiana*)-coffee AFS: the ^{15}N labeling.

After labeling the *Erythrina* stem with ^{15}N -nitrate (1 g ^{15}N) a strong labeling signal was observed in *Erythrina*'s crown. Roots labeling is more uncertain. Soils and coffee studied compartments show labeling signals leading to low, but existent, N transfer rates from the tree to the coffee plant. This labeling method allows also obtaining branches and leaves residues from which ^{15}N could be followed after their decomposition.

Keywords: Mineralization, ^{15}N labeling, agroforestry, *Coffea arabica*, *Erythrina poeppigiana*, nitrogen, Costa Rica

Table des matières

Introduction générale	1
De l'importance des SAF en caféiculture.....	1
Contexte du stage	2
Partie I. L'azote dans les SAF Caféiers (exemple du Costa Rica)	3
I.1. Des interactions globalement mal connues.....	3
I.2. L'importance de mieux cerner le cycle de l'azote	3
I.3. Notions essentielles sur le cycle de l'azote.....	4
I.3.1. L'azote dans le sol	4
I.3.2. Les processus de transformation et de transfert de l'azote du sol.....	5
Partie II. Influence de l'arbre d'ombrage et du traitement sur la minéralisation dans les sols de systèmes caféiers	6
II.1. Introduction à l'expérience	6
II.1.1. Problématique de recherche.....	6
II.1.2. Objectifs de l'étude.....	6
II.1.3. Hypothèses de l'étude.....	7
II.2. Matériels et méthodes	7
II.2.1. Localisation et description du site de l'étude.	7
II.2.2. Présentation des espèces étudiées.....	8
II.2.3. Variables et déterminants du cycle de l'azote étudiés	9
II.2.4. Protocoles de terrain	10
II.2.4.1. Biomasse aérienne et statut azoté des caféiers	10
II.2.4.1.1. Base théorique de l'estimation de la biomasse	10
II.2.4.1.2. Mesures de terrain.....	11
II.2.4.2. Etude de la minéralisation de l'azote du sol	12
II.2.4.2.1. Base théorique	12
II.2.4.2.2. Mesures de terrain.....	13
II.2.5. Protocoles de laboratoire	14
II.2.5.1. Statut azoté des caféiers.....	14
II.2.5.2. Etude des carottes de sols	14
II.2.5.2.1. Minéralisation et nitrification	14
II.2.5.2.2. Protocole pour la colonisation racinaire	15
II.2.5.3. Analyses des données	15
II.3. Résultats.....	16

II.3.1. Biomasse et statut azoté des caféiers	16
II.3.1.1. Biomasse aérienne des caféiers.	16
II.3.1.2. Teneur en azote des caféiers	17
II.3.1.3. Minéralomasse azotée des caféiers.....	17
II.3.2. Etude de la minéralisation	18
II.3.2.1. Minéralisation anaérobie de l'azote du sol	19
II.3.2.2. Minéralisation aérobie de l'azote du sol.....	20
II.3.3. Colonisation racinaire.....	21
II.3.4. Lien avec et entre les valeurs de minéralisation et colonisation racinaire.....	22
II.4. Discussion.....	23
II.4.1. Des objectifs en partie atteints.....	23
II.4.2. Quelques biais potentiels	23
II.4.3. Les variables influant sur la minéralisation des sols reste à déterminer.....	24
II.4.4. Une manipulation à poursuivre malgré les difficultés de comparaison.....	24
Partie III. Expérience d'identification de transfert d'azote dans un SAF Érythrine-caféier	25
III.1. Introduction à l'étude.	25
III.1.1. Marquage au ¹⁵ N	25
III.1.2. Problématique de recherche.	26
III.1.3. Objectifs	26
III.2. Matériels et méthodes.....	26
III.2.1. Localisation et description du site d'étude – 15N	26
III.2.2. Notions sur la méthode employée.	27
III.2.3. Protocole de terrain	28
III.2.3.1. Mode opératoire du marquage.....	28
III.2.3.2. Un échantillonnage régulier... ..	28
III.2.4. Protocole de laboratoire	29
III.2.5. Analyse statistiques	29
III.3. Résultats	30
III.3.1. Identification des flux, validité de la méthode utilisée.....	30
III.3.1.1. Abondance naturelle et marquage de l'Érythrine.....	30
III.3.1.2. Transferts aux caféiers.....	31
III.3.2. Production de biomasse aérienne de l'Érythrine.....	32
III.4. Discussion	33

Conclusion générale et perspectives	35
Bibliographie.....	37
Annexes.....	40

Liste des figures

- Figure 1 : Le cycle de l'azote dans une parcelle agricole
- Figure 2 : Localisation des parcelles agroforestières étudiées
- Figure 3 : *Erythrina poeppigiana* en association avec des caféiers
- Figure 4 : Des *Terminalia amazonia*
- Figure 5 : *Abarema idiopoda* en association avec *Terminalia amazonia* et caféier
- Figure 7 : Schéma de la partie aérienne du caféier.
- Figure 8 : Dispositif expérimental de l'étude de la minéralisation dans les sols
- Figure 9 : La manipulation de transfert de carottes
- Figure 10 : L'analyse de minéralisation en conditions aérobie
- Figure 11 : Rendements en café dans les six types de parcelles étudiées pour la période 2002-2012
- Figure 12 : Biomasse aérienne moyenne d'un caféier dans les parcelles étudiées
- Figure 13 : Moyenne de la teneur azotée de trois compartiments du caféier
- Figure 14 : Minéralomasse azotée moyenne de deux compartiments des caféiers dans les parcelles étudiées
- Figure 15 : Relation entre le taux de minéralisation aérobie et le taux de nitrification pour l'ensemble des carottes
- Figure 16 : Colonisation racinaire dans les carottes de sol en fonction de la parcelle d'origine
- Figure 17 : Colonisations racinaires dans le traitement de destination TBO
- Figure 18 : Colonisation racinaire totale en fonction des traitements de destination
- Figure 19. Localisation de la parcelle étudiée, à la Finca Monte Claro
- Figure 20 : Schéma simplifié du dispositif expérimental
- Figure 21 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un spectromètre de masse
- Figure 22 : Valeurs de marquage $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées dans les feuilles et branches d'Érythrine pour les différentes dates d'étude
- Figure 23 : Valeurs de marquage $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées dans les racines de l'Érythrine et les compartiments des caféiers pour les différentes dates d'étude
- Figure 24 : Valeurs de transferts de ^{15}N calculés dans les différents compartiments pour les différentes dates d'étude selon trois méthodes.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Mode de gestion des parcelles

Tableau 2 : Nombre d'analyses réalisées par type de parcelles

Tableau 3 : Hypothèses de présence pour la colonisation racinaire.

Tableau 4 : Table de corrélation entre cinq variables étudiées

Tableau 5 : Valeurs des taux de minéralisation et nitrification et groupes de Tukey dans les parcelles de destination et dans les carottes de référence (*nd)

Tableau 6 : Valeurs des taux de minéralisation anaérobie et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

Tableau 7 : Valeurs des taux de minéralisation aérobie et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

Tableau 8 : Valeurs du ratio entre les taux de minéralisation aérobie et taux de nitrification dans les carottes de référence (max=1)

Tableau 9 : Valeurs des taux de colonisation racinaire du caféier et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

Tableau 10 : Valeurs des taux de colonisation racinaire totale et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

Tableau 11 : Dates d'échantillonnages (t en jours)

Liste des annexes

Annexe 1: Calendrier des pratiques agricoles dans l'essai..... 40

Annexe 2 : Biomasse des trois compartiments par parcelle étudiée 40

Annexe 3 : Teneur en azote et carbone des trois compartiments par parcelle étudiée 41

Annexe 4 : Minéralomasse (C:N) en azote des trois compartiments par parcelle étudiée 41

Annexe 5 : Tableau d'analyse des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et de transferts 46

Annexe 6. Valeurs de transferts par date d'analyse dans les différents compartiments 47

Abréviations

¹⁵ N :	Azote marqué
*RW.TW	valeur exprimant la colonisation racinaire par l'arbre *
A1/2/3 :	Numéro de la répétition
Anova :	Analyse de la variance
B :	Bloc
BO :	Traitement bajo orgánico (organique)
C* :	Carbone
C :	Cashà ou Abarema / Café lorsqu'il s'agit de colonisation racinaire
Ca :	Cashà ou Abarema lorsqu'il s'agit de colonisation racinaire
CATIE:	Centro Agronómico Tropical de Enseñanza y Investigación.
Cirad :	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CMC :	Parcelle agroforestière Cashá-caféier en conventionnel
E :	Érythrine (<i>Erythrina poeppigiana</i>)
EBO:	Parcelle agroforestière Érythrine-caféier en organique
Eco&Sols :	Ecologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes
EMC :	Parcelle agroforestière Érythrine-caféier en conventionnel
EPIC:	Etablissement public à caractère industriel et commercial
Intens&Fix :	Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières
KCl:	Chlorure de potassium
MC :	Traitement medio convencional (conventionnel)
N :	Azote
Parcelle :	égal à « peuplement »
R ² :	Coefficient de détermination
S :	Monoculture caféière de plein soleil
SAF :	Système agroforestier
SAFSE :	(projet) Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers tropicaux
SMC:	Parcelle de monoculture caféière en conventionnel
T :	Terminalia
TBO :	Parcelle agroforestière Terminalia-caféier en organique
TMC :	Parcelle agroforestière Terminalia-caféier en conventionnel

Introduction générale

De l'importance des SAF en caféiculture.

La caféiculture est l'une des productions agricoles phares du Costa Rica autant qu'un secteur d'activités important, touchant près de 8% des actifs (INEC, 2009). Les innovations technologiques après la seconde guerre mondiale et la nécessité mondiale d'assurer la sécurité alimentaire ont conduit de nombreux acteurs agricoles à se tourner vers une agriculture plus productive, bénéficiant d'une forte artificialisation du milieu, obtenue par un recours massif aux intrants tels que les engrais azotés et les produits phytosanitaires. Cette agriculture est dite « intensive » ou « conventionnelle » (Campbell L., 2012).

Au Costa Rica, les systèmes caféiers (*Coffea arabica*) intensifs conduits en quasi-monoculture ne sont pas traditionnels (Vaast P., Harmand J.M., 2002) mais ont connu un large essor, dans les grandes comme les petites exploitations. Le système est alors généralement caractérisé, et ce notamment dans la Vallée Centrale du Costa Rica où la majeure partie de la production de café est localisée, par des hauts apports d'azote de l'ordre de $250 \text{ kg.N.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Harmand et al., 2007) directement reliés à des besoins plus élevés des plantes et permettant des rendements élevés (Fassbender, 1993 dans Zuluaga Peláez, 2004).

Cependant, la production caféière costaricienne connaît depuis les années 1990 une crise profonde, marquée par une fluctuation importante des prix du café comme de ceux des intrants (Zuluaga Peláez, 2004). Selon Muschler (1997 dans Arana Meza 2003), les systèmes de monoculture caféière ne sont rentables que si l'investissement est possible, ce qui n'est pas le cas dans un tel environnement socio-économique. (Movan, 1992 dans Hagggar et al., 2011) Socialement parlant, de tels systèmes intensifs ne semblent donc pas être une option durable pour la production de café.

D'autre part, au cours des dernières décennies, la caféiculture a été secouée par des problèmes de dégradation de l'environnement dont, notamment, l'érosion et les pollutions dans les bassins versants (Albertin A. et Nair P.K.R., 2004 ; Hagggar et al., 2011, Spalding and Exner, 1993 dans Tully K.L., Lawrence D., Scanlon T.M., 2012). L'utilisation massive d'intrants est également la cause de la diminution de la présence d'arbres d'ombrages dans les systèmes caféiers.

L'agroforesterie, définie par Leakey (1996) est « un système de gestion des ressources dynamique, écologique et naturel qui, par l'intégration des arbres dans les fermes et le paysage permet une production durable et diversifiée, procurant aux paysans des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux accrus ». Sommariba (1992) rajoute trois conditions fondamentales, à savoir : l'existence d'au minimum deux espèces associées et interagissant biologiquement ; l'une des composantes au moins est une espèce ligneuse pérenne ; l'une des composantes au moins a vocation agricole.

Dans un contexte mondial où l'environnement est au cœur des préoccupations, les systèmes agroforestiers (SAF) s'imposent comme une solution possible en vue d'assurer une production durable de café. Cette durabilité vise à « répondre aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Brundtland G.H., 1987).

Bien que les systèmes caféiers soient extrêmement divers en Amérique Centrale, seulement 10% des caféières au Costa Rica sont sous ombrage arboré. (Vaast et Harmand, 2002), Cependant, la situation économique a renforcé l'attrait pour les systèmes agroforestiers (Payán et al., 2009). En effet, face à ces risques environnementaux et économiques, et suite à une demande toujours plus forte de café certifié « biologique », de nombreux caféiculteurs se sont tournés vers des systèmes alternatifs à bas coût et permettant de diversifier les sources monétaires (Arana Meza V.H., 2003 ; Hagggar et al., 2011). Les labels, plus que les certifications, ont également contribué à la réorientation des producteurs dans des systèmes agroforestiers plus respectueux de l'environnement (Harmand et Vaast, 2010, Payán et al., 2009, Vaast et al., 2005 dans Siles, -). Ceci inclut les systèmes agroforestiers, avec présence d'arbres souvent multifonctionnels : fixateurs d'azote, générateurs de produits forestiers non ligneux ou encore de services écosystémiques.

Contexte du stage

Le Cirad (centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) a vu le jour en 1984. Il s'agit d'un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Sa mission globale est de produire et transmettre des connaissances pour accompagner le développement agricole des pays du Sud et contribuer au débat sur les grands enjeux mondiaux de l'agronomie (Cirad, 2013).

Au sein de cette structure, l'UMR Eco&Sols (écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agro-écosystèmes) est une UMR mixte INRA-Montpellier SupAgro-Cirad-IRD. Son objectif général est de caractériser le fonctionnement conjoint des plantes et du sol sous les effets des changements globaux et des pratiques agronomiques.

L'enjeu de l'UMR dans ce projet est de développer des stratégies d'intensification écologique générant une production durable par des méthodes agro-environnementales. L'association de Légumineuses dans les champs ou dans les parcelles forestières est fortement étudiée.

L'ensemble des projets du Cirad au Costa Rica fait également partie du PCP Amérique centrale (Mesoamerican Scientific Partnership Platform on Agroforestry Systems with Perennial Crops).

Ce stage est plus exactement financé dans le cadre du projet SAFSE dont l'objectif est la recherche de compromis entre productions et services écosystémiques rendus par les écosystèmes tropicaux.

Enfin, ce stage s'est articulé selon deux sous-problématiques. Ce choix a été fait après discussions compte tenu de la durée du stage et des objectifs visés, en lien avec les mécanismes étudiés et les contraintes techniques.

Les deux sous-problématiques cadrent dans une des parties du projet SAFSE nommée: « *Services d'approvisionnement et autres services écosystémiques dans les systèmes agroforestiers, interactions et compromis* » et plus précisément dans la première tâche de cette partie: « *Caractérisation des services écosystémiques et interactions biophysiques et biologiques dans les SAF* ».

La première étude traitée dans la partie II, porte sur la minéralisation de l'azote dans les sols de différents systèmes agroforestiers caféiers. La deuxième étude (partie III), cible les transferts d'azote entre une Légumineuse d'ombrage, *Erythrina poeppigiana*, les sols et les différents compartiments des caféiers présents à proximité de l'arbre.

Partie I. L'azote dans les SAF Caféiers (exemple du Costa Rica)

Parmi les services écosystémiques retrouvés dans les SAF, on peut noter l'importance de la régulation du cycle de l'azote par les SAF. (Arana Meza, 2003) note par exemple l'importance des résidus végétaux (litière et débris d'élagage), ainsi que le choix de l'arbre d'ombrage et de sa gestion (Fassbender, 1993 dans Arana Meza, 2003) dans le cycle de l'azote (N). Nygren et al. (2012) soulignent l'importance des arbres ayant la capacité de fixer l'azote dans l'augmentation du bilan azoté du système tout en compensant les exportations. Mungia et al. (2004) l'appuient et montrent que cette fixation d'azote est associée au recyclage de l'azote par ces résidus végétaux. Les débris de Légumineuses se décomposeraient plus rapidement que ceux d'autres espèces.

Enfin, Tully et al. (2012) ont montré que les processus biotiques et abiotiques sont aussi importants que la gestion de l'arbre d'ombrage dans la détermination des flux d'azote au sein de systèmes caféiers. De là l'intérêt de connaître la biologie des composantes du système et agir en conséquence.

I.1. Des interactions globalement mal connues

Les systèmes agroforestiers caféiers souffrent cependant d'un manque de connaissances sur les processus écologiques se déroulant entre ses composantes (CATIE, ASIC, Icafe, 2012). Ceci génère un manque de crédibilité dans la démonstration visant à prouver que de tels systèmes peuvent être économiquement viables et assurer une production écologiquement intensive. Vaast et Harmand (2002) soulignent par exemple que de nombreuses informations restent à préciser, notamment en termes de gestion de l'arbre d'ombrage. Aussi, les données existantes sont difficiles à extrapoler à d'autres sites (van Oijen M. et al., 2009).

Du fait de leur plus grande complexité que les monocultures, les schémas de gestion des SAF demandent une connaissance particulièrement détaillée des cycles biogéochimiques et des interactions inter-composantes. Ces interactions influencent dans une large mesure la disponibilité de la ressource (Swift et al., 2004). De nombreuses recherches ont été menées sur les besoins des composantes dans les SAF mais fort peu se sont penchées sur l'effet des interactions interspécifiques sur les stratégies d'allocation des ressources, notamment en termes de compétition ou de facilitation. (Campbell, 2012).

La gestion de l'azote est un élément clé dans les systèmes agricoles puisqu'il est très souvent, et c'est le cas dans les systèmes caféiers, l'élément limitant principal de la productivité (Carvajal, 1984 dans Arana Meza 2003). Or, bien que le cycle de l'azote soit théoriquement très bien connu, la réalité pratique est toute autre.

I.2. L'importance de mieux cerner le cycle de l'azote

Comment « bien » fertiliser sans connaître le stock et la disponibilité en azote du sol ?

Dans le cas des SAF associant des espèces légumineuses fixatrices d'azote, cette question est difficile à appréhender car les espèces arborées et leur gestion, comme l'importance des élagages ou leur densité, peuvent clairement avoir un impact quant à la disponibilité de l'azote dans le sol. (Arana Meza, 2003)

Toutefois, parmi les mécanismes impliqués, deux processus importants opèrent dans de tels systèmes : la fixation diazotrophe et la minéralisation de l'azote du sol. En effet, les taux de minéralisation peuvent être différents selon les SAF caféiers. Les systèmes racinaires des arbres

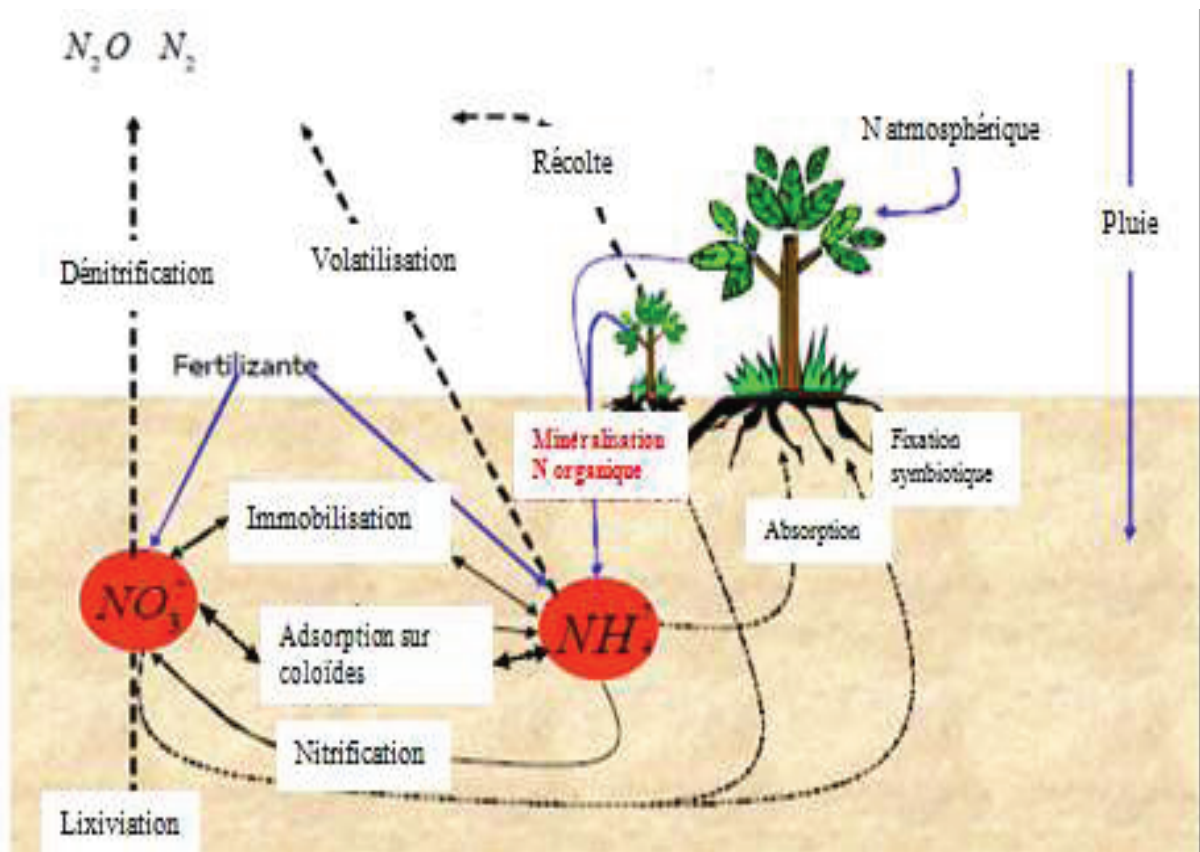


Figure 1 : Le cycle de l'azote dans une parcelle agricole

Source : adapté de Coyne (1999)

notamment peuvent avoir des effets très contrastés sur la nitrification comme l'ont montré Andrianarisoa K.S. et al. (2010). Dans des cultures caféières sous légumineuses ont été mesurés des taux de minéralisation de l'azote du sol plus élevés qu'en monoculture (Babbar et Zak, 1994 ; Hergoualc'h et al, 2008).

De manière générale, peu d'informations sont disponibles, permettant de modéliser le cycle de l'azote dans les systèmes agroforestiers, et en particulier les systèmes à base de caféiers (Nygren et al., 2012).

La réduction des intrants, notamment azotés et donc la limitation de la contamination de l'environnement par les excès azotés, est un des services écosystémiques offerts par les systèmes agroforestiers, ceci grâce aux mécanismes de facilitation entre espèces associées et à la capacité de certains arbres de la famille des Légumineuses à fixer l'azote. Cependant, afin d'optimiser ces processus et limiter les compétitions, le choix de l'arbre d'ombrage ainsi que sa gestion sont des éléments clés (Fassbender, 1993 dans Arana Meza, 2003).

De là l'intérêt de connaître les interactions entre les composantes du système et agir en conséquence pour limiter l'usage d'intrants et les pollutions liées.

I.3. Notions essentielles sur le cycle de l'azote

I.3.1. L'azote dans le sol

Cycle de l'azote

Le cycle biogéochimique de l'azote comprend la circulation de cet élément minéral sous toutes ses formes entre l'atmosphère, la biomasse, le sol, le sous-sol et les eaux. Il comprend les processus biotiques internes au fonctionnement des végétaux terrestres ainsi que l'échange que ces dernières réalisent avec le sol et l'atmosphère.

Le cycle de l'azote dans le sol, tel que le définit, et l'illustre Coyne (1999) en figure 1, comprend l'ensemble des transformations de l'azote dans le sol.

Formes organiques et inorganiques.

L'azote du sol dit « organique » provient de la décomposition d'êtres vivants mais aussi de la fixation d'azote moléculaire (N_2) par certains microorganismes. (Arana Meza, 2003)

L'azote dit « inorganique » est l'objet de notre étude. Il se présente sous forme d'ion ammonium (NH_4^+), de nitrite (NO_2^-), de nitrate (NO_3^-), mais également sous forme de gaz : oxyde nitreux (N_2O), dioxyde d'azote (N_2O_2), diazote (N_2), ammoniac (NH_3) et autres gaz en faibles quantités.

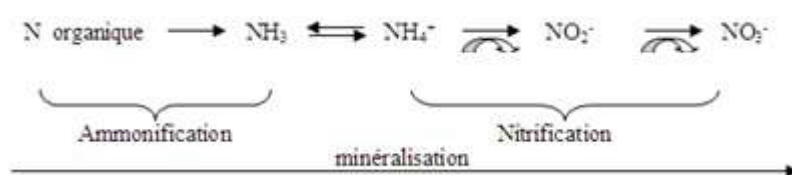
D'après Arana Meza (2003), la quantité totale conjuguée de NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^- , c'est-à-dire l'azote *disponible*, pour les plantes dans le sol est de l'ordre de 2% à 5% de l'azote total du sol.

I.3.2. Les processus de transformation et de transfert de l'azote du sol

Minéralisation de l'azote

Le processus de minéralisation est le fait des microorganismes du sol qui, utilisant dans leur cycle de vie l'énergie et les nutriments contenus dans la matière organique, rejettent l'excès azoté sous forme d'azote dit inorganique ou minéral, disponible pour les plantes. Ces processus microbiologiques sont influencés par les propriétés physico-chimiques du sol telles que la température, l'humidité, le pH et par la quantité et la qualité des matières organiques (Myers et al., 1994). Par exemple, un ratio C/N bas aurait tendance à favoriser le processus de minéralisation de l'azote.

Le processus de minéralisation consiste en deux étapes décrites ci-dessous :



Le processus d'ammonification est dirigé essentiellement par des peptidases et des protéases (Stevenson, 1986) qui transforment l'azote organique en ammoniac. Ensuite, dans les conditions aérobiques, survient la nitrification, impliquant les réactions de nitrosation puis nitratisation, qui conduit à la formation de nitrate, composé final de la minéralisation. Harmand et al. (2007) notent par exemple des valeurs de 0,2 à 0,9 mgN/kg/jour pour la minéralisation dans des SAF caféiers au Costa Rica.

Fixation symbiotique de l'azote

La fixation symbiotique de l'azote résulte de l'association entre bactéries fixatrices d'azote et une plante hôte. L'exemple le plus connu est l'association Légumineuse – Rhizobium, bactérie fixant l'azote de l'air et formant des nodules directement sur les racines permettant ainsi un transfert d'azote assimilable par la plante hôte, en contrepartie de quoi l'hôte fournit les glucides nécessaires au fonctionnement de la bactérie.

Le potentiel de fixation d'azote des Légumineuses d'ombrage en caféiculture est souvent sous estimé et sous utilisé (Nygren et al, 2012). Ainsi dans le cas de l'Érythrine, la gestion telle que la fréquence des élagages influent sur la nodulation et donc la disponibilité d'azote dans les plantations (Nygren et Ramirez, 1995). Ces mêmes auteurs notent une absence de nodulation durant dix semaines après l'élagage total de l'arbre et dans ce contexte une fixation pouvant atteindre 60kgN/ha/an. Cannavo et al (2013) montrent que la fertilisation élevée conduit à une faible fixation d'azote (23 kg N/ha/an) par la Légumineuse d'ombrage (*Inga densiflora*).

arbre d'ombrage	Monoculture caféière (S)	Erythrine (E)		Cashá (C)	Terminalia (T)	
		Conventionnel MC (EMC)	Organique BO (EBO)		Conventionnel MC (CMC)	Conventionnel MC (TMC)
Mode de gestion agronomique (traitement)	Conventionnel MC (SMC)	Conventionnel MC (EMC)	Organique BO (EBO)	Conventionnel MC (CMC)	Conventionnel MC (TMC)	Organique BO (TBO)
Fertilisation du sol	"formule complète" 500kg/ha/an dont engrais minéral azoté 100kg/ha/an	Idem SMC	Résidus de café (rameaux et pulpes) 5 tonnes/ha/an	Idem SMC	Idem SMC	Idem EBO
fertilisation du feuillage	Application minérale	Idem SMC	Non	Idem SMC	Idem SMC	Idem EBO
contrôle des adventices	Herbicides et fauches	Idem SMC	Fauches	Idem SMC	Idem SMC	Idem EBO
contrôle des maladies	Fongicides	Idem SMC	Au cas par cas	Idem SMC	Idem SMC	Idem EBO
gestion de l'ombrage	NA	2 fois l'an	2 fois l'an	Idem SMC	Idem SMC	Idem EBO
Densités (arbres par hectare) Plantations originales en 6*4	0	312 ou 347 ou 382	312 ou 347 ou 382	139	139	139
Densités approximatives (caféiers par hectare) Plantation en 2*1	5000	5000	5000	5000	<5000 (morts)	<5000 (morts)

Tableau 1 : Mode de gestion des parcelles

Source : CATIE, ASIC, ICAFE (2012)

Partie II. Influence de l'arbre d'ombrage et du traitement sur la minéralisation dans les sols de systèmes caféiers.

II.1. Introduction à l'expérience

II.1.1. Problématique de recherche

Dans la plupart des écosystèmes terrestres, la minéralisation et la nitrification de l'azote sont les processus impliqués dans l'apport d'azote minéral aux plantes (Andrianarisoa et al., 2010). De nombreux facteurs environnementaux semblent directement impliqués dans le contrôle de la nitrification et de la minéralisation de l'azote (Andrianarisoa K.S. et al., 2009).

Le fait que les arbres d'ombrage influent sur les niveaux de minéralisation et nitrification via de nombreux processus dont la litière végétale ou les exsudats racinaires (Subbarao et al., 2007) a été amplement documenté par Andrianarisoa et al. (2010).

En effet, les racines des arbres peuvent avoir une influence forte sur les processus de transformation de l'azote, ceci à travers la compétition pour l'ammonium avec les organismes nitrifiants ou l'action des exsudats sur l'activité microbienne. Au sein des SAF, les nutriments comme l'azote pourraient même être directement transférés de l'arbre vers la culture associée via les exsudats racinaires ou les réseaux mycorhiziens sans passer par la voie de minéralisation des composés organiques issus de l'arbre (Jalonen et al., 2012).

Suite à la baisse progressive de rendement observée depuis 2008 dans l'essai agroforestier caféier du CATIE, et ce, notamment dans les parcelles conduites en *organique* (De Melo E., 2013a), un questionnement a été soulevé sur un possible contrôle biologique des processus de minéralisation et de nitrification de l'azote dans les sols, jouant conséquemment un rôle dans la nutrition azotée et le rendement des caféiers. Ceci étant relié au fait que la nutrition azotée est l'un des éléments clé pour la production caféière (Vaast P., Harmand J.M., 2002). Babbar et Zak (1994) et Hergoualc'h et al (2008) avaient par exemple déjà noté des taux de minéralisation plus élevés dans les SAF caféiers avec légumineuse qu'en monoculture caféière.

Dans cette expérimentation seront évaluées 1) la minéralisation de l'azote dans les sols de quelques systèmes agroforestiers 2) l'influence de l'arbre d'ombrage sur la dynamique de l'azote du sol et sa relation avec l'état azoté et les rendements des caféiers dans les parcelles étudiées.

La dynamique de l'azote du sol est-elle reliée à la nature et/ou à la gestion du système agroforestier ?

II.1.2. Objectifs de l'étude

Objectifs généraux

L'objectif général est de mettre en relation la dynamique de l'azote du sol avec le statut azoté et les rendements des caféiers dans différents systèmes caféiers. Il s'agit également d'identifier le rôle des espèces d'ombrage dans la mobilisation de l'azote du sol et leur rôle sur le comportement du caféier.

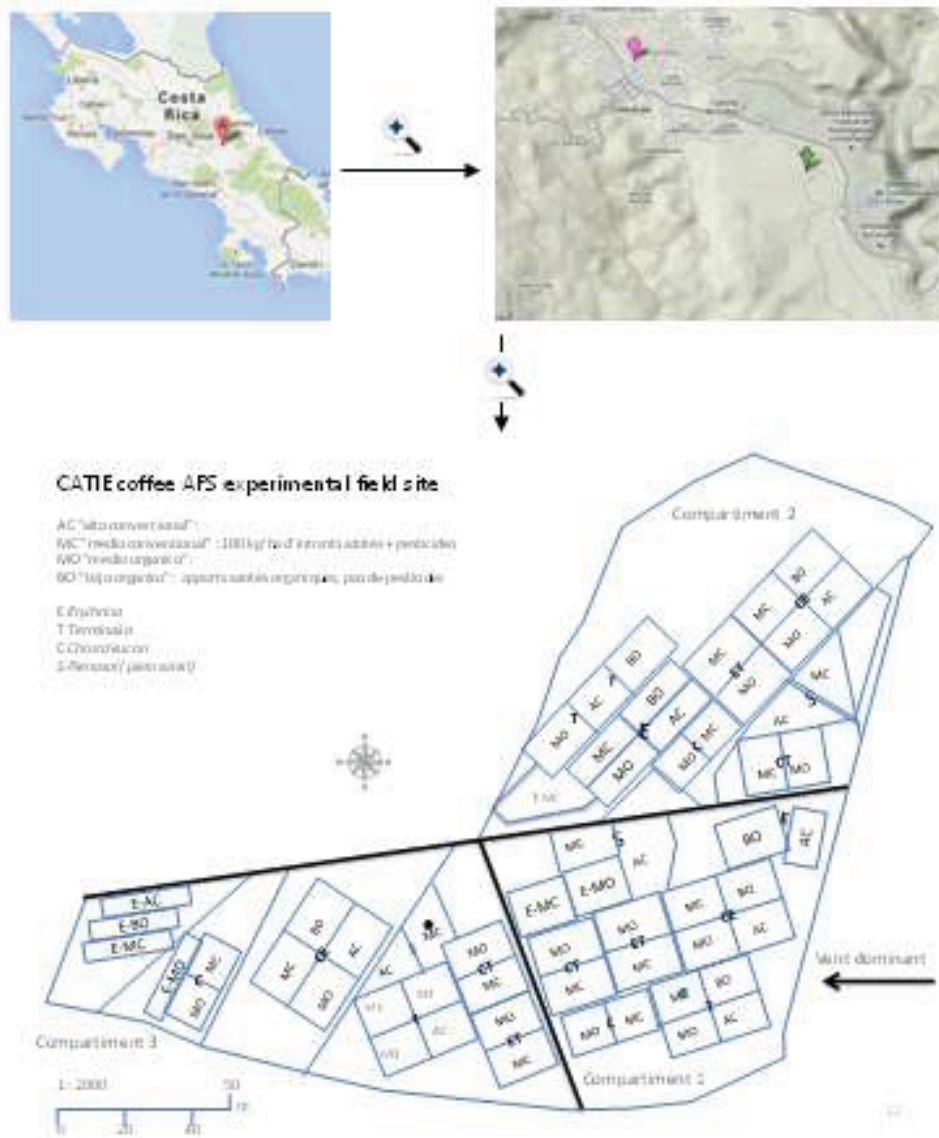


Figure 2 : Localisation des parcelles agroforestières étudiées

Sources : De Melo (comm. pers.), Google maps (2013)

Objectifs particuliers

Evaluer le statut azoté du caféier (biomasse, teneur et contenu en azote de la biomasse) et sa relation avec le rendement du caféier (production de fruits) dans des systèmes caféiers différant par l'arbre d'ombrage et/ou le mode gestion agronomique

Estimer les différences de taux de minéralisation et de nitrification de l'azote du sol dans ces différents systèmes caféiers, et évaluer les relations entre taux de minéralisation et espèce d'ombrage et entre taux de minéralisation et statut azoté ou rendement du caféier

Estimer l'effet de la croissance racinaire sur la minéralisation de l'azote et inversement l'effet éventuel de la disponibilité en azote du sol sur la croissance racinaire.

II.1.3. Hypothèses de l'étude

L'étude réalisée se base sur les hypothèses suivantes :

La minéralisation et la nitrification de l'azote dans le sol est, du moins en partie, sous l'influence des arbres d'ombrage et/ou de la gestion azotée.

Le développement racinaire des espèces est un facteur de contrôle de la minéralisation de l'azote du sol.

Dans les systèmes agroforestiers, les taux de minéralisation et nitrification sont directement corrélables au statut azoté (teneur et contenu en azote de sa biomasse) et au rendement du caféier.

II.2. Matériels et méthodes

II.2.1. Localisation et description du site de l'étude.

L'essai au champ se déroule dans les 9,2 hectares de la plantation expérimentale du Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), situé dans la région de Turrialba, Province de Cartago, Costa Rica. Le site de l'essai est localisé par 9°53'44'' de latitude Nord et 83° 40.7'' de longitude Ouest (CATIE, ASIC, ICAFE, 2012) à une altitude de 600 mètres au dessus du niveau de la mer (fig.2). Jouissant d'un climat tropical humide, le site connaît une précipitation annuelle moyenne de 3037 mm avec une température moyenne de 22°C. L'humidité relative moyenne est de 89,6%. Les sols étudiés sont des sols alluviaux mixtes (Ultisols et Inceptisols) de texture argileuse et de structure plus ou moins compacte.

Avant la mise en place en 2000 des systèmes, les parcelles étaient plantées de canne à sucre ou avaient un usage prairial. Actuellement, les systèmes sont constitués principalement de caféiers (*Coffea arabica* var. *caturra*) plantés tous les mètres sur le rang, les rangs étant espacés de 2 mètres (1*2). Certaines parcelles sont conduites en monoculture caféière ou « plein soleil » (pleno sol, abrégé par la lettre S dans l'étude). Dans les autres systèmes, les caféiers sont associés à une espèce d'ombrage : *Erythrina poeppigiana* (Poró), *Terminalia amazonia* ou *Abarema idiopoda* (Cashá). Les arbres ont été plantés tous les 6 mètres les uns des autres sur les rangs puis des éclaircies ont été réalisées conduisant à réduire les densités (données dans le tableau 1 en verso précédent). Les systèmes agroforestiers sont subdivisés en deux modes de gestion agronomiques : une gestion conventionnelle et une gestion organique. Les pratiques de fertilisation, de contrôle des adventices, des maladies et des ravageurs sont présentés en annexe 1. Chaque système est répété dans trois blocs, que l'on a considéré dans notre étude comme non-indépendants.



Figure 3 : Erythrina poeppigiana en association avec des cafiers

Source : l'auteur

La fertilisation est réalisée dans l'essai du CATIE via des apports sous formes d'engrais minéral, d'excréments de gallinacées ou de pulpe de café selon les traitements. L'élagage des arbres est réalisé en décembre et juin et la fertilisation en mai, août et décembre (tableau 1).

II.2.2. Présentation des espèces étudiées

Le caféier

Le caféier (fig.3), *Coffea arabica* var. *caturra*, est un arbuste aux feuilles ovales vert foncé et fruits ronds de 1 à 2 centimètres de diamètre mûrissant en sept mois environ, chacun d'eux contenant généralement deux grains de café. Il est génétiquement différent des autres espèces de caféiers car il a quatre chromosomes au lieu de deux. Le caféier arabica est souvent sensible aux parasites et aux maladies et la résistance est l'un des principaux objectifs des programmes de sélection végétale. Toutefois, la variété *caturra* a été principalement sélectionnée sur son meilleur rendement que la variété Bourbon dont elle est issue. Le caféier arabica est cultivé dans toute l'Amérique latine et la variété *caturra* est la plus répandue au Costa Rica. (Comité Français du Café, 2013)

Pour optimiser sa production, la plante nécessite un apport d'azote durant toute sa phase végétative, notamment en périodes de fructification, floraison ou de production de nouvelles feuilles. (Osorio Moreno, 2004)

Le Poró

L'Érythrine (fig.3) *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, est un arbre de la famille des Légumineuses (Fabacées) et à la sous famille Papilionacées. Se retrouvant du Guatemala à l'Équateur, il pousse dans des conditions humides assez variées, bien que les Inceptisols et les Ultisols lui soit préférables. La pluviométrie est un facteur limitant en particulier la durée de la saison sèche. Il est principalement appelé « Poró » au Costa Rica et utilisé en association de cultures pérennes. Bien que pouvant atteindre 20 à 30m de hauteur, il est régulièrement étêté à faible hauteur dans les plantations de caféiers.

Il est l'arbre le plus représentatif des SAF à base de caféiers au Costa Rica, et est apprécié comme un arbre de service uniquement, offrant les opportunités suivantes :

- Sa production de biomasse aérienne importante, riche en azote et autres nutriments permet un retour élevé de nutriments aux sols via les émondes. Grâce à sa forte nodulation, il possède une grande aptitude à fixer l'azote.
- Sa croissance rapide et son adaptation aux émondages fréquents permet d'ajuster l'ombrage aux besoins des caféiers. (OFI-CATIEa, 2000)

La compétition pour les ressources entre l'Érythrine et les caféiers est fortement dépendante de la gestion de l'association et des propriétés du sol. Cependant, la quantité de matière organique produite sur un an pourrait être trois à quatre fois plus élevée en présence de l'arbre qu'en système de plein soleil (Glover et Beer, 1994).



Figure 4 : Des Terminalia amazonia

Source : l'auteur



Figure 5 : Abarema idiopoda en association avec Terminalia amazonia

Source : l'auteur

Le Terminalia

Le Terminalia (fig.4), *Terminalia amazonia*, appartient à la famille des Combrétacées. Son extension géographique va du Mexique au Pérou et il est présent sur des sols très divers. Le Terminalia est essentiellement planté en peuplements forestiers monospécifiques ou rencontrés dans les forêts secondaires dans lesquelles il est exploité. Ses propriétés physico-chimiques ont été largement étudiées. (Solis Corrales M., Moya Roque R., -).

Principalement appelé roble coral ou amarillón au Costa Rica, il a été introduit dans les systèmes caféiers pour la production de bois d'œuvre de très bonne qualité (Haggar et al., 2011). Il peut également être utilisé dans des objectifs de stockage de carbone. Il est généralement planté à fort espacement dans les SAF, du fait de son ombrage conséquent. (OFI-CATIEb, 2000). Bien que peu d'informations existent sur l'élagage de ces arbres, il est réalisé au CATIE deux fois par an.

Le Cashá

Le Cashá (fig.5), *Abarema idiopoda*, appartient à la famille des Légumineuses (Fabacées) et à la sous famille des Mimosacées. On le retrouve du Mexique au Panama dans les forêts nuageuses ou semi décidues ainsi que dans les forêts tropicales humides à des altitudes inférieures à 1500m et est particulièrement adapté aux Ultisols ou Inceptisols. Il est planté seul ou en association. De haute valeur commerciale, son bois est particulièrement recherché pour l'artisanat. (OFI-CATIEc, 2000).

Il a été introduit comme arbre d'ombrage dans les SAF caféiers du fait de sa couronne haute et compacte, la grande teneur en azote de son feuillage (Edilberto J.M.G., 2005), de sa large gamme de sols de prédilection et de sa grande résistance aux aléas environnementaux.

Il est peu commun dans les parcelles caféières.

II.2.3. Variables et déterminants du cycle de l'azote étudiés

Les variables étudiées sont :

- le mode de gestion agronomique (traitement) , caractérisé entre autres par la quantité et la nature de l'azote apportée, tel que détaillé dans le tableau 1. Il s'agit des traitements MC et BO, aussi appelés *conventionnel* et *organique* dans cette étude.
- l'arbre d'ombrage. Il s'agit de Cashá (C), Érythrine (E) et Terminalia (T) ou l'absence d'arbre soit la monoculture caféière (S).

Pour chacune des parcelles présentées, caractérisées par le mode gestion agronomique (donc l'apport azoté) et par l'espèce d'ombrage (Cashá, Érythrine, Terminalia ou monoculture caféière), les variables suivantes ont été analysées:

- Rendement en baies de café,
- Biomasse aérienne des caféiers,
- Teneur et contenu en azote de la biomasse aérienne des caféiers,
- Minéralisation de l'azote du sol en anaérobiose,
- Minéralisation et nitrification de l'azote du sol en aérobiose,
- Développement racinaire dans des carottes de sol.

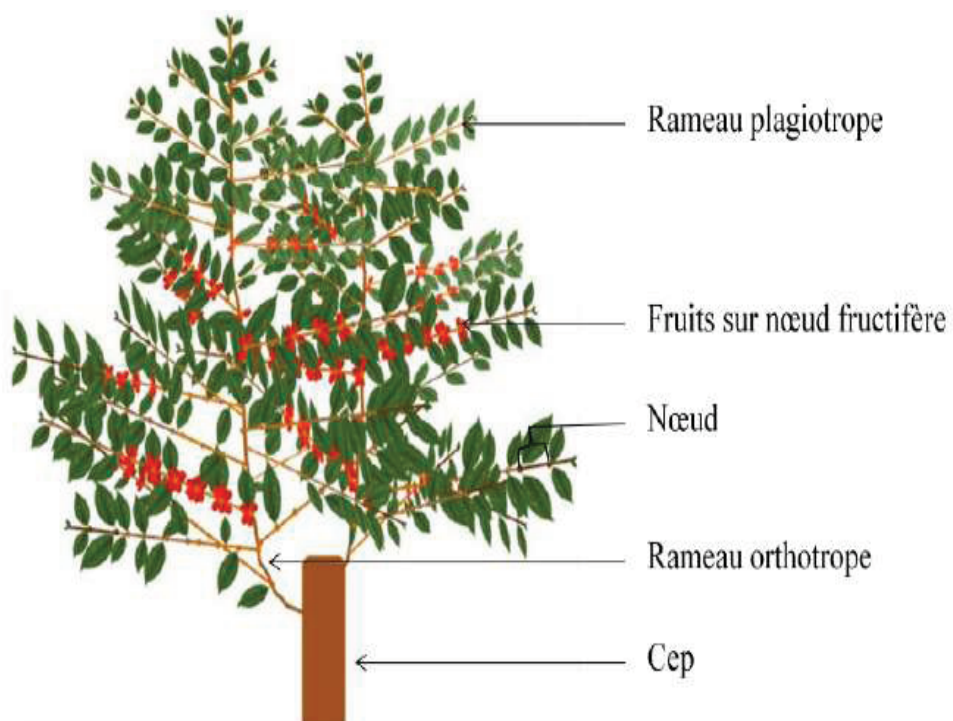


Figure 7 : Schéma de la partie aérienne du caféier.

Source : (Khac E., 2012)

II.2.4. Protocoles de terrain

Deux volets de l'expérience sont traités ici : premièrement l'estimation du statut azoté des caféiers (biomasse et teneur en azote) puis l'incubation (aérobie et anaérobie) de sols, permettant l'analyse de la minéralisation-nitrification, et de la colonisation racinaire en leur sein.

Les répétitions ont été réalisées à l'intérieur et dans des blocs différents. Cependant, du fait de la proximité des blocs et de l'importance de la variabilité microclimatique, l'effet bloc est ignoré.

II.2.4.1. Biomasse aérienne et statut azoté des caféiers

II.2.4.1.1. Base théorique de l'estimation de la biomasse

Biomasse des rameaux

Le procédé expérimental s'appuie des résultats d'Audebert (2011) et notamment des relations allométriques établies pour les rameaux plagiotropes et orthotropes (cf. fig. 7).

D'après cette étude, réalisée à la ferme d'Aquières, sur un panel de 12 caféiers (780 rameaux plagiotropes) et affinée ultérieurement par Fabien Charbonnier, doctorant, la biomasse des rameaux plagiotropes peut s'estimer grâce à l'équation (1).

$$B_{plagio} = \sum_{i=1}^n k \times D_i^\alpha \times L_i^\beta \quad (1)$$

Où :

B_{plagio} : Biomasse des rameaux plagiotropes en grammes.

D_i : Diamètre à la base du rameau plagiotrope i en centimètres.

k , α et β : Paramètres d'ajustement de l'équation ($k=0.03882845$, $\alpha=0.39717483$ and $\beta=0.97630786$, $R^2=0,98$) (Fabien Charbonnier, comm. pers.)

L_i : Longueur du rameau plagiotrope i en centimètres.

De même, la biomasse des rameaux orthotropes peut s'estimer à partir de l'équation (2).

$$B_{ortho} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot D_i^2 \quad (2)$$

Où :

B_{ortho} : Biomasse du rameau orthotrope du rejet étudié.

i : Nombre de tronçons du rameau orthotrope du rejet étudié

L_i : Longueur du tronçon i (cm)

D_i : Diamètre intermédiaire du tronçon i (cm)

α : Coefficient de régression empirique ($\alpha = 0.00503375$, $N=150$, $R^2=0,99$) (Audebert L., 2011)

Biomasse des ceps

Defrenet (2012) a montré une relation affine forte entre la biomasse des ceps et leur aire au collet. L'équation (3) a en effet un coefficient de détermination (R^2) de 0,88. C'est cette relation que l'on utilisera pour estimer la biomasse des ceps, représentant 54% de la biomasse totale (Defrenet E., 2012)

$$B_{cep} = 35,18A + 172,76 \quad (3)$$

Où :

B_{cep} : Biomasse du cep en grammes

A : Aire au collet¹ en cm².

¹ Partie délimitant le tronc des racines

Biomasse foliaire

L'estimation de la biomasse du compartiment « feuilles » du caféier a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, 15 feuilles dans chaque parcelle étudiée ont été récoltées sur les caféiers étudiés, choisis visuellement comme étant représentatifs de la parcelle.

Ces 15 feuilles représentatives ont été pesées, puis la biomasse foliaire du caféier étudié (ensemble des rejets formant le caféier) a été calculée par l'équation (4) :

$$BM=N*m \quad (4)$$

Où

BM : Biomasse (en g.)

N : Nombre de feuilles du rejet

m : Masse moyenne (g) d'une feuille.

Sources : (1) (2) Charbonnier F., 2013 ; (3) Audebert L., 2011

II.2.4.1.2. Mesures de terrain

L'importance de choisir les compartiments étudiés

Le problème principal dans l'estimation du bilan azoté d'une espèce végétale se trouve dans la différence notable inter-organes en ce qui concerne le taux d'azote. Partant de là, il est nécessaire d'échantillonner l'ensemble des organes significatifs de la plante afin de connaître leurs taux respectifs d'azote, à savoir : les fruits, les feuilles, les rameaux (orthotrope et plagiotropes considérés comme ayant les mêmes teneurs en azote) et, éventuellement, les fleurs.

Dans notre étude, compte tenu du stade physiologique des caféiers et des données déjà existantes, il a été choisi de récolter des échantillons de :

- Feuilles, considérées comme les plus représentatives de l'état azoté du plant
- rameaux plagiotropes
- ceps

Choisir l'unité étudiée et sa localisation dans la parcelle

L'unité choisie pour l'expérience est le rejet. En effet, la diversité inter-parcelles des caféiers empêche de travailler sur des caféiers « standards » car ils diffèrent par leur taille moyenne et leur nombre de rejets par cep notamment. Il est également nécessaire de juger au champ quels caféiers sont représentatifs de l'aire utile de la parcelle étudiée.

Ceux sélectionnés doivent totaliser 10 rejets pour l'analyse statistique et, si possible, être dans une zone d'ensoleillement intermédiaire. Le nombre de caféiers étudiés est alors de 3 à 6 selon les parcelles (6 parcelles concernées par bloc : TBO, EBO, TMC, EMC, CMC, SMC), ce qui représente 10 à 15 plants de caféiers par type de parcelle étudiée.

Sur l'ensemble des caféiers de la parcelle :

- cinq échantillons de cinq feuilles chacun sont récoltés aléatoirement dans le feuillage des différents caféiers.
- quinze autres feuilles sont récoltées sur les mêmes plants pour estimer la masse foliaire moyenne.
- Trois fragments de rameau plagiotrope d'ordre 1 sont prélevés sur trois des caféiers à l'aide d'un sécateur et dépouillés de ses feuilles et fruits éventuels.
- Trois carottes de cep sont réalisées grâce à une tarière de Pressler. Les caféiers ayant un bois relativement dur, certains échantillons ont été récoltés à la scie.

Pour chaque caféier étudié:

- Le diamètre au collet du cep est mesuré grâce à un vernier.
- Le nombre de feuilles du caféier est compté.

Sur chacun des 10 rejets :

- Les diamètres – pris au milieu - et les longueurs des tronçons des rameaux orthotropes sont mesurés.
- La longueur et le diamètre à la base des rameaux plagiotropes ligneux de chaque rejet sont mesurés.
- Le nombre de feuilles est compté.

L'aire au collet puis la biomasse du cep sont estimés à partir du diamètre au collet mesuré sur le terrain.

Les mesures des rameaux sont utilisées pour estimer les biomasses de chaque caféier via les équations (1) (2).

L'analyse de la biomasse est faite à l'échelle du caféier et non à l'échelle du rejet ou de la parcelle.

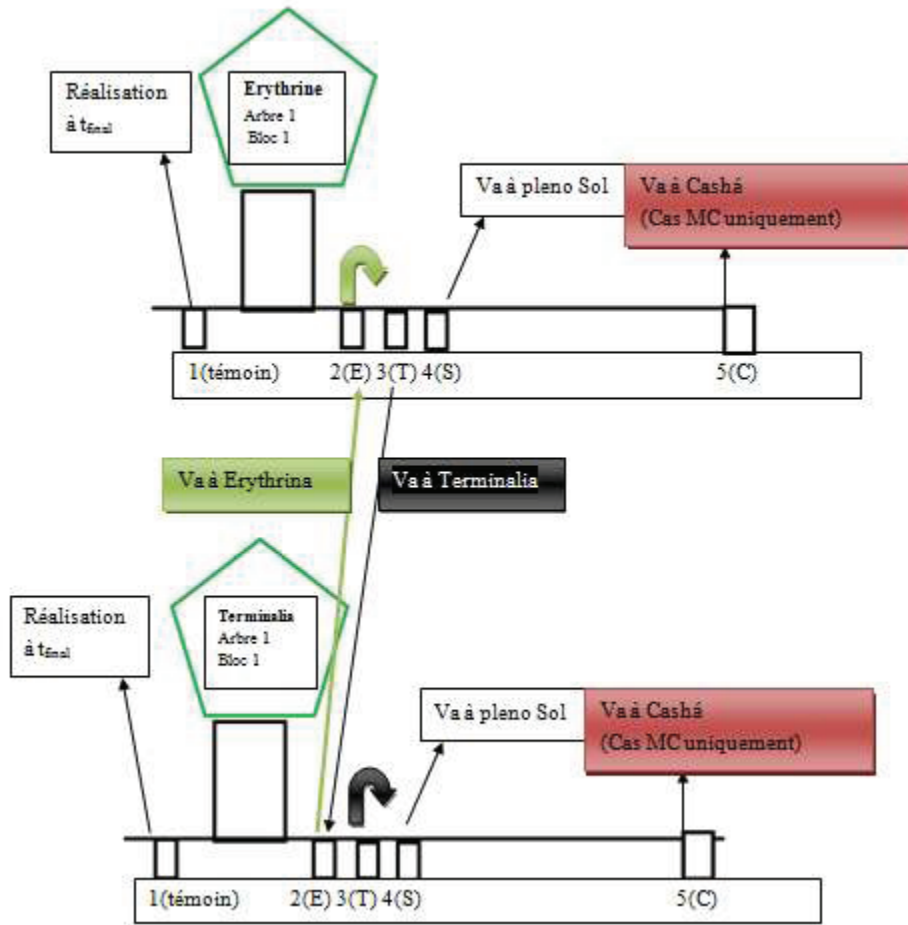
II.2.4.2. Etude de la minéralisation de l'azote du sol

II.2.4.2.1. Base théorique

De nombreuses études ont été menées sur la minéralisation de l'azote, la plupart d'entre elles aient été réalisées en conditions de laboratoire. Cette technique, consistant en l'incubation de carottes de sols dans des résines perméables permettant une détermination de la minéralisation pour un temps donné, ne tient pas compte de l'apport d'azote dû à la décomposition des litières aériennes et racinaires ni d'autres variables comme la saison ou l'humidité des sols.

Cette incubation de sol au laboratoire ou au champ fournit néanmoins un niveau d'expression de l'activité des organismes minéralisateurs et nitrifiants dans les conditions environnementales favorables à l'expression de cette activité et permet ainsi de comparer des systèmes entre eux (Andrianarisoa, 2009).

Notre étude de minéralisation de l'azote au laboratoire consiste l'incubation (aérobie et anaérobie) de sols prélevés directement dans les différents systèmes ainsi que de carottes de sols ayant été transférées d'un système à un autre et laissées en place pendant 3 mois. La colonisation racinaire et l'humidité est également mesurée dans ces échantillons



pleno Sol : monoculture

Figure 8 : Dispositif expérimental de l'étude de la minéralisation dans les sols

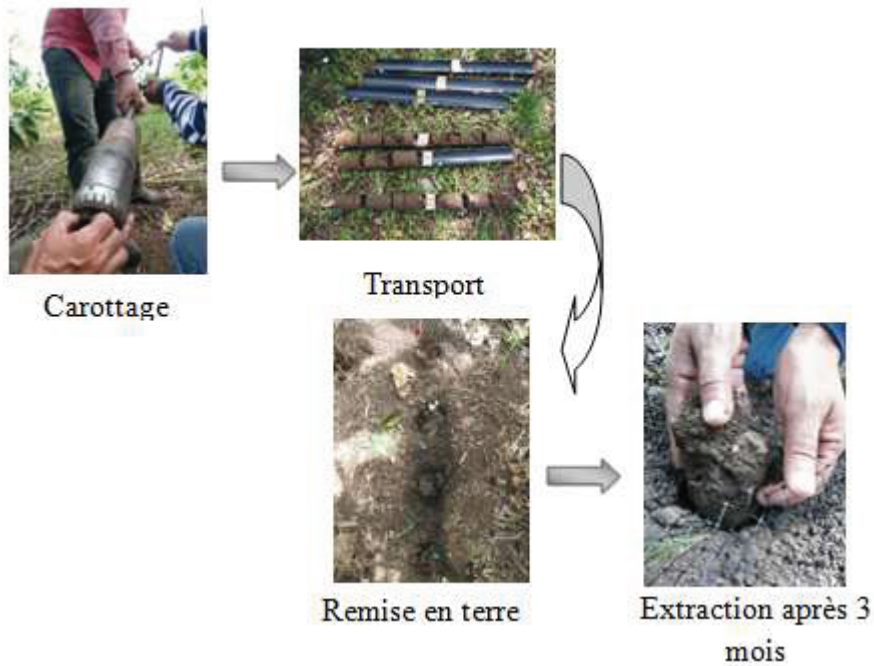


Figure 9 : La manipulation de transfert de carottes

II.2.4.2.2. Mesures de terrain

Définir le lieu de l'étude et la manipulation

L'étude est réalisée dans la surface utile des parcelles étudiées abrégées EBO (Érythrine organique), TBO (Terminalia organique), CMC (Cashá conventionnel), EMC (Érythrine conventionnel), SMC (Monoculture conventionnel) et TMC (Terminalia conventionnel). Elle est définie de manière à être représentative de la parcelle, en évitant les effets de bordure.

La durée de l'essai est de trois mois, de mars à juin 2013, soit initiant quatre mois environ après l'élagage des arbres (décembre) et s'étant terminée une semaine après le second élagage (15 juin).

Dans l'étude en conventionnel, quatre types de parcelles dans chacun des trois blocs sont étudiés.

Dans l'étude en organique, trois parcelles dans chacun des trois blocs sont étudiés.

Chaque répétition consiste en la réalisation de quatre (organique) ou cinq (conventionnel) carottes de sol dans l'horizon 0-10 cm, au milieu de l'interligne de caféiers. Ces carottes sont réalisées avec une tarière racinaire au voisinage d'un arbre (ou d'un caféier en monoculture) correspondant à une répétition.

La fertilisation de mai 2013 n'a pas été appliquée sur les carottes de sol.

Un schéma de l'expérience est proposé en figure 8 pour le cas de l'Érythrine et du Terminalia et est illustrée en figure 9. Le nombre de répétitions par type de parcelle est détaillé dans le tableau 2.

La carotte 1 n'est réalisée qu'à la fin de l'étude. Elle est la référence correspondant à un sol non perturbé, non transféré, et prélevé pour mesurer directement les potentiels de minéralisation et nitrification du système.

La carotte 2 correspond à un sol perturbé. Elle est faite à t_0 . La carotte est extraite du sol avant d'être remise au même endroit. Elle est alors enveloppée dans un filet dont la maille a une taille de 2,2 * 1,5 cm laissant passer les racines, les microorganismes et les solutions du sol. Elle est mise en place pour une durée de trois mois. De la même manière, les autres carottes : 3, 4, et aussi 5 dans le cas des traitements « conventionnel », sont transportées jusqu'à l'emplacement réservé dans un des autres systèmes étudiés. A la fin de l'expérience, au 15 juin 2013, les carottes de sol sont extraites du sol en prenant garde de couper les racines autour du filet et amenées au laboratoire.

Nous avons donc :

- En organique (EBO, TBO, SMC en comparaison), 90 échantillons de sol à analyser.
- En conventionnel (EMC, CMC, TMC et SMC), 192 échantillons.

Un protocole modifié pour répondre aux contraintes du laboratoire d'analyses

La quantité d'échantillons potentiels pour les analyses de minéralisation en aérobie et en anaérobie demandant trop de travail et de matériel au sein du laboratoire d'analyses chimiques du CATIE dans le temps imparti à ce stage, le nombre d'échantillons a du être revu.

Le tableau 2, présente les analyses finalement réalisées pour les 18 parcelles (6 parcelles par bloc, l'effet bloc étant ignoré). Les échanges de sol CMC-TMC et TMC-CMC ont tous été omis. Nous justifions ce choix principalement par le moindre degré d'usage des systèmes Terminalia-caféier et Cashá-caféier.

Parcelle d'origine étudiée	Parcelles de transferts (destination)	Nombre de répétitions pour la minéralisation anaérobie	Nombre de répétitions pour la minéralisation aérobie
CMC	EMC CMC SMC + référence	6	6
EBO	EBO TBO SMC + référence	6	8
EMC	EMC CMC TMC SMC + référence	6	
SMC	EMC CMC TMC SMC EBO TBO + référence	Destination organique et SMC : 8 Sinon 6	Destination organique et SMC : 6 Sinon 9
TBO	EBO TBO SMC + référence	6	8
TMC	EMC TMC SMC + référence	6	6

Tableau 2 : Nombre d'analyses réalisées par type de parcelles



Figure 10 : L'analyse de minéralisation en conditions aérobie

II.2.5. Protocoles de laboratoire

II.2.5.1. Statut azoté des caféiers

Les échantillons préalablement définis sont broyés au broyeur à bille durant cinq minutes en ce qui concerne les feuilles et les rameaux et dix minutes en ce qui concerne les ceps. Les broyats sont ensuite mélangés pour obtenir un total de 54 échantillons (3 compartiments, 6 traitements, une répétition dans chaque bloc). Pour chaque parcelle étudiée (18 au total), les échantillons sont composites de :

- cinq répétitions pour les feuilles.
- trois répétitions pour les ceps et rameaux.

Les broyats sont ensuite transformés en un mélange de gaz (oxydation complète de l'échantillon à 1800°C) grâce à un réacteur de haute température. Les gaz formés sont séparés à travers une colonne chromatographique selon leur affinité avec le gaz porteur. La colonne est reliée à un détecteur de conductivité thermique. L'ensemble des opérations est réalisée dans un analyseur automatique de carbone et d'azote de type Analyseur Thermo Finnigan.

La minéralomasse est calculée en multipliant la teneur en azote de chaque compartiment (%N) par sa biomasse (matière sèche).

II.2.5.2. Etude des carottes de sols

II.2.5.2.1. Minéralisation et nitrification

Minéralisation aérobie et nitrification de l'azote du sol (fig.10)

Pour cela, 25 grammes de sols environ issus de chacun des échantillons ont été pesés et entreposés dans des gobelets en plastique scellés hermétiquement par du papier parafilm semi perméable pour permettre l'échange gazeux. Ces gobelets ont été entreposés dans un incubateur à une température de 27°C durant trois semaines.

L'humidité a été ajustée par ajout d'eau distillée jusqu'au poids originel chaque semaine pour corriger les pertes en eau.

Tous les échantillons ont été analysés à 0 et 3 semaines. A 10 grammes de chaque échantillon sont ajoutés 100 mL de KCl à 2 mol.L⁻¹. Le mélange obtenu est agité à une fréquence de 60Hz grâce à un agitateur électrique durant une heure puis centrifugées durant cinq minutes.

La solution est alors filtrée sur papier Whatmann n°5 (125mm) et analysée par une méthode de distillation pour déterminer le contenu en ammonium et nitrate.

Les taux de minéralisation (M) et nitrification (N) par jour sont calculés via les formules (6) et (7) (Weaver R.W. et al., 1994):

$$M = \frac{[(\text{NH}_4^+_{\text{tfinal}} - \text{NH}_4^+_{\text{tinitial}}) + (\text{NO}_3^-_{\text{tfinal}} - \text{NO}_3^-_{\text{tinitial}})]}{21} \quad (6)$$

$$N = \frac{(\text{NO}_3^-_{\text{tfinal}} - \text{NO}_3^-_{\text{tinitial}})}{21} \quad (7)$$

Minéralisation anaérobie de l'azote du sol

L'analyse du potentiel de minéralisation de l'azote du sol en anaérobiose est réalisée au laboratoire d'analyses de sols du CATIE suivant un protocole légèrement modifié d'après la méthode d'incubation à 40°C durant sept jours de Anderson J.M. et Ingram J.S.I. (1995). Les échantillons de sol sont amenés après élimination des racines et une nuit en réfrigérateur au laboratoire.

Pour déterminer la teneur initiale en NH₄⁺, on insère 10 grammes de sol provenant de l'échantillon dans un conteneur en plastique de 100mL (A), puis on ajoute 50mL de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol.L⁻¹. Les échantillons A, une fois fermés hermétiquement à l'aide d'un papier para film, sont alors agités grâce à un agitateur électrique à une fréquence de 60Hz durant 20 minutes.

	Racines d'Erythrine	Racines de Terminalia	Racines de café	autres racines
	ER	TR	CR	OR
EBO-EBO	O	N	O	O
EBO-SMC	N	N	O	O
EBO-TBO	N	O	O	O
SMC-SMC	N	N	O	O
SMC-EBO	O	N	O	O
SMC-TBO	N	O	O	O
TBO-TBO	N	O	O	O
TBO-EBO	O	N	O	O
TBO-SMC	N	N	O	O
EBO	O	N	O	O
TBO	N	O	O	O
SMC	N	O	O	O
<i>O: potentiellement présent</i> <i>N: présence impossible</i>				

Tableau 3 : Hypothèses de présence pour la colonisation racinaire.

Ils sont réfrigérés jusqu'à la fin de l'incubation du sol dans les conteneurs B. La teneur en eau de l'échantillon de sol est mesurée parallèlement. Les taux en NH_4^+ sont alors déterminés par distillation et le taux de minéralisation anaérobie est calculé selon l'équation (5) :

$$M = \text{NH}_4^+_{\text{B}} - \text{NH}_4^+_{\text{A}}/7 \quad (5)$$

Où :

M est le taux de minéralisation anaérobie (mgN/gramme de sol/jour)

$\text{NH}_4^+_{\text{B}}$ est le taux d'ammonium mesuré dans le conteneur B

$\text{NH}_4^+_{\text{A}}$ est le taux d'ammonium mesuré dans le conteneur A

Biais potentiels

Zuluaga Perez (2004) a observé pour la minéralisation aérobie de sols un taux de minéralisation plus élevé durant la première semaine qu'entre la seconde et la cinquième semaine d'incubation et pour tous les traitements. Cette différence peut être due à l'épuisement progressif du substrat. Toutefois, les mêmes différences entre traitements ont été observées durant les deux périodes. C'est pourquoi nous avons utilisé dans notre étude une seule durée d'incubation considérée comme suffisante : trois semaines.

II.2.5.2.2. Protocole pour la colonisation racinaire

La colonisation racinaire est estimée par mesure de la biomasse de chaque type de racines présentes dans les carottes de sol. Le tableau 3 décrit les racines potentiellement trouvables dans chaque type de carottes.

En effet, nous partons de l'hypothèse selon laquelle, après trois mois, les racines fines de l'arbre présent dans la parcelle d'origine de la carotte ne peuvent se rencontrer.

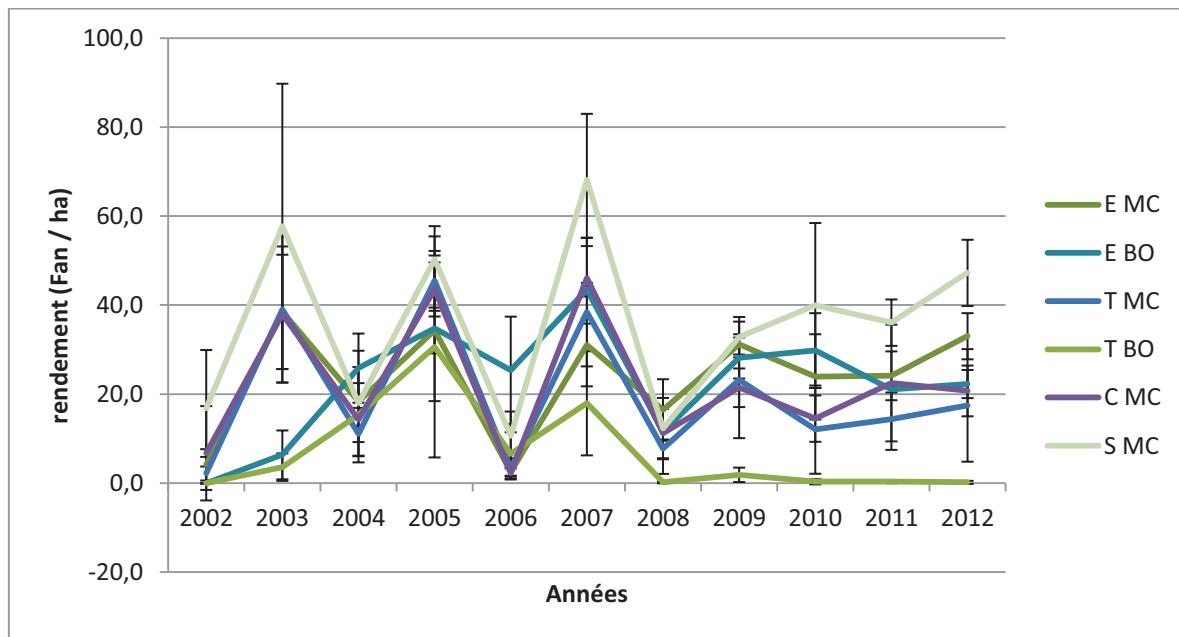
Les racines sont extraites des sols, lavées puis triées. Elles sont ensuite mises à sécher dans un four à 45°C durant trois jours. Elles sont enfin pesées avec une balance de précision à deux décimales.

CRW.TW exprime la colonisation racinaire, correspondant à la valeur rencontrée par l'équation (8). Il en va de même pour la colonisation racinaire par l'Érythrine (ERW.TW), le Terminalia (TRW.TW), le Cashá (CaRW.TW) et la colonisation racinaire totale (ToRW.TW)

$$\text{CRW.TW} = \text{masse sèche de racines de café} / \text{masse sèche de sol collecté} \quad (8)$$

II.2.5.3. Analyses des données

Comme pour l'ensemble des analyses statistiques réalisées durant le stage, le logiciel R v. 3.0.1. a été utilisé. Des tests Anova suivies de tests TukeyHSD ont été employés sur les résultats de l'analyse de carbone et d'azote, sur les données issues de l'estimation de la biomasse et sur les taux de minéralisation et nitrification dans les sols. Les résultats sont considérés significatifs pour des p-value < 0,05%.



Fan : fanegas

Figure 11 : Rendements en café dans les six types de parcelles étudiées pour la période 2002-2012

Source : De Melo E. (2013a)

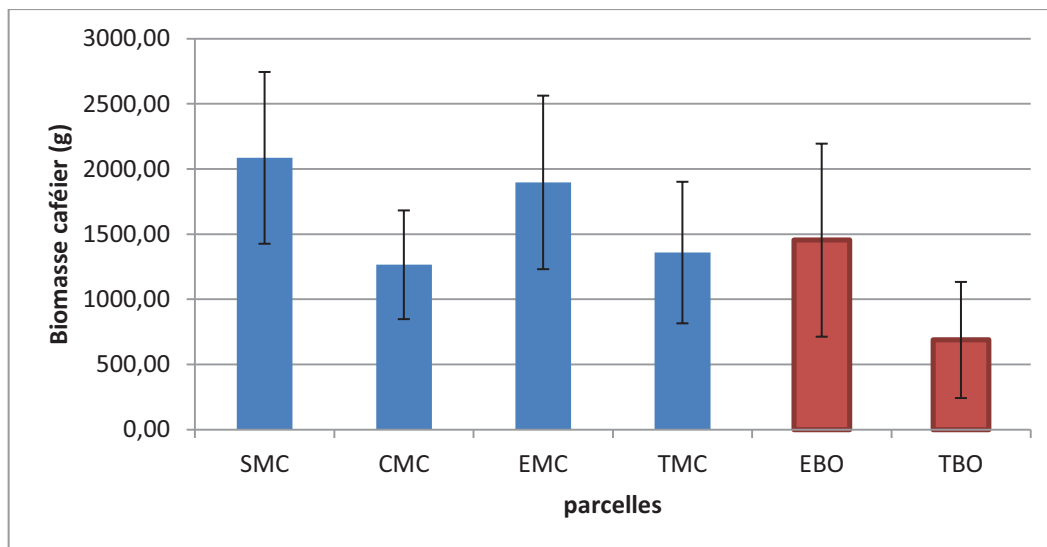


Figure 12 : Biomasse aérienne moyenne d'un caféier dans les parcelles étudiées

Rendements et propriétés chimiques des sols

Les propriétés chimiques des sols nous ont été fournies par le Dr. E. de Melo et correspondent à une analyse réalisée en 2012. Les rendements (fig. 11) nous ont également été gracieusement transmis.

Les rendements sous Terminalia sont plus faibles que dans les parcelles avec d'autres arbres d'ombrage ou sans arbre. On pourrait expliquer ces valeurs en postulant que cet arbre a un effet allélopathique ou exerce une forte compétition sur les caféiers. Les parcelles EMC ont en moyenne des rendements les plus proches de SMC, monoculture. Les parcelles EBO possèdent de bons rendements, notamment meilleurs que l'association avec le Cashá en conventionnel.

Le rendement moyen a été pris sur la période 2009-2012, l'historique de récolte fourni par le Dr. E de Melo indiquant un changement important à partir de 2009 dans les rendements pour toutes les parcelles. Un nombre d'années pair permet de respecter l'alternance de rendement bisannuel observé pour les années antérieures.

II.3. Résultats

II.3.1. Biomasse et statut azoté des caféiers

II.3.1.1. Biomasse aérienne des caféiers.

L'analyse statistique montre que les caféiers des parcelles TBO ont une biomasse (688 grammes – masse sèche) significativement inférieure aux caféiers de toutes les autres parcelles sauf CMC (1265 grammes). On remarque également, à l'analyse de la biomasse (fig. 12 ou annexe 3), que les caféiers des parcelles CMC (caféiers sous ombrage de Cashá, en conventionnel) ont une biomasse inférieure aux caféiers des parcelles SMC (monoculture en conventionnel) (2085 grammes en moyenne) seulement. Tous les caféiers des autres parcelles ont des valeurs de biomasse aérienne moyenne semblables.

En termes de biomasse aérienne globale, on peut noter des écarts-types importants pour les 18 parcelles étudiées, dénotant une grande diversité de biomasse parmi les caféiers échantillonnés.

On peut observer une tendance (non validée par une anova suivie d'un test TukeyHSD) à une biomasse des caféiers croissante TBO < CMC < TMC < EBO < EMC < SMC.

Une relation affine existe entre la biomasse des feuilles et le rendement (R^2 de 79%). La biomasse des caféiers est en effet corrélée positivement avec la moyenne de rendement en baies de café sur la période 2009-2012 (anova, p-value de $2,2 \cdot 10^{-16}$). Séparément, l'anova confirme, avec une p-value de 10^{-9} dans le traitement organique et de 10^{-16} dans le traitement conventionnel.

Il apparaît que le développement des plants de caféiers pourrait être influencé défavorablement par le niveau d'ombrage plus élevé en CMC (Cashá conventionnel), TMC (Terminalia conventionnel) et TBO (Terminalia organique). Le caféier se comporte apparemment mieux sous Érythrine en organique (EBO) que dans les trois types de parcelles précédentes.

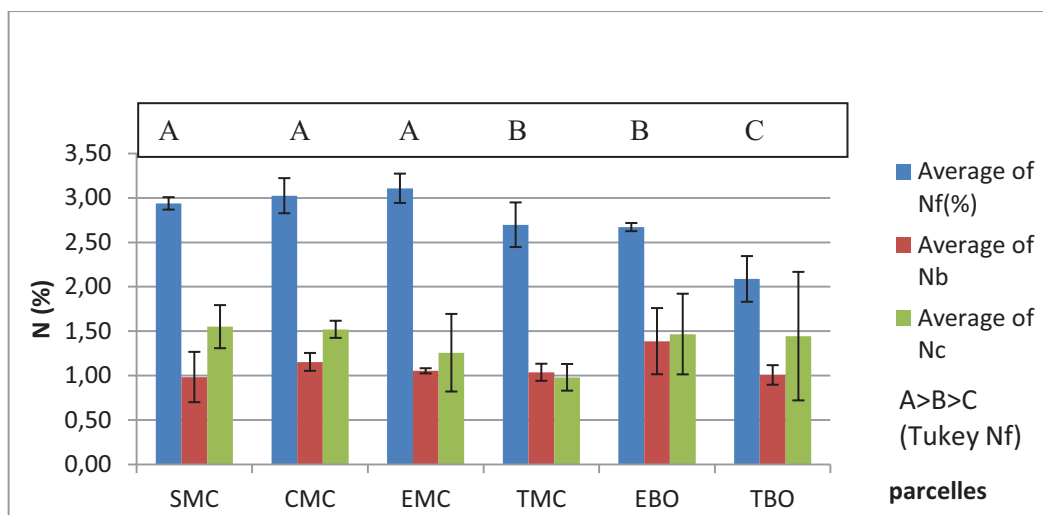


Figure 13 : Moyenne de la teneur azotée de trois compartiments du caféier¹

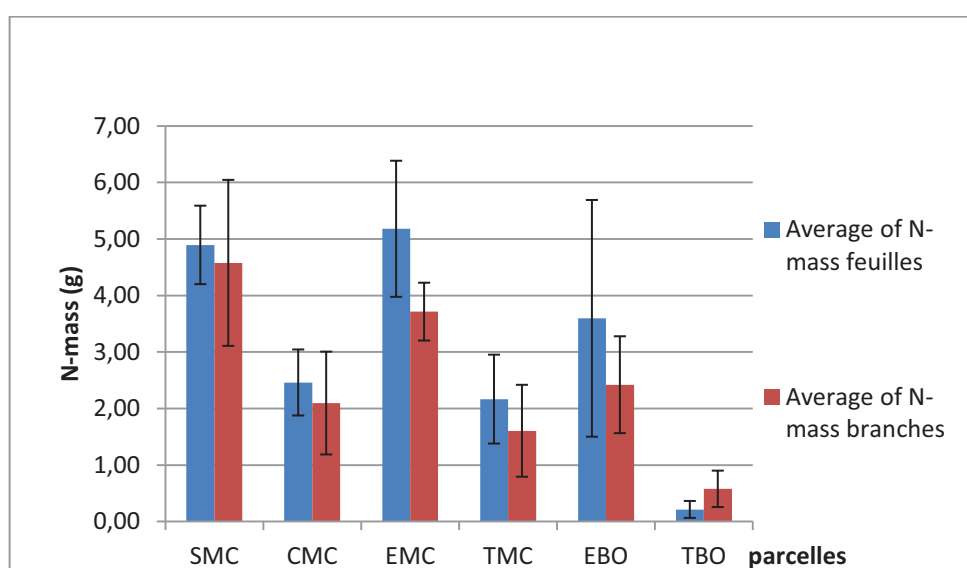


Figure 14 : Minéralomasse azotée moyenne de deux compartiments des caféiers dans les parcelles étudiées

¹ Pour EBO et TBO : de nouvelles mesures tendent à confirmer des erreurs (corrigées - avec succès au vu des nouveaux résultats - par choix arbitraire) dans les résultats présentés. Une valeur encore moindre de minéralomasse azotée est à attendre pour TBO. Les conclusions ne changent pas.

II.3.1.2. Teneur en azote des caféiers

L'analyse de la teneur en azote des caféiers (fig. 13 et annexe 2) ne montre aucune différence entre les parcelles pour les branches (b) et les ceps(c), avec des valeurs comprises respectivement entre 0,98% et 1,39% et entre 0,98% et 1,55%.

En ce qui concerne le taux d'azote dans les feuilles (f), les parcelles TBO (caféier sous Terminalia, en traitement organique) présentent significativement la valeur la plus faible avec 2,09%. Les parcelles EBO (sous Érythrine, en organique) ont en moyenne un taux (2,13%) significativement inférieur aux parcelles du traitement conventionnel (2,91% en moyenne), sauf en ce qui concerne TMC avec 2,67%. Ceci implique que le traitement organique présente des valeurs d'azote dans les feuilles plus faibles qu'en conventionnel.

II.3.1.3. Minéralomasse azotée des caféiers.

On remarque (annexe 4) que la plus grande minéralomasse azotée est retrouvée dans les ceps, possédant généralement la biomasse la plus importante. Cependant les ceps présentent des valeurs de minéralomasse azotée très variables et ne sont pas considérés comme des indicateurs de production annuelle.

La minéralomasse est corrélée avec la biomasse à 62%. On retrouve globalement (fig.14 ou annexe 4) les tendances observées précédemment pour la biomasse. Les parcelles Cashá en conventionnel (CMC) et Terminalia, en conventionnel (TMC) ou organique (TBO) possèdent une plus faible minéralomasse azotée (feuilles ou branches) que tous les autres types de parcelle étudiés, avec respectivement une minéralomasse foliaire de 2,46g/plant, 2,17g/plant et 0,21g/plant contre 5,18g/plant au maximum pour la parcelle EMC (Érythrine conventionnel).

La minéralomasse est corrélée au rendement (87%). Ce qui explique le plus la minéralomasse est la biomasse aérienne, avec une corrélation de 98%, bien au-delà de la corrélation avec la teneur en azote des feuilles (67%).

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades

	Tasa mineralización anaeró..	taux de minéralisation aér..	taux de nitrification/ jou..	CRW/TW	ToRW/TW
Tasa mineralización anaeró..	1,00	0,00	0,00	2,7E-04	1,1E-03
taux de minéralisation aér..	0,54	1,00	0,00	0,01	1,0E-03
taux de nitrification/ jou..	0,51	0,93	1,00	0,06	2,5E-03
CRW/TW	-0,27	-0,18	-0,13	1,00	0,00
ToRW/TW	-0,25	-0,24	-0,22	0,53	1,00

Tableau 4 : Table de corrélation entre cinq variables étudiées

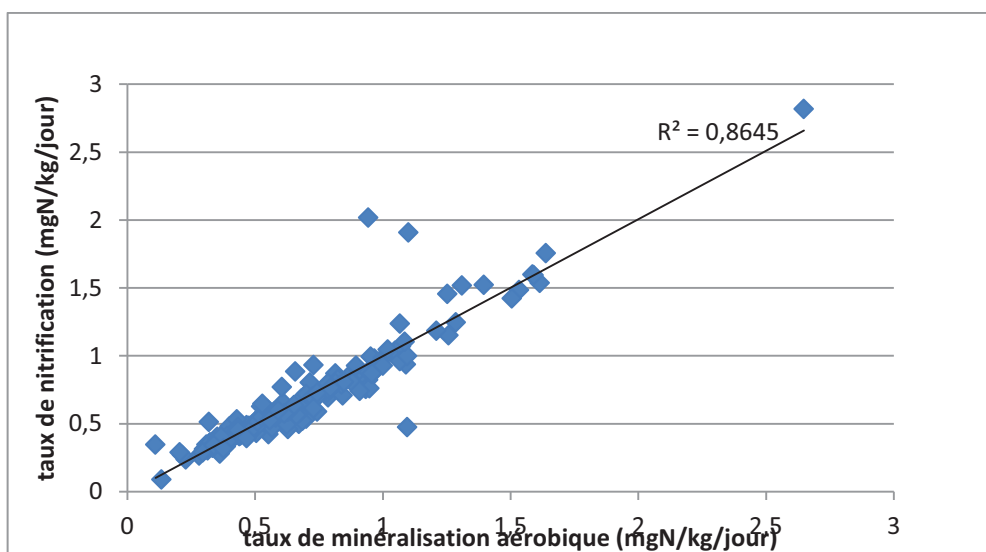


Figure 15 : Relation entre le taux de minéralisation aérobie et le taux de nitrification pour l'ensemble des carottes

Echanges vers les parcelles ----- Taux (mgN/kg/jour)	CMC	CMCnd	EBO	EBOnd	EMC	EMCnd	SMC	SMCnd	TBO	TBOnd	TMC	TMCnd
taux de minéralisation anaérobie/jour	4,88 B	5,22 B	4,2 B	2,9 BC	5,64 B	9,8 A	2,5 C	1,7 C	3,9 BC	4,4 C	5,31 B	5,62 B
taux de minéralisation aérobie/jour	0,83 A	0,94 A	0,8 A	0,6 B	0,84 A	1,07 A	0,58 AB	0,44 AB	0,48 B	0,39 B	0,58 AB	0,73 B
taux de nitrification/jour	0,79 B	0,92 B	0,83 A	0,56 B	0,79 A	1,07 A	0,58 AB	0,43 AB	0,47 B	0,36 AB	0,70 B	0,69 B

A>B>C Majuscules : lecture en ligne

Tableau 5 : Valeurs des taux de minéralisation et nitrification et groupes de Tukey dans les parcelles de destination et dans les carottes de référence (*nd)

II.3.2. Etude de la minéralisation

A la lecture de l'analyse de corrélation (type Pearson) entre les principales variables d'intérêt (tableau 4), il apparaît que les taux de minéralisation anaérobie, aérobique ($R^2=0,65$ entre ces deux derniers) et de nitrification (99% entre ces deux derniers) sont corrélés entre eux, de meilleure manière dans les seules carottes de référence que dans l'ensemble des carottes ($R^2 =0,3$ entre les deux premiers taux). Des résultats comparables ont été obtenus dans d'autres études (Moore et Dalma, 1997).

Les taux de minéralisation aérobique et de nitrification sont positivement et fortement corrélés avec un ratio proche de 1 :1 (fig.15) , d'autre part la nitrification représente plus de 90% de la minéralisation aérobique pour toutes les parcelles et même 100% pour EMC, ce qui signifie que le processus de nitrification est très efficace. En raison de cette forte corrélation, les effets observés des différents traitements sur la minéralisation aérobique et sur la nitrification ont les mêmes tendances, nous ne présenterons donc que les résultats liés à la minéralisation aérobique.

Il est à noter que la minéralisation aérobique est corrélée avec la quantité d'azote minéral dans le sol, ce qui signifie que ces concentrations peuvent être un bon indicateur des taux de minéralisation.

Le tableau 5 résume les valeurs moyennes des taux de minéralisations et nitrification pour les parcelles de destination et les carottes de référence (**nd*).

Pour les deux taux de minéralisation, les carottes de référence pour les six types de parcelles étudiées appartiennent au(x) même(s) groupe(s) de Tukey que la moyenne des taux dans les carottes dans les parcelles « destination » correspondantes (sauf pour la parcelle EMC). Ceci montre 1) le faible effet de la perturbation des sols sur la minéralisation 2) le fort effet « parcelle de destination » dans les transferts de sols. Pour le cas de l'Érythrine, il apparaîtrait qu'un autre facteur soit fortement impliqué.

En ce qui concerne la minéralisation anaérobie, EMC a les plus forts taux (5,64mgN/kg/jour) et SMC les plus faibles (1,7 à 2,5mgN/kg/jour). L'ordre, par groupes de Tukey, n'est pas retrouvé pour les autres taux, ce qui montre que d'autres facteurs expliquent la corrélation globale entre les processus du cycle de l'azote.

		AU TRAITEMENT							
	minéralisation anaérobique nette par jour	CMC	EMC	TMC	SMC	EBO	TBO	Moyenne traitement origine	non perturbées
	DU TRAITEMENT	CMC	4,68 A a	6,57 A a	X	X	X	X	5,63 A
EMC		5,07 A a	4,73 A a	5,33 A a	4,57 A a	X	X	4,79 AB	9,80 A
TMC		X	5,65 A a	5,40 A a	3,8 B a	X	X	4,96 AB	5,62 B
SMC		X	6,38 A a	5,20 A a	1,73 C b	3,71 A ab	2,98 A ab	3,61 B	2,92 B
EBO		X	X	X	3,04 C a	3,08 A a	4,22 A a	3,68 B	2,92 B
TBO		X	X	X	2,73 BC b	5,40 A a	4,45 A ab	4,12 AB	4,38 B
	Moyenne traitements destination	4,88 b	5,64 b	5,31 b	2,5 c	4,2 b	3,9 bc		

Minuscules : lecture par lignes

Majuscules : par colonnes

X : non réalisé

non perturbées : carottes de référence

A>B>C

(*nd) : valeurs de référence dans les parcelles correspondantes

Tableau 6 : Valeurs des taux de minéralisation anaérobique et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

II.3.2.1. Minéralisation anaérobie de l'azote du sol

Les carottes de référence correspondent au sol non perturbé au préalable et issu directement des peuplements avant mise en incubation au laboratoire. L'analyse de ces carottes de référence indique un plus fort potentiel de minéralisation de l'azote sous Érythrine en conventionnel (EMC) (9,8mgN/kg/jour) que dans les autres parcelles qui ne diffèrent pas significativement entre elles (Tableau 6).

En considérant la moyenne des peuplements de destination, EMC a également les plus forts taux de minéralisation (5,64mgN/kg/jour), toutefois non différents significativement des parcelles Terminalia conventionnel (TMC), Cashá conventionnel (CMC) et Érythrine organique (EBO). La destination « monoculture conventionnel » (SMC) présente significativement les plus faibles taux (2,5mgN/kg/jour) (Tableau 6). La destination « Terminalia organique » (TBO) occupe une position intermédiaire (2,5mgN/kg/jour)².

En prenant l'ensemble des échantillons, la parcelle de destination SMC a significativement un taux de minéralisation anaérobie plus faible que les autres parcelles avec une valeur de 2,5mgN/kg/jour contre des valeurs comprises entre 3,9 (TBO) et 5,64mgN/kg/jour (EMC).

En se limitant aux carottes de sol dont le traitement de destination est l'organique, le taux de minéralisation anaérobie est toujours dépendant de la destination et on conserve le même ordre que précédemment avec le plus fort taux dans EBO, le plus faible dans SMC, et TBO occupe une position intermédiaire (anova, p-value de 0,01).

Les valeurs sur la diagonale, correspondant aux carottes ayant la même parcelle d'origine et de destination ne sont pas significativement différentes des carottes de référence (même pour EMC, ceci dû à la déviation standard importante) sauf dans le cas de la monoculture (SMC) où la valeur de référence est plus élevée (2,92 > 1,73 mgN/kg/jour).

Globalement les traitements d'origine ne montrent pas d'effet sur le taux de minéralisation quand les traitements de destination sont regroupés (Tableau 5). Néanmoins la meilleure analyse à faire concerne la destination SMC (Monoculture conventionnel) qui reçoit pratiquement tous les traitements d'origine ; dans ce cas la supériorité de l'origine EMC (donnée par les carottes de référence) est conservée dans les carottes transférées depuis 3 mois avec le plus fort taux de minéralisation de 4.57 mg N/kg/jour. Le peuplement d'origine Cashá conventionnel (CMC) transféré uniquement dans CMC et EMC montre également un fort taux de minéralisation (Tableau 6).

² La différence de groupe vient donc de la variabilité des valeurs.

		AU TRAITEMENT								
		minéralisation aérobie nette/jour	CMC	EMC	TMC	SMC	EBO	TBO	Moyennes Traitements origines	non perturbées
DU TRAITEMENT	CMC	0,96 A a	0,88 A a	X	0,62 AB a	X	X	0,82 A	0,94 A	
	EMC	0,78 A a	0,74 A a	0,50 A	0,90 A a	X	X	0,73 A	1,07 A	
	TMC	X	0,78 A a	0,64 A a	0,50 B a	X	X	0,64 A	0,73 B	
	SMC	0,77 A ab	1,00 A a	0,61 A ab	0,39 B b	0,68 A ab	0,48 A b	0,62 A	0,44 B	
	EBO	X	X	X	0,59 AB a	0,61 A a	0,48 A a	0,56 A	0,60 AB	
	TBO	X	X	X	0,54 AB b	1,13 A a	0,49 A b	0,72 A	0,39 B	
Moyennes traitements de destination		0,83 a	0,84 a	0,58 ab	0,58 ab	0,8 a	0,44 b			

Minuscules : lecture par lignes

Majuscules : par colonnes

X : non réalisé

non perturbées : carottes de référence

A>B>C

(*nd) : valeurs de référence dans les parcelles correspondantes

Tableau 7 : Valeurs des taux de minéralisation aérobie et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

parcelle	CMC nd	EBO nd	EMC nd	SMC nd	TBO nd	TMC nd	CMC	EBO	EMC	SMC	TBO	TMC
min. aérobie/ nitrification	0,98	0,93	1	0,98	0,92	0,95	1,00	0,93	0,92	0,99	1,00	1,00

nd : carottes de référence pour les parcelles

Tableau 8 : Valeurs du ratio entre les taux de minéralisation aérobie et taux de nitrification dans les carottes de référence (max=1)

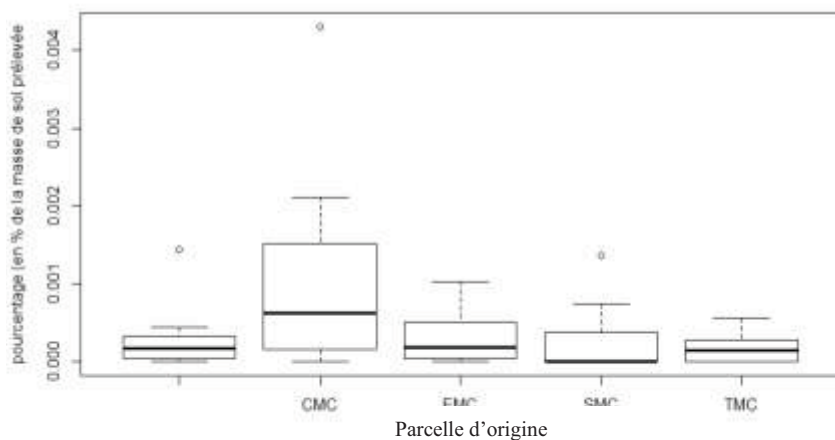


Figure 16 : Colonisation racinaire dans les carottes de sol en fonction de la parcelle d'origine

II.3.2.2. Minéralisation aérobie de l'azote du sol

On peut tout d'abord rappeler que le ratio nitrification/minéralisation aérobie est assez proche de 100% (tableau 8), ce qui signifie que quasiment tout le NH_4^+ produit est transformé en NO_3^- . Cette forte capacité nitrifiante du sol traduit un faible contrôle sur la nitrification dans les différents traitements étudiés.

L'analyse des carottes de référence (non perturbées) (dernière colonne du tableau 7) montre des taux de minéralisation aérobie de l'azote significativement plus élevés sous les légumineuses d'ombrage, à savoir dans l'ordre décroissant Érythrine et Cashá en conventionnel (EMC et CMC), que sous Terminalia (TMC et TBO) et monoculture (SMC) (anova, p-value de 10^{-4}). Le traitement Érythrine en organique (EBO) a un taux intermédiaire et n'est pas différent des deux groupes précédents.

L'analyse de la moyenne des parcelles de destination (dernière ligne du tableau 7), confirme les résultats précédents, à savoir que Cashá et Érythrine dans les parcelles de destination conduisent à de plus hautes valeurs de minéralisation (respectivement pour CMC, EMC et EBO de 0,83, 0,84 et 0,8mgN/kg/jour) que le Terminalia (0,44 et 0,58mgN/kg/jour) ou l'absence d'ombrage (0,58mgN/kg/jour).

Cet effet des légumineuses sur la minéralisation aérobie confirme les observations moins nettes obtenues pour la minéralisation anaérobie.

Les valeurs de minéralisation aérobie dans les carottes de référence et perturbées (pour la parcelle de destination) ne sont pas significativement différentes. Au sein des carottes de sol dont le traitement de destination est le conventionnel, le taux de minéralisation aérobie est expliqué par l'arbre dans la parcelle de destination (anova, p-value de $1,67 \cdot 10^{-10}$) et est relié au rendement (p-value de $8,23 \cdot 10^{-5}$). Dans les seules carottes de référence, les p-values sont de l'ordre de 10^{-2} .

Globalement les peuplements d'origine (moyenne) ne montrent pas d'effet significatif sur le taux de minéralisation quand les parcelles de destination sont regroupées (avant dernière colonne du Tableau 7). Néanmoins l'analyse de la destination SMC (Monoculture, conventionnel) qui reçoit tous les traitements montre la supériorité de l'origine Érythrine (EMC) significativement différentes des origines Terminalia (TMC) et SMC.

		AU TRAITEMENT						
colonisation racinaire café (en % de la masse de sol collectée)		CMC	EMC	TMC	SMC	EBO	TBO	non perturbées
DU TRAITEMENT	CMC	6,60 E-05 B a	1,15E-03 A a	X	1,45E-03 A a	X	X	5,32E-04 B
	EMC	5,52E-04 A a	1,95E-04 B a	1,61E-04 A a	3,15E-04 A a	X	X	1,78E-04 B
	TMC	X	2,20E-04 B a	5,70E-05 A a	2,61E-04 A a	X	X	2,74E-05 B
	SMC	3,38E-04 AB a	2,35E-04 B a	3,64E-06 A a	3,47 E-02 A a	3,05 E-02 A a	5,82E-02 A a	7,94E-02 A
	EBO	X	X	X	4,01E-02 A a	2,71E-03 B a	6,43E-03 A a	1,32E-02 B
	TBO	X	X	X	1,79E-02 A a	1,25E-02 AB a	1,56E-03 A a	3,23E-04 B

Tableau 9 : Valeurs des taux de colonisation racinaire du caféier et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

		AU TRAITEMENT						
colonisation racinaire totale (en % de la masse de sol collectée)		CMC	EMC	TMC	SMC	EBO	TBO	non perturbées
DU TRAITEMENT	CMC	8,47E-04 A a	1,33E-03 A a	X	1,51E-03 B a	X	X	1,13E-03 B
	EMC	3,49E-04 A a	7,15E-04 B a	6,74E-04 A a	3,15E-04 B a	X	X	3,26E-04 B
	TMC	X	4,68E-04 B a	9,55E-04 A a	3,64E-04 B a	X	X	9,00E-04 B
	SMC	3,98E-04 A b	1,13E-03 B b	8,23E-04 A b	5,89E-02 A ab	6,17E-02 A ab	1,21E-01 A a	8,38E-02 A
	EBO	X	X	X	6,42E-02 A a	2,50E-02 A a	1,20E-01 A a	3,89E-02 AB
	TBO	X	X	X	5,43E-02 AB a	7,09E-02 A a	7,02E-02 A a	1,04E-01 A

Tableau 10 : Valeurs des taux de colonisation racinaire totale et groupes de Tukey dans les sols trois mois après le transfert, et dans les sols de référence.

Groupes de Tukey

Minuscules : lecture par lignes

En noir : $> 10^{-2}$

Majuscules : par colonnes

En gris : $> 10^{-3}$

A>B>C

normal : $10^{-4} < x < 10^{-5}$

II.3.3. Colonisation racinaire

Cas du caféier

En ce qui concerne la colonisation des carottes de sol par les racines du caféier, une analyse de type anova montre qu'elle est reliée à la parcelle de destination et d'origine indépendamment, mais aussi à leur interaction, ceci dans les traitements de destination organique et conventionnel.

On remarque, à la lecture du tableau 9, que seule la carotte de référence correspondant à la parcelle SMC possède une colonisation racinaire du caféier supérieure aux autres parcelles de destination. La figure 16 montre que la parcelle d'origine CMC conduit tendanciellement à de plus grandes colonisations racinaires que dans les autres origines. Il faut noter que l'origine CMC montre une tendance à favoriser un taux de minéralisation de l'azote élevé.

On remarque également, sur la diagonale, que les carottes replacées dans le même traitement ont des valeurs de colonisation proches des carottes de référence correspondantes (sauf TBO).

Cas de l'ensemble des racines

La colonisation racinaire totale (tableau 10), c'est-à-dire la somme des racines d'arbres, des autres racines et des racines de caféiers, est, selon une analyse anova, dépendante indépendamment de la parcelle d'origine et du traitement de destination, pour les traitements de destination organique et conventionnel.

Les carottes de référence ont également peu ou prou les mêmes taux de colonisation racinaire que les carottes dont la parcelle d'origine et de destination est la même (cellules de la diagonale).

Une tendance à l'envahissement par les racines du Terminalia a été constatée dans le cas de TBO au détriment des racines du caféier (fig. 17) mais aussi TMC. Il se peut aussi que les racines de caféier retrouvées pour les transferts SMC-TBO soient en fait des racines mortes puisque la parcelle de destination TBO conduit pour les autres transferts à une colonisation racinaire du caféier faible.

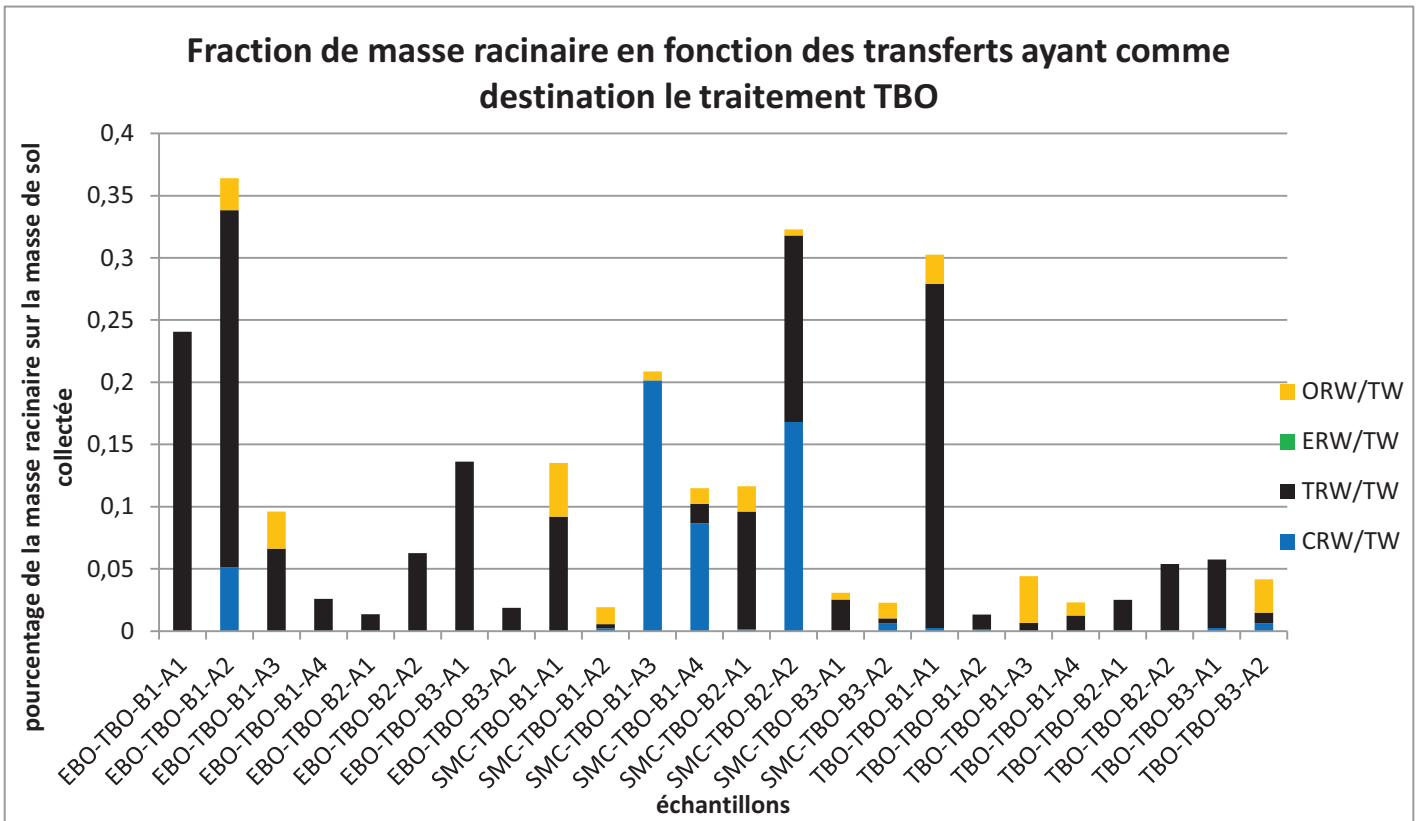


Figure 17 : Colonisations racinaires dans le traitement de destination TBO

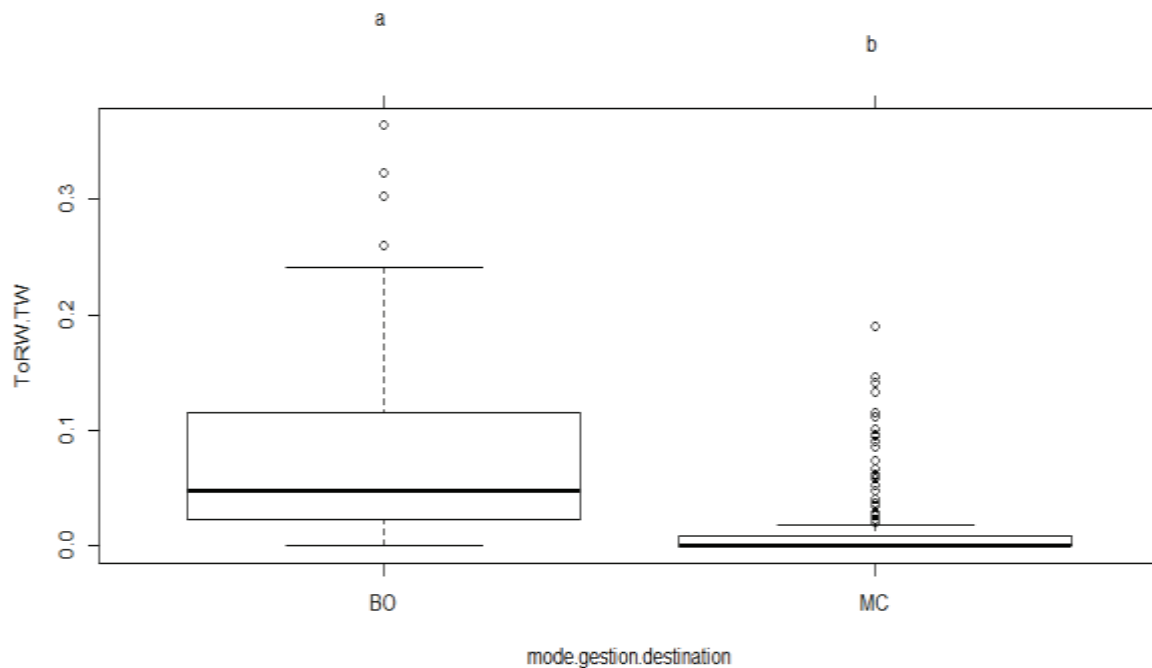


Figure 18 : Colonisation racinaire totale en fonction des traitements de destination

Comparaison entre traitements

Dans les parcelles de destination, on observe une plus grande colonisation racinaire totale dans le traitement (mode.gestion.destination dans la figure 18) organique que dans le traitement conventionnel. Ceci est expliqué par une plus grande colonisation des racines d'arbre, des caféiers mais aussi des « autres » racines, qui correspondent aux herbacées plus répandues en mode de gestion organique.

Comparaison entre arbres d'ombrage

En raison de la grande variabilité des résultats, il n'est pas possible d'obtenir de différence significative entre espèces à l'intérieur de chacun des modes de gestion. Néanmoins on observe en général que les carottes de sol dont l'arbre d'ombrage dans la parcelle de destination est le *Terminalia* sont moins colonisées par les racines de caféiers, d'autres racines que les carottes de sol provenant des légumineuses. On peut supposer que les racines de *Terminalia*, fortement retrouvées, exercent une forte compétition.

II.3.4. Lien avec et entre les valeurs de minéralisation et colonisation racinaire.

La biomasse aérienne, la teneur en azote du feuillage et le rendement sont corrélés positivement avec une p-value inférieure à 10^{-4} dans l'ensemble des parcelles de destination étudiées.

Le rendement n'est pas expliqué par les taux de minéralisations aérobie ou anaérobie (*one-way* anova, p-value $> > 0,05\%$). La minéralisation (anaérobie seulement) n'est significativement reliée à la biomasse aérienne que dans les carottes de référence.

Les taux de minéralisation (aérobie et anaérobie) ne sont toutefois pas corrélés au statut azoté, défini par la minéralomasse aérienne en azote (calculée via la multiplication de la biomasse aérienne par les teneurs en azote). Ceci voudrait signifier que la minéralisation du sol n'est pas l'élément le plus déterminant dans la création de biomasse et l'allocation d'azote du sol au caféier.

D'autre part, la colonisation racinaire du caféier est négativement corrélée avec le taux de minéralisation anaérobie et le taux de minéralisation aérobie. Le taux de nitrification n'est pas significativement corrélé avec cette variable (p-value de 0,06).

Enfin, le taux de nitrification (ou de minéralisation aérobie) et de minéralisation anaérobie est corrélé positivement avec la colonisation racinaire totale. Dans les carottes de référence, la colonisation racinaire totale, et celle du caféier, ne sont ni corrélées au rendement ni à la biomasse aérienne dans les différents parcelles de destination. Elles ne les expliquent pas non plus (anova).

Ces deux taux de colonisation racinaire n'expliquent donc ni les rendements ni les valeurs de minéralisation observés (anova), au contraire de notre hypothèse de départ.

II.4. Discussion

II.4.1. Des objectifs en partie atteints

Des résultats obtenus, nous pouvons répondre à la plupart de nos hypothèses et avons atteint en partie nos objectifs :

La minéralisation, anaérobie et aérobie, de l'azote dans le sol est, du moins en partie, sous l'influence des arbres d'ombrage. Cependant, le développement racinaire des espèces, caféiers comme arbres d'ombrage, n'apparaît pas comme un facteur déterminant de la minéralisation de l'azote, au contraire des hypothèses et conclusions d'Andrianarisoa K.S. et al. (2010). S'appuyant sur l'étude de Andrianarisoa K.S. et al. (2010), l'étude des microorganismes présents dans les carottes pourrait à venir enrichir l'analyse puisque des échantillons des carottes réalisées sont conservés congelés.

Pour l'ensemble des traitements étudiés, biomasse aérienne, teneur en azote du feuillage et rendement en baies sont corrélés positivement avec une p-value inférieure à 10^{-4} .

Les études de minéralisation anaérobie et aérobie montrent l'effet positif des légumineuses fixatrices d'azote, en particulier Érythrine, sur la minéralisation de l'azote du sol.

En revanche le Terminalia ne se différencie pas de la monoculture caféière. L'éventuel effet dépressif que pourrait avoir l'arbre sur la minéralisation de l'azote du sol n'a pas pu être mis en évidence dans cette étude. Néanmoins il apparaît qu'à l'intérieur de chacun des modes de gestion « conventionnel » et « organique » le Terminalia exerce une compétition pour l'azote sur le caféier avec pour conséquence une réduction de la teneur en azote des feuilles du caféier. L'envahissement des carottes de sols par les racines de Terminalia est un indicateur de la capacité compétitrice pour les nutriments que peut avoir cette espèce.

En revanche, d'autres indicateurs du statut azoté, comme la minéralomasse aérienne azotée, le contenu en azote des feuilles, et le rendement du caféier ne sont pas reliés au taux minéralisation de l'azote ni à la colonisation racinaire. On peut notamment penser que le niveau d'ombrage qui peut limiter la photosynthèse (Cashá + Terminalia) et l'azote issu de la fertilisation expliqueraient aussi les différences de biomasse, minéralomasse et rendement en cerises du caféier.

II.4.2. Quelques biais potentiels

Des biais liés au microclimat et aux sols

Le taux d'humidité a été mesuré de manière ponctuelle le 28 mai 2013 dans 18 carottes provenant du milieu d'un interrang de l'aire utile des parcelles étudiées. Le poids frais et le poids sec (20 grammes initiaux pesés après échantillonnage puis après deux jours à 105°C) a été étudié. Cette manipulation a permis de montrer des différences d'humidité entre les parcelles étudiées. L'humidité pourra faire partie des variables environnementales explicatives.

Des biais liés à la végétation et au ruissellement

Bien que la litière végétale ait été enlevée régulièrement, il n'empêche que les mauvaises herbes poussant au sein même des carottes de sol ont pu influencer sur les résultats, notamment en ce qui concerne la colonisation racinaire ligneuse.

II.4.3. Les variables influant sur la minéralisation des sols reste à déterminer

Edilberto (2005) a montré des différences d'apports en éléments minéraux via les résidus d'émondage des arbres et de taille des caféiers dans les parcelles étudiées. 144,78kg/ha/an d'azote seraient libérés par les émondes de l'Érythrine en conventionnel et organique contre seulement 0,60 pour le Terminalia, ce qui fait une différence significative. Cette valeur pour l'Érythrine est proche de la quantité d'azote inorganique épandue dans les parcelles. Cet apport important d'azote organique au sol dans les parcelles avec Érythrine peut expliquer à terme la plus forte minéralisation de l'azote du sol et aussi les plus fortes teneurs en azote de feuilles de caféiers. D'autre part, Duguet (2005) a montré - dans un autre écosystème - que la teneur en matière organique des sols peut avoir une influence sur les taux de minéralisation.

Une première analyse succincte montrerait que plusieurs éléments minéraux dans la parcelle de destination aient une influence sur les taux de minéralisation. Aucun modèle mixte (facteurs+variables)³ n'a été développé mais il semble que le cuivre soit un élément déterminant dans l'explication des taux de minéralisation.

II.4.4. Une manipulation à poursuivre malgré les difficultés de comparaison

En ce qui concerne la minéralomasse azotée dans les parcelles, il faut garder en mémoire que le nombre de caféiers est sensiblement différent – empiriquement – selon les parcelles. Une prochaine étape sera d'estimer le nombre actuel de caféiers par hectare afin d'établir une biomasse de caféiers, et par suite une minéralomasse azotée, moyennes à l'hectare. Pour ce faire - et ce qui aurait peut être du être considéré comme protocole- l'inventaire de la biomasse moyenne et du nombre de caféiers aurait pu être réalisé sur des placettes circulaires comme utilisées lors des inventaires forestiers.

Concernant la minéralisation de l'azote et la colonisation racinaire, un effet du traitement d'origine sur la minéralisation de l'azote du sol transféré a été observé, en particulier pour les légumineuses, trois mois après le transfert de sol. Il serait intéressant de poursuivre l'expérience pour identifier correctement l'effet du traitement de destination.

Enfin, dépendamment des résultats de la modélisation, et ce appuyé par les premières analyses statistiques réalisées sur la relation entre les taux de minéralisation et les variables, il faut garder en tête que cette étude écologique a été menée dans un environnement spatio-technico-temporel particulier, comportant de nombreuses variables environnementales non reproductibles.

Le temps disponible en fin de l'étude n'a enfin pas permis une modélisation explicative de la minéralisation dans les sols, ce qui est une suite à donner à l'étude.

³ Facteurs : origine/destination/traitement

Variables : éléments chimiques dans ces parcelles, humidité...

Partie III. Expérience d'identification de transfert d'azote dans un SAF Érythrine-caféier

III.1. Introduction à l'étude.

III.1.1. Marquage au ^{15}N

A partir des années 1970, les symbioses et mécanismes permettant la fixation d'azote par certains arbres ont été largement étudiées, notamment via des estimations de fixation au sein des nodules racinaires. Cependant, les travaux de recherche orientés sur la fixation d'azote par les Légumineuses arborées ont connu un déclin après les années 1980 suite à la publication d'articles estimant que cet apport d'azote n'était pas significatif dans le bilan azoté des SAF (Nygren et al., 2012). Une réévaluation dans les années 2000 a suggéré une sous-estimation de cette ressource.

Nygren et al. (2012) suggèrent que soient poursuivies les études quant à l'effet de la gestion des systèmes et des Légumineuses sur la fixation biologique de l'azote en relation avec les fonctions des SAF et les services écosystémiques fournis, dont le soutien à la production de la culture associée. De récentes études suggèrent en effet que l'insertion d'arbres fixateurs d'azote dans les SAF peut augmenter les rendements, sans toutefois déterminer la contribution exacte du processus de fixation à cette augmentation de production. Un manque de données existe sur ce point, de même que sur les modes de transfert de l'azote entre arbres fixateurs et cultures associées.

Enfin, les dynamiques intra- et interannuelles de fixation et transfert d'azote restent un point obscur. Les cycles des espèces présentes ainsi que la gestion de la parcelle (densité des espèces, amendements, élagages) influent sur ces dynamiques d'après plusieurs études (Nygren et Ramirez, 1995 ; DeMatta et al., 2007 ; Chesney et Nygren (2012) dans Nygren et al., 2012 ; Cannavo et al., 2013).

Bien que la fixation d'azote ait pu être estimée assez précisément dans certaines conditions, l'existence ou non d'un transfert d'azote fixé par l'arbre d'ombrage à la culture est peu documenté. Toutefois, dans des SAF caféiers au Burundi, Snoeck et al. (2000) dans Nygren et al. (2012), notent des valeurs de 6 à 22% d'azote d'origine atmosphérique dans les feuilles du caféier.

Elle n'est notamment pas étudiée pour *Erythrina poeppigiana*, une Légumineuse connue pour sa forte production de biomasse et aussi la plus utilisée dans les SAF caféiers au Costa Rica (OFI-CATIEa, 2000).

Dans le cadre de ce stage, une expérience test a été réalisée afin de savoir si la méthode de marquage du tronc de l'arbre avec du ^{15}N était utilisable pour quantifier ce flux de transfert d'azote de la Légumineuse vers le caféier. Une identification du flux et une évaluation de la méthode a pu être réalisée au cours de ce stage.

Après marquage du tronc de l'Érythrine (sève xylémique) avec K^{15}NO_3 , il s'agissait d'évaluer 1) le niveau de marquage des différents organes de l'Érythrine et des caféiers voisins pour en déduire un transfert éventuel d'azote vers le caféier et 2) le transfert éventuel de ^{15}N vers le sol par le pluviollessivat.



Figure 19. Localisation de la parcelle étudiée, à la Finca Monte Claro

Sources : Baraër T. (2013), Google maps (2013)

Compte tenu de la dynamique de croissance rapide du houppier de l'espèce après taille et du coût du $K^{15}NO_3$ utilisé pour le marquage de l'arbre, il est important d'estimer la quantité nécessaire de $K^{15}NO_3$ à injecter dans l'arbre sélectionné pour marquer les organes de l'arbre en particulier les feuilles et les branches à un niveau donné. En effet, l'utilisation de ces feuilles et branches marquées dans des expérimentations ultérieures de décomposition a tout son sens pour évaluer la libération d'azote des émondes restituées au sol et son devenir dans le système. Ainsi, dans cette étude la croissance moyenne des branches de l'Érythrine a été mesurée sur trois mois afin d'estimer la production de biomasse et la quantité d'azote accumulée.

III.1.2. Problématique de recherche.

L'identification et la quantification des transferts d'azote entre l'Érythrine et les caféiers est-elle possible grâce à la technique de marquage du tronc de l'Érythrine au ^{15}N ?

III.1.3. Objectifs

Objectif général

- Identifier l'existence de flux d'azote entre *Erythrina poeppigiana*, l'arbre fixateur d'azote, et la culture associée, le caféier.

Objectifs particuliers

- Déterminer l'abondance naturelle de ^{15}N dans différents composants du SAF, à savoir : les feuilles vieilles et jeunes de l'Érythrine et du caféier, leurs racines fines, leurs troncs et branches.
- Tester la méthode de marquage par injection de ^{15}N dans le tronc pour les Érythrines.
- Déterminer la quantité de $K^{15}NO_3$ nécessaire pour observer les flux au sein de l'Érythrine et entre l'Érythrine, le sol et les caféiers.
- Mesurer la vitesse, l'homogénéité de la réallocation du ^{15}N dans les organes des composants du SAF cités ci-dessus.

III.2. Matériels et méthodes.⁴

III.2.1. Localisation et description du site d'étude – ^{15}N

L'essai au champ s'est déroulé à la finca Monte Claro, ferme de 350 hectares (fig.19). Les productions agricoles sont la canne à sucre et le café. La parcelle dans laquelle une Érythrine a été marquée se situe par $9^{\circ} 54'$ de latitude Nord et $83^{\circ} 38'$ de longitude Ouest. Sur cette parcelle, de 0,25ha, les caféiers ont été plantés à écartement de 1,5 m x 1 m. La densité d'Érythrine est de 170 arbres par hectare, qui sont émondés totalement deux fois par an. La parcelle reçoit $60kg.N.ha^{-1}.an^{-1}$.

⁴ Pour les caractéristiques des espèces étudiées, se référer à la partie II.

III.2.2. Notions sur la méthode employée.

Différentes méthodes isotopiques sont utilisées pour évaluer les transferts d'azote et ont été testées au cours des décennies précédentes. Ces méthodes appartiennent à deux catégories : méthodes dites d'abondance naturelle et méthodes à enrichissement isotopique. Cette dernière catégorie comprend les techniques de dilution, où on introduit une forte concentration d'isotopes à un temps initial, pour ensuite suivre la redistribution des isotopes dans le système.

La technique de dilution isotopique (marquage au ^{15}N) la plus couramment utilisée dans les essais au champ est l'application des engrais azotés enrichis en ^{15}N (Rao A.V., Giller K.E., 1993 ; Chalk P.M., 1985). Cependant, de nombreuses critiques ont été émises vis-à-vis de ces techniques de dilution, notamment l'impossibilité d'un enrichissement uniforme dans le substrat marqué. Par rapport à cela, la méthode dite de l'abondance naturelle est souvent recommandée, mais pas toujours applicable (Nygren et al., 2012).

L'abondance naturelle n'est réalisable que dans certaines conditions (Snoeck et al, 2000). Pratiquement, si le caféier proche de l'arbre a une composition isotopique intermédiaire entre le caféier loin de l'arbre et l'Érythrine, la quantification du transfert est réalisable. Dans le cas des sols riches en argile du Costa Rica, cette méthode donne peu de résultats. La confrontation des deux méthodes est parfois nécessaire (Bouillet et al, 2008 dans Nygren et al., 2012).

Ces méthodes consistent en l'estimation du pourcentage d'azote issu de l'atmosphère (%Ndfa).

Le marquage au ^{15}N permet en théorie la qualification des transferts d'azote entre plante fixatrice et plante non fixatrice d'azote.

L'injection de ^{15}N dans les troncs a été expérimentée depuis les années 1990, notamment dans des écosystèmes forestiers, dans l'objectif de tester une méthode plus pertinente dans la caractérisation du cycle de l'azote (Swanston C.W., Myrold D.D., 1998 ; Petersson A., 2010). L'injection de nitrate ^{15}N dans la sève xylémique de l'arbre permet de marquer l'azote de l'arbre après assimilation du nitrate dans les feuilles puis d'évaluer à court terme le transfert direct d'azote via les exsudats racinaires ou le réseau mycélien vers la culture associée.

Le transfert d'azote peut être estimé en utilisant la formule (9) :

$$\%N \text{ dérivé du transfert} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}}(0) - \delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}}(t)) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}}(0) - \delta^{15}\text{N}_{\text{Érythrine}}(t)) \times 100$$

(9) (tiré de Jalonen et al., 2009)

0 : valeur initiale avant marquage t : valeur au temps t après marquage.

Le marquage de la matière organique de l'arbre (partie aérienne et souterraine) permet aussi de suivre au cours de sa décomposition, le transfert d'azote vers la culture associée (transfert indirect).

t=0 Natural Abundance	t=1	t=2	t=3	t=6	t=9	t=15	t=22	t=29	t= 85	t= 115
26 fev	27 février	28 février	1 mars	04-mars	07-mars	13-mars	20-mars	27-mars	22-mai	21-juin

Tableau 11 : Dates d'échantillonnages (t en jours)

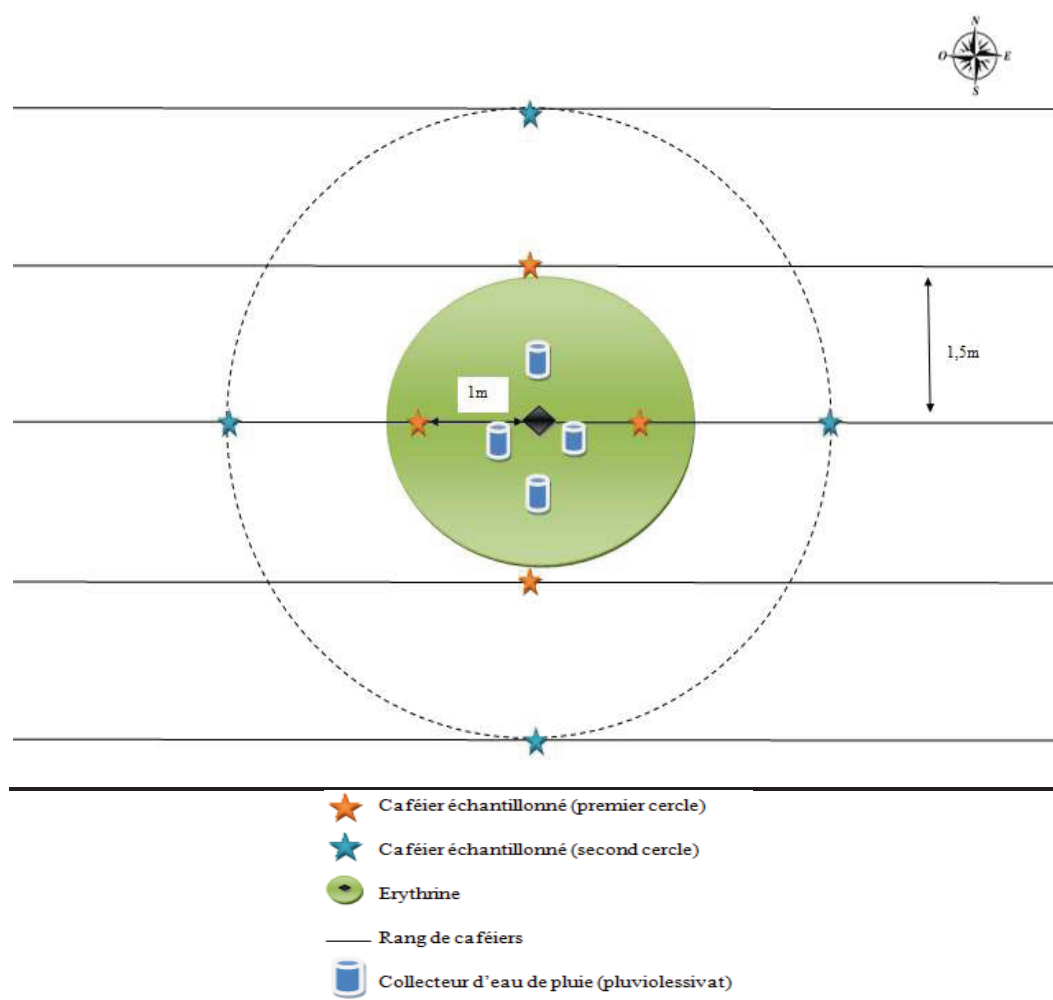


Figure 20 : Schéma simplifié du dispositif expérimental

III.2.3. Protocole de terrain

III.2.3.1. Mode opératoire du marquage

Pour le marquage, 6,66 g de poudre de $K^{15}NO_3$ (soit 1g d'azote marqué) ont été dilués dans 500mL d'eau distillée contenue dans une bouteille en verre.

Sur le tronc sont accrochées deux bouteilles en verre dont le bouchon, orienté vers le bas, sera perforé de deux opercules auxquels sont reliés les tubes contenant l'eau. Celle du bas contient de l'eau distillée afin de ne pas créer de cavitation lors de l'afflux d'eau marquée dans le tronc. Celle du haut contient l'eau marquée.

Le tronc du Poró est perforé grâce à une perceuse munie d'une mèche bois à une profondeur de 10 cm environ. Durant la perforation, de l'eau distillée est apposée sur le tronc de manière à ne pas faire rentrer d'air. Le premier tube de la bouteille contenant l'eau distillée est introduit dans le trou de perforation. Le second tube est ensuite connecté à la seconde bouteille contenant le ^{15}N -nitrate. Le tube restant de la seconde bouteille permet l'entrée d'air par le haut. Les deux bouteilles sont accrochées successivement sur le tronc de l'arbre en amont de la perforation.

III.2.3.2. Un échantillonnage régulier...

A intervalles réguliers (cf. tableau), un échantillonnage de différents organes des différentes composantes de la biomasse, du sol et du pluviollessivat a été effectué. (cf. fig. 20, tableau 11, et annexe 5)

Ont été récoltées :

- Jeunes et vieilles feuilles d'Érythrine, pour les quatre points cardinaux. Les jeunes feuilles sont situées au plus à cinq nœuds de l'extrémité de la branche, les vieilles feuilles au-delà,
- Jeunes et vieilles feuilles de caféier, pour les quatre points cardinaux, sur le cercle 1 (caféiers les plus proches situés environ à 1m de l'arbre) et ultérieurement le cercle 2 (caféiers situés à environ 3 mètres soit la largeur de deux inter-rangs),
- Racines d'Érythrine, prises au pied de l'arbre,
- Racines de caféier, prises au pied de l'arbre, pour les quatre points cardinaux, par carottage sur l'horizon 0-10cm,
- Pluviollessivats collectés sous le houppier de l'Érythrine marquée (4 collecteurs) et sous une Érythrine non marquée (2 collecteurs),
- Mais aussi branches, troncs, baies.

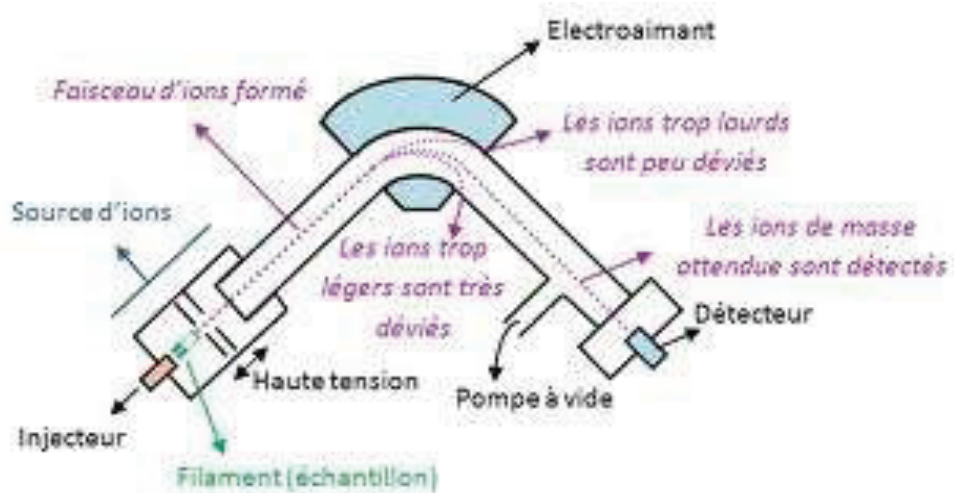


Figure 21 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un spectromètre de masse

Source : ENS Lyon

III.2.4. Protocole de laboratoire

Préparation des échantillons.

Au laboratoire, les échantillons sont lavés (racines extraites des sols seulement), séchés dans un four à 40°C pendant au moins trois jours puis broyés entre cinq et dix minutes selon les échantillons dans un broyeur à bille avant d'être entreposés dans des flacons.

Pour éviter des contaminations de ^{15}N entre échantillons, il est important lors des étapes de préparation des échantillons pour l'analyse de respecter un protocole précis. Une faible contamination d'un échantillon non-marqué pourrait incorrectement indiquer un flux là où il n'y en a pas. Pour cette raison, on mesure en premier les échantillons potentiellement les moins marqués.

L'analyse au spectromètre de masse ne nécessitant que quelques milligrammes de l'échantillon, des sous-échantillons ont été pesés et emballés dans des capsules en étain. Afin de pouvoir convertir cette masse en concentrations d'azote, les échantillons ont été pesés à haute précision sur une balance à cinq décimales (10µg de précision).

Principe du spectromètre de masse

Les composés organiques de l'échantillon sont ionisés par bombardement électronique à 70Ev (électronvolts). Un champ magnétique, généré par un électroaimant, va faire dévier les ions en fonction de leur masse moléculaire. Le ^{15}N va être moins dévié que le ^{14}N , plus léger. Le faisceau d'ions est ensuite collecté par le détecteur (fig. 21). Les données recueillies permettent ensuite de calculer le $\delta^{15}\text{N}$ de l'échantillon grâce à la formule (10) :

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{sa}} = \frac{\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{sa}} - \text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{at}}}{\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{at}}} \times 100,$$

(10) (tiré de Jalonen et al., 2009)

III.2.5. Analyse statistiques

Une Anova suivie d'un test TukeyHSD a été employée sur les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ de chaque compartiment afin de comparer les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées pour chaque date de marquage. Les résultats sont considérés significatifs pour des p-value < 0,05%. Pour autant, le caractère binaire du marquage (marqué/ pas marqué), en lien avec les objectifs visés ne nécessite pas, dans un premier temps, cette analyse.

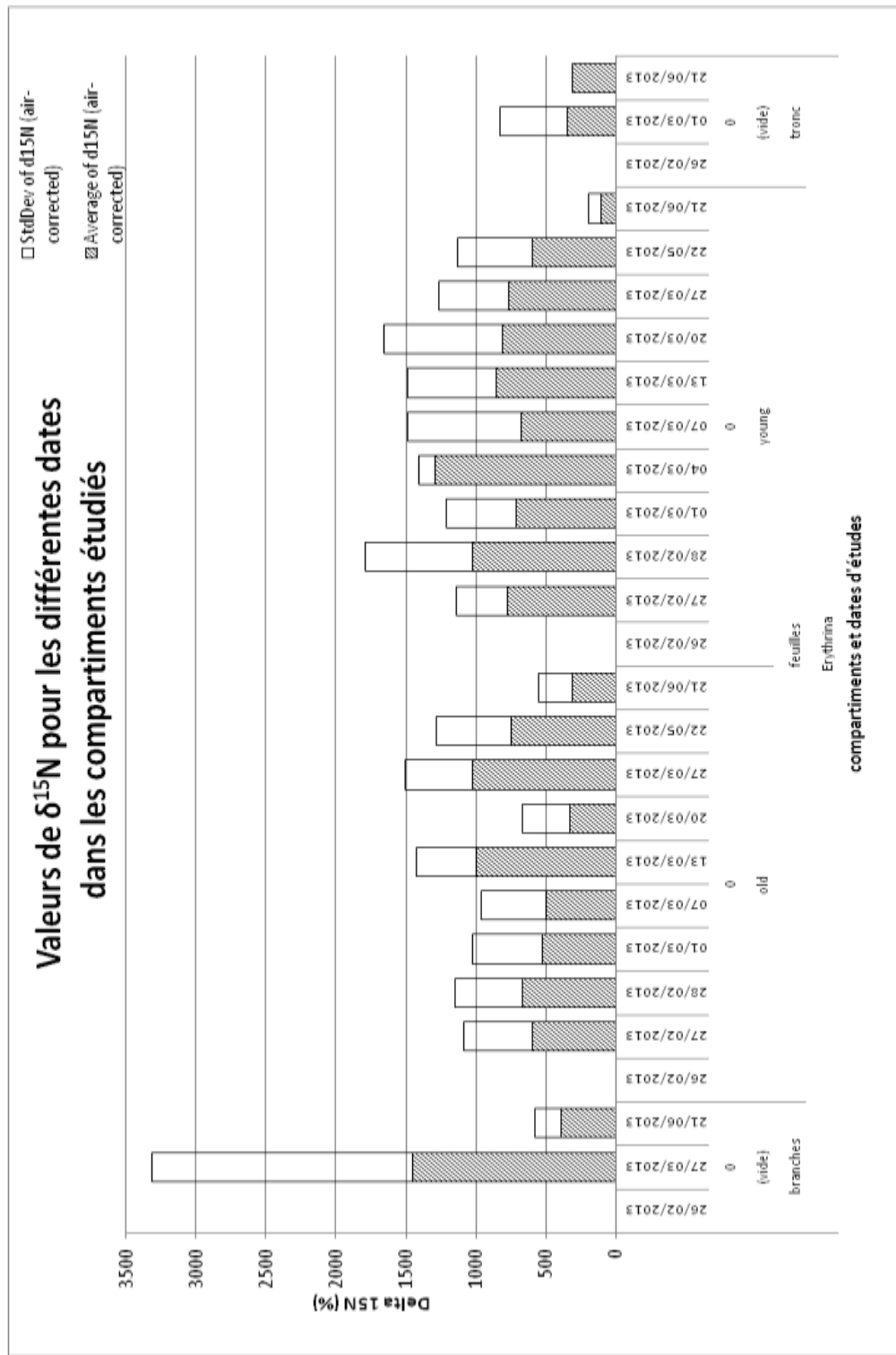


Figure 22 : Valeurs de marquage $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées dans les feuilles et branches d'érythrine pour les différentes dates d'étude

III.3. Résultats

III.3.1. Identification des flux, validité de la méthode utilisée

III.3.1.1. Abondance naturelle et marquage de l'Érythrine

Sur les figures 22 et 23, on observe avant marquage, le 26 février 2013, une valeur faible de $\delta^{15}\text{N}$ retrouvée dans tous les compartiments récoltés et analysés. Cette valeur est considérée comme le $\delta^{15}\text{N}$ en abondance naturelle. Pour le caféier, les valeurs sont de 4,66‰ pour les jeunes feuilles et 3,41‰ pour le tronc. Pour l'Érythrine, le tronc présente une valeur d'abondance naturelle de 4,56‰, les branches de 7,6‰, les racines de 3,65‰, les vieilles feuilles de 3,78‰ ; les jeunes feuilles ont une valeur élevée de 14,51‰ qui pourrait indiquer qu'il y ait déjà eu un marquage.⁵ (cf. annexe 5 pour les valeurs)

Pour les feuilles jeunes et vieilles, le tronc et les branches de l'Érythrine, on observe un marquage fort à partir du lendemain. En effet, dès le 27 février jusqu'à quatre mois après (soit le 21 mai), des valeurs moyennes de $\delta^{15}\text{N}$ entre 500‰ et 1000‰ sont mesurées dans les feuilles. Durant toute cette même période, il n'y a pas de tendance claire vers une augmentation ou une baisse de valeur $\delta^{15}\text{N}$, les feuilles restent fortement marquées. Néanmoins entre le 22 mai et le 21 juin on observe une forte diminution de teneur en ^{15}N dans les feuilles jeunes qui indiquerait une dilution de l'isotope. Cette tendance semble s'être amorcée depuis le mois de mars et est également présente dans les vieilles feuilles.

Les branches présentent une valeur de 1453‰ après un mois et 392‰ après quatre mois. Le tronc de l'Érythrine présente des valeurs – à prendre avec précaution au vu de la grande variabilité entre échantillons - respectives de 347‰ et 317‰ pour ces mêmes dates. A part une seule valeur de $\delta^{15}\text{N}$ très élevée dans les branches en mars, les $\delta^{15}\text{N}$ dans les branches et dans le tronc sont généralement plus faibles que dans les feuilles, ce qui indiquerait un flux préférentiel du nitrate marqué vers les feuilles.

Moins faciles à interpréter sont les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ obtenues dans les racines d'Érythrine après marquage (Figure 23). En effet, seule la valeur au 1er mars est différente de l'abondance naturelle avec une valeur de 451‰. Cette valeur pourrait être un artefact, comme un pic de marquage, sans détermination de l'origine pour l'instant. On verra plus loin que l'estimation de la biomasse aérienne montre que la quantité de ^{15}N insérée est probablement entièrement retrouvée dans le houppier, ce qui trancherait pour un transfert faible, si existant, dans les racines. Une autre explication pourrait être due au fait que les flux dominants de nitrate dans l'arbre sont en principe des racines, sources, vers les feuilles, puits, et lieu de production de protéines. Un flux de nitrate du tronc ou des feuilles vers les racines est en soi contre-intuitif mais a pu se produire.

On peut également remarquer (non montré ici) que le marquage réalisé sur le flanc Ouest du tronc a rendu le marquage non-homogène dans la couronne de feuilles. En effet, les feuilles situées du côté Ouest (W) de l'arbre ont, feuilles jeunes et vieilles confondues, sauf pour une date, toujours un $\delta^{15}\text{N}$ supérieur (> à 1000‰) aux autres côtés qui présentent des variations du $\delta^{15}\text{N}$ entre 500‰ et 1000‰.

⁵ L'échantillonnage ayant été fait juste après l'installation du dispositif de marquage...

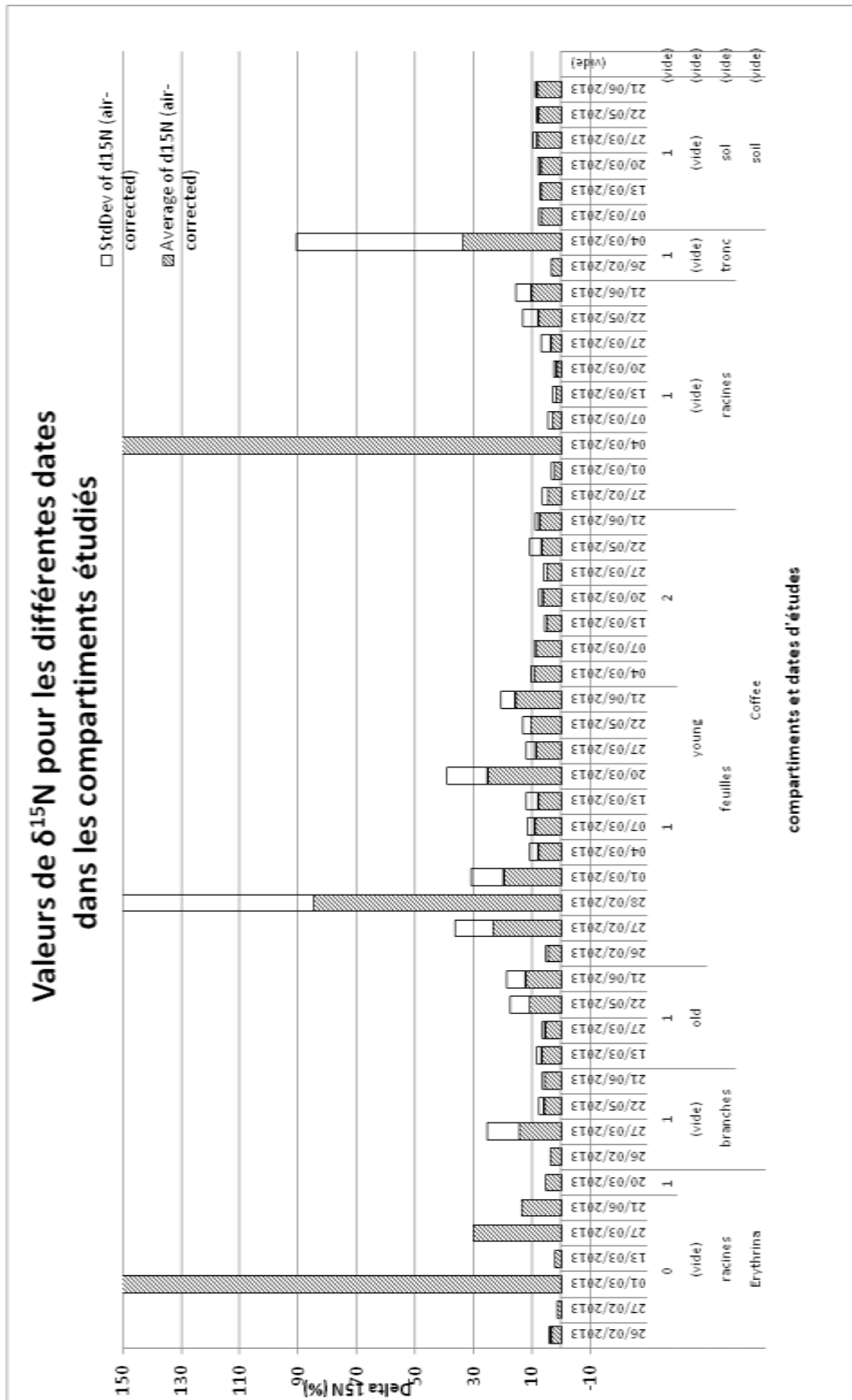


Figure 23 : Valeurs de marquage $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées dans les racines de l'érythrine et les compartiments des caféiers pour les différentes dates d'étude

D'autre part, nous n'observons pas de diminution significative du signal dans les feuilles de l'Érythrine durant plusieurs mois. A partir de juin, il semble que le remplacement du feuillage pourrait induire une dilution. On peut ériger l'hypothèse selon laquelle le réservoir d'azote (le tronc) est suffisamment grand pour assurer un marquage constant durant plusieurs mois. Les faibles valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ retrouvées dans le tronc pourraient être dues à l'échantillonnage de vaisseaux inactifs et actifs, induisant une valeur de $\delta^{15}\text{N}$ inférieure aux feuilles.

III.3.1.2. Transferts aux caféiers

La valeur de $\delta^{15}\text{N}$ en abondance naturelle des feuilles de caféier est de 4,7‰ et ne diffère pas d'autres mesures réalisées dans l'essai agroforestier du Catie (valeurs comprises entre 1 et 9‰, Isaac M. comm. pers.). Après marquage de l'Érythrine, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ des différents compartiments du caféier généralement ne dépassent pas 30‰, exceptions faites des jeunes feuilles de caféier le 28 février, du tronc et des racines de caféier le 4 mars, dont les valeurs seront discutées plus loin. Ce seuil de 30‰ est bien inférieur au marquage des feuilles de l'Érythrine (500‰ à 1500‰).

Toutefois, ces augmentations de $\delta^{15}\text{N}$ sont suffisamment élevées pour estimer des transferts d'azote de l'Érythrine vers le caféier. Ces transferts sont calculés selon un modèle simple de mélange de deux sources (2-source isotope mixing model), avec la formule suivante :

$$\%N \text{ dérivé du transfert} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}(0)} - \delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}(t)}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}(0)} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Érythrine}}) \times 100$$

(11) (tiré de Jalonen et al., 2009)

Les $\delta^{15}\text{N}$ du caféier avant le marquage et durant le marquage ($\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}(0)}$ et $\delta^{15}\text{N}_{\text{caféier}(t)}$), sont des valeurs bien définies. Plus compliqué reste la définition de la valeur de la source ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Érythrine}}$) qui n'est pas constante et difficile à identifier Faut-il prendre les valeurs retrouvées dans les feuilles, les racines ? La question de la valeur (moyenne, extremum) et de la date se posent aussi. Nous avons opté pour un calcul avec trois valeurs uniques et non dépendantes du temps : 1000 et 1300‰ (correspondant aux valeurs retrouvées dans les feuilles) ainsi que 400‰, valeur maximale retrouvée dans les racines d'Érythrine. Pour les sols, la valeur de référence est celle du 7 mars, n'ayant pas d'analyse réalisée pour le 26 février.

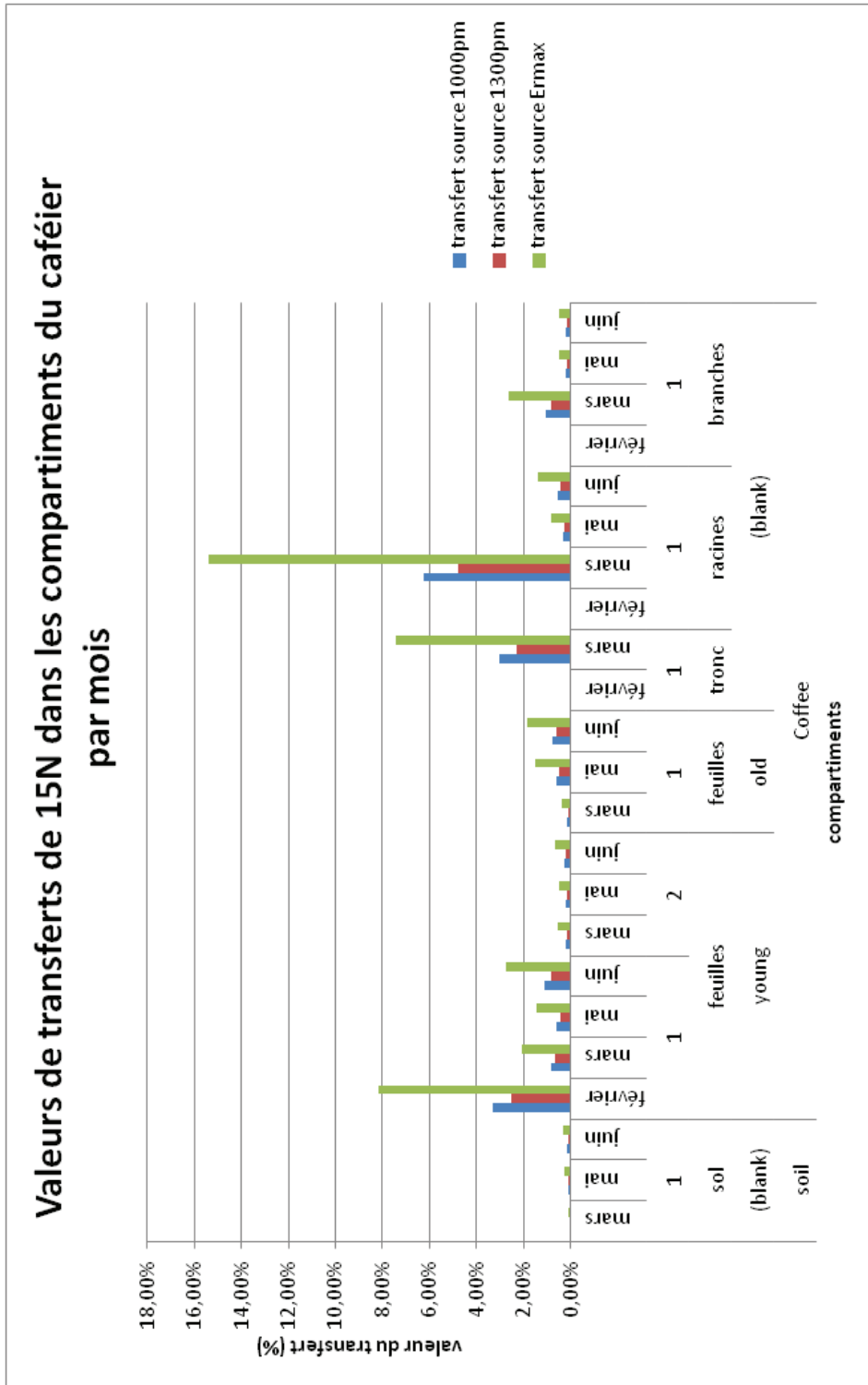


Figure 24 : Valeurs de transferts de 15N calculés dans les différents compartiments pour les différentes dates d'étude selon trois méthodes.

La figure 26 présente les valeurs de transfert par mois pour les différents compartiments des caféiers et dans le sol selon les trois valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ de la source. Une figure plus détaillée est disponible en annexe 6.

Dans les sols, bien que les taux de transfert ne dépassent pas 0,4% dans l'estimation la plus élevée pour tous les mois de l'étude, un triplement des valeurs est observable entre mars et juin (transfert de 0,11 à 0,34% dans l'estimation la plus élevée – en vert.).

Dans les feuilles de café, nous observons une valeur de transfert plus élevée dans les caféiers proches (rang 1, à un mètre de l'arbre) que dans les caféiers lointains (à trois mètres de l'arbre), ceci pour tous les mois. Dans le rang 1, les valeurs de transfert dans les jeunes feuilles vont de 1,43% à plus de 8% en février. Dans les racines et les vieilles feuilles de café, les valeurs de transfert sont inférieures aux jeunes feuilles, et ce pour tous les mois sauf mai. Les valeurs dans les feuilles vieilles des caféiers sont respectivement de 0,37%, 1,53% et 1,87% pour les mois de mars, mai et juin via l'estimation la plus élevée.

Le transfert aux troncs et aux racines des caféiers est quasiment nul en février et atteint des valeurs importantes (7,46% et 15,40% respectivement au maximum) en mars. Ces valeurs sont fortement reliées aux valeurs très importantes retrouvées dans ces deux compartiments le 4 mars et considérées comme des anomalies. Cette forte valeur est également retrouvée dans les branches (2,62%) mais pas dans les feuilles (sauf une « anomalie » à près de 20% le 28 février) où les taux restent en moyenne plus élevés que dans les troncs et les racines, ce qui est étrange en considérant un transfert à travers le sol.

Dans les racines, le transfert augmente de 0,82% à 1,42% entre mai et juin tandis qu'il reste constant dans les branches aux alentours de 0,50%.

Aucun des transferts (hormis le 04 mars pour le tronc et les racines des caféiers) ne sont significativement différents entre les dates d'échantillonnage.

III.3.2. Production de biomasse aérienne de l'Érythrine

En pesant six branches d'Érythrine et comptant le nombre de branches, nous estimons la biomasse aérienne (masse sèche) à 12,14kg avec une moyenne de 506 grammes en moyenne par branche dont 274 grammes de feuilles et 232 grammes de branches. On compte 20 feuilles en moyenne par branche.

Avec une moyenne de 2,11% d'azote dans les branches et 5,14% dans les feuilles (4,68% dans les vieilles feuilles et 5,61% dans les jeunes feuilles), cela fait une moyenne de 10,68g d'azote par branche et 14,08g d'azote dans les feuilles de chaque branche.

Sur douze branches suivies durant 115 jours, la croissance moyenne est de 1,06 cm par jour avec un fort écart type de 0,77cm/jour. Le nombre de feuilles est quadruplé en 85 jours, ce qui correspond à 42,24g d'azote en plus dans les feuilles après 85 jours.

A partir de ces résultats, il est probable que trois mois après le marquage, les teneurs en ^{15}N diminuent dans l'arbre en raison de la dilution du ^{15}N dans une biomasse plus grande (voir discussion suivante).

III.4. Discussion

Les valeurs des abondances naturelles dans les compartiments de l'Érythrine apparaissent sensiblement élevées, notamment au vu des valeurs retrouvées dans les compartiments des caféiers. On aurait de plus pu s'attendre, en tant qu'arbre fixateur d'azote, à des valeurs plus proches de 0. Toutefois, des valeurs similaires à celles trouvées pour les vieilles feuilles d'Érythrine ont été mesurées dans le feuillage d'Érythrines de l'essai caféier du CATIE (Isaac M., comm. pers.). Il est aussi possible que le processus de fixation d'azote par l'Érythrine ait été interrompu pendant 10 semaines suite à la mortalité des nodules due à l'émondage de l'Érythrine en janvier, comme ont pu le montrer Nygren et Ramirez (1995).

La technique de marquage via l'insertion de ^{15}N soluble dans le tronc de l'arbre est une technique valable pour l'Érythrine, bien que le marquage puisse varier beaucoup dans le houppier selon l'orientation choisie pour le marquage. Le marquage de la sève xylémique se retrouve principalement dans le houppier (branches et feuilles) dès le lendemain de la mise en place du dispositif et dure durant au moins quatre mois. L'allocation du ^{15}N du tronc aux branches et aux feuilles est très rapide puisqu'un signal fort a été observé dès le lendemain du marquage.

La vitesse et la présence d'allocation aux racines n'est pas claire. Le flux d'azote marqué vers les racines d'Érythrine, potentielle source de transfert d'azote entre l'Érythrine et les caféiers n'est pas encore prouvé de manière statistique.

Des flux d'azote entre culture associée (caféier) et arbre d'ombrage ont été montrés bien que les valeurs des transferts restent assez faibles. D'autre part, des valeurs de flux plus élevées dans les feuilles du caféier que dans les racines ou le sol pourrait suggérer un transfert s'opérant par d'autres modes que ceux évalués ici.

Plusieurs éléments sont à discuter en ce qui concerne les possibles transferts d'azote de l'Érythrine aux caféiers :

- Les faibles taux de transfert retrouvés dans les feuilles pourraient s'expliquer par le volume important que représente ce compartiment. Le triplement de signal en trois mois, corrélées avec l'augmentation du signal dans les racines (hors valeur du 4 mars) et les vieilles feuilles des caféiers du rang 1, pourraient montrer une augmentation du transfert depuis l'Érythrine. Les valeurs dans les branches seraient alors curieuses
- Si toutefois les valeurs retrouvées le 4 mars ne sont pas considérées comme des *outliners* alors on peut émettre l'hypothèse d'un transfert direct de racines d'Érythrine à racines de caféiers via des mycorhizes. L'étude des relations racinaires pourrait être une suite à donner à l'étude.

Enfin, les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ légèrement plus élevées retrouvées dans les feuilles des caféiers des rangs 1 en comparaison du rang 2 pourraient aussi bien s'expliquer par un transfert de nitrates par le pluviollessivat (non encore analysé) au vu des forts signaux retrouvés dans le houppier. La présence de ^{15}N issu du marquage dans le pluviollessivat pourrait également expliquer les « anomalies » car de fortes pluies se sont produites durant la période de prélèvement.

Des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ de 1000‰ dans le houppier le lendemain du marquage seraient suffisantes (B. Zeller, comm. Pers.) pour observer des transferts entre arbre d'ombrage et culture associée, ce qui tendrait à valider nos observations. Des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ de 1500‰ seraient suffisantes si l'on souhaite observer l'effet de la décomposition des émondes marquées sur la teneur en azote des sols. En prenant en compte la croissance aérienne de l'Érythrine et nos valeurs, pour un marquage de 1500‰, il faudrait insérer respectivement 2.65 g et 10.61 g de ^{15}N dans l'arbre selon la quantité de feuilles à marquer : 6,57 kg (quantité initiale de feuilles) ou 26.3 kg (quantité de feuilles après quatre mois) si on considère qu'on retrouve au plus 70% du ^{15}N apporté.

Ces valeurs théoriques sont supérieures à la quantité insérée dans l'expérience.

Conclusion générale et perspectives

La demande initiale de l'UMR Eco&Sols était d'identifier, quantifier et qualifier les flux d'azote entre le caféier et l'arbre d'ombrage *Erythrina poeppigiana* via la technique de marquage du tronc au ^{15}N .

Suite à l'interrogation sur la validité de cette technique pour cette espèce, nous avons souhaité ériger ce doute en hypothèse et conduire en parallèle une analyse sur la minéralisation des sols dans différents systèmes agroforestiers à base de caféiers, plus porteuse de résultats pour un sujet de stage de fin d'études, conduisant à une étude double.

De notre étude sur les systèmes agroforestiers, il ressort que la **biomasse des caféiers est corrélée positivement avec le rendement en baies de café**. Les rendements sous Terminalia sont plus faibles que dans les parcelles avec d'autres arbres d'ombrage ou sans arbre. Les parcelles sous Érythrine en mode conventionnel ont des rendements les plus proches de la monoculture caféière. Les parcelles sous Érythrine conduite en organique possèdent de bons rendements également, notamment meilleurs que l'association avec le Cashá en mode conventionnel.

Ces résultats sont confirmés par une meilleure nutrition azotée du caféier (plus forte teneur en N des feuilles de caféier) sous Érythrine que sous Terminalia, qui exerce une compétition pour l'azote sur le caféier. L'envahissement des carottes de sols par les racines de Terminalia est un indicateur de la capacité compétitrice pour les nutriments que peut avoir cette espèce. Cette compétition est plus élevée en mode organique qu'en mode conventionnel.

Les études de **minéralisation anaérobie et aérobie montrent l'effet positif des légumineuses fixatrices d'azote**, en particulier Érythrine et Cashá, sur la minéralisation de l'azote du sol. En revanche le Terminalia ne se différencie pas de la monoculture caféière. L'éventuel effet dépressif que pourrait avoir l'arbre sur la minéralisation de l'azote du sol n'a pas pu être mis en évidence dans cette étude. Toutefois, une analyse des possibles substances allélopathiques et une expérience plus poussée sur la compétition mériteraient d'être réalisées

Globalement, la minéralomasse azotée du caféier n'est pas reliée à la minéralisation de l'azote, pourtant indicateur de la disponibilité en azote du sol. Par conséquent la minéralisation de l'azote n'est pas forcément l'élément le plus déterminant dans la création de biomasse et le transfert d'azote du sol au caféier dans l'ensemble de nos systèmes. En effet le niveau d'ombrage peut être un élément plus déterminant dans la limitation du développement des caféiers. Le caféier se comporte mieux sous Érythrine régulièrement taillé en mode organique, que sous arbres à plus fort ombrage tel que le Cashá ou le Terminalia conduits en mode conventionnel.

La colonisation racinaire par le caféier n'est pas corrélée avec le rendement. Cependant, on observe que les racines de Terminalia sont très présentes dans toutes les carottes (transférées et de référence), ce qui tendrait à confirmer l'hypothèse de limitation des rendements sous Terminalia, du fait d'une compétition de l'arbre d'ombrage importante.

Enfin, les taux de **minéralisation aérobie et anaérobie sont corrélés négativement avec la colonisation racinaire totale**. Cependant aucun lien de causalité ne les unit.

D'autre part, nous avons montré que la technique de marquage au ^{15}N est réalisable dans le cas de l'Érythrine et que des transferts directs d'azote vers le caféier existent potentiellement.

Après injection d'un gramme de ^{15}N -nitrate dans la sève xylémique, l'allocation du ^{15}N du tronc aux branches et aux feuilles est très rapide. Des valeurs moyennes de $\delta^{15}\text{N}$ entre 500‰ et 1000‰ ont été mesurées dans les feuilles de l'arbre sans diminution significative durant trois mois. L'allocation vers les racines de l'arbre et le transfert direct de N vers les caféiers voisins est variable et plus difficile à appréhender.

Grâce à l'évaluation de la quantité de ^{15}N nécessaire pour étudier le devenir de l'azote issu de la litière ou d'émondes d'arbres, une étude plus quantitative portant sur les valeurs et processus de transferts d'azote entre arbre d'ombrage et culture associée pourra être menée. La finalité de celle-ci sera d'élaborer un ***guide de gestion des SAF Érythrine-caféier*** permettant d'optimiser la capacité fixatrice de cette Légumineuse et le mode de transfert de l'azote au caféier afin de réduire l'apport d'azote sous forme d'intrants.

Bibliographie

- Albertin A., Nair P.K.R., 2004, Farmers' Perspectives on the Role of Shade Trees in Coffee Production Systems: An Assessment from the Nicoya Peninsula, Costa Rica, Human Ecology, Vol. 32, No. 4, August 2004
- Anderson J.M., Ingram J.S.I., 1995, Tropical soil biology and fertility a handbook of methods second edition, UBS, Unesco, ISSS, Chapter 6.7.4.
- Andrianarisoa K.S., Zeller B., Poly F., Siegenfuhr H., Bienaimé S., Ranger J., Dambrine E., 2010, Control of Nitrification by Tree Species in a Common-Garden Experiment, Ecosystems, published online 16 October 2010
- Andrianarisoa K.S., Zeller B., Dupouey J.L., Dambrine E., 2009, Comparing indicators of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France, Forest Ecology and Management, 257 (2009) 2241–2253
- Arana Meza Victor Hugo, 2003, Dinámica del nitrógeno en un sistema de manejo orgánico de café (*Coffea arabica* L.) asociado con Poró [*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook], Magister Scientiae agroforesteria tropical, Turrialba, Costa Rica
- Avnimelech, Y. 1971. Nitrate transformation in peat. Soil Sci. 111: 113-118.
- Babbar, L. et Zak, D. 1994. Nitrogen cycling in coffee agroecosystems: net N mineralization and nitrification in the presence and absence of shade trees. Agriculture, Ecosystems and Environment 48: 107-113.
- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., and Sommariba, E., 1998, Shade management in coffee and cacao plantations. Agroforestry Systems 38: 139–164.
- Bertsch, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José. 157 p.
- Brundtland G.H., 1987, Our Common Future (Rapport Brundtland), Commission "Environnement et Développement" des Nations Unies, Oslo, 20 mars 1987
- Campbell Leslie, 2012, Biophysical Drivers of Tree Crop Performance in Shade, Agroforestry Systems: The Case of Coffee in Costa Rica, Master Thesis, Department of Geography, university of Toronto
- Campbell Leslie, 2012, Biophysical Drivers of Tree Crop Performance in Shade, Agroforestry Systems: The Case of Coffee in Costa Rica, Master Thesis, Department of Geography, university of Toronto
- CATIE, ASIC, ICAFE, 2012, Coffee Agroforestry Systems Experiment: More than a decade of pioneering results at a world level / Ensayo de Sistemas Agroforestales con Café: más de una década de resultados pioneros en el mundo, Turrialba, Costa Rica.
- Cirad, 2011: <http://intens-fix.Cirad.fr>
- Cirad, 2013: www5.montpellier.inra.fr
- Cirad, 2013b, <http://safse.Cirad.fr/>, site consulté le 08 juillet 2013, mis à jour le 13 avril 2013.
- Comité Français du Café, 2013, <http://www.comitefrançaisducafé.fr>, consulté le 04 juillet 2013, mis à jour le 27 mai 2013.
- Coyne, M., 1999, Microbiología del suelo: un enfoque exploratorio. Editorial Paraninfo, Madrid, España. 416p.

- De Melo E., 2013a, histórico cosecha 2002-2011, CATIE, Turrialba, Costa Rica
- De Melo E., 2013b, Comparación ensayo de cafe_2001_2004_2010, CATIE, Turrialba, Costa Rica
- Duguey F., 2005, Minéralisation de l'azote et du phosphore dans les sols organiques cultivés du Sud-Ouest du Québec, thèse de l'Université Laval, Québec, Qc, Canada
- Edilberto J.M.G., 2005, Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistema de manejo de Café orgánico y convencional, Tesis de Maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Glover, N. y Beer, J., 1984, Spatial and temporal fluctuations of litterfall in the agroforestry associations *Coffea arabica* var. caturra-*Erythrina poeppigiana* and *C. Arabica* var. caturra-*E. poeppigiana* - *Cordia alliodora*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 50 p.
- Haggar J., Barrios M., Bolaños M. et al., 2011, Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America, *Agroforestry System*, vol. 71, N°3, 2007
- Harmand J.M, Avila H., Dambrine E. et al, 2007, Nitrogen dynamics and soil nitrate retention in a *Coffea arabica*—*Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica, *Biogeochemistry* n°85, pp. 125-139
- INEC, 2009, <http://www.inec.go.cr>, page consultée le 17 avril 2013, dernière mise à jour 17 avril 2013.
- Jalonen R., Timonen S., Sierra J., Nygren P., 2012, Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*, *Agroforestry systems*, volume 71, N°3, 2007
- Jalonen R., Nygren P., Sierra J., 2009, Transfer of nitrogen from a tropical legume tree to an associated fodder grass via root exudation and common mycelial networks *Plant, Cell and Environment* (2009) 32, p.p. 1366–1376
- Moore T.R., Dalva M., 1997, Methane and carbon dioxide exchange potentials of peat soils in aerobic and anaerobic laboratory incubations, *Soil Biology and Biochemistry* 29-8, Pages 1157–1164
- Munguía R., Beer J., Harmand J.M., Haggar J., 2004, Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y hojas verdes de *Erythrina poeppigiana* solas y en mezclas, *Agroforesteria en las Américas* 41-42, p.p. 62-68.
- Myers, R.J.K; Cuevas, E; Brossard, M. 1994. The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. Woomer, PL; MJ (Eds.). CAB International, Wallingford, UK P 81-116.
- Nygren P., Fernandez M.P., Harmand J.M., Leblanc H.A., 2012, Symbiotic dinitrogen fixation by trees: an underestimated resource in agroforestry systems?, *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 94, pp.123-160
- OFI-CATIEa, 2000, *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook
- OFI-CATIEb, 2000, *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell
- OFI CATIEc, 2000, *Abarema idiopoda* (Blake) Barneby & Grimes

- Osorio Moreno V.E., 2004, Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café, Tesis de Maestría, CATIE, Turrialba, Cartago, Costa Rica, 89p.
- Payán F., Jones D.L., Beer J., Harmand J.M., 2009, characteristics below *Erythrina poeppigiana* in organic and conventional Costa Rican coffee plantations, *agroforestry systems* 76, pp. 81-93
- Payán F., Jones D.L., Beer J., Harmand J.M., 2009, characteristics below *Erythrina poeppigiana* in organic and conventional Costa Rican coffee plantations, *agroforestry systems* 76, pp. 81-93
- Salisbury, F.B; Ross, C. 1994. *Fisiología Vegetal*. 4 ed. Grupo Editorial Iberoamérica. México.
- Siles P., Vaast P., Dreyer E., Harmand J.M., 2010, Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*, *Journal of Hydrology* 395 (2010) 39–48
- Solis Corrales M., Moya Roque R., -, *Terminalia amazonia* en Costa Rica
- Sommariba E., 1992, Revisiting the past: an essay on agroforestry definition, *Agroforestry Systems* 19, pp 233-240.
- Stevenson, F. J. 1986. *Cycles of soils. C, N, P, S, micronutrients*. J. Wiley and Sons, New York, 380 p.
- Swift M. J., Izac A. M. N., van Noordwijk M., 2004, Biodiversity and ecosystem services in agricultural landscapes: are we asking the right questions?, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 113–134.
- Tully K.L., Lawrence D. & Scanlon T.M., 2012, More trees less loss: Nitrogen leaching losses decrease with increasing biomass in coffee agroforests, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 161 (2012) 137– 144
- Vaast P., Harmand J.M., 2002, Importance des systèmes agroforestiers dans la production de café en Amérique central et au Mexique, *Plantations, recherche, développement*, Mai 2002, 9p.
- Vaast P., Harmand J.M., 2002, Importance des systèmes agroforestiers dans la production de café en Amérique central et au Mexique, *Plantations, recherche, développement*, Mai 2002, 9p.
- Van Oijen M., Dausat J., Harmand J.M., Lawnon G., Vaast P., 2009, Coffee agroforestry systems in Central America: I. A review of quantitative information on physiological and ecological processes, *Agroforest Systems* (2010) 80:341–359.
- Zuluaga Peláez, J.J., 2004, *Dinámica de la materia orgánica del suelo en sistemas agroforestales de café con Erythrina poeppigiana ((Walpers))* O.F. Cook en Costa Rica, *Magister Scientiae*, Turrialba, Costa Rica.
- Wakida, F.T., Lerner, D.N., 2005. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study, *Water Res.* 39, 3–16.
- Weaver R.W. et al., 1994, *Methods of soil analysis*, Soil Science Society of America Inc.

Annexes

Mes Nivel Insumo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
MC Ntotal= 150,3 (Kg/ha/año) K ₂ Ototal= 75 (Kg/ha/año)		Control Enfermedades (Roya)	FOLIAR (B, Zn)+ Control Enfermedades y plagas	Control Enfermedades	SUELO Formula Completa 18-5-15-6-2 50g/cafeto (45 kgN/ha)	Control Enfermedades (Roya)		SUELO Formula Completa 18-5-15-6-2 50g/cafeto (45 kgN/ha)				SUELO Nutran(nitrato amonio) 36g/cafeto 60,3 kgN/ha
BO Ntotal= (Kg/ha/año) *K ₂ O total= (Kg/ha/año)		Control Enfermedades (Roya)	SUELO Broza 1kg /cafeto (5 ton/ha soit 130kgN environ)	Control Enfermedades (Roya)		Beauveria Control Enfermedades (Roya)						

Nota: * El Potasio de las fuentes de Broza y Gallinaza se multiplica por 1,2 para tener una idea del aporte en K₂O y compararlo con los convencionales.

Annexe 1: Calendrier des pratiques agricoles dans l'essai

Row Labels	Average of biomasse feuille (g)	Average of biomasse rameaux	Average of biomasse cep	Average of biomasse caféier
SMC	164,31	470,30	1451,08	2085,69
CMC	81,48	184,16	999,62	1265,26
EMC	168,38	353,05	1375,96	1897,39
TMC	81,90	157,03	1120,08	1359,01
EBO	122,54	179,26	1152,25	1454,05
TBO	9,59	57,79	620,68	688,06

Annexe 2 : Biomasse des trois compartiments par parcelle étudiée

Row Labels	Average of Nf(%)	Average of Nb	Average of Nc	Average of Cf(%)	Average of Cb	Average of Cc
SMC	2,94	0,98	1,55	48,60	48,20	48,18
CMC	3,02	1,15	1,52	47,98	47,91	47,64
EMC	3,11	1,05	1,26	48,16	47,21	52,04
TMC	2,70	1,04	0,98	48,38	47,91	47,59
EBO	2,67	1,39	1,47	49,11	47,18	47,56
TBO	2,09	1,01	1,44	48,49	48,97	48,18

Annexe 3 : Teneur en azote et carbone des trois compartiments par parcelle étudiée

Row Labels	Average of N-mass branches	Average of N-mass cep	Average of N-mass total	Average of N-mass feuilles
SMC	4,58	22,58	32,05	4,89
CMC	2,10	15,22	19,77	2,46
EMC	3,71	17,72	26,62	5,18
TMC	1,61	11,06	14,84	2,17
EBO	2,42	17,47	23,49	3,59
TBO	0,58	8,84	9,64	0,21

Annexe 4 : Minéralomasse (C:N) en azote des trois compartiments par parcelle étudiée

Average of d15N (air-corrected)	StdDev of d15N (air-corrected)	Min of d15N (air-corrected)	Max of d15N (air-corrected)	n	transfert source 1000pm	transfert source 1300pm	transfert source Ermax	Mois	species	matériel	âge	distance to tree	date
7,60	#DIV/0!	7,60	7,60	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Erythrina	branches	(blank)	0	26/02/2013
1453,37	1866,88	133,28	2773,45	2	145,6837%	111,8668%	361,4939%	mars	Erythrina	branches	(blank)	0	27/03/2013
392,14	192,63	255,93	528,36	2	38,7491%	29,7544%	96,1505%	juin	Erythrina	branches	(blank)	0	21/06/2013
3,78	#DIV/0!	3,78	3,78	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Erythrina	feuilles	old	0	26/02/2013
594,91	492,85	73,87	1262,18	4	59,3371%	45,6040%	146,4053%	février	Erythrina	feuilles	old	0	27/02/2013
673,27	481,21	55,25	1148,23	4	67,2031%	51,6495%	165,8135%	février	Erythrina	feuilles	old	0	28/02/2013
526,03	502,41	69,31	1198,05	4	52,4233%	40,2903%	129,3465%	mars	Erythrina	feuilles	old	0	01/03/2013
503,13	460,94	52,21	953,10	4	50,1247%	38,5237%	123,6751%	mars	Erythrina	feuilles	old	0	07/03/2013
1001,11	425,94	427,25	1440,00	4	100,1114%	76,9414%	247,0098%	mars	Erythrina	feuilles	old	0	13/03/2013
335,06	332,20	62,24	797,97	4	33,2542%	25,5578%	82,0497%	mars	Erythrina	feuilles	old	0	20/03/2013
1026,84	480,72	393,21	1470,23	4	102,6942%	78,9264%	253,3823%	mars	Erythrina	feuilles	old	0	27/03/2013
749,93	533,73	196,03	1324,66	4	74,8979%	57,5634%	184,7993%	mai	Erythrina	feuilles	old	0	22/05/2013
309,67	245,61	135,35	656,62	4	30,7051%	23,5987%	75,7602%	juin	Erythrina	feuilles	old	0	21/06/2013
14,51	#DIV/0!	14,51	14,51	1	1,0768%	0,8276%	2,6568%	février	Erythrina	feuilles	young	0	26/02/2013
780,53	358,51	408,56	1128,89	4	77,9695%	59,9241%	192,3778%	février	Erythrina	feuilles	young	0	27/02/2013
1024,13	768,39	328,46	2121,86	4	102,4222%	78,7174%	252,7113%	février	Erythrina	feuilles	young	0	28/02/2013
717,29	496,63	217,60	1185,36	4	71,6213%	55,0452%	176,7148%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	01/03/2013
1290,48	118,77	1223,64	1468,25	4	129,1580%	99,2655%	318,6779%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	04/03/2013
679,42	807,70	126,79	1851,78	4	67,8202%	52,1238%	167,3360%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	07/03/2013
856,53	638,12	191,48	1552,79	4	85,5983%	65,7873%	211,2009%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	13/03/2013
809,45	850,70	172,62	2039,53	4	80,8728%	62,1555%	199,5414%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	20/03/2013
767,79	504,14	204,70	1423,11	4	76,6910%	58,9415%	189,2235%	mars	Erythrina	feuilles	young	0	27/03/2013

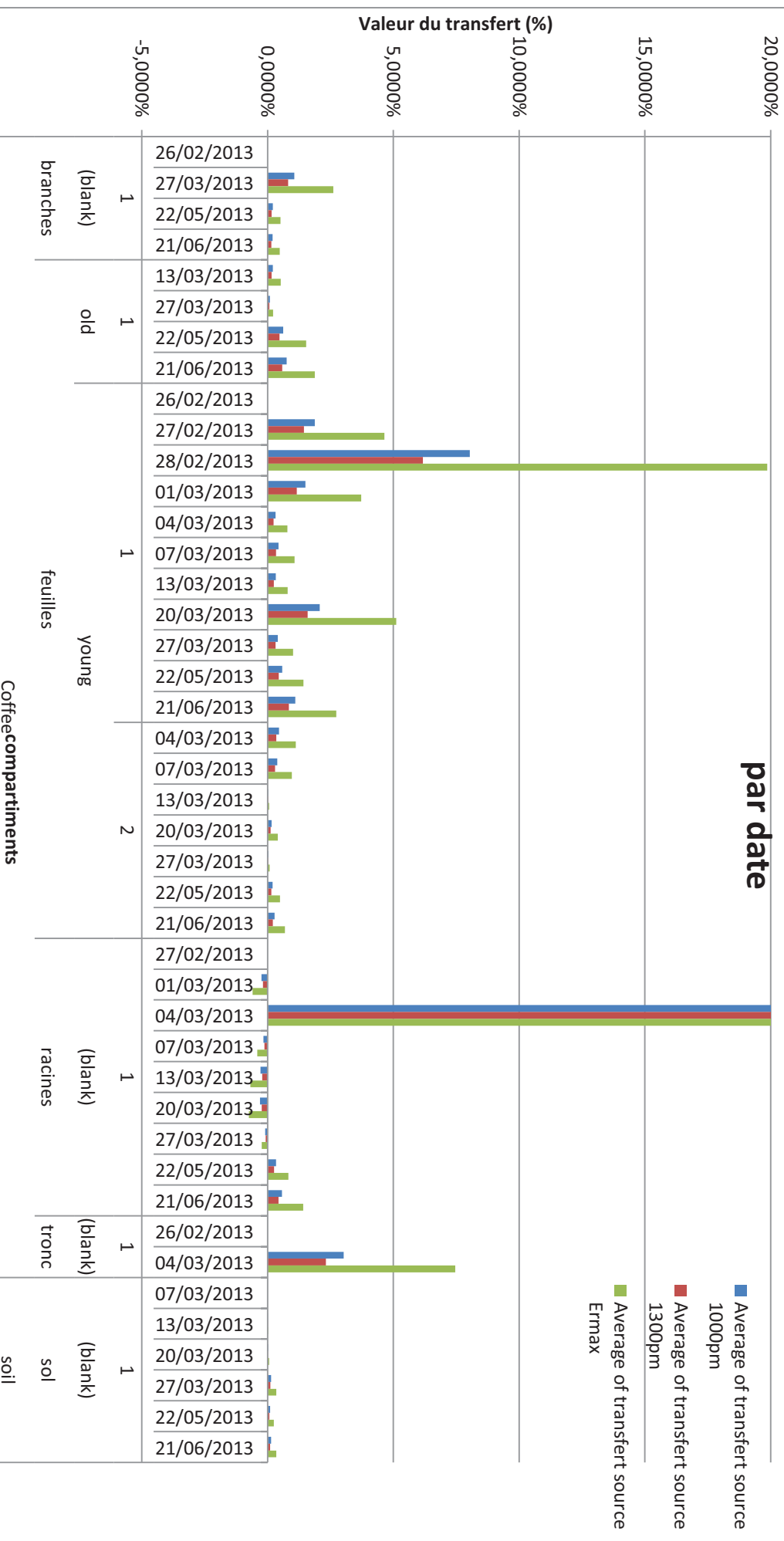
597,31	532,91	150,97	1274,75	4	59,5785%	45,7895%	147,0009%	mai	Erythrina	feuilles	young	0	22/05/2013
109,75	90,56	57,93	245,40	4	10,6372%	8,1753%	26,2457%	juin	Erythrina	feuilles	young	0	21/06/2013
3,65	0,32	3,43	3,88	2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Erythrina	racines	(blank)	0	26/02/2013
1,43	#DIV/0!	1,43	1,43	1	-0,2231%	-0,1715%	-0,5503%	février	Erythrina	racines	(blank)	0	27/02/2013
407,54	451,20	88,49	726,58	2	40,5364%	31,1555%	99,9991%	mars	Erythrina	racines	(blank)	0	01/03/2013
2,22	#DIV/0!	2,22	2,22	1	-0,1441%	-0,1107%	-0,3554%	mars	Erythrina	racines	(blank)	0	13/03/2013
30,07	#DIV/0!	30,07	30,07	1	2,6515%	2,0379%	6,5409%	mars	Erythrina	racines	(blank)	0	27/03/2013
13,75	#DIV/0!	13,75	13,75	1	1,0136%	0,7791%	2,5006%	juin	Erythrina	racines	(blank)	0	21/06/2013
5,53	#DIV/0!	5,53	5,53	1	0,1887%	0,1450%	0,4654%	mars	Erythrina	racines	(blank)	1	20/03/2013
4,56	#DIV/0!	4,56	4,56	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Erythrina	tronc	(blank)	0	26/02/2013
347,94	482,91	6,47	689,41	2	34,4955%	26,5070%	85,2111%	mars	Erythrina	tronc	(blank)	0	01/03/2013
317,28	#DIV/0!	317,28	317,28	1	31,4148%	24,1397%	77,6011%	juin	Erythrina	tronc	(blank)	0	21/06/2013
3,82	#DIV/0!	3,82	3,82	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Coffee	branches	(blank)	1	26/02/2013
14,38	10,85	5,88	29,98	4	1,0598%	0,8145%	2,6151%	mars	Coffee	branches	(blank)	1	27/03/2013
5,89	1,58	4,52	8,03	4	0,2080%	0,1599%	0,5132%	mai	Coffee	branches	(blank)	1	22/05/2013
5,77	0,83	4,65	6,60	4	0,1963%	0,1509%	0,4843%	juin	Coffee	branches	(blank)	1	21/06/2013
6,78	1,67	5,14	9,05	4	0,2127%	0,1635%	0,5256%	mars	Coffee	feuilles	old	1	13/03/2013
5,55	0,99	4,79	6,98	4	0,0897%	0,0689%	0,2215%	mars	Coffee	feuilles	old	1	27/03/2013
10,84	6,73	5,74	18,47	3	0,6209%	0,4771%	1,5340%	mai	Coffee	feuilles	old	1	22/05/2013
12,21	6,23	8,03	21,33	4	0,7586%	0,5829%	1,8741%	juin	Coffee	feuilles	old	1	21/06/2013
4,66	0,72	4,15	5,17	2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Coffee	feuilles	young	1	26/02/2013
23,36	12,97	8,13	34,99	4	1,8784%	1,4434%	4,6408%	février	Coffee	feuilles	young	1	27/02/2013
84,70	105,78	7,64	237,79	4	8,0414%	6,1790%	19,8667%	février	Coffee	feuilles	young	1	28/02/2013
19,66	11,02	8,65	29,26	4	1,5068%	1,1579%	3,7227%	mars	Coffee	feuilles	young	1	01/03/2013
7,83	2,80	4,89	12,74	6	0,3186%	0,2448%	0,7872%	mars	Coffee	feuilles	young	1	04/03/2013

9,00	2,53	6,76	11,74	3	0,4357%	0,3348%	1,0765%	mars	Coffee	feuilles	young	1	07/03/2013
7,88	4,10	5,16	13,97	4	0,3240%	0,2489%	0,8004%	mars	Coffee	feuilles	young	1	13/03/2013
25,28	13,80	12,86	42,12	4	2,0720%	1,5921%	5,1189%	mars	Coffee	feuilles	young	1	20/03/2013
8,75	3,37	6,41	13,73	4	0,4113%	0,3160%	1,0161%	mars	Coffee	feuilles	young	1	27/03/2013
10,42	2,80	7,85	13,15	4	0,5791%	0,4450%	1,4306%	mai	Coffee	feuilles	young	1	22/05/2013
15,68	4,88	11,72	21,92	4	1,1074%	0,8510%	2,7360%	juin	Coffee	feuilles	young	1	21/06/2013
9,19	1,16	7,92	10,59	4	0,4548%	0,3494%	1,1235%	mars	Coffee	feuilles	young	2	04/03/2013
8,54	0,83	8,00	9,76	4	0,3904%	0,3000%	0,9646%	mars	Coffee	feuilles	young	2	07/03/2013
4,93	0,83	4,16	5,96	4	0,0273%	0,0210%	0,0675%	mars	Coffee	feuilles	young	2	13/03/2013
6,29	1,15	4,86	7,68	4	0,1635%	0,1256%	0,4039%	mars	Coffee	feuilles	young	2	20/03/2013
5,01	1,14	4,07	6,66	4	0,0349%	0,0268%	0,0862%	mars	Coffee	feuilles	young	2	27/03/2013
6,64	4,10	4,40	12,80	4	0,1994%	0,1532%	0,4927%	mai	Coffee	feuilles	young	2	22/05/2013
7,43	1,52	6,07	8,94	4	0,2781%	0,2137%	0,6870%	juin	Coffee	feuilles	young	2	21/06/2013
11,18	6,08	7,59	20,25	4	0,6551%	0,5034%	1,6184%	juin	Coffee	fruits	(blank)	1	21/06/2013
4,54	1,72	3,54	6,53	3	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Coffee	racines	(blank)	1	27/02/2013
2,16	1,14	1,48	3,86	4	-0,2387%	-0,1834%	-0,5896%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	01/03/2013
387,49	395,14	14,95	1034,04	8	38,4703%	29,5615%	95,0259%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	04/03/2013
2,91	1,49	1,66	5,02	4	-0,1638%	-0,1258%	-0,4045%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	07/03/2013
1,78	1,02	0,67	2,94	4	-0,2767%	-0,2126%	-0,6834%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	13/03/2013
1,56	1,00	0,70	2,75	4	-0,2986%	-0,2295%	-0,7376%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	20/03/2013
3,60	3,29	1,32	8,37	4	-0,0936%	-0,0720%	-0,2313%	mars	Coffee	racines	(blank)	1	27/03/2013
7,86	5,38	1,42	13,50	4	0,3338%	0,2565%	0,8246%	mai	Coffee	racines	(blank)	1	22/05/2013
10,25	5,20	5,88	17,65	4	0,5739%	0,4410%	1,4177%	juin	Coffee	racines	(blank)	1	21/06/2013
3,41	#DIV/0!	3,41	3,41	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	février	Coffee	tronc	(blank)	1	26/02/2013
33,55	56,93	4,59	118,95	4	3,0249%	2,3250%	7,4593%	mars	Coffee	tronc	(blank)	1	04/03/2013

6,85	0,56	6,26	7,42	4	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	mars	soil	sol	(blank)	1	07/03/2013
6,96	0,26	6,72	7,31	4	0,0109%	0,0083%	0,0269%	0,0269%	mars	soil	sol	(blank)	1	13/03/2013
7,08	0,92	6,01	8,02	4	0,0237%	0,0182%	0,0587%	0,0587%	mars	soil	sol	(blank)	1	20/03/2013
8,25	1,35	6,84	10,00	4	0,1415%	0,1087%	0,3508%	0,3508%	mars	soil	sol	(blank)	1	27/03/2013
7,84	0,64	7,34	8,78	4	0,0996%	0,0765%	0,2468%	0,2468%	mai	soil	sol	(blank)	1	22/05/2013
8,23	0,28	7,84	8,50	4	0,1391%	0,1069%	0,3448%	0,3448%	juin	soil	sol	(blank)	1	21/06/2013

Annexe 5 : Tableau d'analyse des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ et de transferts

Valeurs de transferts de 15N dans les compartiments du caféier



Annexe 6. Valeurs de transferts par date d'analyse dans les différents compartiments



BARAËR, Titouan, 2013, Déterminants du cycle de l'azote dans quelques systèmes agroforestiers caféiers au Costa Rica, minéralisation des sols et transferts d'azote, 36 pages de contenu, Clermont-Ferrand, 2013.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ♦ Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)
- ♦ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : VAN DEN MEERSCHE Karel (Cirad)
- ♦ Tuteur Cirad : HARMAND Jean-Michel (Cirad)
- ♦ Tuteur pédagogique : VASSAL-COURTAILLAC Nathalie (Vetagro Sup)

OPTION : Agronomie, Productions Végétales, Environnement

RESUMÉ

Une remise en question de la durabilité des systèmes de monoculture caféières ont poussé à l'étude avancée des systèmes agroforestiers. La compréhension des processus régissant le cycle de l'azote (N) en leur sein est un facteur clé pour leur durabilité.

La présente étude porte sur deux aspects :

1) Analyse explicative du taux de minéralisation, de la minéralomasse aérienne des caféiers et de la colonisation racinaire de sols permutés dans six parcelles (peuplements) de caféiers à Turrialba (Costa Rica). Ces systèmes diffèrent par l'arbre d'ombrage (*Terminalia amazonia*, *Erythrina poeppigiana* et *Abarema idiopoda*, aucun) et le mode de gestion agronomique (organique ou conventionnel).

Les rendements, corrélés aux biomasses caféières et aux minéralomasses, ne sont pas expliqués par les taux de minéralisation. Ces derniers sont en partie dépendants de l'arbre d'ombrage et/ou du mode de gestion agronomique. L'explication multi-variable des taux est une piste d'avenir.

2) Expérimentation d'une méthode d'identification des flux d'azote dans les associations Érythrine (*Erythrina poeppigiana*) et caféier (*Coffea arabica* var. *caturra*) via le marquage de la plante fixatrice au ^{15}N .

Après marquage au ^{15}N -nitrate du tronc de l'Érythrine (1 g ^{15}N), un signal fort a été observé dans le houppier. Le marquage des racines est plus incertain. Les sols et les caféiers présentent des valeurs de transfert depuis l'arbre d'ombrage faibles, démontrant l'existence d'un flux entre l'arbre et le caféier. Aussi, cette technique de marquage est réalisable pour obtenir des résidus de branches et feuilles dont on pourra suivre le devenir de l'azote après leur décomposition.

Mots clés : Minéralisation, marquage ^{15}N , agroforesterie, *Coffea arabica*, *Erythrina poeppigiana*, azote, Costa Rica