

## Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur  
Option : Élevage en Milieux Difficiles

### Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal



Par  
Guylain GRANGE

Organisme d'accueil :  
CIRAD - UMR SELMET

Année de soutenance : 2015



# Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur  
Option : Élevage en Milieux Difficiles

## Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal



Par  
Guylain GRANGE

Année de soutenance : 2015

Mémoire préparé sous la direction de :  
Charles-Henri MOULIN

Présenté le : 23 Septembre 2015

Devant le jury :

Présidente : Danièle MONTAGNAC

Rapporteur principal : Eric VALL (CIRAD –  
UMR SELMET)

Rapporteur enseignant : François BOCQUIER

Maître de stage : Jonathan VAYSSIÈRES

Tuteur-enseignant : Charles-Henri MOULIN

Organisme d'accueil : Centre  
International de Recherche  
agronomique pour le Développement

Maîtres de stage :

Jonathan VAYSSIÈRES

Bocar THIAM

## RESUME

### **Titre: Suivi du cycle de l'azote en fermes réelles : Cas des systèmes agropastoraux du bassin arachidier du Sénégal**

L'azote (N) est un des facteurs les plus limitants en systèmes agriculture-élevage en Afrique de l'Ouest. Cette étude présente les premiers résultats d'une analyse du cycle de l'N en systèmes mixtes intégrant l'élevage de zébu et la culture du mil dans le bassin arachidier du Sénégal. L'ensemble des flux d'N ont pu être reconstitués dans le cadre d'un suivi fin de 4 fermes réelles sur la période de mars à août 2015. L'étude en fermes réelles sous-entend un suivi de systèmes existants, reproduisant les pratiques des agro-éleveurs, contrairement aux suivis en station expérimentale.

Le dispositif mis en place vise la comparaison de trois systèmes i) un système traditionnel (SysT) basé sur la divagation diurne des troupeaux et le parcage nocturne des animaux sur les champs de mil, ii) un système intensif (SysI) où les animaux sont embouchés à la concession à base d'aliments concentrés avec production de fumier en vue d'une fertilisation du mil et iii) un système intensif amélioré (SysIA) correspondant au précédent mais comportant des pratiques visant une meilleure conservation des nutriments au cours du cycle (bâchage et enfouissement du fumier). Le suivi a permis de comparer les entrées et sorties d'N de chaque étape du cycle de production (Animal, Fumier, Sol-Plante). Trois indicateurs sont calculés à chacune des étapes du cycle et pour l'ensemble du cycle : i) l'efficacité agronomique (ENA) ou taux de recyclage, ii) l'efficacité comestible (ENC) ou taux d'exportation, et enfin l'efficacité azotée globale (ENG) qui correspond à la somme des deux.

En SysT l'étape Animal est caractérisée par une très forte ENA (155%) associée à une ENC négative du fait de l'amaigrissement des animaux en saison sèche. Les SysI et SysIA présentent au contraire une ENC de +19% correspondant au gain de poids important dans ces systèmes. L'étape Fumier (qui n'existe pas en SysT) présente des pertes gazeuses importantes qui limitent l'ENA à 61% en SysI. Cependant, le bâchage du tas permet d'obtenir une ENA de 76% en SysIA. La capacité des plantes à mobiliser les ressources en N du sol expliquent des ENG supérieures à 100% pour l'étape Sol-plante (172 et 191% en SysT et SysIA respectivement). L'enfouissement du fumier testé en SysIA permet en moyenne de multiplier par 3,6 l'efficacité de l'apport de fumier (par rapport au SysI).

Sur la globalité du cycle, le SysT est caractérisé par une faible ENC (24%) et une très forte ENA (209%). Le SysI montre, quant à lui, une bonne ENC (87%) mais une ENA plus limitée (61%). Enfin, le SysIA semble un bon compromis avec des ENC et ENA de 90 et 85% respectivement.

Ainsi, le SysT reste globalement le plus efficace. Cependant, le SysI est voué à se développer face à une croissance rapide des besoins en viande des grandes villes du Sénégal. Ce système occasionne des pertes importantes d'N qui peuvent être réduites de moitié environ par les pratiques améliorantes proposées en SysIA aux étapes Fumier et Sol-plante.

### **Mots clés**

Agropastoralisme, cycle des nutriments, système traditionnel, embouche, intensification écologique, zébu, mil.

## ABSTRACT

### **Title: On-farm monitoring of the nitrogen cycle: the case of agro-pastoral systems in the Senegalese groundnut basin**

Nitrogen (N) is one of the most limiting factors in West African crop-livestock systems. This study shows the first results of N cycling analysis in systems integrating zebu breeding and pearl millet growing in the Senegalese groundnut basin. The whole N flows have been reconstituted thanks to a four farms monitoring on the march – august period in 2015. On-farm monitoring means that existing systems, based on local practices, have been studied unlike on-station experimentations.

The goal of the study device is to compare three systems i) a traditional one (SysT) based on day free-grazing and night corralling on millet fields, ii) an intensive system (SysI) where cattle is fattened in barns on the basis of feed concentrates, producing solid manure used to fertilize millet crops and iii) an improved intensive system (SysIA) corresponding to the previous one but with additional practices aiming a better nutrient (manure covering and in-soil manure incorporation). The study allows to compare N inflows and outflows at each step of the production cycle (Animal, Manure and Soil-Crop steps). Three indicators are calculated at each cycle step and for the whole cycle: i) the agronomic N use efficiency (ENA) or the recycling rate, ii) the edible N use efficiency (ENC) or the exportation rate and iii) the global N use efficiency (ENG) which is the sum of the previous two ones.

For the SysT, Animal step is characterized by a very high ENA (155%) linked with a negative ENC because of the loss of livestock body weight during the dry season. On the contrary, SysI and SysIA show an ENC of +19% related to an important body weight gain in these systems. The Manure step (which not exists in SysT) shows important gaseous loses, limiting ENA at 61% for SysI. Manure covering leads to an ENA of 76% for SysIA. Plant ability to mobilise soil N resources is source of an ENG higher than 100% for the Soil-Crop step (172 and 191% for SysT and SysIA respectively). Manure incorporation, tested in SysIA allows to multiply by 3.6 manure effectiveness (compared to SysI).

About the whole N cycle, SysT have shown a low ENC (24%) but a high ENA (209%). Otherwise, SysI proved a high ENC (87%) but a limited ENA (61%). Finally, SysIA appears as a good compromise with ENC and ENA of 90 and 85% respectively.

Overall, SysT stays the most efficient. However in next decades, an extension of SysI is expected to face the growing meat demand in Senegalese large cities. This system causes important N loses to the environment which can be mitigated by improved practices proposed in SysIA at the Manure and Soil-Crop steps.

### **Key words**

Agro-pastoralism, nutrients cycling, traditional system, fattening, ecological intensification, ruminants, dry cereals.

## REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je voudrais remercier la famille Faye et plus particulièrement Fatou. Vous m'avez accueilli comme un fils de la concession ; la larme que je verserai en partant du Sénégal sera pour vous. Merci pour votre teranga, les enseignements d'Aïssatou, l'éducation religieuse d'Idrissa, la joie de vivre de Kumba, la patience d'Hélène et toutes les choses partagées avec les autres membres de cette famille au grand cœur.

Un merci plus formel mais au moins aussi reconnaissant à Jonathan, un maître de stage comme on en fait peu. Tu as su me motiver et me guider afin que je donne le meilleur de moi-même et m'a soutenu jusqu'au bout dans ce travail. Si je projette de poursuivre ma vie dans la recherche, c'est en grande partie grâce à toi.

Un grand merci à Philippe Lecomte qui a eu la générosité de me consacrer de son temps si précieux, ce mémoire n'aurait pas été le même sans ton coup de pouce.

Je voudrais remercier Moussa Traoré et Coly Wade pour leur générosité à la tâche et leur bonne humeur permanente qui ont transformé ces pénibles phases de terrain en agréable moment de travail entre amis. Puissent vos parcours être à la hauteur de vos engagements.

Merci également à toute l'équipe du LNERV mais surtout à Adja Rokhaya qui a dédié tant d'énergie pour que je puisse avoir des résultats exploitables, ton investissement et ta rigueur son impressionnants.

Les paysans et leurs familles méritent également un grand merci pour leur patience et leur coopération. N'oublions pas que sans eux, ce travail n'aurait jamais pu se faire. Un clin d'œil particulier à Saliou Ndiaye pour la profondeur de nos échanges malgré la barrière de la langue, qu'Allah veille sur ta famille et sur ton petit fils à qui tu as donné mon nom. C'est un geste que je ne suis pas près d'oublier.

En particulier, merci à Charles-Henri Moulin, François Bocquier, Philippe Lecomte, Christian Corniaux et aux chercheurs de SELMET que j'ai eu la chance de rencontrer pour votre passion et vos compétences associées à votre sympathie : on ne peut que vous admirer.

Merci au corps enseignant et administratif de Montpellier SupAgro et de VetAgro Sup qui m'ont permis de découvrir deux institutions, leurs compétences et leurs visions et m'ont inculqué les bases de mon futur métier. Merci de même aux professeurs des universités fédérales de Santa Catarina et du Reconcavô da Bahia pour l'ouverture internationale de mon parcours scolaire.

Enfin, merci à tous ces gens qui comptent énormément pour moi et me permettent d'être chaque jour le plus heureux du monde. En premier lieu je pense à ma famille à qui je dis trop peu combien je l'aime ; puis à mes amis, merci à la coloc du 36 pour cette chouette année à Montpellier, merci à José pour ta connerie qui me rend nostalgique de nos années clermontoises, merci aux cibeinois, merci à Sambaobab, au Gang'ouf, à Bacana et à toute les batucada dont j'ai pu croiser la route dans différents pays : autant dire que le samba ça rapproche !

## SIGLES ET ACRONYMES

CERAAS : centre d'étude régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse  
CIRAD : centre de coopération internationale pour l'agriculture et le développement  
EFEFEACES : élevage, fertilité des sols et économie des fermes agriculture-élevage sous contraintes climatiques et environnementales au Sénégal  
ENA / ENC : efficacité azotée agronomique / comestible  
kg / g : kilogramme / gramme  
ha : hectare  
IRD : institut pour la recherche et le développement  
ISRA : institut sénégalais de recherche agronomique  
MB / MS : matière brute / matière sèche  
Nac : azote contenu dans les aliments concentrés  
NB : azote fécal  
Ncroît : azote stocké (ou déstocké) dans les tissus de l'animal.  
NE : azote excrété  
NF : azote dans le fumier mûre  
Nfour : azote contenu dans les fourrages  
NG : azote contenu dans les grains de mil  
NI : azote ingéré  
NP<sub>A</sub> / NP<sub>R</sub> : azote des pailles de mil dans l'alimentation / récolte  
NR : azote dans les refus ajoutés au fumier  
NU : azote urinaire  
PV : poids vif  
rdt : rendement  
SS : saison sèche  
SP : saison des pluies  
UBT : unité bovin tropical (= un bovin de 250 kg)

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Source : FAO <a href="http://www.fao.org/docrep/t4650t/t4650T06.gif">http://www.fao.org/docrep/t4650t/t4650T06.gif</a> ) .....	3
Figure 2 : Organisation du cycle de l'azote en 3 étapes .....	4
Figure 3 : Principaux flux d'azotes dans les systèmes étudiés .....	5
Figure 4 : Prélèvements sur tas de fumier pour analyse.....	9
Figure 5 : Teneur en azote des principaux produits circulants selon la littérature (moyenne, minimum et maximum (Liste des références en Annexe 1).....	10
Figure 6 : Proportion de l'azote urinaire (NU) dans l'azote excrété (NE) en fonction de la quantité d'azote ingéré (NI) par UBT .....	10
Figure 7 : Flux d'azote en SysT - cycle complet. ....	13
Figure 8 : Flux d'azote en SysI et SysIA – cycle complet.....	13
Figure 9 : Entrées et sorties quotidiennes d'azote par UBT en SysT en saison sèche.....	14
Figure 10 : Entrées et sorties quotidiennes d'azote par UBT en SysI .....	15
Figure 11 : Rendements en grain des parcelles expérimentales suivant les différents systèmes .....	17
Figure 12: Rendements en paille des parcelles expérimentales suivant les différents systèmes .....	17
Figure 13 : Efficience <b>comestible</b> dans les différents systèmes étudiés .....	17
Figure 14 : Efficience <b>agronomique</b> dans les différents systèmes étudiés .....	17
Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré (Références en Annexe 2) .	20

**En couverture (en haut)** : troupeau de Ndep Marone divagant sur des anciennes cultures (juin 2015)

**En couverture (en bas)** : Animaux de Saliou Ndiaye à l'embouche dans la concession (mai 2015)

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques de la « ferme moyenne ».....	3
Tableau 2 : Apports de fertilisant : "essai parcage" (SysT). ....	8
Tableau 3 : Apports de fertilisants : "essai fumier" (SysI et SysIA).....	8
Tableau 4 : Bilan de l'étape Animal .....	11
Tableau 5 : Entrées et Sorties de l'étape Animal - Résultats des suivis de mars à juillet 2015	14
Tableau 6 : Entrées et sorties de l'étape Fumier – Résultats de la campagne de 2015 .....	15
Tableau 7 : Calcul des efficacités et des rendements espérés pour la « ferme moyenne » .....	16
Tableau 8 : Equations de régression des efficacités azotées pour l'étape Sol-Plante en fonction de l'apport azoté.....	18
Tableau 9 : Calculs des efficacités globales à l'échelle de la « ferme moyenne » .....	19
Tableau 10 : Quantité d'apports nécessaire pour doubler le rendement du témoin .....	23



## TABLE DES MATIERES

Avant-Propos.....	xi
1. Introduction.....	1
2. Matériel et Méthode.....	3
2.1. Zone d'étude.....	3
2.2. Model conceptuel .....	4
2.2.1. Le cycle de l'azote et ses 3 étapes .....	4
2.2.2. Les 3 systèmes type étudiés (2 observés + 1 alternatif).....	4
2.3. Méthodes de suivi.....	5
2.3.1. Dispositif en fermes réelles .....	6
Etape Animal .....	6
Etape Fumier .....	6
Etape Sol-Plante .....	6
2.3.2. Quantification des flux de biomasse.....	6
Etape Animal .....	7
Etape Fumier .....	7
Etape Sol-Plante .....	8
2.3.3. Des flux de biomasse aux flux d'azote .....	9
Echantillonnage .....	9
Analyses pour déterminer les taux de matière sèche (TMS) et taux d'azote (TN) .	9
Cas particulier de l'azote urinaire.....	10
2.3.4. Calcul des indicateurs .....	11
Etape Animal .....	11
Etape Fumier .....	12
Etape Sol-Plante .....	12
Bilan cycle complet .....	12
3. Résultats.....	14
3.1. Animal .....	14
3.1.1. Système Traditionnel.....	14
3.1.2. Système Intensif et intensif amélioré.....	15
3.2. Fumier .....	15

3.3.	Sol-Plante .....	16
3.3.1.	Influence des techniques de fumure sur les rendements du mil .....	16
3.3.2.	Efficience azotée à l'étape Sol-Plante .....	17
3.4.	Echelle globale de l'exploitation : Application à la « ferme moyenne » .....	18
4.	Discussion .....	20
4.1.	Etape Animal : Des systèmes aux antipodes .....	20
4.1.1.	Le troupeau divagant : un vecteur de fertilisation .....	20
4.1.2.	L'embouche bovine : quand l'Homme devient le vecteur de fertilisation .....	21
4.1.3.	Des systèmes opposés mais indissociables .....	21
4.2.	L'étape fumier : comment limiter les pertes d'azote .....	21
4.3.	L'azote dans l'étape Sol-Plante .....	22
4.4.	Bilan du cycle .....	23
4.5.	Réflexion sur l'applicabilité du SysIA et les impacts économiques et sociaux ....	24
4.6.	Les limites de l'étude .....	24
4.6.1.	Les inconnues de l'étape Animal.....	24
	Saisonnalité en SysT .....	24
	Estimation de l'azote urinaire et des variations de poids .....	25
4.6.2.	Volatilisation et lixiviation aux étapes Fumier et Sol-Plante .....	25
4.6.3.	Des systèmes simplifiés .....	25
	Surfaces fourragères hors cultures .....	25
	Les autres fertilisations.....	26
4.6.4.	Perspectives : mieux comprendre les processus écologiques sous-jacents .....	26
5.	Conclusion .....	27
6.	Bibliographie .....	28

# Avant-Propos

L'étude réalisée dans le cadre de ce stage de fin d'étude s'inscrit dans le cadre de deux projets de recherche : i) le projet Waapp EFEFEACES<sup>1</sup>, porté par l'ISRA<sup>2</sup> en collaboration avec le CIRAD<sup>3</sup> et l'IRD<sup>4</sup>, ii) et le projet Anr CERA0<sup>5</sup>, coordonné par l'IRD en partenariat avec le CIRAD et l'ISRA (entre autres). Le stage s'est donc déroulé en coopération étroite avec l'ISRA et notamment des étudiants et laborantins du LNERV<sup>6</sup>.

Ce document a été rédigé dans l'optique d'une publication dans un journal scientifique francophone. Pour cela, sa construction et sa taille peuvent différer légèrement du format standard d'un mémoire de fin d'étude d'ingénieur.

Ainsi, le mémoire décrira entre autre la méthodologie et les résultats de l'étude réalisée lors du stage. Cependant, la courte période de réalisation ainsi que les difficultés liées au contexte local n'ont pas permis d'obtenir tous les résultats attendus.

Pour cette raison, bien que le stage ait permis de produire des données pour la campagne 2015, une partie des résultats présentés proviennent de l'année 2014. A titre d'exemple, les cultures expérimentales mises en place pendant le stage ne seront récoltées qu'en octobre 2015, soit après la soutenance. Les données présentées sont donc celles de la récolte d'octobre 2014.

De même, les suivis ayant été effectués de mars à août, ce document se restreint au contexte de la saison sèche qui correspond à la période de janvier à mi-juillet. En effet, le suivi d'août seul est insuffisant pour présenter des résultats quant à la saison des pluies, d'autant plus que l'entièreté des données de ce suivi n'est pas disponible lors de la rédaction de ce rapport.

---

<sup>1</sup> Elevage, Fertilité des sols et Economie des Fermes Agriculture-Elevage sous contraintes Climatiques et Environnementales au Sénégal

<sup>2</sup> Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

<sup>3</sup> Centre de Coopération Internationale pour l'Agriculture et le Développement

<sup>4</sup> Institut pour la Recherche et le Développement

<sup>5</sup> Projet financé par l'Agence Nationale pour la Recherche portant sur l'« auto-adaptation des agro-socio-écosystèmes tropicaux face aux changements globaux ? Etude à long terme en vue d'une intensification écologique de la production de céréales dans les zones de savanes en Afrique de l'Ouest »

<sup>6</sup> Laboratoire National d'Elevage et de Recherche Vétérinaire

# 1. Introduction

Dans un contexte de croissance démographique importante et de changement des habitudes alimentaires, la demande en produits carnés ne cesse d'augmenter dans les pays du Sud. L'Afrique de l'Ouest ne fait pas exception à cette tendance (Kamuanga et al., 2008), en particulier dans les grandes agglomérations côtières telles que Dakar (Mankor, 2009), Lagos (Osho et al., 2005), etc. On voit alors apparaître des systèmes d'élevages plus productifs en zones péri-urbaines et rurales (Vall et al., 2014 ; Gautier et al., 2014). L'émergence de l'embouche paysanne s'observe dans la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest, au Sénégal (Buldgen et al., 1993), au Burkina-Faso (Sanon et al. 2014) etc.

L'intensification se définit par rapport à un facteur de production qui peut être le travail, la terre ou le capital (Tirel, 1991). En Afrique de l'Ouest, les terres et la main d'œuvre sont monopolisées par les cultures en saison des pluies. En saison sèche la main d'œuvre masculine est libérée tandis que les animaux conduits en extensif perdent traditionnellement du poids à cause du manque de ressources fourragères. La demande en viande restant relativement stable au cours de l'année, il devient alors lucratif d'acheter des animaux maigre et des concentrés alimentaires pour les engraisser avant de les revendre à bon prix pendant la période de soudure (Diop et Diao, 2005). Ainsi, une force de travail et du capital sont investis de façon importante pour l'engraissement d'animaux, justifiant le terme d'intensification.

Dans la sous-région, les **systèmes traditionnels** sont mixtes agriculture –élevage et fortement dépendants des ressources locales (Diagana et al., 2008). Ces systèmes sont construits autour de la vaine pâture et du parcage nocturne des animaux au champ (Blanchard, 2010; Audouin, 2013, Vigan et al., 2014). Du fait d'un faible recours aux intrants, les cultures, principalement vivrières dépendent fortement des déjections animales pour leur fertilisation et ces derniers se nourrissent en grande partie des résidus de cultures, au moins au cours de la première moitié de la saison sèche (Audouin, 2013). En Afrique de l'Ouest, les systèmes traditionnels sont donc construits autour d'un recyclage important de la biomasse et des nutriments (Vigne et al., 2012 ; Bénagabou, 2015).

A l'inverse les **systèmes intensifs** basés sur l'embouche mobilisent d'avantage d'intrants, essentiellement sous forme d'aliments concentrés. L'introduction de l'embouche dans les systèmes agricoles conduit à une séparation spatio-temporelle des activités de cultures et d'élevage : garde et affouragement des animaux et stockage du fumier à la concession. Ces changements de pratiques conduisent à une modification importante du cycle de la biomasse et donc des nutriments à l'échelle du système de production, notamment en augmentant les flux de nutriments et en créant une nouvelle étape (l'étape fumier). Cette étape supplémentaire suppose des manipulations supplémentaires de la fumure organique (collecte, mise en tas puis épandage) qui sont susceptibles d'accroître les pertes de nutriments au cours du cycle (Pimentel, 1997 ; Pindozi et al., 2013 ; Darby, 2014).

Des techniques, telles que la couverture du tas de fumier (Tittonel et al., 2009) ou l'enfouissement à l'épandage (Charreau et Poulin, 1963 ; Ganry et al., 1974), permettent potentiellement de limiter ces pertes. Elles pourraient donc permettre de mieux conserver les nutriments au cours du cycle de la biomasse animal-fumier-plante (Peyraud et al., 2012 ; Vayssières et Rufino, 2012). Il semble donc théoriquement possible de concevoir des **systèmes**

**intensifs améliorés**, construits autour de l'embouche, et recyclant de façon efficiente le surplus de nutriments produits par les animaux pour fertiliser les cultures. Ces systèmes alternatifs pourraient constituer une voie d'intensification écologique des systèmes mixtes agriculture-élevage en Afrique de l'Ouest (Dugué et al., 2011).

L'objectif de cette étude est donc d'**évaluer l'intérêt potentiel d'une introduction de l'embouche bovine pour accroître la productivité et l'efficacité globale des systèmes de production mixtes agriculture-élevage**. Pour cela, nous proposons de décrire et comparer de façon quantitative les cycles de la biomasse et des nutriments dans les trois types de système de production décrits ci-dessus : le système traditionnel, le système intensif et le système intensif amélioré intégrant des techniques de conservation des nutriments.

Cette étude de cas s'intéresse aux systèmes agricoles du bassin arachidier au Sénégal, zone sahélienne à pluviométrie limitée où l'essor de l'embouche est particulièrement rapide. Cette étude se focalise sur l'azote (N). En effet, ce nutriment est reconnu comme étant un des plus limitants concernant les productions végétales et animales dans la sous-région (Piéri, 1973 ; Berger, 1996 ; Powell, 2014).

De nombreux travaux en Afrique Sub-saharienne ont déjà décrits les bilans azotés à l'échelle du système de production ( $n > 70$ ) (Schlecht and Hiernaux, 2004) et l'efficacité azoté d'une ou plusieurs étapes du cycle (animal, fumier, sol ou/et plante ;  $n > 40$ ) (Rufino et al., 2006). Mais il est difficile de mettre en cohérence ces différents travaux pour reconstituer de façon suffisamment fiable les cycles de l'N et comparer différents niveaux d'intensification étant donné la variabilité méthodologique et la grande diversité de systèmes de production, de pratiques et de contextes pédoclimatiques couverts par les études. Cette étude s'en distingue par l'approche utilisée. En effet, cette dernière est conduite en fermes réelles à l'échelle du système de production, sur la base de pesées/prélèvements/analyses, en distinguant les étapes intermédiaires du cycle : l'animal, le fumier et l'étape sol-plante. Par conséquent, elle part de données en situation réelle, intègre les contraintes locales et permet d'identifier les étapes intermédiaires les plus limitantes.

## 2. Matériel et Méthode

### 2.1. Zone d'étude

Le bassin arachidier du Sénégal est une zone agropastorale du centre ouest du pays. Elle s'étend majoritairement dans les régions de Kaolack, Fatick, Diourbel, Thiès et Louga (Figure 1). Les suivis expérimentaux ont été réalisés dans deux villages voisins : Diohine et Barry-Sine. Ils sont situés dans la région de Fatick entre les isohyètes de 500 et de 600 mm/an. Les sols sont sableux de type *Dior* sur les zones planes et dunaires (dominantes) et *Deck* dans les bas-fonds (Odru, 2013).

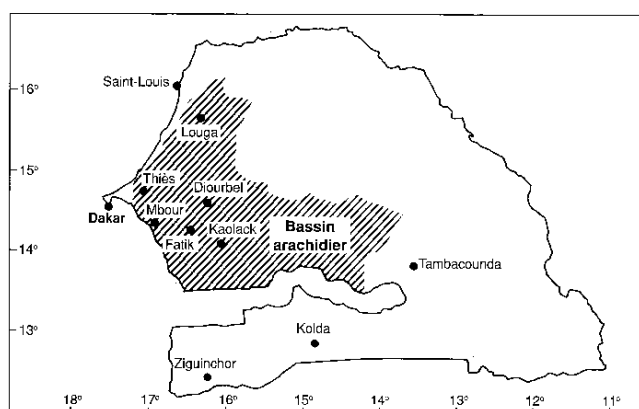


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Source : FAO <http://www.fao.org/docrep/t4650t/t4650T06.gif>)

L'agro-sylvo-pastoralisme<sup>7</sup> est l'activité largement dominante dans cette région (Lericollais, 1999). Bien que les systèmes soient très diversifiés, les troupeaux de ruminants (64% de bovins) sont majoritairement divagants et les cultures sont principalement de mil et d'arachide (60% et 24% de la surface cultivée respectivement) (Audouin, 2013). Pour faciliter l'analyse, seuls les bovins et le mil seront étudiés.

Un nouveau système d'élevage nommé embouche sera lui-aussi étudié ici et comparé au système traditionnel divagant.

En se basant sur les caractéristiques des fermes de ce territoire étudié par Audouin et Odru en 2013, une « ferme moyenne » a été définie avec des caractéristiques correspondantes à celles de la zone (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques de la « ferme moyenne »

<b>SAU par foyer (ha)</b>	4
<b>SAU fertilisée par foyer (ha)</b>	1
<b>Chargement en système divagant (UBT/ha)</b>	1
<b>Bovins engraisés en système embouche (UBT/an)</b>	3
<b>Durée moyenne d'engraissement (mois)</b>	4

<sup>7</sup> Activité agricole consistant à mêler des systèmes de cultures et d'élevage où les ligneux tiennent une place importante notamment pour l'alimentation des animaux.

## 2.2. Model conceptuel

### 2.2.1. Le cycle de l'azote et ses 3 étapes

Les relations entre les activités de cultures et d'élevage peuvent être matérialisées sous la forme d'un cycle de la biomasse et des nutriments (Figure 2). Ce cycle est composé de 3 étapes :

- L'étape Animal : les animaux ingèrent les résidus issus des cultures ainsi que d'autres aliments (fourrages et concentrés). Ces aliments qui constituent les entrées de cette étape sont ensuite digérés puis déféqués. Les sorties sont donc les déjections ainsi que le stockage d'azote dans les tissus de l'animal.
- L'étape Fumier : les bouses collectées ainsi que les refus souillés des animaux forment les entrées de cette étape tandis que les sorties seront le fumier mûre après stockage et les pertes par volatilisation principalement.
- L'étape Sol-Plante : Fertilisé par le fumier ou les déjections qui sont les entrées de cette étape, le mil produira des grains et de la paille qui seront récoltés. A ces sorties s'ajoutent les racines laissées au champ. Les pailles serviront d'alimentation pour les animaux lors de la campagne suivante, bouclant ainsi le cycle.

L'étude portant son intérêt sur le cycle complet, des indicateurs seront définis étapes par étapes puis regroupés pour conclure globalement à l'échelle de l'exploitation.

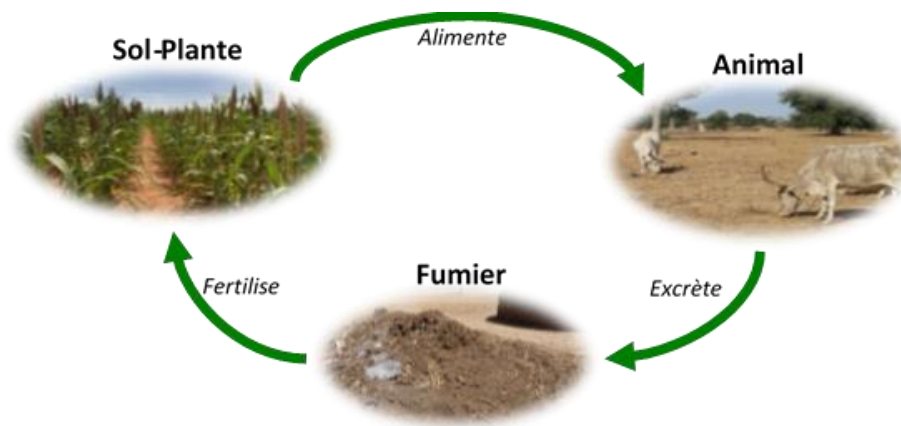


Figure 2 : Organisation du cycle de l'azote en 3 étapes

### 2.2.2. Les 3 systèmes type étudiés (2 observés + 1 alternatif)

Les 2 villages d'étude présentent des systèmes différents : tandis qu'à Diohine le système divagant est largement dominant, à Barry Sine le système d'embouche est majoritaire (Audouin, 2013). En les confrontant, cela nous permettra de s'intéresser à l'impact de ces pratiques sur le cycle de l'azote (Figure 3).

Nous comparerons donc un système dit « traditionnel » (SysT) dans le village de Diohine à un système dit « intensif » (SysI) à Barry Sine. Parallèlement, nous évaluerons l'impact de « pratiques améliorantes ». Ces dernières ont pour objectif de limiter les pertes d'azote au cours

du cycle. Ces pratiques seront appliquées sur le système intensif déjà existant pour créer un système dit « intensif amélioré » (SysIA) (Figure 3).

- En SysT l'alimentation des troupeaux se fait exclusivement sur des ressources spontanées et résidus de culture qui sont valorisés par le pâturage des animaux. Les déjections sont alors déposées directement sur les parcelles par les animaux. Ce système ne produit donc pas de fumier. L'exposition prolongée au soleil occasionne une perte qualitative des bouses et de l'urine par volatilisation et par le travail des termites (Hamon, 1972 ; Landais et Lhoste, 1993).
- En SysI, les animaux sont engraisés avec des aliments concentrés et des résidus de cultures. Ces derniers sont récoltés, stockés puis apportés aux animaux qui ne pâturent pas. Les déjections mêlées à une partie des refus (tiges de mil) sont collectées et stockées en tas de fumier avant d'être épandues sur les parcelles. Lors de la collecte des déjections une partie de l'urine est perdue. D'autres pertes sont occasionnées lors du stockage et de l'épandage car le fumier reste en plein soleil (Tittonell et al., 2009).
- Le SysIA n'est pas encore pratiqué. Il a été défini avec les agriculteurs pour limiter les pertes d'N au stockage et à l'épandage. Les « pratiques améliorantes » dont l'efficacité sera évaluée lors de l'étude sont : d'une part le bâchage du tas de fumier pour limiter les pertes lors du stockage ; et d'autre part, l'enfouissement du fumier lors de l'épandage, pour limiter les pertes par volatilisation.



Figure 3 : Principaux flux d'azotes dans les systèmes étudiés

### 2.3. Méthodes de suivi

Le suivi a été réalisé en fermes réelles avec l'objectif de rester au plus proche des conditions de production. Tout a donc été fait pour impacter au minimum les pratiques des agro-éleveurs. Les flux d'azote ont été quantifiés en deux étapes : i) mesure des flux de biomasses en matière brute (MB) et ii) conversion de ces flux de biomasse en flux d'azote.

**La contrainte de temps du stage n'a permis d'effectuer les suivis qu'en saison sèche, pour cela les résultats ne sont pas représentatifs de l'année entière.**



### 2.3.1. Dispositif en fermes réelles

L'étude en ferme réelle entend un suivi de systèmes existants en s'adaptant aux pratiques des agro-éleveurs. Contrairement aux suivis en station, cette stratégie permet d'approcher au mieux les flux réels et non ceux décidé arbitrairement dans un protocole. Deux fermes ont été choisies dans chaque système : deux fermes en SysT à Diohine et deux fermes en SysI à Barry Sine. Les expériences en SysIA seront appliquées aux fermes en SysI.

#### *Etape Animal*

Pour chaque ferme, 2 animaux ont été suivis, soit au total 4 taurillons en SysT et 1 génisse, 1 taurillon et 2 vaches en SysI. Les quantités ont été ramenées à l'UBT pour s'affranchir de la variabilité du poids des individus (de 90 à 300 kg de poids vif). Le SysIA ne présente pas de différence avec le SysI pour cette étape. Pour extrapoler à la « ferme moyenne » (Tableau 1), les quantités journalières ingérées et excrétées seront multipliées par 4 UBT x 365 jours en SysT ainsi que par 3 UBT x 120 jours en SysI et SysIA.

#### *Etape Fumier*

Le SysT ne produisant pas de fumier, seuls les 2 fermes de Barry Sine ont été suivies pour cette étape. Dans chaque ferme 2 tas ont été créés : un en plein air (SysI) et un bâché (SysIA). Chaque jour, les déjections et refus collectés ont été entreposés tantôt sur le tas bâché, tantôt sur celui en plein air.

#### *Etape Sol-Plante*

Pour l'étape Sol-Plante, une parcelle expérimentale a été mise en place pour chaque ferme dans un champ de l'agriculteur. Des champs n'ayant pas reçu de fumure organique depuis au moins 3 ans ont été choisis pour s'affranchir d'un éventuel arrière effet. Chaque parcelle compte 4 blocs expérimentaux qui correspondent à 4 répétitions. Des placettes de 25m<sup>2</sup> et des couloirs les séparant ont été tracés (Annexe 3).

Les parcelles en SysT ont été nommées « essai parcage » car la fumure a été apportée par parcage nocturne des animaux pendant des durées variables (Tableau 2). Les parcelles en SysI et SysIA ont été regroupées et nommées « essai fumier » (Tableau 3).

Les semis ont été effectués le 20 juin à une densité de 10000 poquets/ha carré soit 25 poquets par placette. La récolte ne se fera qu'en octobre 2015 soit ultérieurement à la remise du rapport. Les données utilisées sont donc celles de la récolte de 2014 avec un protocole légèrement différent (semis plus denses et quantités de fumier plus faibles).

La « ferme moyenne » (Tableau 1) ne comptant qu'un seul hectare fertilisé sur les 4 ha cultivées, seul l'hectare fertilisé sera pris en compte dans cette étude car il est le seul à recevoir des apports mesurables, de même pour les sorties.

### 2.3.2. Quantification des flux de biomasse

Comme vu précédemment, le cycle de l'azote peut se diviser en trois étapes distinctes. Les entrées et sorties de biomasse ont été quantifiées en distinguant les sorties dites « comestibles » des sorties dites « agronomiques ». Les sorties comestibles sont exportées et destinées à l'alimentation humaine. Alors que les sorties agronomiques ne sont pas consommées par l'homme et peuvent potentiellement être recyclées, i.e. utilisés à l'étape suivante.

### *Etape Animal*

Lors de l'étape Animal, les entrées de biomasse sont uniquement constituées de l'alimentation. Celle-ci peut provenir du cycle de production (paille de mil) ou être importée dans le cycle (autres fourrages et aliments concentrés). Dans cette zone, les vaches ne sont pas traitées, il n'y a donc qu'une sortie comestible (viande) et deux sorties agronomiques (bouses et urine). Les entrées et sorties de cette étape ont été mesurées lors de suivis mensuels sur la zone.

Pour le SysT, la biomasse ingérée a été quantifiée grâce à la collecte du berger<sup>8</sup> (Guérin et al., 1983-1984). Les végétaux ingérés ont ensuite été triés en 2 catégories correspondant à quatre types de ressources fourragères :

- Les pailles de mil : qu'elles soient pâturées au champ ou apportées par l'éleveur, elles constituent les entrées provenant du cycle.
- Les autres fourrages qui ne proviennent pas du cycle de production et qui sont émondés ou pâturés. Cette catégorie regroupe 3 types de ressources : les ligneux qui sont parfois des ressources collectives ; les herbacées pâturées sur tous types de surfaces (anciennes cultures, jachères, parcours et bas-fonds) et les débris : petites pailles d'herbacées et de feuilles mortes transportées par le vent dans les bas-fonds ou au pied des ligneux.

En SysI les pesées des aliments ont été effectuées matin et soir lors de la distribution des repas aux animaux. Les pailles de mil et concentrés ont été distingués.

Les déjections ont été collectées grâce à des culottes pour le SysT ou par leur ramassage immédiat en SysI. L'urine excrétée n'a pas pu être collectée, elle a donc été calculée comme développée dans le paragraphe « Cas particulier de l'azote urinaire » en partie 2.3.3.

Les animaux ont été pesés mensuellement afin de connaître leurs variations de poids vif. Cependant, un dysfonctionnement de la balance n'a pas permis d'évaluer les variations de poids avec une précision suffisante notamment en SysI. Les pesées en SysT viendront donc seulement en confirmation des résultats seulement, tandis que pour le SysI, la pertinence des résultats sera validée par les travaux de Calvet et Valenza (1973).

### *Etape Fumier*

Pour l'étape fumier, il existe deux entrées qui sont i) les déjections collectées par ratissage quotidien de l'aire où l'animal est attaché et ii) les refus d'alimentation qui consistent en des tiges de mil souillées et mélangées aux fèces.

Les sorties sont les pertes lors de la collecte des déjections qui restent en partie mêlées à la terre, puis lors du stockage du fumier par volatilisation due à l'effet du soleil et aux fermentations microbiennes.

Chaque mois, la quantité de bouse collectée et la part de refus dans le fumier a été évaluée pour obtenir les entrées. Lors de l'épandage, chaque tas a été pesé et mesuré afin de connaître les sorties. Les pertes sont estimées par défaut de bilan.

---

<sup>8</sup> La collecte du berger consiste à suivre l'animal au pâturage et à reconstituer le bol alimentaire en mimant ses bouchées à la main.

### Etape Sol-Plante

Pour l'étape Sol-Plante, l'unique entrée est la fertilisation qui peut être sous forme de bouse (par parcage en SysT) ou de fumier (SysI et SysIA). De l'engrais chimique (NPK) a aussi été apporté pour certains traitements (Tableau 2 et Tableau 3).

Les temps de parcage ont été calculés en se rapprochant au mieux des pratiques locales décrites par Odru, 2013 et Audouin, 2013. Les doses correspondantes ont été calculées en utilisant les résultats de l'étape animale de 2015 soit : parcage nocturne de 4 UBT par placette de 25m<sup>2</sup>, 11 heures/j = 1,42 tMS/ha/j pendant 4, 7 ou 15 jours.

Les doses de fumier ont été déterminées à partir d'une « dose recommandée » de 25 kgMB/25m<sup>2</sup> soit entre 6 et 9 tMS/ha en fonction du type de fumier.

Les différents traitements sont répertoriés dans les Tableau 2 et Tableau 3.

Pour cette étape, les sorties sont constituées des pertes par lixiviation et de la biomasse produite. Les pertes sont estimées par défaut de bilan. La biomasse peut être séparée en 3 parties : Les grains, les pailles et les racines. Les grains et pailles sont collectés et pesés sur l'ensemble des placettes lors de la récolte.

A défaut de pouvoir être mesurée, la quantité de racines restante sur la parcelle sera considérée égale à celle laissée l'année précédente. Ainsi, ce flux interne et régulier d'une année sur l'autre ne sera pas considéré dans les résultats.

Tableau 2 : Apports de fertilisant : "essai parcage" (SysT).

N°	Traitement	Doses		
		kgMB/25m <sup>2</sup>	tMS/ ha	kgN/ha
1	Témoin	0	0	0
2	NPK	0,1	0,04	11
3	4 jours	48	5,7	84
4	7 jours	83	9,9	146
5	7 jours + NPK	83	10,0	157
6	15 jours	178	21,3	314

*D = Dose recommandée = 25 kgMB/25m<sup>2</sup> = 10 TMB/ha ; F = Fumier non bâché ; B = Fumier Bâché ; E = Enfouissement à 10-20cm lors de l'épandage ; NPK = 4 g/poquet apportés au démarrage = 11,2 kgN/ha*

Tableau 3 : Apports de fertilisants : "essai fumier" (SysI et SysIA).

N°	Traitement	Doses	
		kgMB/25m <sup>2</sup>	kgN/ha
1	Témoin	0	0
2	0,5 D-F	12,5	32
3	0,5 D-B	12,5	35
4	0,5 D-B→E	12,5	35
5	D-F	25	65
6	D-B	25	70
7	D-F→E	25	65
8	D-B→E	25	70
9	1,5 D-F	37,5	97
10	1,5 D-B	37,5	105
11	1,5 D-B→E	37,5	105
12	D-B+NPK	25,1	102

### 2.3.3. Des flux de biomasse aux flux d'azote

Pour connaître les flux d'azote à partir de la biomasse fraîche mesurée comme expliqué dans le paragraphe précédent, il est nécessaire de connaître la teneur en matière sèche (TMS) ainsi que la teneur en azote (TN). Le flux d'azote N peut alors être obtenu à partir du flux de biomasse MB grâce à l'équation suivante :

$$N = MB \times TMS \times TN$$

Trois étapes sont nécessaires alors nécessaires :

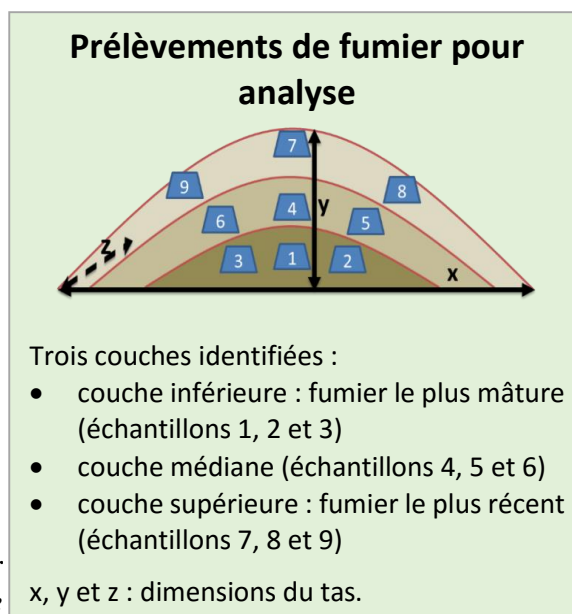
- Prélèvement d'échantillons pour analyse
- Passage à l'étuve pour obtenir la TMS
- Analyse en laboratoire pour déterminer TN

#### Echantillonnage

Les échantillons sont prélevés à chaque suivi pour l'étape animale. Lors du tri des régimes alimentaires, un échantillon de chaque type de ressource (paille de mil, ligneux, herbacées, débris) est prélevé. Les échantillons de bouses et les entrées du tas de fumier ont aussi été prélevés mensuellement.

Pour le fumier mûre, les prélèvements sont réalisés comme expliqué en Figure 4, lors de la pesée, avant l'épandage. Pour l'étape Sol-Plante, un prélèvement par traitement des pailles et grains est effectué lors de la récolte.

Figure 4 : Prélèvements sur tas de fumier pour analyse



#### Analyses pour déterminer les taux de matière sèche (TMS) et taux d'azote (TN)

Chaque échantillon prélevé est amené au LNERV de Dakar où il est passé à l'étuve à 60°C pendant 48h afin d'obtenir le TMS. Les échantillons sont ensuite broyés et divisés en deux exemplaires pour analyses simultanées au LNERV et au LEMSAT<sup>9</sup> de l'IRD. Les échantillons sont d'abord passés au spectromètre, la SPIR<sup>10</sup> (Bertrand, 2002) permettant d'obtenir une estimation des TN dans un délai plus court. La TN par analyse sera ensuite déterminée par la méthode Kjeldhal au LNERV et par la méthode du C, H, N au LEMSAT. Les résultats d'analyse serviront à confirmer et affiner les estimations de la SPIR.

<sup>9</sup> Laboratoire d'Ecologie Microbienne des Sols et Agro Systèmes Tropicaux

<sup>10</sup> La Spectroscopie Proche Infra-Rouge consiste à recueillir le spectre d'un échantillon dans une longueur d'onde donnée puis de les mettre en relief avec d'autres spectres d'échantillons dont les caractéristiques sont connues. Cela permet d'évaluer les caractéristiques d'un échantillon sans effectuer d'analyse en laboratoire.

Le court délai et les difficultés matérielles n'ont pas permis d'effectuer les analyses avant la fin du stage (sauf pour quelques échantillons de fumier). Pour cela, une revue bibliographique a été réalisée pour construire une base de donnée pouvant palier aux données manquantes. La Figure 5 rend compte des TN moyennes et de leur variation observée pour différents flux étudiés. Les TN moyennes ont été utilisées en l'absence de résultats plus précis.

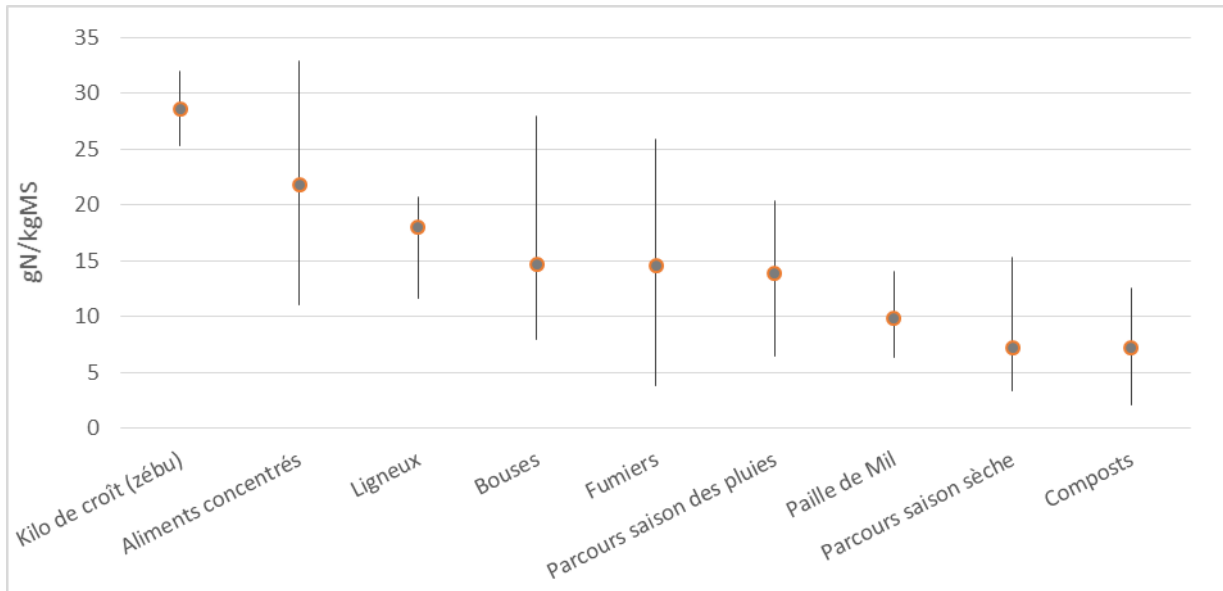


Figure 5 : Teneur en azote des principaux produits circulants selon la littérature (moyenne, minimum et maximum (Liste des références en Annexe 1 )

### Cas particulier de l'azote urinaire

N'ayant pu être mesurée, la part d'azote excrétée via l'urine a été évaluée en croisant 7 références bibliographiques, pour obtenir une équation de régression linéaire de la proportion de l'azote urinaire dans l'azote excrété en fonction de l'ingéré (Figure 6). Cela a donc permis d'évaluer NU en fonction de NI et NB grâce à la formule :

$$\frac{NU}{NE} = 0,2371 \cdot \ln(NI) - 0,6436$$

$$\text{avec } NE = NU + NB$$

Soit :

$$NU = \frac{NB(0,2371 \cdot \ln(NI) - 0,6436)}{1 - (0,2371 \cdot \ln(NI) - 0,6436)}$$

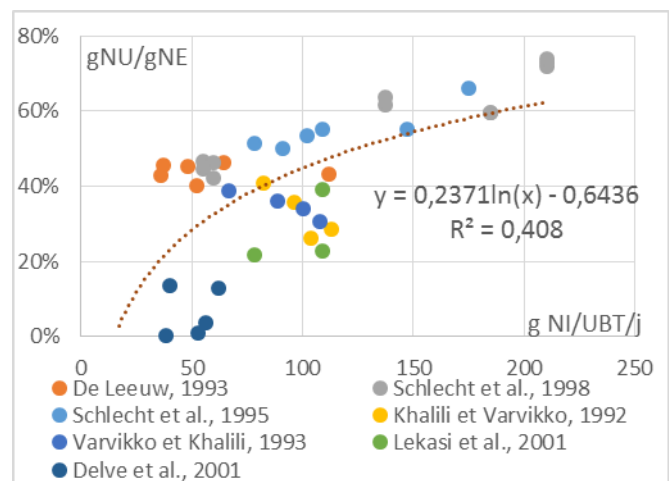


Figure 6 : Proportion de l'azote urinaire (NU) dans l'azote excrété (NE) en fonction de la quantité d'azote ingéré (NI) par UBT

### 2.3.4. Calcul des indicateurs

Connaissant les flux d'azote en entrée et en sortie de chaque étape, il a alors été possible d'établir des indicateurs à chaque étape. L'indicateur retenu est l'efficacité azotée (EN), quotient des entrées provenant du cycle divisées par les sorties « utiles ». Ces sorties peuvent être « utiles » du point de vue agronomique en apportant un flux d'azote à l'étape suivante du cycle, ou du point de vue alimentation humaine (viande ou grain). Les EN agronomiques (ENA) et comestibles (ENC) seront donc distinguées à chaque étape ainsi que sur la globalité du cycle.

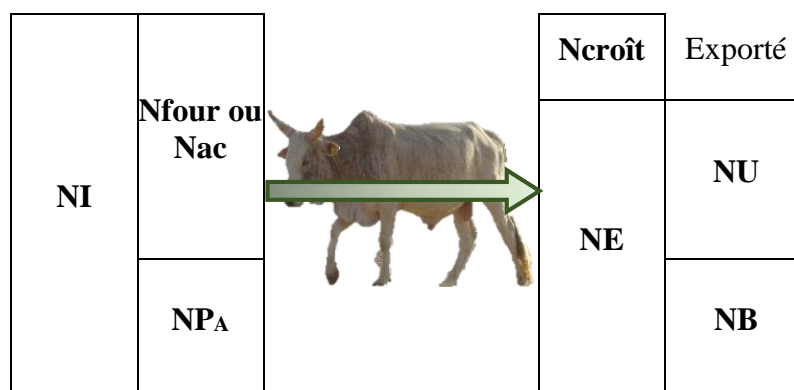
#### Etape Animal

Le Tableau 4 montre en entrée l'azote ingéré (NI) subdivisé entre les pailles de mil ( $NP_A$ ) et les fourrages et aliments concentrés (Nfour et Nac). En sortie l'azote est stocké dans les tissus de l'animal (Ncroît) ou excrété (NE). Le NE se subdivise en deux parties : l'azote urinaire (NU) et l'azote fécal (NB). Il est donc possible de calculer l'efficacité agronomique de cette étape ( $ENA_{Animal}$ ) ainsi que l'efficacité azotée comestible ( $ENC_{Animal}$ ) :

$$ENA_{Animal} = \frac{NE}{NI} = \frac{NU + NB}{NP_A + Nfour \text{ ou } Nac}$$

$$ENC_{Animal} = \frac{Ncroît}{NI} = \frac{Ncroît}{NP_A + Nfour \text{ ou } Nac}$$

Tableau 4 : Bilan de l'étape Animal



Avec : Nac = Azote dans les aliments concentrés ; NB = Azote fécal ; Ncroît = Azote stocké dans les tissus de l'animal ; NE = Azote excrété ; Nfour = Azote dans les fourrages ;  $NP_A$  = Azote dans les pailles de mil apportées ; NU = Azote urinaire.

### *Etape Fumier*

Pour cette étape l'azote apporté quotidiennement au tas vient des déjections (NE) et des refus (NR) et l'azote total du tas après stockage (NF) constitue l'unique sortie « utile ». L'efficacité azotée agronomique de l'étape Fumier ( $ENA_{\text{Fumier}}$ ) est donc :

$$ENA_{\text{Fumier}} = \frac{NF}{NE + NR}$$

Le fumier ne compte rien de comestible pour l'Homme. L'efficacité comestible du fumier est donc nulle.

### *Etape Sol-Plante*

Les entrées d'azote pour l'étape Sol-Plante sont NF pour les SysI et SysIA. Pour le SysT, l'apport d'azote se fait par les déjections des animaux (NE). L'impact de l'engrais chimique ne sera pas développé dans ce mémoire. Les sorties azotées sont les grains (NG) et les pailles de mil ( $NP_R$ ).

Les efficacités agronomique et comestible se définissent alors comme suit :

$$ENA_{\text{Sol Plante}} = \frac{NP_R}{NE \text{ ou } NF} \qquad ENC_{\text{Sol Plante}} = \frac{NG}{NE \text{ ou } NF}$$

Pour cette étape, les doses de fertilisant sont donc décidées arbitrairement en s'inspirant des données de Odru, 2013 et Audouin, 2013. Le raisonnement inverse aux autres étapes est alors appliqué : l'analyse des résultats de la récolte de 2014 permettra de calculer les efficacités qui seront ensuite appliquées aux données des systèmes étudiés.

### *Bilan cycle complet*

En combinant les flux de chaque étape, il est possible de reconstruire le cycle complet de l'azote. Les Figure 7 et Figure 8 montrent les flux s'opérant dans les différents systèmes. Les flèches orientées vers le haut symbolisent les exportations comestibles et celles orientées vers le bas représentent les pertes d'azote. Les flux horizontaux correspondent à l'N qui est recyclé (qui a un intérêt agronomique).

Ces figures illustrent aussi l'intensification du SysI par rapport au SysT. Les pratiques améliorantes (SysIA) ont pour but de limiter les pertes par volatilisation et lixiviation. Elles n'occasionnent donc pas de nouveaux flux mais impactent ceux déjà présents.

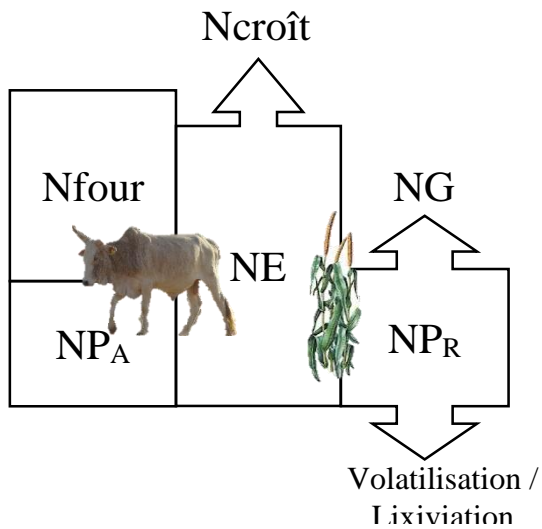


Figure 7 : Flux d'azote en SysT - cycle complet.

Rappel :  $N_{ac}$  = Azote dans les aliments concentrés ;  $N_B$  = Azote fécal ;  $N_{croît}$  = Azote stocké dans les tissus de l'animal ;  $N_E$  = Azote excrété ;  $N_F$  = Azote dans le fumier mûre ;  $N_{four}$  = Azote dans les fourrages ;  $N_{P_A}$  /  $N_{P_R}$  = Azote dans les pailles de mil apportées / récoltées ;  $N_R$  = Azote dans les refus ajoutés au fumier ;  $N_U$  = Azote urinaire.

Les efficacités azotées globales peuvent alors être calculées comme suit :

$$ENAGlobale = \frac{N_{P_R}}{NI (+NR)} \quad ENCGlobale = \frac{N_{croît} + NG}{NI (+NR)}$$

L'efficacité azotée apparente globale (ENG) peut aussi être calculée :

$$ENG = ENAGlobale + ENCGlobale$$

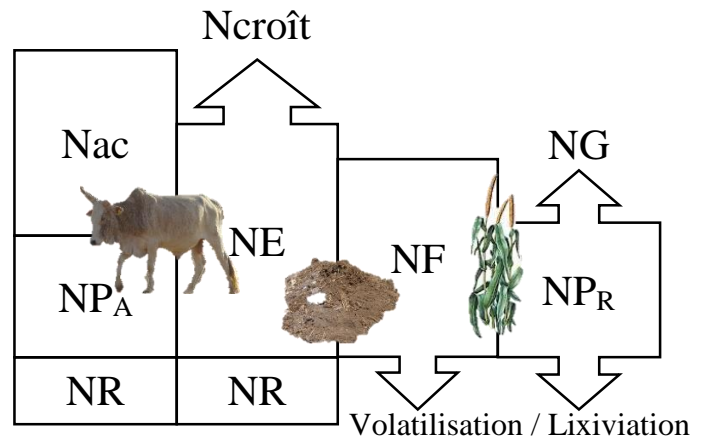


Figure 8 : Flux d'azote en SysI et SysIA – cycle complet



## 3. Résultats

### 3.1. Animal

Les flux d'entrées et de sortie de l'étape animal sont répertoriés dans le Tableau 5. Les efficacités azotées agronomiques et comestibles y ont été calculées. Les valeurs sont les mêmes pour les deux systèmes intensifs puisqu'il s'agit d'une étape commune aux SysI et SysIA.

Tableau 5 : Entrées et Sorties de l'étape Animal - Résultats des suivis de mars à juillet 2015

	Entrées			Sorties				Efficacités		Variation	
	NP <sub>A</sub>	Nfour ou Nac	NI	NB	NU	NE	Ncroît	EN <sub>A</sub> Animal	EN <sub>C</sub> Animal	de poids	
	gN/j/UBT			gN/j/UBT				%		gPV/j/UBT	
<b>SysT</b>	Moyenne	3,7	18,5	<b>22,3</b>	31,3	3,2	<b>34,5</b>	-12,2	<b>155</b>	<b>-55</b>	-406
	écart-type	2,4	5,4	3,1	2,3	1,3	3,5	3,0	17	17	101
<b>SysI</b>	Moyenne	16,5	136,5	<b>152,9</b>	55,5	67,8	<b>123,4</b>	29,5	<b>81</b>	<b>19</b>	984
	écart-type	6,4	18,0	23,0	6,7	14,6	18,0	17,3	11	11	578
<b>SysIA</b>	Moyenne	16,5	136,5	<b>152,9</b>	55,5	67,8	<b>123,4</b>	29,5	<b>81</b>	<b>19</b>	984
	écart-type	6,4	18,0	23,0	6,7	14,6	18,0	17,3	11	11	578

Rappel : Nac = Azote dans les aliments concentrés ; NB = Azote fécal ; Ncroît = Azote stocké dans les tissus de l'animal ; NE = Azote excrété ; Nfour = Azote dans les fourrages ; NP<sub>A</sub> = Azote dans les pailles de mil ; NU = Azote urinaire.

#### 3.1.1. Système Traditionnel

La pénurie de fourrages en saison sèche chaude, période du suivi, a pour conséquence une sous-alimentation des animaux à un point que l'azote excrété (345 g/j/UBT) devient supérieur à l'ingéré (22,3 g/j/UBT). Cela est illustré en Figure 9. On obtient ainsi une efficacité agronomique de 155% soit supérieure à 100%. L'efficacité comestible est donc logiquement de -55% à cause d'un déstockage de l'azote corporel (Ncroît < 0). Les pesées des animaux viennent parfaitement confirmer ces résultats puisqu'une variation de poids négative de - 487 ± 384 gPV/j/UBT a été observée. Dans ce système, 83% de l'azote alimentaire vient de ressources spontanées.

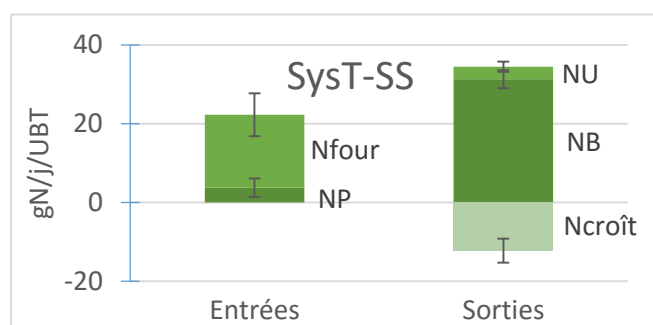


Figure 9 : Entrées et sorties quotidiennes d'azote par UBT en SysT en saison sèche

### 3.1.2. Système Intensif et intensif amélioré

La Figure 10 montre qu'en SysI et SysIA, les quantités d'azote ingérées sont largement supérieures (152,9 g/j/UBT) dépassant ainsi l'azote excrété (123,4 g/j/UBT). La quantité d'azote stockée par l'animal est donc positive, tout comme l'efficience comestible (19%), aboutissant à une efficience agronomique inférieure à 100% (81%). Les animaux atteignent alors un croît moyen de 984 gPV/j/UBT. Pour atteindre ces performances, 89% de l'azote ingéré est acheté sous forme d'aliment concentré.

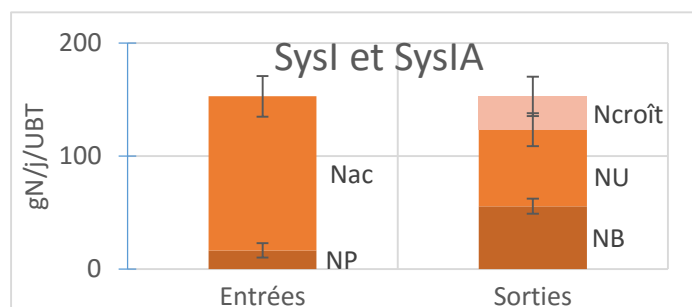


Figure 10 : Entrées et sorties quotidiennes d'azote par UBT en SysI

## 3.2. Fumier

L'étape fumier n'existe pas en système extensif, elle est donc seulement décrite pour les deux systèmes intensifs. L'étape animale ne présentant pas de différence entre le SysI et le SysIA, il est normal d'obtenir les mêmes entrées pour ces deux systèmes.

Tableau 6 : Entrées et sorties de l'étape Fumier – Résultats de la campagne de 2015

		NB	NU	NR	NB+NU+NR	Jours de stockage	NF	ENA <sub>Fumier</sub>
		gN/UBT/j				j	gN/UBT/j	%
SysI	Moyenne	55,5	67,8	2,3	125,7	84	76,7	61
	Ecart-type	6,7	14,6	0,1	21,4	2	4,4	8
SysIA	Moyenne	55,5	67,8	2,3	122,3	84	95,7	76
	Ecart-type	6,7	14,6	0,1	21,4	2	4,2	7

Rappel : ENA = Efficience azotée agronomique ; NB = Azote fécal ; NF = Azote dans le fumier mûre ; NR = Azote dans les refus ; NU = Azote urinaire.

Les tas de fumier non bâchés (SysI) et bâchés (SysIA) ayant chacun reçu les mêmes apports ont été entièrement pesés. Ces pesées et les analyses des TMS ont montré que le fumier bâché conserve mieux la biomasse que le non bâché (+14% de masse en MS pour le fumier bâché récupéré après la même période de stockage). Les premiers résultats d'analyses des fumiers ont montré une très grande variabilité de leur TN. Ils ont donc été combinés aux résultats de 2014. Les TN des fumiers mûres sont donc de l'ordre 13,4±3,7 gN/kgMS et 14,5±4,0 gN/kgMS pour les SysI et SysIA respectivement. La différence de conservation entre les deux types de stockage influe donc sur la quantité d'azote du fumier après maturation soit 76,7±4,4g/UBT/j en SysI contre 95,7±4,2 g/UBT/j en SysIA. Ainsi pour cette étape, l'efficience azotée du SysI (61±8%) est inférieure à celle du SysIA (76±7%).

### 3.3. Sol-Plante

Le Tableau 7 est une synthèse des résultats appliqués à la « ferme moyenne » suite aux résultats présentés en 3.3.2 et 3.4.

Tableau 7 : Calcul des efficacités et des rendements espérés pour la « ferme moyenne »

		<b>NE ou NF</b> (kgN/ha)	<b>ENA<sub>Sol-Plante</sub></b> (%)	<b>ENC<sub>Sol-Plante</sub></b> (%)	<b>NP<sub>R</sub></b> (kgN/ha)	<b>NG</b> (kgN/ha)	<b>rdt paille</b> (kgMS/ha)	<b>rdt grain</b> (kgMS/ha)
<b>SysT</b>	<b>Moyenne</b>	<b>52,24</b>	<b>126</b>	<b>46</b>	<b>68,1</b>	<b>25,6</b>	<b>6843</b>	<b>1283</b>
	<i>Ecart-type</i>	<i>2,38</i>	<i>7</i>	<i>2</i>	<i>0,81</i>	<i>0,59</i>	<i>15,7</i>	<i>2,5</i>
<b>SysI</b>	<b>Moyenne</b>	<b>27,98</b>	<b>123</b>	<b>61</b>	<b>34,5</b>	<b>17,05</b>	<b>3485</b>	<b>852</b>
	<i>Ecart-type</i>	<i>1,60</i>	<i>6</i>	<i>0</i>	<i>0,09</i>	<i>0,04</i>	<i>9,5</i>	<i>2,1</i>
<b>SysIA</b>	<b>Moyenne</b>	<b>34,94</b>	<b>138</b>	<b>53</b>	<b>48,3</b>	<b>18,42</b>	<b>4879</b>	<b>921</b>
	<i>Ecart-type</i>	<i>1,54</i>	<i>5</i>	<i>0</i>	<i>0,08</i>	<i>0,01</i>	<i>7,9</i>	<i>0,3</i>

Rappel : ENA = Efficacité azotée agronomique ; ENC = Efficacité azotée comestible ; NE = Azote excréteur ; NF = Azote dans le fumier mûre ; NG = Azote dans les grains de mil ; NP<sub>R</sub> = Azote dans les pailles récoltées ; NU = Azote urinaire ; rdt = Rendement.

#### 3.3.1. Influence des techniques de fumure sur les rendements du mil

La Figure 11 et la Figure 12 relèvent les rendements en grain et paille des essais pour les différents systèmes. Les résultats sont exprimés en pourcentage du témoin et en matière brute. L'efficacité de la fumure est traduite par la pente de la droite de régression et son ordonnée à l'origine.

En SysT, le parage semble avoir une efficacité importante pour les petites quantités de fumures mais la faible pente des droites de régressions traduisent un effet limité voir négatif du parage (+ 0,23% de production de grain et -0,06% de paille par kg d'azote apporté par hectare).

En SysI le fumier montre une influence plus importante sur le rendement avec +0,47% et +0,63% de grain et de paille respectivement par kg d'azote apporté par hectare, et cette efficacité est encore augmentée en SysIA par l'enfouissement du fumier bûché : +1,71% et +1,22% de grain et de paille respectivement par kg d'azote apporté par hectare.

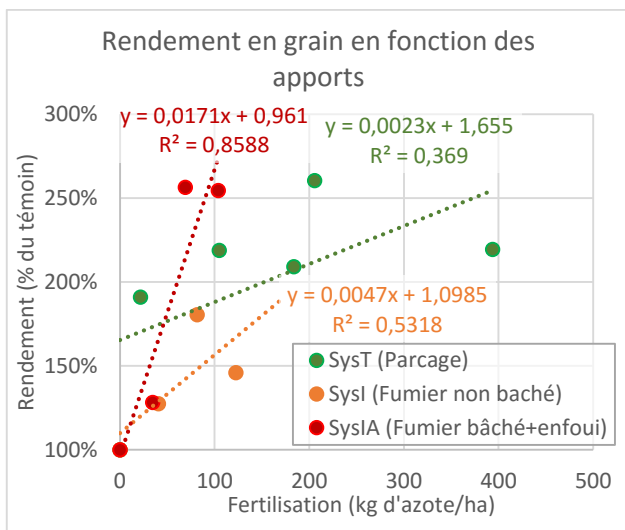


Figure 11 : Rendements en grain des parcelles expérimentales suivant les différents systèmes

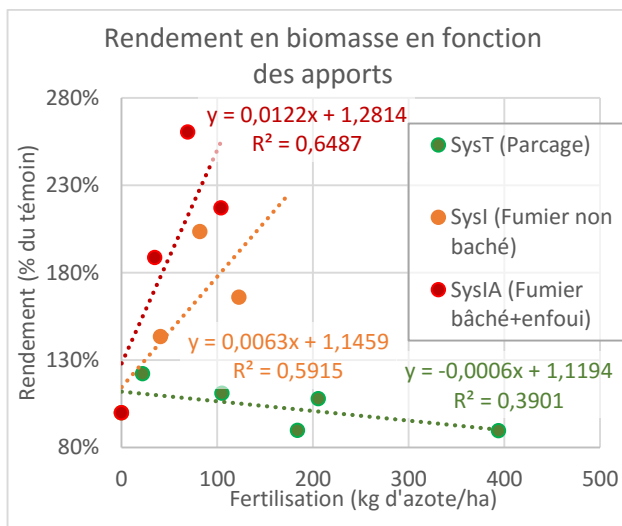


Figure 12: Rendements en paille des parcelles expérimentales suivant les différents systèmes

### 3.3.2. Efficience azotée à l'étape Sol-Plante

Les résultats des différents essais ont permis de construire les Figure 13 et Figure 14. Ces graphes montrent l'effet d'une augmentation des apports d'azote sur l'efficience. Cette dernière décroît avec l'importance des apports.

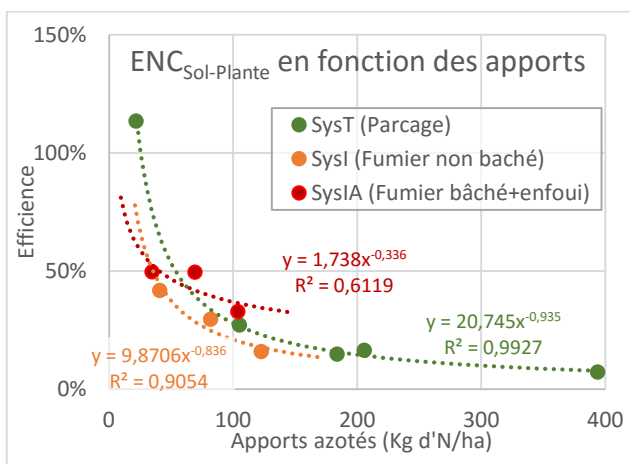


Figure 13 : Efficience **comestible** dans les différents systèmes étudiés

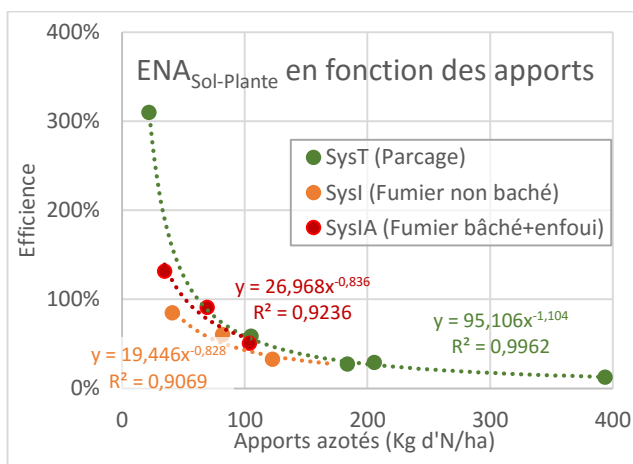


Figure 14 : Efficience **agronomique** dans les différents systèmes étudiés

Ces figures montrent les équations de régression permettant d'estimer les efficacités en fonction des apports avec une bonne précision (un seul  $R^2$  est  $<0,9$ ). Les entrées de l'étape étant constituées de NE en SysT et NF en SysI et SysIA, les équations de régression peuvent s'écrire comme dans le Tableau 8.

**Cas particulier du parcage** : En SysT, les animaux sont parqués 12h/j seulement avec un débit d'excrétion régulier entre le jour et la nuit (résultats personnels). L'azote apporté pour la fertilisation du mil n'est alors que de NE/2. L'autre moitié est déposée par l'animal hors des surfaces de culture et est donc considérée comme une perte pour l'exploitation. Il faudra alors

diviser les efficacités par 2 pour cette étape en SysT afin de ramener cette efficacité à la quantité d'azote excrétée et non aux apports à la parcelle, d'où les formules suivantes.

Tableau 8 : Equations de régression des efficacités azotées pour l'étape Sol-Plante en fonction de l'apport azoté

	$ENASol-Plante$	$ENC_{Sol-Plante}$
<i>SysT</i>	$95,11 \times (NE/2)^{-1,104} / 2$	$20,75 \times (NE/2)^{-0,935} / 2$
<i>SysI</i>	$19,45 \times NF^{-0,828}$	$9,87 \times NF^{-0,836}$
<i>SysIA</i>	$26,97 \times NF^{-0,836}$	$1,74 \times NF^{-0,336}$

Les résultats sont consignés dans le Tableau 7 (en début de partie) et montrent des efficacités azotées agronomiques proches pour le SysT et le SysI, soit 126% et 123% respectivement tandis que celle du SysIA est légèrement supérieure : 138%. Les efficacités comestibles sont comprises entre 46% (SysT) et 61% (SysI). Celle du SysIA est de 53%. La somme des deux efficacités est donc de 172% pour le SysT, 184% pour le SysI et 191% pour le SysIA.

### 3.4. Echelle globale de l'exploitation : Application à la « ferme moyenne »

Ce paragraphe retrace le cheminement de l'azote au cours du cycle. Les résultats sont appliqués à la « ferme moyenne » (Tableau 1) et calculés pour une campagne, soit un an bien que la forte saisonnalité laisse supposer un large biais quant au SysT.

Comme présenté en Tableau 1, la « ferme moyenne » en SysT possède 4 UBT. L'azote total excrété est alors de 52,25 Kg/ferme/an pour un ingéré de 32,51 kg/ferme/an. En SysI et SysIA, 3 UBT/an sont embouchés pendant 4 mois en moyenne. L'azote total excrété et donc apporté au tas de fumier est alors de 45,05 kgN/ferme/an pour un ingéré de 55,81 kgN/ferme/an.

Suite aux pertes lors de l'étape Fumier, les quantités d'azote disponibles pour la fertilisation du mil seront de 27,98 kg/ferme/an pour le SysI et de 34,94 kg/ferme/an pour le SysIA.

Selon le Tableau 1, ces quantités sont épanchées sur 1ha. La fumure disponible est donc de l'ordre de 4tMS de déjections en SysT ; 2,1 tMS de fumier /ha en SysI et 2,4 tMS/ha en SysIA. Ces résultats ont été utilisés en partie 3.3 pour calculer les sorties d'azote dans la dernière étape soit les grains et la paille de mil.

Le Tableau 9 présente donc la synthèse des entrées et sorties sur un cycle de production, soit un an. Le rapport entre les entrées (NI et NR) et les sorties (NPR, Ncroît et NG) permet ainsi d'obtenir les efficacités globales à l'échelle de la « ferme moyenne » suivant le système de conduite.

Tableau 9 : Calculs des efficacités globales à l'échelle de la « ferme moyenne »

		<b>NI</b> (kgN/an)	<b>NR</b> (kgN/an)	<b>NP<sub>R</sub></b> (kgN/an)	<b>Ncroît</b> (kgN/an)	<b>NG</b> (kgN/an)	<b>ENA</b> Globale (%)	<b>ENC</b> Globale (%)	<b>ENG</b> (%)
<b>SysT</b>	<b>Moyenne</b>	<b>32,5</b>	-	<b>68,0</b>	<b>-17,8</b>	<b>25,6</b>	<b>209</b>	<b>24</b>	<b>233</b>
	<b>Ecart-type</b>	4,5	-	5,0	4,4	0,6	110	39	149
<b>SysI</b>	<b>Moyenne</b>	<b>55,8</b>	<b>0,85</b>	<b>34,5</b>	<b>32,3</b>	<b>17,1</b>	<b>61</b>	<b>87</b>	<b>148</b>
	<b>Ecart-type</b>	8,4	0,05	3,2	6,3	0,0	38	66	104
<b>SysIA</b>	<b>Moyenne</b>	<b>55,8</b>	<b>0,85</b>	<b>48,3</b>	<b>32,3</b>	<b>18,4</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>175</b>
	<b>Ecart-type</b>	8,4	0,05	3,8	6,3	0,0	45	67	112

Rappel : ENA = Efficacité azotée agronomique ; ENC = Efficacité azotée comestible ; ENG = Efficacité azotée globale ; Ncroît = Azote stocké dans les tissus ; NG = Azote dans les grains de mil ; NI = Azote ingéré ; NP<sub>R</sub> = Azote dans les pailles récoltées ; NR = Azote dans les refus.

Ces résultats montrent une efficacité azotée totale plus importante en SysT qu'en SysI et SysIA (233% contre 148% et 175% respectivement). Cela est notamment dû à une très haute efficacité agronomique (ENA) de 209% qui contrebalance une efficacité comestible (ENC) de seulement 24%. Le SysI quant à lui présente une bonne efficacité comestible (87%) pour une efficacité agronomique plus faible (61%). En SysIA, l'efficacité agronomique augmente de presque 40% par rapport au SysI et l'efficacité comestible de 90% dépasse celles des deux autres systèmes.

## 4. Discussion

### 4.1. Etape Animal : Des systèmes aux antipodes

L'analyse de la littérature a permis de construire la Figure 15 exprimant l'azote excrété (NE) en fonction de l'ingéré (NI). Les deux points correspondant à chacun des systèmes étudiés y ont aussi été représentés (SysIA = SysI). On y voit encore une fois un excrété supérieur à l'ingéré en SysT. Ce graphe montre aussi que les deux systèmes étudiés représentent deux situations extrêmes.

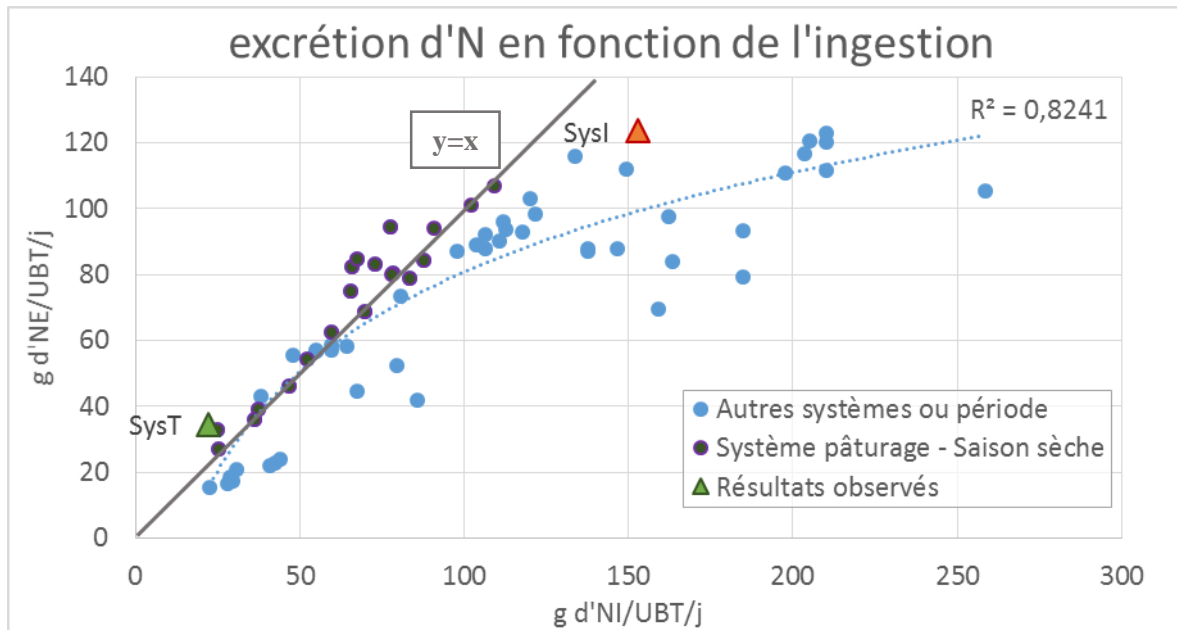


Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré (Références en Annexe 2)

#### 4.1.1. Le troupeau divagant : un vecteur de fertilisation

Lors de l'étape animale, l'azote ingéré paraît très faible (32,5 kg/UBT/an) mais cette valeur reste cohérente avec la Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré et les résultats de Diarra, 1995 ayant mesuré une consommation de 35 kgN/UBT/ha dans le même contexte. Comme l'illustre la Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré ( $NE > NI$ ), l'azote ingéré ne couvre alors pas les besoins d'entretien de l'animal. Cela crée une rupture d'homéostasie chez l'animal qui mobilise alors l'azote de ses tissus afin d'entretenir son métabolisme, occasionnant ainsi une perte de poids. De Leeuw et al., 1993 et Schlecht et al., 1995 ont aussi observé des pertes de poids allant jusqu'à 310g/j/UBT en saison sèche.

Dans ce système et à cette période, l'alimentation des troupeaux se fait majoritairement à partir de ressources spontanées ( $N_{four} \gg N_{PA}$ ) et sans complémentation. Ainsi, le parcage nocturne sur les parcelles de culture permet à l'agro-éleveur d'utiliser la moitié de l'azote excrété comme fertilisant. L'animal joue alors le rôle de vecteur de fertilisation en transférant les nutriments depuis les parcours, bas-fonds, etc. par son alimentation jusqu'aux surfaces de cultures (par ses

déjection lors du parcage) (Vigan et al., 2014). Powell et Ikpe (1992) ont en effet constaté que la consommation d'azote par les animaux sur les parcours était supérieure aux restitutions par les déjections. La différence constitue le transfert de fertilisation des ressources spontanées aux cultures.

#### **4.1.2. L'embouche bovine : quand l'Homme devient le vecteur de fertilisation**

Le système intensif, pratiquant l'embouche, présente la stratégie inverse. En effet, ce système a pour but que l'animal produise un maximum de tissus. Ici, la variation de poids calculée ( $984 \pm 578$  g/j/UBT) est légèrement supérieure à celles observées par Calvet et Valenza (1973) qui ont obtenu des gains de poids de  $745 \pm 167$  g/j/UBT pour des rations moins riches en azote.

Cela suppose une alimentation plus concentrée en azote et énergie et donc l'achat de concentrés (Calvet et Diallo, 1971 ; Tiémoko et al., 1990) qui représentent ici 89% de l'azote ingéré. Ce qui n'est pas valorisé par l'animal i.e. l'azote excrété et des refus sert à la production de fumier moyennant des pertes lors de la collecte et du stockage. Ce fumier est ensuite épandu sur les parcelles de cultures. Dans ce système c'est donc l'humain qui devient le vecteur de fertilité, moyennant une main d'œuvre supplémentaire.

#### **4.1.3. Des systèmes opposés mais indissociables**

Le SysT montre ainsi une grande efficacité sur le plan agronomique. L'efficacité comestible reste négative mais permet tout de même d'effectuer la reproduction du troupeau grâce à la saison des pluies Powell et al., 1996. Cela reste insuffisant pour fournir la demande importante des villes en produits carnés.

Pour le SysI ou SysIA, l'efficacité agronomique est donc moindre, mais l'efficacité comestible est positive et permet alors d'approvisionner le marché de la viande. Cette conduite ne permet cependant pas la reproduction du cheptel. Ce système est donc dépendant du traditionnel pour la fourniture d'animaux à engraisser.

### **4.2. L'étape fumier : comment limiter les pertes d'azote**

En SysI, 37% de l'azote est perdu lors de l'étape fumier entre la collecte et le stockage. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Castellanos-Navarrete et al. (2015) qui ont mesuré des pertes allant de 37 à 40%. Pour du fumier recevant plus de paille (>20% de la MS total), Mathot et al. (2011) ont observé des pertes entre 20 et 31% pendant un stockage moyen de 185 jours. Ces pertes sont majoritairement occasionnées par la volatilisation de l'azote sous forme ammoniacale. En effet, selon Steinfeld et al. (2006) ce flux seul représenterait la perte de 20% de l'azote d'un fumier et 26 à 29% de celui contenu dans les bouses. Le reste des pertes est lié à la formation de  $N_2O$ ,  $NO_3^-$  et  $N_2$  (Vayssières et Rufino, 2012).

La grande majorité des pertes se fait donc par volatilisation. C'est pourquoi il a été proposé de



bâché le fumier en SysIA. Aucune référence bibliographique traitant du bâchage du fumier de ferme n'a été trouvée. Cette technique est en effet l'intermédiaire entre la couverture du fumier par un toit ou des branches et une maturation anaérobie. Murwira et al. (1993) ont montré que les fumiers stockés en anaérobiose occasionnent moins de pertes via le  $\text{NH}_3$  que le fumier en plein air. De même, un fumier couvert par un toit conserve plus d'azote durant son stockage (Tifton et al., 2009). En revanche, la couverture du tas par des branches ne s'est pas montrée plus efficace dans les travaux menés par (Castellanos-Navarrete et al., 2015).

Dans le cas de l'étude, les pertes ne représentent qu'une sortie et peuvent être calculées par défaut de bilan. Elles sont occasionnées lors de la collecte et du stockage. Les pertes lors de la collecte s'appliquent de la même manière aux SysI et SysIA, n'handicapant donc pas la comparaison. L'embouche se déroulant majoritairement en saison sèche, la lixiviation est négligeable. Les différences d'efficacité sont donc uniquement dues à une limitation de la volatilisation grâce au bâchage du fumier.

Le bâchage du fumier a ici permis une meilleure conservation de la biomasse et de l'azote, aboutissant ainsi à une diminution de 38% des pertes d'azote. Le fumier bâché contient aussi de l'azote plus facilement mobilisable par la plante. En effet, des résultats de ce suivi non présentés dans ce document ont montré qu'à apport d'azote égal, le mil fertilisé par du fumier bâché occasionne de meilleurs rendements en grain et en paille que le non bâché, tous autres paramètres égaux.

### **4.3. L'azote dans l'étape Sol-Plante**

Les résultats estimés pour cette étape sont cohérents avec les travaux d'Audouin (2013) qui a relevé un rendement moyen en grain de 1267 kg/ha fertilisé dans le village de Diohine (SysT) et de 795 kg/ha fertilisé à Barry Sine (SysI). Ces résultats correspondent presque au double de ceux observés sans fertilisation par William et al. (1995) ayant estimé les exportations d'azote entre 22 et 38 kg/ha.

Bien que les rendements en grain augmentent avec la fumure quel que soit le système, le rendement en biomasse diminue avec le parcage. Cela peut s'expliquer par la présence d'un autre facteur limitant que l'azote, tel que le phosphore comme le conclut Piéri (1973).

Les efficacités azotées calculées restent tout de même très importantes car le rapport du total des sorties sur le total des apports situé entre 172% (SysT) et 191% (SysIA). Cela signifie que les exportations d'azote dépassent les apports et donc que le sol s'appauvrit en azote. Ce problème n'est pas propre au bassin arachidier. En effet, Sanchez et Leasky (1996) estiment les déficits cumulés en azote entre 1960 et 1990 de l'ordre 700 kg/ha pour  $10^8$  ha en Afrique subsaharienne. L'efficacité n'est donc pas un bon indicateur de la pérennité du système pour cette étape où il est plus durable de rechercher une optimisation du rendement par une plus forte disponibilité en azote fertilisant et une limitation des pertes au champ.

Ces pertes azotées au champs sont majoritairement dues à la volatilisation sous forme de  $\text{NH}_3$  (entre 15 et 20 % selon Smil, 1999 ; entre 2 et 20% des apports selon Gac et al., 2009). Ce processus s'applique similairement aux déjections ou au fumier et impactera donc le SysT et le SysI de la même manière (IPCC, 1997). Ces pertes pouvant être plus importantes sous un climat chaud et sec (Vallis et al., 1985), elles seront certainement élevées dans le contexte de l'étude réunissant ces deux critères. La lixiviation du  $\text{NO}_3^-$  joue aussi un rôle important dans les pertes azotées (Vayssières et Rufino, 2012).

L'enfouissement du fumier lors de l'épandage a donc été proposé comme pratique améliorante. Cela permet d'une part de protéger le fumier du vent et des rayons du soleil, limitant ainsi les pertes (Pichot et al., 1974 ; Ganry et Bertheau, 1980). D'autre part, lors de l'enfouissement le sol est travaillé et ainsi ameubli, facilitant la levée et le développement racinaire du mil (Chopart et Nicou, 1976). Ainsi, selon Piéri, 1989, un labour profond permettrait de multiplier les rendements de maïs par 3,6 à Séfa, (Sénégal).

Pour évaluer les pertes comparativement entre les systèmes, il été proposé de calculer la quantité d'apports azotés nécessaires pour doubler le rendement par rapport au témoin. Ces quantités ont été évaluées pour chaque système et répertoriées dans le Tableau 10. Cela montre que l'enfouissement du fumier permet d'augmenter les rendements beaucoup plus rapidement en divisant par 3 la quantité d'apports nécessaire à un doublement du rendement témoin.

Tableau 10 : Quantité d'apports nécessaire pour doubler le rendement du témoin

		kgN/ha	tMS de bouse ou fumier
<b>Grain</b>	SysT	150	11,5
	SysI	191,8	14,3
	SysIA	60,8	4,2
<b>Paille</b>	SysT	-	-
	SysI	135,5	10,1
	SysIA	58,9	4,1

#### 4.4. Bilan du cycle

A l'échelle du cycle, le SysT paraît beaucoup plus efficace que les autres sur le plan agronomique, mais ces résultats sont fortement influencés par l'étape Animal. Comme développé en paragraphe 4.1.1, ces résultats sont spécifiques à la période et ne permettent pas de conclure à une efficacité réellement supérieure pour ce système.

Les SysI et SysIA sont très différents du SysT, mais paraissent globalement moins efficaces sur le plan agronomique, et plus efficaces sur le plan comestible. Cela est cohérent avec la stratégie d'engraissement des animaux.

De manière globale, bien qu'il ne soit donc pas possible de conclure à une meilleure efficacité du SysT, ce système paraît permettre un recyclage intra-cycle de l'azote plus important, notamment en limitant les exportations via le gain de poids. Vigne, 2014 a aussi démontré que les systèmes extensifs sont plus efficaces que les intensifs.

En revanche, les SysI et SysIA sont suffisamment similaires pour être comparés. S'ils ne présentent aucune différence pour l'étape Animal, l'impact des pratiques améliorantes montre un effet important sur l'efficacité agronomique, en augmentant de 40% celle du SysI sans diminuer l'efficacité comestible. De plus ces pratiques permettent d'augmenter l'azote disponible pour les cultures par simple amélioration de la qualité du fumier et réduction des pertes au champ. Or, Blanchard et al., 2014 jugeaient ces paramètres comme des leviers d'action essentiels à l'amélioration des systèmes agropastoraux en Afrique de l'Ouest.

## **4.5. Réflexion sur l'applicabilité du SysIA et les impacts économiques et sociaux**

Le paragraphe précédent montre donc la pertinence du SysIA sur le plan théorique par une diminution des pertes azotées au cours du cycle par rapport à un système d'embouche classique. Les systèmes d'embouche sont voués à se développer dans tous les cas, stimulés par la demande en viande de l'agglomération dakaroise, et ce même si ces systèmes semblent moins efficaces que le SysT. Il est donc nécessaire de s'intéresser à l'applicabilité de ces pratiques améliorantes.

Tout d'abord, le bûchage du fumier ne nécessite pas de main d'œuvre en plus, l'unique limite étant dans la difficulté de se procurer une bûche. La meilleure décomposition du fumier, visible à l'œil nu, semble avoir séduit les agro-éleveurs partenaires. Il est donc probable que cette technique soit vite adoptée, moyennant une disponibilité en bûche.

L'enfouissement quant à lui a montré un fort impact sur les rendements de mil (Figure 11 et Figure 12). En revanche, son application demande une main d'œuvre très importante. En effet, lors de la mise en place des parcelles expérimentales, il a été chronométré que l'enfouissement demanderait 300 heures de travail supplémentaire par hectare. De plus, ce travail physique et pénible empêche une aide des femmes ou des jeunes.

Pour permettre l'applicabilité d'une telle pratique, une machine permettant d'enfouir le fumier a été inventée par un artisan de Fatick. Cependant, le coût élevé de cet outil suppose une gestion collective. Or, les stratégies des emboucheurs semblent majoritairement individualistes (Odru, 2013). Il y a donc peu de chance de voir cette pratique améliorante se développer rapidement dans la zone.

## **4.6. Les limites de l'étude**

### **4.6.1. Les inconnues de l'étape Animal**

#### *Saisonnalité en SysT*

Comme expliqué précédemment, la période de suivi n'a pas permis de relever les quantités ingérées et excrétées au cours de l'année. Cela crée un biais important.

En effet, l'extrapolation des résultats à l'année entière aboutit à une efficacité agronomique très importante (155%) due à un déstockage de l'azote corporel (efficacité comestible de -55%). L'analyse de la bibliographie permet cependant d'imaginer que cette perte de poids se contrebalance en saison des pluies. En effet, l'analyse de 9 systèmes pâturant (Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré) a montré une efficacité agronomique moyenne de 84% sur l'année entière, soit 106% en saison sèche pour 75% en saison des pluies. Ainsi, en saison sèche les animaux ne font que déstocker de l'azote accumulé en saison des pluies.

Les données étudiées sont donc issues d'une situation extrême, ne permettant pas de conclure définitivement à une réelle efficacité en SysT sans quantification des flux en saison des pluies.

### *Estimation de l'azote urinaire et des variations de poids*

N'ayant pu être mesuré lors des suivis, l'azote urinaire a été estimé selon la méthode présentée en paragraphe 2.3.3, *Cas particulier de l'azote urinaire*. Cette estimation permet d'obtenir un ordre de grandeur des sorties azotées via l'urine, cependant il reste difficile de conclure avec précisions, d'une part à cause d'un  $R^2 < 0,5$  et d'autre part car les systèmes étudiés ici représentent des situations extrêmes (Figure 15: Excrétion quotidienne d'azote en fonction de l'ingéré).

Aussi, les difficultés de pesée des animaux ne permettent pas de connaître les variations de poids vif des animaux avec précision. Cette étape présente donc 2 inconnues et rendent ainsi les conclusions difficiles. Or, il suffirait d'en lever une seule pour pouvoir déterminer l'autre par défaut de bilan.

Les variations de poids résultant d'une fonte musculaire, les mesures baryométriques non pas permis de conclure à une variation de poids cohérente avec l'équation proposée par l'ISRA (proportionnelle au périmètre thoracique). En effet, que ce soit en SysT ou SysI, les variations de poids aboutissent à une variation de la Note d'état corporelle et non du périmètre thoracique.

### **4.6.2. Volatilisation et lixiviation aux étapes Fumier et Sol-Plante**

Si pour le fumier il est facile d'estimer les pertes (paragraphe 4.2)(Pindozi et al., 2013), l'étape Sol-Plante compte de nombreux paramètres rendant cette estimation difficile. En effet, les seuls apports considérés ici sont issus des bouses ou du fumier. Cependant, le mil puise aussi de l'azote déjà présent dans le sol, d'où des efficacités supérieures à 100% pour cette étape. De la même manière, les sorties non récoltées sont multiples : pertes par volatilisation ou lixiviation, stockage dans le sol ou les parties non récoltées.

La part de chacune de ces sorties ne peut pas être quantifiée ici mais peut différer d'un système à l'autre (Egoumenides et al., 1987). Ainsi il devient intéressant de savoir si un système favorise plutôt le stockage ou les pertes, ce qui permettrait de conclure à une efficacité prenant en compte l'enrichissement des sols en azote (Ganry et al., 1979 ; Guiraud et al., 1980). Malheureusement, ces paramètres ne sont pas mesurables ni calculables pour cette étude.

### **4.6.3. Des systèmes simplifiés**

La complexité et la diversité des flux internes voir inter-fermes a supposé effectuer de nombreuses simplifications. L'approche étant réalisée par ferme et non par territoire, il a été décidé de ne s'intéresser qu'aux surfaces de cultures. Un travail exhaustif n'étant pas possible sur le temps imparti, voici quelques pistes de réflexion pour mettre en relief les résultats présentés.

#### *Surfaces fourragères hors cultures*

La plupart des ressources fourragères du SysT ne proviennent pas des cultures mais des parcours, les jachères et les bas-fonds. La distinction entre ces types de surfaces n'est pas aisée en saison sèche et n'a donc pas permis de relever le temps de passage sur ces surfaces. Il n'est donc pas possible de conclure au-delà du fait que les animaux jouent le rôle de vecteur de fertilisation dans ce système (Manlay et al., 2004 ; Diarisso et al., 2015).

### *Les autres fertilisations*

Bien que l'étude ne considère que la fumure organique, une multitude d'autres mécanismes entre en jeu. En effet, l'impact de l'utilisation d'engrais chimique (représentant 20% des apports d'azote aux cultures sur le territoire selon Odru, 2013) n'a pas été étudié ici, tout comme l'influence des ligneux (Charreau et Vidal, 1965 ; Dancette et Sarr, 1985 dans Badiane et al., 2000a) et les autres sources d'azote telles que les jachères (De Rouw, 2004), les associations de culture, les ordures ménagères, ni les sorties telles que la collecte des bouses pour le feu (Garin et al., 1990).

L'étude s'est aussi affranchie des arrières-effets éventuels de fumures organiques précédentes par le choix des parcelles ; cependant, il n'est pas encore possible de conclure à un arrière effet effectif qui signifierait un stockage d'azote dans le sol et donc une sortie utile sur le plan agronomique (Blondel, 1971 ; Badiane et al., 2000b ; Gandah, 2003). La même problématique se pose pour les racines de mil restant sur la parcelle.

Tous ces mécanismes peuvent avoir une influence non négligeable sur les calculs d'efficiences azotée. Cependant, tous les systèmes étudiés y sont soumis, cela ne limite donc pas leur comparaison.

#### **4.6.4. Perspectives : mieux comprendre les processus écologiques sous-jacents**

Les paragraphes ci-dessus montrent les limites pratiques de la détermination des flux de lixiviation et de volatilisation. Cependant, ils sont issus de processus écologiques impactant l'efficacité azotée du cycle de production (Vayssières et Rufino, 2012). Il serait donc intéressant de mieux comprendre ces mécanismes d'une part pour mieux connaître les flux qui en résultent et d'autre part pour évaluer l'impact de ces flux sur l'environnement (Peyraud et al., 2012). On pourra aussi considérer l'environnement proche tel que la ferme (comme dans cette étude) ou le territoire (village, région), mais aussi l'environnement global en considérant les autres acteurs ou une échelle plus large. En effet, contrairement à ceux mesurés dans cette étude, ces flux de lixiviation ou volatilisation sont extrêmement mobiles et peuvent ainsi participer à des tendances globales telles que l'eutrophisation des nappes par les nitrates et phosphates, les pluies acides ou le réchauffement climatique par la volatilisation de  $\text{NO}_2$  et autres gaz à effet de serre.

Bien que les systèmes présents au sahel paraissent peu producteurs de ces externalités négatives, il est légitime de se questionner quant à l'évolution de ces flux avec le développement de systèmes intensifs tels que l'embouche (Vall et al., 2014).

## 5. Conclusion

Cette étude souligne des différences importantes qui distinguent les systèmes de production présents dans le bassin arachidier. En effet, de nombreux points opposent le système traditionnel basé sur la divagation des animaux au système intensif construit autour de l'embouche bovine.

Le système traditionnel est caractérisé par une stratégie ne visant pas un haut niveau de productions animales mais orientée vers un recyclage important de l'azote au cours du cycle de production. Ainsi, la conduite tente d'être la plus économe possible en ressources tout en tentant d'auto-entretenir ses ressources azotées au maximum. Les apports sont donc réduits à leur minimum, voire déficitaires de façon saisonnière. En revanche, cette alimentation valorise les ressources locales spontanées et permet de les transformer en déjections qui sont en partie utilisées pour la fertilisation des cultures de mil. Ce système permet toutefois aux troupeaux de se reproduire et donc de vendre des animaux maigres ou de réforme, tout en produisant de la biomasse végétale pour l'alimentation humaine (grain) et animale (paille).

De son côté, le système intensif basé conduit à une productivité comestible beaucoup plus importante permettant ainsi la vente d'animaux bien conformés. L'alimentation est alors basée sur des aliments concentrés du commerce, ouvrant ainsi le système au milieu extérieur avec l'achat et la revente des animaux. Ce système caractérisé par des flux d'azote plus importants est sources de pertes azotées plus élevées que le traditionnel. Cela vient notamment du fait que le cycle comprend une étape supplémentaire de stockage du fumier de ferme produit par les refus et les déjections des animaux attachés dans la concession.

Pour limiter ces pertes, divers techniques de conservation de l'N ont été proposées et testées dans le système intensif amélioré. Les pertes azotées étant majoritairement dues à la volatilisation de l'N lors du stockage et de l'épandage du fumier, deux techniques ont été appliquées dans ce système. Bien qu'une diminution des pertes n'ait pas pu être directement mesurée, il a été constaté que la combinaison de la couverture du tas de fumier et son épandage avec enfouissement permettaient d'augmenter les rendements cultureux pour un même niveau de production de déjections animales.

Ces résultats montrent bien la pertinence d'une intensification écologique du système intensif couplant les techniques d'embouche et de conservation des nutriments. Ces résultats prennent toute leur importance quand on sait que l'embouche est et sera en plein essor dans les années à venir. Cet essor est stimulé par une forte demande en produits carnés dans les grandes villes sénégalaises. Cette réflexion peut être généralisée à une grande partie de la région Afrique de l'Ouest car des dynamiques similaires y sont observées. Il devient alors primordial de s'intéresser à l'applicabilité de ces techniques et à leurs impacts dans le cas d'une adoption à grande échelle. En effet, les pertes azotées en système d'embouche peuvent occasionner des externalités négatives (pollution notamment) et leur évitement constitue une opportunité d'accroître également les productions végétales.

## 6. Bibliographie

- Alvarez S, Rufino MC, Vayssières J, Salgado P, Tifton P, Tillard E, Bocquier F, 2014. Wholefarm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: An application of network analysis. *Agricultural Systems* – vol. 26, p. 25–37
- Audouin, 2013. Terroirs comparison in terms of biomass flows and nitrogen balance - Study case of Diohine and Barry Sine in the former groundnut basin. Master thesis – ISARA. 92 pp.
- Badiane A., Khouma M., Sène M., 2000a. Région de Diourbel : Gestion des sols. Drylands Research Working Paper 15 - Crewkerne, United Kingdom, 33 pp.
- Badiane A., Khouma M., Sène M., 2000b. Gestion et transformation de la matière organique - synthèse des travaux de recherches menés au Sénégal depuis 1945. Publication ISRA, 123 pp.
- Bénagabou A., 2013. Effet de la pratique de l'intégration agriculture-élevage sur l'efficacité énergétique des exploitations agricoles dans les systèmes agro-pastoraux du Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université de Bobo-Dioulasso, 97 pp.
- Berger M., 1996. Amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. CIRAD, Agriculture et développement, hors-série juin 1996, 57 pp.
- Bertrand D., 2002. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications. *INRA Production Animale* - n. 15, p. 209-219
- Blanchard M., 2010. Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-sud savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage. Thèse de Doctorat en sciences de l'Univers et Environnement. Univ. Paris-est Créteil. 301 pp.
- Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P., Vall E., 2014. Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les recommandations de fumure ? Base 2014 [En ligne], - vol. 18, n. 4, p. 512-523
- Blondel D., 1971. Rôle de la matière organique libre dans la minéralisation en sol sableux, relation avec l'alimentation azotée du mil. *AT*, 1971. - vol. 26, n. 12, p. 1372-1377
- Buldgen A., Piraux M., Dieng A., Compère R., 1993. Mise au point de techniques d'embouche bovine villageoise dans le bassin arachidier sénégalais. Dans : Regain d'intérêt pour les ressources génétiques animales – Revue Mondiale de Zootechnie – FAO, 1993. – vol. 76, n. 3 (<http://www.fao.org/docrep/v0600t/v0600T0d.htm>)
- Calvet H., Diallo S., 1971. Influence de la nature de l'azote sur la valeur alimentaire des rations. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1971, n. 24 p. 69-75
- Calvet H., Valenza J., 1973. Embouche intensive de zébus Peulh sénégalais à base de paille de riz. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1973, - vol. 26, n. 1, p. 105-116
- Castellanos-Navarrete A., Tifton P., Rufino M., Giller K., 2015. Feeding, crop residue and manure management for integrated soil fertility management – A case study from Kenya. *Agricultural Systems*, - vol. 134, p. 24-35
- Charreau C., Poulain J.F., 1963. La fertilisation des mils et sorghos. *AT*, 1963. - vol. 18, n. 1, p. 53-63
- Charreau C., Vidal P., 1965. Influence de l'Acacia albida Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils Pennisetum au Sénégal. *AT*, 1965. - vol. 20, n. 6-7, p. 600-626
- Chopart J.L., Nicou R., 1976. Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *AT*, 1976. - vol. 31, n. 1, p. 7-28
- Darby H., 2014. Maximizing Manure Nitrogen. Crops & Soils program – 8-30 juin 2014, University of Vermont. – 2 pp.
- De Leeuw, Reynolds L., Rey B., 1993. Nutrient transfers from livestock in West African agricultural systems. In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p. 360-380

- De Rouw A., Rajot J.L., Schumelzer G., 1995. Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger. Mil et bouses au Niger Niamey, p. 95-112
- De Rouw A., 2004. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, 2004. – vol. 81, p. 73–93
- Diagana B., Mankior A., Sadibou C., Guèye A., 2008. Agriculture durable et réduction de la pauvreté dans le Bassin arachidier du Sénégal: Résultats du Modèle Analyse Tradeoffs. Réflexions et Perspectives – ISRA, 2008. – vol. 6, n. 5, 43 pp.
- Diarisso T., Corbeels M., Andrieu N., Djamen P., Tittonell P., 2015. Biomass transfers and nutrient budgets of the agro-pastoral systems in a village territory in south-western Burkina Faso. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2015 – vol. 101, n. 3, p. 295-315
- Diarra L., Hiernaux P., Leeuw P., 1995. Foraging behaviour of cattle grazing semi-arid rangelands in the Sahel of Mali. In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p.101-115
- Diop M., Diao M.B., 2005. Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal. Ministère français des Affaires étrangères, Projet Joko (FAC n° 98004900), ISRA, ITA, CIRAD, 524 pp.
- Dugué P., Vayssières J., Chia E., Ouedraogo S., Havard M., Coulibaly D., Nacro H.B., Sissoko F., Sangare M., Vall E., 2011. L'intensification écologique : réflexions pour la mise en pratique de ce concept dans les zones de savane d'Afrique de l'Ouest. Dans Vall E., Andrieu N., Chia E., Nacro H. B., 2012. Partenariat, modélisation, expérimentation : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique. Actes du séminaire ASAP, novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Cédérom. 15 pp.
- Egoumenides C., Risterucci A., Melebou K.E., 1987. Appréciation de la fertilité azotée des sols tropicaux : étude des fractions organiques de l'azote. *AT*, 1987. - vol. 42, n. 2, p. 85-93
- Gac, A., F. Béline, and T. Bioteau. 2006. Flux de gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) liés à la gestion des déjections animales: Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données. [Greenhouse gases and ammonia emissions from livestock wastes management: Bibliographic review and database development. Technical report.] CEMAGREF, Paris.
- Gandah M., Bouma J., Brouwer J., Hiernaux P., Van Duivenbooden N., 2003. Strategies to optimize allocation of limited nutrients to sandy soils of the Sahel: a case study from Niger, west Africa. *Agric., Ecos. & Envir.*, 94, 3: 311-319
- Ganry F., Bideau J., Nicoli J., 1974. Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle d'un mil souma III. *AT*, 1974. - vol. 29, n. 10, p. 1006-1015
- Ganry, F., Guiraud, G., 1979. Mode d'application du fumier et bilan azoté dans un système mil sol sableux du Sénégal. Colloque AIEA, Colombo, 1979 - IAEA SIM:, p. 235 16.
- Ganry F., Bertheau Y., 1980. Gestion des résidus de récolte et économie de l'azote au Sénégal. Séminaire sur le recyclage des matières organiques. FAO, 24 au 29 novembre 1980. - p. 37-51
- Garin P., Faye A., Lericollais A., Sissokho M., 1990. Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs Sereer au Sénégal. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, 1990. - vol 26, p.65-84
- Gautier D., Locatelli B., Corniaux C., Alary V., 2014. Global changes, livestock and vulnerability: the social construction of markets as an adaptive strategy. *The Geographical Journal* 2014 doi: 10.1111/geoj.12115. 12pp.
- Guérin H., Friot D., Mbaye Nd., 1983-1984. Méthodologie d'étude de la valeur alimentaire des parcours naturels à faible productivité : 1 - Approche bibliographique, LNERV, 1983, n° 103, 31 pp. ; 2 - Protocoles et premiers résultats. LNERV, 1984, n° 12, 33 pp.
- Guiraud G., Ganry F., Llimous G., 1980. Etude au moyen de 15N de l'influence de l'enfouissement répété de compost de paille de mil sur la disponibilité de l'azote d'un sol sableux tropical. *AT*, 1980. - vol. 35, n. 3, p. 215-219
- Hamon R., 1972. L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (bilan de trois années d'études). *AT*, 1972. - vol. 27, n. 5, p. 592-607
- IPCC, 1997. (Intergovernmental Panel on Climate Change/Organization for Economic Cooperation and



- Development). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. OECD/OCDE, Paris.
- Kamuanga M., J. Somda, Sanon Y., Kagoné H., Zoundi J., Hitimana L., 2008. Élevage et marché régional au Sahel et en Afrique de l'Ouest - Potentialités et défis. Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest/OCDE, 2008 – 182 pp.
- Landais E., Lhoste P., 1993. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. II. Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. Cahiers Agriculture, 1993. – vol. 2, p. 9-25
- Lekasi, J., Tanner, J., Kimani, S., Harris, P., 2001. Managing manure to sustain smallholder livelihoods in the East African Highlands. HDRA, Coventry University, UK.
- Lericollais A., 1999. Paysans sereer : dynamiques agraires et mobilités au Sénégal. IRD Editions, 1999 - 668 pp.
- Mankor A., 2009. Consommation urbaine de viandes en Afrique de l'Ouest : l'exemple de Dakar. Grain de Sel, Mars-Août 2009. – n. 46-47, p. 16-17
- Manlay R., Ickowicz A., Masse D., Feller C., Richard D., 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna—II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. Agricultural Systems, 2004, - vol. 79, p. 83–107
- Mathot M., Decuyenaere V., Lambert r., Stilmant D., 2011. Comparaison des flux en éléments (C, N, cendres, P et K) entre un système en stabulation entravée et un système en stabulation libre avec accumulation de fumier. Renc. Rech. Ruminants, 2011, - vol. 18, p. 161-164
- Murwira K., Swift M., Frost P., 1993. Manure as a key resource in sustainable agriculture. . In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p. 131-148
- Odrú M., 2013. Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir.- Etude de cas d'un terroir villageois sereer au Sénégal. Mémoire de fin d'étude – Master en Agro-développement international – ISTOM. 109 pp.
- Osho, Gbolahan Solomon, Nazemzadeh, Asghar, 2005. Consumerism: Statistical Estimation of Nigeria Meat Demand. Journal of International Business Research, January 2005. – vol. 4, n. 1
- Peyraud J., Cellier P., Donnars C., Réchauchère O. (éditeurs), 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 68 pp.
- Pichot J., Burdin S., Charoy J., Nabos J., 1974. L'enfouissement des pailles de mil Pennisetum dans les sols sableux dunaires. Son influence sur les rendements et la nutrition minérale du mil. Son action sur les caractéristiques chimiques du sol et la dynamique de l'azote minéral. AT, 1974. - vol. 29, n. 10, p. 995-1005
- Pichot J., Sedogo M.P., Poulain J.F., Arrivets J., 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. AT, 1981. - vol. 36, n. 2, p. 122-133
- Piéri C., 1973. La fumure des céréales de culture sèche en République du Mali. Premier essai de synthèse. AT, 1973. - vol. 28, n. 8, p. 751-766
- Piéri C., 1989. Bilan organique des terres cultivées dans les savanes au sud du Sahara. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, pp. 47- 112.
- Pimentel D., 1997. Conservation of Fertilizers and Livestock Manure: Pollution Prevention. National Pollution Prevention Center for Higher Education. 7 pp.
- Pindozi S., Faugno S., Okello C., Boccia L., 2013. Measurement and prediction of buffalo manure evaporation in the farmyard to improve farm management. Biosystems Engineering, 2013. – vol. 115, p 117-124
- Powell M., Ikpe F., 1992. Fertilizer factories – Nutrient recycling through livestock. Ileia Newsletter, 1992. – vol. 8, n. 3, 2 pp.
- Powell J.M., Fernández-Rivera S., Hiernaux P., Turner M.D., 1996. Nutrient cycling in integrated rangeland / cropland systems of the Sahel. Agricultural Systems, 1996. - vol. 52, n. 2-3, p. 143-170
- Powell J.M., 2014. Feed and manure use in low-N-input and high-N-input dairy cattle production systems. Environ. Res. Lett., 2014 – vol. 9, n. 115004, 8 pp.
- Rufino M., Rowe E., Delve R., Giller K., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, - vol. 112, p. 261–282
- Sanchez P.A, Leaky R., 1996. Land use transformation in Africa: three determinants for balancing food security with natural resources utilization. Keynote address,

- proceedings of European society of agronomy 4th congress, Velthoven, The Netherlands, July 7-11, 1996.
- Sanon H., Drabo A., Sangare M., Kiendrebeogo T., Gomgnibou A., 2014. Caractérisation des pratiques d’embouche bovine dans l’Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, April 2014. – vol. 8, n. 2, p. 536-550
- Schlecht E., Malher F., Sangaré M., Susenbeth A., Becker K., 1995. Quantitative and qualitative estimation of nutrient intake and faecal excretion of zebu cattle grazing natural pasture in semi-arid Mali. . In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p. 88-100
- Schlecht E., Fernández-Rivera S., Hiernaux P., 1998. Timing, size, and N-concentration of faecal and urinary excretions in cattle, sheep and goats - can they be used for better manuring of cropland? In: Renard G, Neef A, Becker K & von Oppen M (eds) *Soil Fertility Management in West African land use systems*. Niamey, Niger. 4-8 mars 1997, - n. 47, p. 361-367
- Schlecht E., Hiernaux P., 2004. Beyond adding up inputs and outputs: process assessment and upscaling in modelling nutrient flows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, - vol. 70, p. 303–319
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock’s long shadow*. FAO, Rome: Environmental issues and options. 416 pp.
- Tirel J-C ., 1991. L’extensification : chance ou défi pour les exploitations agricoles ? *INRA Prod. Anim.*, 1991. – vol. 4, n. 1, p. 5-12
- Tiémmoko Y., Bouchel D., Kouao Brou J., 1990. Effet de différents niveaux de complémentation d’une ration de fourrage vert (*Panicum maximum*) par de la graine de coton mélassée sur la croissance de taurillons Baoulé en post-sevrage. *Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1990 – vol. 43, n. 4, p. 529-534
- Tittonell P., Rufino M., Janssen B., Giller K., 2009. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems—evidence from Kenya. Springerlink, ref. DOI 10.1007/s11104-009-0107-x, 17 pp.
- Vall E., Salgado P., Corniaux C., Blanchard M., Dutilly C., Alary V., 2014. Changements et innovations dans les systèmes d’élevage en Afrique. *INRA Prod. Anim.*, 2014. – vol. 27, n. 2, p. 161-174
- Vallis I., Peake D., Jones R., McCown R., 1985. Fate of urea nitrogen from cattle urine in a pasture-crop sequence in a seasonally dry tropical environment. *Australian Journal of Agricultural And Resource* 1985. – vol. 36, p. 809–817
- Vayssières J., Rufino M., 2012. Managing nutrient cycles in crop and livestock systems with green technologies. In J.I. Boye and Y. Arcand (eds.), *Green Technologies in Food Production and Processing*, Food Engineering Series, p. 151-183
- Vidal P., 1963. Croissance et nutrition minérale des mils (*Pennisetum*) cultivés au Sénégal. *AT*, 1963. - vol. 18, n. 6-7, p. 591-733
- Vigan A., Vayssières J., Masse D., Manlay R., Sissokho M., Lecomte P., 2014. Sustainable Intensification of Crop Production in agro- sylvo-pastoral Territories through the Expansion of Cattle Herds in Western Africa. *Livestock, Climate Change and Food Security Conference - Madrid 2014*. Résumé. p. 127
- Vigne M, Vayssières J., Lecomte P., Peyraud J.L., 2012. Evaluating the ability of current energy use assessment methods to study contrasting livestock production systems. *Journal of Environmental Management*, 2012. – vol. 112, p. 199-212
- Vigne M., 2014. Efficiency of extensive livestock systems in harsh environments. *Perspectives*, january 2014. - n. 25, 4 pp.
- Williams T., Powell J., Fernandez-Rivera S., 1993. Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel: Implications for cropland productivity. In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993– FAO – vol. 2, p. 381-397

(76 références)

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1	Liste des références bibliographiques utilisées pour construire la figure 5.....	II
Annexe 2	Liste des références bibliographiques utilisées pour construire la Figure 11.....	IV
Annexe 3	Organisation des parcelles expérimentales.....	VI

## Annexe 1 Liste des références bibliographiques utilisées pour construire la Figure 5.

- Berger M., 1996. Amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. CIRAD, Agriculture et développement, hors-série juin 1996, 57 pp.
- Bertaudière L., Godet C., César J. 1984. Efficacité de deux techniques de fertilisation animale en savane soudanaise. Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop., 1984. – vol. 37, n. 3, p. 355-360
- Bertrand R., Nabos J., Vicaire R., 1972. Exportations minérales par le mil et l'arachide. Conséquences sur la définition d'une fumure d'entretien d'un sol ferrugineux tropical développé sur matériau éolien à Tarna (Niger). AT, 1972. - vol. 27, n. 12, p. 1287-1303
- Blanchard M., 2010. Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-sud savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture élevage. Thèse de Doctorat en sciences de l'Univers et Environnement. Univ. Paris-est Créteil. 301 pp.
- Boudet G., Rivière R., 1968. Emploi pratique des analyses fourragères pour l'appréciation des pâturages tropicaux. Rev. Elev. Méd. Vét. Pays trop., 1968, vol. 21, n. 2, p. 227-266
- Charreau C., Vidal P., 1965. Influence de l'Acacia albida Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils Pennisetum au Sénégal. AT, 1965. - vol. 20, n. 6-7, p. 600-626
- De Rouw A.; Rajot J.L. ; Schumelzer G., 1995. Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes du rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger. Mil et bouses au Niger Niamey, 1995, p. 95-112
- Diallo S., Pugliese P.L., Calvet H., 1976. Nutrition des bovins tropicaux dans le cadre des élevages extensifs sahéliens : mesures de consommation et appréciation de la digestibilité et de la valeur alimentaire des fourrages. Rev. Elev. Méd. Vét. Pays trop., 1976, vol. 29, n. 3, p. 233-246
- Egoumenides C., Risterucci A., Melebou K.E., 1987. Appréciation de la fertilité azotée des sols tropicaux : étude des fractions organiques de l'azote. AT, 1987. - vol. 42, n. 2, p. 85-93
- Fall S., 1991. Digestibilité in vitro et dégradabilité in situ dans le rumen de ligneux fourragers disponibles sur pâturages naturels au Sénégal. Premiers résultats. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1991. – vol. 44, n. 3, p. 345
- FAO : <http://www.fao.org/docrep/003/v7180f/v7180f05.htm>. [Consulté le 18/07/2015]
- Feedipedia : <http://www.feedipedia.org/node/357> ; <http://www.feedipedia.org/node/726> ; <http://www.feedipedia.org/node/724> ; <http://www.feedipedia.org/node/399> ; <http://www.feedipedia.org/node/11637> ; <http://www.feedipedia.org/node/697> ; <http://www.feedipedia.org/node/696> ; <http://www.feedipedia.org/node/742> ; <http://www.feedipedia.org/node/712> ; <http://www.feedipedia.org/node/12611> ; <http://www.feedipedia.org/node/12440> . [Consultés entre le 12/06/2015 et le 15/06/2015]
- Feller C., Ganry F., 1982. Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. III – Effet du compostage et de l'enfouissement de divers résidus de récolte sur la répartition de la matière organique dans différents compartiments d'un sol sableux AT, 1982. - vol. 37, n. 3, p. 262-269
- Hamon R., 1972. L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (bilan de trois années d'études). AT, 1972. - vol. 27, n. 5, p. 592-607
- Landais E., Lhoste P., 1993. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans la zone des savanes africaines. II. Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. Cahiers Agriculture, 1993. – vol. 2, p. 9-25
- Onduru D., Snijder P., Muchena F., Wouters B., De Jager A., 2008. Manure and soil fertility management in subhumid and semi-arid farming systems of sub-Saharan Africa: Experiences from Kenya. Int. J. Agric. Res., 2008, - vol. 3, n. 3, p. 166-187

- Quilfen J.P.; Milleville P., 1983. Résidu de culture et fumure animale : un aspect des relations agriculture-élevage dans le nord de la Haute-Volta. AT, 1983. - vol. 38, n. 3, p. 206-212
- Richard D., Guerin H., Friot D., Mbaye N., 1990. Teneurs en énergies brute et digestible de fourrages disponibles en zone tropicale. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1990, vol. 43, p. 225-231
- Schlecht E., Fernández-Rivera S., Hiernaux P., 1998. Timing, size, and N-concentration of faecal and urinary excretions in cattle, sheep and goats - can they be used for better manuring of cropland? In: Renard G, Neef A, Becker K & von Oppen M (eds) Soil Fertility Management in West African land use systems. Niamey, Niger. 4-8 mars 1997, - n. 47, p. 361-367
- Tiémoko Y., Bouchel D., Kouao Brou J., 1990. Effet de différents niveaux de complémentation d'une ration de fourrage vert (*Panicum maximum*) par de la graine de coton mélassée sur la croissance de taurillons Baoulé en post-sevrage. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1990 – vol. 43, n. 4, p. 529-534
- Tittonell P., Rufino M., Janssen B., Giller K., 2009. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems—evidence from Kenya. Springerlink, ref. DOI 10.1007/s11104-009-0107-x, 17 pp.
- Valenza J., Fayolle F., 1965. Notes sur les essais de charges de pâturages en République du Sénégal. Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop., 1965. – vol. 18, n. 3, p. 321-327

## Annexe 2 Liste des références bibliographiques utilisées pour construire la Figure 15.

- Ayantude A., Hiernaux P., Fernandez Rivera S., Van Keulen H., Udo H.M.J., 1999. Selective grazing by cattle on spatially and seasonal heterogeneous rangeland in Sahel. *Journal of Arid Environments* - n. 42, p. 261-279
- Bois B., 2013. Évaluation du potentiel méthanogène des fourrages naturels consommés par les zébus Peuls du Nord Sénégal en saison sèche : Rapport de stage de seconde année, Master Ecologie et Biodiversité, spécialité Ecologie et Développement Durable. Université Montpellier II – CIRAD/ISRA. 40pp.
- Calvet H., Diallo S., 1971. Influence de la nature de l'azote sur la valeur alimentaire des rations. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1971, n. 24 p. 69-75
- Chirat G., Ickowicz A., Diaf H., Boquier F., 2008. Etude des facteurs clés du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur un territoire « agrosylvopastoral » tropical. *Renc. Rech. Ruminants*, n° 15, p. 327-330
- Coly I., Diop B., Akpo E., 2013. Transformation locale des résidus de récolte en fumier de ferme dans le terroir de la Néma au Saloum (Sénégal). *J. of Applied Biosciences* 2013. – vol. 70, p. 5640-5
- De Leeuw, Reynolds L., Rey B., 1993. Nutrient transfers from livestock in West African agricultural systems. In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p. 360-380651
- Delve R., Cadisch G., Tanner J., Thorpe W., Thorne P., Giller K., 2001. Implications of livestock feeding management on soil fertility in the smallholder farming systems of sub-Saharan Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2001. – vol. 84, p. 227–243.
- Diallo S., Pugliese P.L., Calvet H., 1976. Nutrition des bovins tropicaux dans le cadre des élevages extensifs sahéliens : mesures de consommation et appréciation de la digestibilité et de la valeur alimentaire des fourrages. *Rev. Elev. Méd. Vét. Pays trop.*, 1976, vol. 29, n. 3, p. 233-246
- Guérin H., 1980. Interactions digestives entre les fourrages et les aliments concentrés. Conséquences pour la prévision de la valeur alimentaire des rations distribuées à des ruminants. Mémoire : ingénieur zootechnicien, Université Clermont II. – Résumé, 23 pp.
- Khalili, H., Varvikko, T., 1992. Effect of replacement of concentrate mix by wilted sesbania (*Sesbania sesban*) forage on diet digestibility rumen fermentation and milk production in Friesian X Zebu (Boran) crossbred cows fed low quality native hay. *Anim. Feed Sci. Technol.* – vol. 36, p. 275–286
- Lekasi, J., Tanner, J., Kimani, S., Harris, P., 2001. Managing manure to sustain smallholder livelihoods in the East African Highlands. HDRA, Coventry University, UK.
- Molénat G., Corniaux C., Gueguen S., Lacz C., Bocquier F., 2003. Adapter les systèmes d'alimentation pendant la saison sèche pour les zébus laitiers sédentarisés en zone rizicole du Nord – Sénégal. *Renc. Rech. Ruminants*, 2003, - n. 10, 1 p.
- Njuguna P., Muinga R., Saha H., 2002. Evaluation of manure from cows fed napier grass or maize stover basal diet supplemented with gliricidia, clitoria, or mucuna. KARI, 2002. 6pp.
- Powell J.M., 2014. Feed and manure use in low-N-input and high-N-input dairy cattle production systems. *Environ. Res. Lett.*, 2014 – vol. 9, n. 115004, 8 pp.
- Rufino M., Rowe E., Delve R., Giller K., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, - vol. 112, p. 261–282
- Schlecht E., Malher F., Sangaré M., Susenbeth A., Becker K., 1995. Quantitative and qualitative estimation of nutrient intake and faecal excretion of zebu cattle grazing natural pasture in semi-arid

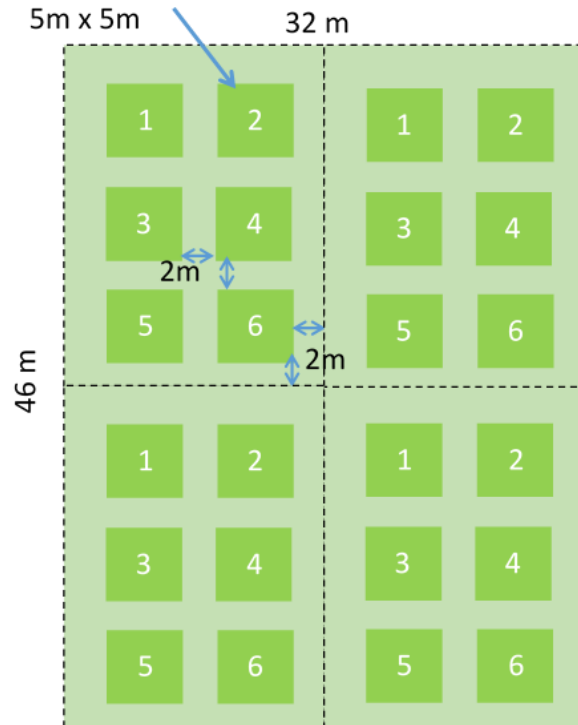
- Mali. . In: Powell J.M., Fernández-Rivera S., Williams T.O., Renard C. (eds) Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia. 22–26 November 1993 – FAO – vol. 2, p. 88-100
- Schlecht E., Blümmel M., Becker K., 1997. The Influence of the Environment on Feed Intake of Cattle in Semi-Arid Africa. CAB International 1999. Regulation of Feed Intake. 19 pp.
- Schlecht E., Fernández-Rivera S., Hiernaux P., 1998. Timing, size, and N-concentration of faecal and urinary excretions in cattle, sheep and goats - can they be used for better manuring of cropland? In: Renard G, Neef A, Becker K & von Oppen M (eds) Soil Fertility Management in West African land use systems. Niamey, Niger. 4-8 mars 1997, - n. 47, p. 361-367
- Schlecht E., Hiernaux P., Achard F., Turner M.D., 2004. Livestock related nutrient budgets within village territories in western Niger. Nutr. Cycling in Agroecosyst., 68: 199-211
- Schlecht E., Hiernaux P., Kadaouré I., Hülsebusch C., Malher F., 2006. A spatio-temporal analysis of forage availability and grazing and excretion behaviour of herded and free grazing cattle, sheep and goats in Western Niger. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, - vol. 113, p. 226–242
- Tiémoko Y., Bouchel D., Kouao Brou J., 1990. Effet de différents niveaux de complémentation d'une ration de fourrage vert (*Panicum maximum*) par de la graine de coton mélassée sur la croissance de taurillons Baoulé en post-sevrage. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1990 – vol. 43, n. 4, p. 529-534
- Tittonell P., Rufino M., Janssen B., Giller K., 2009. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems—evidence from Kenya. Springerlink, ref. DOI 10.1007/s11104-009-0107-x, 17 pp.
- Varvikko, T., Khalili, H., 1993. Wilted tagasaste (*Chamaecytisus palmensis*) forage as a replacement for a concentrate supplement for lactating crossbred Friesian X Zebu (Boran) dairy cows fed low-quality native hay. Anim. Feed Sci. Technol. – vol. 40, n. 239–250

### Annexe 3

### Organisation des parcelles expérimentales

Essai Parcage :

Placettes de  
5m x 5m



Essai Fumier :

Placettes  
de 5m x 5m

