



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

FACULTE DES SCIENCES

MENTION : ENTOMOLOGIE CULTURE ELEVAGE ET SANTE (ECES)

PARCOURS : SYSTEME DE PRODUCTION D'ALTITUDE DURABLES (SPAD)

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme au grade de Master II

Evolution des pertes en carbone et en nutriments des fumiers  
de bovin entre la fin du stockage à la ferme  
et avant l'enfouissement dans le sol

Présenté par

**RASOAMIHAMINA Faniry**

Devant le jury composé par :

Président :

Examinateur :

Maitre de stage : **Docteur (HDR) Paulo SALGADO**

Encadreur pédagogique : **Docteur Jean Claude RAKOTONIRINA**

Co-encadrant : **Docteur (HDR) Thierry BECQUER**





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

FACULTE DES SCIENCES

MENTION : ENTOMOLOGIE CULTURE ELEVAGE ET SANTE (ECES)

PARCOURS : SYSTEME DE PRODUCTION D'ALTITUDE DURABLES (SPAD)

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme au grade de Master II

Evolution des pertes en carbone et en nutriments des fumiers  
de bovin entre la fin du stockage à la ferme  
et avant l'enfouissement dans le sol

Présenté par

**RASOAMIHAMINA Faniry**

Devant le jury composé par :

Président :

Examineur :

Maitre de stage : **Docteur (HDR) Paulo SALGADO**

Encadreur pédagogique : **Docteur Jean Claude RAKOTONIRINA**

Co-encadrant : **Docteur (HDR) Thierry BECQUER**





*« Je puis tout par Celui qui me fortifie »*

*Phillipiens 4 : 13*

## *Remerciements*

A terme de cette étude, je remercie avant tout notre Seigneur tout Puissant par sa bonté et son amour qui m'a toujours soutenu, aimé et aidé durant toutes ces épreuves.

Je tiens également à remercier les personnes suivantes sans qui ce présent mémoire n'aurait pu voir le jour :

- Docteur **Jean Claude RAKOTONIRINA**, responsable du parcours SPAD à la faculté des Sciences.
- Docteur (HDR) **Paulo SALGADO**, chercheur à l'UMR SELMET du CIRAD, qui m'a épaulé jusqu'à l'accomplissement de ce travail. Un grand merci pour la patience dans mon encadrement avec les précieux conseils très utiles jusqu'à l'accomplissement de ce mémoire.
- Docteur (HDR) **Thierry BECQUER**, chercheur à l'UMR Eco&Sol de l'IRD, qui m'a guidé et m'a apporté son expertise. Un grand merci pour les soutiens et les temps consacrés à ce travail, qui malgré les nombreuses fonctions n'a pas ménagé ses efforts pour m'aider avec ses précieuses instructions.
- Docteur **Marie Lucia FANJANIAINA**, chercheur du projet ECO-AFRICA, une grande aide à qui ce mémoire n'aurait pas pu être réalisé sans sa grande contribution, surtout pour les travaux sur terrain.
- Docteur **Mathieu VIGNE**, chercheur à l'UMR SELMET du CIRAD, une collaboration fructueuse pour ce stage.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements aux personnes suivantes qui ont participé d'une manière pédagogique et matérielle à l'aboutissement de ce présent travail :

- Monsieur **Aina RAZAFINDRAKOTO**, technicien au FOFIFA Andranomanelatra,
- Monsieur **Damase Hillaire RAZAFIMAHAFALY**, en charge de laboratoire du LRI,
- Monsieur **Jean Fortunat BEVELO**, assistant de M. Bertrand MULLER,
- Tous les corps enseignants de la mention ECES, en particulier ceux du parcours SPAD,
- Tous mes ami(e)s de notre promotion au master SPAD,
- Tous les stagiaires et personnels du dP SPAD.

Je tiens également à adresser mes plus profondes gratitude à ces personnes qui me sont chères et qui ont été toujours présents pour me soutenir et m'encourager : **Dada, Mama et Manjato**, sans oublier **mes ami(e)s, ma grande famille, ...**

A tous, je vous fais part de mes sincères remerciements.

## TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	i
Liste des figures .....	i
Liste des tableaux.....	i
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	ii
<b>GLOSSAIRE</b> .....	iii
<b>RESUME</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>I.    SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	5
<b>I.1.    Transfert de biomasses et de fertilité dans les exploitations en Intégration Agriculture-Élevage</b> ...	5
<b>I.2.    Bilan en éléments nutritifs du fumier</b> .....	6
<b>I.2.1.    Formes et transformation de l'azote dans le fumier</b> .....	6
<b>I.2.2.    Risques de pertes de nutriments dans le fumier</b> .....	7
<b>I.3.    Modes de gestion des fumiers dans les petites exploitations familiales en Afrique</b> .....	8
<b>I.4.    Pratiques de gestion des fumiers pour minimiser les pertes</b> .....	9
<b>I.4.1.    Minimiser les pertes au niveau de l'étable (étape 1)</b> .....	9
<b>I.4.2.    Minimiser les pertes gazeuses lors du stockage et épandage (étapes 2 à 4)</b> .....	10
<b>I.4.3.    Minimiser les pertes par lixiviation</b> .....	13
<b>II.    MATERIEL ET METHODES</b> .....	14
<b>II.1.    Généralité sur la zone d'étude</b> .....	14
<b>II.1.1.    Localisation</b> .....	14
<b>II.1.2.    Climat du site d'expérimentation</b> .....	15
<b>II.1.3.    Sols</b> .....	15
<b>II.2.    Phase d'enquête</b> .....	16
<b>II.3.    Phase d'expérimentation</b> .....	16
<b>II.3.1.    Suivi de la volatilisation de l'azote et des autres éléments dans le tas de fumier au champ</b> 17	
<b>II.3.2.    Expérimentation pour la détermination de la lixiviation</b> .....	20
<b>II.3.3.    Mesures effectuées</b> .....	22
<b>II.3.4.    Analyse au laboratoire</b> .....	22
<b>II.3.5.    Calcul de l'évolution des éléments en fonction du temps</b> .....	23
<b>II.3.6.    Analyses statistiques</b> .....	25
<b>III.    RESULTATS ET INTERPRETATION</b> .....	26
<b>III.1.    Analyse de variance</b> .....	26
<b>III.2.    Caractéristiques des quatre types de fumiers à T0</b> .....	27
<b>III.3.    Relations entre les différents éléments au temps T0</b> .....	29
<b>III.4.    Variation du Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en fonction du temps de stationnement</b> .....	30

III.4.1.	Variation des concentrations d'azote minéral en fonction du temps.....	30
III.4.2.	Variation des quantités d'azote minéral en fonction du temps, pour les grands tas (GT) .	31
III.5.	Evolution de la concentration de Nmin tot, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> pour chaque type de fumier en fonction du temps de stationnement.....	32
III.6.	Estimation de la volatilisation .....	34
III.6.1.	Volatilisation des quatre types de fumier.....	34
III.6.2.	Bilan d'azote minéral et volatilisation pour chaque fumier .....	34
III.7.	Estimation de la lixiviation .....	35
III.7.1.	Concentration en Nmin tot, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> du sol.....	35
III.7.2.	Estimation de la lixiviation.....	36
IV.	DISCUSSION .....	39
IV.1.	Comparaison des types de fumier selon leur teneur en matière organique .....	39
IV.2.	Importance de la volatilisation d'azote liée au temps de stationnement et à la taille du tas...	40
IV.3.	Quantification de la lixiviation par imitation d'arrosage .....	42
IV.4.	Limite du travail.....	43
IV.5.	Pratique de gestion du fumier .....	44
	CONCLUSION ET PERSPECTIVE.....	45
	BIBLIOGRAPHIE .....	47
	WEBOGRAPHIE.....	53
	ANNEXES.....	I
	ANNEXE I : MINERALISATION ET NITRIFICATION .....	II
	ANNEXE II : VOLATILISATION DE L'AZOTE .....	IV
	ANNEXE III : LIXIVIATION .....	VI
	ANNEXE IV : EFFETS DES PERTES D'AZOTE SUR L'ENVIRONNEMENT .....	VII
	ANNEXE V : RESULTAT D'ENQUETE AU NIVEAU DES EXPLOITATIONS.....	IX
	ANNEXE VI : RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES .....	XII

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

### Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Transfert de l'azote au niveau de l'exploitation (Rufino et al., 2006).....	3
<b>Figure 2.</b> Formes d'azote dans le fumier et pertes (Auteur, 2021) .....	7
<b>Figure 3.</b> Schéma conceptuel de la pratique d'utilisation du fumier (Auteur, 2021).....	9
<b>Figure 4.</b> Localisation de la zone d'étude.....	14
<b>Figure 5.</b> Courbe ombrothermique de Gaussen d'Andranomanelatra, moyenne 2005-2020. ....	15
<b>Figure 6.</b> Dispositif expérimental pour le test de volatilisation de l'azote et estimation des pertes en d'autres éléments durant le temps de stationnement .....	17
<b>Figure 7.</b> Séparation de l'interface sol-fumier par un grillage .....	19
<b>Figure 8.</b> Dispositif pour l'estimation de la lixiviation suivant le temps de stationnement .....	21
<b>Figure 9.</b> Teneur en matière sèche (MS) des quatre (4) types de fumier durant le temps de stationnement.....	27
<b>Figure 10.</b> Cercle de corrélation entre les différents teneurs en éléments (a) et projection sur le plan factoriel des traitements types de fumiers (b).....	30
<b>Figure 11.</b> Concentration en Nmin tot, en N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> et en N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> durant le temps de stationnement ...	31
<b>Figure 12.</b> Quantité en Nmin tot, en N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> et en N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> durant le temps de stationnement .....	32
<b>Figure 13.</b> Variation des concentrations en Nmin tot (a), N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (b) et N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (c) en fonction du temps de stationnement .....	33
<b>Figure 14.</b> Bilan d'azote suivant les types de fumier.....	35
<b>Figure 15.</b> Comparaison de teneurs du sol en Nmin tot suivants les temps de stationnements.....	36
<b>Figure 16.</b> Cycle de l'azote dans le fumier.....	41
<b>Figure 17.</b> Effet simulé de la vitesse du vent et du rayonnement global sur le flux d'ammoniac (Sommer et al., 2003) .....	V
<b>Figure 18.</b> Pollution azotée en relation avec l'agriculture et les secteurs associés (Adegbye <i>et al.</i> , 2019).....	VIII

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> Résultats des <i>p</i> -values de l'ANOVA sur les trois facteurs étudiés, pour les concentrations en éléments minéraux (Nmin tot, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ptot, Ktot, Catot, Mgtot), le pH et les teneurs organiques (MS, Ctot, Ntot).....	26
<b>Tableau 2 :</b> Teneur en Ctot, Ntot, MS et concentration en N min tot, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH eau des quatre types de fumiers au temps T0.....	29
<b>Tableau 3 :</b> Différence de stock en (Nmin tot) élément durant l'essai avec estimation de la volatilisation.....	34
<b>Tableau 4 :</b> Comparaison des moyennes de la concentration en Nmin tot, N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> dans le sol par rapport au temps de stationnement T0 .....	35
<b>Tableau 5 :</b> Différence de la teneur en Nmin tot du sol durant l'essai et estimation de la lixiviation.....	36
<b>Tableau 6 :</b> Teneur en Ntot dans la partie matière organique pure des quatre types de fumier .....	39

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>ACP :</b>	Analyse de Composante Principale
<b>ADEME :</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>ANOVA :</b>	Analyse de Variance
<b>CIRAD :</b>	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CSA :</b>	Comité de la Sécurité Alimentaire mondiale
<b>DGEP :</b>	Direction Générale de l'Economie et du Plan
<b>ECO-AFRICA :</b>	<i>Ecological intensification pathways for the future of crop-livestock integration in African agriculture</i> (Projet)
<b>FAO :</b>	Food and Agriculture Organisation
<b>FC :</b>	Fosse Couverte
<b>FNC :</b>	Fosse Non Couverte
<b>GIEC :</b>	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
<b>IAE :</b>	Intégration Agriculture-Elevage
<b>IRD :</b>	Institut de Recherche pour le Développement
<b>LSD :</b>	Least Significant Difference
<b>MO :</b>	Matière Organique
<b>pH :</b>	Potentiel d'Hydrogène
<b>SPAD :</b>	Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité (dispositif de recherche et d'enseignement en partenariat)
<b>TC :</b>	Tas Couvert
<b>TNC :</b>	Tas Non Couvert
<b>UMR-Eco&amp;Sol :</b>	Unité Mixte de Recherche en Ecologie du Sol
<b>UMR-SELMET :</b>	Unité Mixte de Recherche en Systèmes d'Elevage Méditerranéens et Tropicaux



## GLOSSAIRE

<b>Ammoniac :</b>	Combinaison gazeuse d'azote et d'hydrogène de formule $\text{NH}_3$
<b>Dénitrification :</b>	Élimination biologique de l'azote par des bactéries dénitrificateurs en milieu anaérobie
<b>Densité apparente :</b>	Masse par unité de volume apparent de sol (volume réel de terre + volume de l'espace poreux)
<b>Effluents d'élevage :</b>	Ensemble d'urine, fèces et de résidus d'aliment non ingérés par l'animal
<b>Flux de nutriments :</b>	Transfert ou transformation de nutriments selon les conditions du milieu
<b>Gaz à Effet de Serre (GES) :</b>	Gaz qui absorbe le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre contribuant à l'effet de serre. Les principaux gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), l'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et l'ozone ( $\text{O}_3$ )
<b>Lixiviation :</b>	Perte de nutriments dans le sol qui sont dissouts et entraînés par les eaux d'infiltration
<b>Nitrification :</b>	Transformation de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )
<b>Résidu de culture</b>	Matériel végétal laissé dans un champ agricole après la récolte (par ex., la paille ou les cannes de maïs)
<b>Volatilisation :</b>	Perte en éléments nutritifs ou d'autres substances dans l'atmosphère sous une forme de gaz

## RESUME

Les fumiers de bovins sont une importante source de fertilisant et d'amendement pour les exploitations agricoles. Divers mécanismes biogéochimiques, notamment ceux associés au cycle de l'azote, induisent des pertes d'éléments nutritifs (notamment d'azote) lors du stationnement au champ des fumiers. La conservation de l'azote et des autres éléments minéraux est primordiale pour développer une agriculture durable, dépendant le moins possible de l'apport de fertilisants minéraux ou de synthèse. C'est dans ce sens que la présente étude a été menée pour quantifier l'azote qui peut être perdu lorsque les exploitants épandent leurs fumiers au champ. Deux essais ont été effectués dans la commune rurale d'Andranomanelatra. Lors du premier essai, trois facteurs sont étudiés tels que : (i) le type de fumier qui diffère suivant le mode de stockage à la ferme avec fumier à fosse couverte (FC), à fosse non-couverte (FNC), à tas couvert (TC) et à tas non-couvert (TNC) ; (ii) le temps de stationnement du fumier au champ (T0, T2, T4, T8, T16, T32) et (iii) la taille du tas, en grand tas (GT) et en petit tas (PT). Des prélèvements de fumier suivant ces trois facteurs ont été effectués. L'azote ( $N_{\text{tot}}$ ,  $N_{\text{min tot}}$ ,  $N\text{-NH}_4^+$ ,  $N\text{-NO}_3^-$ ), la teneur en  $C_{\text{tot}}$  et les teneurs des autres éléments minéraux majeurs ( $P_{\text{tot}}$ ,  $K_{\text{tot}}$ ,  $Ca_{\text{tot}}$  et  $Mg_{\text{tot}}$ ) ainsi que le pH des fumiers ont été quantifiés. Pour le second essai, un fumier stocké en fosse couverte (FC) a été stationné en grand tas pendant huit jours (T0, T2, T4, T8) et soumis à un arrosage correspondant à une pluie simulée de 50 mm. Des prélèvements de sol (0-10 cm) ont été réalisés et les teneurs en N du sol ( $N_{\text{min tot}}$ ,  $N\text{-NH}_4^+$ ,  $N\text{-NO}_3^-$ ) mesurées. Le temps de stationnement a des effets importants sur les pertes en azote minéral, particulièrement durant les deux premiers jours des essais au champ. La perte par volatilisation, qui correspond à une transformation de l'ammonium ( $N\text{-NH}_4^+$ ) en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) atteint 22% de l'ammonium présent initialement dans les fumiers. Par contre, l'azote organique n'a pas été minéralisé durant les 32 jours de stationnement et n'a donc pas contribué à la volatilisation. Les autres éléments n'ont pas non plus été perdus durant le stationnement. La taille du tas n'a pas eu d'effet significatif sur la perte en azote. L'essai de lixiviation a induit la perte par lixiviation de 74,5% de l'azote minéral total du fumier vers le sol pendant les deux premiers jours après la pluie simulée. Des pertes importantes d'azote minéral ont lieu par volatilisation et lixiviation pendant les deux premiers jours après l'épandage des fumiers. Un enfouissement rapide du fumier dans le sol permettrait de limiter les pertes par volatilisation.

**Mots clés** : fumier de bovin, temps de stationnement, volatilisation, ammoniac, lixiviation, taille de tas.

## ABSTRACT

Cattle manure is an important fertilizer and amendment source for farms. Various biogeochemical mechanisms, especially those associated with the nitrogen cycle, induce nutrient losses (mainly nitrogen) when manure is parked in the field. The conservation of nitrogen and other mineral elements is essential to develop sustainable agriculture, depending as little as possible on the input of mineral or synthetic fertilizers. It is in this sense that this study was conducted to quantify the nitrogen that can be lost when farmers spread their manure in the field. Two trials were carried out in the rural commune of Andranomanelatra. During the first trial, three factors were studied, such as: (i) the type of manure, which differs according to the method of storage on the farm, with manure in a covered pit (CP), in an uncovered pit (UNP), in a covered heap (CH) and in an uncovered heap (UNH); (ii) the manure parking time in the field (T0, T2, T4, T8, T16, T32) and (iii) the size of the heap, in large heap (LH) and in small heap (SH). Manure samples, according to these three factors, were carried out. Manure nitrogen (N<sub>tot</sub>, N<sub>min tot</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), C<sub>tot</sub> and other major mineral elements (P<sub>tot</sub>, K<sub>tot</sub>, Ca<sub>tot</sub> and Mg<sub>tot</sub>) content, as well as the pH, were quantified. For the second trial, the manure stored in a covered pit (CP) was parked in a large heap for eight days (T0, T2, T4, T8) and subjected to watering, corresponding to a simulated rainfall of 50 mm. Soil samples (0-10 cm) were taken and soil N content (N<sub>min tot</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) was measured. Parking time has a significant effect on mineral nitrogen losses, particularly during the first two days of field trials. The loss by volatilization, which corresponds to a transformation of ammonium (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) into ammonia (NH<sub>3</sub>) reaches 22% of the ammonium initially present in manure. On the other hand, organic nitrogen was not mineralized during the 32 days of parking and therefore did not contribute to volatilization. The other elements were not lost during the parking either. The size of the heap did not have a significant effect on nitrogen loss. The leaching trial resulted in the leaching loss of 74.5% of total mineral nitrogen, from the manure to the soil, during the first two days after the simulated rainfall. Significant losses of mineral nitrogen occurred through volatilization and leaching, during the first two days after spreading manure. Manure rapid burial in the soil would limit losses by volatilization.

**Keywords:** cattle manure, parking time, volatilization, ammonia, leaching, heap size

## INTRODUCTION

Selon le Comité de la Sécurité Alimentaire mondiale (CSA, 2016), le développement durable de l'agriculture, y compris l'élevage, est essentiel pour réduire la pauvreté et parvenir à la sécurité alimentaire et à une bonne nutrition des populations. Une des recommandations évoquées par ce comité est de promouvoir et soutenir les systèmes mixtes d'agriculture et d'élevage dans les petites exploitations agricoles (familiales). Elle vise à renforcer la production agricole des exploitations familiales par diverses pratiques, entre autres le renforcement de l'intégration des activités d'agriculture et d'élevage. Le CSA se donne comme objectifs aussi de satisfaire les besoins en intrants et en énergie dans des conditions durables, notamment par l'utilisation de la force motrice animale et l'utilisation des effluents d'élevage comme source engrais. D'après (Herrero *et al.*, 2010) ces systèmes mixtes culture-élevage pourraient être la clé de la sécurité alimentaire future, puisque la plupart de la population, notamment dans les pays en voies de développement, et une grande partie de la croissance démographique future s'y produira.

En général, l'Intégration Agriculture-Élevage (IAE) repose sur trois piliers biotechniques permettant le recyclage de la biomasse et de l'énergie entre le système agricole et le système d'élevage : (i) la traction (énergie) animale pour certaines pratiques sur les systèmes de culture, (ii) la production d'aliments (résidus de cultures, cultures fourragères) pour l'alimentation des animaux, et (iii) la production de fumure organique issue des déjections animales pour la fertilisation des systèmes de culture (Bénagabou *et al.*, 2017).

Le fumier figure parmi les intrants agricoles les plus importants dans l'exploitation agricole mixte, notamment dans les pays du sud (Tittonnel *et al.*, 2007). Les agriculteurs l'utilisent fréquemment dans la plupart des cultures (maraichère, vivrière, etc.) comme source de nutriments pour les plantes. En absence d'engrais minéraux (ou de synthèse) ou d'autres apports de nutriments, le fumier est souvent la seule source de nutriments disponible pour les agriculteurs africains pour fertiliser leurs sols et souvent aussi le seul apport de carbone (C) car les résidus de récolte sont retirés des champs après récolte (Tittonnell *et al.*, 2007).

Le fumier de ferme est le produit de la fermentation d'un mélange de pailles plus ou moins piétinées et de déjections animales. C'est un fertilisant organique qui a pour fonction d'améliorer la qualité du sol en lui fournissant de la matière organique (MO). Les amendements organiques ont des effets fertilisants sur le long terme, ainsi que des effets positifs sur les

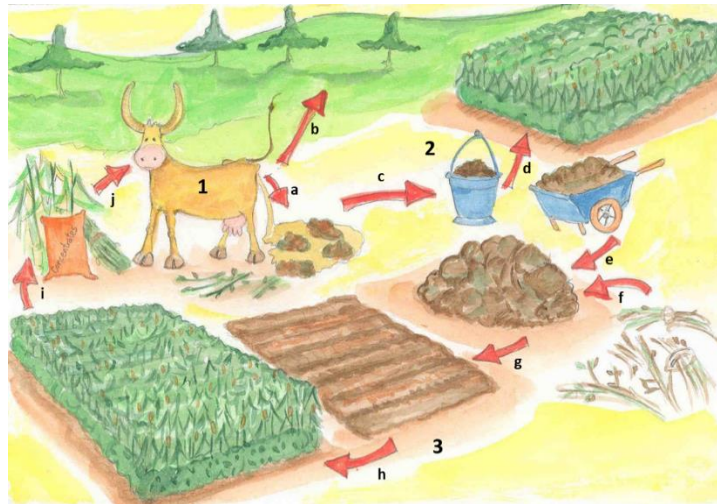
propriétés physiques et biologiques du sol (Agrotransfert, 2017). Le fumier de bovin possède donc de bonnes propriétés d'amendement et fertilisantes (ADEME, 2018).

Les MO tel que les fumiers ont de multiples rôles et sont responsables de nombreux services écosystémiques dans le sol (Dominati *et al.*, 2010) : (i) par leur action physique, elles protègent le sol contre l'érosion et améliorent aussi la structure du sol, ce qui leurs procurent le rôle de fonction de support, (ii) sur le plan biologique, elles sont des milieux de cultures et de vie pour la faune et la flore tellurique, (iii) les MO participent aussi à la maintenance de la régulation des émissions des gaz à effet de serre (GES), d'où la fonction de régulation, (iv) comme action chimique, les MO ont la capacité de solubiliser, de complexer ou d'agréger des particules permettant de limiter la lixiviation et de stocker les éléments nutritifs dont la plante a besoin tel que le phosphore, le potassium et l'azote (fonction d'approvisionnement) (Moureaux, 1973).

Une importance particulière est portée sur l'azote (N) qui est un constituant majeur des êtres vivants. C'est un élément indispensable à la vie car il intervient dans la constitution de nombreuses biomolécules telles que les protéines, les acides nucléiques, les nucléotides ou la chlorophylle (Brouquisse et Puppo, 2019). L'N est donc un facteur limitant majeur pour la croissance des animaux et des végétaux dans les agroécosystèmes (Portejoie *et al.*, 2002). Cependant, dans le fumier, l'N est plus facilement perdu que les autres éléments minéraux. Comme les autres nutriments, l'N peut être perdu sous l'action de fortes précipitations, soit en s'infiltrant dans le sol (lixiviation), soit par ruissellement à la superficie du sol (lessivage). Cependant, contrairement aux autres nutriments, l'N peut aussi être perdu sous des formes gazeuses, notamment par volatilisation (Barrington *et al.*, 2002). Dans tous les cas, ces pertes entraînent une diminution de la qualité fertilisante du fumier.

### **Contexte de l'étude**

Rufino *et al.* (2006) ont effectués des recherches sur le transfert de l'azote au niveau d'exploitation intégrant l'agriculture et l'élevage. Chaque étape de ce transfert permet de calculer les bilans azotés (Figure 1).



**Figure 1.** Transfert de l'azote au niveau de l'exploitation (Rufino *et al.*, 2006)

Le transfert de l'N au niveau de l'exploitation peut être décrit en trois étapes majeures :

- Production d'effluents d'élevage (1). Une fraction de l'azote alimentaire consommée par l'animal est excrétée dans les fèces et urines. Ces effluents peuvent rester dans le parc (flux a) et/ou sur les parcours (flux b) selon le mode de gestion des animaux.
- Collecte et gestion des effluents d'élevage (2). Les effluents sont recueillis (flux c) puis appliqués directement sur les terres cultivées (flux d) ou compostés (flux e) ; des résidus de culture peuvent être ajoutés aux effluents (flux f) pendant le stockage.
- Minéralisation de l'azote dans le sol, prélèvement et transformation par la plante (3). Les effluents d'élevage et/ou le compost sont épandus sur les terres cultivées (flux g) ; les plantes absorbent la fraction minéralisée de l'azote, seule rendue disponible (flux h). L'azote assimilé par la plante est partitionné dans les grains et dans les parties végétatives (flux i). Les résidus des cultures, non-valorisés par l'homme, peuvent être utilisés pour l'alimentation des animaux (flux j).

Tout au long de ce schéma, des pertes en azote peuvent se produire suivant le mode de gestion du fumier. Les étapes lors desquelles les pertes d'azote sont les plus importantes concernent : (i) la gestion du fumier et son stockage à la ferme ; (ii) la gestion du fumier lors de son épandage et enfouissement au champ. Selon les modalités de gestion des biomasses dans le système, l'efficacité d'utilisation de l'azote est très variable avant l'enfouissement du fumier (Salgado *et al.*, 2011) et, dans certaines conditions, la totalité de l'azote peut être perdue.

Les pertes au niveau de l'étable et les conditions pour limiter ces mêmes pertes sont assez bien renseignées pour les systèmes agricoles africains (Rufino *et al.*, 2006). Cependant, les pertes lors du transport au champ et avant l'enfouissement sont encore peu étudiées.

À Madagascar, certains paysans déposent d'abord les tas de fumier dans le champ avant de les enfouir. À cause de cette pratique, une possibilité de perte d'azote par volatilisation et lixiviation peut se produire durant cette période.

## **Problématique**

Durant toutes les étapes de transfert de l'azote dans l'exploitation, des pertes peuvent apparaître et donc l'efficacité de conservation de l'azote (et des autres nutriments) circulant dans le système peut être réduite, dont lors du transport et avant l'enfouissement du fumier au champ. Face à cette situation, la question suivante se pose : **Quelles sont les éventuelles pertes en azote par volatilisation entre la fin de stockage à la ferme et avant l'étape d'enfouissement dans le sol ? Est-ce que les autres éléments tels que le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium peuvent-ils aussi se perdre lors de cette période que nous appelons de « stationnement » ?**

## **Objectifs de l'étude et hypothèses**

L'objectif global de cette étude est : (i) de déterminer l'évolution des pertes d'azote du fumier par volatilisation après sa sortie de la ferme, c'est-à-dire durant l'étape de dépôt en tas sur une parcelle, avant l'enfouissement dans le sol, (ii) de connaître si d'autres éléments majeurs (phosphore, potassium, calcium, magnésium) peuvent aussi être perdus lors du « stationnement » du fumier au champ et (iii) de déterminer l'importance de la lixiviation de l'azote lors de précipitations (simulées).

Les objectifs spécifiques sont : (i) d'identifier la relation entre le temps de stationnement et la volatilisation ammoniacale, (ii) d'identifier la perte des autres éléments (P, K, Ca, Mg) du fumier lors du stationnement, (iii) de connaître la teneur en azote minéral dans le sol après une simulation de précipitation.

Face à ces objectifs, trois hypothèses sont posées :

H1 : l'importance de la perte d'azote par volatilisation est reliée à la durée du stationnement et à la taille du tas ;

H2 : d'autres éléments minéraux (P, K, Ca, Mg) du fumier ne sont pas perdus lors du dépôt en tas en absence de lixiviation ;

H3 : un arrosage avec 50 mm d'eau, simulant une forte précipitation, induit des pertes d'azote minéral (et d'autres éléments minéraux) par lixiviation au niveau du fumier.

## I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1. Transfert de biomasses et de fertilité dans les exploitations en Intégration Agriculture-Élevage

Généralement, l'IAE peut être vue comme un ensemble de pratiques qui mobilisent les processus écologiques inhérents au fonctionnement des écosystèmes (Bonaudo *et al.*, 2014), et plus particulièrement en tant que réseau de flux de nutriments (Altieri et Nicholls, 2005). L'IAE offre divers avantages dans les exploitations agricoles. Selon Altieri et Nicholls (2005), l'IAE permet aux animaux de créer des synergies bénéfiques qui permettent généralement aux agroécosystèmes de pérenniser leur propre fertilité des sols, la lutte contre les parasites et la productivité. Cette synergie se traduit souvent par une augmentation de la productivité agricole au niveau des ménages (et de la région) d'une manière durable (Herrero *et al.*, 2010). En effet, le fumier animal peut contenir de grandes quantités de nutriments (notamment d'azote) disponibles, ce qui améliore la croissance des plantes (Ruffino *et al.*, 2006). Powell *et al.* (2004) affirment que le bétail joue un rôle majeur dans la concentration et la redistribution des ressources en nutriments, à la fois au sein des exploitations et entre elles, ainsi que dans la récolte du fourrage (et des nutriments) sur les terres communes. Manlay et Ickowicz (2000) indiquent toutefois que les flux de biomasses à l'échelle d'un terroir se présentent sous plusieurs formes et dépendent de plusieurs paramètres car les pratiques de gestion de la fertilité changent suivant la distance au village, la conduite du parcage des animaux, la quantité et la qualité du fourrage disponible, le statut foncier de l'exploitant.

Le réseau de flux de nutriments (Altieri et Nicholls, 2005) liés aux systèmes de production intégrant agriculture et élevage se traduit par plusieurs transferts de fertilité. Ils se caractérisent par des flux de matières organiques et minérales liés à leur transport par les fermiers, par le déplacement du cheptel, ainsi que par des phénomènes naturels (érosion hydrique et éolienne) (Dugué, 1998). Par exemple, la mobilité des troupeaux assure les transferts de fertilité des zones de pâturage vers les aires cultivées (Fanjaniaina, 2018). Par ailleurs, durant le pâturage, les animaux peuvent entraîner une redistribution spatiale des éléments nutritifs par des excréments localisés (Rotz *et al.*, 2005). Cependant, l'inconvénient pour les bovins élevés au pâturage c'est qu'ils rejettent de l'azote de façon aléatoire, là où ils passent et, bien que cet azote soit potentiellement utile pour fertiliser les pâturages et les champs cultivés qui sont pâturés après la récolte, il est également susceptible d'être perdu (Ruffino *et al.*, 2006). Par contre, pour les animaux élevés en stabulation, les effluents produits ne sont pas épandus immédiatement sur les terrains extérieurs et il n'y a pas de retour direct des éléments fertilisants vers les champs. Ce retour des nutriments se fait après une phase de stockage au sein de la ferme, puis par des



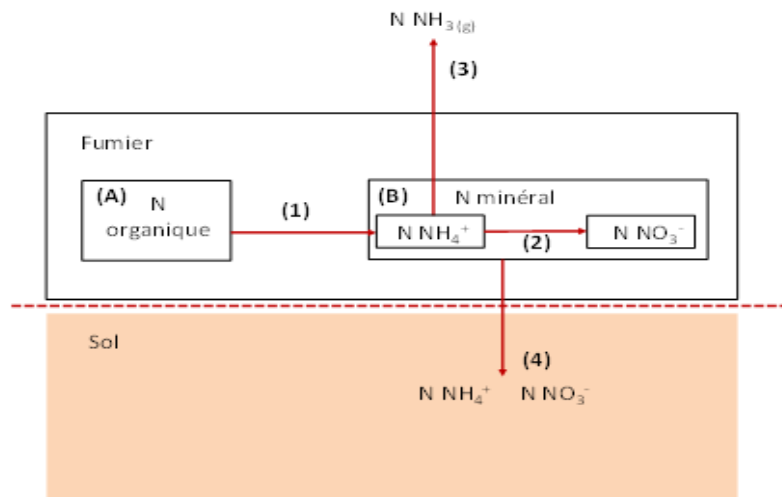
apports sur certaines parcelles en fonction du choix de l'exploitant. Ces transferts de fertilité sont déterminés par différents facteurs : (i) la taille du cheptel et la quantité d'amendements organiques produits sur l'exploitation ; (ii) le niveau d'équipement des exploitations (notamment en matériels de transport) ; (iii) la fertilité des sols et les besoins des cultures ; et surtout (iv) l'importance accordée par les paysans à la fumure animale (Fanjaniaina, 2018). Le mode et l'ampleur du recyclage des éléments fertilisants dépendent aussi du type (grands ou petits ruminants, porcins, lapins et volaille) et du nombre d'animaux disponibles dans un système de production (Lekasi *et al.*, 2003).

La première étape de transfert de nutriments correspond principalement à la transformation des biomasses alimentaires par les animaux d'élevage (digestion et métabolisme) ; la seconde à la collecte et à la manipulation des effluents (fèces et urine) accompagnée du stockage à la ferme des divers produits organiques résiduels (principalement le fumier) ; et la troisième à la mise à disposition des nutriments dans le sol, après épandage et minéralisation des amendements organiques, qui seront absorbés et convertis par les cultures en biomasse (alimentaire ou non-alimentaire) (Figure 1). Ces flux se traduisent donc par le transfert des nutriments provenant principalement des résidus de cultures et des cultures fourragères stockés (Petersen *et al.*, 2007). Lors de ces diverses étapes, des pertes de nutriments plus ou moins importantes peuvent avoir lieu en fonction des modes de gestion des résidus organiques produits au niveau du système d'élevage.

## **I.2. Bilan en éléments nutritifs du fumier**

### **I.2.1. Formes et transformation de l'azote dans le fumier**

Dans le fumier, l'N est présent sous des formes organiques et minérales. L'N organique, issue des résidus de plantes (fourrages, litières, etc.) plus ou moins transformés par la digestion animale, est une forme de réserve non-utilisable par les plantes. Il doit subir des étapes de transformation avant de pouvoir fournir à la plante des éléments nutritifs sous les formes minérales ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ) dont elle a besoin. La Figure 2 résume les principales formes d'azote présentes dans les fumiers, avec les différentes transformations qui s'opèrent au cours des transferts, et les différents types de perte pouvant se produire : (i) la minéralisation de l'azote organique en azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), puis (ii) en azote nitrique ( $\text{N-NO}_3^-$ ) ; (iii) la volatilisation de  $\text{NH}_3$  et (iv) la lixiviation d'azote minéral ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ). Les processus de transformation de l'azote (minéralisation, nitrification) sont décrits en détail en Annexe I.



**Figure 2.** Formes d'azote dans le fumier et pertes (Auteur, 2021)

(A) : Azote organique ; (B) : Azote minéral  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  ; (1) : Minéralisation de l'azote organique en azote minéral ; (2) : Minéralisation de  $\text{N-NH}_4^+$  en  $\text{NO}_3^-$  ; (3) : Volatilisation de  $\text{N-NH}_3$  ; (4) : Lixiviation de l'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) et du nitrate ( $\text{N-NO}_3^-$ ).

### I.2.2. Risques de pertes de nutriments dans le fumier

Depuis l'étable jusqu'à l'enfouissement dans le sol, le fumier est sujet à des pertes continues et progressives en carbone et en nutriments ou éléments fertilisants. Ces pertes en nutriments tels que l'azote varient considérablement, en fonction du bétail et du mode de gestion du fumier (Titonnell *et al.*, 2009). Dans les exploitations, les pertes en N peuvent varier entre 10 à 90% de l'N initial.

Les risques de perte les plus importants dans le fumier se font par deux mécanismes principaux, la volatilisation et la lixiviation (Snijders *et al.*, 2009) :

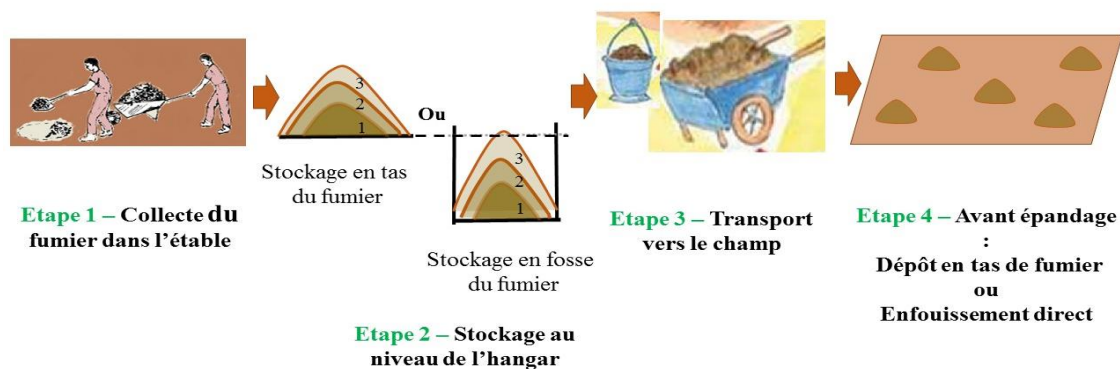
- (i) les pertes gazeuses par volatilisation (une description des mécanismes est présentée en Annexe II), lors de la collecte, du stockage et de l'application au champ, constituaient plus de 90% de toutes les pertes d'azote (Barrington *et al.*, 2002). La dénitrification peut aussi induire des pertes gazeuses en conditions anaérobies, suite à la transformation du nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) en divers gaz azotés ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ) (Andrinambinina, 2013). Si le taux de dioxygène est en partie suffisant, la dénitrification est alors en partie arrêtée aux stades  $\text{NO}$  ou, plus souvent,  $\text{N}_2\text{O}$ , plutôt que  $\text{N}_2$ . Une faible porosité des substrats à cause d'une densité apparente élevée du fumier ou lorsque le tas de fumier est très fermé conduit à cette condition d'anaérobiose (Bernal *et al.*, 2009) ;

- (ii) la lixiviation des nutriments solubles, en particulier de l'urine (une description des mécanismes est présentée en Annexe III).

Les pertes gazeuses ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) et par lixiviation et ruissellement (N, P) peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement en lien avec le réchauffement climatique, l'eutrophisation des eaux ou l'acidification des sols. Les principaux effets environnementaux des pertes d'azote sont décrits en Annexe IV.

### **I.3. Modes de gestion des fumiers dans les petites exploitations familiales en Afrique**

Le fumier est une ressource nutritive majeure dans de nombreux systèmes agricoles tropicaux, mais sa quantité est souvent limitée (Achard et Banoin, 2003), d'où la nécessité de recycler les MO pour améliorer et maintenir la santé du sol au profit de la plante. Les diverses étapes entre la collecte à l'étable et l'épandage aux champs sont schématisées dans la Figure 3. Dans les petites exploitations agricoles de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique australe, les fumiers sont collectés à l'étable (étape 1), puis souvent stockés en tas ou en fosse (étape 2), ensuite transportés au champ (étape 3), avant d'être épandus sur les parcelles (étape 4) avant le semis ou la plantation (Nzuma et Murwira 2000 ; Lekasi *et al.*, 2003). Lors du stockage, ils sont normalement mélangés avec d'autres MO telles que les résidus de culture, de la litière, des déchets ménagers, etc. La plupart du temps, l'urine ne peut pas être collectée, sauf dans les systèmes où les bovins sont en stabulation permanente avec un sol dur. Un certain nombre d'agriculteurs recouvrent les tas de fumier sous un simple toit, ou les recouvrent de matériaux comme de la paille ou du film plastique (Onduru *et al.*, 2008 ). Le fumier est souvent homogénéisé avant son transport au champ. Au champ, l'agriculteur choisit entre plusieurs pratiques avant l'épandage du fumier : certains enfouissent directement leur fumier alors que d'autres le laissent à la surface du sol durant une période de temps (Rochette, 2008). Diverses options peuvent être choisies concernant le mode de mise en tas au champ : soit le dépôt du fumier est réalisé à l'extérieur de la parcelle sous forme d'un grand tas, avant distribution en petit tas ou enfouissement direct ; soit une distribution directe du fumier en tas plus ou moins grands sur la parcelle.



**Figure 3.** Schéma conceptuel de la pratique d'utilisation du fumier (Auteur, 2021)

## **I.4. Pratiques de gestion des fumiers pour minimiser les pertes**

### **I.4.1. Minimiser les pertes au niveau de l'étable (étape 1)**

En milieu rural, les MO sont souvent assez mal gérées. Les déjections humaines sont rarement valorisées alors qu'ils correspondent à des quantités non-négligeables de nutriments. D'après Rose *et al.* (2015), l'N des matières fécales humides est majoritairement sous forme de protéine non-digestible, d'acide nucléique ou encore de protéine venant des bactéries. L'excrétion fécale humaine est de l'ordre de 1,8 g/individu/jour, ce qui ne représente que 14% de la concentration en N. Les excréments fécaux de P et K sont respectivement de 0,35 et 0,7 g/individu/j (Meininger et Oldenburg, 2009). Quant à l'urine, sa valeur médiane quotidienne pour un individu est de 1,4 litres ; alors les quantités moyennes de N, P et K excrétés sont de 11,2, 2,52 et 1,68 g/individu/j, respectivement. Pour une famille de cinq personnes, ceci correspond à environ 20 kg de N, 4,6 kg de P et 3,1 kg de K par an.

Concernant le fumier, une meilleure gestion de la collecte des excréments et des urines permet aussi de limiter et minimiser les pertes en nutriments (Salgado, 2018). Lors de la digestion des ruminants, l'azote en excès, non-digéré et métabolisé, est excrété dans les fèces et dans les urines (sous forme d'urée). La quantité d'N dans les fèces varie de 19 à 136 g N/animal/j et celle dans l'urine de 0,1 à 444 g N/animal/j, en fonction du type d'animal et des aliments ingérés (Rufino *et al.*, 2006). Nennich *et al.* (2006) ont estimé les quantités journalières de N et d'autres éléments (P, K) dans les excréments et les urines produites suivant la catégorie de l'animal. Par exemple, une vache en lactation peut produire 7,25 kg d'excréments contenant 0,22 kg de N et 23,1 litres d'urine avec 0,217 kg de N ; une vache tarie excrète 0,090 kg de N fécal et 0,138 kg de N urinaire ; un veau excrète 0,024 kg de N fécal et 0,039 kg de N urinaire.

Dans la pratique, la fréquence de collecte des fèces et des urines a une conséquence sur la perte en élément dans l'étable. Ces matières sont parfois laissées dans le local durant des semaines ou même des mois : les pertes d'N urinaires sont importantes non seulement par volatilisation mais aussi par dénitrification et lixiviation (Martins et Dewes, 1992). Selon Salgado (2018), le raclage fréquent permet de mieux récupérer les éléments et réduire la perte en N. La facilitation du raclage est liée à la conception de l'étable, par exemple, dans les systèmes hors sols où le sol est en béton ou en pavé, presque la totalité de l'N pourrait être récupéré lorsque la gestion s'effectue correctement. En fait, les sols pavés évitent que les fèces et l'urine ne s'infiltrent dans le sol et permet ainsi d'humidifier et d'enrichir la paille utilisée dans la litière (Salgado, 2018).

L'ajout de la paille au niveau de l'étable est aussi une pratique permettant à la fois à minimiser les pertes d'azote mais aussi de récupérer les urines des bovins. D'après Nzuma et Murwira (2000), l'ajout de paille permet de réduire la perte d'N par volatilisation de 50% dans les urines et excréments combinés des bovins. Pour les fèces seuls, cet ajout de litière réduit la perte en N jusqu'à 80%. Lekasi *et al.* (2003) ajoutent que le type de fibre qui compose la litière a un rôle majeur dans l'absorption de l'urine lors du raclage et du stockage. Une autre alternative pour diminuer les pertes en NH<sub>3</sub> à l'étable consiste à diluer le fumier avec de l'eau. D'après Huijsmans (2003), cette pratique permet de diminuer rapidement la concentration d'ammonium et donc de limiter la transformation en gaz ammoniacal. En résumé, la quantité d'N qui se perd au niveau de l'étable dépend donc étroitement de l'utilisation de la litière et de la fréquence et du mode de collecte du fumier et des purins (Salgado, 2018).

#### **I.4.2. Minimiser les pertes gazeuses lors du stockage et épandage (étapes 2 à 4)**

Lors du stockage à la ferme, les pertes d'azote peuvent se situer entre 10 à 40% d'après Eghball *et al.* (1997). Les pratiques de gestion utilisées par les paysans ont une influence sur l'ampleur de cette perte. L'exposition directe du fumier au soleil et au vent favorise les pertes en carbone et autres éléments nutritifs (Tittonell *et al.*, 2007). L'étude de Tittonell *et al.* (2009), comparant trois modes de stockage de fumier au Kenya dont : (i) des tas de fumier en plein air ; (ii) des fosses à fumier en plein air ; et (iii) des tas de fumier sous abris, a montré que :

- les fumiers stockés sous abris ont retenu plus d'N avec une perte de 54% seulement contre 60 et 70% pour les autres modes de stockage, (i) et (ii), respectivement ;
- les fumiers stockés sous abris ont retenu plus de K avec seulement 20% de perte, tandis que (i) et (ii) ont une perte respective de 68% et 75% ;

- pour le cas du phosphore, c'est le tas de fumier stocké en plein air (i) qui a induit le moins de perte avec 48% contre 57% pour le fumier stocké sous abri ;
- en ce qui concerne la perte en carbone, (iii) retient moins de C avec seulement 30% par rapport à sa teneur initiale, tandis que (i) et (ii) retiennent jusqu'à 55% du C.

Ainsi, le mode de stockage adopté par les paysans peut modifier le niveau de perte de nutriments dans le fumier. Le stockage du fumier en tas couvert sous un toit ou sous abri est un moyen efficace car il permet d'obtenir un ratio C/N favorable (Snijders *et al.*, 2009), de réduire la production de GES (Hansen *et al.*, 2006) et surtout de mieux retenir les éléments fertilisants comme l'azote et le potassium (Tittonell *et al.*, 2009). En fait, la couverture du tas réduit le contact entre l'air et la MO (Barrington *et al.*, 2002) et diminue la diffusion de l'ammoniac vers l'atmosphère (Huijsmans, 2003). D'après Wade *et al.* (2018), un système d'élevage avec embouche dans l'étable et une gestion de fumier par couverture du tas de fumier a obtenu une efficacité globale d'azote de presque 90%, tandis qu'un système similaire sans couverture du fumier ne possède qu'une efficacité globale en N de 58% et un système d'élevage extensif avec une divagation spontanée sans gestion de fumier n'a que 38% de son efficacité globale.

L'entreposage des fumiers au champ conduit aussi à une perte par volatilisation d'azote. D'après Rochette (2008), les fumiers laissés à la surface du sol peuvent perdre entre 5 à 100% de leur N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par volatilisation. En fait, la moitié de la volatilisation s'effectue en général dans les 10 premières heures lorsque le fumier est épandu à la surface du sol. De ce fait, l'incorporation des fumiers au sol, très rapidement après l'épandage, limite les pertes d'azote ammoniacal (Havard *et al.*, 2007). Le pH légèrement acide du sol dans certains pays comme à Madagascar permet rapidement de tamponner le pH légèrement basique du fumier et de stopper la transformation de l'ammoniac en ammonium. De plus, les pratiques d'enfouissement permettent de limiter le contact du fumier avec l'atmosphère.

Le compostage est aussi un moyen à la fois d'améliorer la qualité des fumiers et de minimiser les pertes. Néanmoins, d'après Bernal *et al.* (2009), les fumiers associés avec les urines et les déchets sont souvent entassés avec peu d'attention pour le contrôle des conditions du processus (aération, température, perte d'ammoniac, etc.) et avec une méthodologie rudimentaire. Or, une maîtrise de ces techniques permet d'obtenir un bon compost de bonne qualité avec moins de pertes en C et N, et surtout sans nuisance olfactive.

Le principe du compostage est de mélanger le fumier avec d'autres matières organiques en les entassant les unes aux autres. Lors du compostage, la taille des particules a une influence sur la

disponibilité du carbone utilisé par les microorganismes pour immobiliser l'N (Barrington *et al.*, 2002). Les particules doivent fournir des espaces poreuses entre 35 à 50% pour assurer une bonne continuité des activités microbiennes (Bernal *et al.*, 2009). De ce fait, le retournement est un facteur clé du compostage, car il diminue la densité du tas, régularise la température, élimine l'excès d'humidité et de CO<sub>2</sub> et fournit de l'O<sub>2</sub> pour les processus biologiques (Bernal *et al.*, 2009). Cependant, le retournement du compost favorise les pertes en NH<sub>3</sub> (Parkinson *et al.*, 2004), les pertes d'N pouvant atteindre presque 50% (Martins et Dewes, 1992). De ce fait, en absence de retournement, il existe une réduction importante de perte en NH<sub>3</sub> jusqu'à 90 à 95% (Petersen et Sommer, 2011). Le retournement permet donc d'obtenir un compost mure, mais il faut savoir régulariser sa fréquence pour diminuer l'émission d'ammoniac. L'humidification peut aussi être une solution pour diminuer la volatilisation (Meisinger et Jokela, 2000). D'après Bussink et Oenema (1996), une précipitation de l'ordre de 7 à 9 mm étant suffisante pour réduire la perte d'ammoniac.

Le rapport C/N est aussi un paramètre important à considérer lors d'un compostage. Snijders *et al.* (2009) affirment qu'un ratio entre 25 à 35 est idéal pour diminuer les pertes d'azote. En fait, l'assimilation de l'N par les microorganismes sera favorisée au détriment de l'accumulation d'azote minéral. Cette immobilisation de N par les microorganismes dépend aussi de la dégradabilité du carbone. Une MO de qualité, facilement biodégradable implique une immobilisation active du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par la biomasse microbienne, alors que la présence de la biomasse organique moins biodégradable augmente les émissions de NH<sub>3</sub>. La sélection du type de matière organique à composter est donc importante pour minimiser la perte en NH<sub>3</sub>. Selon (Parkinson *et al.*, 2004), le choix d'une MO dégradabile, comme les céréales riches en C et pauvre en N, permet de diminuer les pertes en NH<sub>3</sub>. Mahimairaja *et al.* (1994) ont constaté une perte d'azote de seulement 11% pendant 12 semaines de compostage de fumier de volaille et de paille de maïs, tandis que les pertes ont représenté 26% de l'azote total dans le compostage du fumier de volaille avec des déchets de coton. En fait, la paille possède une teneur élevée en cellulose facilement décomposable, qui constitue une source d'énergie facilement disponible pour la multiplication des microorganismes et immobiliser le N du fumier (Parkinson *et al.*, 2004).

Outre la volatilisation, la dénitrification peut contribuer aux pertes de N. Selon Petersen *et al.* (2013), l'importance des émissions de N<sub>2</sub>O dépend non seulement de la composition mais aussi des modes de gestion des fumiers ou des composts. Ces émissions proviennent d'un processus

microbien de respiration anaérobie qui utilise l'ion nitrate comme accepteur d'électrons, opéré en milieu hypoxique ou anoxique. Pour diminuer les facteurs de perte d'azote par dénitrification, il faut maintenir des conditions d'aération suffisantes dans le compost (Bochove, 1993). Le retournement du compost et son aération favorisent la voie ammoniacale et limitent fortement la dénitrification. Compte tenu des propriétés du N<sub>2</sub>O comme GES, il est important de limiter la dénitrification. D'après Petersen et Sommer (2011), une couverture synthétique perméable est une solution pour limiter à la fois les émissions de N<sub>2</sub>O et de NH<sub>3</sub>.

#### **I.4.3. Minimiser les pertes par lixiviation**

La réduction de la lixiviation nécessite la protection du fumier contre les précipitations. Le revêtement du sol de l'étable par une surface en dur (pavés, béton) et le recouvrement de l'aire de stockage du fumier par une toiture sont des moyens de minimiser cette perte (Salgado, 2018). Bernal *et al.* (2009) rajoutent que les pertes par lixiviation peuvent être réduites en contrôlant la teneur en humidité du tas par un système de compostage, en concevant l'installation avec une couverture contre la pluie et un système de collecte et de recirculation des lixiviats dans le compost.



## II. MATERIEL ET METHODES

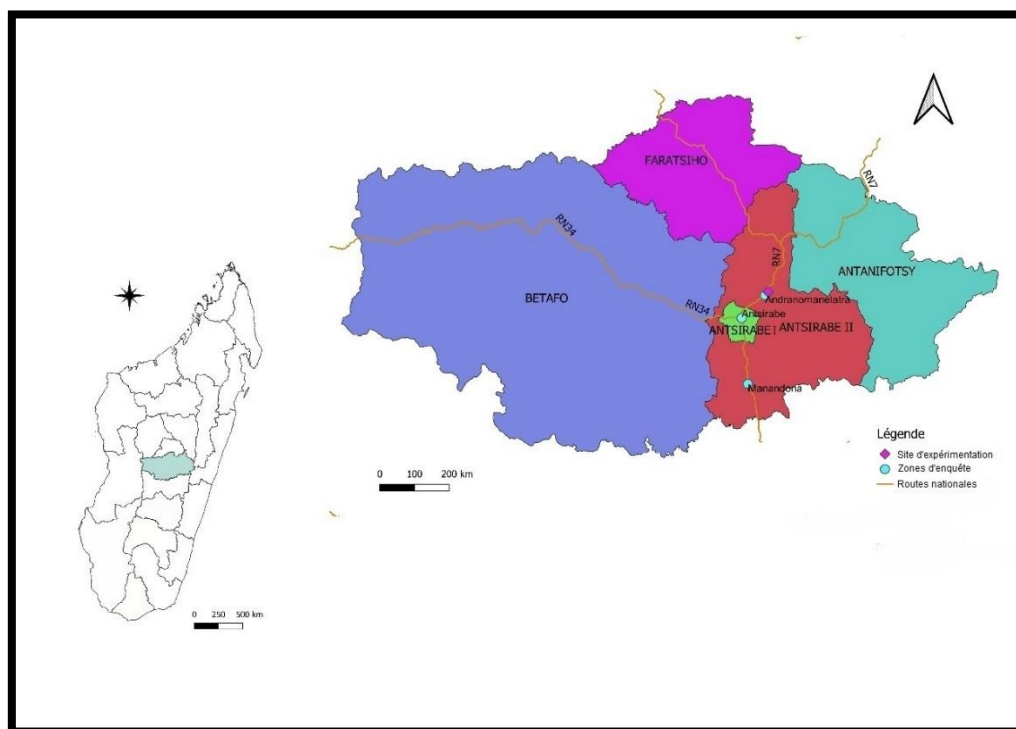
### II.1. Généralité sur la zone d'étude

#### II.1.1. Localisation

La zone d'étude se situe dans la région du Vakinankaratra, une région des Hautes Terres de Madagascar avec une altitude moyenne de 1 800 m (DGEP, 2008). C'est une des zones les plus productives de Madagascar en termes d'agriculture, tant pour la culture du riz (notamment le riz pluvial) que pour les cultures maraichères. En ce qui concerne l'élevage, l'exploitation des bovins laitiers occupe une place importante, le triangle laitier couvrant une partie importante de la région.

L'étude s'effectue en deux étapes, la première consiste à faire une enquête au niveau d'exploitations agricoles, situées dans la commune rurale d'Andranomanelatra, la commune rurale de Manandona et la commune urbaine d'Antsirabe I (Figure 4).

La seconde étape de l'étude est d'effectuer une expérimentation sur la période où les fumiers restent au champ, avant l'enfouissement, que nous appelons de « stationnement ». Cette étude a été effectuée dans la commune rurale d'Andranomanelatra, dans le district d'Antsirabe II à 15 km d'Antsirabe. Le site d'essai comporte les coordonnées géographiques suivantes : 19° 47' 50.3 " S et 47° 06' 31.3" E.

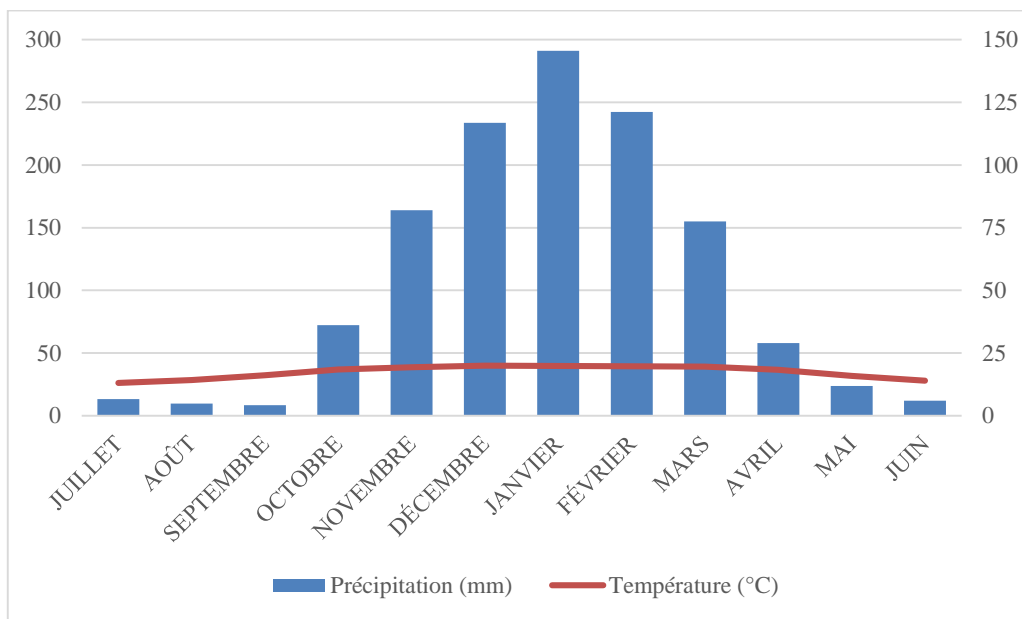


**Figure 4.** Localisation de la zone d'étude

### II.1.2. Climat du site d'expérimentation

Le territoire est caractérisé par un climat tropical d'altitude. Dans la classification bioclimatique, la région du Vakinankaratra appartient à l'étage subhumide avec des saisons sèches qui peuvent être atténuées par les brouillards (Alvarez, 2012).

La courbe ombrothermique de Gaussen dont la formule est de  $P=2T$  présente les températures et les précipitations moyennes mensuelles d'Andranomanelatra (Figure 5). Les données correspondent aux valeurs moyennes des années 2005-2020, mesurées par la station météorologique du CIRAD à Andranomanelatra. L'année est caractérisée par une saison pluvieuse et chaude, du mois d'octobre au mois d'avril, et une saison fraîche et sèche, de mai à septembre. La température moyenne annuelle durant ces 15 dernières années est de 17,3°C et la moyenne du cumul de précipitations est de 1 283 mm.



**Figure 5.** Courbe ombrothermique de Gaussen d'Andranomanelatra, moyenne 2005-2020.

### II.1.3. Sols

D'un point de vue pédologique, les Hautes Terres de Madagascar sont dominées par des collines (*tanety*), avec principalement des sols ferrallitiques (Ferralsols selon la classification de la FAO-Unesco, 1976), qui se sont développés sur le socle cristallin ancien (granites). Dans certaines zones, les sols ont été influencés par des dépôts volcaniques assez récents, avec un gradient entre des Andosols sur dépôts volcaniques épais et les Ferralsols. Les bas-fonds sont dominés par des sols colluviaux-alluviaux plus ou moins hydromorphes.

Le type de sol d'Andranomanelatra est classé de type ferrallitique gibbsitique avec couleur rouge ou ocre (Raunet, 1981). La texture est dominée par de l'argile et le pH est de 4,19 (Bevelo, 2018). La parcelle est utilisée pour une expérimentation agronomique sur le riz pluvial depuis 2010. Le terrain était en jachère en 2019-2020. Pour notre étude, nous avons utilisé une zone de la parcelle correspondant à une des bordures de la précédente expérimentation en riz pluvial. Cette zone est caractérisée par une abondance d'adventice.

## **II.2.Phase d'enquête**

Cette première étape de l'étude consiste à effectuer une enquête au niveau des exploitations pour déterminer les pratiques de gestion du fumier des paysans entre le moment de sortie de la ferme et avant l'enfouissement sur la parcelle. L'enquête a pour objectif d'obtenir une image globale des pratiques de gestion des fumiers de l'exploitation. Il s'agit notamment de : (i) identifier les raisons des pratiques de chaque exploitation en termes d'épandage du fumier ; (ii) savoir les déterminants du processus depuis la sortie du tas de stockage à la ferme jusqu'à la parcelle ; et (iii) connaître les modes de distributions des tas sur la parcelle, ainsi que leur taille (petit ou grand tas), la durée du stationnement en surface du sol avant enfouissement (1j, 2 j, 4 j, 8 j, etc.), placés de façon aléatoire ou non, épandus de façon plus ou moins homogène en surface du sol ou non, etc.

La connaissance des pratiques paysannes permet ensuite de simuler l'effet de la durée du stationnement des fumiers au champ avant leur enfouissement, par une expérimentation. Les résultats de l'enquête sont présentés dans l'annexe V.

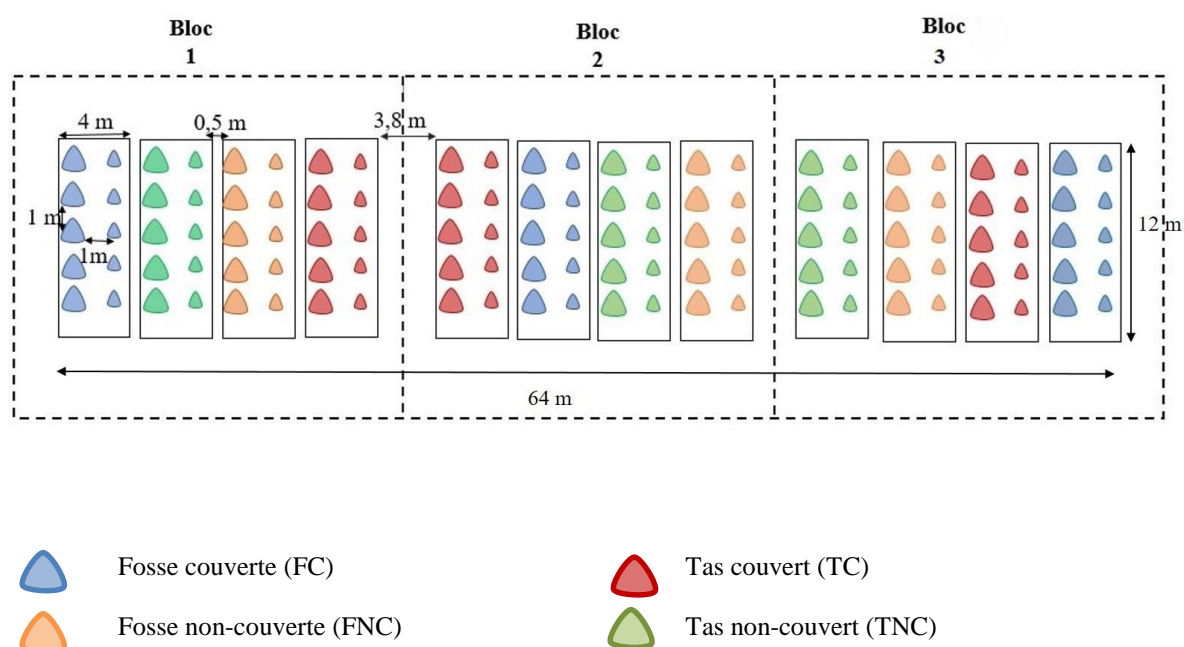
## **II.3.Phase d'expérimentation**

Cette seconde étape constitue à la mise en place d'essais pour étudier l'impact du stationnement des fumiers avant enfouissement. Cette phase d'expérimentation vise à quantifier les stocks et les flux d'azote et d'autres constituants chimiques des tas de fumier déposés sur la parcelle avant leur enfouissement.

### II.3.1. Suivi de la volatilisation de l'azote et des autres éléments dans le tas de fumier au champ

#### a. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 6) comporte trois blocs où les traitements sont répliqués trois fois de façon aléatoire. Chaque bloc possède quatre sous-blocs comportant les quatre types de fumier qui se différencient par leur mode de stockage. La totalité des sous-blocs s'élève à 12, chacun comportant des séries de cinq petits tas et cinq grands tas, afin de faire un suivi temporel. Du fait que le terrain est rectangulaire avec 12 m de largeur et 64 m de longueur, l'emplacement des blocs doit s'adapter à cette forme. Les deux séries de petit et grand tas sont déposés au champ avec une distance de 0,5 m entre tas et 1,0 m entre les deux séries, un allé de 0,5m est installé pour séparer chaque parcelle.



**Figure 6.** Dispositif expérimental pour le test de volatilisation de l'azote et estimation des pertes en d'autres éléments durant le temps de stationnement

#### b. Matériel biologique

Le fumier utilisé durant l'essai provient de diverses exploitations d'Andranomanelatra. Ces fermes se distinguent par des modes de gestion du stockage du fumier contrastés : (i) fosse à fumier couverte, (ii) fosse à fumier non-couverte, (iii) tas couvert et (iv) tas non-couvert. Le tas de fumier non-couvert se trouve sur une surface plane de l'exploitation avec une exposition permanente à l'atmosphère, tandis que le fumier à fosse non-couverte se trouve dans une fosse.

Le tas de fumier couvert est protégé par une toiture. Le fumier en fosse couverte est recouvert par de la paille, des résidus de culture ou des branches d'arbres, sans toiture.

### **c. Facteurs étudiés**

Les facteurs à étudier durant l'expérimentation sont : (i) le type de fumier suivant le mode de stockage, (ii) la taille du tas et (iii) la durée de son stationnement au champ.

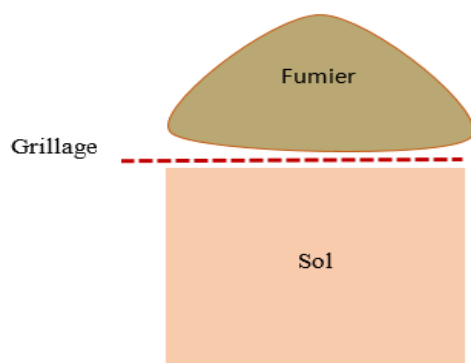
- (i) Le type de fumier, différent selon le mode de stockage à la ferme, est censé avoir une influence sur la qualité de ce dernier, avec des teneurs variables en C et nutriments.
- (ii) La taille du tas est supposée avoir une influence sur la volatilisation, les petits tas, qui ont une surface de contact plus importante par unité de masse de fumier, favorisant la volatilisation. Les tas sont répartis suivant leur taille : grand tas et petit tas.
- (iii) La durée de dépôt du tas au champ est supposée avoir une influence sur la volatilisation en  $\text{NH}_3$ , avec une évolution de la perte suivant la durée du stationnement pour les deux tailles de tas.

### **d. Conduite de l'expérimentation pour mesurer la volatilisation de l'azote et l'évolution des autres éléments dans le tas de fumier au champ**

#### **d.1. Installation au champ**

Avant installation, le sol est tout d'abord travaillé, puis les parcelles expérimentales délimitées, avant que le fumier ne soit déposé au champ. Chaque type de fumier est homogénéisé à la ferme avant d'être transporté au champ. Les tas sont pesés avant leur mise en place. La taille initiale au moment de l'installation du petit tas est de 20 kg de matière fraîche tandis que le grand tas est de 100 kg de MS. Ces quantités sont obtenues après les enquêtes menées auprès des paysans pour obtenir une estimation de la taille moyenne des petits tas et des grands tas utilisés en général au niveau des exploitations.

Pour éviter les mélanges entre le fumier et le sol, l'interface entre le fumier et le sol est séparée par un grillage (Figure 7) en nylon (avec de petites mailles de 2 mm). Cela permet de collecter le fumier facilement, sans mélange avec le sol, tout en offrant des conditions assez proches de la réalité car il n'y a pas de risque de stagnation d'eau.



**Figure 7.** Séparation de l'interface sol-fumier par un grillage

Le nombre de tas de fumier mis en place dépend du nombre de prélèvements à effectuer pour avoir un suivi dans le temps. La prise d'échantillonnage s'effectue entre le temps  $T_0$  et 32 jours ( $T+32$ ). L'échantillonnage est réalisé à cinq (5) dates de prélèvement, selon une suite géométrique, c'est à dire en doublant le nombre de jour après chaque prélèvements ( $T_0$ ,  $T+2$ ,  $T+4$ ,  $T+8$ ,  $T+16$ ,  $T+32$ ). Ce dispositif a été mis en place car le prélèvement des échantillons à une date donnée est destructif : nous considérons que nous ne pouvons pas prélever des échantillons à plusieurs dates successives sans perturber considérablement le fonctionnement du tas.

À  $T_0$ , l'échantillonnage s'effectue en prélevant le fumier venant de la ferme, ce qui correspond à son état initial (il n'y a pas de tas à  $T_0$ ). Un échantillon  $T_0$  a été effectué pour chaque mode de stockage avec trois répétitions, ce qui donne, en totalité, 12 échantillons à  $T_0$ . À partir de  $T+2$ , l'échantillonnage s'effectue sur les tas mis en place sur l'expérimentation, avec des prélèvements à cinq dates successives (de  $T+2$  à  $T+32$ ), pour deux types de tas (petits et grands) et quatre types de fumiers, avec trois (3) répétitions (blocs), ce qui conduit à 120 échantillons de fumier à prélever dans les tas. Au total, 132 échantillons seront donc collectés pour mesurer les éventuelles pertes en carbone et éléments nutritifs dans ce dispositif.

#### **d.2. Prélèvement des échantillons de fumier et préparation des échantillons au laboratoire**

Avant chaque prélèvement, la totalité du tas est pesé pour connaître l'évolution de la matière sèche (MS) du fumier. Ensuite s'effectue le mélange des différentes couches du fumier dans une cuvette pour bien homogénéiser l'ensemble et pour prélever un échantillon composite. L'obtention de ce composite se fait en effectuant des prélèvements dans différents endroits du

mélange du fumier grâce à des petits sous-échantillons. Après le prélèvement, le tas en question est donc supprimé de l'essai.

L'échantillon composite, d'environ 700-800 g, est réparti dans deux sacs en plastique :

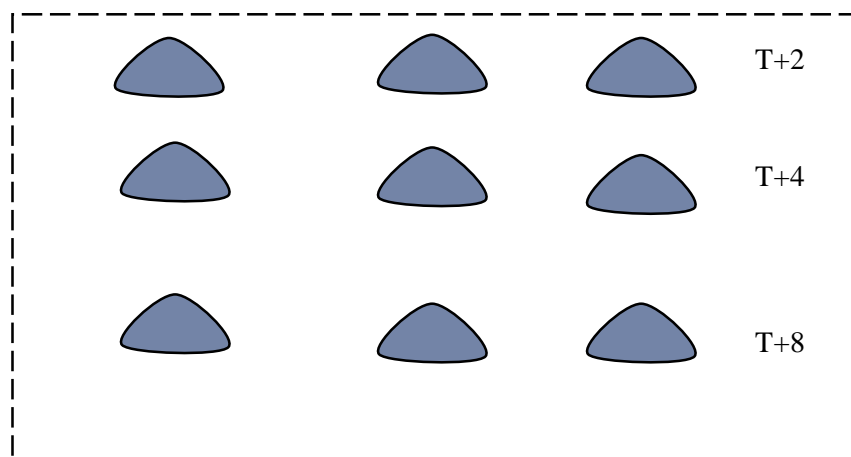
- environ 200 g est mis dans un sac hermétiquement fermé et bien rempli (pour limiter la volatilisation), maintenu au frais dans une glacière sur le terrain puis au réfrigérateur au laboratoire, pour effectuer les analyses d'azote minéral (Nmin). Pour minimiser les pertes en N, l'extraction KCl de l'échantillon s'effectue le plus tôt possible. En raison de la crise sanitaire les extractions KCl n'ont pas pu être réalisées immédiatement. Les échantillons ont alors été congelés, ce qui bloque les activités biologiques et préserve donc la teneur en Nmin.
- 500 g est mis dans un sac plastique. Lors de l'arrivée au laboratoire, 200 g de l'échantillon est séché à l'étuve à 60°C et l'humidité est déterminée. Ensuite, l'échantillon est broyé grossièrement à environ 2 mm avec un broyeur pour végétaux. Un sous-échantillon de 20 à 30 g est ensuite broyé plus finement pour réaliser les analyses des teneurs en nutriments (Ctot, Ntot, P, Ca, Mg, K). Le reste de l'échantillon (300 g), qui n'est pas broyé, est gardé en réserve en cas de nécessité. Pour la détermination de Ctot et Ntot, un broyage très fin (200 µm) est nécessaire.

### **II.3.2. Expérimentation pour la détermination de la lixiviation**

#### **a. Dispositif expérimental**

Le second dispositif (Figure 8) vise à quantifier la quantité d'azote lixivié après une simulation de pluie, effectuée en arrosant le tas. Un échantillonnage du sol sous le tas de fumier est nécessaire pour la quantification de l'azote lixivié. Ce dispositif renferme trois blocs (répétitions), chacun composé par trois grands tas, avec des prélèvements à trois dates (T+2), (T+4) et (T+8). Au total, neuf (9) grand tas de fumier sont utilisés pour ce test de lixiviation. Comme dans le premier dispositif, les séries de grand tas sont entreposés au champ avec les mêmes distances.

Le facteur étudié dans ce dispositif est la teneur en azote minéral (Nmin) du sol (horizon 0-10 cm), après arrosage du tas de fumier, pour les trois temps de stationnement (T+2, T+4, T+8).



**Figure 8.** Dispositif pour l'estimation de la lixiviation suivant le temps de stationnement

## **b. Conduite de l'essai pour la détermination de la lixiviation**

### **b.1. Installation**

Pour cet essai, seul le mode de stockage en fosse couverte est utilisé. Comme l'essai est réalisé en contre-saison, un arrosage du tas est nécessaire pour « imiter » l'effet des pluies et induire un transfert d'azote minéral par lixiviation. L'azote est un élément fortement mobile, facilement entraîné dans le sol par l'eau de pluie. La quantité d'eau pour l'arrosage doit être limitée afin de ne pas provoquer une lixiviation trop profonde. Nous faisons l'hypothèse qu'un arrosage équivalent à 50 mm de pluie (50 l d'eau /m<sup>2</sup> de sol), qui correspondant approximativement au remplissage par de l'eau de la porosité du sol (environ 50%), deux jours avant le prélèvement de l'échantillon de sol provoquera une humectation suffisante du tas de fumier et un transfert de solutés vers l'horizon 0-10 cm.

### **b.2. Prélèvement des échantillons**

Des prélèvements de sol sont effectués avant l'installation du fumier, au temps (T0), comme témoin de l'état initial du sol avant le dépôt du fumier suivi des trois dates de prélèvement (T+2, T+4, T+8). Un prélèvement d'échantillon composite de 100 à 200 g de sol est effectué sous le tas, dans l'horizon 0-10 cm. En totalité, 12 échantillons de sol sont prélevés pour ce test de lixiviation.



### **II.3.3. Mesures effectuées**

Pour quantifier les éventuelles pertes en éléments des fumiers, nous avons mesurés :

- le N<sub>tot</sub>, par la méthode CHN, l'N<sub>min</sub>, par extraction KCl, le pH et les teneurs en P, K, Ca, et Mg des fumiers pour les expérimentations 1 et 2 ;

- l'N<sub>min</sub> du sol pour l'expérimentation 2.

### **II.3.4. Analyse au laboratoire**

Les analyses de tous les échantillons ont été effectuées par les responsables de laboratoire au LRI à Antananarivo et à Montpellier.

#### **a. Détermination du carbone et de l'azote total**

Les capsules en étain contiennent les sous-échantillons pour l'analyse du CHN. Ce dernier permet de déterminer la teneur en C<sub>tot</sub> et N<sub>tot</sub> des échantillons. C'est une méthode d'analyse par chromatographie en phase gazeuse. Il s'agit de faire une combustion par utilisation de deux tubes dans une calorifugée. Le premier tube est le siège de la réaction d'oxydation et le deuxième celui de la réaction de réduction (Caria *et al.*, 2007). Une capsule en étain contenant l'échantillon est chauffée jusqu'à 1 050°C. La combustion est favorisée par des catalyseurs (oxydes de cuivre et chrome). Les gaz obtenus (CO<sub>2</sub>, NO, H<sub>2</sub>O) par combustion de l'échantillon passent ensuite dans un piège à eau, composé de perchlorate de magnésium. Les gaz passent dans une colonne chromatographique qui les séparent et les quantifient. La détermination du N<sub>tot</sub> et C<sub>tot</sub> a été réalisée au laboratoire de l'UMR Eco&Sol à Montpellier.

#### **b. Détermination de l'azote minérale dans le fumier et le sol**

La teneur en N<sub>min</sub> (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dans le fumier est obtenue après une extraction avec du KCl M. Le principe est de mélanger un échantillon de 5 g de fumier (ou de sol), conservé à 4°C, avec une solution de 50 ml de KCl (rapport solide:solution de 1:10). Le large excès d'ions K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> permettent de saturer les surfaces d'échange avec ces ions et donc de désorber les ions NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que l'on retrouve dans la solution d'extraction. Le mélange est agité mécaniquement durant une heure. L'extrait est ensuite centrifugé durant 5 minutes, puis filtré et récupéré dans des fioles. Le N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a été analysé selon la réaction de Berthelot modifiée et le N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> selon la réaction de Griess, avec un colorimètre à flux continu Skalar, aux longueurs d'onde respectives de 660 nm et 540 nm. Le même principe est utilisé pour déterminer l'N<sub>min</sub> du sol.

### **c. Détermination du pH (pH eau)**

Le pH eau correspond à la concentration en proton  $[H^+]$  de la solution. Tout d'abord, la biomasse est finement broyée à 200  $\mu\text{m}$  (Obriot *et al.*, 2016). Ensuite, 1 ml de biomasse finement broyée est mélangé à 5 ml d'eau distillée (rapport volumique de 1:5), puis agitée durant 30 mn. La lecture du pH est réalisée grâce à un pH-mètre avec une électrode de verre combinée.

### **d. Analyses de P<sub>tot</sub>, K<sub>tot</sub>, Catot, Mgtot du fumier**

Des échantillons de 0,5 g sont broyés à 2 mm et calcinés à 600°C pour obtenir de la cendre, ensuite mise à l'étuve à 60 °C durant une nuit. La cendre est resolubilisée dans 1 ml de HCl concentré, chauffée à 80°C. Après filtration avec un papier filtre de 2  $\mu\text{m}$  de maille, les extraits sont dosés par diverses méthodes selon l'élément à analyser. Pour la détermination de la teneur en phosphore, une méthode colorimétrique « au bleu » est utilisée. L'extrait est additionné avec du bleu de molybdène, qui forme un complexe avec l'anion orthophosphate nommé « complexe phosphomolybdique ». Ce complexe coloré est dosé avec un spectrophotomètre avec une absorbance à 882 nm avec un trajet optique de 1 cm. La concentration des autres éléments (K, Ca, Mg) est obtenue par spectrométrie d'absorption atomique. Les éléments sont propulsés dans une flamme obtenue avec de l'acétylène. La flamme d'une épaisseur de 10 cm est traversée par un spectre de lumière émis par des lampes cathodique propre à chaque élément. C'est avec le reste du spectre non-réfléchi par les éléments dans la flamme que le calcul de la quantité de l'élément dans l'extrait est obtenu. La lecture de la teneur en ces éléments est effectuée au Laboratoire des Radio Isotopes à Antananarivo.

## **II.3.5. Calcul de l'évolution des éléments en fonction du temps**

### **a. Bilan d'azote**

Ce calcul vise à déterminer le stock d'azote à chaque date de prélèvement. Ce stock est obtenu par la multiplication de la teneur en N total obtenu par l'analyse CHN avec la quantité de la matière sèche (MS) du fumier :

$$\text{N total (\%)} \times \text{Quantité de MS du tas (kg)} = \text{stock N (kg)}$$

Le calcul du stock de N est effectué à chaque date de prélèvement :

$$\text{Stock de N}_{\text{tot}} (\text{Tn}) = \text{teneur en N}_{\text{tot}} (\text{Tn}) \times \text{quantité de matière sèche (Tn)}$$

avec n le nombre de jour de stationnement du fumier.

La différence de stock entre les temps de prélèvement donne une estimation des pertes en N durant ces 32 jours de stationnement :

$$\Delta \text{ stock Ntot 1 (stock entre T0 et T+2)} = \text{Stock T+2} - \text{Stock T0}$$

$$\Delta \text{ stock Ntot 2 (stock entre T+2 et T+4)} = \text{Stock T+4} - \text{Stock T+2}$$

$$\Delta \text{ stock Ntot 3 (stock entre T+4 et T+8)} = \text{Stock T+8} - \text{Stock T+4}$$

$$\Delta \text{ stock Ntot 4 (stock entre T+8 et T+16)} = \text{Stock T+16} - \text{Stock T+8}$$

$$\Delta \text{ stock Ntot 5 (stock entre T+16 et +32)} = \text{Stock T+32} - \text{Stock T+16}$$

En absence de lixiviation, ce qui est probable en saison sèche, on peut supposer que cette variation de stock ( $\Delta \text{ Stock Ntot}$ ) correspond à la volatilisation de l' $\text{NH}_3$  :

$$\Delta \text{Stock Ntot} = \text{Volatilisation}$$

A partir du bilan d'azote total, nous ne savons pas si la volatilisation en  $\text{NH}_3$  provient uniquement du  $\text{N-NH}_4^+$  initialement présent dans le tas à l'instant T0, ou si la minéralisation de l'azote organique a contribué à la fourniture de  $\text{N-NH}_4^+$  durant la période de stationnement du fumier dans le champ. Il faut donc connaître l'évolution du stock d'N minéral au cours du temps de stationnement.

Après avoir obtenu la teneur en N minéral, sa variation peut aussi être calculée :

$$\Delta \text{ stock Nmin 1 (stock Nmin T0 et T+2)} = \text{Stock T+2} - \text{Stock T0}$$

$$\Delta \text{ stock Nmin 2 (stock Nmin T+2 et T+4)} = \text{Stock T+4} - \text{Stock T+2}$$

$$\Delta \text{ stock Nmin 3 (stock Nmin T+4 et T+8)} = \text{Stock T+8} - \text{Stock T+4}$$

$$\Delta \text{ stock Nmin 4 (stock Nmin T+8 et T+16)} = \text{Stock T+16} - \text{Stock T+8}$$

$$\Delta \text{ stock Nmin 5 (stock Nmin T+32 et T+16)} = \text{Stock T+32} - \text{Stock T+16}$$

Les variations de stock ( $\Delta \text{ stock Nmin}$ ,  $\Delta \text{ stock N-NH}_4^+$ ,  $\Delta \text{ stock NO}_3^-$ ) peuvent être négatives lorsque la minéralisation décroît et que le fumier devient de plus en plus mature.

Interprétation des résultats :

- ✓ S'il n'existe pas de variation de stock en Nmin, cela signifie que l'ammonium produit est volatilisé à la même vitesse qu'il est produit

Alors, **Minéralisation = Volatilisation**

- ✓ Si le stock de Nmin varie :
  - si stock de Nmin baisse, la volatilisation est plus rapide que la minéralisation ;
  - si stock de Nmin augmente, la volatilisation est plus lente que la minéralisation.

Alors, **Minéralisation = Volatilisation +  $\Delta \text{ Stock Nmin}$**

### **II.3.6. Analyses statistiques**

Le logiciel XLStat est utilisé pour effectuer les analyses statistiques. Des tests de normalités sont effectués. Les données qui suivent la loi normale sont analysées par l'Analyse de Variance ou ANOVA, associée avec le test de Fischer-LSD pour comparer les moyennes entre les traitements. Les variables qui ne suivent pas la loi normale sont transformés en box cox ou par  $\log x+1$  pour être ensuite réintégrés dans l'ANOVA. Par contre, les données qui ne sont pas normales, même après transformation, sont analysées avec le test non-paramétrique de Kruskal Wallis. Une analyse de Composante Principale (ACP) a été réalisée afin de connaître les corrélations entre la concentration en élément des quatre types de fumiers au temps T0.

### III. RESULTATS ET INTERPRETATION

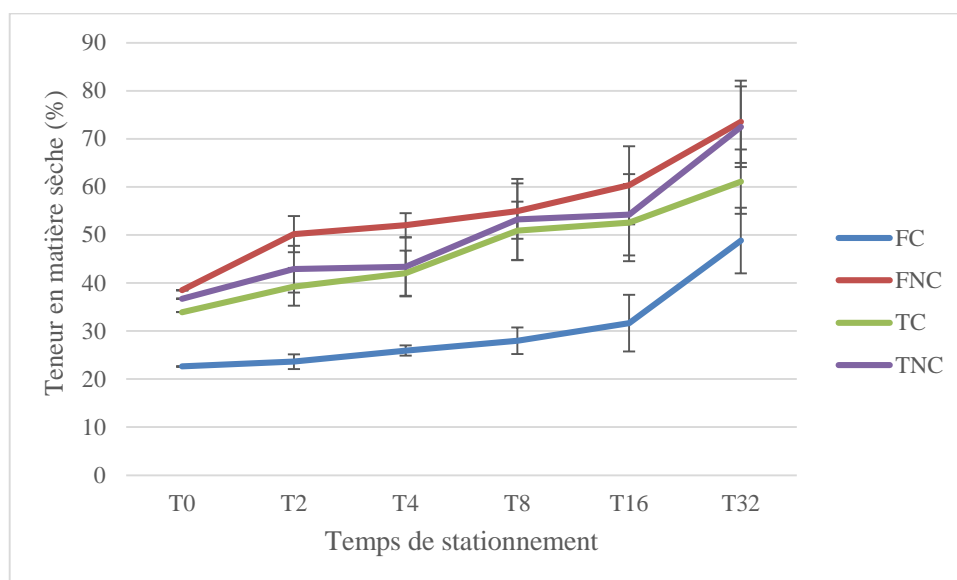
#### III.1. Analyse de variance

Une ANOVA a été réalisée afin d'analyser les effets des trois facteurs étudiés (Tableau 1). Les quatre types de fumiers, stockés en fosse couverte (FC), en fosse non-couverte (FNC), en tas couvert (TC) et tas non-couvert (TNC), sont tous différents les uns des autres, avec des effets fortement significatifs pour tous les éléments ( $p$ -value  $< 0,0001$ ). Une description plus détaillée des résultats des analyses statistiques est présentée dans l'Annexe VI.

**Tableau 1** : Résultats des  $p$ -values de l'ANOVA sur les trois facteurs étudiés, pour les concentrations en éléments minéraux (Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ptot, Ktot, Catot, Mgtot), le pH et les teneurs organiques (MS, Ctot, Ntot).

Variables	Facteurs étudiés		
	Type de fumier	Temps de stationnement	Taille de tas
Nmin tot (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	<b>0,005</b>	0,165
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	0,301
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	<b>0,001</b>	0,587
Ptot (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	0,600	0,845
Ktot (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	0,218	0,615
Catot (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	0,321	0,965
Mgtot (g kg <sup>-1</sup> )	< <b>0,0001</b>	0,945	0,984
pH eau	< <b>0,0001</b>	0,878	0,928
MS (%)	< <b>0,0001</b>	< <b>0,0001</b>	0,070
Ctot (%)	< <b>0,0001</b>	0,910	0,814
Ntot (%)	< <b>0,0001</b>	0,862	0,867

Le temps de stationnement a un effet significatif sur la concentration en Nmin tot et des effets significatifs sur les concentrations en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Il n'a pas d'effet sur les autres éléments (Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH, Ctot, Ntot). Par contre, il a aussi un effet hautement significatif sur la teneur en matière sèche (Figure 9). A T0, la teneur moyenne en MS des quatre types de fumier était de 33%. La teneur a augmenté progressivement jusqu'à 64% à la fin de l'essai (T32), ce qui correspond à un assèchement important des tas. Les différences entre les cinq temps de stationnement sont cependant significatives uniquement au temps T16 et T32.



**Figure 9.** Teneur en matière sèche (MS) des quatre (4) types de fumier durant le temps de stationnement

Le facteur « taille de tas » ne présente aucun effet significatif sur la teneur de l'ensemble des éléments analysés (Nmin, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH, MS, Ctot, Ntot).

### III.2. Caractéristiques des quatre types de fumiers à T0

Les pratiques de stockage de fumier à la ferme ont un effet hautement significatif sur la teneur en Ctot et Ntot. ( $p$ -value < 0,0001) (Tableau 2). Pour le Ctot, les teneurs des quatre types de fumier varient de 12,7 à 32,3%, tous étant significativement différents. Pour le Ntot, le fumier en fosse couverte (FC) est significativement différent de FNC, mais FNC, TC et TNC n'ont pas de différence significative entre eux. Quant à la teneur en matière sèche (MS), les pratiques de stockage de fumier à la ferme n'ont pas d'effet significatif ( $p$ -value = 0,053), malgré des variations de 23 à 39%.

En ce qui concerne la teneur en N minéral total, les quatre types de stockage fumier ont un effet sur sa concentration ( $p$ -value = 0,048). Le fumier stocké en fosse non-couverte (FNC) possède la concentration maximale en N minéral total, avec une teneur de 0,43 g kg<sup>-1</sup>, tandis que la plus faible se trouve dans le fumier stocké en tas-couvert (TC) avec une concentration de presque la moitié de celle observée avec FNC (0,23 g kg<sup>-1</sup>). La quantité d'Nmin tot représente 4,6% de Ntot pour FNC et 1,4-1,7% de Ntot pour les autres fumiers. En ce qui concerne la concentration en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, les pratiques de stockage du fumier influencent de manière significative la concentration en ammonium ( $p$ -value = 0,003). Le fumier stocké en fosse-couverte (FC) est celui qui présente la concentration en ammonium la plus élevée (0,39g kg<sup>-1</sup>). La plus faible concentration d'ammonium a été observée pour le fumier TC, avec une valeur cinq fois plus

faible que celle observé dans le fumier FC. Les deux modes de stockage non-couverts (en tas et en fosse) ont une concentration d'ammonium intermédiaire mais ne présentent pas de différence significative entre eux. La proportion de  $N-NH_4^+$  dans l' $N_{min}$  tot varie entre 30 et 97%.

En ce qui concerne la concentration en  $N-NO_3^-$ , les pratiques de stockage du fumier influencent de manière significative la concentration en nitrate ( $p$ -value = 0,002). FNC et TC, avec des teneurs de  $0,18 \pm 0,03 \text{ g kg}^{-1}$  et  $0,16 \pm 0,05 \text{ g kg}^{-1}$ , présentent des concentrations en nitrate plus élevées que les fumiers FC et TNC. Ces derniers ont en moyenne une concentration en nitrate trois à cinq fois plus faible que les deux premiers types de fumier. Les fumiers FNC et TC sont donc significativement différents de FC et TNC.

En ce qui concerne le K total, la concentration varie de 7,2 à 16,3  $\text{g kg}^{-1}$ . Elle a été maximale dans le fumier TNC et elle est significativement différente de la concentration des fumiers TC et FNC. Pour Mg total, la concentration varie de 1,6 à 5,4  $\text{g kg}^{-1}$ . Elle a été maximale dans le fumier FC et elle est significativement différente de celle des fumiers FNC, TC, et TNC.

Pour P total et Ca total, nos résultats montrent que les pratiques de stockage de fumier n'ont pas eu d'effet significatif sur la concentration de ces deux éléments, du fait de teneurs assez variables pour un même type de fumier (écart-types importants), les teneurs variant de 6,5 à 20,8  $\text{g kg}^{-1}$  pour Catot et de 2,3 à 4,0  $\text{g kg}^{-1}$  pour Ptot. Aucune différence significative n'a été constatée parmi les quatre types de fumier.

Les pratiques de stockage du fumier à la ferme ont un effet significatif sur le pH du fumier, avec un pH de 7,5 à 8,1. Le fumier FNC possède un pH plus faible, de l'ordre de 0,6 unités inférieures, par rapport aux trois autres types de stockage de fumier. Il présente donc des différences significatives par rapport aux FC, TC et TNC.

D'un point de vu global, le mode de stockage de fumier à la ferme (en fosses couvertes, en fosses non-couvertes, en tas couverts et en tas non-couverts) a des effets sur les teneurs de presque tous les éléments, sauf Ptot et Catot. La teneur en matière sèche ne variait pas non plus entre les divers fumiers.

**Tableau 2** : Teneur en Ctot, Ntot, MS et concentration en N min tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH eau des quatre types de fumiers au temps T0

	FC	FNC	TC	TNC	p-value
Ctot (%)	32,3 (1,35) <sup>A</sup>	12,7 (2,01) <sup>D</sup>	19,9 (1,04) <sup>C</sup>	27,2 (2,91) <sup>B</sup>	< <b>0,0001</b>
Ntot (%)	2,38 (0,21) <sup>A</sup>	0,93 (0,09) <sup>C</sup>	1,52 (0,09) <sup>B</sup>	1,59 (0,07) <sup>B</sup>	< <b>0,0001</b>
MS (%)	22,6 (0,74) <sup>B</sup>	38,5 (9,19) <sup>A</sup>	33,9 (1,52) <sup>AB</sup>	36,7 (5,94) <sup>A</sup>	0,053
Nmin tot (g kg <sup>-1</sup> )	0,40 (0,07) <sup>AB</sup>	0,43 (0,10) <sup>A</sup>	0,23 (0,04) <sup>C</sup>	0,27 (0,08) <sup>BC</sup>	<b>0,048</b>
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	0,39 (0,07) <sup>A</sup>	0,25 (0,07) <sup>B</sup>	0,07 (0,03) <sup>C</sup>	0,21 (0,06) <sup>B</sup>	<b>0,003</b>
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	0,02 (0,02) <sup>B</sup>	0,18 (0,03) <sup>A</sup>	0,16 (0,05) <sup>A</sup>	0,06 (0,03) <sup>B</sup>	<b>0,002</b>
Ptot (g kg <sup>-1</sup> )	3,15 (1,74) <sup>A</sup>	4,04 (3,49) <sup>A</sup>	2,79 (0,04) <sup>A</sup>	2,32 (0,37) <sup>A</sup>	0,804
Ktot (g kg <sup>-1</sup> )	13,4 (1,28) <sup>AB</sup>	7,16 (1,3) <sup>C</sup>	12,9 (0,93) <sup>B</sup>	16,3 (2,2) <sup>A</sup>	<b>0,001</b>
Catot (g kg <sup>-1</sup> )	6,46 (3,57) <sup>A</sup>	8,24 (2,94) <sup>A</sup>	17,9 (2,31) <sup>A</sup>	20,8 (17,6) <sup>A</sup>	0,306
Mgtot (g kg <sup>-1</sup> )	5,41 (0,92) <sup>A</sup>	1,57 (0,36) <sup>C</sup>	3,51 (0,41) <sup>B</sup>	2,44 (0,40) <sup>BC</sup>	<b>0,000</b>
pH eau	8 (0,08) <sup>A</sup>	7,5 (0,08) <sup>B</sup>	8,13 (0,11) <sup>A</sup>	8,05 (0,04) <sup>A</sup>	<b>0,000</b>

Les données correspondent aux moyennes de quatre (4) types de fumier, avec les écart-types entre parenthèses. Les valeurs des moyennes suivies de la même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5%.

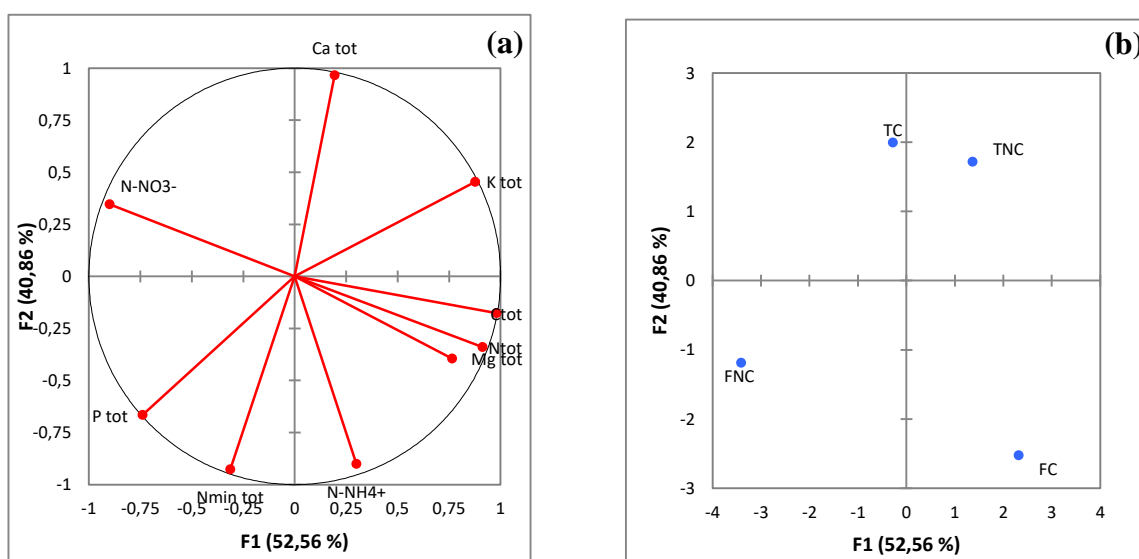
Description des abréviations : FC= fosse couverte, FNC= fosse non-couverte, TC= tas couvert, TNC= tas non-couvert.

### III.3. Relations entre les différents éléments au temps T0

Les covariations entre les divers éléments des quatre fumiers ont été analysées grâce à une Analyse en Composantes Principales (ACP) (Figure 10a). L'axe F1 de l'ACP montre que les teneurs en Ktot, Ntot, Ctot et Mgtot covarient positivement, alors que la concentration en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> covarie négativement sur ce même axe. L'élément Ktot présente une relation négative avec Ptot, qui diminue lorsque la concentration en Ktot augmente. Les concentrations en Nmin tot et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> covariant négativement et Catot positivement ; ces trois éléments sont associés à l'axe F2. Les teneurs en N min tot et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, associé à l'axe F2, sont indépendantes de celle de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, associé à l'axe F1.

Dans le graphique des observations (Figure 10b), le fumier stocké en tas non-couvert (TNC) possède des teneurs élevés en Ktot, Ctot, Mgtot et Ntot mais avec une basse concentration en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, tandis que le fumier en fosse couverte (FC) est riche en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> avec une faible teneur en Catot. Dans le fumier en fosse non-couverte (FNC), c'est plutôt du Ptot qui est abondant, mais aussi avec du Nmin tot et du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> alors que les autres éléments tels que les Ctot, Ntot, Mgtot, Ktot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, et Catot sont faibles. Le fumier en tas couvert (TC) est particulièrement riche en Catot.





**Figure 10.** Cercle de corrélation entre les différents teneurs en éléments (a) et projection sur le plan factoriel des traitements types de fumiers (b)

### III.4. Variation du Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en fonction du temps de stationnement

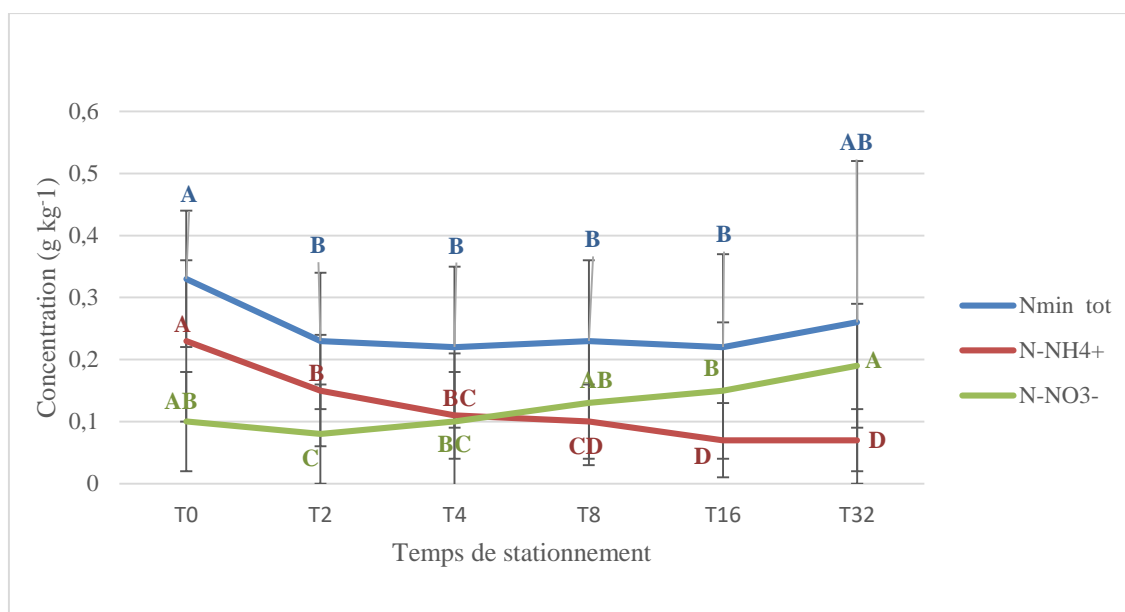
Il n'y a pas d'effet significatif du temps de stationnement sur Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH, Ctot, Ntot (Tableau 1), les teneurs restant similaires à celles de T0. Seules les concentrations en Nmin tot, en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> varient avec le temps de stationnement avec des effets significatifs. Nous avons donc décidé d'étudier ces trois éléments dans cette partie des résultats. En fait, si la teneur en Ntot et/ou en Ctot avaient variées, la seule étude de la variation des concentrations aurait été insuffisante ; une étude de la variation de la quantité de tous les éléments (Ptot, Ktot, Catot, Mgtot ...) en stocks aurait été nécessaire. Cependant, pour mieux illustrer ce qui se passe, nous avons effectué une étude de la concentration et de la quantité d'N des grands tas (GT) dans cette partie afin de mieux comparer l'évolution des stocks de Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans un grand tas.

#### III.4.1. Variation des concentrations d'azote minéral en fonction du temps

Des différences significatives ont été observées entre T0 et T2 pour la concentration de Nmin tot (Figure 11). Une diminution rapide de Nmin tot, correspondant à 30% de Nmin tot initialement présent, est observée pour les deux premiers jours de stationnement, suivie par une stabilisation de la concentration jusqu'à T32.

Pour  $\text{N-NH}_4^+$ , une baisse brusque de la concentration a été observée entre T0 et T4, suivie d'une baisse plus lente par la suite. Une différence significative est surtout observée entre les concentrations en ammonium pour les deux premiers jours de stationnement. La concentration de  $\text{N-NH}_4^+$  se stabilise à partir de T16 (pas de différence significative entre T16 et T32).

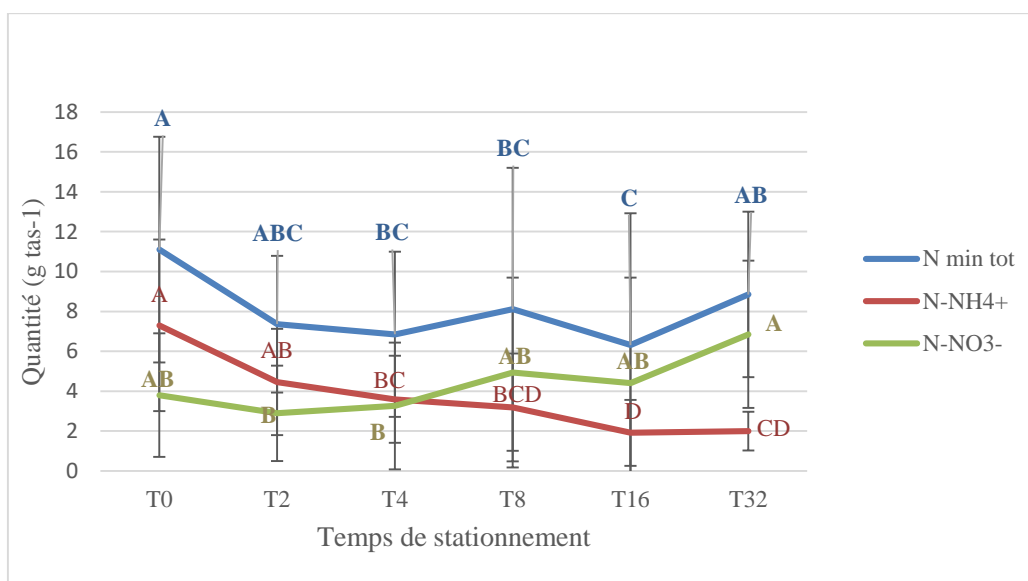
Pour le  $\text{N-NO}_3^-$ , la concentration est restée stable et sans différence significative entre T0 et T4, puis elle augmente progressivement pour atteindre son maximum à T32. Cette augmentation n'est significative qu'à partir du 8<sup>ème</sup> jour de stationnement.



**Figure 11.** Concentration en Nmin tot, en  $\text{N-NH}_4^+$  et en  $\text{N-NO}_3^-$  durant le temps de stationnement

#### III.4.2. Variation des quantités d'azote minéral en fonction du temps, pour les grands tas (GT)

Les quantités d'azote minéral en fonction du temps varient de façon similaire aux concentrations (Figure 12). Néanmoins, quelques variations (difficilement interprétables, par exemple à T8) sont plus marquées dans cette analyse sur les quantités de N minéral dans les gros tas (GT) comparativement aux variations des concentrations. Pour les quantités, le nombre de répétitions est plus faible (4 ; GT) que pour les concentrations (8 ; GT et PT), ce qui peut expliquer ces différences.

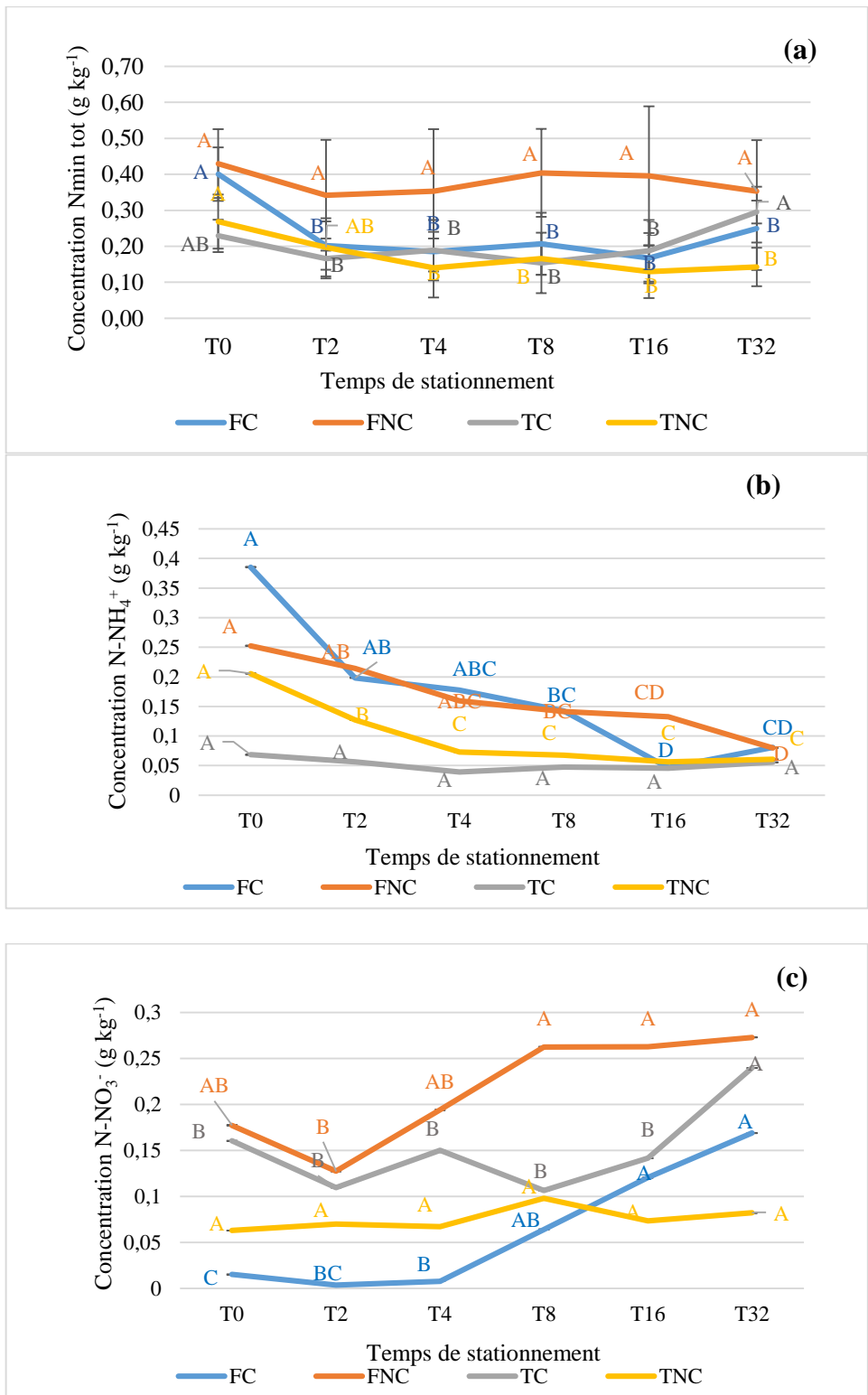


**Figure 12.** Quantité en Nmin tot, en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> durant le temps de stationnement

### III.5. Evolution de la concentration de Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pour chaque type de fumier en fonction du temps de stationnement

Après une analyse globale de l'évolution moyenne des teneurs en N minéral des quatre fumiers (Figure 13), nous avons fait une analyse pour chacun des fumiers. Les lettres en majuscules déterminent le groupe de chaque type de fumier suivant les divers temps de stationnement. Elles sont de la même couleur que le type de fumier correspondant avec : en bleu le fumier de la fosse couverte (FC), en orange celui de la fosse non-couverte (FNC), en gris celui du tas couvert (TC), et en jaune celui du tas non-couvert (TNC).

Des diminutions importantes des concentrations, atteignant 30% pour Nmin tot (Figure 13a) et 35% pour N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Figure 13b), ont été observées entre les deux premiers jours de stationnement. Entre T2 et T32, la concentration d'azote minéral total ne varie plus (hormis une légère augmentation inexplicée à T32), alors que les teneurs en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> continuent à décroître légèrement. En ce qui concerne le N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Figure 13c), une augmentation progressive de sa concentration au cours du stationnement, atteignant 48%, a été observée à la fin de l'essai.



**Figure 13.** Variation des concentrations en Nmin tot (a), N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(b) et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (c) en fonction du temps de stationnement

### III.6. Estimation de la volatilisation

#### III.6.1. Volatilisation des quatre types de fumier

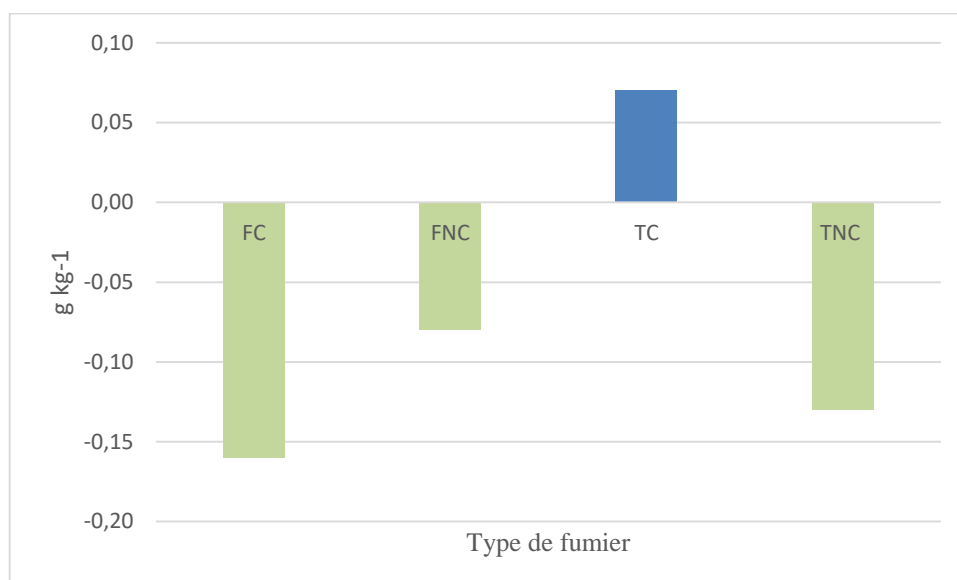
Nous avons observé que la fluctuation de  $N_{tot}$  est très faible et sa variation non significative. Ainsi, nous pouvons considérer que la variation de stock de  $N_{tot}$  n'a pas d'impact (mesurable) sur la volatilisation. La volatilisation dépend de la variation de stock en  $N_{min}$  tot, qui correspond aussi aux variations de stocks de  $N-NH_4^+$  et  $N-NO_3^-$  au cours du temps (voir paragraphe III.5 pour le calcul de la volatilisation). Le bilan calculé est de  $-0,07 \text{ g N kg}^{-1}$  (Tableau 3) ; le signe négatif en azote correspondant à une perte d'N dans le fumier. Cette perte correspond donc à une volatilisation de  $0,07 \text{ g N kg}^{-1}$ . Ainsi, avec une concentration initiale moyenne d'ammonium des quatre fumiers de  $0,33 \text{ g kg}^{-1}$ , 22% de l'ammonium du fumier se volatilise sous forme d'ammoniac pendant le temps de stationnement. La totalité de cette volatilisation a lieu lors des deux premiers jours de stationnement.

**Tableau 3 :** Différence de stock en ( $N_{min}$  tot) élément durant l'essai avec estimation de la volatilisation

	$N-NH_4^+$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	$N-NO_3^-$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )
T2-T0 ( $\Delta$ stock 1)	-0,08	-0,02
T4-T2 ( $\Delta$ stock 2)	-0,04	0,02
T8-T4 ( $\Delta$ stock 3)	-0,01	0,03
T16-T8 ( $\Delta$ stock 4)	0,03	0,02
T32-T16 ( $\Delta$ stock 5)	0	0,04
En $\text{g kg}^{-1}$	-0,16	0,09
<b>Bilan de <math>N-NH_4^+</math> et <math>N-NO_3^-</math> (<math>\text{g kg}^{-1}</math>) = -0.07</b>		
% de perte en élément par rapport à T0	-70%	90%

#### III.6.2. Bilan d'azote minéral et volatilisation pour chaque fumier

D'après la figure 14, les types de fumier en fosse couverte (FC), en fosse non-couverte (FNC) et en tas non-couvert (TNC) possèdent des valeurs négatives, ce qui peut être interprété comme une perte en  $N_{min}$  tot par volatilisation. Cependant, le fumier en tas couvert (TC) possède une valeur positive synonyme de gain en  $N_{min}$  tot.



**Figure 14.** Bilan d'azote suivant les types de fumier

### III.7. Estimation de la lixiviation

#### III.7.1. Concentration en Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> du sol

Les teneurs en Nmin tot mesurées à T0 sous les tas où le fumier a été laissé en stationnement pendant 2 à 8 jours (T0 de T2 ; T0 de T4 ; T0 de T8) sont présentées dans le Tableau 4. Il n'y avait aucune différence significative des teneurs initiales en Nmin pour les trois séries de sols ( $p$ -value=0,491 pour Nmin tot ;  $p$ -value= 0,820 pour N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ;  $p$ -value=0,361 pour N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), aucun des trois éléments ne présentant des différences significatives au temps T0.

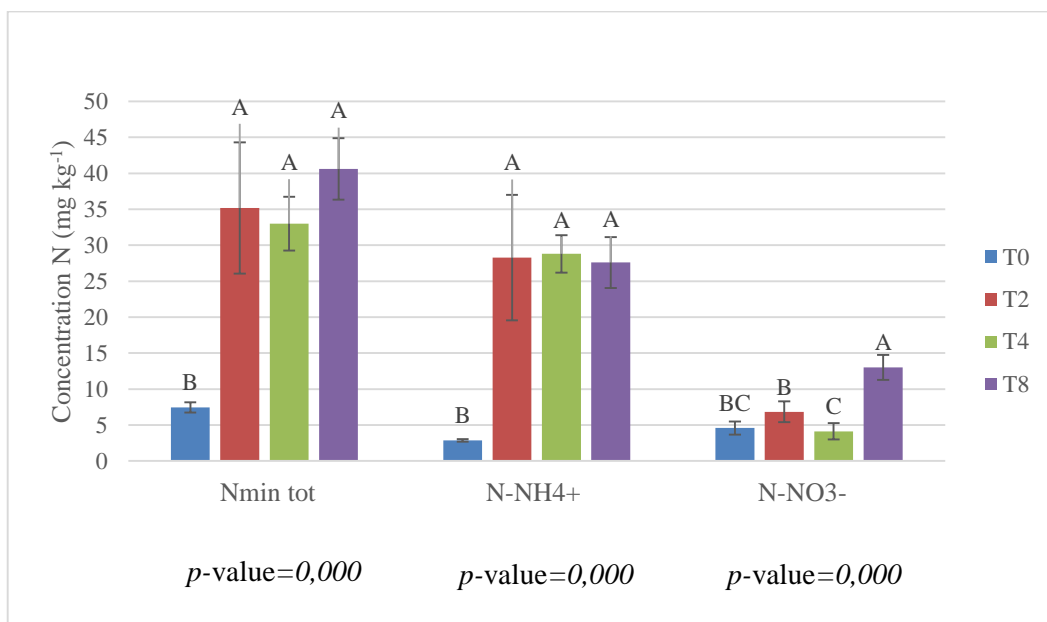
**Tableau 4 :** Comparaison des moyennes de la concentration en Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol par rapport au temps de stationnement T0

	Nmin tot(mg kg <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
T0 de T2	7,68 (1,73) <sup>A</sup>	2,84 (0,27) <sup>A</sup>	4,84 (1,98) <sup>A</sup>
T0 de T4	6,62 (1,58) <sup>A</sup>	3,03 (1,05) <sup>A</sup>	3,59 (0,79) <sup>A</sup>
T0 de T8	8,03 (0,76) <sup>A</sup>	2,67 (0,51) <sup>A</sup>	5,36 (1,26) <sup>A</sup>
<i>p</i> -value	0,491	0,820	0,361

Du fait qu'aucun effet significatif n'a été trouvé sur la concentration en azote à T0 pour les trois temps de stationnement (T0 de T2, T0 de T4, T0 de T8), la moyenne de ces éléments a été prise comme valeur de T0.

Suite à l'arrosage, les concentrations en Nmin tot et en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> du sol augmentent de façon très significatives ( $p$ -values < 0,001) dès T2 (Figure 15). Ensuite, de T2 à T8, les concentrations de

Nmin tot et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> restent stables. Par contre, la concentration en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, n'augmente pas de façon significative par rapport à T0 pour T2 et T4, puis elle augmente légèrement à T8.



**Figure 15.** Comparaison de teneurs du sol en Nmin tot suivants les temps de stationnements

### III.7.2. Estimation de la lixiviation

La somme des variations de stocks en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> permet de calculer la valeur de la lixiviation d'N minéral en provenance du fumier ayant eu lieu au cours de l'essai, après un apport simulé de 50 mm de pluie (Tableau 5). A la fin de l'expérimentation, la teneur du sol en Nmin total a augmenté de 33,2 mg kg<sup>-1</sup>. Elle correspond à la lixiviation de l'ammonium et du nitrate. Cette valeur positive correspond à une augmentation de la teneur en Nmin dans le sol mais aussi à une perte en Nmin dans le fumier.

**Tableau 5 :** Différence de la teneur en Nmin tot du sol durant l'essai et estimation de la lixiviation

Temps de stationnement	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
T2-T0 ( $\Delta$ stock 1)	25,45	2,24
T4-T2 ( $\Delta$ stock 2)	0,5	-2,72
T8-T4 ( $\Delta$ stock 3)	-1,2	8,88
Gain de N min dans le sol (mg kg <sup>-1</sup> )	24,75	8,4
<b>Augmentation de la teneur en Nmin tot dans le sol = 33,2 mg kg<sup>-1</sup></b>		

Le calcul du pourcentage de perte en Nmin tot par lixiviation par rapport à la quantité initiale présente à T0 dans le fumier s'effectue en plusieurs étapes.

### ✓ Quantité de fumier

Le tas de fumier de 100 kg a été apporté sous la forme de 10 *soubiques* de 49 litres, ce qui correspond à un volume total du tas de 0,49 m<sup>3</sup>.

Le tas a été apporté sur le sol sur une surface de forme ovale de 2 m x 1 m.

### ✓ Volume de sol impacté par le tas de fumier

Le volume de sol impacté par le tas de fumier correspond à la surface où le fumier a été déposé (surface de l'ellipse =  $\pi \times a \times b$ , avec  $a$  le rayon du grand axe et  $b$  le rayon du petit axe de l'ellipse) multiplié par la hauteur de sol affecté par la lixiviation. On a fait l'hypothèse qu'avec 50 mm d'eau apportée, la lixiviation n'allait pas au-delà de 100 mm de sol (0,1 m), donc la hauteur du sol affectée ( $h$ ) est de 0,1 m. Le volume de sol impacté par la lixiviation est déterminé par la formule suivante :

$$V_{\text{sol}} = \pi \times a \times b \times h$$

$$V_{\text{sol}} = 3,14 \times 1 \times 0,5 \times 0,1 = 0,157 \text{ m}^3$$

### ✓ Masse du sol influencé par la lixiviation

La masse du sol influencée par la lixiviation ( $M_{\text{sol}}$ ) est calculée à partir de la densité apparente du sol ( $Da$ ) du sol du site qui est de 1,1 g cm<sup>-3</sup> :

$$M_{\text{sol}} = V_{\text{sol}} \times Da$$

$$M_{\text{sol}} = 157 \times 1,31 = 205,7 \text{ kg}$$

### ✓ Quantité de Nmin lixivié dans le sol depuis le tas de fumier

La quantité en Nmin lixivié dans le sol venant du tas de fumier correspond à l'augmentation de la teneur en Nmin tot dans le sol (33,2 mg kg<sup>-1</sup>) multiplié par la masse de sol influencée par la lixiviation ( $M_{\text{sol}}$ ) :

$$\text{Qté N min lixivié} = 33,2 \times 205,7 = 6\,829,2 \text{ mg (6,8g)}$$

$$33,2 \times 205,7 = 6829,2 \text{ (6,8g)}$$

### ✓ Proportion de Nmin lixivié par rapport à quantité à T0



Nous pouvons alors calculer la quantité de Nmin lixivié par rapport à sa quantité initiale dans le fumier. La quantité de Nmin tot dans le fumier à T0 correspond à la teneur en Nmin tot à T0 multipliée par la quantité moyenne de matière sèche des tas utilisés :

$$\text{Quantité Nmin T0} = \text{teneur en Nmin tot à T0 (g kg}^{-1}\text{)} \times \text{quantité de matière sèche (kg)}$$

$$\text{Quantité Nmin T0} = 0,40 \text{ g kg}^{-1} \times 22,7 \text{ kg} = 9,11 \text{ g}$$

La proportion d’Nmin tot lixiviée depuis le fumier dans le sol est calculée :

$$\begin{aligned} \text{\% Nmin tot du fumier qui se lixivie dans le sol} &= (\text{Quantité Nmin tot lixivié depuis le tas de} \\ &\text{fumier} / \text{Quantité Nmin tot à T0 dans le fumier}) \times 100 \\ &= (6,8/9,11) \times 100 = 74,5\% \end{aligned}$$

Ceci signifie que **74,5%** de Nmin tot initialement présent dans le tas de fumier a été lixivié dans le sol après un apport correspondant à une pluie de 50 mm.

## IV. DISCUSSION

### IV.1. Comparaison des types de fumier selon leur teneur en matière organique

La teneur en Ctot est un indicateur de la composition en matière organique des fumiers. Les quatre types de fumier qui se distinguent selon leur mode de stockage à la ferme ont des teneurs en Ctot significativement différentes. Or, en général, la teneur en Ctot des biomasses tels que les fumiers varie assez peu, avec une teneur de l'ordre de 50%. En effet, le C représentant environ la moitié de la masse moléculaire des composés organiques (pour transformer la teneur en Ctot en teneur en matière organique, le Ctot est multiplié par une constante de 2 ( $MO (\%) = Ctot (\%) \times 2$ ). Dans notre étude (Tableau 2), les teneurs en MO varient de 25 à 65%. Les biomasses telles que les fumiers sont en générale composées par 95% de matière organique et de 5% d'éléments minéraux (cendres). La faible teneur en MO des fumiers indique que 35 à 75%, soit d'un tiers à trois-quarts du fumier, est formé de matière minérale, principalement de la terre mélangée au fumier lors des diverses manipulations durant le stockage à la ferme.

L'effet du mélange de la terre avec le fumier a induit une qualité différente des types de fumier, avec une forte dilution de la teneur en nutriments dans les fumiers mélangés avec de la terre. Si nous supposons que la teneur en N (et autres nutriments) de la fraction terrigène du fumier est faible par rapport à celle de la fraction organique, nous pouvons calculer la teneur en Ntot de cette fraction organique comme suit :

$$N_{tot} \text{ MO pure } (\%) = N_{tot} (\%) \times 100 / C_{tot} (\%).$$

Le tableau 6, ci-dessous, montre que seule la fraction organique du fumier TNC est significativement moins riche en N que les trois autres fumiers.

**Tableau 6 :** Teneur en Ntot dans la partie matière organique pure des quatre types de fumier

	Ntot (%)
FC	7,31 (0,51) <sup>A</sup>
FNC	7,34 (0,64) <sup>A</sup>
TC	7,34 (0,38) <sup>A</sup>
TNC	6,46 (0,53) <sup>B</sup>

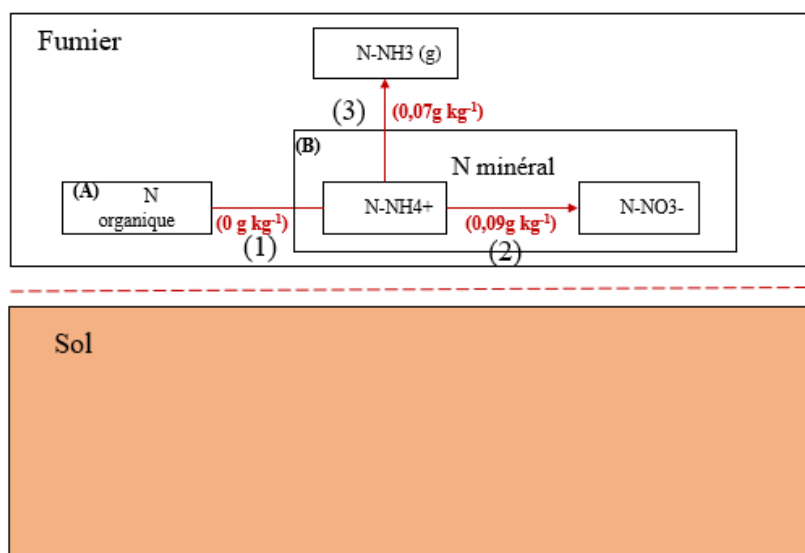
A partir des hypothèses ci-dessus, nous pouvons donc estimer que le fumier TNC est environ 12% moins riche en N que les trois autres fumiers. Ce fumier non-couvert est beaucoup plus

soumis aux aléas climatiques que les autres types de fumiers, ce qui peut favoriser des pertes d'azote par lixiviation, ruissellement et/ou volatilisation.

#### **IV.2. Importance de la volatilisation d'azote liée au temps de stationnement et à la taille du tas**

Le flux d'azote ammoniacal qui se volatilise (flux 3 ; Figure 16) provient de la minéralisation de d'azote organique (flux 1) et de la variation de stock d'azote minéral, c'est-à-dire de la quantité d'ammonium qui ne se transforme pas en nitrate (flux 2). Les variations de stocks de  $N_{tot}$ ,  $N-NH_4^+$ ,  $N-NO_3^-$  sont calculées et permettent donc, par différence, d'estimer la volatilisation (voir paragraphe III.6). La teneur en  $N_{min}$  tot est très faible par rapport au  $N_{tot}$ , de l'ordre de 2 à 4% (Tableau 2), la majorité de l'azote étant sous forme organique. Dans notre étude, nous n'avons pas pu mettre en évidence une minéralisation nette d'azote, qui se serait traduite par une baisse significative de la teneur en  $N_{tot}$ . En effet, nous n'avons pas observé de variation significative des teneurs en  $N_{tot}$  des fumiers en fonction du temps de stationnement (Tableau 1). La minéralisation ou la transformation de l'azote organique en azote minérale est donc faible durant l'expérimentation. En conséquence, le flux de minéralisation est considéré comme nul (cf. Figure 16 ; avec un flux de transformation du N organique en N minérale de  $0 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Les seules modifications significatives concernent donc les stocks et flux d'azote minéral. Le stock d'ammonium a diminué, en moyenne pour les quatre types de fumiers, de  $0,23 \text{ g kg}^{-1}$  à  $0,07 \text{ g kg}^{-1}$ , soit une baisse de stock de  $0,16 \text{ g kg}^{-1}$ . Une partie de l'ammonium se nitrifie, ce qui se traduit par une augmentation du stock de nitrate qui passe de  $0,10 \text{ g kg}^{-1}$  à  $0,19 \text{ g kg}^{-1}$ , soit un flux de  $0,09 \text{ g kg}^{-1}$  entre le compartiment  $N-NH_4^+$  et le compartiment  $N-NO_3^-$ . La différence entre la baisse de stock de  $N-NH_4^+$  et l'augmentation du stock de  $N-NO_3^-$ , soit  $0,07 \text{ g kg}^{-1}$  de  $N_{min}$ , correspond donc à de la volatilisation d' $N-NH_4^+$  sous forme d'ammoniac. Cette volatilisation suppose en outre qu'il n'y a pas de dénitrification, correspondant à des émissions gazeuses d'oxydes d'azote. Cette hypothèse est assez probable dans un tas de fumier peu humide, la dénitrification nécessitant des conditions de réduction favorisées par un excès d'eau.



**Figure 16.** Cycle de l'azote dans le fumier

(A) : azote organique ; (B) : azote minéral  $NH_4^+$  et  $NO_3^-$  ; (1) : minéralisation de l'azote organique en azote minéral ; (2) : minéralisation de  $N-NH_4^+$  en  $NO_3^-$  ; (3) : volatilisation de  $N-NH_3$

L'émission d'ammoniac est liée à la concentration initiale en  $N-NH_4^+$  dans le fumier : une faible concentration initiale en ammonium induit à une faible émission (Guinand, 2003). La concentration initiale en ammonium dans les tas de fumiers varie d'une manière très significative. C'est le fumier stocké en fosse couverte (FC) qui a la concentration initiale la plus importante et qui perd jusqu'à 49% de sa concentration au temps T2. Par contre, le fumier en tas couvert (TC) possède la plus basse concentration à T0 et ne perd que 14% de sa teneur initiale. A la fin de l'essai, la concentration en ammonium de ce type de fumier n'a pas eu de différence significative par rapport à T0.

La majorité des pertes d'azote par volatilisation ont lieu entre T0 et T2 (Tableau 3). Ces résultats sont similaires à ceux de Générmont *et al.* (2013), qui montrent que l'émission d'ammoniac atteint son flux maximal le jour de l'épandage au champ, celle-ci diminuant très rapidement le deuxième jour ainsi que le troisième jour. Jusqu'à 91% des pertes par volatilisation ont en effet lieu durant les deux premiers jours (Bussink *et al.*, 1994). La volatilisation initiale entre T0 et T2 correspond à environ 22% de la teneur initiale d' $N-NH_4^+$  dans la présente étude. Cette valeur est cohérente avec les données de la FAO/IFA qui indiquent que la volatilisation d'ammoniac après application du fumier entraîne une perte nette de N de l'ordre de 23%. Le GIEC (1995) évalue à 20% la perte moyenne d'N min due à volatilisation d'ammoniac si nous incluons la

perte importante qui a lieu lors du stockage. Ces valeurs sont également similaires à celles proposées par Salgado (2018) qui indique des pertes variant de 5 à 35% du N total excrété lors du stockage de fumier complet (fèces + urine), en fonction de la ventilation, de la profondeur des réservoirs et du temps de stockage. Entre les temps de stationnement T2 et T32, la teneur en Nmin tot devient stable et la volatilisation ammoniacale n'est plus significative.

A T32, une ré-augmentation de la teneur en Nmin tot a été observé, ce qui réduit la volatilisation calculée à la fin de l'essai. Cette augmentation de Nmin correspond à une augmentation de la teneur en nitrate à la fin de l'essai mais sans observer une diminution de la teneur de  $\text{N-NH}_4^+$  (Figure 14). Cette augmentation de la teneur en  $\text{N-NO}_3^-$  est mal expliquée : elle n'est probablement pas due simplement à une transformation de  $\text{N-NH}_4^+$  en  $\text{N-NO}_3^-$  par nitrification, puisque la teneur en  $\text{N-NH}_4^+$  ne varie pas. Nous faisons donc l'hypothèse que de l'ammonium a été minéralisé à partir de l'azote organique mais que cette transformation n'est pas suffisante pour induire une baisse statistiquement significative de la teneur en Nmin.

La taille du tas n'a pas eu d'effet significatif sur les teneurs de Nmin tot,  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ . Une hypothèse était que les petits tas ayant une surface de contact plus importante avec l'atmosphère favorisaient la volatilisation. En effet, selon Béline *et al.* (2011), pour diminuer les pertes en ammoniac, il faut réduire la surface de contact entre le fumier et l'air. Nos résultats n'ont pas confirmé cette hypothèse.

Les autres éléments (Ptot, Ktot, Catot et Mgtot) analysés ne présentent pas de différence significative de leur teneur en fonction du temps. Contrairement à l'azote, les teneurs de ces éléments sont similaires à celle de T0 durant tout l'essai. Ce résultat est probablement dû au fait que ces éléments n'ont pas de forme gazeuse, contrairement à l'azote et que l'absence de précipitations pendant la période d'essai (en saison hivernale) n'a pas engendré de lixiviation ou lessivage.

### **IV.3. Quantification de la lixiviation par imitation d'arrosage**

L'augmentation de la teneur en Nmin tot du sol (+33,2 mg kg<sup>-1</sup> sol) correspond à l'Nmin provenant du fumier qui a été lixivié. Nous avons calculé que 74,5% de l'Nmin était lixivié, ce qui correspond, pour une teneur d'Nmin à T0 de 0,40 g Nmin kg<sup>-1</sup> de fumier, à une lixiviation de 0,25 g Nmin kg<sup>-1</sup> du fumier. Le flux lié à la lixiviation est donc de trois à quatre fois plus important que celui lié à la volatilisation d'ammoniac (0,07 g kg<sup>-1</sup>). Comme dans cette seconde expérimentation nous avons mesuré uniquement les teneurs en Nmin du sol, nous n'avons pas

de données directes sur les teneurs en Nmin du fumier à la fin de l'expérimentation. Nous ne pouvons pas savoir si l'expérimentation sur la lixiviation (humectation du fumier) a eu des effets sur les pertes par volatilisation.

A la fin de l'essai, après huit jours, 74,5% de Nmin tot initialement présent dans le fumier a été lixivié dans le sol avec 50 mm de pluie. Martins et Dewes (1992), trouvent que la majorité de perte en azote minérale par lixiviation (plus de 70%) se produit lors des dix premiers jours d'un compostage de fumier. La quantité de Nmin tot lixivié lors du compostage et lors du stationnement au champ possède presque le même seuil en matière de perte.

Les résultats ont démontré que les deux formes d'azote minéral peuvent toutes deux être soumise à la lixiviation. La forme ammoniacale est dominante par rapport au nitrate dans le Nmin tot lors de l'essai. Par contre, les travaux de Tiftonnel *et al.* (2010) montrent que la proportion de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lixiviée est supérieure à celle du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en dessous des tas de fumier.

A part la lixiviation, des processus biologiques d'ammonification puis de nitrification ont permis une augmentation de la teneur en nitrate à la fin de l'essai (T8) avec 8,88 mg kg<sup>-1</sup>. A T8, la teneur en Nmin tot est due à la fois à la lixiviation et à des transformations de l'Nmin liées à la minéralisation de l'azote dans le sol.

#### **IV.4. Limite du travail**

L'expérimentation a eu lieu durant la première phase du confinement total à Madagascar. Les extractions d'N min des fumiers et des sols n'ont pas pu être réalisées immédiatement : les échantillons ont été congelé à Antsirabe avant d'effectuer l'extraction à Antananarivo. Or, il est recommandé d'effectuer l'extraction KCl le plutôt possible, au plus tard 48 heures après le prélèvement (voir, par exemple, les travaux de Tiftonnel *et al.*, 2010), afin de déterminer la teneur en Nmin. Cela a pu induire un biais dans les résultats des analyses de Nmin. En effet, la congélation et la décongélation augmentent la teneur en Nmin (Shepherd *et al.*, 2001). Cette augmentation est attribuée à une augmentation de l'activité microbienne suite à la décomposition des cellules microbiennes mortes (tuées par le gel/dégel) et une meilleure exposition de la matière organique suite à la rupture des agrégats du sol. Néanmoins cette même étude montre un biais assez réduit (< 5%) lorsque les teneurs en Nmin sont > à 20 mg kg<sup>-1</sup> de sol. Dans notre cas, le biais est donc considéré comme faible, les teneurs en Nmin des fumiers étant de l'ordre de 230 à 400 mg kg<sup>-1</sup> de fumier et celles des sols après lixiviation étant de l'ordre de 35 à 40 mg kg<sup>-1</sup> de sol.

#### **IV.5. Pratique de gestion du fumier**

D'un point de vue global, la qualité des fumiers utilisés lors de l'expérimentation n'est pas de bonne qualité. Le pourcentage de matière organique varie entre 35 à 75%, une large part du fumier étant constituée par du sol. Cette abondance de terre est un indice de mauvaise gestion du fumier lors du stockage à la ferme. Ceci rend difficile les comparaisons entre les fumiers car les différences de teneurs en nutriments peuvent résulter à la fois des pratiques de stockage (tas ou fosse, avec ou sans toit), qui peuvent induire une évolution différente de la qualité des fumiers, et de la présence de plus ou moins de terre en mélange, qui peut avoir un effet de dilution sur les teneurs en nutriments.

Le type de stockage de fumier en fosse couverte possède apparemment (compte tenu des réserves précédentes) la meilleure qualité au début de l'essai puisqu'il possède la teneur en matière organique (réservoir de nutriment) la plus élevée, ainsi qu'une teneur élevée en  $N_{tot}$  et  $N_{min}$  tot. Les deux types de fumiers en fosse possèdent une valeur en  $N_{min}$  tot élevée par rapport aux deux types de fumiers stockés en tas. Par contre, si les fumiers sont comparés sur la base des teneurs en  $N_{tot}$  de leur fraction organique, trois des fumiers (TC, FC, FNC) sont similaires et seul le fumier TNC est plus pauvre en azote que les autres.

L'étude a permis de montrer que le temps de stationnement du fumier au champ diminue la qualité des fumiers, du fait de pertes d'N par volatilisation ( $NH_3$ ) et de pertes d'N ( $NH_4^+$  et  $NO_3^-$ ) et d'autres nutriments par lixiviation. Ce sont les fumiers les plus riches en  $N_{min}$ , notamment en ammonium, qui sont les plus susceptibles de perdre leurs nutriments. Ces phénomènes sont rapides puisque la volatilisation a lieu essentiellement dans les deux jours suivant l'épandage et que la lixiviation a lieu rapidement lorsqu'il y a une pluie intense. Il est donc nécessaire d'incorporer le plus tôt possible les fumiers au sol après sa sortie de la ferme pour éviter des pertes.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Cette étude a été menée dans le but de déterminer l'importance des pertes en élément minéraux du fumier lors de l'étape de dépôt en tas sur une parcelle, avant l'enfouissement dans le sol. Deux types de pertes ont été quantifiées : (i) les pertes d'ammoniac par volatilisation et (ii) les pertes en azote par lixiviation lors des précipitations. Les paramètres étudiés pour les pertes lors du stationnement des fumiers aux champs ont été le type de fumiers qui se diffèrent de leur mode de stockage à la ferme (fumier stocké en fosse couverte, en fosse non-couverte, en tas couvert et en tas non-couvert), le temps de stationnement au champ ainsi que la taille du tas. Quant à la simulation de la précipitation pour la détermination de la lixiviation, le principal paramètre étudié a été le temps de stationnement au champ après l'arrosage du tas.

La première hypothèse supposait que le temps de stationnement et la taille du tas au champ avaient des effets sur l'importance des pertes par volatilisation d'ammoniac. D'après les résultats, jusqu'à 22% de l'azote ammoniacal initialement présent dans le fumier est perdu par volatilisation. La majorité de cette perte a lieu durant les deux premiers jours de stationnement (T0 à T2). C'est surtout durant cette période qu'un effet significatif est observé sur les teneurs en Nmin. Entre T2 et T32, la teneur en Nmin reste stable, une partie de l'ammonium étant transformé en nitrate. A la fin de l'essai, jusqu'à 70% de l' $\text{N-NH}_4^+$  initialement présent dans le fumier est perdu par volatilisation ou transformé par minéralisation. **De ce fait, la première partie de la première hypothèse, désignant une perte par volatilisation d'ammoniac suivant le temps de stationnement, est validée.**

Par contre, nous n'avons pas montré d'effet de la taille des tas sur la volatilisation de l' $\text{N-NH}_4^+$ . La taille des tas (grande et petite) n'a pas eu d'effets significatifs sur les teneurs en N minéral total, ammonium ou nitrate. **Ainsi, la seconde partie de la première hypothèse indiquant que la perte par volatilisation d'ammoniac était liée à la taille du tas n'est pas validée.**

La deuxième hypothèse supposait une absence de perte en d'autres éléments (Ptot, Ktot, Catot et Mgtot) au cours du temps de stationnement. Les résultats ont montré qu'il n'y avait aucun effet significatif du temps de stationnement sur le bilan des différents autres éléments minéraux des fumiers. **Ainsi, la seconde hypothèse stipulant que les éléments minéraux (Ptot, Ktot, Catot, Mgtot) du fumier ne sont pas perdus lors du dépôt de tas en absence de lixiviation est validée.**



La troisième hypothèse supposait qu'un arrosage simulant une pluie de 50 mm conduisait à la perte d'azote par lixiviation. Après deux jours de temps de stationnement et après arrosage, seul l'ammonium a été lixivié d'une manière significative dans le sol. Le nitrate, dont la concentration initiale dans le fumier était faible, n'a pas été lixivié de façon significative. Ce n'est que huit jours après l'arrosage (T8) que la concentration en nitrate augmente d'une manière significative dans le sol, suite à la minéralisation de l'azote du sol et/ou la nitrification de l'ammonium lixivié. A la fin de l'essai, 74,5% de l'azote minéral totale initialement présent dans le tas de fumier a été lixivié vers l'horizon 0-10 cm du sol. **Ainsi, la troisième hypothèse stipulant une perte d'azote pas lixiviation lors d'un arrosage pour simuler une pluie est validée.**

Les essais doivent permettre d'optimiser l'utilisation des fumiers lors de la sortie de la ferme. La connaissance de la quantité d'éléments nutritifs susceptibles d'être perdus lors de l'exposition au champ permet de mieux sensibiliser les agriculteurs sur les pratiques adéquates permettant de mieux conserver les éléments minéraux, surtout l'azote, face à divers processus biogéochimiques favorisant la perte de nutriments. En perspectives futures, il serait souhaitable de mieux comprendre la volatilisation au champ par utilisation d'appareil mesurant en continu les quantités d'ammoniac qui se volatilisent ou les quantités d'ammonium et nitrate qui sont lixiviées. Cela permettrait de mieux comprendre la dynamique de ces processus au cours du temps de stationnement.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Achard F., Banoin M., 2003. Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 65: 183-189
2. Adegbeye M.J., Reddy P.R.K., Obaisi, A. I., Elghandour M.M.M.Y., Oyebamiji K.J., Salem A.Z.M., Camacho-Díaz L.M., 2019. Sustainable agriculture options for production, nutritional mitigation of greenhouse gasses and pollution, and nutrient recycling in emerging and transitional nations. *Journal of Cleaner .* 242: 118319.
3. ADEME, 2018. Matières fertilisantes organiques : gestion et épandage. 15 p.
4. Agrotransfert, 2017. Optimiser les apports d'engrais organiques en agriculture biologique. 2 p.
5. Altieri M.A., Nicholls C.I., 2005. Agroecology and the search for a truly sustainable agriculture. 1<sup>st</sup> edition. *Basic Textbooks for Environmental Training*. 291 p.
6. Alvarez S., 2012. Pratiques de gestion de la biomasse au sein des exploitations familiales d'agriculture-élevage des hauts plateaux de Madagascar : conséquences sur la durabilité des systèmes. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier. 141 p.
7. Andrianambinina F.V., 2013. Dynamique et disponibilité de l'azote et du phosphore sous association riz-haricot soumise à différentes doses croissantes de fertilisation minérale azotée et phosphatée, Essai en pot sous serre sur sol ferrallitique de tanety de Lazaina. Mémoire de fin d'études en vue d'obtenir le diplôme d'Ingénieur Agronome. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 71 p.
8. Onduru D.D., Du Preez C.C.C., 2008. Farmers' knowledge and perceptions in assessing tropical dryland agricultural sustainability: experiences from Mbeere District, Eastern Kenya. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 15(2) : 145-152.
9. Barrington S., Choiniere D., Trigui M., Knight W., 2002. Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology*. 83: 189-194.
10. Béline F., Delaby L., Vertès F., Rochette P., Morvan T., Parnaudeau V., Cellier P., Peyraud L.L., 2011. Transformation, devenir et valorisation de l'azote : des effluents d'élevage aux systèmes de cultures. 6: 229-294.
11. Bénagabou O.I., Blanchard M., Yaméogo V.M.C., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Nacro H.B., 2017. L'intégration agriculture-élevage améliore-t-elle l'efficience, le recyclage et l'autonomie énergétique brute des exploitations familiales

- mixtes au Burkina Faso ? *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*. 70: 31-41.
12. Bernal M.P., Albuquerque J.A., Moral R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*. 100: 5444-5453.
  13. Bevelo J.F., 2018. Caractérisation des effets de fertilisations contrastées sur la phénologie et les dynamiques des biomasses du riz pluvial : cas des Hautes Terres et du Moyen-Ouest du Vakinankaratra. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention d'un diplôme d'Ingénieur Agronome au grade de Master II. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 91 p.
  14. Bochove v. E., 1993. Etude du cycle de l'azote dans le processus de compostage : le cas du fumier de bovin, Thèse présentée comme exigence partielle pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor. Université du Québec institut National de la Recherche Scientifique. 203 p.
  15. Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*. 57: 43-51.
  16. Bussink D.W., Oenama O., 1996. Differences in rainfall and temperature define the use of different types of nitrogen fertilizer on managed grassland in UK, NL and Eire, *Netherland journal of Agriculture and Science*. 44: 317-338.
  17. Bussink D.W., Huijsmans J.F.M., Ketelaars J.J.M.H., 1994. Ammonia volatilization from nitric-acid-treated cattle slurry surface applied to grassland. *Netherland Journal of Agricultural Science*. 293-309
  18. Caria G., Proix N., Ciesielski H., 2007. Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols. INRA. 8 p.
  19. CSA, 2016. Le développement agricole durable au service de la sécurité alimentaire et de la nutrition : quels rôles pour l'élevage ? *Recommandations politiques*. 8p.
  20. DGEP, 2008. 3 p.
  21. Dominati E., Paterson M., Mackay A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economical*. 69:1858-1868.
  22. Dugué, P., 1998. Gestion de la fertilité et stratégies paysannes. Le cas des zones de Savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Agriculture et développement*. 18: 13-20.

23. ECETOC, 1994. Ammonia emissions to air in Western Europe. European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. 210 p.
24. Eghball B., Power J.F., Gilley J.E., Doran J.W., 1997. Nutrient, Carbon, and Mass Loss during Composting of Beef Cattle Feedlot Manure. Waste Management. 5 p.
25. Fanjaniaina M.L., 2018. Transfert de fertilité dans des exploitations d'agriculture : cas de la région du Vakinankaratra. Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences agronomiques. École Doctorale Agriculture-Élevage- Environnement. École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 186 p.
26. FAO, 2003. Estimations des émissions gazeuses de NH<sub>3</sub>, NO et N<sub>2</sub>O par les terres agricoles à l'échelle mondiale, Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 80 p.
27. FAO, 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 139 p.
28. FAO, 2014. Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage, une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. 148 p.
29. FAO-Unesco, 1976. Carte mondiale des sols. 337 p.
30. Freney J.R., Simpson J.R., Denmead O.T., 1983. Volatilization of ammonia. Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems. 31p.
31. Générmont S., Flura D., Autret H., Masson S., Décuq C., Fanucci O., Flick D., Fattori A.P., Loubet B., Bedos C., Ntinas G., 2013. Predicting ammonia volatilisation after fertilizer or organic manure application in the field: solving scientific and technical issues. INRA-AgroParisTech. 102 p.
32. GIEC, 1995. Seconde évaluation du GIEC « Changement de climat 1995 ». 74 p.
33. Giller K.E., Rowe E.C., Ridder N., Keulen V.H., 2006. Resource use dynamics and interactions in the tropics: scaling up in space and time Agricultural Systems 88: 8-27.
34. Guingand N., 2003. Influence de la mise en place de caillebotis partiel et de la taille de la case sur les émissions d'ammoniac et d'odeurs en engraissement. Journées Recherche Porcine. 35: 15-20.
35. Hansen M.N., Henriksen K., Sommer S.G., 2006. Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: Effects of covering. Atmospheric Environment. 40: 4172-4182.

36. Havard P., Le Roux L., Dequin A., 2007. Les bonnes pratiques d'épandage du fumier. Chambres d'Agriculture de Bretagne. 29 p.
37. Haynes R.J., Williams P.H., 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. Canterbury Agriculture and Science Centre. 81 p.
38. Henintsoa M. 2013. Disponibilité et dynamique du carbone, de l'azote et du phosphore sous association culturale riz-haricot soumise à différents types de fertilisation phosphatée apportée à dose croissante : cas de l'expérimentation agronomique de Lazaina sur sol ferrallitique de « tanety ». Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'études approfondies. École Supérieure des Sciences, Université d'Antananarivo. 88 p.
39. Manlay R.J., Ickowicz A., Masse D., Floreta C., Richard D., Feller C., 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget of a village in the West African savanna. *Agriculture Systems* 79: 55-81.
40. Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Woo, S., Msangi, S., Freeman H.A., Bossio D., Dixon J., Peters M., van de Steeg J., Lynam J., Rao P.P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Sere C., Rosegrant M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*. 327: 822-825.
41. Huber H.M., Johannes T., Katharina B., Lechner P., 2011. Scrutinizing compost properties and their impact on methane oxidation efficiency. *Waste Management*. 31: 871-883.
42. Huijsmans J.F.M., 2003. Manure application and ammoniac. Thèse de doctorat. Université de Wageningen. 160 p.
43. ICE, 2019. Chiffres clés du climat France. Europe et Monde. 80 p.
44. Lekasi J.K., Tanner J.C, Kimani S.K, Harris P.J.C, 2003. Cattle manure quality in Maragua District, Central Kenya: effect of management practices and development of simple methods of assessment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 94: 289-298.
45. Mahimairaja S., Bolan N.S., Hedley M.J., Macgregor A.N., 1994. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresource technology*. 47: 265-273.
46. Martins O., Dewes T., 1992. Loss of Nitrogenous Compounds during Composting of Animal Wastes, *Bioresource Technology*. 42: 103-111.

47. Meisinger J.J, Jokela W.E, 2000. Ammonia volatilisation from daily poultry manure, *Managing nutrient pathogens from Animal Agriculture*. 21 p.
48. Meininger, F., Oldenburg, M., 2009. Characteristics of source-separated household wastewater flows: a statistical assessment. *Water Science and Technology*. 59(9): 1785-179.
49. Moureaux Cl., 1973. *Cours de microbiologie du sol*, édition O.R.S.T.O.M, 164 p.
50. Nennich T.D., Harrison, J.H., Van Weieringen L.M., Meyer D., Heinrichs A.J., Weiss W.P., St-Pierre N.R., Kincaid R.L., Davidson D.L., Block E., 2006. Prediction of manure and nutrient excretion from dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. 88: 3721-3733
51. Nzuma J.K., Murwira H.K., 2000. Improving the management of manure in Zimbabwe. *Managing Africa's Soils No. 15 IIED-Drylands Programme, London*. 15-20.
52. Obriot F., Stauffer M., Goubard Y., Cheviron N., Peres G., Eden M., Revallier A., Vieublé-Gonod L., Houot S., 2016. Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 232: 165-178.
53. Onduru D.D., Du Preez C.C.C., 2008. Farmers' knowledge and perceptions in assessing tropical dryland agricultural sustainability: Experiences from Mbeere District, Eastern Kenya. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. 15: 145-152.
54. Parkinson R., Gibbs P., Burchett S., Misselbrook T., 2004. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. *Bioresource Technology*. 91: 171-178.
55. Petersen S.O., Blanchard M., Chadwick D., Prado A.D., Edouard N., Mosquera J., Sommer S.G., 2013. Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal* 2013. 17 p.
56. Petersen S.O., Sommer S.G., 2011. Ammonia and nitrous oxide interactions: roles of manure organic matter management. *Animal Feed Science and Technology*. 166-167: 503-513.
57. Petersen S.O., Sommer S.G., Béline F., Burton C., Dach, J., Dourmad J.Y., Leip A., Misselbrook T., Nicholson F., Poulsen H.D., Provolo G., Sørensen P., Vinnerås B., Weiske A., Bernal M.P., Böhm R., Juhász C., Mihelic R., 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock Science*. 112: 180-191.

58. Portejoie S., Dourmad J.Y., Martinez J., Lebreton Y., 2004. Effect of lowering dietary crude protein on nitrogen excretion, manure composition and ammonia emission from fattening pigs. *Livestock Production Science*. 91: 45-55.
59. Portejoie S., Landmann G., Martinez J., 2002. L'ammoniac d'origine agricole : impacts sur la santé humaine et animale et sur le milieu naturel. *INRA Prod. Anim.* 15: 151-160.
60. Powell J.M., Pearson, R.A., Hiernaux, P.H., 2004. Crop–livestock interactions in the WestAfrican drylands. *Agronomy Journal*. 96: 469-483.
61. Raharilaza K. 2019. Mise au point des pratiques innovantes de restauration de la fertilité des sols par des assemblages de matières organo-minérales. Mémoire de Fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master II. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo. 63 p.
62. Raunet M., 1981. Le milieu physique de la région volcanique Ankaratra-Vakinannakaratra-Itasy (Madagascar). IRAT. 89 p.
63. Rochette P., 2008. Gestion des engrais organiques et minéraux : volatilisation de l'ammoniac. *CRAAQ*. 7 p.
64. Rose A., Parkera A., Jeffersona B., Cartmell E., 2015. The characterisation of faeces and urine; a review of the literature to inform advanced treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 101 p.
65. Rotz, C.A., Taube, F., Russelle, M.P., Oenema, J., Sanderson, M.A., Wachendorf, M., 2005. Whole-farm perspectives of nutrient flows in grassland agriculture. *Crop Science*. 45: 2139-2159.
66. Rufino M.C., Rowe E.C., Delve R.J. et Giller K.E. 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 112: 261-282.
67. Ryden J.C., Skinner J.H., 1987. Soil core incubation system for the field measurement of denitrification using acetylene-inhibition, *Soil Biol. Biochem.* 5 p.
68. Salgado P., 2018. Interactions élevage-agriculture : de la digestion entérique au métabolisme de l'exploitation. Habilitation à Diriger des Recherches. Université de la Réunion. 1-165.
69. Salgado P., 2011. Pratiques d'amélioration de la qualité des fumiers. In : Atelier national sur l'intégration Agriculture – Elevage dans la région des Hautes Terres à Madagascar, 20 et 21/06/2011, Antsirabe, Madagascar.

70. Schwartz C., Muller J-C., Decroux J., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. France Agricole. 412 p.
71. Shepherd M., Bhogal A., Barrett G., Dyer C., 2001. Dissolved organic nitrogen in agricultural soils : effects of sample preparation on measured values. Communications in Soil and Plant Analysis. 32: 1523-1542
72. Snijders P., Onduru D., Wouters B., Gachimbi L., Zake J., Ebanyat P., Ergano K., Abduke M., Keulen v.H., 2009. Cattle manure management in East Africa: Review of manure quality and nutrient losses and scenarios for cattle and manure management. Wageningen UR Livestock Research Partner in livestock innovations. 39 p.
73. Sommer S.G., Générmont S., Cellier P., Hutchings N.J, Olesen J.E, Morvan T. 2003. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field. Europ. J. Agronomy 19: 465-486.
74. Tittonell P., Zingore S., Wijk v. M.T, Corbeels M., Giller K. E., 2007. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. Field crops research. 100: 348-368.
75. Tittonell, P., Rufino, M.C., Janssen, B.H., Giller, K.E., 2009. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder croplivestock systems - evidence from Kenya. Plant Soil. 328: 253-269.
76. Tremblay N., Scharpf H.C., Weier U., Laurence H., Owen J. 2001. Régie de l'azote chez les cultures maraichères. Guides pour une fertilisation raisonnée. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 70 p.
77. Wade C., Vayssières J., Thiam M.B., Diaw M.T., Faye A., Dieng A., Lecomte P., 2018. Effet de l'intensification de l'élevage et d'une gestion améliorée de la fumure animale sur l'efficacité d'utilisation de l'azote en systèmes mixtes agriculture-élevage au centre du Sénégal. Rencontre Recherche Ruminant. 5 p.

#### **WEBOGRAPHIE**

Brouquisse R., Puppo A. 2019. Des plantes qui vivent l'air du temps. Encyclopédie de l'environnement, [En ligne].

URL : <https://www.encyclopedie environnement.org/vivant/plantes-air-du-temps/> (Juin, 2020)



## ANNEXES

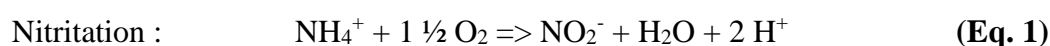
<b>ANNEXE I : MINERALISATION ET NITRIFICATION.....</b>	<b>II</b>
<b>ANNEXE II : VOLATILISATION DE L'AZOTE .....</b>	<b>IV</b>
<b>ANNEXE III : LIXIVIATION .....</b>	<b>VI</b>
<b>ANNEXE IV : EFFETS DES PERTES D'AZOTE SUR L'ENVIRONNEMENT .....</b>	<b>VII</b>
<b>ANNEXE V : RESULTAT D'ENQUETE AU NIVEAU DES EXPLOITATIONS.....</b>	<b>IX</b>
<b>ANNEXE VI : RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES .....</b>	<b>XII</b>

## ANNEXE I : MINÉRALISATION ET NITRIFICATION

Le fumier est un fertilisant organique qui subit une minéralisation grâce à des microorganismes, en présence d'eau et à une température favorable aux activités biotiques (processus biologique). La minéralisation de la matière organique induit des transformations à la fois au niveau de l'azote, mais également du carbone et des autres nutriments.

**L'azote organique** dans le fumier se transforme progressivement en ammonium (ammonification) par hydrolyse de molécules organiques azotées, par des bactéries ammonifiantes (*Bacillus*, *Clostridium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*), des champignons et des actinomycètes, en ion ammonium ou  $\text{N-NH}_4^+$ . Selon Schvartz *et al.* (2005), l'ammonification est un mécanisme nécessitant l'action de microorganismes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie. Ces bactéries décomposent des constituants organiques contenant un groupe amine,  $-\text{NH}_2$  (protéines, acides nucléiques, urée), grâce à des enzymes spécifiques, en libérant de l'ammoniac. Celui-ci se dissout dans l'eau et forme généralement des ions ammonium, en se combinant avec des ions hydrogène,  $\text{H}^+$ , abondants dans la plupart des milieux (sols, fumiers). Lorsque la teneur en C dégradable dans la matière organique est élevée, les organismes possèdent plus de source de C comme nourriture et augmentent la teneur en N minéral disponible pour leur nutrition azotée ou aussi pour la nutrition de la plante. De ce fait, le rapport C/N est un indicateur de la vitesse de minéralisation des matières organiques (Raharilaza, 2019). Pour leur développement et leur activité, les microorganismes ont besoin d'une source d'énergie (C organique dégradable) et d'azote (Tiftonell *et al.*, 2007).

L'ammonium peut ensuite se transformer progressivement en nitrate (nitrification). Cette étape de nitrification se divise en deux phases, la nitritation et la nitratisation. La nitritation est la transformation de l'ion ammonium ( $\text{N-NH}_4^+$ ) en ion nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) grâce à une oxydation réalisée par les bactéries nitrifiantes du genre *Nitrosomas* (**équation 1**). Tandis que la nitratisation est la transformation du nitrite, qui est une forme transitoire, en nitrate ( $\text{N-NO}_3^-$ ) par oxydation par des bactéries du genre *Nitrobacter* (**équation 2**).



Le N minéral est donc composé par deux formes : l'ammonium ( $N-NH_4^+$ ) et le nitrate ( $N-NO_3^-$ ). Dans le sol, ce sont ces formes ioniques qui sont disponibles pour la plante. La majorité des végétaux absorbent l'ion nitrate pour se nourrir. Toutefois, certaines plantes assimilent l'azote majoritairement sous la forme ammoniacale. C'est le cas, par exemple, dans des milieux réduits tels que des rizières ou la forme prédominante assimilée par le riz est l'ammonium  $N-NH_4^+$  (Henintsoa, 2013).

Il existe une relation entre la minéralisation de l'N et celle du C (Barrington *et al.*, 2002). La minéralisation de la matière organique est réalisée en conditions anaérobies par des microorganismes hétérotrophes : ils produisent leur énergie par la respiration en minéralisant la matière organique en  $CO_2$  ; ils utilisent de la matière organique et immobilisent l'azote et les autres éléments nutritifs pour fabriquer leur propre matière organique. La disponibilité du carbone joue un rôle majeur dans l'immobilisation de l'azote, en fonction du rapport C/N de la matière organique. Les matières organiques avec un rapport C/N faible (< 10-15) sont riches en azote : la minéralisation s'effectue rapidement et un surplus d'azote est disponible pour la plante (Tittonell *et al.*, 2007). Dans le cas de fumiers, ce faible ratio peut être une source de perte d'azote par volatilisation de l'ammoniac car il y a un excès d'ammonium ( $N-NH_4^+$ ) par rapport au C dégradé. Inversement, selon Huber *et al.* (2011), une matière organique à C/N élevé (> 15-20) favorise le risque du phénomène de « faim d'azote » pour les plantes, puisque les microorganismes utilisent l'N disponible dans le sol pour effectuer la minéralisation du carbone. Lors d'un compostage par exemple, 85% de l'azote total présent initialement est disponible pour la dégradation microbienne et 70% du C disponible est perdu sous forme de  $CO_2$  pendant le processus d'immobilisation (Barrington *et al.*, 2002). Cette perte en carbone dans le fumier conduit à une diminution de la fraction massique de la matière organique du fumier (Tittonell *et al.*, 2009).

Comme pour l'azote, les autres nutriments ne sont pas immobilisés en totalité par les microorganismes. Selon Lekasi *et al.* (2003), les fumiers des petites exploitations en Afrique induisent une perte entre 15 à 50% de l'ensemble des éléments minéraux. Par exemple, la perte en P se situe entre 3 à 30% ; celle de potassium, présent principalement dans les urines, sont de l'ordre de 5 à 80% (Snijders *et al.*, 2009).

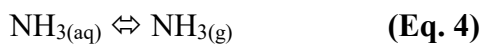
## ANNEXE II : VOLATILISATION DE L'AZOTE

Une partie importante de l'azote dans le fumier, qui est sous forme ammoniacal, peut se transformer en ammoniac (gazeux). Des pertes d'azote sous forme d'ammoniac  $\text{NH}_3$  se produisent dans le fumier lorsque la teneur initiale en  $\text{N-NH}_4^+$  est élevée (Rufino *et al.*, 2006), avec un pH qui s'accroît (Tremblay *et al.*, 2001). En effet, la transformation de l'ion ammonium en gaz ammoniacal est fonction du pH. Un pH se situant entre 6,5 à 8,5 est favorable à la volatilisation. De plus, une augmentation de l'ammonification du fumier est plus susceptible d'induire la volatilisation, lorsque le pH est favorable. À pH élevé, l'équilibre de la réaction entre ammoniac gazeux et ion ammonium soluble (équation 3, ci-dessous) est déplacé vers la droite avec pour résultat la volatilisation d'ammoniac et la production d'un proton, conduisant à une acidification progressive du fumier, ce qui va progressivement réduire la vitesse de réaction (processus physico-chimique).

D'après Freney *et al.* (1983), la concentration à la surface du fumier dépend de l'équilibre chimique entre l'ammonium aqueux ( $\text{NH}_4^+(\text{aq})$ ) et l'ammoniac aqueux ( $\text{NH}_3(\text{aq})$ ) dans le fumier :



Ensuite, la formation d'ammoniac gazeux dans le fumier dépend de l'équilibre entre l'ammoniac aqueux ( $\text{NH}_3(\text{aq})$ ) et l'ammoniac gazeux ( $\text{NH}_3(\text{g})$ ) dans le fumier :

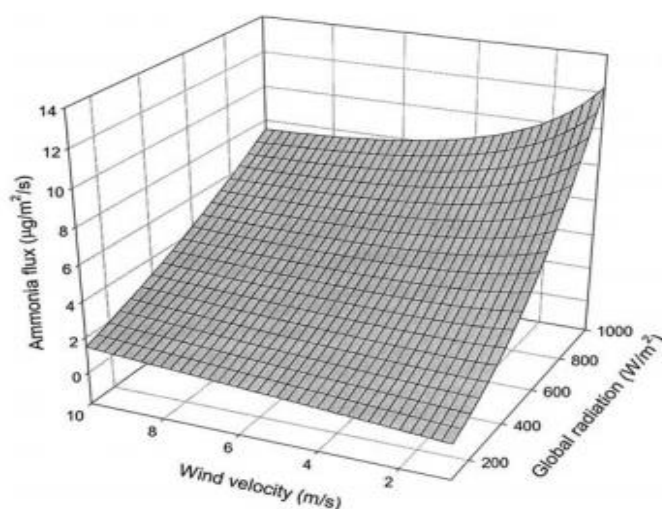


La diffusion du  $\text{NH}_3(\text{g})$  dans l'atmosphère dépend de la concentration de  $\text{NH}_3(\text{g})$  du fumier et des conditions atmosphériques (Freney *et al.*, 1983). Les paramètres climatiques et/ou physiques influent sur la volatilisation de l'azote. L'augmentation de la température dans le fumier favorise la volatilisation car l'évaporation de l'eau augmente la teneur en ammoniac aqueux du fumier (Huijsmans, 2003). À partir d'une température de 10°C, la teneur en  $\text{N-NH}_4^+$  aqueux peut s'élever. Sommer *et al.* (2003) précisent qu'une évaporation de 50% d'eau à cause d'une élévation de température dans les lisiers permet d'accroître la concentration en  $\text{NH}_3$ .

Les pertes ammoniacales sont également influencées par le vent. Ce dernier contribue à la diffusion et à la convection par turbulence des molécules de  $\text{NH}_3$  vers l'atmosphère (Sommer *et al.*, 2003). En éliminant le  $\text{NH}_3(\text{g})$  à l'interface entre le tas et l'atmosphère, le vent permet une diffusion plus rapide du gaz vers l'atmosphère. La plupart des recherches sur le sujet ont

démontré une relation linéaire entre la vitesse du vent et la volatilisation de l'ammoniac (Meisinger et Jokela, 2000).

Ces deux paramètres climatiques ont une relation en interdépendance sur la volatilisation. Selon Sommer *et al.* (2003), il existe un phénomène nommé « stabilité atmosphérique » qui est affecté par la température et la vitesse du vent sur le milieu. La volatilisation de l'ammoniac augmente considérablement avec l'augmentation du rayonnement global et avec la vitesse du vent (Figure 17).



**Figure 17.** Effet simulé de la vitesse du vent et du rayonnement global sur le flux d'ammoniac (Sommer *et al.*, 2003)

Dans les fumiers, les pertes d'azote par volatilisation sont surtout importantes pour l'urine par rapport aux excréments solides, où l'azote est présent majoritairement sous des formes organiques. D'après les études de Rotz *et al.* (2005), seul 20 à 25% de l'azote contenu dans les excréments n'est soluble dans l'eau, avec une perte en  $\text{NH}_3$  inférieure à 5% (Ryden *et al.*, 1987). Par contre, l'urine est composée principalement d'azote minérale, avec jusqu'à 80% d'urée, qui est facilement hydrolysé en ammonium par l'enzyme uréase (Haynes et Williams, 1993).

### ANNEXE III : LIXIVIATION

L'entraînement des éléments en profondeur par les eaux de pluie vers les nappes d'eau souterraine constitue le phénomène de lixiviation (ADEME, 2018). Ce processus n'est pas totalement considéré comme une source de perte en élément, notamment en azote, lorsque celui-ci se retrouve encore dans les horizons de la surface du sol colonisés par les racines ou la rhizosphère. Au contraire, ces éléments peuvent enrichir les horizons de subsurface du sol et y favoriser le développement racinaire. En fait, lors des périodes de sécheresse, les parties superficielles du sol ont tendances à s'assécher, et l'entraînement des éléments à une certaine profondeur du sol, qui reste plus humide, devient une source importante de nutriments pour les racines. Par contre, au-delà de la surface d'exploration racinaire, c'est devenu une perte en fertilité puisque les éléments ne sont plus disponibles pour la plante.

L'azote dans l'urine sous forme de nitrate est le premier élément soumis à cette forme de perte, suivi du potassium et du soufre (Snijders *et al.*, 2009). Dans le sol, il existe un complexe appelé argilo humique (CAH) qui est une structure formée par de l'argile et de l'humus. Ce complexe est chargé négativement et il a la capacité de retenir ou d'échanger des cations à sa surface. Cette charge se nomme Capacité d'Échange Cationique (CEC). Le CAH est le « garde-manger » du sol car les ions qui sont retenus sont moins susceptibles d'être perdues par la lixiviation. Or, du fait de sa charge négative, l'anion  $\text{NO}_3^-$  ne se fixe pas aux particules du sol et conserve une forte mobilité (Barrington *et al.*, 2002). Quant à l'ammonium ( $\text{N-NH}_4^+$ ), il peut aussi être lixivié lorsque les précipitations sont intenses.

## ANNEXE IV : EFFETS DES PERTES D'AZOTE SUR L'ENVIRONNEMENT

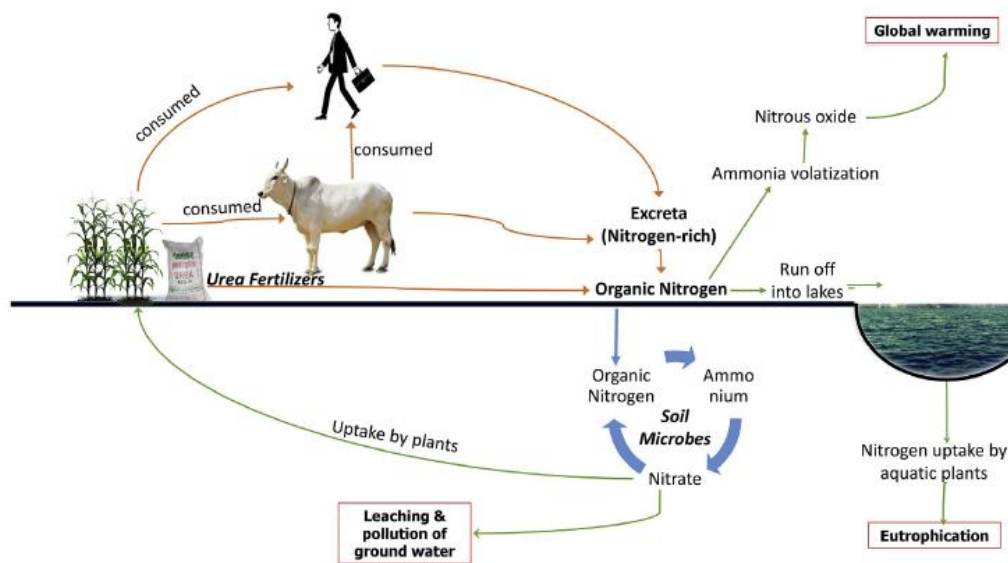
La majorité des émissions des Gaz à Effet de Serre (GES) est majoritairement d'origine atrophique. Sur le plan environnemental, selon le type de déjection (solide, liquide) et les modes de manutention (collecte, stockage, épandage), les effluents d'élevages émettent des gaz tels que l'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), le  $CO_2$  et l'ammoniac. L'élevage est responsable de l'émission de 14,5% de GES d'origine anthropique (FAO, 2014). L'élevage émie jusqu'à 53% de protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), 5% de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et 44% de méthane ( $CH_4$ ). S'ajoute à cela l'émission de méthane produit lors de la rumination du bétail tenant une place importante d'émission de l'ordre de 44% de  $CH_4$ . A ces pertes gazeuses s'ajoutent des pertes sous forme ioniques, notamment de N et P, qui contribuent à l'eutrophisation des eaux ou à l'acidification des sols (Portejoie *et al.*, 2004). Les divers effets environnementaux liés au cycle de N sont schématisés dans la Figure 18.

L'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), est un puissant GES avec un potentiel de réchauffement de la planète 298 fois plus fort que celui du  $CO_2$  (GIEC, 1995). Les émissions de protoxyde d'azote sont liées à la production et à l'épandage des engrais nécessaires à la culture du fourrage et surtout aux émissions à partir du fumier. En 2013, la FAO a publié un rapport qui conclut à une part de l'élevage dans les émissions globales évaluées à 14,5% et récemment, l'*Institute for Climate Economics* (ICE, 2019) a réévalué cette part à 18%.

En ce qui concerne l'ammoniac, c'est un gaz qui participe aux problèmes de l'environnement (Huijsmans, 2003). Selon l'ECETOC (1994), le fumier de bétail contribue jusqu'à 74% des émissions d'ammoniac atmosphérique en Europe. Dans l'atmosphère, ce dernier a une courte durée de vie, et retombe ensuite en dépôt sec ou en dépôt humide par des précipitations (Portejoie *et al.*, 2002). Ces précipitations ou retombées atmosphériques ramènent la plus grande partie de  $NH_3$  à la surface de la terre, où elle peut contribuer à l'acidification et à l'eutrophisation des écosystèmes (FAO, 2003). Ces pluies acides ainsi que les dépôts de soufre sous forme de sulfates causés par la mauvaise combustion des charbons de mauvaises qualités ont participé au dépérissement de certaines forêts en Europe.

Des applications excessives de fumier et des pratiques inefficaces de stockage du fumier peuvent aussi avoir des effets néfastes sur l'environnement à plusieurs échelles, comme la contamination des ressources en eaux et des sols aux niveaux local et régional et les émissions de GES au niveau mondial (Salgado, 2018). Par eutrophisation, il y a accumulation excessive

de nutriments surtout en azote et phosphore dans le sol lorsque des engrais d'origine animale sont appliqués à hautes doses. Cela peut menacer la fertilité du sol en raison de la concentration déséquilibrée, voire toxique, de nutriments. L'eutrophisation des eaux de surface (photo droite de la Figure 18) détériore la qualité des eaux, augmente la prolifération des algues, et fait des ravages sur les poissons, etc. Tout cela est due à des apports de substances organiques et de nutriments lorsque les déjections ou eaux usées se déversent, ruissèlent ou débordent dans les lagunes, pour finir dans les cours d'eau. Ces problèmes d'eutrophisation sont surtout rencontrés dans les pays qui conduisent l'élevage de manière intensive comme en Europe. Par contre en Afrique de l'Est ou à Madagascar, ce phénomène est presque négligeable.



**Figure 18.** Pollution azotée en relation avec l'agriculture et les secteurs associés (Adegbye *et al.*, 2019).



## ANNEXE V : RESULTAT D'ENQUETE AU NIVEAU DES EXPLOITATIONS

Le nombre de ménage enquêté est de 41, réparti dans la commune urbaine d'Antsirabe I, commune rural de Manandona et Andranomanelatra.

### ✓ Annexe V-1 : Nombre de tête par exploitation

---

Moyenne : 2

Maximal : 7

Minimal : 1

---

### ✓ Annexe V-2 : Alimentation des bovins utilisés par les exploitations enquêtées

---

Herbe sauvage :	95%
Fourrage cultivée ( <i>Ray grass</i> et avoine) :	5%
Résidus de culture :	100%

---

### ✓ Annexe V-3 : Description de l'étable des exploitations enquêtées

---

Type de l'étable	Pourcentage des exploitations (%)
Sous toit, sol en terre, présence de mur :	17%
Sous toit, sol en terre, absence de mur :	24%

---

### ✓ Annexe V-4 : Mode de stockage des fumiers à la ferme des exploitations enquêtées

---

Mode de stockage à la ferme	Pourcentage des exploitations (%)
FC	37
FNC	39
TC	2
TNC	22

---

✓ **Annexe V-5 : Réparation des exploitations stationnant leur fumier au champ**

Parmi les 41 exploitations, 16 d'entre elles stationnent leur fumier au champ avant de les enfouir. Ce qui correspond à 39% du total. Jusqu'à 75% de ces exploitations qui stationnent leur fumier se trouve dans la commune rurale de Manandona, tandis que 25% est à Andranomanelatra.

✓ **Annexe V-6 : Nombre de jour de stationnement au champ du fumier par rapport au nombre total des exploitations qui stationnent leur fumier au champ**

Nombre de jour de stationnement	Pourcentage des exploitations (%)
15	13
1	19
2	44
30	6
3	19

✓ **Annexe V-7 : Pourcentage des exploitations stationnant leur fumier au champ en grand tas et en petit tas**

La majorité des exploitations utilisent le grand tas (81%) lors du stationnement du fumier au champ. La quantité pour un grand tas équivaut est de l'ordre de ½ charrette jusqu'à deux charrettes (1 charrette = environ 200kg), tandis que le petit tas est de l'ordre de deux soubiques (20 kg).

✓ **Annexe V-8 : Raison du stationnement du fumier au champ (39% des exploitations enquêtées)**

RAISON DU STATIONNEMENT
Gestion de temps : parcelle de culture est éloigné de l'étable, du fait que le transport de fumier exige beaucoup de temps alors mieux vaut le transporter en avance.
Dépendant de la disponibilité des mains d'œuvres : si les transporteurs de fumier sont déjà libres alors ils amènent en avance le fumier au champ.
Le fumier n'est pas encore mature alors il est entreposé au champ pour qu'il murisse.
Le fumier est trop humide lorsque qu'il sort de l'étable, alors il est stationné pour assécher.
Le fumier est encore brulant à sa sortie de la ferme et peut bruler les semences.

✓ **Annexe V-9 : Raison de l'enfouissement direct du fumier au champ (61% des exploitations enquêtées)**

RAISON DE L'ENFOUISSEMENT DIRECT
Habitude
Gestion de temps : pour éviter les déplacements fréquents, les exploitants transportent et enfouissent le fumier dans la même journée.
Le fumier est déjà mature, s'il est encore entreposé au champ il va être exposé au soleil.
Proximité de l'étable et du champ.

## ANNEXE VI : RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES

- ✓ **Annexe VI-1 : ANOVA sur les trois facteurs étudiés, pour les concentrations en éléments minéraux (Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ptot, Ktot, Catot, Mgtot), le pH et les teneurs organiques (MS, Ctot, Ntot)**

Annexe VI-1-1 : Test de Kruskal-Wallis du Nmin-tot suivant le type de fumier

Test de Kruskal-Wallis (N minéral total (g kg <sup>-1</sup> ) :	
K (Valeur observée)	44,085
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Annexe VI-1-2 : ANOVA du Nmin tot suivant le temps de stationnement

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	5	5,038	1,008	3,569	<b>0,005</b>
Erreur	138	38,964	0,282		
Total corrigé	143	44,002			

Annexe VI-1-3 : ANOVA du Nmin tot suivant le temps de stationnement

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	0,595	0,595	1,946	0,165
Erreur	142	43,407	0,306		
Total corrigé	143	44,002			

Annexe VI-1-4 : ANOVA du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> suivant le type de fumier

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	28,724	9,575	21,303	<b>&lt; 0,0001</b>
Erreur	140	62,921	0,449		
Total corrigé	143	91,645			

Annexe VI-1-5 : ANOVA du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> suivant le temps de stationnement

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	5	25,263	5,053	10,504	<b>&lt; 0,0001</b>
Erreur	138	66,382	0,481		
Total corrigé	143	91,645			

Annexe VI-1-6 : Test de Kruskal-Wallis du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	1,071
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,301
alpha	0,05

Annexe VI-1-7 : Test de Kruskal-Wallis du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	54,632
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Annexe VI-1-8 : Test de Kruskal-Wallis du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	21,226
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,001
Alpha	0,05

Annexe VI-1-9 : Test de Kruskal-Wallis du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> suivant la taille du tas

K (Valeur observée)	0,295
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,587
Alpha	0,05

Annexe VI-1-10 : Test de Kruskal-Wallis du Ptot suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	39,736
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Annexe VI-1-11 : Test de Kruskal-Wallis du Ptot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	3,659
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,600
Alpha	0,05

Annexe VI-1-12 : Test de Kruskal-Wallis du Ptot suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	0,038
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,845
Alpha	0,05

Annexe VI-1-13 : Test de Kruskal-Wallis du Ktot suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	67,196
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
Alpha	0,05

Annexe VI-1-14 : Test de Kruskal-Wallis du Ktot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	7,039
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,218
alpha	0,05

Annexe VI-1-15 : Test de Kruskal-Wallis du Ktot suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	0,253
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,615
alpha	0,05

Annexe VI-1-16 : ANOVA du Catot suivant le type de fumier

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	13,748	4,583	15,438	< <b>0,0001</b>
Erreur	140	41,556	0,297		
Total corrigé	143	55,304			

Annexe VI-1-17 : Test de Kruskal-Wallis du Catot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	5,849
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,321
alpha	0,05

Annexe VI-1-18 : Test de Kruskal-Wallis du Catot suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	0,002
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,965
alpha	0,05

Annexe VI-1-19 : Test de Kruskal-Wallis du Mgtot suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	107,157
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-20 : Test de Kruskal-Wallis du Mgtot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	1,199
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,945
Alpha	0,05

Annexe VI-1-21 : Test de Kruskal-Wallis du Mgtot suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	0,000
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,984
alpha	0,05

Annexe VI-1-22 : Test de Kruskal-Wallis du pH suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	71,006
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-23 : Test de Kruskal-Wallis du pH suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	1,787
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,878
alpha	0,05

Annexe VI-1-24 : Test de Kruskal-Wallis du pH suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	0,008
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,928
alpha	0,05

Annexe VI-1-25 : Test de Kruskal-Wallis du MS suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	60,683
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-26 : Test de Kruskal-Wallis du MS suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	58,355
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-27 : Test de Kruskal-Wallis du MS suivant la taille du tas

K (Valeur observée)	3,678
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,055
alpha	0,05

Annexe VI-1-28 : Test de Kruskal-Wallis du Ctot suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	114,824
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-29 : Test de Kruskal-Wallis du Ctot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	1,527
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,910
alpha	0,05

Annexe VI-1-30 : Test de Kruskal-Wallis du Ctot suivant la taille du tas

K (Valeur observée)	0,056
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,814
alpha	0,05



Annexe VI-1-31 : Test de Kruskal-Wallis du Ntot suivant le type de fumier

K (Valeur observée)	110,670
K (Valeur critique)	7,815
DDL	3
p-value (bilatérale)	< 0,0001
alpha	0,05

Annexe VI-1-32 : Test de Kruskal-Wallis du Ntot suivant le temps de stationnement

K (Valeur observée)	1,908
K (Valeur critique)	11,070
DDL	5
p-value (bilatérale)	0,862
alpha	0,05

Annexe VI-1-33 : Test de Kruskal-Wallis du Ntot suivant la taille de tas

K (Valeur observée)	0,028
K (Valeur critique)	3,841
DDL	1
p-value (bilatérale)	0,867
alpha	0,05

✓ **Annexe VI-2 : Teneur en Ctot, Ntot, MS et concentration en Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ptot, Ktot, Catot, Mgtot, pH eau des quatre types de fumiers au temps T0**

Annexe VI-2-1 : ANOVA des quatre types de fumier du Ctot au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	656,479	218,826	45,359	< <b>0,0001</b>
Erreur	8	38,595	4,824		
Total corrigé	11	695,074			

Annexe V-2-2 : ANOVA du Ntot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	3,161	1,054	50,785	< <b>0,0001</b>
Erreur	8	0,166	0,021		
Total corrigé	11	3,327			

Annexe VI-2-3 : ANOVA du MS des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	456,370	152,123	3,972	0,053
Erreur	8	306,418	38,302		
Total corrigé	11	762,789			

Annexe VI-2-4 : ANOVA du Nmin tot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	0,087	0,029	4,154	<b>0,048</b>
Erreur	8	0,056	0,007		
Total corrigé	11	0,142			

Annexe VI-2-5 : ANOVA du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	0,154	0,051	11,497	<b>0,003</b>
Erreur	8	0,036	0,004		
Total corrigé	11	0,190			

Annexe VI-2-6 : ANOVA du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	0,054	0,018	13,362	<b>0,002</b>
Erreur	8	0,011	0,001		
Total corrigé	11	0,065			

Annexe VI-2-7 : ANOVA du Ptot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	4,752	1,584	0,331	0,804
Erreur	8	38,335	4,792		
Total corrigé	11	43,087			

Annexe VI-2-8 : ANOVA du Ktot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	132,646	44,215	15,677	<b>0,001</b>
Erreur	8	22,563	2,820		
Total corrigé	11	155,210			

Annexe VI-2-9 : ANOVA du Catot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	449,036	149,679	1,422	0,306
Erreur	8	841,866	105,233		
Total corrigé	11	1290,901			

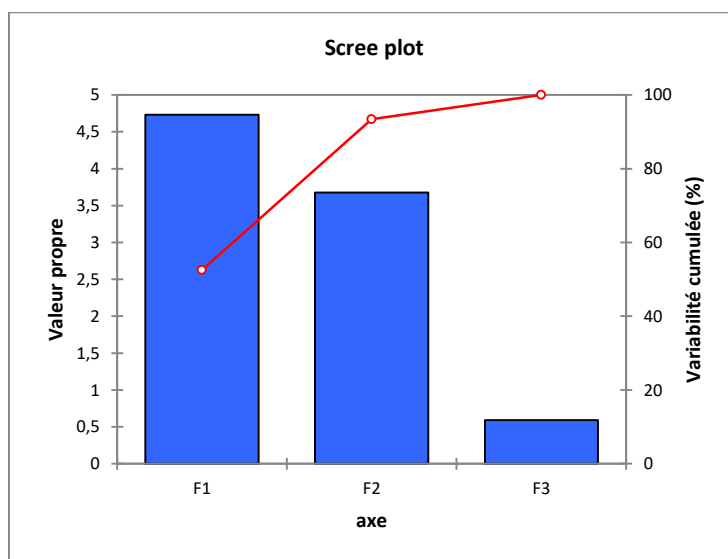
Annexe VI-2-10 : ANOVA du Mgtot des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	24,577	8,192	20,047	<b>0,000</b>
Erreur	8	3,269	0,409		
Total corrigé	11	27,846			

Annexe VI-2-11 : ANOVA du pH eau des quatre types de fumier au temps T0

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	0,731	0,244	29,914	<b>0,000</b>
Erreur	8	0,065	0,008		
Total corrigé	11	0,797			

✓ **Annexe VI-3 : Contribution des axes de l'ACP de la concentration en différents éléments au temps T0**



✓ **Annexe VI-4 : ANOVA de la concentration en Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol par rapport au temps de stationnement T0**

Annexe 4-4-1 : ANOVA du Nmin tot

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	3,234	1,617	0,802	0,491
Erreur	6	12,096	2,016		
Total corrigé	8	15,330			

Annexe VI-4-2 : ANOVA du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	0,195	0,097	0,205	0,820
Erreur	6	2,852	0,475		
Total corrigé	8	3,047			

Annexe VI-4-3 : ANOVA du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	4,961	2,480	1,212	0,361
Erreur	6	12,275	2,046		
Total corrigé	8	17,236			

✓ **Annexe VI-5 : ANOVA de la concentration en Nmin tot, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol durant les temps de stationnement**

Annexe VI-5-1 : ANOVA du Nmin tot

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	1956,887	652,296	22,518	<b>0,000</b>
Erreur	8	231,740	28,967		
Total corrigé	11	2188,627			

Annexe VI-5-2 : ANOVA du N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	1451,011	483,670	20,273	<b>0,000</b>
Erreur	8	190,860	23,858		
Total corrigé	11	1641,872			

Annexe VI-5-3 : ANOVA du N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	150,044	50,015	27,610	<b>0,000</b>
Erreur	8	14,492	1,811		
Total corrigé	11	164,536			