

# EVALUATION DE L'EFFICIENCE D'UTILISATION DE L'AZOTE DES PRAIRIES RÉUNIONNAISES CONDUITES AVEC UNE FERTILISATION MINÉRALE ET/OU ORGANIQUE SUR LE LONG TERME

**Antoine CHAPPERON**

## RESUMÉ

Les prairies réunionnaises représentent la deuxième surface agricole de l'île de la Réunion. Bien que la production de fourrage à la Réunion couvre les besoins des cheptels, elle reste sous-valorisée, en partie en raison de pratiques de fertilisation insuffisamment raisonnées. Les types d'engrais et les doses appliquées ne prennent pas toujours en compte les besoins spécifiques des cultures ou la saisonnalité. Cela s'explique en partie par un manque de références locales sur la réponse des prairies à la fertilisation. Le Cirad a mené un essai expérimental afin d'évaluer les effets agronomiques et environnementaux à long terme de différents types de fertilisation azotée en climat tropical.

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer quel type de fertilisation, testé dans le cadre de cet essai, permet une meilleure valorisation de l'azote en climat tropical, dans l'optique d'améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée des prairies réunionnaises. Pour cela, nous avons étudié l'impact de différents types de fertilisation sur les propriétés du sol et sur différents indicateurs de la valorisation de l'azote.

La fertilisation minérale acidifie les sols, mais contribue à augmenter la teneur en matière organique et les stocks d'azote. La fertilisation organique relève le niveau du pH, augmente la teneur en matière organique et les stocks d'azote. Nous observons une augmentation des exportations en azote lors d'une fertilisation organique ou mixte. Les indicateurs montrent une meilleure valorisation de l'azote sur le long terme, grâce à l'effet de la matière organique et à l'arrière-effet de la minéralisation de l'humus.

**Mots-clés :** fertilisation azotée, prairie, production fourragère, climat tropical, engrais organiques, engrais minéraux

## ABSTRACT

Grasslands represent the second largest agricultural area on the island of Reunion (22,6% of the island's utilized agricultural area). The fodder production in Reunion is undervalued, partly due to insufficient fertilization practices. The doses do not respect the specific needs of crops nor the seasonality. To assess the long-term agronomic and environmental effects of several types of nitrogen fertilization (organic, mineral, or mixed) in tropical climates, Cirad conducted an experimental trial from 2004 to 2021.

The main objective of this work is to determine which type of fertilization allows better use of nitrogen in tropical climates. To do this, we studied the impact of fertilization on different soil properties (such as pH, organic matter content, and nitrogen stock). Then, we analyzed several indicators of nitrogen efficiency (such as nitrogen exported by the fodder, the apparent nitrogen utilization, the nitrogen rate provided by the fertilizer, and the nitrogen nutrition index).

The results show that mineral fertilization induces soil acidification. However, it still contributes to increasing organic matter content and nitrogen stocks. Organic fertilization raises the pH level, increases organic matter content and nitrogen stocks. Nitrogen exports are greater with organic fertilization, thanks to the effect of organic matter and the aftereffect of humus mineralization. A significant interannual variation was recorded, probably because of climate fluctuations.

**Keywords:** nitrogen fertilization, grassland, fodder production, tropical climate, organic fertilization, mineral fertilization

## **REMERCIEMENTS**

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement ma maîtresse de stage Maëva MIRALLES-BRUNEAU pour son encadrement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de mon stage. Ses nombreuses relectures ont largement contribué à la rédaction de ce mémoire.

Je tiens également à remercier Louis-Axel EDOUARD RAMBAUT pour son accompagnement essentiel sur la partie statistique, ainsi que pour ses relectures et ses remarques constructives qui ont permis d'enrichir ce travail.

Merci à Emmanuel LEGENDRE pour m'avoir présenté le travail qu'il mène au sein de l'Association Réunionnaise de Pastoralisme.

Merci à ma tutrice Elana DAYOUB pour son suivi régulier.

Merci aux membres du Cirad Ligne Paradis pour leur accueil, leur disponibilité et leur soutien.

Enfin, un grand merci aux stagiaires, dont l'amitié et le soutien ont été précieux tout au long de ce stage. Merci à Magéna, Lou-Anne, Mathis, Gaël, Anaïs et bien d'autres encore.

# SOMMAIRE

TABLE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET UNITÉS .....	V
INTRODUCTION .....	1
1 CONTEXTE ET ENJEUX .....	2
1.1 Le Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement (Cirad) .....	2
1.1.1 Historique du Cirad .....	2
1.1.2 L'unité mixte de recherche (UMR) systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (Selmet) .....	2
1.1.2.1 L'UMR Selmet dans le monde .....	2
1.1.2.2 L'UMR Selmet à La Réunion .....	2
1.2 Le contexte de la production fourragère à La Réunion .....	3
1.2.1 Contexte pédoclimatique de La Réunion .....	3
1.2.2 Le développement de l'agriculture réunionnaise .....	4
1.2.3 L'élevage à La Réunion et sa consommation de fourrage .....	4
1.2.4 Les systèmes fourragers réunionnais .....	7
1.2.4.1 Les surfaces fourragères et leur production .....	7
1.2.4.2 Enjeux liés à la gestion des prairies .....	10
1.2.4.2.1 Pratiques de gestion des prairies .....	10
1.2.4.2.2 Sous valorisation de la production fourragère .....	10
1.2.4.2.3 Problématiques liées à la gestion des prairies .....	11
1.3 L'azote dans les systèmes prairiaux .....	12
1.3.1 Le cycle de l'azote dans les systèmes prairiaux .....	12
1.3.2 Impact d'une fertilisation azotée minérale ou organique .....	13
1.3.3 Fertilisation des prairies réunionnaises .....	14
1.3.3.1 Evolution conjointe de la recherche et du conseil .....	14
1.3.3.2 Pratiques de fertilisation et enjeux associés .....	14
1.3.4 Problématiques et hypothèses de travail .....	15
2 DEMARCHE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE .....	17
2.1 Les essais fertilisation des prairies .....	17
2.2 Démarche méthodologique .....	19
2.2.1 Recherche bibliographique sur les variables et indicateurs de la valorisation de l'azote .....	20
2.2.1.1 Propriétés du sol illustrant les mécanismes d'utilisation de l'azote .....	20
2.2.1.2 Les exportations d'azote .....	21
2.2.1.3 Le bilan azoté apparent .....	21
2.2.1.4 Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et le taux d'azote apporté par l'engrais ( $t_{\text{engrais}}$ ) .....	22
2.2.1.5 L'indice de nutrition azotée (iNN) .....	23
2.3 Méthodologie de traitement des résultats .....	24
3 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS .....	25
3.1 Impact de la fertilisation sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	25
3.1.1 Evolution du pH sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	25
3.1.2 Evolution de la teneur en MO sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	27
3.1.3 Evolution du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm du sol .....	31
3.2 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote .....	33
3.2.1 Evolution des exportations en azote .....	33
3.2.1.1 À l'échelle de la coupe .....	33
3.2.1.2 À l'échelle annuelle .....	35
3.2.2 Evolution du bilan azoté apparent annuel .....	38
3.2.3 Evolution du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et du taux d'azote apporté par l'engrais ( $t_{\text{engrais}}$ ) à l'échelle de l'année .....	40
3.2.4 Evolution de l'iNN à l'échelle de la coupe .....	43
4 DISCUSSIONS ET PROPOSITIONS .....	45
4.1 Comparatif avec les essais IRAT/Cirad .....	45
4.2 Impact de la fertilisation sur les propriétés du sol .....	45
4.3 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote .....	46
4.4 Adaptation du conseil en fertilisation .....	47
4.4.1 Optimisation de la valorisation de l'azote .....	47

4.4.2	Impact des conditions climatiques.....	48
4.4.3	Suivi des pratiques de fertilisation.....	48
	CONCLUSION.....	50
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
	TABLE DES FIGURES.....	61
	TABLE DES TABLEAUX.....	64
	Annexe I : Carte des isohyètes annuelles (en mm) de la Réunion (Meteo France, 2024).....	68
	Annexe II : Carte des isothermes moyens (en °C) à la Réunion (Meteo France, 2024).....	69
	Annexe III : Gouvernance de la filière bovin laitier à la Réunion (Agreste, 2021a).....	70
	Annexe IV : Gouvernance de la filière bovin viande à la Réunion (Agreste, 2021b).....	71
	Annexe V : Gouvernance de la filière ovin et caprin viande à la Réunion (Agreste, 2021c).....	72
	Annexe VI : Photographie des principales graminées des prairies de la Réunion.....	73
	Annexe VII : Description détaillée du cycle de l'azote.....	75
	Annexe VIII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur les exportations en azote.....	77
	Annexe IX : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur les exportations en azote.....	78
	Annexe X : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le bilan azoté apparent.....	79
	Annexe XI : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le bilan azoté apparent.....	80
	Annexe XII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le CAU et le $tN_{engrais}$ .....	81
	Annexe XIII : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le CAU et le $tN_{engrais}$ .....	82
	Annexe XIV : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur l'iNN.....	83
	Annexe XV : Résultats de l'analyse des données sur le site du Lycée.....	84
	Annexe XVI : Résultats de l'analyse des données sur le site de la Sedael.....	91
	TABLE DES ANNEXES.....	98

## **TABLE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET UNITÉS**

ADP : adénosine diphosphate

Aff. en vert : affouragement en vert

AFP : association française de pastoralisme

ALTER : conduite alternative des élevages

ARE : animaux, ressources et environnements

ARIBEV : association réunionnaise interprofessionnelle du bétail, des viandes et du lait

CAU : coefficient apparent d'utilisation de l'azote

CEC : capacité d'échange cationique

CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O : urée

CILAM : compagnie laitière des Mascareignes

Cirad : centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

cm : centimètre

DEFIT : développement de l'élevage et des filières dans les territoires

Δ (delta) : différence

EMT : extensif moyen troupeau

FODEBO : fonds de développement de l'élevage bovin

FODELAIT : fonds de développement de l'élevage laitier

FBA : fixation biologique de l'azote

GERDAT : groupement d'étude et de recherche pour le développement de l'agriculture tropicale

GMS : grandes et moyennes surfaces

ha : hectare

Idele : institut de l'élevage

iNN : indice de nutrition azotée

IRAT : institut de recherche agronomique tropicale et des cultures vivrières

kg : kilogramme

m : mètre

MAT : matière azotée totale

MS : matière sèche

N : azote

N<sub>2</sub> : diazote

NH<sub>3</sub> : ammoniac

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : ammonium

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : nitrate

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> : nitrite

NO : monoxyde d'azote

N<sub>2</sub>O : protoxyde d'azote

OAD : outil d'aide à la décision

OVICAP : Ovin & Caprin

PAC : politique agricole commune

POSEI : programme d'options spécifiques à l'éloignement et à l'insularité

RITA : réseaux d'innovation et de transfert agricole

SAU : surface agricole utile  
SAFER : société d'aménagement foncier et d'établissement rural  
SEDAEL : société d'étude, de développement, d'amélioration de l'élevage local  
SELMET : systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux  
SIGT : semi-intensif grand troupeau  
SIMT : semi-intensif moyen troupeau  
SPIR : spectroscopie proche infrarouge  
STH : surface toujours en herbe  
t : tonne  
tMS : tonne de matière sèche  
UMR : unité mixte de recherche  
UURCOOPA : union réunionnaise des coopératives agricoles

## INTRODUCTION

Les prairies couvrent 22,6 % de la surface agricole utile de la Réunion (RA 2020). Ces surfaces jouent un rôle clé dans l'alimentation des ruminants, en étant valorisées en production de fourrage ou au pâturage. Cependant, à la Réunion, malgré une production globale qui couvre les besoins des cheptels, les prairies sont sous valorisées, de l'ordre de 40 à 70 % de la production potentielle (Leleux 2016). Cette sous-valorisation constitue un frein au développement de l'élevage, et pour certaines filières cela crée une dépendance accrue à l'importation de provendes.

L'un des principaux leviers identifiés pour améliorer la productivité quantitative et qualitative des prairies repose sur une meilleure gestion de la fertilisation. La fertilisation a souvent été analysée sous l'angle de la productivité, avec pour objectif d'augmenter les rendements et la qualité du fourrage (Blanfort 1998). Cependant, une approche alternative consiste à étudier la fertilisation à travers la valorisation de l'azote. En prenant en compte cet aspect, cela permet de faire évoluer les pratiques agricoles et le conseil en matière de fertilisation.

Par ailleurs, la gestion des effluents d'élevage est un enjeu crucial dans le cadre de la fertilisation des prairies. Ces effluents, souvent considérés comme des déchets, peuvent constituer une alternative aux engrais minéraux, dont l'importation à la Réunion représente un coût important (Miralles-Bruneau, Nobile, Bravin 2023).

L'objectif de ce mémoire est donc d'évaluer l'impact de différents types de fertilisation azotée en climat tropical. Pour cela, les données d'un essai longue durée vont être valorisées. Dix modalités de fertilisation différentes seront étudiées sous l'angle de la valorisation de l'azote. Plusieurs indicateurs seront analysés, afin d'étudier l'impact de la fertilisation sur les propriétés du sol, et sur la valorisation de l'azote par le fourrage.

L'étude a été menée en collaboration avec le centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad), un organisme de recherche s'intéressant à la résilience des agricultures, des systèmes alimentaires et des forêts (CIRAD 2022a). Plus précisément, cette recherche a été menée au sein de l'unité mixte de recherche système d'élevage méditerranéen et tropicaux.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante : (i) contexte et enjeux de la gestion de l'azote en climat tropical (ii) méthodologie employée pour répondre à la question de recherche (iii) présentation des principaux résultats obtenus (iv) discussion de ces résultats au regard de la littérature scientifique et des études préalablement menées.



# 1 CONTEXTE ET ENJEUX

## 1.1 Le Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement (Cirad)

Le Cirad est un institut français spécialisé dans la recherche agronomique et la coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes.

### 1.1.1 Historique du Cirad

Dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la France développe des instituts techniques et de recherche afin d'améliorer l'agronomie des pays tropicaux faisant partie de son empire colonial ; neuf instituts sont créés pour améliorer la production de la France métropolitaine. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'enjeu de ces instituts est d'aider les territoires à assurer leur propre alimentation. En parallèle, le Groupement d'études et de recherche pour le développement de l'agriculture tropicale (Gerdat), créé en 1970, permet de coordonner les différents instituts. En 1984, le Cirad succède au Gerdat. Il regroupe les instituts techniques et de recherche (Cirad 2021).

Aujourd'hui, le Cirad est l'un des acteurs les plus importants de la recherche agronomique en milieu tropical. Il est localisé dans plus de 50 pays tropicaux et méditerranéens. Sa mission est de contribuer à la résilience des agricultures, des systèmes alimentaires et des forêts pour un monde plus durable et solidaire. Les thématiques de recherche n'ont cessé d'évoluer et sont désormais axées sur la biodiversité, les approches territoriales, le changement climatique, les systèmes alimentaires, les transitions agroécologiques et la santé des animaux, des plantes et des écosystèmes (Cirad 2022a).

### 1.1.2 L'unité mixte de recherche (UMR) systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (Selmet)

#### 1.1.2.1 L'UMR Selmet dans le monde

L'UMR regroupe une centaine d'agents implantés en Afrique de l'Ouest, Amazonie, Asie du Sud-Est, Méditerranée et Océan Indien, ce qui permet d'étudier un large panel de formes d'élevage. Les travaux se concentrent sur l'élevage des ruminants, principalement les bovins, et traitent du territoire à l'animal. L'unité opère sur plusieurs sites expérimentaux présents en France et sur les territoires étrangers. Elle possède plusieurs laboratoires expérimentaux et un herbier (Cirad 2022b). L'UMR Selmet est divisée en trois collectifs : conduite alternative des élevages (ALTER), développement de l'élevage et des filières dans les territoires (DEFIT) et animaux, ressources, environnements (ARE), dans lequel s'inscrit ce mémoire.

Le collectif ARE s'intéresse aux pratiques d'élevage et de productivité agricole dans un contexte de changement climatique, de croissance démographique et d'évolution de l'agriculture. Le collectif ARE conceptualise des systèmes d'élevage agroécologique, en s'appuyant sur la diversité animale et végétale pour augmenter les ressources alimentaires, réduire les intrants et renforcer la résilience des cycles de nutriments. Ses axes de recherche portent sur :

- La capacité adaptative des ruminants dans les systèmes méditerranéens et tropicaux,
- L'évaluation multicritère et la gestion durable des ressources alimentaires,
- L'élevage et ses interactions avec l'environnement (impacts et services écosystémiques) (Cirad 2022c).

#### 1.1.2.2 L'UMR Selmet à La Réunion

Depuis son implantation à La Réunion en 1987, le pôle élevage a réalisé de nombreux travaux et études, s'inscrivant dans la continuité des recherches menées par l'institut de recherche agronomique tropicale et des cultures vivrières (IRAT) de 1960 à 1986. Ces travaux se sont concentrés sur le développement de l'élevage et sa professionnalisation.

Les thématiques de recherche ont évolué au fil des décennies pour répondre aux besoins de la profession et aux défis environnementaux. De 1987 à 1993, ces travaux se sont principalement axés sur la santé, la reproduction et la nutrition animale, sur la production fourragère et sur la mécanisation. Ces thématiques visaient à renforcer le développement technique afin d'accompagner le développement des compétences des techniciens et des éleveurs. Ces travaux ont modernisé les pratiques agricoles et ont amélioré la productivité des élevages réunionnais. Entre 1994 et 2007, l'UMR a orienté ses travaux vers le développement d'outils d'aide à la décision (OAD) et sur l'économie des exploitations agricoles. Ces recherches étaient destinées principalement aux coopératives agricoles afin d'orienter les stratégies des filières. L'objectif était de fournir des outils permettant aux éleveurs de prendre des décisions éclairées pour optimiser leurs exploitations et améliorer leur rentabilité. Depuis 2008, les recherches se sont élargies pour inclure des problématiques telles que l'énergie, l'environnement, les races locales et les systèmes d'élevage alternatifs. Ces nouvelles thématiques répondent aux attentes sociétales et aux enjeux climatiques, visant à promouvoir des pratiques agricoles durables et résilientes (Lopez et al. 2021).

Les travaux ont plus spécifiquement porté sur les systèmes fourragers. Entre 1990 et 2000, l'UMR Selmet s'est concentrée sur l'utilisation et la valorisation des ressources alimentaires par l'élevage bovin. L'objectif était de mieux comprendre la variabilité des systèmes d'élevage, des systèmes fourragers et des performances zootechniques (Mandret 2000). Puis, à partir des années 2000, la recherche au sein de l'UMR Selmet s'est focalisée sur plusieurs grands thèmes. Au niveau de la production fourragère, le Cirad a mené des travaux sur la quantification de la biomasse produite à La Réunion (Dobignard 2011; Achard 2020a; 2020b; Lurette et al. 2022) et sur la qualité des fourrages à l'aide la méthode de spectrométrie proche infrarouge (SPIR) (Solesse, Miralles-Bruneau 2022a; 2022b; 2022c). Le Cirad s'est également intéressé à la fertilisation des surfaces fourragères (Edouard-Rambaut et al. 2022; Nobile et al. 2022; Miralles-Bruneau 2022). L'étude de Scherrer en 2017 a permis de caractériser les pratiques des éleveurs bovins allaitants. En parallèle, en 2017, la mise en place de l'Observatoire de la Croissance de l'Herbe (OCH) par l'association réunionnaise de pastoralisme (ARP) et le Cirad a permis de récolter des données de croissance d'herbe sur des parcelles représentatives des conditions pédoclimatiques de La Réunion afin d'analyser la dynamique de la croissance de l'herbe à La Réunion (Averna et al. 2020).

## **1.2 Le contexte de la production fourragère à La Réunion**

L'île de La Réunion est située dans l'Océan Indien à l'Est de Madagascar, au sein de l'archipel des Mascareignes.

### **1.2.1 Contexte pédoclimatique de La Réunion**

L'île de La Réunion est une formation volcanique montagneuse, constituée du Piton des Neiges, qui culmine à 3 069 m, et du Piton de la Fournaise, toujours actif. L'effondrement entre les deux massifs forme la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes. La géologie de l'île présente des pentes très fortes, résultant en des contraintes importantes pour l'agriculture réunionnaise. La totalité de l'île de La Réunion est classée en zone agricole défavorisée, avec 53 % de la surface agricole utile (SAU) en zone de montagne et 47 % en zone de piémont (Darras, Bosc, Mialet-Serra 2021).

Les sols sont entièrement composés de dérivés de roches volcaniques, provenant de coulées de lave du Piton des Neiges ou de la Fournaise (BRGM 2020).

La Réunion est sous l'influence d'un climat tropical humide avec une saison humide et chaude, l'été austral, de décembre à mars, et une saison sèche plus froide, l'hiver austral, de mai à novembre. Avril et novembre sont des mois de transition. De très forts gradients de pluviométrie sont observables, avec des cumuls pouvant atteindre 9 000 mm. Le climat est singulier avec une influence importante du relief, avec à l'Est (côte au vent) une très forte pluviométrie toute l'année et à l'Ouest (côte sous le vent) des cumuls de pluie plus

faibles. Le relief crée une multitude de microclimats (plus de 200), conduisant à des ressources en eau variables et inégales entre les secteurs. Les températures sont douces, grâce aux alizés. Les cartes de pluviométrie et de température moyenne annuelles sont présentées respectivement en Annexe I et en Annexe II (Météo France 2024; Darras, Bosc, Mialet-Serra 2021).

### **1.2.2 Le développement de l'agriculture réunionnaise**

Découverte par les Européens au début du XVI<sup>e</sup> siècle, l'île de La Réunion est colonisée par les Français en 1638. À partir de 1700, l'agriculture se développe, sous l'impulsion de la Compagnie des Indes, pour l'exportation de café, d'épices et de coton. La culture de la vanille se développe en 1840 et la canne à sucre commence à s'imposer au début du XIX<sup>e</sup> siècle, remplaçant progressivement les autres cultures. L'élevage est présent dès les premiers temps de la colonisation de l'île, pour l'autoconsommation et la traction (Darras, Bosc, Mialet-Serra 2021).

En 1955, 5 % des exploitations concentrent encore 70 % de la SAU totale (Mandret 2000). Une grande réforme foncière est initiée par la Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural (SAFER) dès 1966. La SAFER rachète et morcèle les terres agricoles en unités de production de 5 ha de canne à sucre ou 20-30 ha de pâture. Cette réforme affectera 40 % de la SAU de l'île et contribuera en partie à la délocalisation de l'élevage vers les Hauts de La Réunion (INSEE 2010; Darras, Bosc, Mialet-Serra 2021; Mandret 2000).

À la suite des différentes vagues d'immigration successives, la population sur le littoral devient trop nombreuse. Le plan de réaménagement des Hauts, lancé en 1975, a eu pour objectif de développer l'économie dans les Hauts, de rééquilibrer la démographie entre le littoral et les Hauts, et de réduire la dépendance alimentaire de l'île. Ce plan s'est appuyé notamment sur la structuration de l'élevage bovin, à travers deux axes principaux : (i) récupérer et mettre en valeur les friches et (ii) satisfaire la demande en lait et en viande locale. Cela a permis de développer plusieurs zones fourragères, les quatre principales se situant à la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes, les Hauts de l'Ouest et les Hauts de Saint-Joseph (Benoit 1991). Un programme d'extension de l'élevage bovin est également mis en place en 1974 afin d'exploiter les zones de montagne. Ces différentes politiques conduiront à installer durablement l'élevage dans les Hauts (Mandret 2000; Darras, Bosc, Mialet-Serra 2021).

### **1.2.3 L'élevage à La Réunion et sa consommation de fourrage**

L'élevage réunionnais est composé de filières viandes (porcin, bovin, caprin, ovin, cunicole), laitières (bovin et caprin), avicole (viande, et œufs) et apicole. A cela s'ajoute l'élevage de cervidés (destiné à la consommation de viande) et l'élevage équin (destiné au loisir) qui ne sont pas organisés autour d'une filière. L'élevage représente environ un tiers de la valeur ajoutée de l'agriculture réunionnaise (DAAF de La Réunion 2024a). Au sein de ces différentes filières, l'analyse se concentrera uniquement sur celles valorisant les prairies et les fourrages, à savoir les filières bovines, ovines, caprines, cervidés et équine. La Figure 1 présente la localisation des élevages bovins, petits ruminants, équidés et cervidés.

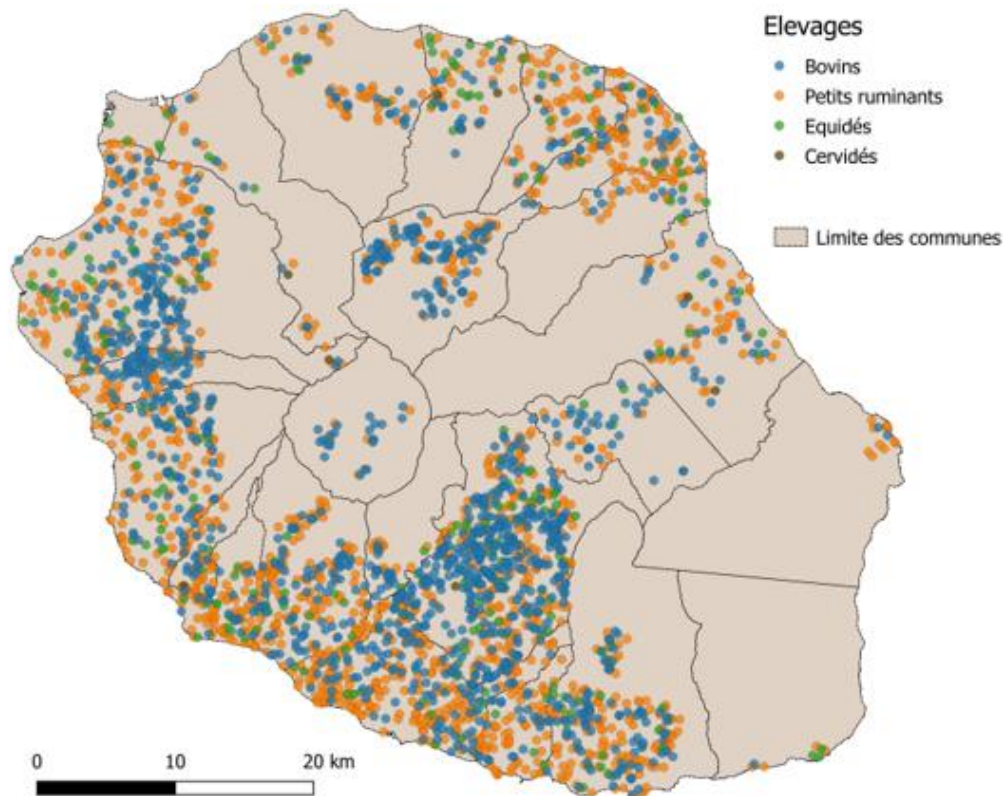


Figure 1 : Carte de la localisation des élevages à La Réunion, selon le type d'élevage. Chaque point représente une exploitation agricole (Achard 2020a).

**La filière laitière** est composée en 2022 de 49 élevages bovins laitiers, localisés principalement à la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes, Saint-Joseph et les Hauts de l'Ouest. Le cheptel de l'île est de 2 342 vaches laitières (Magnier 2019; Agreste 2021a). Sur La Réunion, deux types d'élevage prédominent (selon la typologie de la chambre d'agriculture) : les systèmes Semi Intensif Moyen Troupeau (SIMT) et les systèmes Semi Intensif Grand Troupeau (SIGT). Les élevages SIMT (plus de 50 % des élevages réunionnais) comptent environ 40 vaches laitières (VL), et 6 à 15 ha de surfaces fourragères. Le chargement est de 2,5 à 4 VL.ha<sup>-1</sup>. Les rations sont composées d'ensilage d'herbe en balles rondes, de concentrés, de paille de *Saccharum officinarum* (n.c. canne à sucre) et de foin. Les élevages SIGT (35 % des élevages réunionnais) comptent moins de 80 VL et environ 30 ha de surface fourragère. Le chargement est de plus de 4 VL.ha<sup>-1</sup>. La filière laitière s'organise autour de la Sicalait, créée en 1962. Elle fournit un accompagnement technique et logistique aux éleveurs et assure la production de génisses sur un élevage dédié à la Plaine des Cafres (Magnier 2019; Achard 2020b; Agreste 2021a).

**La filière allaitante** compte, en 2019, 16 741 bovins, dont 8 365 vaches allaitantes (RA 2020). L'effectif est réparti sur 1 301 exploitations, dont 337 adhérentes à la coopérative Sica Révia. Trois types d'ateliers de production sont distinguables. Les naisseurs stricts produisent des broutards destinés à la vente pour engraissement. Ils sont principalement conduits en pâturage tournant avec un complément de concentrés. Lors de la période de déficit hivernal, les éleveurs utilisent des balles rondes enrubannées et de la paille de canne, voire du foin. Les naisseurs-engraisseurs spécialisés produisent des broutards et les engraisent dans la même exploitation. L'engraissement est réalisé en bâtiment, avec une ration composée de graminées tempérées et tropicales, sous forme d'ensilage en balles rondes enrubannées et éventuellement un apport de fourrages secs (foin de *Chloris gayana*, n.c. Chloris, et paille de canne à sucre). Enfin, les engraisseurs élèvent les broutards produits par les élevages naisseurs stricts. Ce sont principalement des canniers qui se sont diversifiés pour exploiter au maximum les co-produits de la canne à sucre.

L'engraissement est réalisé en bâtiment, avec une ration composée de choux de canne, de paille de canne à sucre, de bagasse et de foin de Chloris. Les ateliers naisseurs stricts et naisseurs-engraisseurs sont localisés dans les Hauts, tandis que les ateliers engraisseurs sont localisés dans les Bas (Magnier 2019; Choisis et al. 2008; Villaret 2022). La filière allaitante s'organise autour de la Sica Révia, créée en 1979. Elle assure 75 % des abattages de l'île et couvre 94 % de la production locale. La majorité des éleveurs naisseurs se situent dans les Hauts de l'Ouest et à la Plaine des Cafres, et à Saint-Pierre, Saint-Louis, Petite île et Saint-Joseph pour les éleveurs engraisseurs. Les éleveurs hors-filière, indépendants, sont environ 800. La taille de leur cheptel est très réduite, avec une moyenne de 5 têtes par exploitation. Ils couvrent 6 % de la production locale (Agreste 2021b). Le cheptel est estimé à 5 600 bovins, dont 2 300 vaches allaitantes. Leur alimentation se fait majoritairement en pâture (90 %), et leur ration est complétée par de la paille de canne ou autre fourrage (Leleux 2016).

**Les filières ovines et caprines** sont composées d'une majorité d'éleveurs indépendants, et d'un peu moins de cent éleveurs adhérents à la coopérative SICA OVICAP (Ovins & Caprins). Il est complexe de recenser précisément les élevages hors-filière. Le recensement agricole de 2010 dénombre 1 100 éleveurs caprins élevant en moyenne 8 caprins par élevage, et une centaine d'éleveurs ovins détenant en moyenne 15 brebis par exploitation. 58 éleveurs ovins et 33 éleveurs caprins sont adhérents à la SICA OVICAP. Quelques élevages caprins font de la production laitière, mais ils restent marginaux (Agreste 2021c; Leleux 2016; Magnier 2019). Au sein de la SICA OVICAP, les élevages ovins type sont composés de 120 brebis mères, 36 agnelles de renouvellement et 6 béliers, avec une productivité cible de 1,8 agneaux par brebis et par an. Les élevages caprins type sont composés d'environ 30 chèvres mères, avec une production cible de 1,9 chevreaux par chèvre et par an. Les animaux d'élevage hors-filière sont majoritairement destinés aux pratiques religieuses de la religion tamoule. Les boucs sont destinés aux sacrifices rituels et représentent près de 90 % de la production locale. Les animaux hors-filière sont également destinés à la consommation familiale ou à la constitution de trésorerie (les animaux peuvent être commercialisés en cas de besoin) (Magnier 2019).

**L'élevage équin** est composé d'un cheptel estimé à 3 000 chevaux, répartis équitablement entre des éleveurs particuliers et environ 60 structures exerçant une activité équestre. Le recensement du cheptel équin est très complexe à mettre en place, un grand nombre d'animaux n'étant pas déclarés. L'élevage des équins est à destination du sport et du loisir. L'élevage n'est pas organisé autour d'une filière équine (Leleux 2016; Magnier 2019).

Les chevaux détenus par les particuliers (50 % du cheptel) ont une ration composée à 90 % de foin. Les chevaux détenus par les structures équestres ont une ration composée à 70 % de foin, à 20 % de pâture et à 10 % d'autres fourrages. 80 % des éleveurs s'approvisionnent en foin chez des producteurs indépendants, les 20 % autres restants produisant eux-mêmes leur foin. Les rations sont complétées par de la paille de canne, des drèches d'usine de bières et des graines de soja germées. Une partie des éleveurs complètent les rations avec des concentrés. Les chargements moyens à l'hectare sont de 6 à 10 chevaux (Leleux 2016; Magnier 2019).

**L'élevage de cervidés** s'organise autour d'une douzaine d'éleveurs, possédant un cheptel estimé à 3 600 animaux. Un éleveur présent à Sainte-Marie concentre 1/3 du cheptel. L'élevage des cervidés est localisé en altitude, à la limite de la culture de la canne à sucre et des terres domaniales, ou sur le littoral. En altitude, les élevages sont extensifs, avec un chargement inférieur à 5 biches suitées (accompagnées d'un faon) par hectare. Les élevages sont conduits en pâturage sans complémentation. Sur le littoral, étant donné la pression foncière, les élevages sont intensifs avec un chargement de 8 à 40 biches suitées par hectare. L'alimentation est composée principalement de cannes fourragères (Grimaud 2007; Leleux 2016; Magnier 2019).

Le tableau ci-dessous présente la consommation des différentes filières en termes de type de fourrage. Les bovins allaitants sont les principaux consommateurs de fourrage (65 %).

Leur consommation est répartie principalement entre l'herbe pâturée, l'enrubannée, et l'affouragement en vert. Les caprins sont en deuxième position, avec une consommation plus importante d'affouragement en vert. Les bovins laitiers consomment principalement de l'enrubannée et un peu de paille de canne. Les ovins ont une faible part dans la consommation totale (3,3 %), et consomment principalement du foin, de l'affouragement en vert et de l'enrubannée. Les Équidés consomment exclusivement du foin. Les cervidés consomment principalement de l'herbe pâturée.

Tableau 1 : Consommation annuelle en fourrages (en tMS) selon le type de fourrage et d'élevage à La Réunion en 2019 (Magnier 2019).

	Herbe pâturée	Enrubannée *	Foin	Paille de canne	Aff. en vert **	Mais ensilé	Total filière	Part (en %)
<i>Bovins laitiers</i>	211	7 711	-	1 527	-	-	<b>9 449</b>	9 %
<i>Bovins allaitants</i>	34 362	15 128	6 403	1 084	14 901	99	<b>72 005</b>	65 %
<i>Caprins</i>	-	567	183	41	17 506	-	<b>18 296</b>	16 %
<i>Ovins</i>	346	633	1 175	203	1 109	-	<b>3 466</b>	3,3 %
<i>Équidés</i>	-	-	6 520	-	-	-	<b>6 520</b>	6 %
<i>Cervidés</i>	725	-	-	-	95	-	<b>821</b>	1 %
<b>Total fourrage</b>	<b>35 645</b>	<b>24 040</b>	<b>14 307</b>	<b>2 855</b>	<b>33 612</b>	<b>99</b>	<b>110 557</b>	100 %
<i>Part (en %)</i>	32 %	22 %	13 %	3 %	30 %	0,1 %	100 %	-

\* Enrubannée = Ensilage d'herbe enrubannée / \*\* Aff. en vert = Affouragement en vert

La pression foncière est une problématique qui touche l'ensemble de ces filières. Le manque de foncier empêche l'installation et le développement des exploitations agricoles. Les coûts d'investissement et de production sont élevés, et la structure des exploitations conduit à une intensification des modes d'élevage, ce qui les rend beaucoup plus fragiles (DAAF de La Réunion 2024a; IDELE 2018; Grimaud 2007). L'organisation des filières bovines et ovines est présentée en Annexe III, Annexe IV et Annexe V.

## 1.2.4 Les systèmes fourragers réunionnais

### 1.2.4.1 Les surfaces fourragères et leur production

En 2022, la SAU est de 37 950 ha et représente 15,1 % de la surface totale de l'île. Les surfaces toujours en herbe (STH), regroupant prairies et cultures fourragères, représentent 10 755 ha, soit 22,6 % de la SAU totale (RA 2020). C'est la deuxième surface de production après la culture de la canne à sucre (20 140 ha, 54,4 % SAU). Elle tend à se développer ces dernières années, conjointement à l'élevage bovin (+ 60 % de têtes sur le cheptel bovin depuis 1989), notamment à travers la diversification des canniers qui remplacent une partie de leur surface en canne par de la production de foin (INSEE 2014; Achard 2020a; DAAF de La Réunion 2024b).

Les quatre zones principales de production fourragères sont les Hauts de l'Ouest, les Hauts de Saint-Joseph, la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes. La majorité des prairies sont implantées dans le Sud. En 2019, Lorre et Magnier ont estimé à 220 ha la surface allouée à la production de canne fourragère. Ces surfaces sont de petites tailles. Elles sont situées principalement en bord de routes ou de parcelles, et constituent majoritairement une récolte informelle. Seuls quelques éleveurs engraisseurs la cultivent en parcelles

fourragères. Treize hectares sont alloués à la production de maïs fourrager. La Figure 2 présente la localisation des ressources fourragères à La Réunion (prairies tropicales, prairies de *Cenchrus clandestinus* (n.c. Kikuyu), prairies tempérées, canne fourragère et maïs ensilage) ainsi que les surfaces en canne à sucre et en jachère. La carte distingue l'île en quatre régions : nord, sud, est et ouest, et quantifie la répartition des surfaces fourragères entre ces quatre localisations (Achard 2020a; Mandret 2000; Lorre 2019; Magnier 2019).

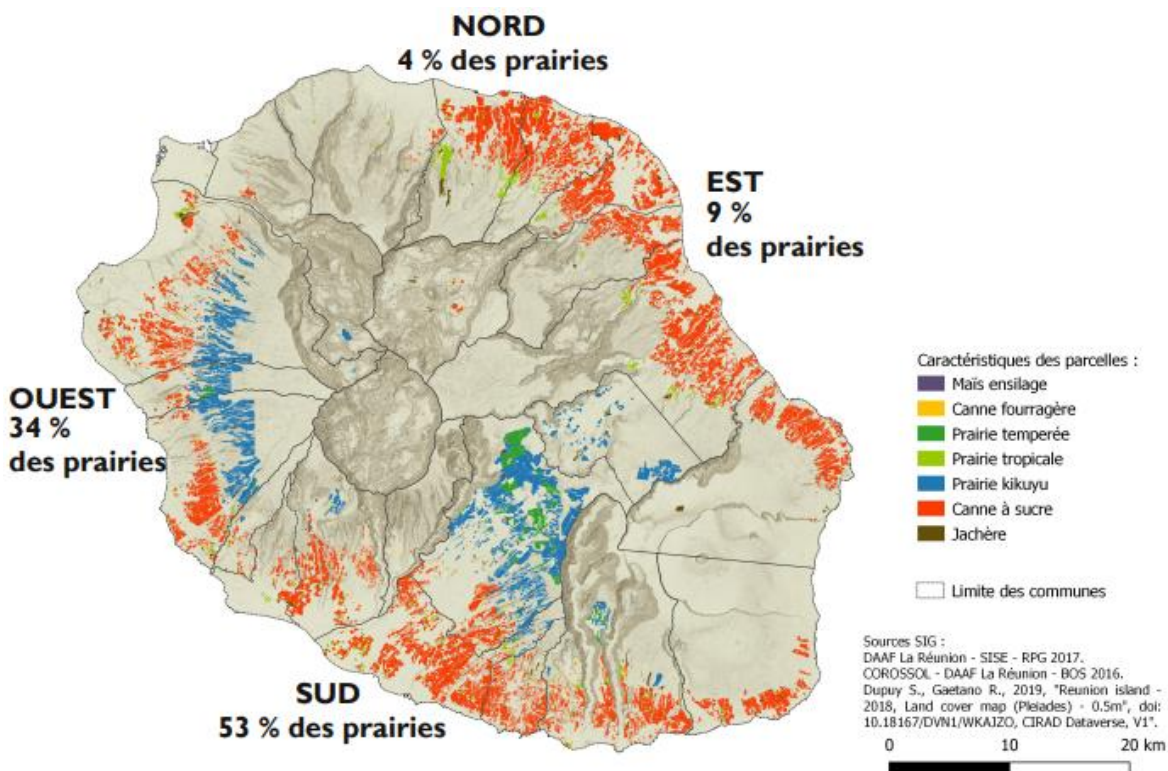


Figure 2 : Carte de la localisation des surfaces fourragères à La Réunion en 2017. Les pourcentages indiquent la part des surfaces fourragères selon les quatre points cardinaux (Cirad 2024).

La topographie de La Réunion conditionne grandement la stratification des zones de végétation et de culture. Les Bas de La Réunion, de 0 à 1 200 m, sont composés d'une végétation tropicale. Les Hauts de La Réunion, à partir de 1 000 m, sont composés d'une végétation mixte tropicale et tempérée. Les vents dominants influencent également la stratification de la végétation. Dans les zones tropicales basses, la production fourragère est composée de *Chloris*, de *Cenchrus purpureus* (n.c. canne fourragère), de *Cenchrus purpureus x americanum* (n.c. bana grass), de *Tripsacum laxum* (n.c. guatemala grass) de *Sétaria sphacelata* (n.c. Sétaria) et de *Urochloa sp.* (n.c. Brachiara). Dans les zones tropicales hautes, la production fourragère est composée de Kikuyu, et dans les zones des Hauts, tropicales-tempérées, la production fourragère est composée de *Lolium sp* (n.c. Ray-grass anglais, italien et hybride), *Dactylis glomerata* (n.c. Dactyle pelotonné), *Bromus sp* (n.c. Brome), *Festuca sp* (n.c. Fétuque), et *Trifolium repens* (n.c. trèfle blanc), souvent associées au Kikuyu. On peut également y cultiver *Avena sp* (n.c. Avoine) et *Triticum sp* n.c. Triticale) (Lorre 2019; Mandret 2000; Thomas et al. 2004). *Medicago sativa* (n.c. Luzerne), et *Zea mays* (n.c. maïs) sont cultivables à toutes les altitudes, et le sont de manière ponctuelle. La Figure 3 illustre la localisation des zones de culture et l'étagement de la végétation (Mandret 2000).

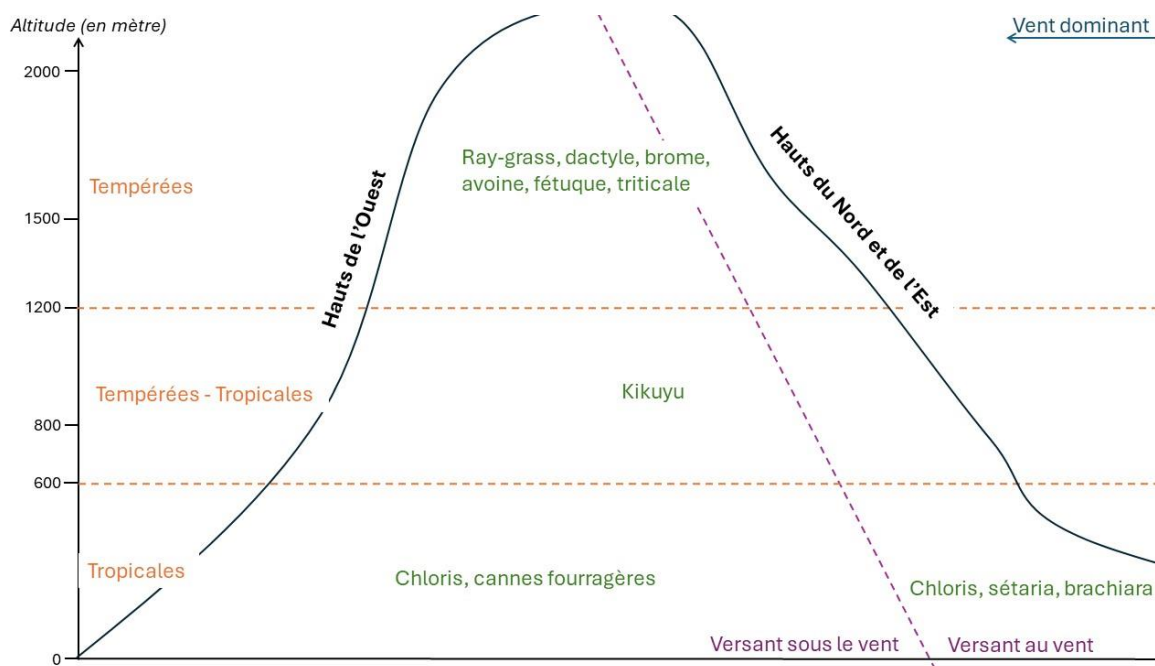


Figure 3 : Schéma de la répartition des espèces de prairies selon le gradient altitudinal et l'exposition aux vents dominants (Mandret 2000; Thomas et al. 2004).

Nous retrouvons donc trois typologies différentes : les prairies tropicales des Bas, les prairies tropicales à mi-pente, et dans les Hauts, les prairies mixtes tropicales-tempérées. Des photos des graminées tropicales décrites dans les parties suivantes sont présentées en Annexe 10.

**Les prairies tropicales des Bas**, du Sud, de l'Ouest et du Nord-est, sont composées principalement de Chloris, une graminée tropicale pérenne originaire du sud de l'Afrique. Le Chloris peut être associé à du Sétaria et du Brachiara, voire de la Luzerne. Dans le Nord-est, on rencontre des prairies à dominante de Brachiara. Présentes jusqu'à 600-800 m d'altitude, ces prairies sont majoritairement fauchées et valorisées en foin pour les zones sèches ou plus rarement enrubannées pour les zones humides ou en été austral. Elles peuvent également être pâturées (Mandret 2000; Thomas et al. 2004; Lorre 2019). Ces prairies ont un potentiel de production élevé, la faible altitude offrant de bonnes conditions de croissance tout au long de l'année (Lorre 2019; Leleux 2016). Ces prairies tropicales peuvent être fauchées jusqu'à 10 fois par an, avec un rendement allant de 3 à 5 tonnes de matière sèche (tMS) par coupe. Les rendements varient de 10 à 40 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> en conditions d'irrigation et de fertilisation optimales (Mandret 2000; Thomas et al. 2004; Lorre 2019).

**Les prairies tropicales à mi-pente** (800 - 1 000 m d'altitude) sont composées principalement de Kikuyu, une graminée tropicale pérenne originaire des Hauts plateaux du Kenya. Implanté sur l'ensemble des régions de La Réunion, à une altitude allant de 800 à 1 600 m, le Kikuyu est particulièrement résistant au piétinement et aux adventices. Il est très longévif et possède une bonne valeur alimentaire. À La Réunion, il est valorisé principalement au pâturage, mais il est aussi enrubanné. Les rendements varient de 5 à 10 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> sans fertilisation, et de 15 à 25 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> avec une fertilisation raisonnée (Thomas et al. 2004; Lorre 2019; Leleux 2016).

**Les prairies des Hauts** sont composées de prairies de Kikuyu, de prairies tempérées et de prairies mixtes. Le Kikuyu est présent jusqu'à 1 600 m d'altitude. Les graminées tempérées sont implantées à partir de 1 200 m d'altitude, principalement sur les terrains ayant bénéficié d'améliorations foncières. Les mélanges les plus utilisés sont Ray-grass – Dactyle. Les associations avec des légumineuses (Trèfle blanc ou Luzerne) sont peu présentes. Les prairies tempérées continuent leur croissance en hiver, contrairement au Kikuyu qui connaît un ralentissement, voire un arrêt de croissance. Leur valorisation se fait



en pâture ou en fauche enrubannée. Le rendement de ces prairies est de 5 à 10 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> sans fertilisation, et de 12 à 25 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> avec une fertilisation adaptée (Lorre 2019).

Les prairies de Kikuyu sont les plus importantes de l'île, avec une couverture de 80 % de la couverture en herbe de l'île (Leleux 2016).

La production de fourrage sur l'île est estimée à 116 370 tMS en 2019. La Plaine des Cafres est la zone la plus importante en termes de quantité produite, avec une production de 40 000 tMS en 2019, suivie par les Hauts de l'Ouest avec une production de 20 000 tMS (Achard 2020a). La production est principalement valorisée au pâturage (61 190 tMS en 2019), avec une production légèrement plus importante en été (52 %). L'enrubanné est le deuxième mode de valorisation (24 640 tMS), réalisée principalement en été (72 %), en période de surplus fourrager. Le foin représente une production de 16 625 tMS.

Tableau 2 : Production de fourrage (en tMS) à La Réunion selon le type de fourrage et part de la production en été et en hiver (en %) en 2019 (Achard 2020a).

Type de fourrage	Herbe	Enrubanné	Foin	Canne fourragère	Paille de canne	Maïs ensilage
<b>Production (en tMS)</b>	61 190	24 640	16 625	6 980	6 375	560
<b>Production en été (en %)</b>	52 %	71 %	54 %	56 %	50 %	52 %
<b>Production en hiver (en %)</b>	48 %	29 %	46 %	44 %	50 %	48 %

#### 1.2.4.2 Enjeux liés à la gestion des prairies

##### 1.2.4.2.1 Pratiques de gestion des prairies

Les surfaces fourragères de La Réunion sont soit pâturées (~75 % des surfaces fourragères), soit fauchées (~25 % des surfaces fourragères). Le pâturage est essentiellement pratiqué à mi-pente et dans les Hauts. Le pâturage tournant est la pratique la plus répandue, avec des durées de rotation dépendantes de la saison (Scherrer 2017), et globalement lentes. Les prairies de fauche des Hauts sont majoritairement valorisées sous la forme d'enrubannage. Les prairies des Bas sont essentiellement fauchées, et valorisées sous la forme de foin. Les conditions climatiques, avec une pluviométrie moins importante dans les Bas, permettent de produire du foin avec un taux d'humidité suffisamment bas, ce qui n'est pas possible dans les Hauts. Ponctuellement, les fauches des prairies des Bas sont enrubannées. Les temps de repousse entre deux pâtures ou fauches sont globalement tardifs, ce qui est un facteur de sous-valorisation (Leleux 2016).

##### 1.2.4.2.2 Sous valorisation de la production fourragère

Les conditions pédoclimatiques influencent la gestion des prairies à La Réunion. Lors de l'été austral, les fortes températures et la pluviométrie conduisent à une croissance importante des fourrages. *A contrario*, la croissance est ralentie en hiver en raison des températures plus basses et de la pluviométrie plus faible. Cela induit un déficit fourrager hivernal. (Mandret 2000; Lorre 2019; Leleux 2016).

Le rapport de Leleux en 2016 fait état d'une variation importante entre la production de fourrage valorisée et la production de fourrage potentielle. Le Tableau 3 compare le rendement potentiel et le rendement valorisé selon quatre régions (sud, est, ouest et nord), pour les prairies de Chloris et de Kikuyu.

Tableau 3 : Gamme de variation des rendements valorisés et potentiels pour les prairies de Chloris et de Kikuyu selon les quatre points cardinaux (Leleux 2016).

Région	Nord		Ouest		Est		Sud	
Type de prairie	Chloris	Kikuyu	Chloris	Kikuyu	Chloris	Kikuyu	Chloris	Kikuyu
Rendement valorisé (en tMS/ha)	20-25	12	20-25	6-8	20-25	9	20-25	8-10
Rendement potentiel (en tMS.ha <sup>-1</sup> )	23-30	17	23-30	15-17	23-30	17	23-30	15-17

Les prairies de Chloris ont un rendement valorisé proche du potentiel, bien que plus faible. Ces prairies sont majoritairement irriguées, ce qui limite l'influence de la pluviométrie sur la production. En revanche, les prairies de Kikuyu ont un rendement valorisé bien en dessous du potentiel, et il est hétérogène entre les différentes régions. Les rendements plus faibles de l'Ouest et du Sud peuvent être dus à une combinaison de plusieurs facteurs : l'influence du climat, la topographie plus accidentée, l'éloignement de l'encadrement technique, et la gestion des prairies plus extensive (Leleux 2016).

#### 1.2.4.2.3 Problématiques liées à la gestion des prairies

La diversité des stratégies de gestion des prairies de La Réunion explique également les différences entre les rendements potentiels et valorisés. Selon le rapport de Choisis, Grimaud, Lassalle en 2009, trois stratégies de gestion se distinguent à La Réunion. Tout d'abord, le modèle à « flux tendu » adapte le rythme de rotation des pâtures à la saison, afin de consommer rapidement le fourrage disponible. Ensuite, les éleveurs constituent des stocks de fourrages en saison humide, via de l'ensilage d'herbe enrubbanné, qu'ils pourront réutiliser en saison sèche lors de la période de déficit hivernal. Enfin, les éleveurs ajustent les surfaces à pâturer selon la saison, avec une surface plus importante en saison sèche.

Ces différents modèles de gestion permettent de produire des fourrages pour assurer les besoins des troupeaux, mais les éleveurs ne cherchent pas à atteindre une productivité maximale des prairies. Plusieurs problématiques interviennent : le pâturage des graminées est parfois trop tardif, avec une pâture réalisée au-delà du stade 3 feuilles, lorsque la lignification de la plante a déjà débuté, ce qui impacte la digestibilité. Également, certains lots d'animaux restent trop longtemps sur une même parcelle, ce qui entraîne un surpâturage et donc une repousse plus lente. Enfin, les chargements à l'hectare sont en dessous des préconisations, ce qui entraîne une surproduction des ressources fourragères en saison humide, et donc des zones de refus. Ces différentes problématiques engendrent une sous-valorisation des prairies et des difficultés en approvisionnement de fourrage (Leleux 2016; Lorre 2019).

La production de fourrages secs sous forme de foin, dans les Bas, rencontre plusieurs problématiques. Les conditions climatiques de La Réunion sont un facteur limitant, avec un taux d'humidité parfois trop important pour réaliser le séchage du foin, en saison des pluies. Également, la gestion de la fertilisation n'est pas toujours adaptée à la production (Leleux 2016).

La qualité de l'ensilage à La Réunion est moyenne à faible : les fourrages tropicaux, pauvres en sucres fermentescibles, ne permettent pas une bonne acidification par les bactéries lactiques. L'apport de mélasse de canne à sucre ou de ferments biologiques permet d'améliorer la fermentation, mais ce n'est pas une technique répandue du fait de son coût. De plus, la récolte de l'ensilage est souvent réalisée à un stade de croissance trop avancé (Mandret 2000; Leleux 2016).

### 1.3 L'azote dans les systèmes prairiaux

L'azote est le moteur de la croissance de l'herbe et caractérise la teneur en protéines du fourrage. Une fertilisation adéquate est donc essentielle. Le cycle de l'azote décrit l'évolution de cet élément sous ses différentes formes chimiques et organiques dans le système sol – plante.

#### 1.3.1 Le cycle de l'azote dans les systèmes prairiaux

L'azote dans le sol se présente sous diverses formes chimiques, mais les plantes ne peuvent l'assimiler que lorsqu'il est sous forme d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) ou de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Par conséquent, différentes transformations doivent se produire dans le sol pour que ces formes assimilables soient disponibles.

La fixation du diazote atmosphérique ( $\text{N}_2$ ) est réalisée par des bactéries du sol, qui forment des nodosités sur les racines des légumineuses, produisant ainsi de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et de l'ammonium (Sierra, Tournebize 2019). Outre ces bactéries symbiotiques, des bactéries libres, incluant des endophytes et diazotrophes, fixent également l'azote en produisant du  $\text{NH}_4^+$  grâce à la nitrogénase (Deacon 2024; Roper, Gupta 2016).

En parallèle, la minéralisation, effectuée par les microorganismes hétérotrophes du sol, transforme l'azote organique du sol en ammonium (Recous et al. 2015 ; Chevalier 2017). À La Réunion, cette minéralisation est particulièrement active de novembre à janvier, pendant la saison humide (Fritz 1972). Les recherches de l'IRAT et du Cirad montrent que la minéralisation est plus intense en saison humide et qu'elle diminue avec l'altitude. De plus, elle est moins prononcée sur le littoral (Mandret 2000; Blanfort 1998).

Le processus inverse de la minéralisation, appelé immobilisation, intervient lorsque l'ammonium est utilisé par les bactéries pour créer de la biomasse, formant ainsi de l'azote organique. Une grande disponibilité d'azote minéral peut conduire à une « faim d'azote », réduisant l'azote assimilable pour les plantes (Recous et al. 2015).

Enfin, la nitrification complète le cycle de l'azote en transformant l'ammonium en une forme encore plus assimilable par les plantes. Ce processus microbiologique correspond à l'oxydation de l'ammonium en nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), puis en nitrate. La nitrification se déroule en deux sous-étapes : la nitritation ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ ) et la nitratisation ( $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ) (Deroche 1983; Lata 2011).

Différentes pertes peuvent se produire lors du cycle de l'azote. La volatilisation ammoniacale, à la suite d'un apport d'engrais en surface, cause une perte d'ammoniac. À La Réunion, cela concerne principalement les engrais organiques, avec des pertes de 20 à 80 % selon le type et la méthode d'épandage (Lecomte et al. 2013 ; Giban 2004 ; Benoit 2014). La lixiviation de l'azote correspond à la perte du nitrate (en grande majorité) et de l'ammonium. Elle est fortement liée aux saisons, lors de la recharge des nappes phréatiques par les pluies (Poss 1993 ; Agro Transfert 2017 ; Benoit 2014). À La Réunion, dans le cas d'apports minéraux, la lixiviation peut atteindre 40 %. Les bactéries dénitrifiantes sont responsables du phénomène de dénitrification. Ce sont des hétérotrophes aérobies qui, en situation d'anaérobie, réduisent le nitrate en dioxyde d'azote (Lecomte et al. 2013).

Au sein d'un système prairial, un apport d'azote est réalisé pour compenser les exportations liées au couvert végétal. Cet apport se fait soit via des engrais minéraux contenant de l'ammonium ou du nitrate directement assimilable, soit via des engrais organiques contenant de l'azote organique, qui sera ensuite minéralisé. Les animaux en pâture restituent de l'azote via les fèces et les urines, sous les formes suivantes : urée ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), ammonium et ammoniac (Lecomte et al. 2013).

La Figure 4 représente le cycle de l'azote à l'échelle du système prairial. L'Annexe VII décrit plus précisément les différents mécanismes intervenant au sein du cycle de l'azote.

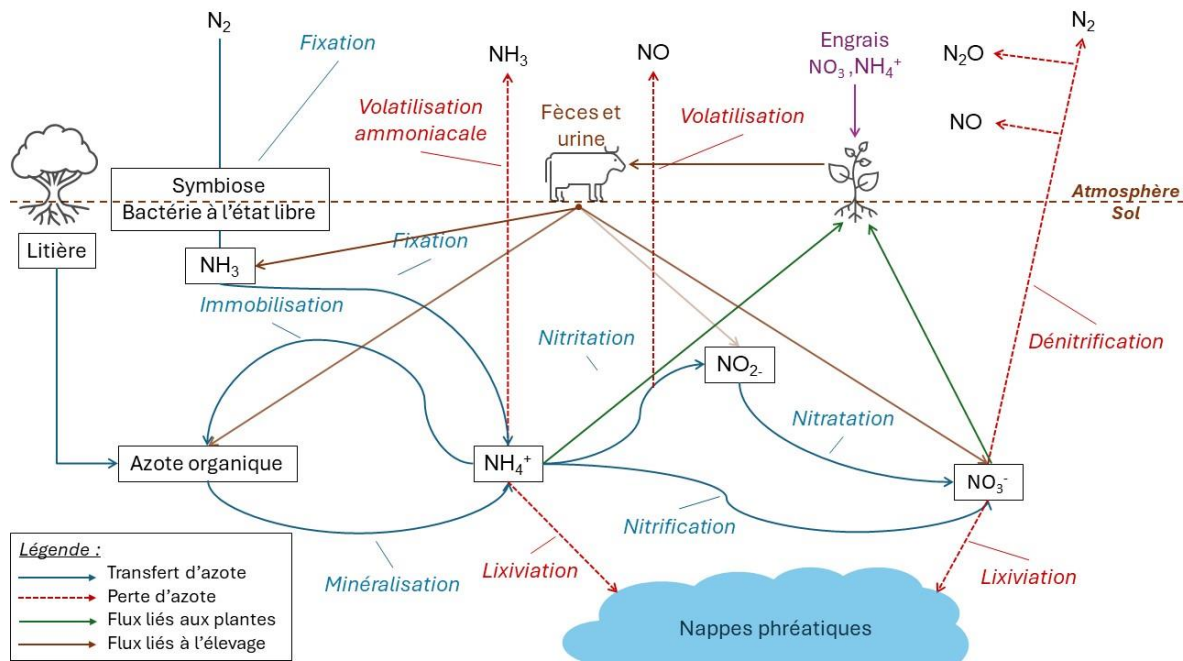


Figure 4 : Schéma du cycle de l'azote à l'échelle d'une prairie. Les transferts d'azote sont représentés en bleu, les pertes d'azote en rouge, les flux liés aux plantes en vert, les flux associés à l'élevage en marron, et ceux liés aux engrais en violet (Chevalier 2017).

### 1.3.2 Impact d'une fertilisation azotée minérale ou organique

Les engrais minéraux azotés, directement assimilables par les plantes, ont un effet acidifiant sur le sol. L'acidification est d'autant plus importante lorsque la dose d'azote apportée augmente. Lorsqu'ils sont apportés sous les formes ammoniacales ou uréiques, leur nitrification produit un proton  $H^+$ , responsable de l'acidification. Lorsqu'ils sont apportés sous forme de nitrate, l'acidification est moindre (Geisseler, Scow 2014; Czarnecki, Düring 2015). La fertilisation minérale réduit également la capacité d'échange cationique (CEC). Cette diminution est tout d'abord due à l'acidification des sols, qui réduit le nombre de sites de fixation des cations sur les colloïdes du sol. De plus, un déséquilibre ionique peut se produire, les engrais minéraux apportant des cations spécifiques en grande quantité, ce qui conduit au déplacement d'autres cations essentiels. Enfin, les apports d'engrais minéraux peuvent conduire à une diminution de la teneur en MO, diminuant le nombre de sites fixateurs de cations (Julien et al. 2023). L'acidification des sols peut engendrer une toxicité aluminique. Un sol acide ( $pH < 5,5$ ) entraîne une réaction des composés d'aluminium avec les protons, ce qui libère de l'aluminium toxique pour les plantes. La croissance des parties aériennes est donc limitée, ce qui impacte les exportations en azote (Harter 2007).

Les engrais organiques ont un effet positif sur le pH. Les protons libérés par la nitrification de l'azote sont neutralisés par les bases échangeables K, Ca et Mg présentes dans les traitements organiques (Maltas, Raphaël, et al. 2012; Kidd et al. 2017). Également, les engrais organiques augmentent la teneur en MO du sol (Goyal et al. 1999), ce qui permet d'améliorer la CEC en augmentant le nombre de sites fixateurs de cations (Julien et al. 2023). L'apport d'engrais organiques permet d'augmenter la biomasse et l'activité microbienne (Triberti et al. 2008). L'application d'un engrais organique augmente la teneur en humus du sol. Cet humus se minéralise très lentement, ce qui libère l'azote de manière progressive. Ce processus est appelé « arrière-effet » (Spiess, Prasuhn, Stauffer 2011). La MO des engrais organiques se dégrade à des vitesses différentes selon le type d'engrais. Dans le cas du lisier, la MO est moins stable et se dégrade plus vite, l'azote est donc disponible plus rapidement pour les plantes (Maltas, Charles, et al. 2012).

Les engrais mixtes, combinant une fertilisation minérale et une fertilisation organique, permettent de neutraliser l'effet acidifiant des engrais minéraux, tout en assurant une bonne

disponibilité de l'azote à court et long terme. La part d'engrais minéraux assure un apport immédiat, tandis que la part d'engrais organiques apporte une libération progressive d'azote (Chen et al. 2021).

### **1.3.3 Fertilisation des prairies réunionnaises**

#### **1.3.3.1 Evolution conjointe de la recherche et du conseil**

De 1965 à 1989, de nombreux essais ont été menés par l'IRAT sur le volet de la fertilisation des cultures fourragères. Les différentes études ont quantifié les exportations d'azote sur différentes cultures de graminées (Chloris, canne fourragère, Houlique laineuse, Fétuque élevée) (IRAT 1968; 1972a; 1972b; 1975). De plus, différents engrais azotés (sulfate d'ammoniaque, ammonitrate, perlurée) ont été comparés, pour définir le type d'engrais le plus adapté (IRAT 1970). En parallèle, l'IRAT a mis en place plusieurs essais de fertilisation : un essai à la Plaine des Cafres en 1963 pour étudier l'évolution de la production fourragère en fonction de la quantité d'azote apportée, ou encore deux essais (aux Colimaçons et à Mont Caprice) pour évaluer la réponse à l'azote du Chloris (IRAT 1969a; Fritz 1967; IRAT 1969b). Les essais se sont donc majoritairement concentrés sur l'étude des effets de l'azote, afin de déterminer la quantité et le type d'engrais à apporter. À l'époque, le conseil se résumait à compenser les exports des prairies.

En 1986, le laboratoire d'agronomie Cirad-Réunion développe un outil de conseils en fertilisation (préconisations de fumure de fond à l'implantation et d'entretien), à partir des analyses de sol et des besoins des cultures. L'outil édite des diagnostics de la fertilité du sol et des conseils en fertilisation automatiquement (Pouzet, Chabalière, Legier 1997). En 1988, via le programme Elevage Mieux, le Cirad a édité quatre documents techniques permettant d'actualiser les préconisations en termes de fertilisation d'entretien et de correction. Les doses préconisées prennent compte des niveaux de production (intensif et semi-intensif) et des teneurs en éléments minéraux du sol. À noter que le niveau de rendement associé au système intensif serait considéré comme moyen à l'heure actuelle (10 à 12 tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) (Cirad et al. 1988a; 1988b; 1988c; 1988d).

De 1992 à 1998, le Cirad et l'Union des AFP ont mis en place un programme de gestion raisonnée des prairies, qui a permis de mettre en place différents outils de diagnostic prairiaux visant à améliorer l'efficacité des systèmes fourragers de La Réunion, notamment à travers le volet de la fertilisation. V. Blanfort et P. Thomas ont notamment adapté à la flore locale les équations de dilution permettant de calculer les indices de nutrition en azote, phosphore et potassium. Le raisonnement de la fertilisation a alors pris en compte l'effet de saisonnalité, avec des apports qui se font principalement en hiver lorsque la minéralisation de l'azote est plus faible. En 2004, la création d'un guide technique a permis de vulgariser les différents travaux de V. Blanfort et P. Thomas, afin de transmettre les connaissances acquises à la profession. À partir des années 2000, le conseil en fertilisation s'est donc basé sur leurs préconisations.

A partir de 2018, le Réseau d'Innovation et de Transfert Agricole (RITA) Animal, conjointement avec le Cirad, a conduit des études afin d'optimiser l'utilisation des engrais azotés en prairies. Les travaux ont porté notamment sur la fourniture en azote des sols et sur les pratiques de fertilisation. L'ARP, en partenariat avec le Cirad et l'Institut de l'élevage, a mené des travaux pour mettre en place des outils permettant de raisonner la fertilisation des prairies, tels que l'adaptation de la méthode du bilan azoté aux prairies réunionnaises (Miralles-Bruneau et Pierre, 2020), et la mise en place de campagnes de diagnostics d'indices de nutrition (Solesse, Miralles-Bruneau 2022c; 2022a; 2022b; Miralles-Bruneau et al. 2022).

#### **1.3.3.2 Pratiques de fertilisation et enjeux associés**

En 1986, un rapport de l'IRAT indiquait que les producteurs de fourrage ne raisonnaient pas leur fertilisation, et que les interventions n'étaient pas consignées. La fertilisation était réalisée avec un engrais ternaire. Les doses étaient définies en fonction des besoins de la culture, et ne prenaient pas en compte les caractéristiques du sol. Les agriculteurs étaient également fortement dépendants du prix et de la disponibilité de l'engrais en magasin (IRAT 1978; Miralles-Bruneau, Nobile, Bravin 2023). Entre 1992 et 1998, le programme de gestion raisonnée des prairies a mis en exergue l'inadéquation entre les pratiques de fertilisation et les conditions pédoclimatiques (Blanfort, Thomas 1996). Le programme a permis d'homogénéiser les pratiques. Il était conseillé des apports limités en saison des pluies, la production d'herbe étant suffisante et bien alimentée par la fourniture du sol. En saison sèche, il préconisait de fertiliser pour stimuler la croissance et prolonger la période de production, ce qui n'était pas fait systématiquement. Blanfort et Thomas avaient relevé que les agriculteurs doutaient de l'efficacité des engrais lorsque la pluviométrie était faible et préféraient ne pas fertiliser. Le programme a promu l'utilisation de formulations mieux adaptées et à des doses raisonnées, ce qui a permis de lisser la production fourragère sur l'année (Blanfort, Thomas 1996; Thomas et al. 2001).

En 2015, une enquête menée par la Chambre d'agriculture de La Réunion auprès de 51 élevages laitiers a mis en relief le manque de raisonnement des pratiques de fertilisation. Réalisées à 94 % à partir d'engrais organiques (lisiers et fumier), elles servent à 69 % à réduire les charges liées à l'engrais, à 10 % à valoriser les effluents d'élevage, et seulement à 12 % à augmenter le rendement des prairies. 88 % des éleveurs jugent leur fertilisation insuffisante, mais cela ne représente un problème que pour 18 % d'entre eux (47 % ne se prononcent pas) (Miralles-Bruneau, Nobile, Bravin 2023).

En 2017, le Cirad a réalisé une enquête auprès de 52 éleveurs bovins allaitants concernant leurs pratiques de fertilisation. Les éleveurs utilisent à 43 % uniquement des engrais organiques, à 27 % uniquement des engrais minéraux, à 4 % des engrais mixtes, et 25 % des éleveurs n'utilisent pas d'engrais. La fertilisation minérale est réalisée soit lors d'un changement de saison, soit après le passage d'animaux, soit après les coupes. Elle est également appliquée en été (Scherrer 2017). Les engrais organiques utilisés sont le mélange fumier + lisier poule/porc/lapin (53 %), le fumier de bovin (32 %), l'urée (8 %) et le lisier de bovin (8 %). La fertilisation est réalisée en majorité après le passage des animaux (40 %) ou après le passage des animaux et les coupes (17 %). Les prairies reçoivent généralement plus d'apports de fertilisation (4 à 8) que les prairies pâturées (0 à 5), bien qu'un nombre plus important d'agriculteurs n'appliquent pas de fertilisation sur les prairies fauchées. Pour 33 % des agriculteurs, la fertilisation n'est pas calculée, tandis que 40 % dosent « à l'œil » et 21 % ajustent en fonction des prix des engrais. Également, 44 % des agriculteurs ne modifient pas leur pratique de fertilisation selon la saison, 25 % changent le type de fertilisation, 25 % la fréquence des apports, et seulement 6 % ajustent la dose. Enfin, 37 % des agriculteurs ne consignent pas leurs interventions de fertilisation. On observe globalement, au cours du temps, un manque de raisonnement et de suivi de la fertilisation de la part des éleveurs, malgré une mise à jour régulière des préconisations (Scherrer 2017).

#### **1.3.4 Problématiques et hypothèses de travail**

Les travaux de Blanfort et Thomas, ainsi que les enquêtes récentes de la Chambre d'Agriculture et du Cirad, ont montré des lacunes dans le raisonnement et le suivi des pratiques de fertilisation. La fertilisation a souvent été évaluée sous l'angle de la productivité, principalement dans l'objectif d'augmenter les rendements et la qualité du fourrage, qui sont des indicateurs directs de la performance de production d'une culture. Les différents travaux menés par l'IRAT puis le Cirad se sont principalement axés sur l'étude de la productivité. Les travaux plus récents montrent une évolution vers une gestion raisonnée et durable des prairies. L'étude de la fertilisation sous l'angle de la valorisation de l'azote présente un intérêt pour faire évoluer les pratiques et le conseil en fertilisation (Blanfort, Thomas 1996; Blanfort 1998).

La gestion des effluents d'élevage représente un enjeu dans le cadre de la fertilisation à La Réunion. Ces effluents, souvent perçus et gérés comme des déchets, sont généralement épandus sans réelle valorisation agronomique, souvent sur les parcelles les plus proches et les plus accessibles. Cette gestion ne tient pas compte du potentiel fertilisant de ces effluents. Ils pourraient constituer une alternative viable aux engrais minéraux, dont l'importation représente un coût important à La Réunion (Miralles-Bruneau, Nobile, Bravin 2023).

Ces différents enjeux conduisent à la formulation de la problématique suivante : **quel type de fertilisation valorise le mieux l'azote en climat tropical, entre le lisier, le compost, les engrais minéraux ou les fertilisations mixtes ?**

Deux hypothèses ont été formalisées pour répondre à cette problématique :

- i. Les fertilisations minérales ont une valorisation de l'azote qui diminue au cours du temps, causée notamment par l'acidification des sols.
- ii. Les traitements mixtes valorisent mieux l'azote que les traitements purs, sur le court et le long terme.

## 2 DEMARCHE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Afin de répondre à la problématique formulée précédemment, des données récoltées lors d'un essai mené par le Cirad seront valorisés en abordant l'angle de la valorisation de l'azote.

### 2.1 Les essais fertilisation des prairies

Le Cirad a mené un essai, de 2004 à 2021, en parcelles expérimentales, afin d'étudier les effets agronomiques et environnementaux sur le long terme d'une fertilisation azotée organique, minérale et mixte en climat tropical (Cirad 2004; Miralles-Bruneau 2013). Les objectifs généraux étaient les suivants :

- Évaluer l'impact de différents types de fertilisation sur la production de biomasse fourragère (quantité, qualité) ;
- Évaluer l'impact d'une fertilisation basée sur la valorisation des ressources organiques de l'exploitation, sur la composition chimique et la fertilité des sols sur le long terme ;
- Produire des références originales en contexte tropical sur les dynamiques agronomiques (plante, sol) et les flux d'azote et de carbone à long terme (émissions gazeuses) de différents types de fertilisation et de formuler des plans de fertilisation adaptés aux contextes prairiaux des zones tropicales.

Cet essai a été mis en place sur trois sites, représentatifs de la diversité des prairies du Sud de La Réunion, le long d'un gradient altitudinal : à la Plaine des Cafres (ferme de la Sicalait), à Mont-Vert les Hauts (ferme de la Sedael) et à Saint-Joseph (site du Lycée de Saint-Joseph) (Cirad 2004; Miralles-Bruneau 2013).

Ces trois sites présentent un gradient altitudinal. La ferme de la Sicalait est localisée à 1 610 m d'altitude. L'essai a été mis en place sur une prairie de Ray-grass, de Dactyle et de Brome sur un sol volcanique (andosol perhydraté). La ferme de la Sedael (coopérative Sica Révia), implantée à 1 020 m d'altitude, est une prairie de Kikuyu sur un sol volcanique (andosol non perhydraté). La ferme du Lycée de Saint-Joseph, à 10 m d'altitude, est une prairie de Chloris sur sol sableux (arenosol). La localisation des trois sites expérimentaux est présentée dans la Figure 5.

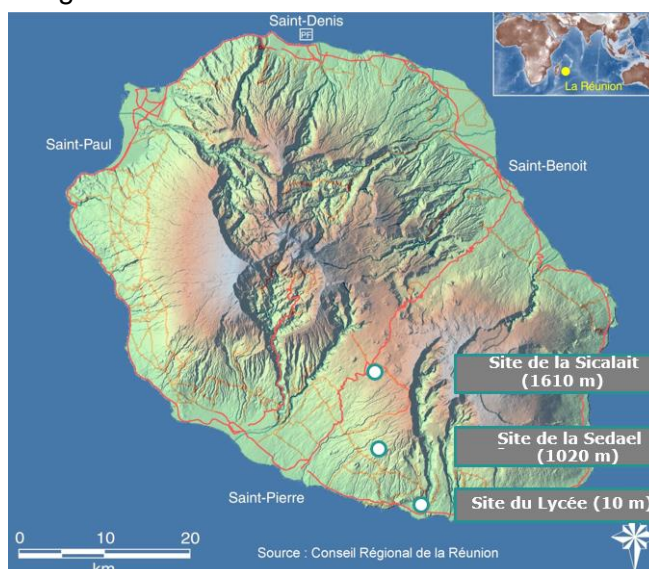


Figure 5 : Carte de la localisation géographique des trois sites expérimentaux à La Réunion (Cirad 2008).

Les 10 modalités de fertilisation évaluées sur les trois sites expérimentaux comprennent des modalités minérales (ammonitrate), et organiques (lisier et compost), ainsi que des modalités mixtes. Elles sont présentées dans le Tableau 4 (Cirad 2004).



Tableau 4 : Modalité de fertilisation des traitements et quantification des doses d'azote, de phosphore et de potassium théoriques (Cirad 2004). Les apports théoriques d'azote ont été estimés par P. LECOMTE. Les apports théoriques de phosphore et de potassium ont été estimés sur la base du guide de fertilisation organique à La Réunion.

Modalité	Apports à l'hectare	Apports théoriques (en kg.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )		
		N	P	K
<b>Témoin (T)</b>	Pas de fertilisation	0	0	0
<b>Minéral (M1)</b>	70 kgN.ha <sup>-1</sup>	440	120	80
<b>Minéral (M2)</b>	120 kgN.ha <sup>-1</sup>	760	120	80
<b>Lisier (L1)</b>	40 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup>	720	454	958
<b>Mixte Lisier + Minéral (L1M)</b>	30 kgN.ha <sup>-1</sup> + 40 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup>	910	454	958
<b>Lisier (L2)</b>	70 m <sup>3</sup>	1260	794	1676
<b>Compost (C1)</b>	7,2 t.ha <sup>-1</sup>	350	136	331
<b>Mixte Compost + Minéral (C1M)</b>	7,2 t.ha <sup>-1</sup> + 56 kgN.ha <sup>-1</sup>	700	136	331
<b>Compost (C2)</b>	12 t.ha <sup>-1</sup>	580	227	252
<b>Mixte Compost + Minéral (C2M)</b>	12 t.ha <sup>-1</sup> + 48 kgN.ha <sup>-1</sup>	880	227	252

La fertilisation minérale est réalisée avec de l'azote ammoniacal (26 % ou 20 %), le lisier provient de la ferme de M. Didier Picard, à la Plaine des Cafres, qui est une exploitation de bovins laitiers. Le compost provient de la ferme de la Sicalait, également à la Plaine des Cafres. C'est un compost de fumier de génisses sur paille de canne.

Un dispositif en trois blocs aléatoires complets a été mis en place sur chaque site expérimental. Chaque traitement étant répété trois fois, un total de 30 microparcelles a été installé sur chaque site (Figure 6). Chaque microparcelle mesure 0,7 m par 6 m, avec un inter-rang de 30 cm (Miralles-Bruneau 2012).

B1	
Parcelle	Traitement
P1	C1
P2	M1
p3	C2
P4	L1

B2	
Parcelle	Traitement
P11	C2M
P12	T
P13	M2
P14	L2

B3	
Parcelle	Traitement
P21	L1
P22	M1
P23	L1M
P24	C1M

P5	T
P6	C2M
P7	L1M
P8	M2
P9	L2
P10	C1M

P15	L1M
P16	C2
P17	M1
P18	C1
P19	C1M
P20	L1

P25	C2M
P26	C1
P27	C2
P28	M2
P29	T
P30	L2

Figure 6 : Disposition des parcelles expérimentales selon les blocs (B1, B2, B3) et les traitements appliqués. Chaque bloc contient 10 parcelles numérotées (P1 à P30) (Miralles-Bruneau 2012).

Six à sept coupes par an ont été réalisées (fréquence de fauche de 45 jours en été et 55 jours en hiver). La fertilisation était appliquée dans les deux jours suivant la fauche, à l'exception des traitements à base de compost qui étaient apportés une coupe sur deux. Les données météo (précipitation, radiation globale, température minimale, maximale et moyenne, évapotranspiration potentielle) étaient collectées via le réseau de stations météorologiques Cirad / Météo France.

Le dispositif expérimental a recueilli des données afin de comparer les rendements fourragers et la fertilité des sols des modalités. À chaque fauche, des mesures de hauteur d'herbe et de valeur alimentaire du fourrage, et un diagnostic de composition floristique ont été réalisés.

Le rendement est estimé à chaque coupe, en pesant la biomasse récoltée (en kg de MB) avec une balance de précision. Chaque mesure est réalisée à l'échelle de la microparcelle, en prélevant un échantillon moyen de fourrage afin de mesurer le taux de MS (% MS), par une pesée avant et après un passage à l'étuve (48 h à 60 °C). Le rendement en MS à l'hectare est calculé en multipliant la quantité de biomasses par le taux de MS, le tout ramené à l'hectare.

La teneur en azote totale du fourrage pour chaque coupe est obtenue grâce à la méthode SPIR, qui mesure l'absorption par spectrométrie.

À chaque apport de fertilisant organique, un prélèvement était réalisé afin de quantifier le taux de matière sèche, la teneur en azote, en azote ammoniacal et en carbone.

Une analyse standard de sol a été réalisée à novembre de chaque année, sur chaque microparcelle afin de connaître la composition chimique du sol (teneur en azote et en carbone notamment). A cet effet, cinq carottes étaient réalisées par microparcelles sur l'horizon 0-15 cm, avec retrait des cinq premiers centimètres de la surface, qui correspondent à la litière et aux résidus. Un échantillon moyen était alors effectué, avec retrait des gros débris (feuilles, pierres, racines), puis analysé au laboratoire d'analyses de Saint-Denis. Les caractéristiques physiques du sol sont connues grâce aux mesures réalisées en 2011 par l'UMR UREP. La granulométrie, la densité apparente et la porosité du sol ont été déterminées à l'échelle du bloc sur cinq horizons (h1 = 0-5 cm ; h2 = 5-10 cm ; h3 = 10-20 cm ; h4 = 20-30 cm ; h5 = 30-40 cm). En 2018, une analyse de sol des horizons 15-30 cm et 30-60 cm a également été réalisée.

## 2.2 Démarche méthodologique

Il a été réalisé, dans un premier temps, une recherche bibliographique afin de cerner le sujet et ses enjeux. Cette recherche s'est également concentrée sur les travaux menés par l'IRAT et le CIRAD, afin de développer une gamme de valeurs sur les différents indicateurs et variables de la valorisation de l'azote. Puis, les données de l'essai ont été valorisées et analysées grâce au logiciel R. Enfin, les résultats obtenus ont été discutés par rapport à la bibliographie existante et par rapport à la gamme de valeurs préalablement établie.

## 2.2.1 Recherche bibliographique sur les variables et indicateurs de la valorisation de l'azote

La valorisation de l'azote au sein des prairies peut être évaluée via différentes variables et indicateurs d'utilisation de l'azote. Elle peut tout d'abord être étudiée au niveau du sol, via la teneur en azote du sol et le stock d'azote du sol, et les variables explicatives de ces valeurs telles que le pH et la teneur en MO, qui peuvent permettre de comprendre et d'illustrer les mécanismes d'utilisation de l'azote. La valorisation de l'azote peut être étudiée au niveau du fourrage, via la teneur en azote totale du fourrage, les exportations en azote, le bilan azoté apparent, le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU), le taux d'azote apporté par l'engrais (tNengrais) et l'indice de nutrition azotée (iNN). Pour chaque indicateur retenu pour l'analyse, un travail de recherche bibliographique a été réalisé afin d'obtenir des gammes de valeurs permettant de discuter des résultats obtenus.

### 2.2.1.1 Propriétés du sol illustrant les mécanismes d'utilisation de l'azote

Afin d'analyser la valorisation de l'azote, nous allons étudier l'impact de la fertilisation sur les propriétés du sol suivantes : le pH, la teneur en MO et le stock d'azote du sol.

**Le pH** du sol est un élément clé de la croissance des plantes. Trop acide ou trop basique, il limitera le développement des végétaux. Il est admis que le pH des sols varie généralement de 4 à 8,5, et est considéré comme optimal pour une prairie lorsqu'il se situe entre 5,5 à 6,5 pour une prairie de graminées, et de 6 à 7 pour une prairie de légumineuses (Edouard-Rambaut 2023). Le pH des sols de La Réunion varie de 4 à 8,5, avec 50 % des valeurs comprises entre 5 et 5,8 (Communication interne du Cirad). Selon des mesures réalisées par le laboratoire d'agronomie de l'IRAT, le pH est de 5,5 sur les zones des trois sites expérimentaux (IRAT 1989).

**La teneur en MO** des sols réunionnais varie de 11,9 à 22 % avec une moyenne de 16,8 % (Communication interne du Cirad). Elle est calculée à partir de la teneur en carbone du sol (Baize 2016), telle que :

$$\text{Teneur MO} = \text{Teneur C} * 1,724 \text{ (1)}$$

Où *Teneur MO* la teneur en matière organique du sol en % et *Teneur C* la teneur en carbone du sol en %

**Le stock d'azote** du sol d'une parcelle est estimé à partir d'une analyse de sol. Celle-ci permet d'obtenir la teneur en azote du sol. Le calcul suivant permet de déterminer le stock d'azote du sol sur un horizon déterminé :

$$N_{\text{Stock}} = C_N * Da * e * 0,1 \text{ (2)}$$

Où  $N_{\text{stock}}$  le stock d'azote du sol en  $t.ha^{-1}$ ,  $C_N$  la concentration d'azote du sol en  $mgN.g^{-1}$ ,  $Da$  la densité apparente du sol en  $g.cm^{-3}$  et  $e$  l'épaisseur de l'horizon en cm

Des mesures de densité apparente ont été réalisées par le Cirad sur les trois sites expérimentaux de l'essai. Ce sont celles qui seront utilisées lors de l'analyse des résultats. Le Tableau 5 présente les valeurs des mesures de densité apparente.

Tableau 5 : Mesure de densité apparente (en  $g.cm^{-3}$ ) sur les trois sites expérimentaux (Plaine des Cafres = Sicalait, Mont-Vert = Sedael, Saint-Joseph = Lycée).

Localisation	Densité apparente (en $g.cm^{-3}$ )
Plaine des Cafres	0,58
Mont-Vert	0,52
Saint-Joseph	1,18

### 2.2.1.2 Les exportations d'azote

Les exportations d'azote correspondent à l'azote contenu dans le fourrage récolté et exporté. Elles sont dépendantes du rendement et de la teneur en azote du fourrage. Elles peuvent être analysées à l'échelle de la coupe ou de l'année. Elles se calculent telles que :

$$N_{\text{export}} = \text{Rdt} \times 10^{-2} \times tN_{\text{fourrage}} \quad (3)$$

Où  $N_{\text{export}}$  les exportations d'azote en  $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $\text{Rdt}$  le rendement en  $\text{kgMS} \cdot \text{ha}^{-1}$  et  $tN_{\text{fourrage}}$  la teneur en azote du fourrage en % MS

Les essais de fertilisation menés par le passé par l'IRAT ont montré une tendance à l'augmentation du rendement et de la teneur en azote du fourrage, et donc des exportations en fonction du niveau de fertilisation azotée. Les exportations en azote de Chloris gayana varient de  $37,29 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  à  $393,6 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an pour des apports d'azote allant de 0 à  $560 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an. Les exportations varient également selon la date d'apport. Les essais menés aux Colimaçons et à Mon Caprice montrent que les exportations diminuent lorsque l'apport est retardé (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b). Les tableaux en Annexe VIII présentent les résultats des essais menés par l'IRAT sur les prairies tropicales des Bas.

Pour les prairies de Kikuyu, les exportations en azote ont été estimées à partir des travaux de Bigot en 1991. Sur un scénario avec 4 pâturages en été et 8 en hiver, nous obtenons des exportations de  $161,3 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  en été, et de  $136,7 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  en hiver, soit  $298 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an. Sur un scénario avec 3 fauches en été et 3 fauches en hiver, nous obtenons des exportations de  $163,5 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  en été et de  $100,4 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  en hiver, soit  $263,9 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an.

Pour les prairies tempérées, les exportations en azote varient de  $2,7$  à  $353,4 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an (Fétuque élevée) pour des apports allant de 0 à  $700 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  (IRAT 1975), ou de  $526$  à  $854 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an (Dactyle, Ray-grass, Brome et Trèfle blanc) pour des apports allant de  $66$  à  $800 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Miralles-Bruneau et al. 2020). Les tableaux en Annexe X et XI présentent les résultats des essais menés par l'IRAT et le Cirad sur prairie tempérée.

### 2.2.1.3 Le bilan azoté apparent

La méthode du bilan azoté apparent permet de calculer l'état final du stock d'azote dans le sol. Il se définit sur une période donnée, avec une date d'ouverture et de fermeture du bilan. Dans cette étude, le bilan azoté apparent sera analysé à l'échelle annuelle. Le calcul consiste à réaliser la différence entre les imports et les exports d'azote. Le calcul est utilisable sur les prairies à dominante graminée. Un bilan azoté apparent négatif indique que plus d'azote est exporté, ce qui peut signifier que les apports en azote sont insuffisants pour compenser la part prélevée par la culture. Un bilan azoté positif indique un excédent d'azote, qui peut être stocké dans le sol ou lixivié. Il se calcule de la manière suivante (Abdelaziz et al. 2019) :

$$\text{BNA} = N_{\text{import}} - N_{\text{export}} \quad (4)$$

Où  $\text{BNA}$  le bilan azoté en  $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $N_{\text{import}}$  les importations d'azote en  $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  et  $N_{\text{export}}$  les exportations d'azote en  $\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$

En reprenant les différents travaux menés par l'IRAT, il est possible de calculer des bilans azotés apparents, en utilisant les valeurs d'apports d'azote et d'exportations d'azote. Les essais montrent que les valeurs de bilan azoté apparent augmentent en fonction des apports d'azote. Sur prairie de Chloris, le bilan azoté apparent varie de  $-37,29$  à  $166,4 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  par an pour des apports d'azote variant de 0 à  $560 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Fritz 1967). Un apport retardé ne fait pas varier sensiblement le bilan azoté apparent (IRAT 1972a; 1972b). L'Annexe X présente les résultats des essais sur prairie tropicale pour le bilan azoté apparent.

À mi-pente dans le Sud, l'essai mené à la station Mont Vert sur prairie de Kikuyu présente des valeurs de bilan azoté apparent de 248 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour un scénario de pâturage, et de 213,9 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour un scénario de fauche (Bigot 1991).

Sur prairie tempérée, l'essai mené en 1975 aux Colimaçons sur prairie de Fétuque élevée présente des valeurs de bilan azoté apparent variant de -2,7 à 346,6 kgN.ha<sup>-1</sup> par an. L'évolution du bilan azoté apparent est fonction de la dose d'azote apportée (IRAT 1975). La même tendance est observable sur l'essai réalisé à la Plaine des Cafres, avec un bilan azoté apparent variant de 66 à 800 kgN.ha<sup>-1</sup> par an pour des doses d'azote allant de 526 à 854 kgN.ha<sup>-1</sup> (Miralles-Bruneau et al. 2020). L'Annexe XI présente les résultats des essais sur prairie tempérée.

#### **2.2.1.4 Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et le taux d'azote apporté par l'engrais (tN<sub>engrais</sub>)**

Le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) est un indicateur permettant de caractériser la valorisation de l'azote. Il peut se calculer à l'échelle de la coupe ou à l'échelle annuelle. Dans cette étude, nous retiendrons l'échelle annuelle. Le CAU correspond au ratio entre les sorties et les entrées d'azote. Un CAU élevé indique que la majeure partie de l'azote a été absorbé et valorisé par la plante. Un CAU faible indique une mauvaise valorisation de l'azote par la plante (Chambre d'agriculture de la Marne 2021).

$$\text{CAU} = (\text{N}_{\text{sorties}} / \text{N}_{\text{entrées}}) * 100 \text{ (5)}$$

Où CAU le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote en %,  $N_{\text{sorties}}$  les sorties d'azote en kgN et  $N_{\text{entrées}}$  les entrées d'azote en kgN

Le tN<sub>engrais</sub> est un calcul dérivé du CAU qui permet de prendre en compte la part d'azote du sol valorisée par la culture. Il peut être calculé à l'échelle de la coupe ou à l'échelle annuelle. Nous retiendrons ici l'échelle annuelle. Comme pour le CAU, un tN<sub>engrais</sub> élevé indique une bonne valorisation de l'azote par la plante, tandis qu'un tN<sub>engrais</sub> faible indique une mauvaise valorisation de l'azote par la plante (Congreves et al. 2021; Blanfort 1998). Il se calcule alors tel que :

$$\text{tN}_{\text{engrais}} = (\text{N}_{\text{sorties}} - \text{N}_{\text{sorties-témoin}} / \text{N}_{\text{entrées}}) * 100 \text{ (6)}$$

Où tN<sub>engrais</sub> le taux d'azote apporté par l'engrais en %,  $N_{\text{sorties}}$  les exports d'azote en kgN,  $N_{\text{sorties-témoin}}$  les exports d'azote du témoin en kgN et  $N_{\text{entrées}}$  les entrées d'azote en kgN

Sur prairie de Chloris, le CAU et le tN<sub>engrais</sub> peuvent être calculés à partir des essais menés par l'IRAT. Les résultats montrent que les valeurs de CAU varient de 88,9 à 70,29 %, pour des apports allant de 0 à 560 kgN.ha<sup>-1</sup> par an. Plus les apports d'azote sont importants, plus le CAU est faible. En ce qui concerne le tN<sub>engrais</sub>, les valeurs obtenues varient de 60,78 à 63,81 % (Fritz 1967). Les essais d'apport retardé d'azote, suivent la même tendance pour le CAU, qui décroît lorsque les doses d'azote apporté augmentent (IRAT 1972a; 1972b). Les travaux menés par Loynet en 1976 sur le Pangola montrent des valeurs de CAU variant de 54 à 84 % de manière décroissante en fonction des apports d'azote, et des valeurs de tN<sub>engrais</sub> variant de 35 à 42 %. L'Annexe XII présente les résultats des essais sur le CAU et le tN<sub>engrais</sub>.

L'essai mené en 1975 aux Colimaçons sur prairie de Fétuque élevée présente des valeurs de CAU variant de 46 à 54,18 %. Le tN<sub>engrais</sub> varie quant à lui de 44,83 à 53,60 % (IRAT 1975). Selon les travaux Blanfort en 1998, le taux d'azote apporté par l'engrais pour des graminées tempérées varie de 22 à 30 % pour des apports de 150 kgN.ha<sup>-1</sup>. Il est de 34 % avec des apports de 250 kgN.ha<sup>-1</sup>. Pour le Kikuyu, le taux d'azote apporté par l'engrais varie de 20 à 23 % (les apports ne sont pas précisés). L'annexe XIII présente les résultats des essais sur le CAU et le tN<sub>engrais</sub>.

G. Mandret indique que le tN<sub>engrais</sub> ne dépasse pas, quelle que soit l'année, 10 % en hiver et 15 % en été (Mandret 2000).

### 2.2.1.5 L'indice de nutrition azotée (iNN)

L'indice de nutrition est un indicateur permettant de réaliser un diagnostic du niveau de nutrition en azote d'un fourrage à l'échelle de la coupe. L'iNN d'un couvert est calculé en réalisant le ratio entre la teneur en azote du fourrage et la teneur qu'aurait eu le fourrage avec une nutrition azotée non limitante (Cruz et al. 2006; Duru et al. 2020). Le calcul de l'iNN est réalisé de deux manières différentes, selon si le fourrage est composé de graminées tempérées ou tropicales (Blanfort 1998; Mandret 2000). Pour les graminées tempérées (plante en C<sub>3</sub>), le calcul est le suivant :

$$iNN = 100 \times (4,8 - 4,8 \times MS^{-0,32} + N\%_{\text{mesuré}}) / 4,8 \quad (7)$$

Où iNN l'indice de nutrition azotée en %,  $N\%_{\text{mesuré}}$  la teneur en azote du fourrage en %MS, MS le rendement du fourrage en tMS/ha, 4,8 la concentration optimale en azote pour une biomasse accumulée de 1 t en % et -0,32 le coefficient de dilution de l'azote dans la biomasse

Pour les graminées tropicales (plante en C<sub>4</sub>), le calcul est le suivant :

$$iNN = 100 \times (3,6 - 3,6 \times MS^{-0,4} + N\%_{\text{mesuré}}) / 3,6 \quad (8)$$

Où iNN l'indice de nutrition azotée en %,  $N\%_{\text{mesuré}}$  la teneur en azote du fourrage en %MS, MS le rendement du fourrage en tMS.ha<sup>-1</sup>, 3,6 la concentration optimale en azote pour une biomasse accumulée de 1 t en % et -0,4 le coefficient de dilution de l'azote dans la biomasse

Si la biomasse accumulée est inférieure à 1 t, les calculs d'iNN sont les suivants :

$$\text{Plante en C}_3 : iNN = 100 \times (N\%_{\text{mesuré}} / 4,8) \quad (9)$$

$$\text{Plante en C}_4 : iNN = 100 \times (N\%_{\text{mesuré}} / 3,6) \quad (10)$$

Où iNN l'indice de nutrition azotée en %,  $N\%_{\text{mesuré}}$  la teneur en azote du fourrage en %MS, 4,8 et 3,6 la concentration optimale en azote pour une biomasse accumulée < 1 t

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons appliqué le calcul de l'iNN pour les graminées tempérées sur le site de la Sicalait, bien que le Kikuyu puisse s'implanter dans ces prairies. Nous avons appliqué le calcul de l'iNN pour les graminées tropicales sur les sites de la Sedael et du Lycée.

Les travaux de V. Blanfort et P. Thomas, dans le cadre du programme de gestion raisonnée des prairies mené par le Cirad, ont testé la validité des lois de dilution de l'azote, et ont mis en place un suivi de l'indice de nutrition azoté. Celui-ci varie de 0 à plus de 100 %. Selon le programme de gestion raisonnée des prairies, trois situations se distinguent :

- Si iNN < 90 % : l'indice est trop faible, avec un effet dépressif sur le rendement et la teneur en azote du fourrage ;
- Si 90 % < iNN < 100 % : l'indice est correct, avec une nutrition permettant de produire selon le rendement optimal de la prairie ;
- Si iNN > 100 % : l'indice est trop fort, indiquant une consommation « de luxe » de la prairie. L'augmentation des apports d'azote n'entraîne pas une augmentation du rendement, mais une augmentation de la teneur en azote du fourrage.

Différents essais ont montré que l'iNN est plus important en saison sèche qu'en saison humide (Blanfort 1994). Mandret, en 2000, indique qu'en saison sèche, avec un apport de 150 kgN/ha, l'iNN atteint les 100 %. En saison humide, il faut un apport de 250 kgN.ha<sup>-1</sup> pour l'atteindre. L'azote est dilué en saison humide (Blanfort 1998). Les travaux de Grimaud et al. en 2007 donnent des gammes de valeurs d'iNN variant en saison sèche de 46 à 71 % pour les prairies de Chloris, de 29 à 45 % pour les prairies de Kikuyu et de 51 à 60 % pour les prairies tempérées. En saison humide, ces valeurs varient de 31 à 52 % pour les prairies de Chloris, de 37 à 41 % pour les prairies de Kikuyu, et de 37 à 68 % pour les prairies tempérées.

Également, l'iNN est plus important lorsqu'il y a un apport d'azote (Blanfort 1994). Les relations entre la fertilisation et l'iNN ont été démontrées par Blanfort en 1998. Il montre que des pratiques de fertilisation azotée forte ( $> 200 \text{ kgN.ha}^{-1}$ ) induisent des iNN  $> 80 \%$ . Les travaux de Miralles-Bruneau en 2020 confirment ce lien, avec des iNN variant de 115 à 152 % pour des apports sans azote, avec lisier et avec lisier + minéral. Les résultats des études sur l'iNN se trouvent en Annexe XIV.

### 2.3 Méthodologie de traitement des résultats

Les données initiales sont contenues dans deux bases de données. La première contient les mesures réalisées sur les fourrages, avec 8 160 observations réalisées et 52 variables. Parmi ces 52 variables, 10 ont été valorisées (Date, Bloc, Traitement, Site, Année, Rendement, Teneur en azote du fourrage, iNN, exportations en azote, Apports d'azote). Chaque observation correspond à une coupe réalisée sur une microparcelle. La deuxième base de données contient les mesures d'analyse de sol, avec 1 650 observations et 14 variables. Sur ces 14 variables, 8 ont été valorisées (Traitement, Année, Site, Bloc, Teneur en carbone, Teneur en azote, CEC, pH H<sub>2</sub>O). Chaque observation correspond à une analyse de sol.

Afin de réaliser l'analyse des données, un travail d'analyse descriptive et de préparation des différentes variables permettant de calculer les indicateurs a été réalisé. Puis, les indicateurs de la valorisation de l'azote ont été calculés selon les formules précédemment établies pour chaque coupe. Pour chaque indicateur, la moyenne des répétitions (bloc de 1 à 3) a été calculée par site, traitement et année.

Une brève analyse descriptive est ensuite réalisée. La moyenne ainsi que l'écart-type seront présentés selon trois échelles : sur la durée totale de l'essai, sur la première année de l'essai (2004 ou 2005 selon le site ou l'indicateur) et sur la dernière année de l'essai (2018 ou 2019 selon le site ou l'indicateur).

Les données ont ensuite été soumises à une ANOVA à un facteur, afin d'identifier les effets de chaque traitement sur les différentes variables et indicateurs de valorisation de l'azote. Un test post-hoc de Tukey a été réalisé pour préciser si les différences observées sont statistiquement significatives.

Par la suite, des régressions linéaires ont été effectuées pour réaliser une analyse bivariée, afin d'examiner les interactions entre les variables. L'utilisation d'une régression linéaire en fonction du temps permet d'illustrer les tendances des indicateurs en fonction des traitements de fertilisation.

Le logiciel R (R Core Team 2024) a été utilisé pour réaliser le traitement des données et les analyses statistiques. Plus spécifiquement, les paquets suivants ont été utilisés :

- ggplot2 (Wickham et al. 2024)
- ggpubr (Kassambara 2023)
- ggpmisc (Aphalo, Slowikowski, Mouksassi 2024)
- dplyr (Wickham, François, et al. 2023)
- multcomp (Hothorn et al. 2024)
- scales (Wickham, Pedersen, et al. 2023)
- corrrplot (Wei et al. 2024)

Les résultats obtenus ont ensuite été comparés avec la littérature scientifique et la gamme de valeurs préalablement établies. Cette comparaison permet de vérifier la présence de biais et la pertinence des méthodes de mesure. Elle permet également de discuter des résultats et de les mettre en perspective.

### 3 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS

Afin de déterminer quel type de fertilisation valorise le mieux l'azote en climat tropical, entre le lisier, le compost, les engrais minéraux ou les fertilisations mixtes, nous étudions tout d'abord les propriétés du sol, puis nous nous concentrons ensuite sur les différents indicateurs de la valorisation de l'azote à l'échelle du fourrage. L'analyse détaillée ci-dessous se focalisera sur le site de la Sicalait. Les résultats obtenus pour les autres sites sont présentés en Annexe XV et XVI.

#### 3.1 Impact de la fertilisation sur l'horizon 0-15 cm du sol

##### 3.1.1 Evolution du pH sur l'horizon 0-15 cm du sol

Nous analysons l'évolution du pH sur l'horizon 0-15 cm du sol, selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 6).

Pour l'intégralité des traitements organiques, nous observons une basification de l'horizon 0-15 cm entre 2004 et 2018. Le pH du traitement témoin est plus élevé en 2018 ( $\bar{m} = 6,34$ ) qu'en 2004 ( $\bar{m} = 6,03$ ), bien que la différence ne soit pas significative ( $P > 0,05$ ). Pour les deux traitements minéraux, nous observons une acidification de l'horizon 0-15 cm du sol.

En début d'essai (2004), les traitements ont tous des pH statistiquement similaires (excepté pour le traitement L1 dont le pH est statistiquement supérieur au traitement M2). En fin d'essai (2018), les traitements organiques ont des pH statistiquement supérieurs aux traitements minéraux.

Tableau 6 : pH de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	pH 2004-2018 (moyenne $\pm$ écart-type)	pH 2004 (moyenne $\pm$ écart-type)	pH 2018 (moyenne $\pm$ écart-type)
C1	6,21 $\pm$ 0,39 (ab)	6,20 $\pm$ 0,20 (ab)	6,77 $\pm$ 0,06 (ab)
C1M	5,94 $\pm$ 0,38 (ac)	6,03 $\pm$ 0,11 (ab)	6,61 $\pm$ 0,04 (ab)
C2	6,26 $\pm$ 0,45 (b)	6,17 $\pm$ 0,15 (ab)	6,88 $\pm$ 0,18 (ab)
C2M	6,13 $\pm$ 0,39 (ab)	6,10 $\pm$ 0,10 (ab)	6,73 $\pm$ 0,01 (ab)
L1	6,39 $\pm$ 0,49 (bd)	6,23 $\pm$ 0,06 (a)	6,85 $\pm$ 0,22 (ab)
L1M	6,25 $\pm$ 0,45 (b)	6,03 $\pm$ 0,21 (ab)	6,80 $\pm$ 0,18 (ab)
L2	6,53 $\pm$ 0,62 (d)	6,07 $\pm$ 0,15 (ab)	7,03 $\pm$ 0,15 (a)
M1	5,34 $\pm$ 0,37 (e)	5,87 $\pm$ 0,21 (ab)	5,9 $\pm$ 0,22 (cd)
M2	4,94 $\pm$ 0,56 (f)	5,8 $\pm$ 0,10 (b)	5,51 $\pm$ 0,11 (c)
Témoin	5,76 $\pm$ 0,41 (c)	6,03 $\pm$ 0,12 (ab)	6,34 $\pm$ 0,21 (bd)



Nous réalisons un test de corrélation de Pearson afin de regarder s'il existe une relation linéaire entre le pH et la CEC. Nous obtenons une corrélation positive forte ( $r = 0,83$  ;  $P < 0,05$ ). Nous réalisons une régression linéaire entre le pH et la CEC (Figure 9). Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) de la CEC lorsque le pH augmente.

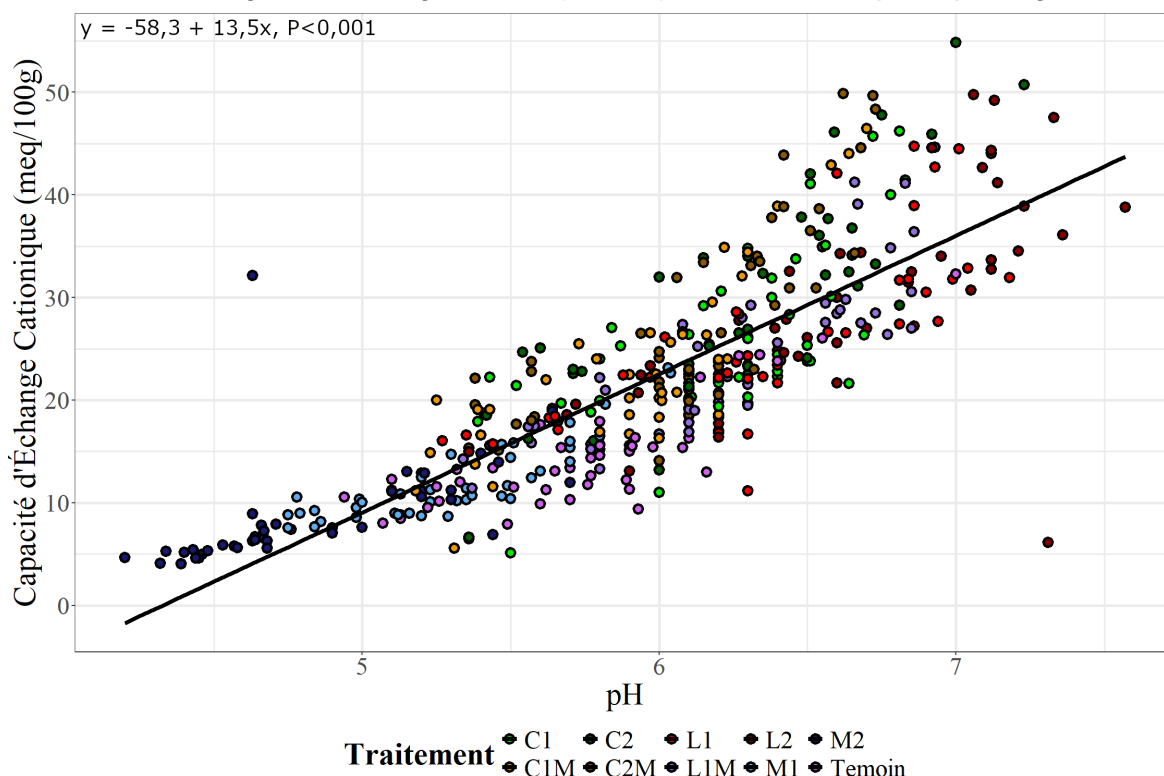


Figure 7 : Régression linéaire  $\ln(\text{pH} \sim \text{CEC})$  représentant la relation entre le pH et la capacité d'échange cationique (en meq/100g) pour le site de la Sicalait sur la période 2004-2018

Nous avons calculé pour chaque analyse de sol de chaque traitement la différence par rapport au témoin de pH de l'horizon 0-15 cm afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 8 représente les régressions linéaires entre le pH de l'horizon 0-15 cm et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une diminution significative ( $P < 0,05$ ) du pH de l'horizon 0-15 cm du sol par rapport au témoin pour les traitements minéraux M1 ( $a^1 = -0,0425$ ) et M2 ( $a = -0,0581$ ) entre 2004 et 2018. En revanche, nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) pour les traitements lisiers L1 ( $a = 0,0344$ ) et L2 ( $a = 0,0497$ ) et le traitement compost C2 ( $a = 0,0268$ ). Les augmentations ne sont pas significatives ( $P > 0,05$ ) pour les traitements C1, C1M, C2M et L1M.

Nous observons un effet dose non significatif, avec des coefficients de droite plus élevés pour les traitements C2, C2M ( $a = 0,0185$ ) et L2 que ceux des traitements C1 ( $a = 0,00605$ ), C1M ( $a = 0,00731$ ) et L1, et moins élevés pour le traitement M2 que celui du traitement M1.

Les coefficients de droite des traitements mixtes C1M, C2M et L1M ( $a = 0,0284$ ) sont moins importants que ceux des traitements purs équivalents C1, C2 et L1, indiquant que la basification de l'horizon 0-15 cm est plus faible dans le cas d'un traitement mixte.

<sup>1</sup> « a » représente le coefficient de droite

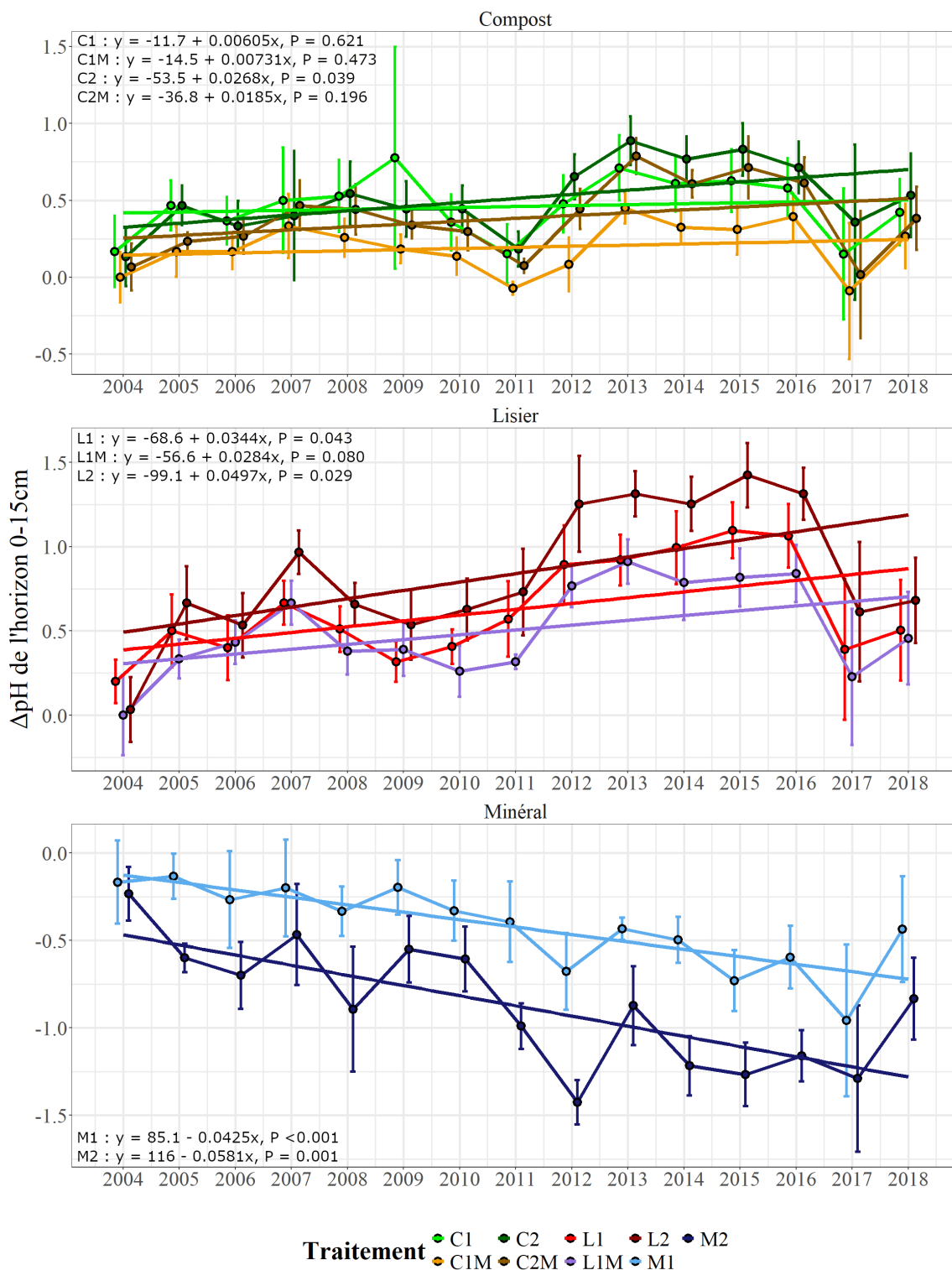


Figure 8 : Régressions linéaires  $\text{lm}(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

### 3.1.2 Evolution de la teneur en MO sur l'horizon 0-15 cm du sol

Nous analysons l'évolution de la teneur en MO (en %) sur l'horizon 0-15 cm du sol, selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 7).

En moyenne, sur la période 2004-2018, les traitements organiques ont des valeurs plus élevées que le traitement minéral M2 ( $P < 0,05$ ). En 2004, il n'y a pas de différences significatives entre les dix modalités de fertilisation, indiquant un départ équivalent pour tous les traitements. En 2018, les traitements composts C1 ( $\bar{m} = 26,69$ ), C1M ( $\bar{m} = 28,18$  %), C2 ( $\bar{m} = 29,74$  %) et C2M ( $\bar{m} = 29,66$  %) ont les teneurs en MO les plus importantes ( $P < 0,05$ ). Le traitement L2 ( $\bar{m} = 24,64$  %) est statistiquement similaire au traitement C1 ( $P < 0,05$ ).

Tableau 7 : Teneur en MO (en %) de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	Teneur en MO 2004-2018 (moyenne $\pm$ écart-type)	Teneur en MO 2004 (moyenne $\pm$ écart-type)	Teneur en MO 2018 (moyenne $\pm$ écart-type)
<b>C1</b>	22,57 $\pm$ 2,33 (a)	21,72 $\pm$ 1,90	26,69 $\pm$ 1,30 (ab)
<b>C1M</b>	23,02 $\pm$ 2,81 (a)	22,41 $\pm$ 0,62	28,18 $\pm$ 1,16 (ac)
<b>C2</b>	23,30 $\pm$ 3,04 (a)	21,32 $\pm$ 0,98	29,74 $\pm$ 0,9 (c)
<b>C2M</b>	23,13 $\pm$ 3,03 (a)	21,26 $\pm$ 0,65	29,66 $\pm$ 0,51 (c)
<b>L1</b>	22,25 $\pm$ 1,86 (a)	22,76 $\pm$ 1,80	23,96 $\pm$ 0,19 (de)
<b>L1M</b>	22,03 $\pm$ 1,86 (ab)	22,18 $\pm$ 1,56	23,29 $\pm$ 0,84 (ef)
<b>L2</b>	22,10 $\pm$ 2,18 (ab)	21,66 $\pm$ 1,27	24,64 $\pm$ 1,15 (be)
<b>M1</b>	20,66 $\pm$ 1,68 (bc)	22,01 $\pm$ 0,98	22,56 $\pm$ 0,45 (ef)
<b>M2</b>	19,89 $\pm$ 1,77 (c)	20,34 $\pm$ 0,60	21,45 $\pm$ 1,08 (df)
<b>Témoin</b>	19,78 $\pm$ 1,58 (c)	21,26 $\pm$ 1,15	20,99 $\pm$ 0,25 (f)

Nous réalisons un test de corrélation de Pearson afin de regarder s'il existe une relation linéaire entre la teneur en MO et la CEC. Nous obtenons une corrélation positive forte ( $r = 0,72$  ;  $P < 0,05$ ). Nous réalisons une régression linéaire entre la teneur en MO et la CEC (Figure 9). Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) de la CEC lorsque la teneur en MO augmente.

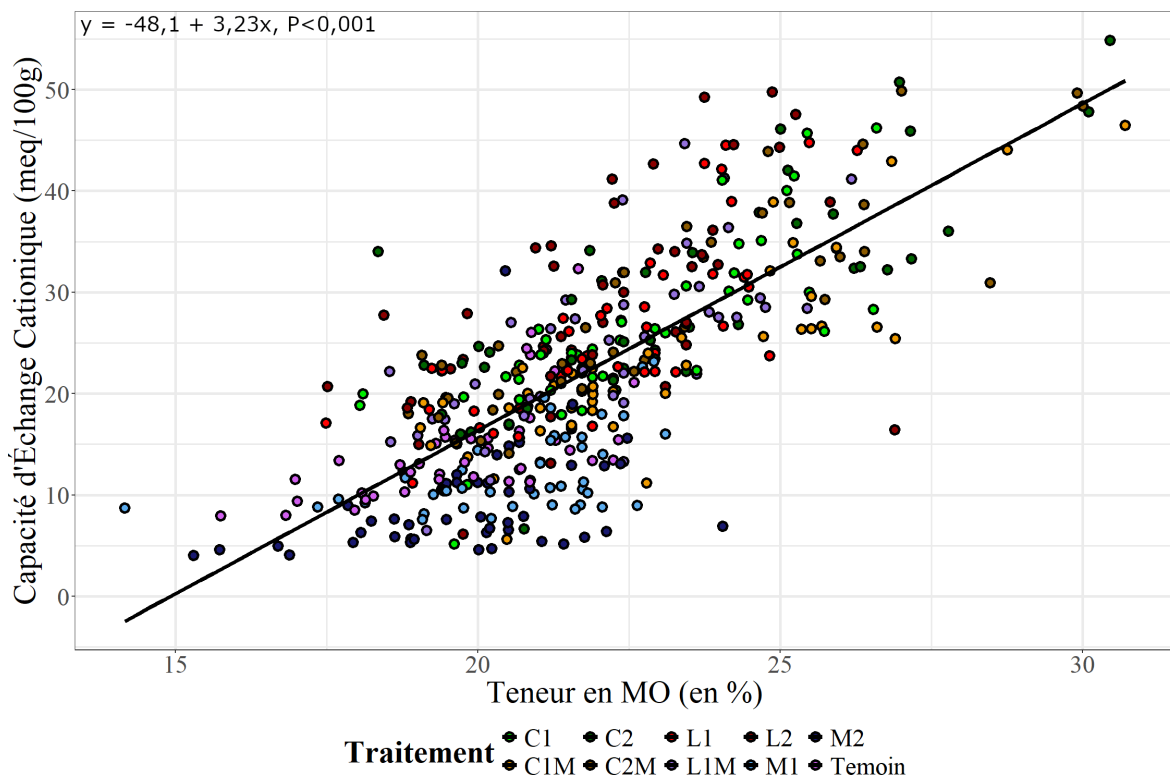


Figure 9 : Régression linéaire  $\ln(\text{MO} \sim \text{CEC})$  représentant la relation entre la teneur en MO (en %) et la capacité d'échange cationique (en meq/100g) pour le site de la Sicalait sur la période 2004-2018.

Nous avons calculé pour chaque analyse de sol de chaque traitement la différence par rapport au témoin de teneur en MO de l'horizon 0-15 cm afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 10 représente les régressions linéaires entre la teneur en MO de l'horizon 0-15 cm et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) pour les traitements organiques, excepté pour le traitement L2 ( $P > 0,05$ ), entre 2004 et 2018. L'augmentation est plus importante pour les traitements composts C1 ( $a = 0,283$ ), C1M ( $a = 0,372$ ), C2 ( $a = 0,385$ ) et C2M ( $a = 0,458$ ), les coefficients de droite étant plus importants que les traitements lisiers L1 ( $a = 0,118$ ), L1M ( $a = 0,149$ ) et L2 ( $a = 0,122$ ). Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) de la teneur en MO pour le traitement M2 ( $a = 0,079$ ).

Un effet dose est également observable, les coefficients de droite des traitements C2 et C2M étant plus élevés que ceux des traitements C1 et C1M.

Les traitements mixtes ont des coefficients de droite plus élevés que ceux des traitements purs équivalents, indiquant qu'ils ont un effet plus marqué sur l'augmentation de la teneur en MO.

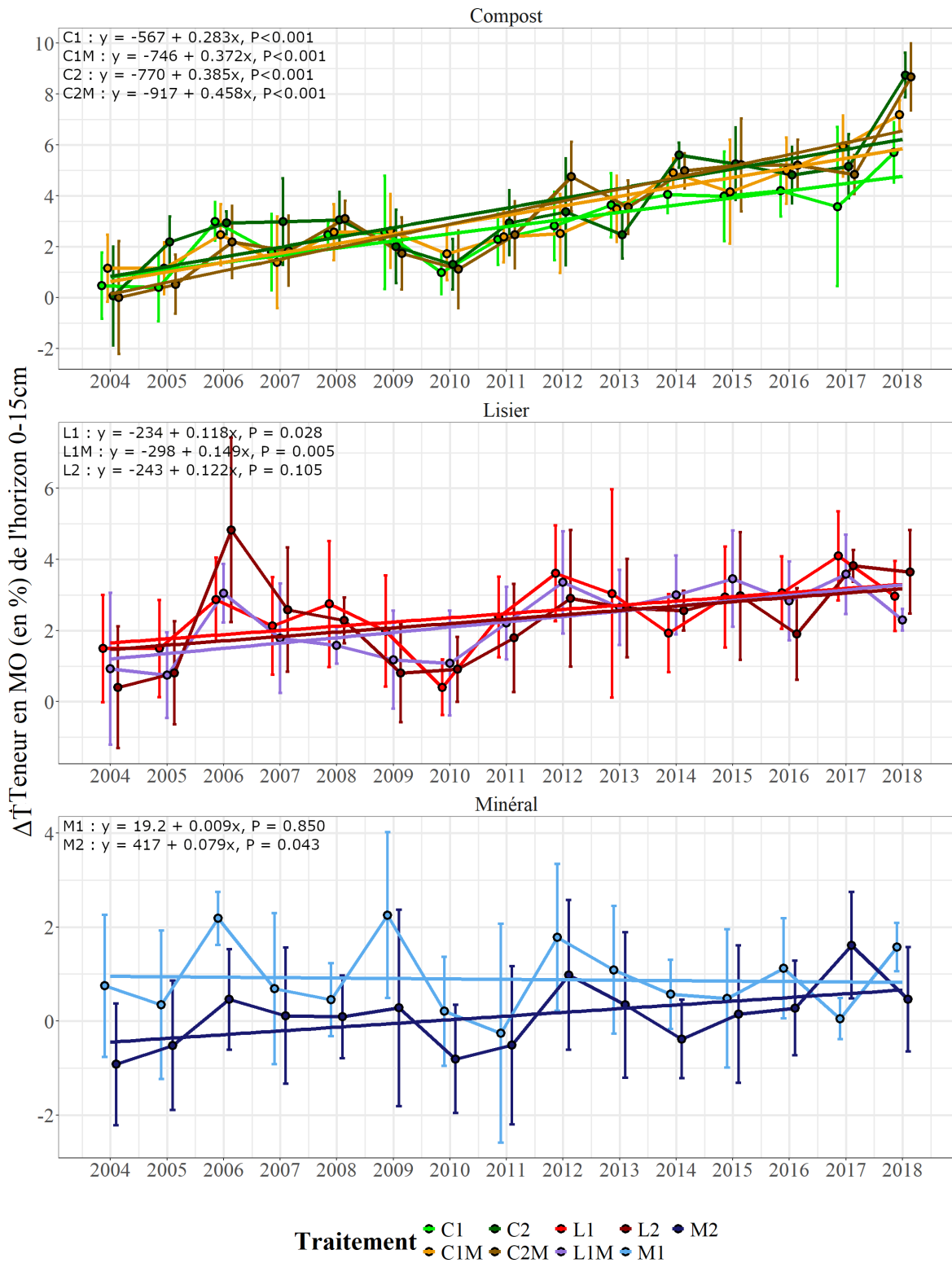


Figure 10 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

### 3.1.3 Evolution du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm du sol

Nous analysons l'évolution du stock d'azote (en tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) sur l'horizon 0-15 cm du sol, selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 8).

En moyenne, sur la période 2004-2018, les traitements organiques stockent plus d'azote dans l'horizon 0-15 cm (en moyenne 10,76 tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) que les traitements minéraux et témoin (en moyenne 9,48 tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>). En 2004, il n'y a pas de différences statistiques entre les dix modalités de fertilisation. En 2018, nous n'observons pas de différences statistiques entre tous les traitements, mais il se dégage tout de même que les traitements composts C2 ( $\bar{m} = 13,58$  tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) et C2M ( $\bar{m} = 13,51$  tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) ont les stocks d'azote les plus élevés. Le témoin présente le stock d'azote le plus faible ( $\bar{m} = 9,89$  tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>), et est statistiquement similaire ( $P < 0,05$ ) aux traitements M1 ( $\bar{m} = 10,81$  tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) et M2 ( $\bar{m} = 10,22$  tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>).

Tableau 8 : Stock d'azote (en tonnes d'azote.ha<sup>-1</sup>) de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	Stock d'azote 2004-2018 (moyenne $\pm$ écart-type)	Stock d'azote 2004 (moyenne $\pm$ écart-type)	Stock d'azote 2018 (moyenne $\pm$ écart-type)
C1	10,60 $\pm$ 1,05 (a)	9,66 $\pm$ 0,70	12,41 $\pm$ 0,65 (ab)
C1M	10,90 $\pm$ 1,25 (a)	10,09 $\pm$ 0,30	13,14 $\pm$ 0,52 (ac)
C2	10,97 $\pm$ 1,23 (a)	9,51 $\pm$ 0,36	13,58 $\pm$ 0,36 (a)
C2M	10,86 $\pm$ 1,26 (a)	9,57 $\pm$ 0,30	13,51 $\pm$ 0,12 (a)
L1	10,71 $\pm$ 0,88 (a)	10,12 $\pm$ 0,80	11,69 $\pm$ 0,22 (bd)
L1M	10,57 $\pm$ 0,86 (a)	9,89 $\pm$ 0,62	11,42 $\pm$ 0,49 (be)
L2	10,72 $\pm$ 1,01 (a)	9,72 $\pm$ 0,56	12,09 $\pm$ 0,53 (bc)
M1	9,75 $\pm$ 0,82 (b)	9,86 $\pm$ 0,43	10,81 $\pm$ 0,40 (def)
M2	9,43 $\pm$ 0,85 (b)	9,16 $\pm$ 0,27	10,22 $\pm$ 0,47 (ef)
Témoin	9,26 $\pm$ 0,74 (b)	9,51 $\pm$ 0,51	9,89 $\pm$ 0,14 (f)

Nous avons calculé pour chaque analyse de sol de chaque traitement la différence par rapport au témoin du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 11 représente les régressions linéaires entre le stock d'azote de l'horizon 0-15 cm et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une évolution du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm significative ( $P < 0,05$ ) pour tous les traitements entre 2004 et 2018. L'augmentation est plus faible pour les traitements minéraux M1 ( $a = 0,0187$ ) et M2 ( $a = 0,0117$ ), les coefficients de droite étant moins élevés que ceux des traitements organiques. Plus précisément, ce sont les traitements composts C1 ( $a = 0,0902$ ), C1M ( $a = 0,0949$ ), C2 ( $a = 0,145$ ) et C2M ( $a = 0,146$ )

qui ont l'augmentation de stock d'azote de l'horizon 0-15 cm la plus élevée, avec des coefficients de droite plus importants. Nous observons un effet dose, les coefficients de droite étant plus élevés pour les traitements C2, C2M, L2 (a = 0,078) et M2. Les traitements mixtes ont également des coefficients de droite plus importants que ceux des traitements purs équivalents, indiquant une augmentation du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm plus importante.

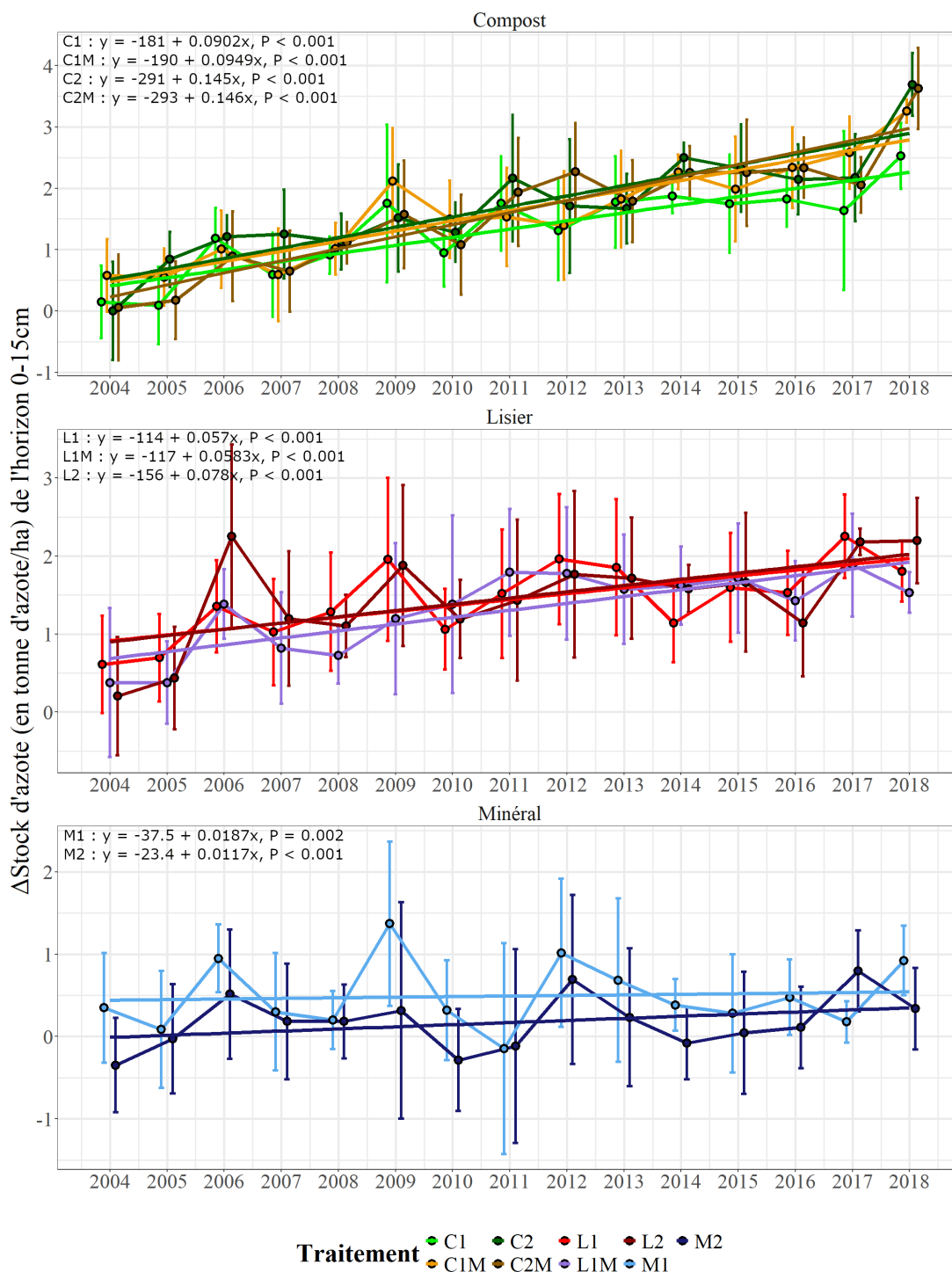


Figure 11 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonnes d'azote. $\text{ha}^{-1}$ ) de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

## 3.2 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote

### 3.2.1 Evolution des exportations en azote

#### 3.2.1.1 À l'échelle de la coupe

Nous analysons l'évolution des exportations en azote par coupe (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>), selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2019, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 9).

Le traitement témoin est celui qui exporte le moins d'azote sur la période 2004-2019 ( $\bar{m} = 39,17$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>), suivi des traitements C1 ( $\bar{m} = 53,10$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et M1 ( $\bar{m} = 58,76$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>). Le traitement L2 ( $\bar{m} = 114,76$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) est celui qui exporte le plus d'azote. Nous observons un effet dose entre les traitements C1 ( $\bar{m} = 53,10$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et C2 ( $\bar{m} = 70,53$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>), L1 ( $\bar{m} = 89,56$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et L2 ( $\bar{m} = 114,56$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et M1 ( $\bar{m} = 58,76$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et M2 ( $\bar{m} = 74,54$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>).

En 2004, les traitements C2 ( $\bar{m} = 34,14$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) et Témoin ( $\bar{m} = 28,95$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) sont ceux qui exportent le moins d'azote. Le traitement M2 ( $\bar{m} = 80,04$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>) exporte le plus d'azote, bien que statistiquement similaire au traitement L2 ( $\bar{m} = 69,15$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.coupe<sup>-1</sup>). En 2018, les traitements organiques (excepté C1) exportent plus d'azote que les traitements minéraux et témoin. Les exportations en azote sont plus importantes en 2019 qu'en 2004. Les exportations en azote des traitements composts mixtes sont statistiquement plus élevées en début d'essai que celles des traitements purs équivalents. Elles sont statistiquement similaires en fin d'essai.

Tableau 9 : Exportations en azote (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>) par coupe (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2019 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	Exportations en azote 2004-2018 (moyenne ± écart-type)	Exportations en azote 2004 (moyenne ± écart-type)	Exportations en azote 2018 (moyenne ± écart-type)
C1	53,10 ± 32,14 (a)	34,14 ± 4,33 (a)	81,63 ± 37,52 (ab)
C1M	74,43 ± 36,73 (b)	56,35 ± 10,88 (bc)	135,76 ± 58,15 (bc)
C2	70,53 ± 38,92 (b)	38,57 ± 9,62 (ad)	118,57 ± 62,04 (bc)
C2M	79,11 ± 39,32 (bc)	55,15 ± 8,04 (bc)	136,55 ± 49,70 (bc)
L1	89,56 ± 43,42 (cd)	51,04 ± 15,55 (cd)	115,15 ± 33,28 (bc)
L1M	97,08 ± 42,03 (d)	61,81 ± 12,76 (bc)	132,31 ± 46,68 (bc)
L2	114,76 ± 51,88 (e)	69,15 ± 13,77 (be)	171,91 ± 43,63 (c)
M1	58,76 ± 29,41 (a)	52,24 ± 11,14 (cd)	73,31 ± 29,62 (ab)
M2	74,54 ± 36,98 (b)	80,04 ± 11,98 (e)	90,08 ± 29,54 (ab)
Témoin	39,17 ± 26,57 (f)	28,95 ± 3,69 (a)	39,53 ± 18,92 (a)



Afin de déterminer quelle variable entre le rendement et la teneur en azote du fourrage fait varier les exportations en azote, nous calculons le coefficient de corrélation de Pearson. La corrélation entre les exportations en azote et le rendement est très forte ( $r = 0,94$ ,  $P < 0,05$ ), ce qui indique que l'augmentation des exportations en azote est liée à une augmentation du rendement. La corrélation entre les exportations en azote et la teneur en azote du fourrage est faible ( $r = 0,03$ ,  $P < 0,05$ ), ce qui indique que la teneur en azote du fourrage exerce une faible influence sur les exportations en azote. Nous réalisons une régression linéaire  $lm(\text{Rendement} \sim \text{ExpN})$ . Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) des exportations en azote lorsque le rendement augmente (Figure 12).

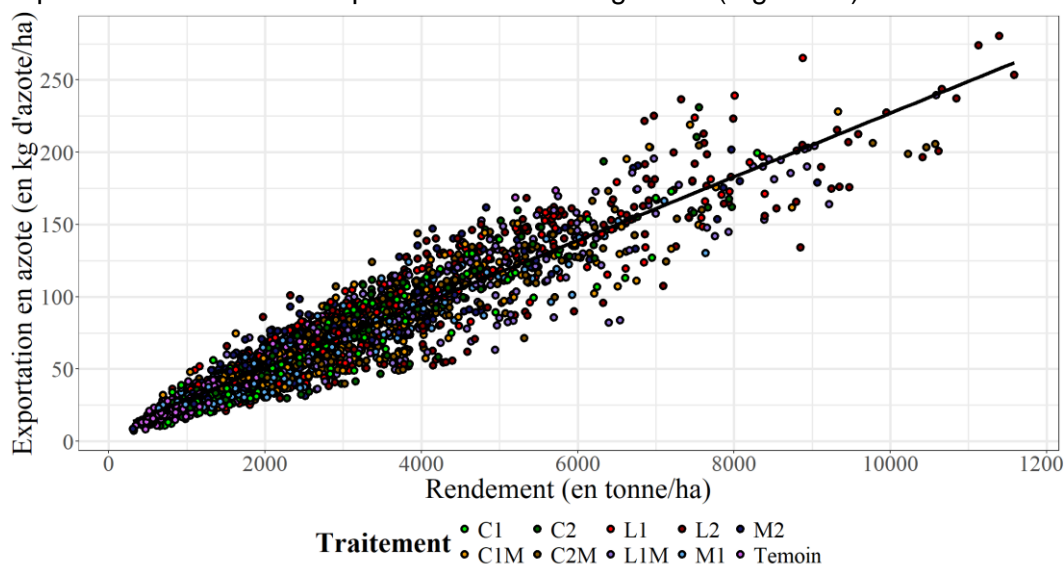


Figure 12 : Relation entre le rendement (en tonne/ha) et les exportations en azote (en kg d'azote/ha) sur la période 2004-2019 sur le site de la Sicalait.

Pour évaluer l'impact du pH, de la teneur en MO et du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm ainsi que des apports d'azote sur les exportations en azote, nous calculons le coefficient de corrélation de Pearson (Tableau 10). La corrélation est importante entre les exportations en azote et les apports d'azote ( $r = 0,45$  ;  $P < 0,05$ ). Elle est modérée entre les exportations en azote et le stock d'azote de l'horizon 0-15 cm ( $r = 0,25$  ;  $P < 0,05$ ). Elle est faible entre les exportations en azote et la teneur en MO ( $r = 0,16$  ;  $P < 0,05$ ), et entre les exportations en azote et le pH ( $r = 0,18$  ;  $P < 0,05$ ).

Tableau 10 : Test de corrélation de Pearson entre les exportations en azote et les variables Teneur en MO, pH, Stock d'azote, Apports d'azote, Rendement, Teneur en azote du fourrage

Variable	Coefficient de corrélation de Pearson	P-value
Teneur en MO	0,16	<0,05
pH	0,18	<0,05
Stock d'azote	0,25	<0,05
Apports d'azote	0,45	<0,05
Rendement	0,94	<0,05
Teneur en azote du fourrage	0,03	<0,05

Nous avons calculé pour chaque coupe de chaque traitement la différence par rapport au témoin des exportations en azote afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 13 représente les régressions linéaires entre les exportations en azote et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) de la différence par rapport au témoin des exportations en azote des traitements C1 ( $a = 2,05$ ), C2 ( $a = 1,88$ ), C2M ( $a = 2,8$ ), L1M ( $a = 1,63$ ) et L2 ( $a = 2,77$ ) entre 2004 et 2019. La différence par rapport au témoin des exportations en azote des traitements minéraux M1 ( $a = -1,02$ ) et M2 ( $a = -1,55$ ) diminue significativement ( $P < 0,05$ ). Nous observons un effet dose, les coefficients de droite des traitements C2, C2M et L2 étant plus importants que ceux des traitements C1, C1M ( $a = 1,79$ ) et L1 ( $a = 1,17$ ). Le coefficient de droite du traitement M2 est inférieur à celui du traitement M1. Également, les traitements mixtes C2M et L1M ont des coefficients de droite plus élevés que ceux des traitements purs équivalents.

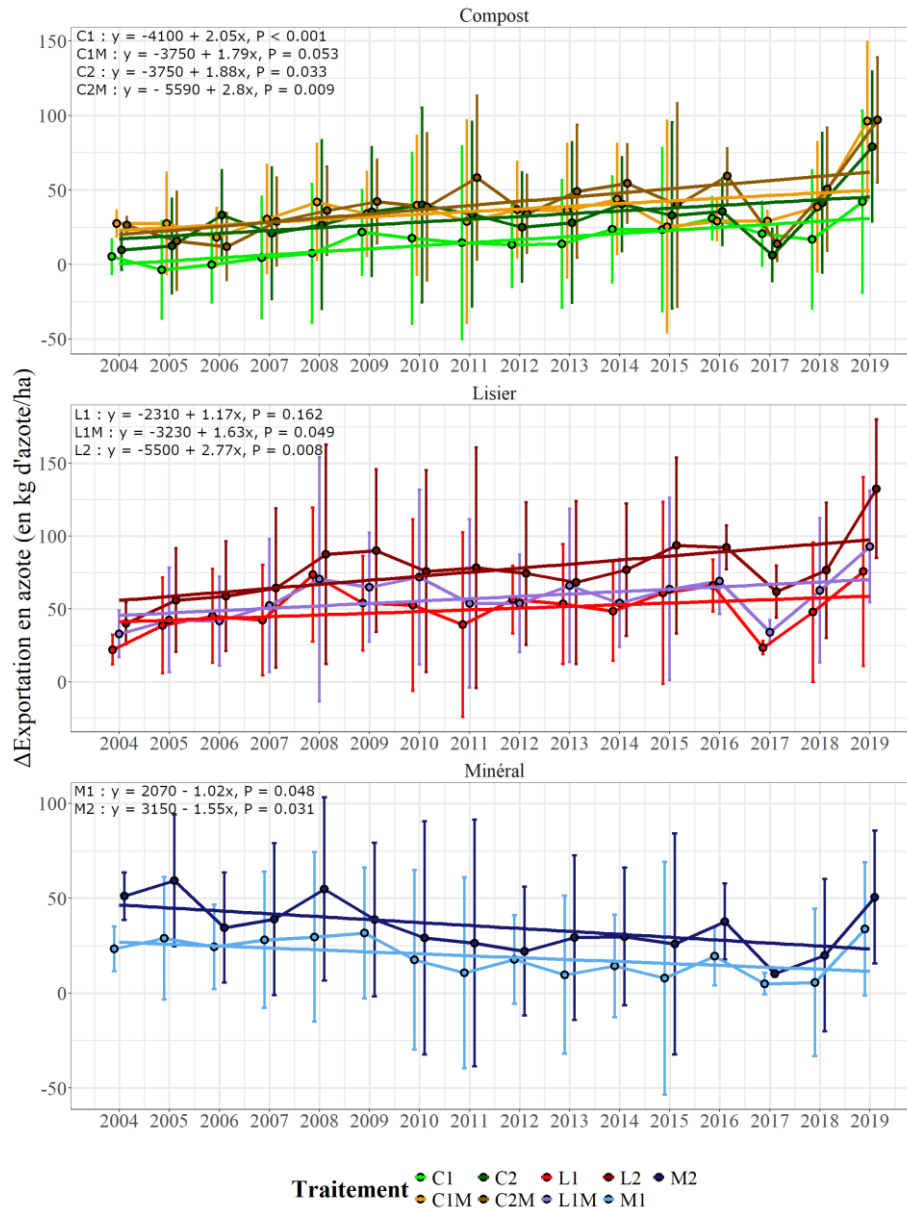


Figure 13 : Régressions linéaires  $lm(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>) par coupe par rapport au témoin ( $\Delta$ Exportation) sur la période 2004-2019 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

### 3.2.1.2 À l'échelle annuelle

Nous pouvons également analyser les exportations en azote à l'échelle annuelle. Nous analysons l'évolution des exportations en azote par an (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>), selon trois

échelles : la moyenne de la période 2004-2019, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2019. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 11).

Le traitement témoin est celui qui exporte le moins d'azote sur la période 2005-2018 ( $\bar{m} = 239,81$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), suivi des traitements C1 ( $\bar{m} = 316,97$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et M1 ( $\bar{m} = 355,43$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). Le traitement L2 ( $\bar{m} = 695,62$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) est celui qui exporte le plus d'azote. Nous observons un effet dose entre les traitements C1 ( $\bar{m} = 316,97$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et C2 ( $\bar{m} = 427,30$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), L1 ( $\bar{m} = 549,09$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et L2 ( $\bar{m} = 695,62$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et M1 ( $\bar{m} = 355,43$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et M2 ( $\bar{m} = 443,49$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>).

En 2005, nous observons que les traitements Témoin ( $\bar{m} = 275,55$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), C1 ( $\bar{m} = 253,62$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), C2 ( $\bar{m} = 349,58$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et C2M ( $\bar{m} = 369,99$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) sont ceux qui exportent le moins d'azote.

En 2018, c'est le traitement L2 ( $\bar{m} = 743,31$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) qui exportent le plus d'azote. Les exportations en azote sont plus importantes en 2018 qu'en 2005.

En début d'essai, les exportations en azote du traitement C1M ( $\bar{m} = 440,21$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) sont statistiquement plus élevées que celles du traitement C1 ( $\bar{m} = 253,62$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). En fin d'essai, les exportations sont statistiquement similaires.

Tableau 11 : Exportations en azote (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>) par an (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2005-2018 (les années 2016 et 2017 sont exclues) pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	Exportations en azote 2005-2018 (moyenne $\pm$ écart-type)	Exportations en azote 2005 (moyenne $\pm$ écart-type)	Exportations en azote 2018 (moyenne $\pm$ écart-type)
<b>C1</b>	316,97 $\pm$ 84,78 (a)	253,62 $\pm$ 20,73 (a)	384,66 $\pm$ 33,63 (ab)
<b>C1M</b>	443,20 $\pm$ 54,56 (b)	440,21 $\pm$ 22,59 (bcd)	515,90 $\pm$ 29,41 (bcde)
<b>C2</b>	427,30 $\pm$ 83,65 (b)	349,58 $\pm$ 19,18 (ab)	532,73 $\pm$ 34,21 (bde)
<b>C2M</b>	472,03 $\pm$ 99,40 (b)	369,99 $\pm$ 20,98 (ad)	587,18 $\pm$ 26,03 (ef)
<b>L1</b>	549,09 $\pm$ 72,01 (c)	506,86 $\pm$ 20,99 (de)	570,97 $\pm$ 35,44 (bef)
<b>L1M</b>	591,81 $\pm$ 75,46 (c)	529,51 $\pm$ 25,37 (ce)	660,72 $\pm$ 37,75 (df)
<b>L2</b>	695,62 $\pm$ 96,96 (d)	611,36 $\pm$ 24,94 (e)	743,31 $\pm$ 33,61 (f)
<b>M1</b>	355,43 $\pm$ 58,76 (a)	448,66 $\pm$ 20,10 (bcd)	317,84 $\pm$ 22,14 (ac)
<b>M2</b>	443,49 $\pm$ 83,56 (b)	631,56 $\pm$ 23,85 (e)	404,24 $\pm$ 24,31 (ae)
<b>Témoin</b>	239,81 $\pm$ 54,52 (e)	275,55 $\pm$ 25,31 (a)	284,50 $\pm$ 32,02 (a)

Nous avons calculé pour chaque année de chaque traitement la différence par rapport au témoin des exportations en azote afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 13 représente les régressions linéaires entre les exportations en azote et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) de la différence par rapport au témoin des exportations en azote des traitements C1 ( $a = 10,6$ ) et C2M ( $a = 16,1$ ) entre 2005 et 2018. La différence par rapport au témoin des exportations en azote des traitements minéraux M1 ( $a = -1,45$ ) et M2 ( $a = -0,362$ ) diminue non significativement ( $P > 0,05$ ).

Nous observons un effet dose pour les traitements lisiers et minéraux, les coefficients de droite étant supérieurs pour le traitement L2 ( $a = 7,9$ ) par rapport au traitement L1 ( $a = 2,22$ ), et pour le traitement M2 ( $a = -1,45$ ) par rapport au traitement M1 ( $a = -0,362$ ).

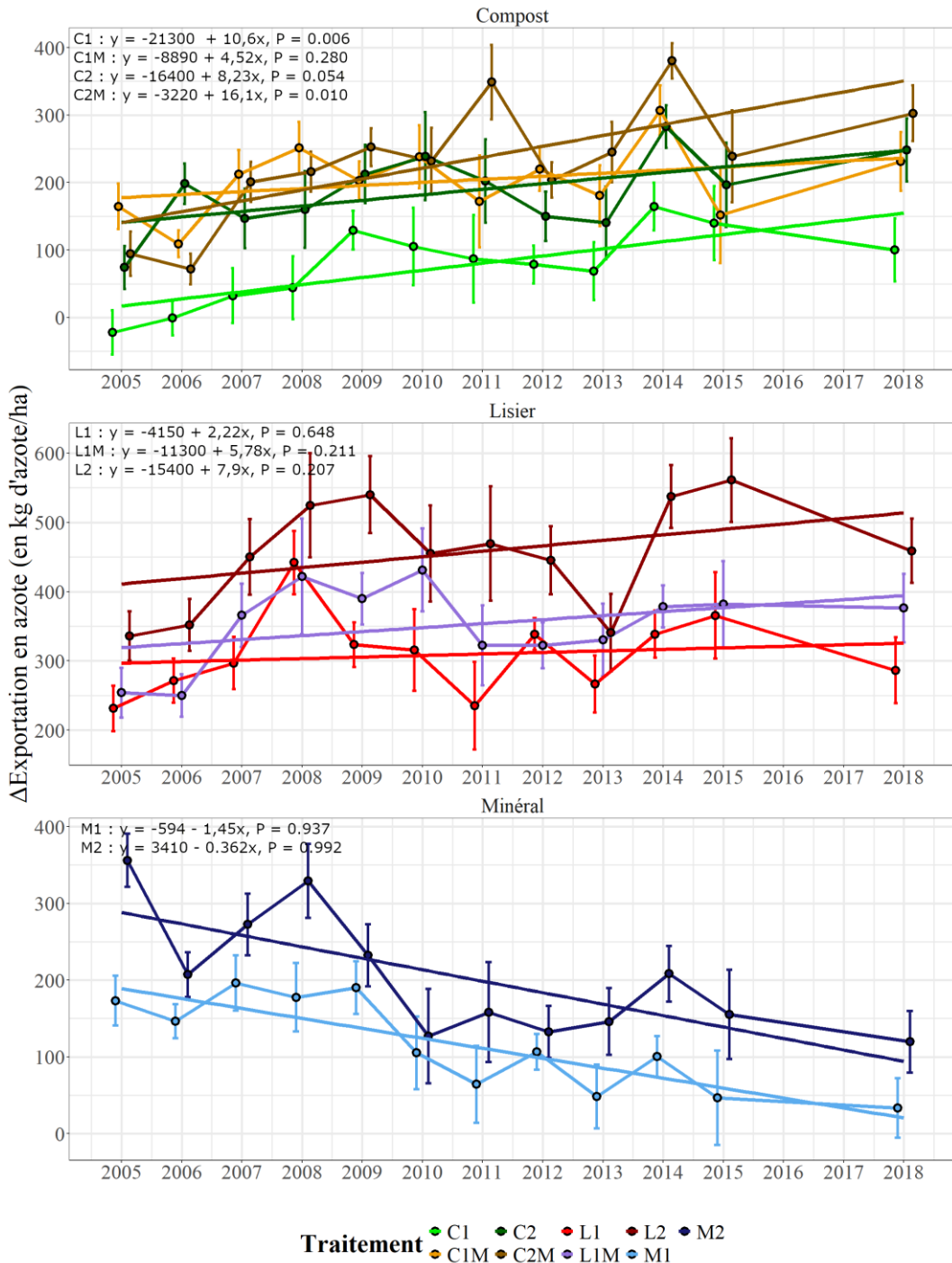


Figure 14 : Régressions linéaires  $\text{lm}(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en  $\text{kg d'azote} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) par an par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

### 3.2.2 Evolution du bilan azoté apparent annuel

Nous analysons l'évolution du bilan azoté apparent (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>), selon trois échelles : la moyenne annuelle de la période 2004-2019, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2019. Nous calculons également l'écart-type pour la période 2004-2019 (Tableau 12).

Sur la période 2004-2019, nous pouvons noter que les bilans azotés apparents des traitements C1M ( $\bar{m} = -50,69$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) et Temoin ( $\bar{m} = -203,22$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) sont négatifs. Le bilan azoté du traitement L2 est le plus élevé ( $\bar{m} = 623,89$  kg d'azote.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). C'est la modalité qui présente le plus grand apport d'azote (1260 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>).

Tableau 12 : Bilan azoté apparent (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>) par an (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2019 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	Bilan azoté apparent 2004-2019 (moyenne ± écart-type)	Bilan azoté apparent 2005 (moyenne ± écart-type)	Bilan azoté apparent 2018 (moyenne ± écart-type)
<b>C1</b>	0,54 ± 127,85 (ab)	-30,48 ± 28,63 (a)	-28,62 ± 24,93 (ab)
<b>C1M</b>	-50,69 ± 158,51 (a)	-161,07 ± 13,58 (b)	-103,86 ± 19,13 (a)
<b>C2</b>	96,80 ± 191,35 (bc)	22,32 ± 51,06 (ac)	60,68 ± 30,96 (bc)
<b>C2M</b>	100,89 ± 193,44 (bc)	49,91 ± 28,56 (ac)	54,23 ± 68,07 (bc)
<b>L1</b>	227,19 ± 184,17 (d)	249,89 ± 48,74 (d)	109,03 ± 60,96 (bc)
<b>L1M</b>	219,03 ± 193,22 (d)	257,23 ± 6,41 (d)	49,28 ± 26,22 (bc)
<b>L2</b>	623,89 ± 241,75 (e)	712,94 ± 62,82 (e)	446,69 ± 55,03 (d)
<b>M1</b>	135,17 ± 114,08 (cd)	-8,66 ± 13,20 (a)	122,16 ± 67,72 (c)
<b>M2</b>	376,42 ± 141,11 (f)	128,44 ± 48,75 (c)	355,76 ± 48,65 (d)
<b>Temoin</b>	-203,22 ± 86,43 (g)	-275,56 ± 14,47 (f)	-284,50 ± 59,61 (e)

La Figure 15 représente les régressions linéaires entre le bilan azoté apparent et la variable année pour chaque traitement.

Nous pouvons noter une diminution significative ( $P < 0,05$ ) du bilan azoté apparent pour les traitements lisiers L1 ( $a = -23,2$ ), L1M ( $a = -26$ ) et L2 ( $a = -35,6$ ). Les résultats des autres régressions ne sont pas significatifs ( $P > 0,05$ ).

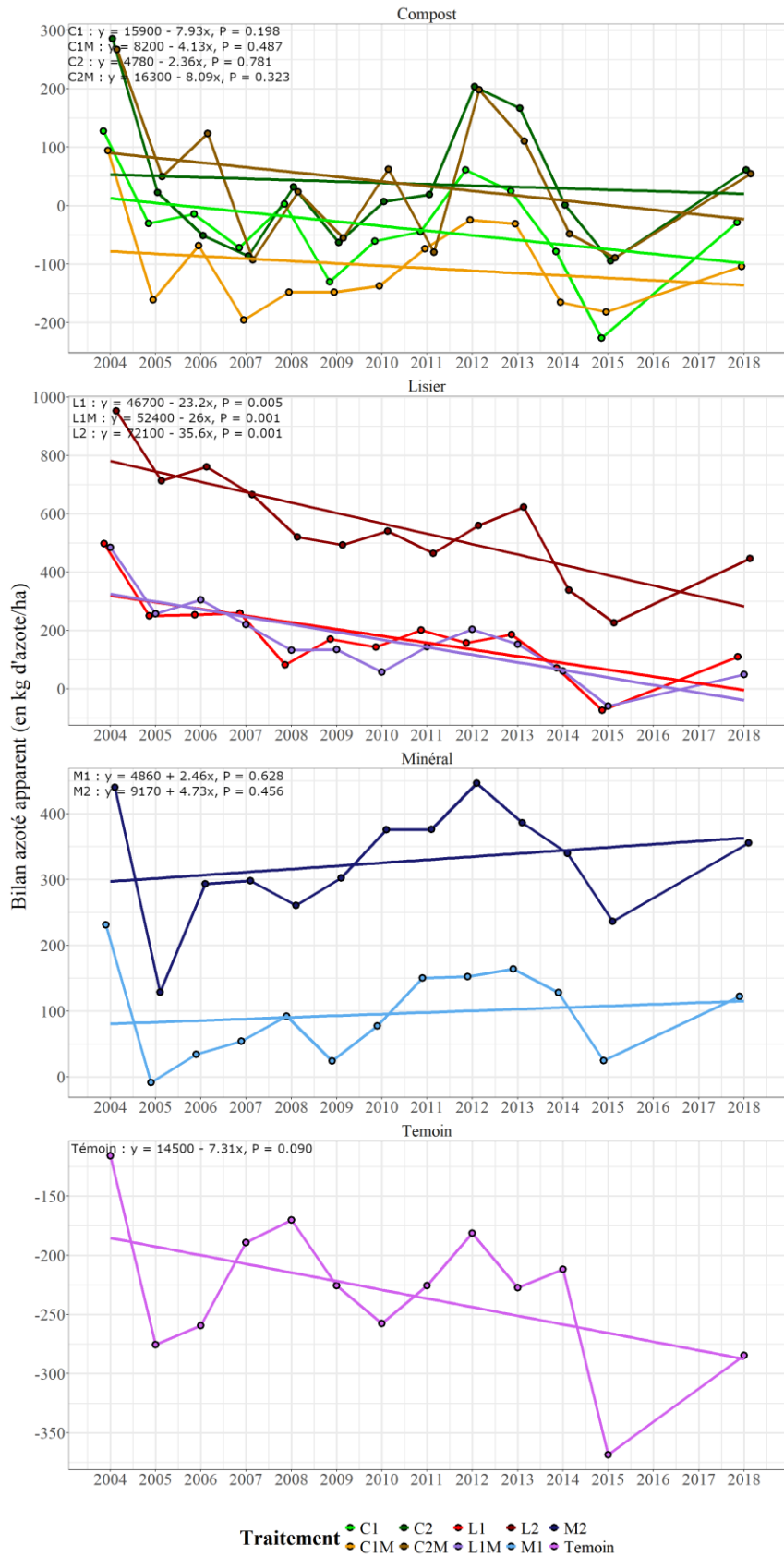


Figure 15 : Régressions linéaires  $\ln(BNA \sim Year)$  représentant l'évolution du bilan azoté apparent (en kg d'azote.ha<sup>-1</sup>) par an sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.

### 3.2.3 Evolution du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et du taux d'azote apporté par l'engrais (tNengrais) à l'échelle de l'année

Nous analysons l'évolution du CAU (en %), selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 13).

Sur la période 2004-2018, le traitement C1M ( $\bar{m} = 121\%$ ) est celui qui a la valeur de CAU la plus élevée. Les traitements L2 ( $\bar{m} = 49\%$ ) et M2 ( $\bar{m} = 50\%$ ) sont ceux qui ont les valeurs de CAU les plus faibles.

Nous observons en 2004 que ce sont les traitements composts C1 ( $\bar{m} = 114\%$ ), C1M ( $\bar{m} = 158\%$ ) et M1 ( $\bar{m} = 102\%$ ) qui ont les valeurs de CAU les plus élevées. Les traitements lisiers présentent les valeurs les plus faibles.

En 2018, c'est le traitement M2 ( $\bar{m} = 53\%$ ) qui a la valeur de CAU la plus faible. Nous observons une augmentation des valeurs de CAU pour les traitements organiques entre 2004 et 2018, et une diminution pour les traitements minéraux.

Tableau 13 : CAU (en %) par an (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	CAU 2004-2019 (moyenne $\pm$ écart-type)	CAU 2005 (moyenne)	CAU 2018 (moyenne)
<b>C1</b>	104,27 $\pm$ 43,40 (ab)	113,66 $\pm$ 12,83 (a)	108,04 $\pm$ 7,00 (ab)
<b>C1M</b>	120,72 $\pm$ 47,30 (a)	157,70 $\pm$ 4,87 (b)	125,21 $\pm$ 4,64 (a)
<b>C2</b>	83,76 $\pm$ 37,94 (bc)	94,00 $\pm$ 13,73 (ac)	89,78 $\pm$ 5,22 (bc)
<b>C2M</b>	83,83 $\pm$ 34,09 (bc)	88,11 $\pm$ 6,80 (cd)	91,55 $\pm$ 10,61 (bc)
<b>L1</b>	67,94 $\pm$ 26,03 (cd)	66,98 $\pm$ 6,44 (de)	83,97 $\pm$ 8,96 (cd)
<b>L1M</b>	70,40 $\pm$ 26,15 (cd)	67,30 $\pm$ 0,81 (de)	93,06 $\pm$ 3,69 (bc)
<b>L2</b>	49,43 $\pm$ 18,83 (d)	46,16 $\pm$ 4,74 (e)	62,46 $\pm$ 4,62 (de)
<b>M1</b>	69,28 $\pm$ 25,93 (cd)	101,96 $\pm$ 3,00 (ac)	72,24 $\pm$ 15,39 (ce)
<b>M2</b>	50,47 $\pm$ 18,96 (d)	83,10 $\pm$ 6,42 (cd)	53,19 $\pm$ 6,4 (e)

Nous analysons l'évolution du tNengrais (en %), selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 14).

En moyenne, sur la période 2004-2019, nous n'observons pas de différence statistiquement significative entre les traitements ( $P < 0,05$ ). Nous pouvons cependant noter que les traitements mixtes C1M ( $\bar{m} = 55,48\%$ ), C2M ( $\bar{m} = 40,9\%$ ) et L1M ( $\bar{m} = 41,67\%$ ) sont ceux qui semblent valoriser le mieux l'azote.

Nous observons une forte diminution du tNengrais entre 2004 et 2018 pour les traitements minéraux M1 (2004 :  $\bar{m} = 39,34\%$  ; 2018 :  $\bar{m} = 7,58\%$ ) et M2 (2004 :  $\bar{m} = 46,84\%$  ; 2018 :  $\bar{m} = 15,76\%$ ).

Tableau 14 : tNengrais (en %) par an (moyenne  $\pm$  écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	tNengrais 2004-2019 (moyenne $\pm$ écart-type)	tNengrais 2005 (moyenne)	tNengrais 2018 (moyenne)
<b>C1</b>	24,43 $\pm$ 22,77 (a)	-9,83 $\pm$ 17,64 (a)	28,13 $\pm$ 13,31 (ab)
<b>C1M</b>	55,48 $\pm$ 28,91 (b)	58,99 $\pm$ 9,35 (b)	56,16 $\pm$ 18,70 (b)
<b>C2</b>	35,85 $\pm$ 21,03 (ac)	19,90 $\pm$ 14,37 (a)	41,83 $\pm$ 5,26 (bc)
<b>C2M</b>	40,90 $\pm$ 21,60 (c)	22,49 $\pm$ 5,85 (ab)	47,19 $\pm$ 6,30 (b)
<b>L1</b>	37,96 $\pm$ 16,69 (c)	30,57 $\pm$ 4,77 (a)	42,13 $\pm$ 10,24 (bc)
<b>L1M</b>	41,67 $\pm$ 17,25 (c)	32,28 $\pm$ 2,27 (ac)	52,99 $\pm$ 5,18 (b)
<b>L2</b>	32,30 $\pm$ 13,62 (ac)	25,36 $\pm$ 4,97 (a)	38,56 $\pm$ 1,79 (bc)
<b>M1</b>	23,09 $\pm$ 16,22 (a)	39,34 $\pm$ 4,19 (ab)	7,58 $\pm$ 7,66 (a)
<b>M2</b>	23,98 $\pm$ 13,43 (a)	46,84 $\pm$ 4,85 (bc)	15,76 $\pm$ 10,53 (ac)

Nous avons calculé pour chaque coupe de chaque traitement la différence par rapport au témoin du CAU, ainsi que du tNengrais afin d'isoler l'effet du traitement. L'analyse portera seulement sur les résultats obtenus pour la variable tNengrais, qui prend en compte les exportations en azote du témoin. La Figure 16 représente les régressions linéaires entre le tNengrais et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous observons une diminution significative ( $P < 0,05$ ) du tNengrais pour les traitements minéraux M1 ( $a = -2,95$ ) et M2 ( $a = -1,97$ ). Les résultats des régressions pour les autres traitements ne sont pas significatifs.



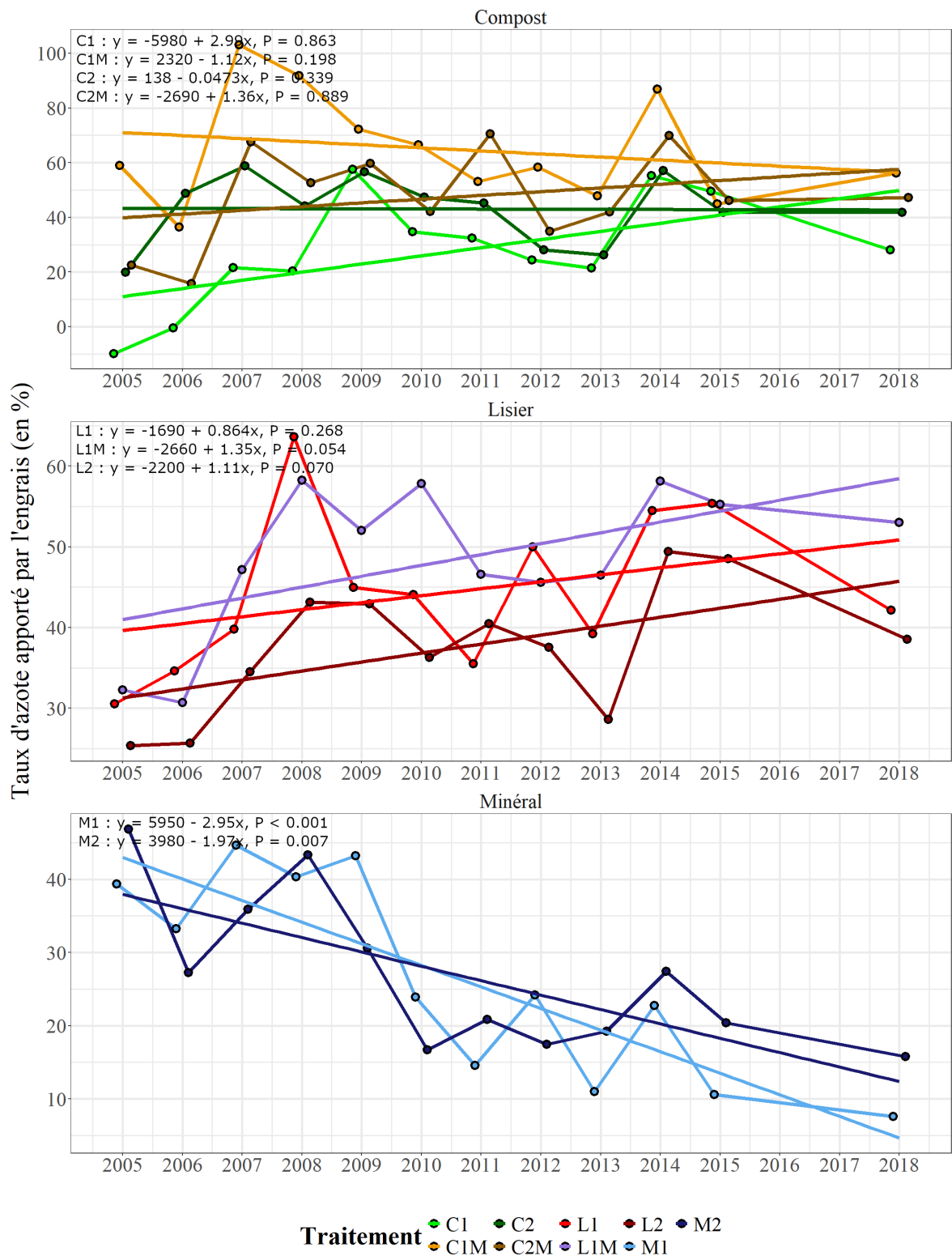


Figure 16 : Régressions linéaires  $\ln(tN_{engrais} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution du  $tN_{engrais}$  (en %) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.

### 3.2.4 Evolution de l'iNN à l'échelle de la coupe

Nous analysons l'évolution de l'iNN (en %), selon trois échelles : la moyenne de la période 2004-2018, la moyenne de l'année 2004 et la moyenne de l'année 2018. Nous calculons également l'écart-type (Tableau 14).

Sur les trois périodes étudiées, nous observons un iNN supérieur à 100 % pour l'ensemble des traitements. Sur la période 2004-2018, le traitement M2 ( $\bar{m} = 148,65$  %) est celui qui présente la moyenne d'iNN la plus importante. Le traitement L1 ( $\bar{m} = 145,93$  %) est statistiquement similaire. En 2004, l'ensemble des traitements sont statistiquement similaires (l'iNN est en moyenne de 143,934 %). Nous observons une augmentation de l'iNN entre 2004 et 2018.

Tableau 15 : Moyenne et écart-type de l'iNN (en %) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.

Traitement	iNN 2004-2018 (moyenne $\pm$ écart-type)	iNN 2004 (moyenne $\pm$ écart-type)	iNN 2018 (moyenne $\pm$ écart-type)
<b>C1</b>	141,88 $\pm$ 9,62 (ab)	141,34 $\pm$ 9,29	143,75 $\pm$ 5,30 (a)
<b>C1M</b>	142,41 $\pm$ 9,89 (abc)	142,69 $\pm$ 9,81	151,78 $\pm$ 6,66 (ab)
<b>C2</b>	143,79 $\pm$ 9,36 (ad)	143,56 $\pm$ 11,42	147,76 $\pm$ 7,75 (ab)
<b>C2M</b>	141,16 $\pm$ 9,53 (a)	141,94 $\pm$ 12,42	148,87 $\pm$ 10,50 (ab)
<b>L1</b>	145,93 $\pm$ 10,86 (de)	145,81 $\pm$ 9,85	150,67 $\pm$ 4,52 (ab)
<b>L1M</b>	143,05 $\pm$ 10,42 (abc)	144,66 $\pm$ 10,82	149,76 $\pm$ 7,36 (ab)
<b>L2</b>	144,93 $\pm$ 11,31 (cd)	147,19 $\pm$ 11,68	153,37 $\pm$ 6,37 (b)
<b>M1</b>	143,24 $\pm$ 9,59 (ad)	143,75 $\pm$ 10,89	144,57 $\pm$ 10,33 (ac)
<b>M2</b>	148,65 $\pm$ 10,18 (e)	146,05 $\pm$ 12,17	152,94 $\pm$ 12,60 (bc)
<b>Témoin</b>	144,55 $\pm$ 10,44 (bd)	142,35 $\pm$ 9,32	147,75 $\pm$ 6,06 (ab)

Nous avons calculé pour chaque coupe de chaque traitement la différence par rapport au témoin de l'iNN afin d'isoler l'effet du traitement. La Figure 17 représente les régressions linéaires entre le tNengrais et la variable année pour chaque traitement. Les écart-types sont représentés par les lignes verticales.

Nous n'obtenons pas de résultats significatifs. Nous pouvons noter une forte variabilité interannuelle, particulièrement en 2017 avec une différence par rapport au témoin très importante pour les traitements C2, C2M, M1 et M2. Également, nous observons une diminution de la différence par rapport au témoin de l'iNN non significative ( $P > 0,05$ ) pour l'ensemble des traitements, excepté le traitement C1M.

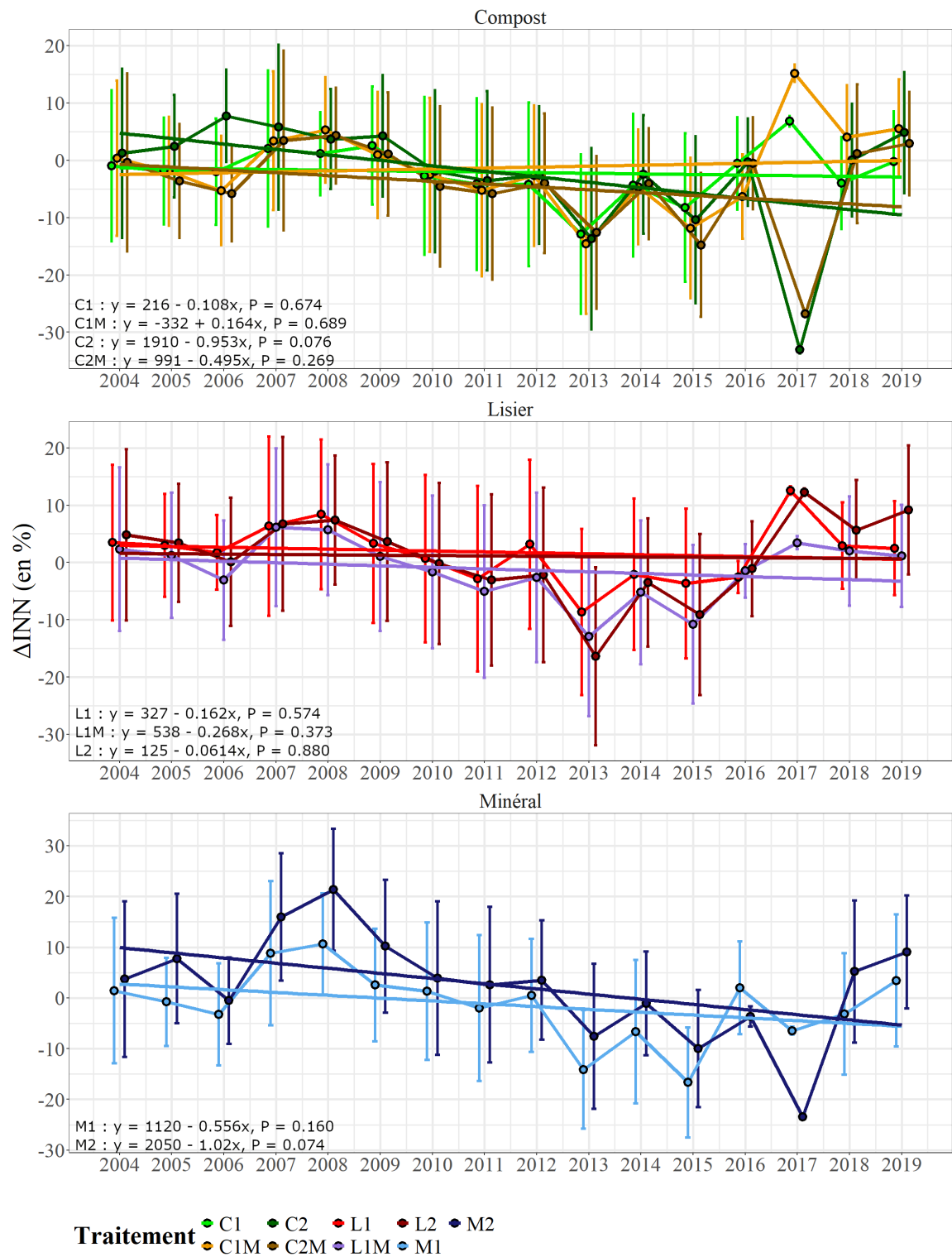


Figure 17 : Régressions linéaires  $\ln(iNN \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'iNN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta iNN$ ) sur la période 2004-2019 sur le site de la Siclait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

## 4 DISCUSSIONS ET PROPOSITIONS

Ce mémoire a pour objectif de comparer sous l'angle de la valorisation de l'azote différents types de fertilisation en climat tropical. À cet effet, nous avons formalisé deux hypothèses : (i) Les fertilisations minérales ont une valorisation de l'azote qui diminue au cours du temps, causée notamment par l'acidification des sols et (ii) Les traitements mixtes valorisent mieux l'azote que les traitements purs, sur le court et le long terme.

### 4.1 Comparatif avec les essais IRAT/Cirad

Nous pouvons comparer les résultats obtenus avec la gamme de valeurs préalablement établie grâce aux essais de l'IRAT/Cirad. Cette comparaison permet de discuter de la validité des résultats obtenus et de les mettre en perspective. Les exportations en azote sur le site de la Sicalait sont supérieures à la gamme de valeurs. En l'absence de fertilisation, le traitement témoin exporte en moyenne  $239,81 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  par an entre 2004 et 2018, contre seulement  $27 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  sur l'essai mené sur une prairie de Fétuque élevée. Cette différence peut s'expliquer en partie par la proximité des microparcelles de notre essai entre elles, qui représente un biais potentiel. La prairie témoin peut puiser une partie de l'azote provenant des modalités fertilisées (IRAT 1975).

Sur ce même essai, pour des niveaux de fertilisation sensiblement équivalents, le traitement M1 ( $440 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  apporté par an) exporte en moyenne  $304,83 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  par an entre 2004 et 2018, contre  $250,33 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  sur l'essai IRAT ( $462 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  apporté par an). Le traitement M2 ( $760 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  apporté par an) exporte  $383,58 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  par an, contre  $353,4 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  sur l'essai IRAT ( $700 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  apporté par an). Compte tenu des gammes de variations possibles (conditions pédoclimatiques, conditions de mesures et de calculs) nous observons des exportations comparables entre les modalités équivalentes (IRAT 1975).

Le bilan azoté apparent des traitements composts C1, C1M, C2 et C2M, ainsi que du traitement M1 sont les plus proches de 0, indiquant un bon équilibre entre les apports et les exports d'azote. L'essai mené en 1975 aux Colimaçons sur prairie tempérée indiquait des valeurs de bilan azoté variant de  $-27$  à  $346,6 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  par an. Le traitement lisier ne se situe pas dans cette gamme de valeurs. L'essai mené à la Plaine des Cafres présente des valeurs de bilan azoté apparent supérieures à nos essais (Miralles-Bruneau et al. 2020). Nous pouvons émettre l'hypothèse que nous avons des apports d'azote trop importants pour certaines modalités, notamment les traitements lisiers.

Nous obtenons des valeurs de CAU variant de 49,43 à 120,72 % en moyenne de 2004 à 2019. En comparaison, l'essai de l'IRAT sur une prairie de Fétuque élevée relève des valeurs de CAU comprises entre 46,00 et 54,18 %. Cette différence est expliquée par l'utilisation d'engrais minéraux sur l'essai de l'IRAT. (IRAT 1975).

Concernant le tNengrais, il varie de 23,09 à 55,48 % en moyenne de 2004 à 2019. Sur l'essai mené par l'IRAT sur prairie de Fétuque élevée, il varie de 34,31 à 48,34 % (IRAT 1975). Nous obtenons des gammes de valeurs relativement similaires.

Les travaux de V. Blanfort indiquent que les valeurs de tNengrais sont comprises entre 22 et 30 % pour un apport de  $150 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ , et de 34 % pour un apport de  $250 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Blanfort 1998).

### 4.2 Impact de la fertilisation sur les propriétés du sol

Sur l'essai, nous pouvons confirmer que la fertilisation a un impact sur les propriétés du sol, notamment sur le pH, la teneur en MO, le CEC et le stock d'azote du sol. La fertilisation minérale engendre une acidification de l'horizon 0-15 cm du sol. Nous obtenons en moyenne des valeurs de pH se situant entre 4,94 et 5,34 pour les deux traitements minéraux. Pour rappel, 50 % des mesures de pH réalisées par le laboratoire d'analyse du Cirad Réunion sur les prairies réunionnaises se situent entre 5 et 5,8 (Communication interne). Cette acidification a également été relevée sur d'autres essais menés par Geisseler et Scow en 2014 ou Czarnecki et Düring en 2015. Elle serait causée par la

nitrification de l'azote lorsqu'il se trouve sous forme ammoniacale ou uréique. Leur nitrification produit un proton  $H^+$ , responsable de l'acidification du sol.

Nous pouvons également confirmer que la CEC est fortement liée au pH ( $r = 0,83$  ;  $P < 0,05$ ) ainsi qu'à la teneur en MO ( $r = 0,72$  ;  $P < 0,05$ ). Dans notre étude, le pH diminue lors d'une fertilisation minérale, contribuant alors à diminuer le nombre de sites de fixation des cations sur les colloïdes du sol. Cela induit une disponibilité en azote réduite pour les plantes. L'étude menée par Maltas, Raphaël, et al. en 2012, qui étudie l'effet de la fertilisation organique sur les propriétés du sol, montre que la MO et le pH sont corrélés à la CEC.

La fertilisation organique engendre une basification de l'horizon 0-15 cm du sol. Les protons libérés par la nitrification de l'azote sont neutralisés par les bases échangeables K, Ca et Mg présentes dans les traitements organiques (Maltas, Raphaël, et al. 2012). L'utilisation d'engrais organiques permet d'atteindre, en fin d'essai (2018), un pH se situant entre 6,73 et 7,03, soit supérieur aux valeurs observées par le Cirad sur les prairies réunionnaises (Communication interne).

L'ensemble des modalités de fertilisation augmentent la teneur en MO, mais de manière plus élevée dans le cas d'une fertilisation organique. En moyenne, sur la durée de l'essai, la teneur en MO varie de 19,78 à 23,30 %, ce qui la situe dans la gamme de valeurs observée par le Cirad (la teneur en MO varie de 11,9 à 22 %). Ce résultat confirme ce qui a déjà été étudié dans de précédentes études. Une teneur en MO importante permet d'augmenter les sites de fixation des cations sur la CEC (Julien et al. 2023). L'augmentation de la teneur en MO augmente la biomasse microbienne, et stimule son activité (Triberti et al. 2008).

Les stocks d'azote augmentent pour l'ensemble des traitements, ce qui diffère des études réalisées par le passé. Les traitements composts ont des stocks d'azote plus importants en fin d'essai. Les traitements minéraux et témoin ont les stocks d'azote les plus faibles. L'étude menée par Triberti et al. en 2008 présente des résultats similaires, avec une augmentation du stock d'azote total pour tous les traitements organiques. Cependant, ils n'observent pas d'augmentation du stock d'azote total pour les traitements minéraux à des doses de  $300 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . Dans notre étude, les traitements minéraux ont des doses de 420 à  $490 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  pour le traitement M1, et de 720 à  $840 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ , ce qui peut expliquer l'augmentation des stocks d'azote observée. L'étude de Triberti et al. montre qu'une fertilisation organique augmente les teneurs en nutriments du sol, dont l'azote, et plus particulièrement lors de l'application d'un traitement mixte combinant organique et minéral. L'étude menée par Shi et al. en 2024 indique que les stocks d'azote augmentent lors de l'application d'une fertilisation organique et minérale. Yang et al. en 2016 observent le même phénomène. Ils indiquent également que les stocks d'azote augmentent de manière plus importante lors de l'application d'une fertilisation mixte minérale et organique. Ils indiquent également que c'est la modification des propriétés du sol qui pourrait être responsable de l'augmentation des stocks d'azote.

Gioacchini et al., en 2024 ont observé une baisse du stock d'azote du sol sur quatre horizons différents (0 - 0.15 m ; 0.16 – 0.25 m ; 0.26 – 0.45 m ; 0.46 – 0.60 m), et plus particulièrement dans la couche la plus profonde dans le cas d'une fertilisation minérale. Ils indiquent que cette baisse serait certainement due à une lixiviation de l'azote.

Notre étude montre donc que les traitements organiques permettent une amélioration significative des propriétés du sol, contrairement aux traitements minéraux. Ils accentuent le pH et la teneur en MO et le stock d'azote du sol, ce qui augmente le nombre de sites de fixation des cations sur les colloïdes du sol. Cela induit une disponibilité en azote accrue, permettant une meilleure valorisation de l'azote.

### **4.3 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote**

L'amélioration des propriétés du sol et de la disponibilité de l'azote pour les plantes peut être une explication de l'augmentation des exportations en azote pour l'intégralité des traitements au cours de l'essai. Cette augmentation est plus importante pour les traitements

organiques. Nous avons relevé dans notre étude que le rendement est fortement corrélé aux exportations en azote ( $r = 0,94$  ;  $P < 0,05$ ). L'azote disponible pour la plante est un facteur clé de croissance et de rendement. Dans notre étude, les doses d'azote appliquées à l'hectare sont particulièrement importantes, dépassant  $1000 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  pour le traitement L2. Ces fortes doses favorisent une croissance accrue et, par conséquent, des rendements plus élevés. De plus, l'indice de disponibilité de l'azote (iNN) du traitement témoin est supérieur à 140 %. Ce phénomène peut s'expliquer par la richesse initiale du sol en matière organique (MO) et en azote, avec une teneur de 21,26 % en 2004 pour le traitement témoin. Cela permet une bonne disponibilité et une assimilation efficace de l'azote, ce qui contribue à des iNN particulièrement élevés dans les essais, souvent supérieurs à 100 %. Cela indique une consommation « de luxe », favorisant ainsi la croissance des plantes et augmentant les teneurs en azote du fourrage (Blanfort 1998).

La MO dans le lisier est moins stable et se dégrade plus rapidement, l'azote est donc disponible plus vite (Maltas, Charles, et al. 2012). Nous pouvons observer que les valeurs de CAU des traitements lisiers sont plus basses que celles des traitements composts. Cela pourrait être dû à une minéralisation plus rapide de l'azote, et donc à une trop forte disponibilité en azote par rapport aux besoins de la prairie, ce qui entraînerait des pertes. Ladha et al. en 2003 ont montré que l'utilisation continue d'engrais minéraux provoque une baisse des rendements, tandis que l'utilisation d'engrais organiques combinés à des engrais minéraux permet de les maintenir, grâce à l'amélioration du stock de carbone organique et des propriétés du sol. Les CAU des traitements composts C1 et C1M sont les plus élevés de l'essai, indiquant une bonne valorisation de l'azote. Les iNN des traitements composts sont également élevés, confirmant la bonne valorisation de l'azote.

Le tNengrais est plus élevé sur la période 2004-2019 pour les traitements organiques que pour les traitements minéraux. Il est intéressant de noter que dans le cas d'une fertilisation organique, nous observons une augmentation du tNengrais pour presque tous les traitements (excepté pour le traitement C1M), indiquant une meilleure valorisation de l'azote sur le long terme. Lors de l'application d'un engrais organique, la part d'azote organique fait augmenter les teneurs en humus. L'humus se minéralise très lentement, et l'azote libéré est alors assimilable par les plantes. Ce processus est appelé arrière-effet. Plusieurs études ont montré que l'arrière-effet pouvait durer de nombreuses années, et que l'azote était alors mieux valorisé. Il faut cependant noter que si l'azote relâché ne suit pas les besoins des plantes, il y a un risque de lixiviation et/ou de dénitrification (Dahlin et al. 2005; Spiess, Prasuhn, Stauffer 2011). À l'inverse, le tNengrais des traitements minéraux diminue au cours de l'essai, indiquant une moins bonne valorisation de l'azote sur le long terme.

Il est également important de noter que les modalités présentant les plus fortes doses d'azote, notamment sous forme de lisier et d'engrais minéraux, affichent une moins bonne valorisation de l'azote. Ces traitements, bien que montrant des bilans apparents élevés, ne se traduisent pas nécessairement par une augmentation proportionnelle des stocks d'azote dans le sol. Ce constat pourrait indiquer un risque de pertes, notamment par lixiviation et volatilisation. En effet, la forte disponibilité d'azote dans le sol peut dépasser les besoins des plantes, entraînant des pertes significatives dans l'environnement.

#### **4.4 Adaptation du conseil en fertilisation**

Cette étude met en lumière des résultats pertinents pour ajuster les pratiques agricoles dans les systèmes prairiaux en vue d'optimiser la gestion de l'azote. Il est important de souligner que les différents types de fertilisation ont des impacts variés selon les contextes pédoclimatiques et les pratiques de gestion. Les conclusions tirées ici apportent des indications et des pistes d'amélioration qui nécessitent des ajustements.

##### **4.4.1 Optimisation de la valorisation de l'azote**

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'engrais organiques, et plus particulièrement du compost, permet une meilleure valorisation de l'azote sur le long terme. Le compost libère progressivement l'azote au fur et à mesure de sa minéralisation, ce qui

permet aux plantes de bénéficier d'un apport plus régulier, et de réduire les risques de pertes par volatilisation ou par lixiviation. Il semble que la fertilisation organique soit particulièrement avantageuse pour les sols à faible teneur en MO, car elle contribue à remonter les niveaux de teneur en MO, et donc à augmenter les sites de fixation des cations sur la CEC (Julien et al. 2023).

Également, les niveaux de pH atteints lors d'une fertilisation organique sont favorables à une bonne croissance des prairies, et favorisent une bonne assimilation des engrais apportés. Ce sont également des niveaux de pH favorables à l'implantation de légumineuses (6 à 6,5) dans les prairies (Protin et al. 2016). Les légumineuses sont des espèces peu présentes dans les prairies réunionnaises, malgré leur intérêt en termes de nutrition azotée, notamment en raison des pH des sols défavorables.

La fertilisation mixte, combinant des apports organiques et minéraux, apparaît comme une solution équilibrée, particulièrement adaptée aux conditions locales. Ce type de fertilisation permet de neutraliser l'effet acidifiant des engrais minéraux sur le sol, tout en assurant une bonne disponibilité de l'azote pour les plantes à court et à long terme. Grâce à cette combinaison, les engrais organiques apportent une libération progressive de l'azote, tandis que les engrais minéraux fournissent un apport immédiat pour soutenir les besoins des cultures pendant les périodes de forte croissance (Chen et al. 2021).

Il est cependant nécessaire d'adapter les doses d'apports aux besoins des cultures et aux caractéristiques des sols pour éviter un excès d'azote qui pourrait entraîner des pertes dans le système. Cette étude présente des doses particulièrement élevées par rapport à celles habituellement appliquées (Communication interne). Il serait pertinent d'étudier la valorisation de l'azote dans les prairies par une fertilisation raisonnée afin d'obtenir des données de référence applicables chez les agriculteurs (Ladha et al. en 2003).

#### **4.4.2 Impact des conditions climatiques**

Les conditions climatiques jouent un rôle important dans la valorisation de l'azote, en influençant directement le processus de minéralisation et les pertes d'azote. Dans les zones où la pluviométrie est élevée (Haut de l'île, région Est notamment), les risques de lixiviation des engrais minéraux augmentent considérablement (Penel, Godefroy, Lassoudiere 1982). L'azote apporté par ces engrais peut être rapidement lixivié dans les couches profondes du sol avant même d'être assimilé par les plantes. Cela constitue une perte économique pour l'agriculteur et un risque de pollution pour les ressources en eau. Dans ces conditions, il est fortement recommandé de limiter les apports d'engrais minéraux et de privilégier les fertilisants organiques, qui libèrent l'azote plus lentement grâce au processus de minéralisation (Maltas, Charles, et al. 2012).

#### **4.4.3 Suivi des pratiques de fertilisation**

Il est essentiel que les agriculteurs adoptent une approche raisonnée de la fertilisation en tenant compte des spécificités de leur sol, des conditions climatiques et des besoins nutritionnels de leurs cultures. Un suivi fréquent et rigoureux des propriétés du sol est indispensable pour garantir une gestion optimale de la fertilisation. Également, un suivi des indicateurs de la valorisation de l'azote par le fourrage, tels que le CAU ou l'iNN permettrait de mieux raisonner l'utilisation de l'azote.

Une fertilisation raisonnée, qui repose sur un suivi rigoureux des propriétés des sols et une adaptation des pratiques en temps réel, permettra non seulement d'améliorer les rendements des prairies, mais aussi de réduire les coûts de production en optimisant les apports. De plus, cette approche minimise les risques environnementaux associés aux pertes d'azote, que ce soit par lixiviation ou volatilisation, et contribue ainsi à une gestion plus durable de la fertilisation. L'ARP a notamment renforcé depuis quelques années le suivi des pratiques de fertilisation auprès des agriculteurs, en mettant en place différents outils : des fiches techniques, un OAD de plan de fertilisation et des suivis de l'iNN. Également, un travail conjoint de l'ARP avec le Cirad et l'Institut de l'Élevage (Idele) est

mené pour améliorer les connaissances et les outils de pilotage de la fertilisation des prairies.



## CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif de comparer sous l'angle de la valorisation de l'azote différents types de fertilisation en climat tropical. Parallèlement, il s'agissait de déterminer si de nouveaux éléments pertinents permettait de fournir de nouvelles références spécifiques pour la gestion des systèmes prairiaux dans des conditions tropicales. Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie employée s'est structurée en plusieurs étapes : une phase de recherche bibliographique permettant de cerner les enjeux liés à la fertilisation à La Réunion, suivie d'une analyse approfondie des données expérimentales, puis d'une comparaison avec des références locales issues de la littérature scientifique et d'études menées par l'IRAT/Cirad.

Les principaux résultats montrent que (i) l'utilisation des engrais minéraux conduit à une acidification progressive des sols, ce qui peut avoir un impact négatif sur leur valorisation à long terme, (ii) la fertilisation organique, notamment avec du compost, permet une meilleure valorisation de l'azote sur le long terme, en apportant une libération progressive des nutriments, tout en améliorant la structure et la fertilité des sols et (iii) une fertilisation mixte, combinant des apports minéraux et organiques permet d'assurer un apport immédiat en azote grâce aux engrais minéraux et une bonne valorisation sur le long terme grâce aux engrais organiques.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons préconiser l'usage des engrais organiques, en particulier du compost, comme fertilisants dans les systèmes prairiaux, car ils valorisent mieux l'azote et améliorent les propriétés des sols. Les engrais minéraux, bien que fournissant une réponse rapide aux besoins en nutriments des cultures, doivent être utilisés de manière complémentaire et modérée, en tenant compte des phases de croissance des plantes et des risques environnementaux tels que la lixiviation. Il est crucial de mettre en place un suivi régulier des propriétés des sols, notamment en ce qui concerne le pH, la teneur en MO et les stocks d'azote. Cela permettra d'adapter plus précisément les pratiques de fertilisation en fonction de la disponibilité en nutriments dans le sol et des besoins spécifiques des cultures.

Il serait pertinent de poursuivre ces recherches en se concentrant désormais sur l'impact des conditions climatiques. Le climat joue un rôle clé dans la valorisation de l'azote et dans l'efficacité des différentes stratégies de fertilisation. Une meilleure compréhension des interactions entre climat, fertilisation et sol permettrait d'affiner les recommandations de fertilisation. En prenant en compte des paramètres tels que la pluviométrie ou la température, les agriculteurs pourraient ajuster leurs pratiques pour maximiser la valorisation de l'azote en fonction des variations climatiques. Cela permettrait d'améliorer encore davantage les rendements tout en réduisant l'impact environnemental, garantissant ainsi une gestion plus durable des ressources en climat tropical.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDELAZIZ, Mimouni, WIFAYA, Ahmed, MOKRINI, Fouad, BOUHARROUD, Rachid, YOUSSEF, Karra et FOUAD, Elame, 2019. Bilan apparent d'azote à l'échelle de différents types d'exploitations agricoles de la région du Souss-Massa. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. 27 septembre 2019. Vol. 7, n° 4, pp. 534-538.

ACHARD, Pascale, 2020a. *La production fourragère à la Réunion* [en ligne]. [Consulté le 9 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://afpf-asso.fr/actualite/fiches-production-et-consommation-fourragere-a-la-reunion>

ACHARD, Pascale, 2020b. *La consommation des fourrages à la Réunion* [en ligne]. [Consulté le 9 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://afpf-asso.fr/actualite/fiches-production-et-consommation-fourragere-a-la-reunion>

AGRESTE, 2021a. *Fiche filière - filière bovin lait* [en ligne]. Saint-Denis. [Consulté le 19 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20210623\\_Fiche\\_Filiere\\_lait\\_cle05532b.pdf](https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20210623_Fiche_Filiere_lait_cle05532b.pdf)

AGRESTE, 2021b. *Fiche filière - filière viande bovine* [en ligne]. Saint-Denis. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/202100617\\_Filiere\\_bovine\\_cle811591.pdf](https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/202100617_Filiere_bovine_cle811591.pdf)

AGRESTE, 2021c. *Fiche filière - Filières ovines et caprines* [en ligne]. Saint-Denis. [Consulté le 22 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20210823\\_Fiche\\_Filiere\\_ovin\\_caprin\\_cle81129f.pdf](https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20210823_Fiche_Filiere_ovin_caprin_cle81129f.pdf)

AGRO TRANSFERT, 2017. *Limiter les pertes d'azote par lixiviation pour en disposer pour les cultures suivantes* [en ligne]. Agro Transfert. [Consulté le 5 avril 2024]. Agri-Bio : de la connaissance à la performance. Disponible à l'adresse : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2017/01/Fiche-pertes.pdf>

APHALO, Pedro J., SLOWIKOWSKI, Kamil et MOUKSASSI, Samer, 2024. *ggpmisc: Miscellaneous Extensions to « ggplot2 »* [en ligne]. 28 juin 2024. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/ggpmisc/index.html>

AVERNA, Jeanne, MIRALLES-BRUNEAU, Maeva, PELLIER, Yoann et TILLARD, Emmanuel, 2020. Un observatoire de la pousse l'herbe à la Réunion pour accompagner les éleveurs dans leur gestion de la ressource fourragère dans un contexte de changement climatique. *Produire des fourrages dans un contexte de changements climatiques*. [en ligne]. 2020. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/600071/>

BAIZE, Denis, 2016. Du taux de carbone à celui de matières organiques dans les sols — Les Mots de l'agronomie. [en ligne]. 2016. [Consulté le 16 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : [https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Du\\_taux\\_de\\_carbone\\_%C3%A0\\_celui\\_de\\_mati%C3%A8res\\_organiques\\_dans\\_les\\_sols](https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Du_taux_de_carbone_%C3%A0_celui_de_mati%C3%A8res_organiques_dans_les_sols)

BENOIT, Guillaume, 1991. Les Hauts de la Réunion : la difficile mise en valeur d'une montagne tropicale. *Bois et Forêt des Tropiques*. 1991. N° 229, pp. 43-50.

BENOIT, Marie, 2014. *Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières* [en ligne]. Paris : Université Pierre et Marie Curie. [Consulté le 5 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-01158890>

BIGOT, Alain, 1991. *Cinétique de la productivité et de la valeur alimentaire du Kikuyu en fonction de la saison dans les Hauts de Mont Vert* [en ligne]. [Consulté le 26 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/304081/1/ID304081.pdf>

BLANFORT, Vincent, 1994. *Les pâturages d'altitude à la Réunion - Etude des écosystèmes herbagers en relation avec les pratiques d'exploitation pour une gestion durable des systèmes fourragers* [en ligne]. 1994. [Consulté le 29 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/324181/>

BLANFORT, Vincent, 1998. *Agroécologie des pâturages d'altitude à l'île de la Réunion*. Montpellier : CIRAD-EMVT.

BLANFORT, Vincent et THOMAS, Patrick, 1996. *Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement - bilan de deux années de suivi en exploitations*. Montpellier : CIRAD-EMVT.

BRGM, 2020. La Réunion | BRGM. [en ligne]. 2020. [Consulté le 17 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.brgm.fr/fr/implantation-regionale/reunion>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MARNE, 2021. *Méthodes de références de calcul de la dose d'azote prévisionnelle*. 2021.

CHEN, Mengmeng, ZHANG, Shirong, LIU, Lu, WU, Lipeng et DING, Xiaodong, 2021. Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil. *Soil and Tillage Research*. 1 août 2021. Vol. 212, pp. 105060. DOI 10.1016/j.still.2021.105060.

CHEVALIER, Juliette, 2017. Contribution à l'analyse du cycle de l'azote en prairie permanente en réponse au pâturage et à la fertilisation. [en ligne]. 2017. [Consulté le 28 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02789100>

CHOISIS, J. P., GRIMAUD, P. et LASSALLE, C., 2009. Pratiques d'élevage dans les exploitations bovines allaitantes conduites sur pâturage dans les Hauts de la Réunion. *INRAE Productions Animales*. 20 avril 2009. Vol. 22, n° 4, pp. 345-354. DOI 10.20870/productions-animales.2009.22.4.3359.

CHOISIS, Jean Philippe, LASSALLE, C, MESSAD, Samir et GRIMAUD, Patrice, 2008. Performances zootechniques et pratiques des éleveurs en élevage bovin naisseur à la Réunion. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*. 2008. N° 61, pp. 89-96.

CIRAD, 2004. Protocole essai ferti. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 2004.

CIRAD, 2008. Dispositif « Fertilisation raisonnée des prairies ». . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 2008.

CIRAD, 2021. Notre histoire. *CIRAD* [en ligne]. 7 mai 2021. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.cirad.fr/nous-connaître/notre-histoire>

CIRAD, 2022a. Mission et stratégie. *CIRAD* [en ligne]. 2 février 2022. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.cirad.fr/nous-connaître/mission-et-strategie>

CIRAD, 2022b. Présentation / L'unité - Unité mixte de recherche Système d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET). [en ligne]. 2022. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://umr-selmet.cirad.fr/l-unite/presentation>

CIRAD, 2022c. Axes de recherche / ARE - Unité mixte de recherche Système d'élevage méditerranéens et tropicaux (SELMET). [en ligne]. 2022. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://umr-selmet.cirad.fr/l-unite/organisation/are/axes-de-recherche>

CIRAD, 2024. Zonage prairies pâturées La Réunion. [en ligne]. 2024. [Consulté le 20 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://aware.cirad.fr/maps/?limit=20&offset=0&category\\_\\_identifiant\\_\\_in=farming](https://aware.cirad.fr/maps/?limit=20&offset=0&category__identifiant__in=farming)

CIRAD, EDE, SICALAIT et SIER, 1988a. Elevage mieux - Fiche n°1 - Fertilisation des prairies. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1988.

CIRAD, EDE, SICALAIT et SIER, 1988b. Elevage mieux - Fiche n°2 - Plan de fumure des prairies - niveau de production intensif. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1988.

CIRAD, EDE, SICALAIT et SIER, 1988c. Elevage mieux - Fiche n°3 - Plan de fumure des prairies - niveau de production semi-intensif. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1988.

CIRAD, EDE, SICALAIT et SIER, 1988d. Elevage mieux - Fiche n°4 - Fumures de correction des prairies (Ca, P, K). . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1988.

CONGREVES, Kate A., OTCHERE, Olivia, FERLAND, Daphnée, FARZADFAR, Soudeh, WILLIAMS, Shanay et ARCAND, Melissa M., 2021. Nitrogen Use Efficiency Definitions of Today and Tomorrow. *Frontiers in Plant Science* [en ligne]. 4 juin 2021. Vol. 12. [Consulté le 12 juillet 2024]. DOI 10.3389/fpls.2021.637108. Disponible à l'adresse : <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.637108/full>

COSTEA, 2013. *Chloris gayana* [en ligne]. 2013. [Consulté le 24 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/Cusman1/r/Poaceae\\_Chloris\\_gayana\\_77627.html](http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/Cusman1/r/Poaceae_Chloris_gayana_77627.html)

CRUZ, Pablo, JOUANY, Claire, THEAU, J-P, PETIBON, P, LECLoux, E et DURU, Michel, 2006. L'utilisation de l'indice de nutrition azotée en prairies naturelles avec présence de légumineuses. *Fourrages*. 2006. N° 187, pp. 369-376.

CZARNECKI, S. et DÜRING, R.-A., 2015. Influence of long-term mineral fertilization on metal contents and properties of soil samples taken from different locations in Hesse, Germany. *SOIL*. 6 janvier 2015. Vol. 1, n° 1, pp. 23-33. DOI 10.5194/soil-1-23-2015.

DAAF DE LA RÉUNION, 2024a. Les filières animales à la Réunion. *DAAF de la Réunion* [en ligne]. 2024. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/les-filières-animales-a-la-reunion-a3513.html>

DAAF DE LA RÉUNION, 2024b. *Présentation de La Réunion* [en ligne]. Saint-Denis : DAAF. [Consulté le 18 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/presentation-de-la-reunion-a3354.html>

DAHLIN, Sigrun, KIRCHMANN, Holger, KÄTTERER, Thomas, GUNNARSSON, Sophie et BERGSTRÖM, Lars, 2005. Possibilities for improving nitrogen use from organic materials in agricultural cropping systems. *Ambio*. juin 2005. Vol. 34, n° 4-5, pp. 288-295. DOI 10.1639/0044-7447(2005)034[0288:pfinuo]2.0.co;2.

DARRAS, Adèle, BOSC, Pierre-Marie et MIALET-SERRA, Isabelle, 2021. *L'agriculture de La Réunion : évolution, chiffres clés et défis*. Saint-Denis : CIRAD.

DEACON, Jim, 2024. The Microbial World : The Nitrogen cycle and Nitrogen Fixation. [en ligne]. 2024. [Consulté le 4 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <http://archive.bio.ed.ac.uk/jdeacon/microbes/nitrogen.htm>

DEROCHE, Marie-Esther, 1983. *Relations entre la photosynthèse et l'assimilation de l'azote* [en ligne]. Versailles : INRA. [Consulté le 28 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/01811789.1983.10826592?needAccess=true>

DOBIGNARD, Emilie, 2011. *Étude de faisabilité de la mise en place d'un modèle d'estimation du rendement fourrager des prairies d'élevage bovin à la Réunion par télédétection* [en ligne]. thesis. Université Toulouse III Paul Sabatier. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/607021/>

DURU, Michel, CRUZ, Pablo, JOUANY, Claire et THEAU, J-P, 2020. Intérêt, pour le conseil, du diagnostic de nutrition azotée de prairies de graminées par analyse de plante. *Fourrages*. 2020. N° 164, pp. 381-395.

EDOUARD-RAMBAUT, Louis-Axel, 2023. *Impact agronomique et environnemental d'une fertilisation long terme - mixte minérale et organique - sous prairies tropicales le long d'un gradient altitudinal* [en ligne]. thesis. Université de Montpellier. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/604541/La Réunion>

EDOUARD-RAMBAUT, Louis-Axel, TILLARD, Emmanuel, VAYSSIERES, Jonathan, LECOMTE, Philippe et SALGADO, Paulo, 2022. Trade-off between short and long-term effects of mineral, organic or mixed mineral-organic fertilisation on grass yield of tropical permanent grassland - Agritrop. [en ligne]. 2022. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/602938/>

FRITZ, J, 1967. Essai de fertilisation azotée de *Chloris gayana* aux colimaçons. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1967.

FRITZ, J, 1972. Etude de la dynamique de l'azote en sol nu à la Réunion. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1972.

GEISSELER, Daniel et SCOW, Kate M., 2014. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 1 août 2014. Vol. 75, pp. 54-63. DOI 10.1016/j.soilbio.2014.03.023.

GIBAN, Martine, 2004. Volatilisation ammoniacale au champ. *Perspectives agricoles* [en ligne]. 2004. N° 302. [Consulté le 5 avril 2024]. Disponible à l'adresse : [https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported\\_files/302\\_7604674726859497892.pdf](https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/302_7604674726859497892.pdf)

GIOACCHINI, P., BALDI, E., MONTECCHIO, D., MAZZON, M., QUARTIERI, M., TOSELLI, M. et MARZADORI, C., 2024. Effect of long-term compost fertilization on the distribution of organic carbon and nitrogen in soil aggregates. *CATENA*. 1 mai 2024. Vol. 240, pp. 107968. DOI 10.1016/j.catena.2024.107968.

GOYAL, Sneh, CHANDER, K, MUNDRA, M.C. et KAPPOOR, K.K., 1999. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biol Fertil Soil*. 1999. N° 29, pp. 196-200.

GRIMAUD, P, THOMAS, P, BLANFORT, V et LECOMTE, P, 2007. Herbage mineral nutrition indexed as tools for rapid mineral status diagnosis in tropical pastures. *African Crop Science Journal* [en ligne]. 2007. Vol. 15, n° 3. [Consulté le 12 juillet 2024]. DOI 10.4314/acsj.v15i3.54423. Disponible à l'adresse : <http://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/54423>

GRIMAUD, Patrice, 2007. L'élevage du cerf sur l'île de la Réunion voie de diversification d'une agriculture insulaire et enjeu de coopération régionale. *Cahiers Agricultures*. mars 2007. Vol. 16, n° 2, pp. 111-118. DOI 10.1684/agr.2007.0083.

HARTER, Robert, 2007. LES SOLS ACIDES DES TROPIQUES. *Les notes techniques de ECHO*. 2007.

HOFFMANN, M. et JOHNSON, H., 1999. A method for assessing generalised nitrogen leaching estimates for agricultural land. *Environmental Modeling & Assessment*. 1 janvier 1999. Vol. 4, n° 1, pp. 35-44. DOI 10.1023/A:1019087511708.

HOTHORN, Torsten, BRETZ, Frank, WESTFALL, Peter, HEIBERGER, Richard M., SCHUETZENMEISTER, Andre et SCHEIBE, Susan, 2024. *multcomp: Simultaneous Inference in General Parametric Models* [en ligne]. 18 juillet 2024. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/index.html>

IDELE, 2018. Les clés pour une diversification caprine à la Réunion. [en ligne]. 2018. [Consulté le 22 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [https://idele.fr/reseaux-de-references-en-elevage-dom/?eID=cmis\\_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F4fb3ddb2-37ae-4244-91ed-7608c3c02c3e&cHash=ad66ed1baf28714d45035b87fed57a8](https://idele.fr/reseaux-de-references-en-elevage-dom/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F4fb3ddb2-37ae-4244-91ed-7608c3c02c3e&cHash=ad66ed1baf28714d45035b87fed57a8)

INSEE, 2010. *1.1 - LA RÉUNION*. Saint-Denis : INSEE.

INSEE, 2014. *TER Réunion - 11.2.1 Utilisation du sol et élevage - Tableau économique de La Réunion | Insee* [en ligne]. Saint-Denis : INSEE. [Consulté le 18 juin 2024]. TER 2010. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1378811>

IRAT, 1968. Essai de fertilisation azotée de *Pennisetum purpureum*. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1968.

IRAT, 1969a. Essai de fertilisation azotée de *Chloris gayana* à la station de Mon Caprice. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1969.

IRAT, 1969b. Fertilisation du pâturage naturel des Hauts sous le vent. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1969.

IRAT, 1970. Etude de la forme d'azote sous laquelle la fumure azotée est apportée. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1970.

IRAT, 1972a. Essai d'apport retardé de l'azote sur *Chloris gayana* Colimaçons. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1972.

IRAT, 1972b. Essai d'apport retardé de l'azote sur *Chloris gayana* Mon Caprice. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1972.

IRAT, 1975. Réponse de la fétuque Manade à différents niveaux d'azote à Colimaçons. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1975.

IRAT, 1978. Le sol et la culture - Fiche N°55. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1978.

IRAT, 1989. Fertilité des sols de la Réunion (Période 1986-1989) - Mise en évidence de la variabilité spatiale : par région, par type de sol. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1989.

JULIEN, Jean-Luc, BOURRIÉ, Guilhem, BRUAND, Ary, FELLER, Christian et MORLON, Pierre, 2023. Histoire de trois concepts du sol mal maîtrisés: le pH du sol, les cations échangeables et la capacité d'échange cationique. . 2023.

KASSAMBARA, Alboukadel, 2023. *ggpubr: « ggplot2 » Based Publication Ready Plots* [en ligne]. 10 février 2023. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/ggpubr/index.html>

KIDD, Jonathan, MANNING, Peter, SIMKIN, Janet, PEACOCK, Simon et STOCKDALE, Elizabeth, 2017. Impacts of 120 years of fertilizer addition on a temperate grassland ecosystem. SAINJU, Upendra M. (éd.), *PLOS ONE*. 28 mars 2017. Vol. 12, n° 3, pp. e0174632. DOI 10.1371/journal.pone.0174632.

LADHA, Jagdish, HILL, James, DUXBURY, John, GUPTA, Raj, BURESH, Roland, PATHAK, Dr Surendra, PADRE, Agnes et DAWE, David, 2003. Productivity Trends in Intensive Rice–Wheat Cropping Systems in Asia. In : *Improving the Productivity and Sustainability of Rice-Wheat Systems: Issues and Impacts*. ISBN 978-0-89118-150-7.

LATA, Jean-Christophe, 2011. *Interactions entre processus microbiens, cycle des nutriments et fonctionnement du couvert herbacé: cas de la nitrification dans les sols d'une savane humide de Côte d'Ivoire sous couvert à *Hyparrhenia diplandra**. [en ligne]. Paris VI : Université Pierre et Marie Curie. [Consulté le 4 avril 2024]. Disponible à l'adresse : [https://theses.hal.science/file/index/docid/576611/filename/ThA\\_se\\_JC\\_Lata\\_1999.pdf](https://theses.hal.science/file/index/docid/576611/filename/ThA_se_JC_Lata_1999.pdf)

LECOMTE, Philippe, SALGADO, Paulo, TILLARD, E, RIVIÈRE, Expedit, NABENEZA, Serge, BARBET-MASSIN, Vladimir, EMILE BIGOT, C et MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2013. *Impact agronomique de la fertilisation organique des prairies naturelles à la Réunion*.

LELEUX, Mathilde, 2016. *ETUDE PROSPECTIVE SUR LA RESSOURCE FOURRAGERE* [en ligne]. La Réunion : BRL Ingénierie. [Consulté le 14 juin 2024]. Disponible à l'adresse : [https://coatis.rita-dom.fr/osiris/files/EtudeProspectiveSurLaRessourceFourragere\\_fichier\\_ressource\\_rapport\\_fourrage\\_def\\_post\\_copil.pdf](https://coatis.rita-dom.fr/osiris/files/EtudeProspectiveSurLaRessourceFourragere_fichier_ressource_rapport_fourrage_def_post_copil.pdf)

L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER, n.d. Minéralisation et Immobilisation. *LearningApps* [en ligne]. n.d. [Consulté le 5 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://learningapps.org/display?v=p7tiko3dt16>

LOPEZ, Nina, CHOISIS, Jean Philippe, VAYSSIERES, Jonathan, DE ROMEMONT, Aurelle et FONTAINE, Olivia, 2021. *Analyse de la trajectoire d'accompagnement, par la recherche, du développement de l'élevage bovin à la Réunion*.

LORRE, Fanny, 2019. *Evaluation du disponible fourrager à l'échelle de l'île de la Réunion et levier pour une meilleure valorisation des surfaces fourragères* [en ligne]. Saint-Pierre : CIRAD. Disponible à l'adresse : [https://agritrop.cirad.fr/606964/1/Lorre\\_2019\\_DisponibleFourragerReunion.pdf](https://agritrop.cirad.fr/606964/1/Lorre_2019_DisponibleFourragerReunion.pdf)

LOYNET, G, 1976. Résultats des analyses de la matière sèche réalisées sur l'essai réponse azote sur *digitaria valida*. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 1976.

LURETTE, Amandine, MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, LORRE, Fanny, MAGNIER, Jacques, DEGENNE, Pascal, KLEINPETER, Vivien, VIGNE, Mathieu et VAYSSIÈRES, Jonathan, 2022. Modélisation spatialisée des besoins, de la production, et des flux de fourrages en vue de la création d'une filière « Fourrages » sur l'île de La Réunion. *Fourrages* [en ligne]. 2022. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [https://agritrop.cirad.fr/600935/La Réunion](https://agritrop.cirad.fr/600935/La_Réunion)

MAGNIER, Jacques, 2019. *Evaluation de la consommation fourragère à la Réunion, construction et simulation de scénarios d'organisation d'une « filière fourrage »*. Angers : ESA.

MALTAS, Alexandra, CHARLES, Raphaël, BOVET, Vincent et SOKRAT, Sinaj, 2012. Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures. *Recherche Agronomique Suisse*. 2012. N° 3, pp. 156-163.

MALTAS, Alexandra, RAPHAËL, Charles, OBERHOLZER, Hans-Rudolf, SOKRAT, Sinaj et BOVET, Vincent, 2012. Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse*. 2012. Vol. 3, n° 3, pp. 148-155.

MANDRET, Gilles, 2000. *L'élevage bovin à la Réunion - Synthèse de 15 ans de recherche*. La Réunion : CIRAD.

METEO FRANCE, 2024. CLIMAT LA REUNION par Météo-France La Réunion. [en ligne]. 2024. [Consulté le 17 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://meteofrance.re/fr/climat>

MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2012. Essai Fertilisation - Impact agronomique de la fertilisation organiques des prairies. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 2012.

MIRALLES-BRUNEAU, Maeva, 2013. Essai émission de N<sub>2</sub>O en prairie de fauche, pour différentes modalités de fertilisation, à la Réunion - Protocole expérimental. [en ligne]. 2013. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/606637/>

MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2022. Évaluation de la gamme d'exportations du phosphore des prairies réunionnaises par l'utilisation des équations de dilution en azote et phosphore. [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/604392/>

MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, BOYER, A, PELLIER, Yoann, LEGENDRE, Emmanuel et SAINT-OMER, C, 2020. Compte rendu d'essai - Essai fertilisation des prairies. . [Document interne à l'entreprise]. La Réunion. 2020.



MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, NOBILE, Cécile et BRAVIN, Matthieu, 2023. Synthèse et actualisation de l'exportation en phosphore par les prairies à la Réunion. [en ligne]. 2023. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/607234/>

MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, PIERRE, P, BOYER, A, RIVIÈRE, Expedit, DELABY, L et TILLARD, E, 2022. *Adaptation de la méthode du bilan azoté au contexte des prairies réunionnaises. Contribution à l'analyse de la fourniture d'azote des sols prairiaux à l'île de La Réunion.*

NICKRENT, 2017. *Setaria sphacelata* [en ligne]. 2017. [Consulté le 24 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/paraman1/r/Poaceae\\_Setaria\\_sphacelata\\_117950.html](http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/paraman1/r/Poaceae_Setaria_sphacelata_117950.html)

NOBILE, Cécile, MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, CONROZIER, Rémi, FEVRIER, Amélie, LEGENDRE, Emmanuel et BRAVIN, Matthieu, 2022. Raisonement de la fertilisation phosphatée : synthèse des références à La Réunion. [en ligne]. 2022. [Consulté le 25 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/604454/>

PARKER, 2023. *Cenchrus clandestinum*. [en ligne]. 2023. [Consulté le 24 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : [http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/paraman1/r/Poaceae\\_Cenchrus\\_clandestinus\\_221736.html](http://www.phytoimages.siu.edu/imgs/paraman1/r/Poaceae_Cenchrus_clandestinus_221736.html)

PENEL, J-P, GODEFROY, J et LASSOUDIÈRE, A, 1982. Evolution saisonnière de l'azote minéral de quelques sols tourbeux tropicaux sous culture bananière. *Fruits*. 1982. Vol. 37, n° 10, pp. 581-593.

POSS, R, 1993. *La lixiviation, une cause majeure de l'acidification des sols* [en ligne]. Canberra : ORSTOM. [Consulté le 5 avril 2024]. Disponible à l'adresse : [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/griseli1/010018623.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/griseli1/010018623.pdf)

POUZET, D, CHABALIER, P-F et LEGIER, P, 1997. *Fertilité des sols et conseil en fertilisation - Système expert d'interprétation des analyses chimiques des sols réunionnais*. Montpellier : CIRAD-CA.

PROTIN, P-V, LABREUCHE, J, GUIBERT, S, LE PICHON, D, BOUET, S et ROUVREAU, P, 2016. L'implantation des légumineuses fourragères et prairiales : une étape cruciale. *Fourrages*. 2016. N° 226, pp. 111-119.

R CORE TEAM, 2024. R: The R Project for Statistical Computing. [en ligne]. 2024. [Consulté le 26 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.r-project.org/>

RECOUS, CHABBI, CHENU, THIÉBEAU et VERTES, 2015. Fertilité des sols et minéralisation de l'azote : sous l'influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués ? *Association Francophone pour les Prairies et Fourrages* [en ligne]. 2015. [Consulté le 5 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://afpf-asso.fr/article/la-fertilite-du-sol-dans-les-systemes-fourragers-1ere-partie?a=2050>

ROPER, M. M. et GUPTA, V. V. S. R., 2016. Enhancing Non-symbiotic N Fixation in Agriculture. *The Open Agriculture Journal* [en ligne]. 13 mai 2016. Vol. 10, n° 1. [Consulté le 4 avril 2024]. DOI 10.2174/1874331501610010007. Disponible à l'adresse : <https://openagriculturejournal.com/VOLUME/10/PAGE/7/FULLTEXT/#sec4>

SCHERRER, Lucie, 2017. *Caractérisation des élevages bovins allaitants réunionnais par leurs pratiques et stratégies fourragères en vue d'améliorer le suivi et le conseil de ces exploitations* [en ligne]. [Consulté le 10 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/606822/1/SCHERRER%20Lucie%20P103%20MFE%202017.pdf>

SHI, Ting-Shuai, COLLINS, Scott L., YU, Kailiang, PEÑUELAS, Josep, SARDANS, Jordi, LI, Hailing et YE, Jian-Sheng, 2024. A global meta-analysis on the effects of organic and inorganic fertilization on grasslands and croplands. *Nature Communications*. 22 avril 2024. Vol. 15, n° 1, pp. 3411. DOI 10.1038/s41467-024-47829-w.

SIERRA, Jorge et TOURNEBIZE, Régis, 2019. 9 : *Fixation symbiotique d'azote par les légumineuses en association. Résultats obtenus en Guadeloupe*. [en ligne]. Other. Inconnu. [Consulté le 4 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-02373208>

SOLESSE, Raphaël et MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2022a. Étalonnage de l'indice de nutrition potassique par spectroscopie proche infrarouge. [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/602353/>

SOLESSE, Raphaël et MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2022b. Étalonnage de l'indice de nutrition phosphore par spectroscopie proche infrarouge. [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/602352/>

SOLESSE, Raphaël et MIRALLES-BRUNEAU, Maëva, 2022c. Étalonnage de l'indice de nutrition azotée par spectroscopie proche infrarouge. [en ligne]. 2022. [Consulté le 18 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://agritrop.cirad.fr/601833/>

SPIESS, Ernst, PRASUHN, Volker et STAUFFER, Werner, 2011. Influence de la fumure organique et minérale sur le lessivage des éléments nutritifs. *Recherche Agronomique Suisse*. 2011. Vol. 2, n° 9, pp. 376-381.

TEFFAHI, Abderrahim et NOUN, Aimen, 2021. *Raisonnement de la fertilisation azotée phospho-potassique (NPK) de la culture de blé dur (Triticum durum Desf.) (variété vitron) dans la région de Guelma*. Université 8 Mai 1945 Guelma : Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la terre et de l'Univers.

THOMAS, Patrick, BLANFORT, Vincent, MICHON, Alex et GRIMAUD, Patrice, 2001. *Le suivi de gestion raisonnée des prairies à la Réunion*. Ile Maurice : AMAS.

THOMAS, Patrick, GRIMAUD, Patrice, MICHON, Alex et BARBET-MASSIN, Vladimir, 2004. *Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion*. Ile de la Reunion : CIRAD - EMVT.

TRIBERTI, Loretta, NASTRI, Anna, GIORDANI, Gianni, COMELLINI, Franca, BALDONI, Guido et TODERI, Giovanni, 2008. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? *European Journal of Agronomy*. 2008. N° 29, pp. 13-20.

VILLARET, A, 2022. *Référentiel technico-économique systèmes bovins viande - conjoncture 2022*.

WEI, Taiyun, SIMKO, Viliam, LEVY, Michael, XIE, Yihui, JIN, Yan, ZEMLA, Jeff, FREIDANK, Moritz, CAI, Jun et PROTIVINSKY, Tomas, 2024. *corrplot: Visualization of a Correlation Matrix* [en ligne]. 17 août 2024. [Consulté le 26 septembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/index.html>

WICKHAM, Hadley, CHANG, Winston, HENRY, Lionel, PEDERSEN, Thomas Lin, TAKAHASHI, Kohske, WILKE, Claus, WOO, Kara, YUTANI, Hiroaki, DUNNINGTON, Dewey, BRAND, Teun van den, POSIT et PBC, 2024. *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics* [en ligne]. 23 avril 2024. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>

WICKHAM, Hadley, FRANÇOIS, Romain, HENRY, Lionel, MÜLLER, Kirill, VAUGHAN, Davis, SOFTWARE, Posit et PBC, 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* [en ligne]. 17 novembre 2023. [Consulté le 8 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>

WICKHAM, Hadley, PEDERSEN, Thomas Lin, SEIDEL, Dana, POSIT et PBC, 2023. *scales: Scale Functions for Visualization* [en ligne]. 28 novembre 2023. [Consulté le 29 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://cran.r-project.org/web/packages/scales/index.html>

YANG, Rong, SU, Yong-zhong, WANG, Tao et YANG, Qin, 2016. Effect of chemical and organic fertilization on soil carbon and nitrogen accumulation in a newly cultivated farmland. *Journal of Integrative Agriculture*. 1 mars 2016. Vol. 15, n° 3, pp. 658-666. DOI 10.1016/S2095-3119(15)61107-8.

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de la localisation des élevages à La Réunion, selon le type d'élevage. Chaque point représente une exploitation agricole (Achard, 2020b). .....	5
Figure 2 : Carte de la localisation des surfaces fourragères à La Réunion en 2017. Les pourcentages indiquent la part des surfaces fourragères selon les quatre points cardinaux (Cirad 2024).....	8
Figure 3 : Schéma de la répartition des espèces de prairies selon le gradient altitudinal et l'exposition aux vents dominants (Mandret, 2000; Thomas et al., 2004). .....	9
Figure 4 : Schéma du cycle de l'azote à l'échelle d'une prairie. Les transferts d'azote sont représentés en bleu, les pertes d'azote en rouge, les flux liés aux plantes en vert, les flux associés à l'élevage en marron, et ceux liés aux engrais en violet (Chevalier, 2017).....	13
Figure 5 : Carte de la localisation géographique des trois sites expérimentaux à La Réunion (Cirad 2008).....	17
Figure 6 : Disposition des parcelles expérimentales selon les blocs (B1, B2, B3) et les traitements appliqués. Chaque bloc contient 10 parcelles numérotées (P1 à P30) (Miralles-Bruneau, 2012). .....	19
Figure 7 : Régression linéaire $\ln(\text{pH} \sim \text{CEC})$ représentant la relation entre le pH et la capacité d'échange cationique (en meq/100g) pour le site de la Sicalait sur la période 2004-2018 .....	26
Figure 8 : Régressions linéaires $\ln(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	27
Figure 9 : Régression linéaire $\ln(\text{MO} \sim \text{CEC})$ représentant la relation entre la teneur en MO (en %) et la capacité d'échange cationique (en meq/100g) pour le site de la Sicalait sur la période 2004-2018.....	29
Figure 10 : Régressions linéaires $\ln(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	30
Figure 11 : Régressions linéaires $\ln(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonnes d'azote.ha <sup>-1</sup> ) de l'horizon 0-15 cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	32
Figure 12 : Relation entre le rendement (en tonne/ha) et les exportations en azote (en kg d'azote/ha) sur la période 2004-2019 sur le site de la Sicalait.....	34
Figure 13 : Régressions linéaires $\ln(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par coupe par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2004-2019 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type. ....	35
Figure 14 : Régressions linéaires $\ln(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par an par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type. ....	37
Figure 15 : Régressions linéaires $\ln(\text{BNA} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution du bilan azoté apparent (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par an sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon	

le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.....	39
Figure 16 : Régressions linéaires $\text{Im}(t\text{Nengrais} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution du tNengrais (en %) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.....	42
Figure 17 : Régressions linéaires $\text{Im}(i\text{NN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'iNN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta\text{INN}$ ) sur la période 2004-2019 sur le site de la Sicalait selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	44
Figure 18 : <i>Chloris gayana</i> (Costea, 2013).....	73
Figure 19 : <i>Sétaria sphacelata</i> (Nickrent, 2017) .....	73
Figure 20 : <i>Cenchrus clandestinus</i> (Parker, 2023) .....	74
Figure 21 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	84
Figure 22 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	85
Figure 23 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonne d'azote/ha) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	86
Figure 24 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote/ha) par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	87
Figure 25 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{BNA} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution bilan azoté apparent (en kg d'azote/ha) sur la période 2005-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.....	88
Figure 26 : Régressions linéaires $\text{Im}(t\text{Nengrais} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution du tNengrais (en %) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes. ....	89
Figure 27 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{INN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'INN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta\text{INN}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	90
Figure 28 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type. ....	91
Figure 29 : Régressions linéaires $\text{Im}(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	92

Figure 30 : Régressions linéaires $lm(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonne d'azote/ha) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	93
Figure 31 : Régressions linéaires $lm(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote/ha) par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	94
Figure 32 : Régressions linéaires $lm(\text{BNA} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution bilan azoté apparent (en kg d'azote/ha) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes. ....	95
Figure 33 : Régressions linéaires $lm(\text{tNengrais} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution du tNengrais (en %) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.....	96
Figure 34 : Régressions linéaires $lm(\text{INN} \sim \text{Year})$ représentant l'évolution de la différence d'INN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta\text{INN}$ ) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.....	97

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Consommation annuelle en fourrages (en tMS) selon le type de fourrage et d'élevage à La Réunion en 2019 (Magnier 2019).....	7
Tableau 2 : Production de fourrage (en tMS) à La Réunion selon le type de fourrage, et part de la production en été et en hiver (en %) en 2019 (Achard 2020a).....	10
Tableau 3 : Gamme de variation des rendements valorisés et potentiels pour les prairies de Chloris et de Kikuyu selon les quatre points cardinaux (Leleux 2016).....	11
Tableau 4 : Modalité de fertilisation des traitements et quantification des doses d'azote, de phosphore et de potassium théoriques (Cirad 2004). Les apports théoriques d'azote ont été estimés par P. LECOMTE. Les apports théoriques de phosphore et de potassium ont été estimés sur la base du guide de fertilisation organique à La Réunion. ....	18
Tableau 5 : Mesure de densité apparente (en g.cm <sup>-3</sup> ) sur les trois sites expérimentaux (Plaine des Cafres = Sicalait, Mont-Vert = Sedaël, Saint-Joseph = Lycée). ....	20
Tableau 6 : pH de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	25
Tableau 7 : Teneur en MO (en %) de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	28
Tableau 8 : Stock d'azote (en tonnes d'azote.ha <sup>-1</sup> ) de l'horizon 0-15 cm du sol (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey...	31
Tableau 9 : Exportations en azote (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par coupe (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2019 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	33
Tableau 10 : Test de corrélation de Pearson entre les exportations en azote et différentes variables .....	34
Tableau 11 : Exportations en azote (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par an (moyenne ± écart-type) sur la période 2005-2018 (les années 2016 et 2017 sont exclues) pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.....	36
Tableau 12 : Bilan azoté apparent (en kg d'azote.ha <sup>-1</sup> ) par an (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2019 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	38
Tableau 13 : CAU (en %) par an (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	40
Tableau 14 : tNengrais (en %) par an (moyenne ± écart-type) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey. ....	41
Tableau 15 : Moyenne et écart-type de l'iNN (en %) sur la période 2004-2018 pour le site de la Sicalait pour les traitements C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2 et Témoin. Les	

lettres indiquent les différences statistiques entre les traitements après la réalisation d'une ANOVA et d'un test post-hoc de Tukey.....	43
Tableau 16 : Exportations d'azote selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b).....	77
Tableau 17 : Exportation en azote sur prairie de Pangola pour différents apports d'azote (Loynet 1976) .....	77
Tableau 18 : Exportation en azote sur prairie de Fétuque élevée pour différents apports d'azote (IRAT 1975).....	78
Tableau 19 : Exportation en azote sur prairie tempérée (Ray-Grass, Brome, Dactyle, Trèfle Blanc) pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020) .....	78
Tableau 20 : Bilan azoté apparent selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b).....	79
Tableau 21 : Bilan azoté apparent sur prairie de Pangola selon différents apports d'azote (Loynet 1976) .....	79
Tableau 22 : Bilan azoté apparent sur prairie de Fétuque élevée selon différents apports d'azote (IRAT 1975).....	80
Tableau 23 : Bilan azoté apparent sur prairie tempérée pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020).....	80
Tableau 24 : CAU et $tN_{engrais}$ selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b).....	81
Tableau 25 : CAU et $tN_{engrais}$ sur prairie de Pangola selon différents apports d'azote (Loynet 1976) .....	81
Tableau 26 : CAU et $tN_{engrais}$ sur prairie de Fétuque élevée selon différents apports d'azote (IRAT 1975).....	82
Tableau 27 : Bilan azoté apparent sur prairie tempérée pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020).....	82
Tableau 28 : iNN selon deux modalités de fertilisation azotée sur Houlque laineuse et mélange Dactyle – Ray Grass en saison sèche et humide (Blanfort 1994) .....	83
Tableau 29 : Valeurs d'iNN pour trois types de prairies sur trois ans, par saison (Grimaud et al. 2007).....	83
Tableau 30 : Valeurs d'iNN pour différents fertilisants sur une prairie tempérée .....	83

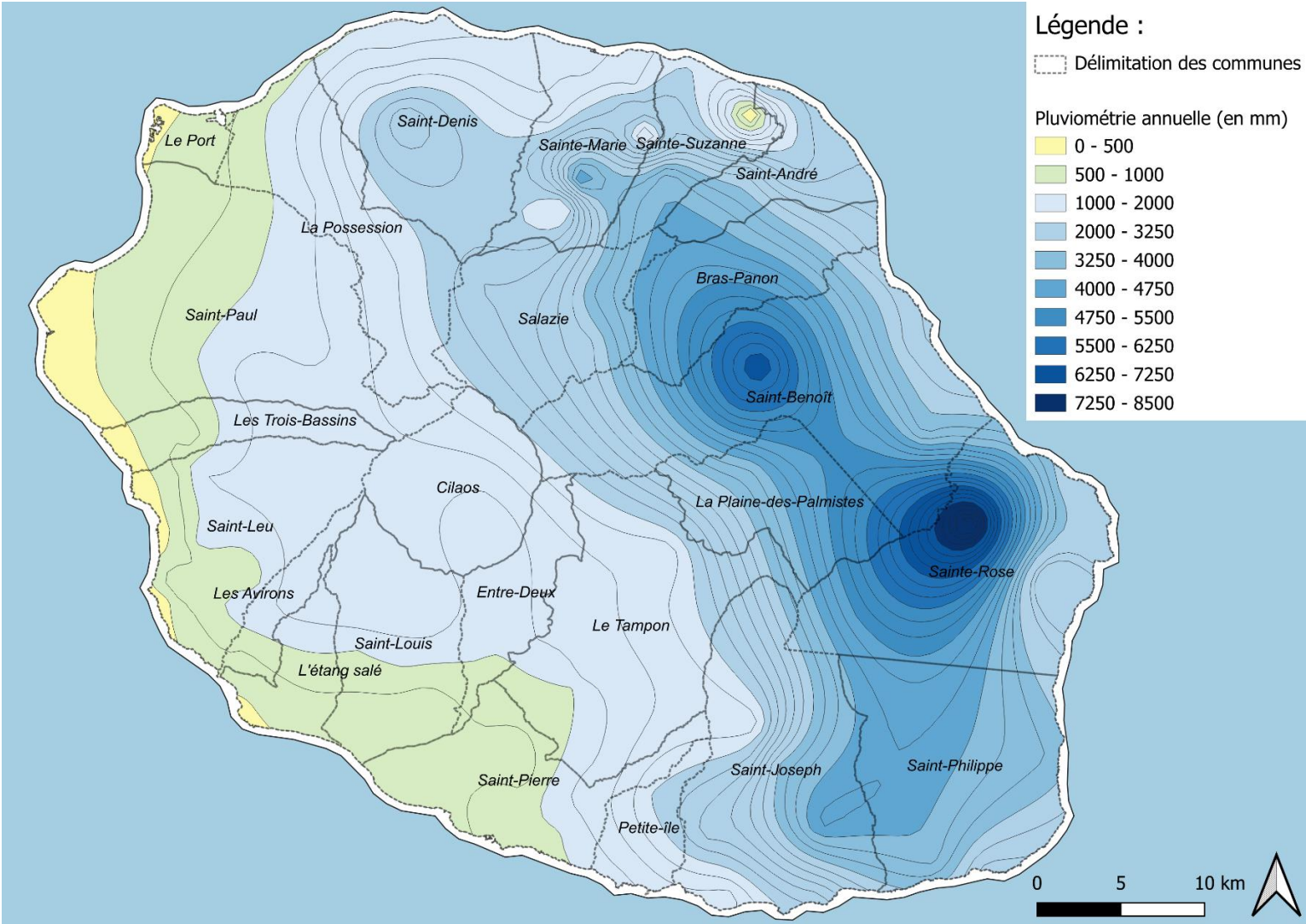


# TABLE DES MATIERES

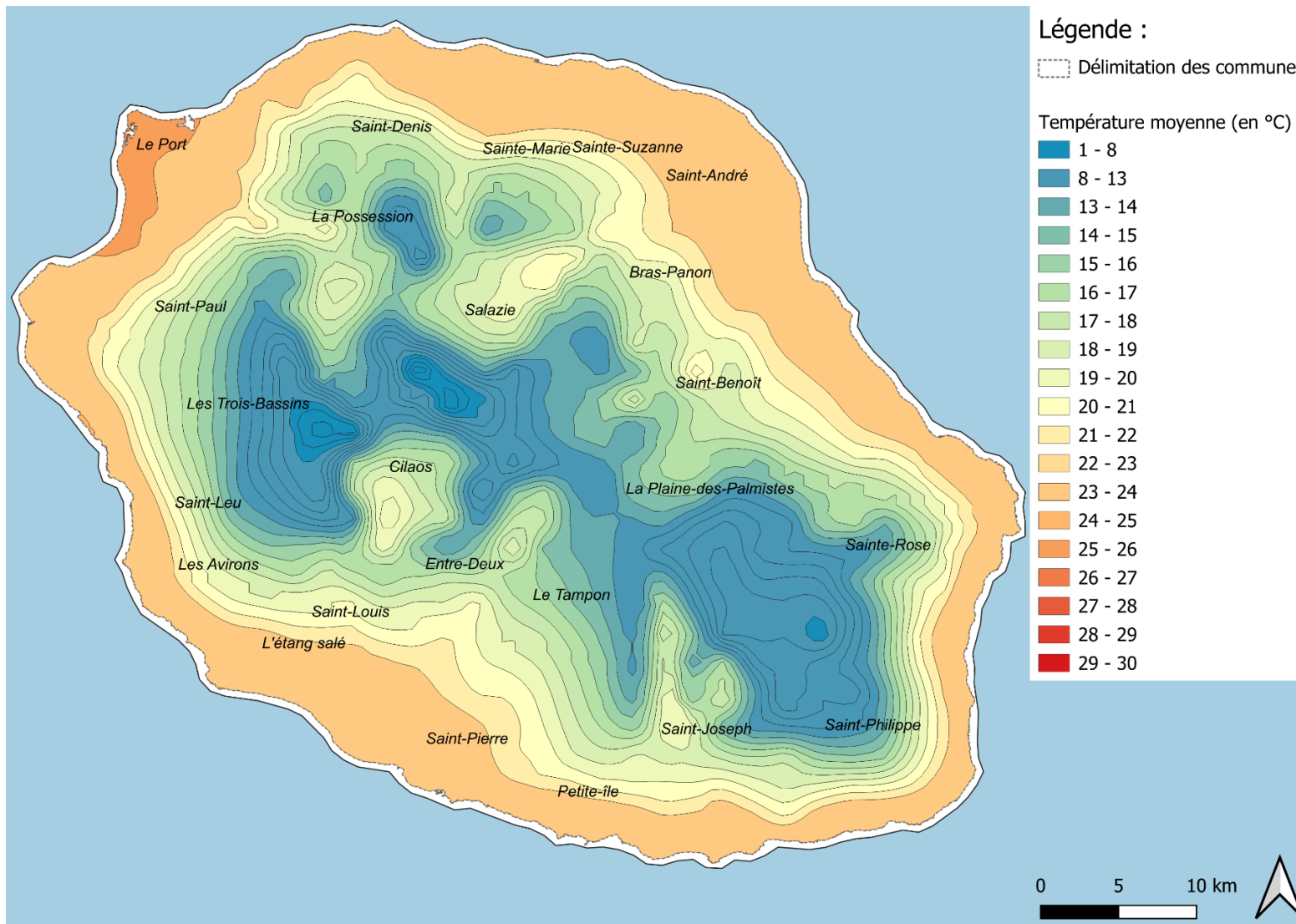
SOMMAIRE .....	III
TABLE DES SIGLES, ABREVIATIONS ET UNITÉS .....	V
INTRODUCTION .....	1
1 CONTEXTE ET ENJEUX .....	2
1.1 Le Centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement (Cirad) .....	2
1.1.1 Historique du Cirad .....	2
1.1.2 L'unité mixte de recherche (UMR) systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux (Selmet) .....	2
1.2 Le contexte de la production fourragère à La Réunion .....	3
1.2.1 Contexte pédoclimatique de La Réunion .....	3
1.2.2 Le développement de l'agriculture réunionnaise .....	4
1.2.3 L'élevage à La Réunion et sa consommation de fourrage .....	4
1.2.4 Les systèmes fourragers réunionnais .....	7
1.3 L'azote dans les systèmes prairiaux .....	12
1.3.1 Le cycle de l'azote dans les systèmes prairiaux .....	12
1.3.2 Impact d'une fertilisation azotée minérale ou organique .....	13
1.3.3 Fertilisation des prairies réunionnaises .....	14
1.3.4 Problématiques et hypothèses de travail .....	15
2 DEMARCHE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE .....	17
2.1 Les essais fertilisation des prairies .....	17
2.2 Démarche méthodologique .....	19
2.2.1 Recherche bibliographique sur les variables et indicateurs de la valorisation de l'azote .....	20
2.3 Méthodologie de traitement des résultats .....	24
3 ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS .....	25
3.1 Impact de la fertilisation sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	25
3.1.1 Evolution du pH sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	25
3.1.2 Evolution de la teneur en MO sur l'horizon 0-15 cm du sol .....	27
3.1.3 Evolution du stock d'azote de l'horizon 0-15 cm du sol .....	31
3.2 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote .....	33
3.2.1 Evolution des exportations en azote .....	33
3.2.2 Evolution du bilan azoté apparent annuel .....	38
3.2.3 Evolution du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) et du taux d'azote apporté par l'engrais (tNengrais) à l'échelle de l'année .....	40
3.2.4 Evolution de l'iNN à l'échelle de la coupe .....	43
4 DISCUSSIONS ET PROPOSITIONS .....	45
4.1 Comparatif avec les essais IRAT/Cirad .....	45
4.2 Impact de la fertilisation sur les propriétés du sol .....	45
4.3 Impact de la fertilisation sur la valorisation de l'azote .....	46
4.4 Adaptation du conseil en fertilisation .....	47
4.4.1 Optimisation de la valorisation de l'azote .....	47
4.4.2 Impact des conditions climatiques .....	48
4.4.3 Suivi des pratiques de fertilisation .....	48
CONCLUSION .....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	51
TABLE DES FIGURES .....	61
TABLE DES TABLEAUX .....	64
Annexe I : Carte des isohyètes annuelles (en mm) de la Réunion (Meteo France, 2024) .....	68
Annexe II : Carte des isothermes moyens (en °C) à la Réunion (Meteo France, 2024) .....	69
Annexe III : Gouvernance de la filière bovin laitier à la Réunion (Agrete, 2021a) .....	70
Annexe IV : Gouvernance de la filière bovin viande à la Réunion (Agrete, 2021b) .....	71
Annexe V : Gouvernance de la filière ovin et caprin viande à la Réunion (Agrete, 2021c) .....	72
Annexe VI : Photographie des principales graminées des prairies de la Réunion .....	73
Annexe VII : Description détaillée du cycle de l'azote .....	75
Annexe VIII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur les exportations en azote .....	77
Annexe IX : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur les exportations en azote .....	78

Annexe X : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le bilan azoté apparent.....	79
Annexe XI : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le bilan azoté apparent .....	80
Annexe XII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le CAU et le $tN_{engrais}$ .....	81
Annexe XIII : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le CAU et le $tN_{engrais}$	82
Annexe XIV : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur l'iNN .....	83
Annexe XV : Résultats de l'analyse des données sur le site du Lycée .....	84
Annexe XVI : Résultats de l'analyse des données sur le site de la Sedael .....	91
TABLE DES ANNEXES .....	98

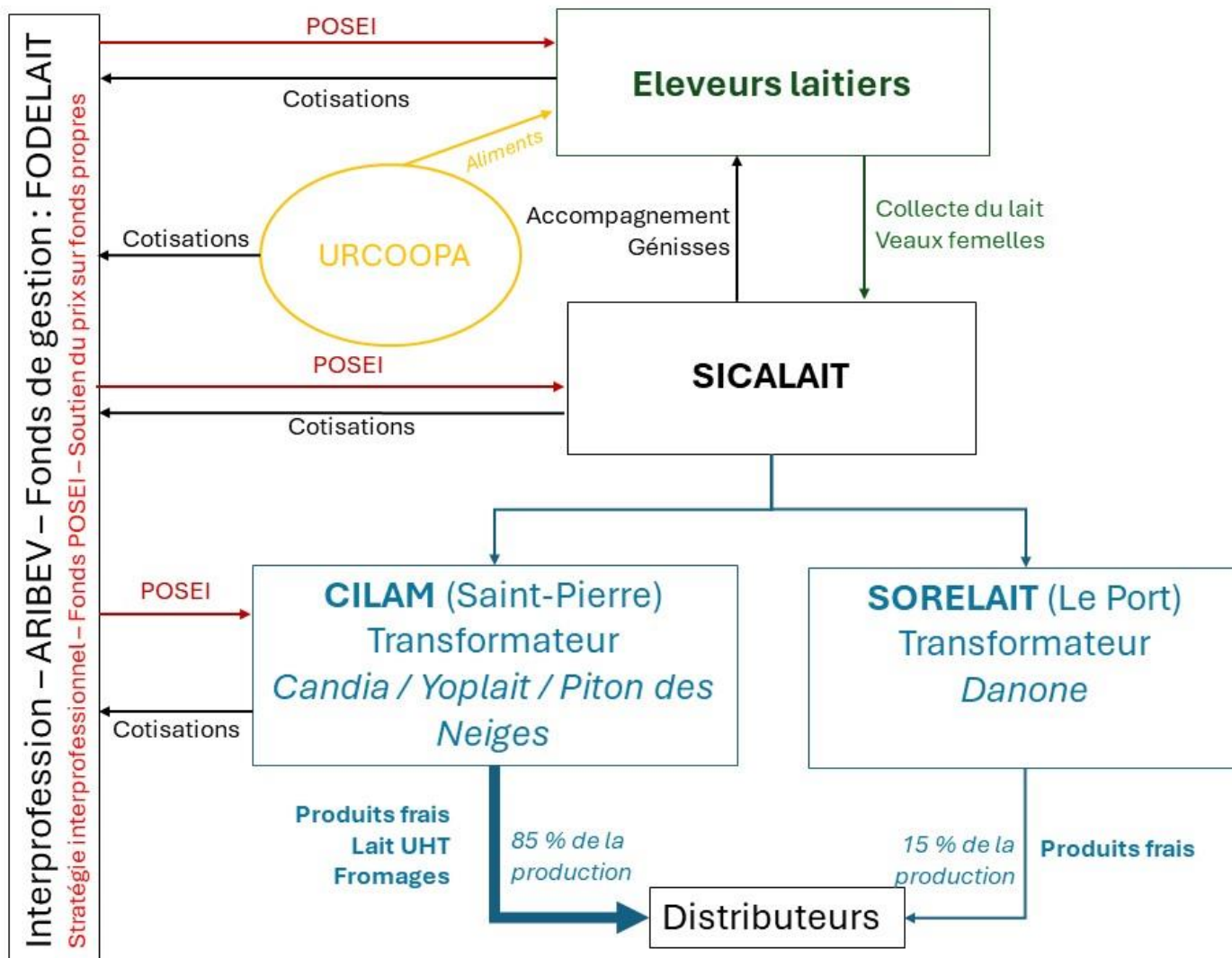
# Annexe I : Carte des isohyètes annuelles (en mm) de la Réunion (Meteo France 2024)



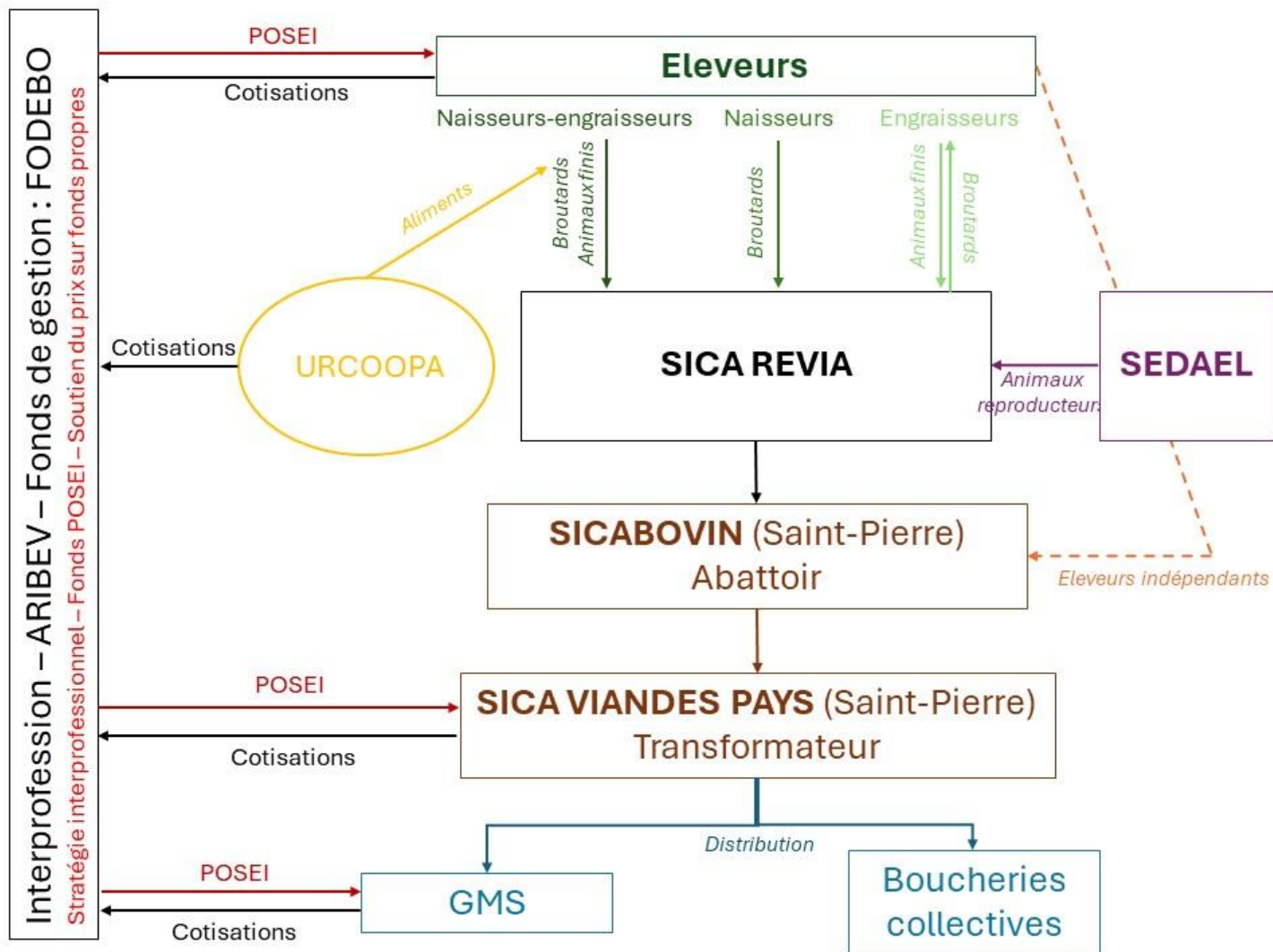
## Annexe II : Carte des isothermes moyens (en °C) à la Réunion (Meteo France 2024)



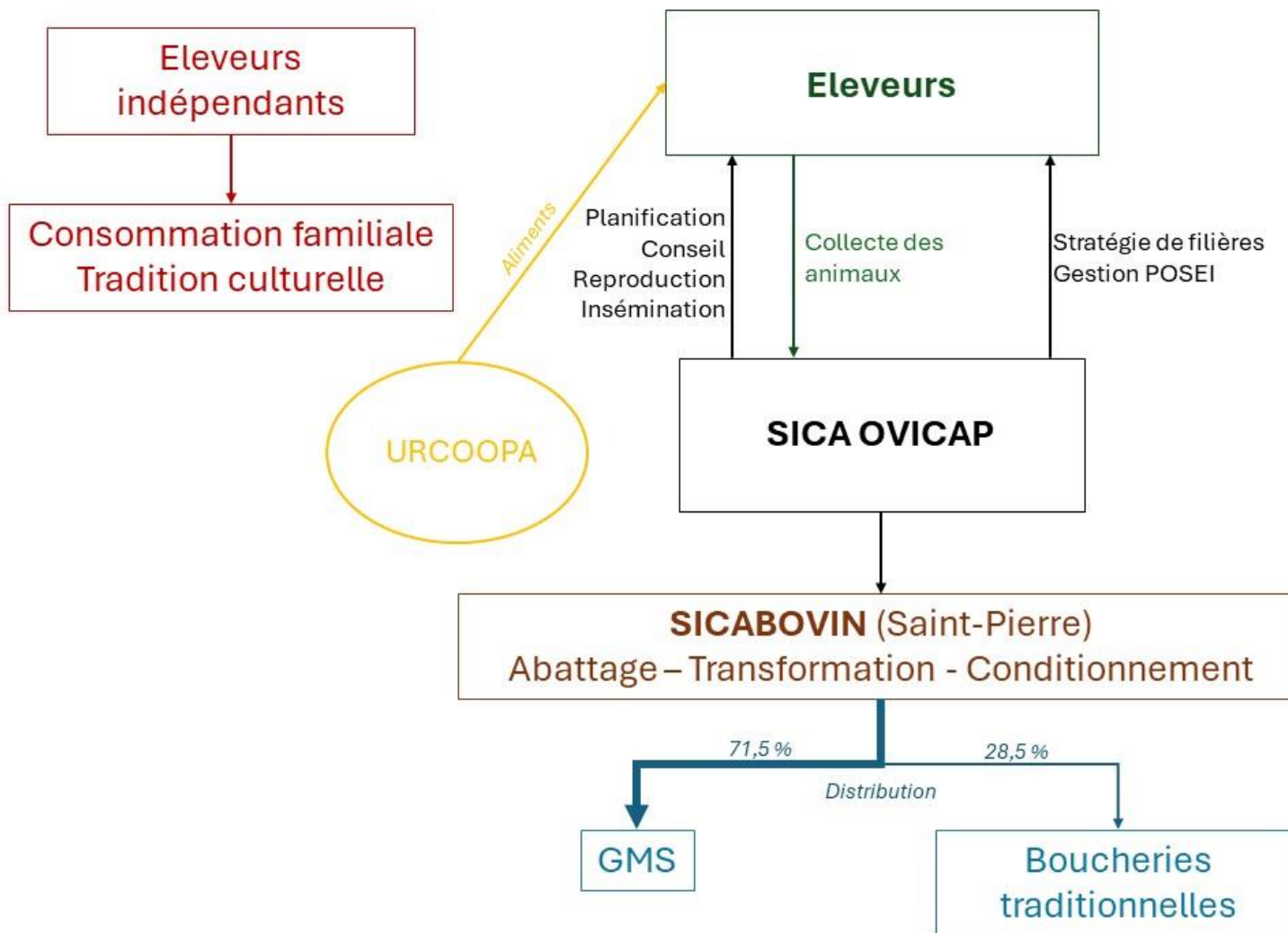
### Annexe III : Gouvernance de la filière bovin laitier à la Réunion (Agreste 2021a)



## Annexe IV : Gouvernance de la filière bovin viande à la Réunion (Agreste 2021b)



### Annexe V : Gouvernance de la filière ovin et caprin viande à la Réunion (Agreste 2021c)



**Annexe VI : Photographie des principales graminées des prairies de la Réunion**



Figure 18 : *Chloris gayana* (Costea 2013)



Figure 19 : *Sétaria sphacelata* (Nickrent 2017)





Figure 20 : *Cenchrus clandestinus* (Parker 2023)

## **Annexe VII : Description détaillée du cycle de l'azote**

### **Evolution de l'azote**

#### **Fixation du diazote**

La fixation du diazote atmosphérique  $N_2$  est réalisée par la flore bactériologique du sol, qui se décompose en deux catégories : les bactéries réalisant des symbioses et les bactéries à l'état libre. Les bactéries réalisant des symbioses sont principalement des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium*. Celles-ci reconnaissent la plante hôte, une légumineuse, et pénètrent par les poils racinaires afin de former des nodosités. Au sein de ces nodosités, la plante assure un apport en composés carbonés, garantissant une source d'énergie aux bactéries symbiotiques. En échange, ces bactéries produisent de l'ammoniac  $NH_3$  puis de l'ammonium  $NH_4^+$  à partir du  $N_2$  atmosphérique. C'est la fixation biologique de l'azote (FBA). Les deux réactions s'écrivent de la manière suivante (Sierra, Tournebize 2019) :

Les bactéries à l'état libre fixent également l'azote dans le sol. Elles se décomposent en trois grandes catégories : les bactéries endophytes qui se développent à l'intérieur de la plante, en majorité dans le système racinaire, les bactéries diazotrophes, qui se développent dans la rhizosphère, et les bactéries associatives, qui peuvent être à la fois endophytes et diazotrophes. Ces bactéries produisent également du  $NH_4^+$  grâce à la nitrogénase (Deacon 2024; Roper, Gupta 2016).

#### **Minéralisation et immobilisation**

La minéralisation correspond à la transformation de l'azote organique, présent dans le sol à la suite de la dégradation de la litière, en azote inorganique de forme  $NH_4^+$ . Elle s'opère grâce aux microorganismes hétérotrophes du sol, qui, grâce à des enzymes extracellulaires, décomposent les molécules organiques (tissus végétaux, animaux ou microbiens, substances humiques), de taille importante, en molécule moins complexe formée de chaînes carbonées et d'acides aminés. Ces acides aminés sont ensuite hydrolysés afin de produire du  $NH_4^+$  (Recous et al. 2015 ; Chevalier 2020).

La minéralisation est donc très dépendante de la faune microscopique du sol, mais également du cycle du carbone. En effet, les organismes participant à la minéralisation de l'azote ont besoin de composés carbonés. De plus, lors de l'absorption de l'azote par la plante, une absorption du carbone est observable et correspond au couplage C/N. Celui-ci permet de réduire les émissions d'azote réactif dans l'atmosphère (Chevalier 2017).

L'immobilisation correspond au processus inverse. Lorsque l'ion  $NH_4^+$  est relâché dans le sol, les bactéries environnantes l'utilisent pour fabriquer de la biomasse bactérienne. Cela entraîne la formation d'azote organique au sein de la biomasse bactérienne. Une trop grande disponibilité d'azote minéral induit donc une « faim d'azote » qui correspond à ce processus, et qui peut provoquer un manque d'azote assimilable chez les plantes (Recous et al. 2015 ; L'institut Agro Montpellier n.d.).

La minéralisation à La Réunion est particulièrement importante aux mois de novembre, décembre et janvier, lors de la saison humide (Fritz 1972). Les recherches de l'IRAT et du CIRAD ont étudié la minéralisation des sols prairiaux à la Réunion. La minéralisation se produit toute l'année, avec une baisse en saison sèche, et qui peut être quasi nulle en altitude. Les essais de Mandret et Blanfort affirment que l'activité biologique des sols varie en fonction de l'altitude et du niveau de fertilisation, avec un niveau d'activité biologique faible sur les sols du littoral et plus important sur les sols des Hauts.

#### **Nitrification**

La nitrification est un processus microbiologique qui correspond à l'oxydation du  $NH_4^+$  en nitrite  $NO_2^-$  puis en nitrate  $NO_3^-$ . Elle est donc formée de deux sous-étapes, la nitritation ( $NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$ ) et la nitratisation ( $NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ ). Elles permettent la transformation de l'azote en une forme assimilable par les plantes. Ces deux transformations sont réalisées par les bactéries nitrifiantes. Dans le cas de la nitritation, ce sont les bactéries *Nitrosomonas* qui

oxydent le  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$ , et dans le cas de la nitratisation, ce sont les bactéries Nitrobacter qui oxydent le  $\text{NO}_2^-$  en  $\text{NO}_3^-$  (Deroche 1983; Lata 2011).

## **Apports et pertes d'azote exogènes**

### **La fertilisation**

L'azote peut également être directement apporté dans le sol via la fertilisation, sous la forme d'engrais minéraux ou organiques. Dans le cas d'engrais minéraux, ils se présentent sous forme de granulés, qui contiennent des proportions spécifiques d'azote, de phosphore et de potassium. Les engrais simples contiennent uniquement de l'azote, du phosphore ou du potassium, tandis que les engrais composés peuvent être binaires ou ternaires. Les engrais organiques sont formés à partir de composés organiques réduits contenant du carbone ainsi que d'éléments fertilisants. Ils sont généralement d'origine animale ou végétale, et peuvent provenir de rejets de l'agriculture (effluents d'élevage, résidus de culture). Ils peuvent également être synthétisés (Teffahi, Noun 2021).

L'azote dans les engrais minéraux est sous la forme  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$ , et est donc directement assimilable par les plantes. Lorsque la fertilisation est organique, l'azote est principalement sous la forme  $\text{NH}_3$  ou organique. Dans de moindres quantités, il peut être sous la forme  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$ .

### **Volatilisation**

La volatilisation se produit sous plusieurs formes. Lors d'un apport d'engrais en surface, dû au contact avec l'oxygène, il peut se produire une volatilisation ammoniacale, qui correspond à la perte d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) dans l'atmosphère. Elle résulte de l'augmentation du stock de  $\text{NH}_3$  et se produit sur une courte durée, entre 6 et 15 jours après l'apport de fertilisant. A La Réunion, la volatilisation concerne principalement les apports d'engrais organiques. Elle est estimée de 20 à 80 % selon le type d'engrais organique et selon la méthode d'épandage (Lecomte et al. 2013).

Également, la volatilisation de l'azote se produit lors de la nitritation, avec un dégagement de monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) (Giban 2004 ; Benoit 2014).

### **Lixiviation**

La lixiviation de l'azote correspond au mouvement vertical des ions  $\text{NO}_3^-$  en grande majorité (plus mobiles et solubles dans l'eau) et des ions  $\text{NH}_4^+$ . Elle est fortement liée aux saisons, puisqu'au printemps et en été, l'azote minéral est en grande partie absorbé par les plantes, et l'évapotranspiration limite la recharge des nappes et donc le risque de lixiviation. Lors de la fin de la période de culture, l'azote minéral s'accumule alors dans les sols, en formant des reliquats entrée hiver. Lors de la recharge des nappes phréatiques par les pluies, l'azote est exporté vers les nappes phréatiques (Poss 1993 ; Agro Transfert 2017 ; Benoit 2014).

Le type de sol, et donc le drainage de l'eau, influent sur la lixiviation. Un sol sableux, présentant un fort drainage de l'eau, présentera une lixiviation bien plus importante qu'un sol argileux avec une forte rétention de l'eau. Également, la présence d'azote dans le sol à l'entrée de l'hiver augmente la lixiviation (Hoffmann, Johnsson 1999).

A la Réunion, dans le cas d'apports minéraux, la lixiviation peut atteindre 40 % (Lecomte et al. 2013).

### **Dénitrification**

Les bactéries dénitrifiantes sont les bactéries responsables du phénomène de dénitrification. Ce sont des hétérotrophes aérobies qui, en situation d'anaérobie, réduisent le  $\text{NO}_3^-$  en  $\text{N}_2$ . En effet, l'oxygène étant l'accepteur d'électrons, lorsque celui-ci s'épuise, le nitrate est utilisé en remplacement.

## Annexe VIII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur les exportations en azote

Tableau 16 : Exportations d'azote selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b)

Modalité	Apports d'azote (en kgN/ha/an)	Rendement (en tMS/ha/an)	Teneur en azote (en %N de la MS)	Exports d'azote (en kgN/ha/an)
<b>Essai de fertilisation azotée de Chloris gayana aux colimaçons (1967)</b>				
N0	0	3,3	1,13	37,29
N1	140	9,8	1,27	124,46
N2	280	15,6	1,33	207,48
N3	420	21,2	1,44	305,28
N4	560	24,6	1,6	393,6
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Colimaçons (1970)</b>				
N0	0	4,3	1,4	60
N1 (après coupe)	264	14,9	1,5	220
N2 (après coupe)	528	20,8	1,7	349
N3 (après coupe)	800	24,6	1,9	478
N4 (10j après)	264	12,3	1,6	191
N5 (10j après)	528	19,1	1,8	338
N6 (10j après)	800	23,4	2,1	479
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Mon Caprice (1970)</b>				
N0	0	11,9	1,11	133
N1 (après coupe)	400	36,5	1,09	399
N2 (7j après)	400	34,1	1,14	389
N3 (14j après)	400	34,4	1,12	387
N4 (après coupe)	800	46	1,36	626
N5 (7j après)	800	45	1,49	674
N6 (14j après)	800	43,9	1,47	646

Tableau 17 : Exportation en azote sur prairie de Pangola pour différents apports d'azote (Loynet 1976)

Modalité	Apport d'azote (en kg/ha/an)	Export d'azote (en kgN/ha/an)
N <sub>0</sub> (Pas d'apport)	0	138,88
N <sub>1</sub> (40 kgN/ha)	280	236,33
N <sub>2</sub> (80 kgN/ha)	560	372,8
N <sub>3</sub> (120 kgN/ha)	840	480,76
N <sub>4</sub> (160 kgN/ha)	1 120	601,34

## Annexe IX : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur les exportations en azote

Tableau 18 : Exportation en azote sur prairie de Fétuque élevée pour différents apports d'azote (IRAT 1975)

Modalité	Apports d'azote (en kgN/ha/an)	Rendement (en tMS/ha/an)	Teneur en azote (en %N de la MS)	Exports d'azote (en kgN/ha/an)
N1	0	0,18	1,5	27
N2	231	6,9	1,54	106,26
N3	462	14,47	1,73	250,331
N4	700	17,67	2	353,4

Tableau 19 : Exportation en azote sur prairie tempérée (Ray-Grass, Brome, Dactyle, Trèfle Blanc) pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020)

Modalité	Apport d'azote (en kgN/ha/an)	Exports d'azote (en kgN/ha/an)
Témoin	66	526
Lisier	338	705
Lisier + 33.11.06	800	854

## Annexe X : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le bilan azoté apparent

Tableau 20 : Bilan azoté apparent selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b)

Modalité	Apports d'azote (en kgN/ha/an)	Exports d'azote (en kgN/ha/an)	Bilan azoté apparent (en kgN/ha/an)
<b>Essai de fertilisation azotée de Chloris gayana aux colimaçons (1967)</b>			
N0	0	37,29	-37,29
N1	140	124,46	15,54
N2	280	207,48	72,52
N3	420	305,28	114,72
N4	560	393,6	166,4
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Colimaçons (1970)</b>			
N0	0	60	-60
N1 (après coupe)	264	220	44
N2 (après coupe)	528	349	179
N3 (après coupe)	800	478	322
N4 (10j après)	264	191	73
N5 (10j après)	528	338	190
N6 (10j après)	800	479	321
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Mon Caprice (1970)</b>			
N0	0	133	-133
N1 (après coupe)	400	399	1
N2 (7j après)	400	389	11
N3 (14j après)	400	387	13
N4 (après coupe)	800	626	174
N5 (7j après)	800	674	126
N6 (14j après)	800	646	154

Tableau 21 : Bilan azoté apparent sur prairie de Pangola selon différents apports d'azote (Loynet 1976)

Modalité	Export d'azote total (en kgN/ha)	Apport d'azote total (en kg/ha)	Bilan azoté apparent (en kgN/ha)
N <sub>0</sub> (Pas d'apport)	138,88	0	- 138,88
N <sub>1</sub> (40 kgN/ha)	236,33	280	- 43,67
N <sub>2</sub> (80 kgN/ha)	372,8	560	- 187,2
N <sub>3</sub> (120 kgN/ha)	480,76	840	- 359,24
N <sub>4</sub> (160 kgN/ha)	601,34	1 120	- 518,66

## Annexe XI : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le bilan azoté apparent

Tableau 22 : Bilan azoté apparent sur prairie de Fétuque élevée selon différents apports d'azote (IRAT 1975)

Modalité	Exports d'azote (en kgN/ha/an)	Apports d'azote (en kgN/ha/an)	Bilan azoté apparent (en kgN/ha)
N0	27	0	-27
N1	106,26	231	124,74
N2	250,331	462	211,669
N3	353,4	700	346,6

Les travaux de Miralles-Bruneau et al. en 2020, réalisé à la Plaine des Cafres sur une prairie tempérée (composée de Dactyle, de Brome, de Ray-grass et de trèfle blanc), présente des valeurs de bilan azoté apparent pour trois modalités de fertilisation lisier et minérale.

Tableau 23 : Bilan azoté apparent sur prairie tempérée pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020)

Modalité	Export (en kgN/ha/an)	Apport (en kgN/ha/an)	Bilan azoté (en kgN/ha/an)
Témoin	526	66	-460
Lisier	705	338	-367
Lisier + 33.11.06	854	800	-54

## Annexe XII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le CAU et le tN<sub>engrais</sub>

Tableau 24 : CAU et tN<sub>engrais</sub> selon différentes modalités de fertilisation sur prairie de Chloris (Fritz 1967; IRAT 1972a; 1972b)

Modalité	Apports d'azote (en kgN/ha/an)	Exports d'azote (en kgN/ha/an)	CAU (en %)	tN <sub>engrais</sub> (en %)
<b>Essai de fertilisation azotée de Chloris gayana aux colimaçons (1967)</b>				
N0	0	37,29	/	/
N1	140	124,46	88,90%	62,26%
N2	280	207,48	74,10%	60,78%
N3	420	305,28	72,69%	63,81%
N4	560	393,6	70,29%	63,63%
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Colimaçons (1970)</b>				
N0	0	60	/	/
N1 (après coupe)	264	220	83,33%	60,61%
N2 (après coupe)	528	349	66,10%	54,73%
N3 (après coupe)	800	478	59,75%	52,25%
N4 (10j après)	264	191	72,35%	49,62%
N5 (10j après)	528	338	64,02%	52,65%
N6 (10j après)	800	479	59,88%	52,38%
<b>Essai d'apport retardé de l'azote sur Chloris gayana Mon Caprice (1970)</b>				
N0	0	133	/	/
N1 (après coupe)	400	399	99,75%	66,50%
N2 (7j après)	400	389	97,25%	64,00%
N3 (14j après)	400	387	96,75%	63,50%
N4 (après coupe)	800	626	78,25%	61,63%
N5 (7j après)	800	674	84,25%	67,63%
N6 (14j après)	800	646	80,75%	64,13%

Tableau 25 : CAU et tN<sub>engrais</sub> sur prairie de Pangola selon différents apports d'azote (Loynet 1976)

Modalité	Export d'azote (en kgN/ha)	Apport d'azote (en kg/ha)	CAU (en %)	tN <sub>engrais</sub> (en %)
N <sub>0</sub> (Pas d'apport)	138,88	0	/	/
N <sub>1</sub> (40 kgN/ha)	236,33	280	84%	35%
N <sub>2</sub> (80 kgN/ha)	372,8	560	67%	42%
N <sub>3</sub> (120 kgN/ha)	480,76	840	57%	41%
N <sub>4</sub> (160 kgN/ha)	601,34	1 120	54%	41%



## Annexe XIII : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le CAU et le tN<sub>engrais</sub>

Tableau 26 : CAU et tN<sub>engrais</sub> sur prairie de Fétuque élevée selon différents apports d'azote (IRAT 1975)

Modalité	Export d'azote (en kgN/ha)	Apport d'azote (en kg/ha)	CAU (en %)	tN <sub>engrais</sub> (en %)
N0	27	0	/	/
N1 (33)	106,26	231	46,00%	34,31%
N2 (66)	250,331	462	54,18%	48,34%
N3 (100)	353,4	700	50,49%	46,63%

Tableau 27 : Bilan azoté apparent sur prairie tempérée pour trois modalités de fertilisation (Miralles-Bruneau et al. 2020)

Modalité	Export (en kgN/ha/an)	Apport (en kgN/ha/an)	CAU
Témoin	526	66	797%
Lisier	705	338	209%
Lisier + 33.11.06	854	800	107%

## Annexe XIV : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur l'iNN

Tableau 28 : iNN selon deux modalités de fertilisation azotée sur Houlque laineuse et mélange Dactyle – Ray Grass en saison sèche et humide (Blanfort 1994)

Espèce végétale	Houlque laineuse		Dactyle – Ray Grass	
	Sèche	Humide	Sèche	Humide
<b>N0 (0 kgN/ha)</b>	20	/	50	40
<b>N1 (150 kgN/ha)</b>	60	70	80	105

Tableau 29 : Valeurs d'iNN pour trois types de prairies sur trois ans, par saison (Grimaud et al. 2007)

Type de prairie	Année	Saison	iNN
<b>Chloris</b>	1	Humide	52 %
		Sèche	60 %
	2	Humide	33 %
		Sèche	46 %
	3	Humide	31 %
		Sèche	71 %
<b>Kikuyu</b>	1	Humide	37 %
		Sèche	29 %
	2	Humide	40 %
		Sèche	45 %
	3	Humide	41 %
		Sèche	43 %
<b>Tempérées</b>	1	Humide	37 %
		Sèche	51 %
	2	Humide	68 %
		Sèche	60 %
	3	Humide	53 %
		Sèche	55 %

Tableau 30 : Valeurs d'iNN pour différents fertilisants sur une prairie tempérée

Modalité	iNN
Témoin	115 %
Lisier	139 %
Lisier + 33.11.06	152 %

## Annexe XV : Résultats de l'analyse des données sur le site du Lycée

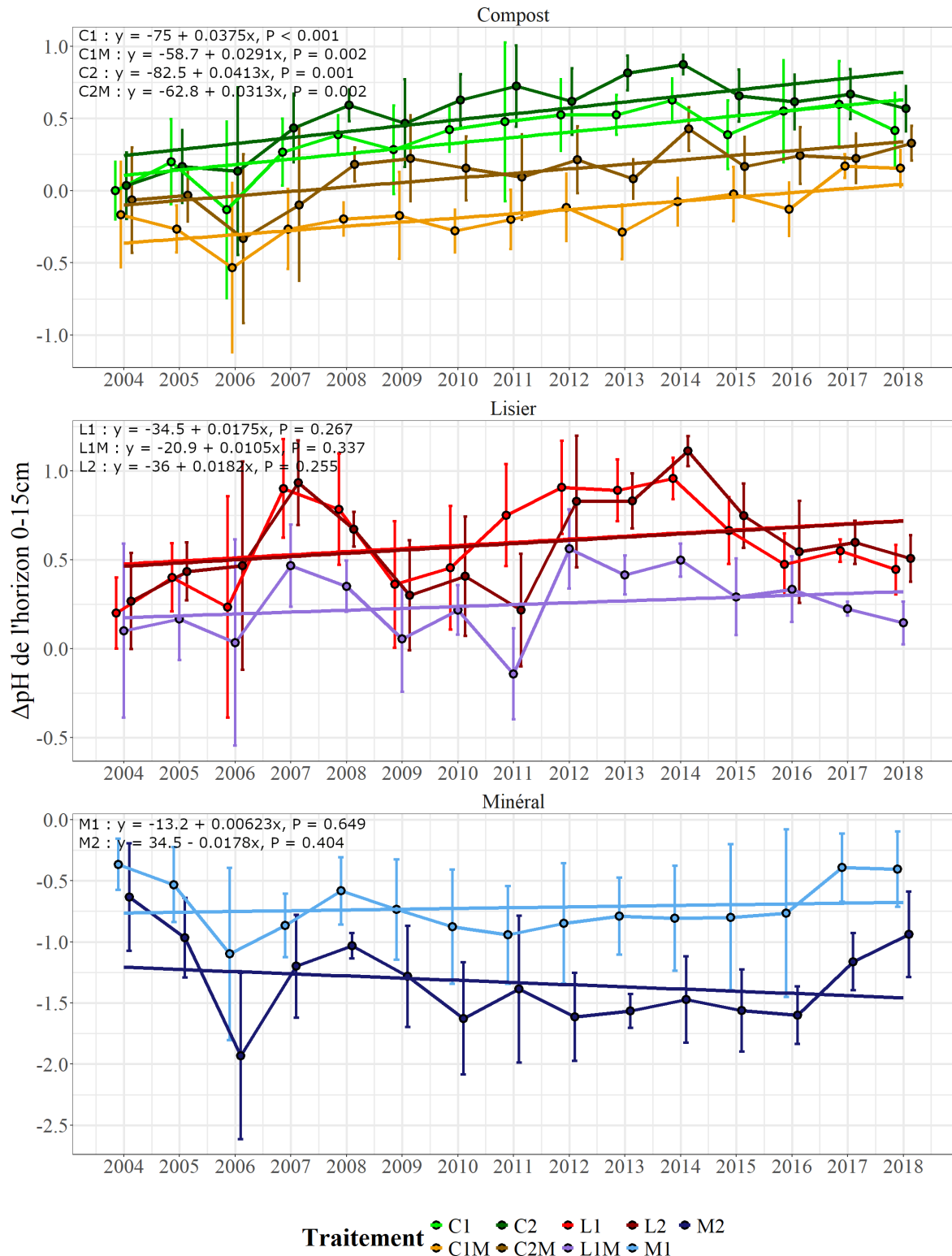


Figure 21 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

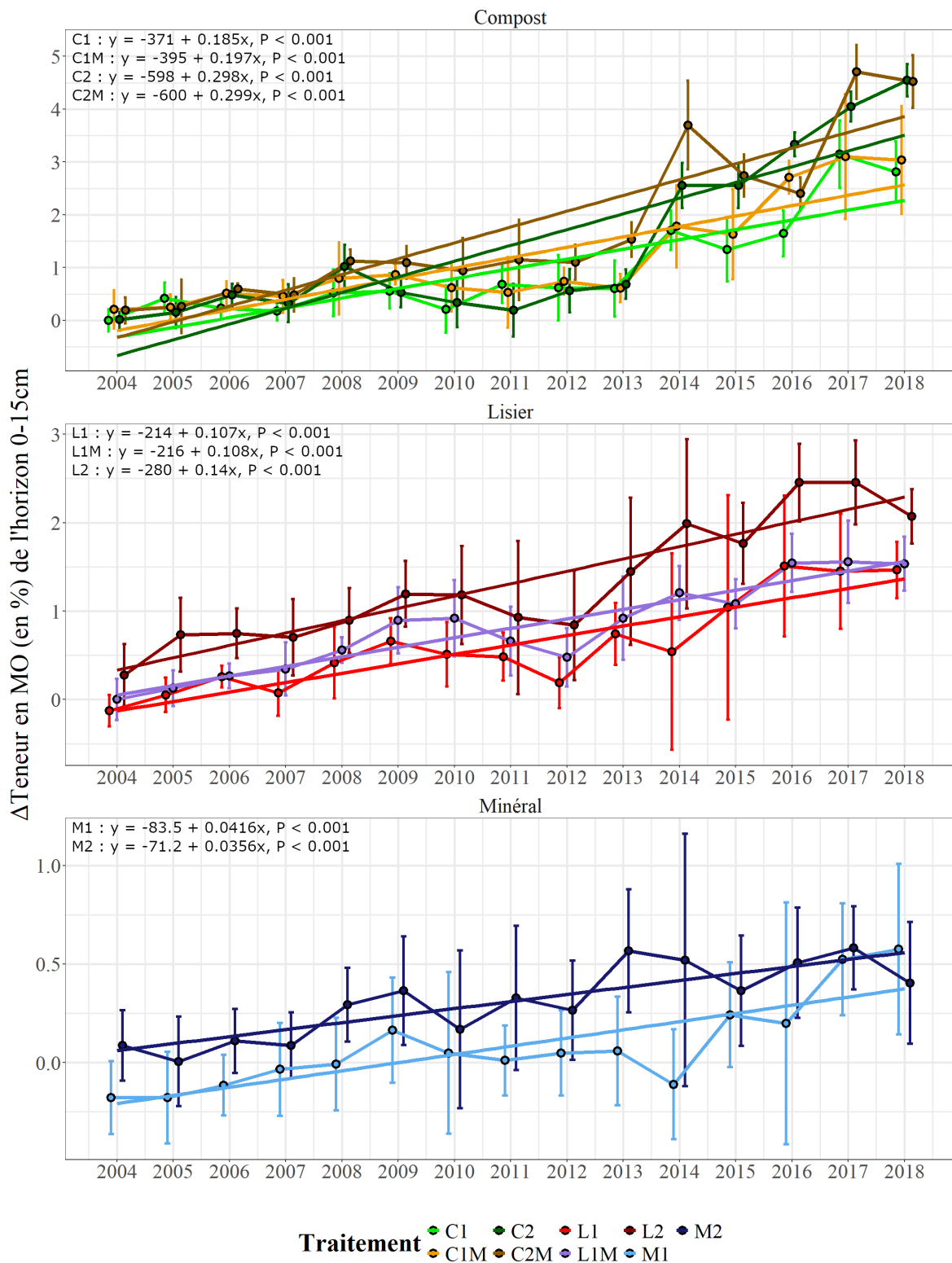


Figure 22 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

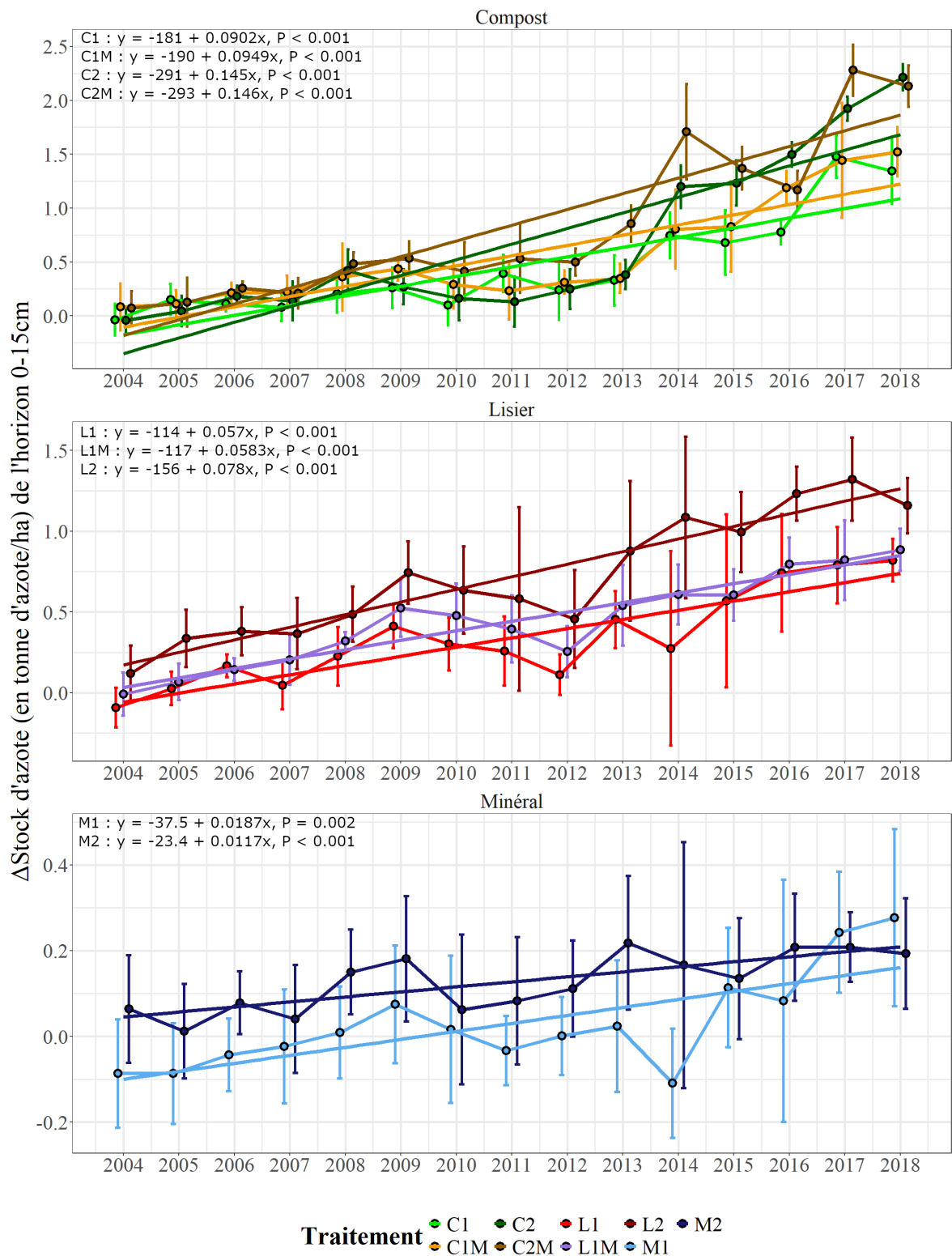


Figure 23 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonne d'azote/ha) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

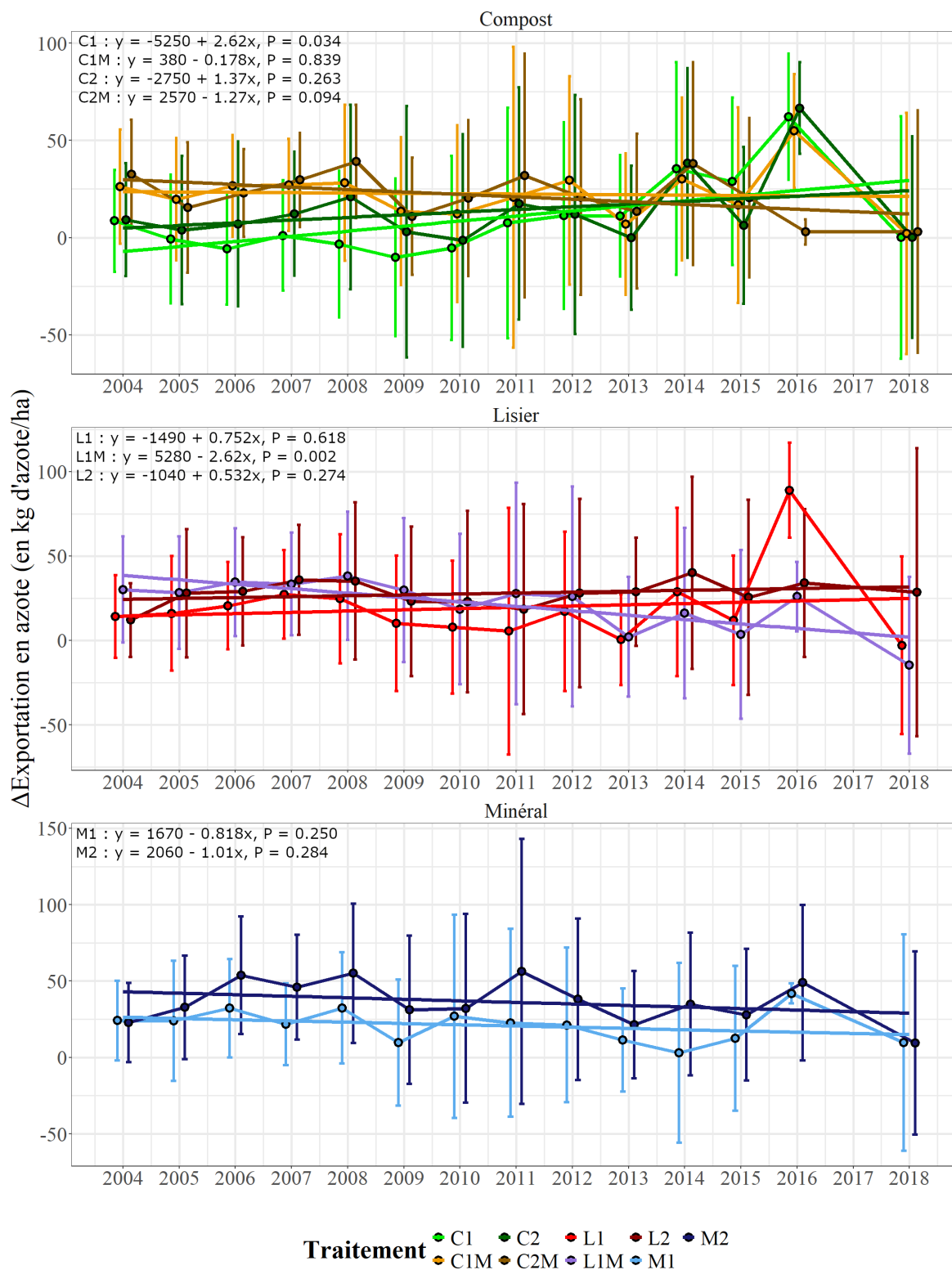


Figure 24 : Régressions linéaires  $lm(Diff\_expN \sim Year)$  représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote/ha) par rapport au témoin ( $\Delta Exportation$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

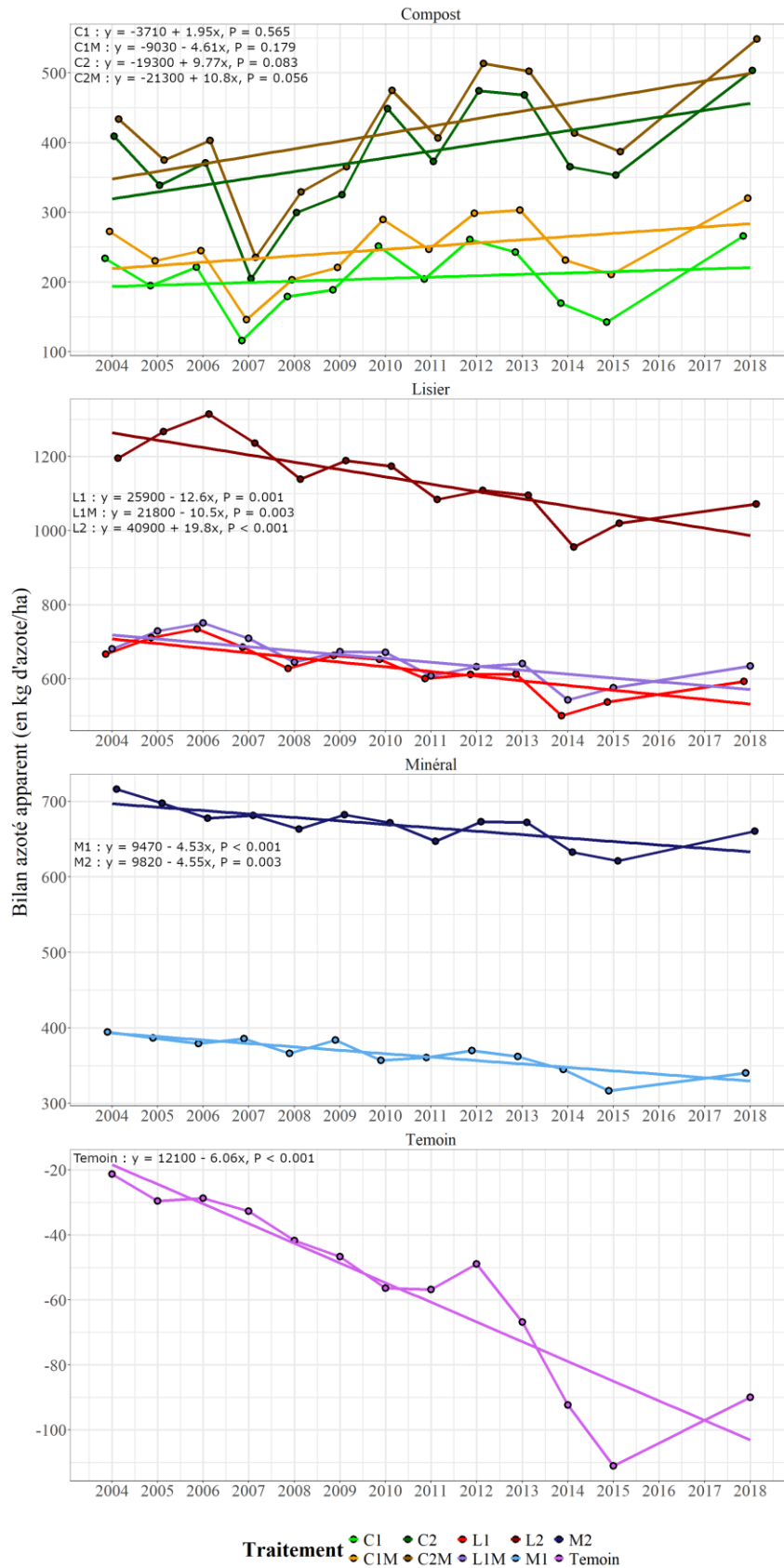


Figure 25 : Régressions linéaires  $lm(BNA \sim Year)$  représentant l'évolution bilan azoté apparent (en kg d'azote/ha) sur la période 2005-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.

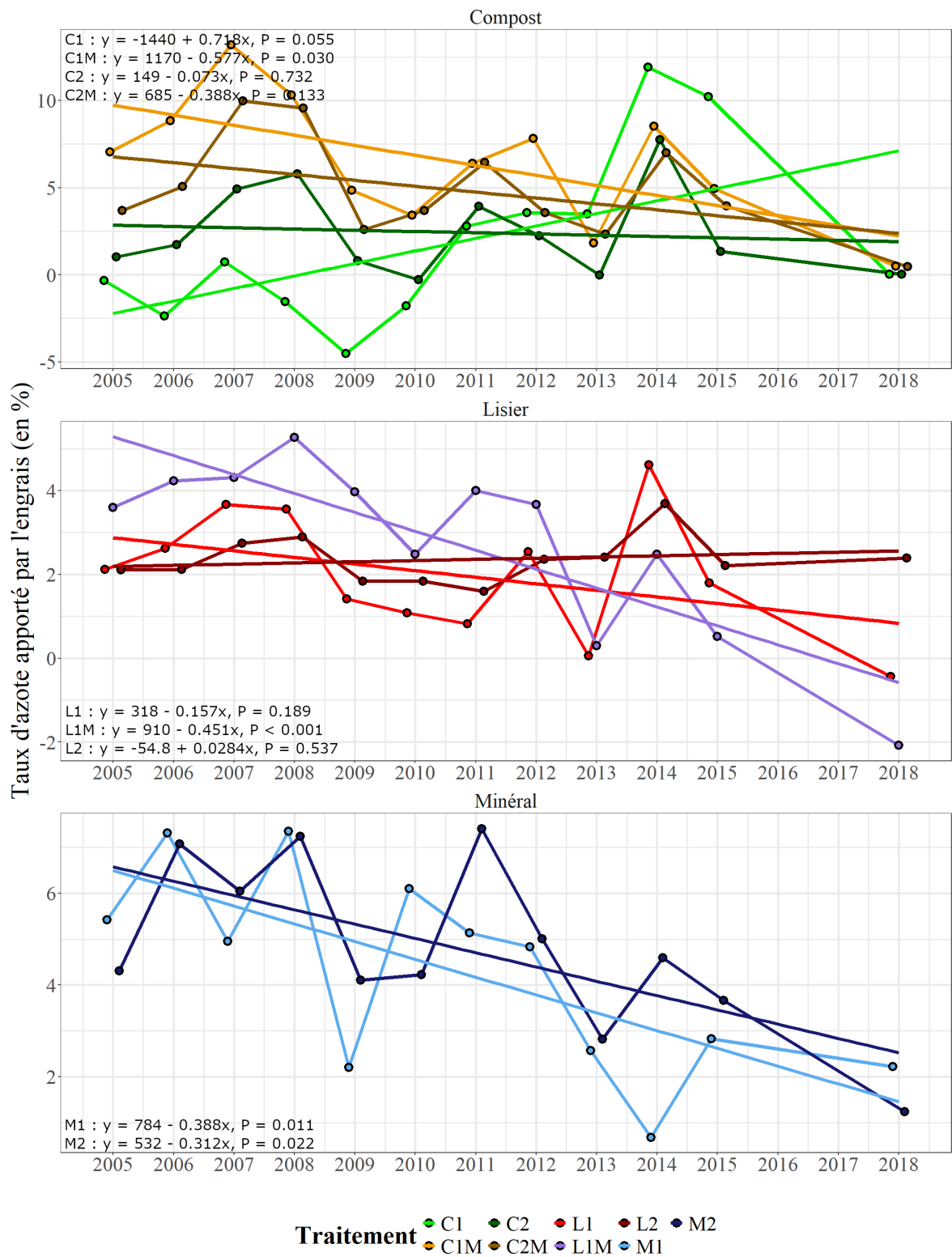


Figure 26 : Régressions linéaires  $\ln(tN_{engrais} \sim Year)$  représentant l'évolution du  $tN_{engrais}$  (en %) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.



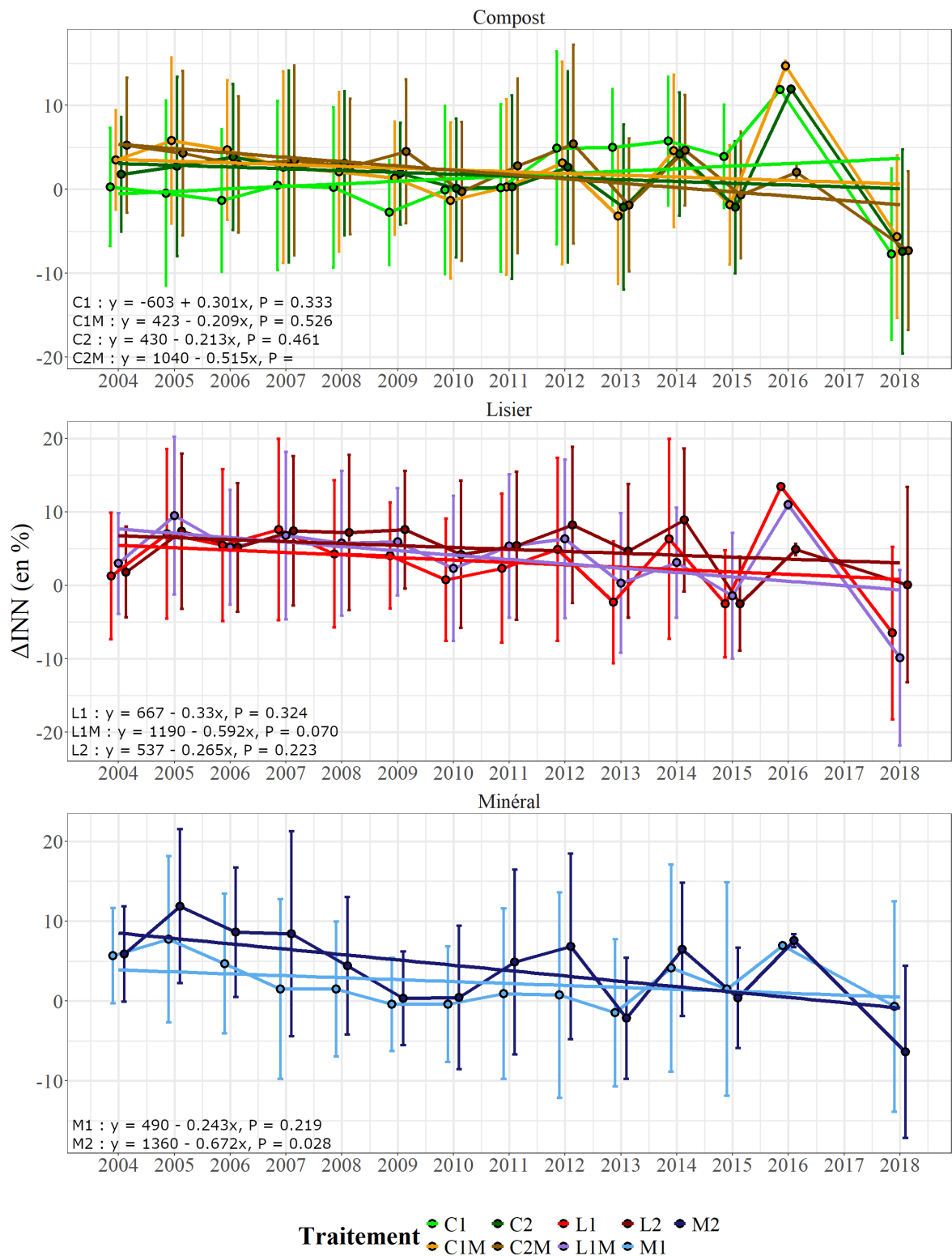


Figure 27 : Régressions linéaires  $\ln(\text{INN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'INN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta\text{INN}$ ) sur la période 2004-2018 sur le site du Lycée selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

## Annexe XVI : Résultats de l'analyse des données sur le site de la Sedael

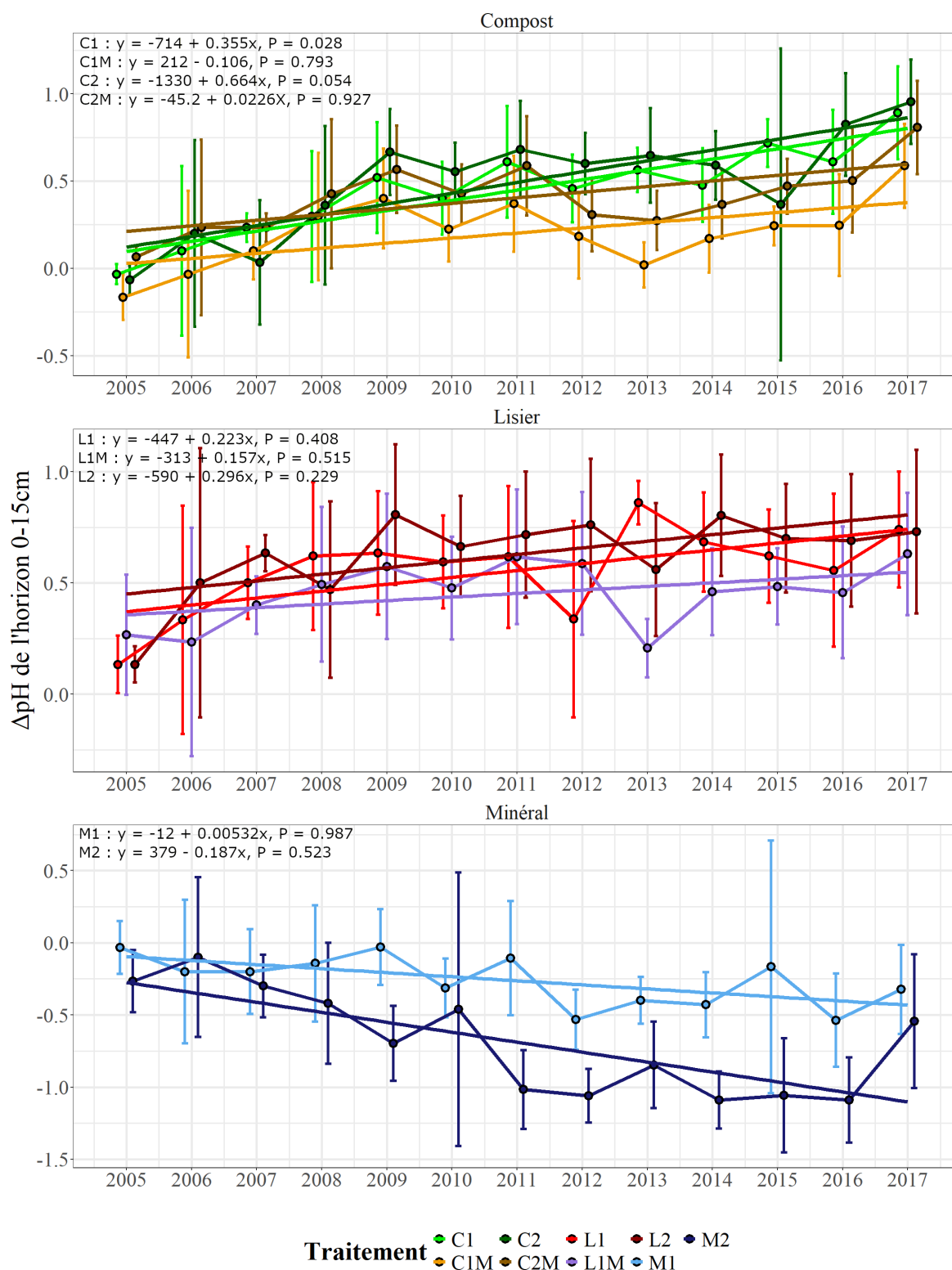


Figure 28 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_pH} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de pH de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{pH}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedael selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

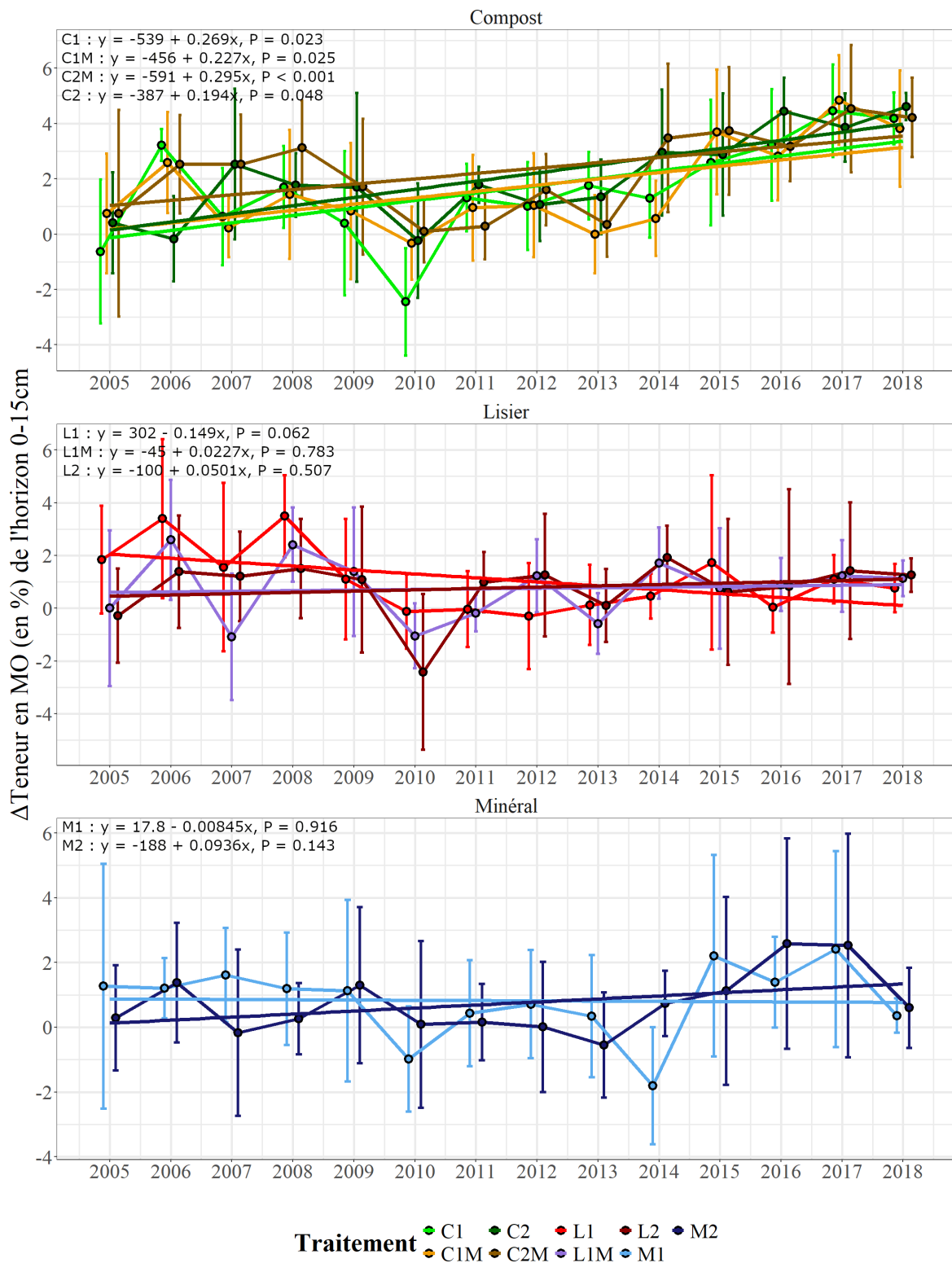


Figure 29 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_MO} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en MO (en%) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{MO}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

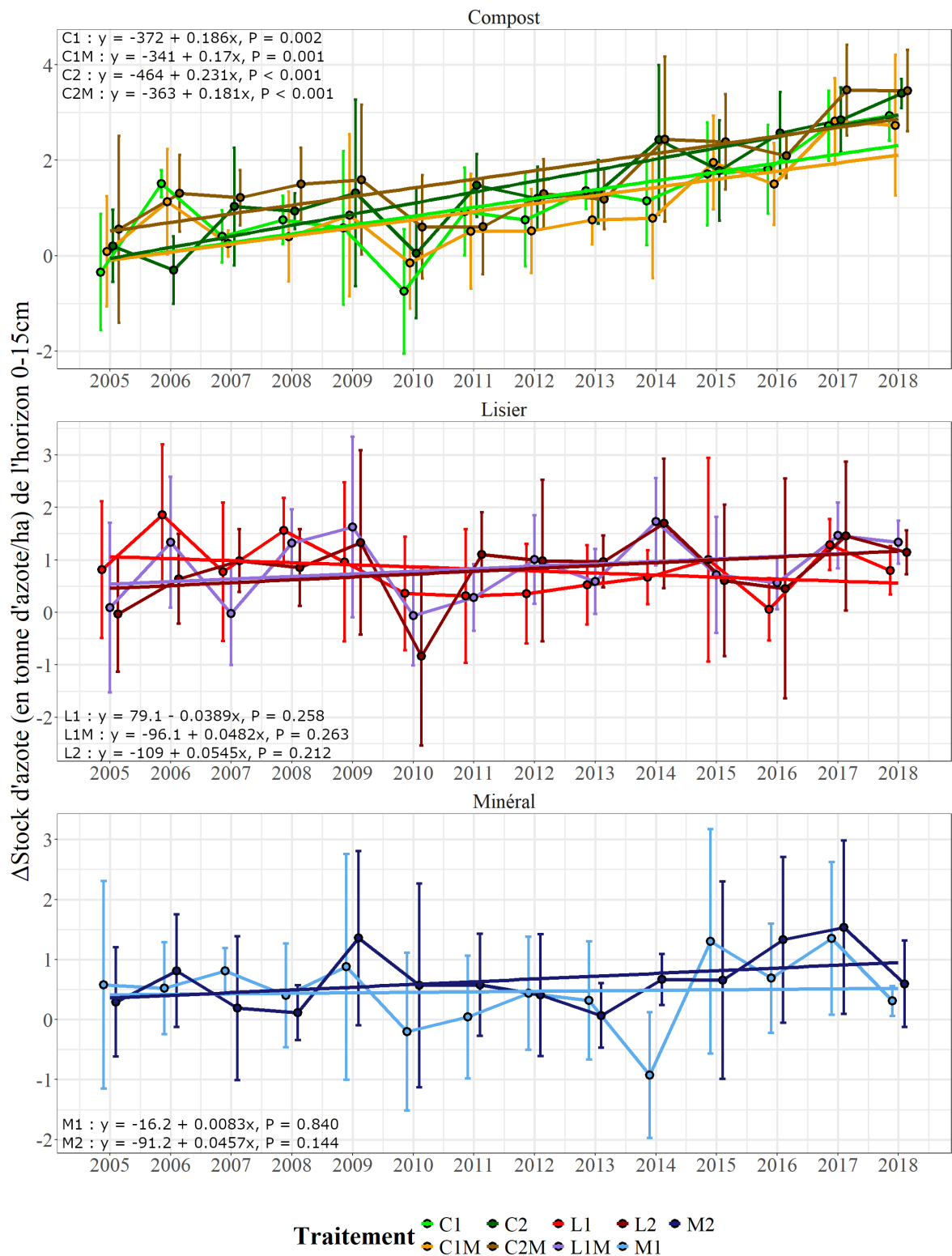


Figure 30 : Régressions linéaires  $\text{Im}(\text{Diff\_StockN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence de teneur en stock d'azote (en tonne d'azote/ha) de l'horizon 0-15cm par rapport au témoin ( $\Delta\text{Stock}$ ) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedael selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

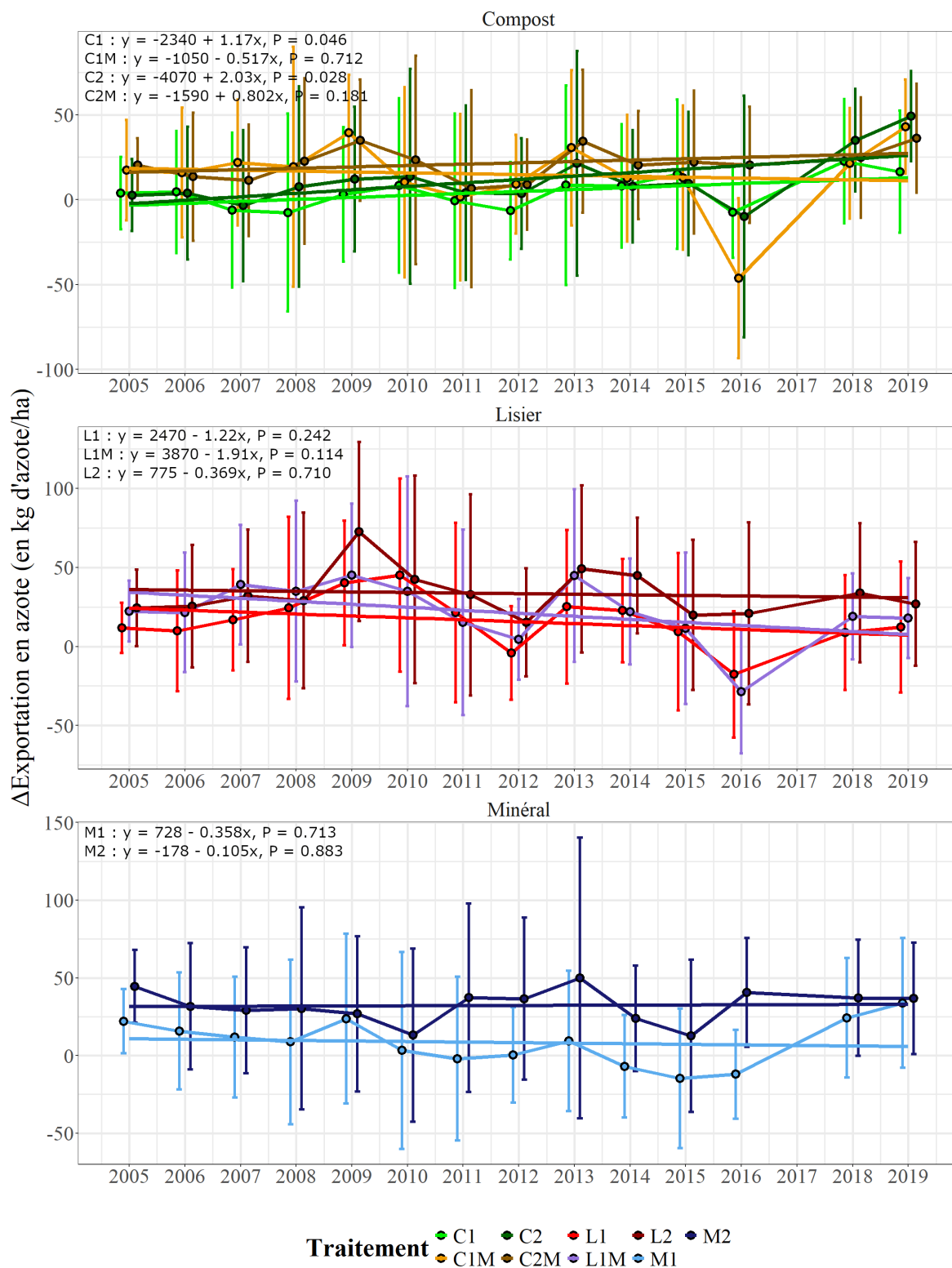


Figure 31 : Régressions linéaires  $lm(\text{Diff\_expN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'exportations en azote (en kg d'azote/ha) par rapport au témoin ( $\Delta\text{Exportation}$ ) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedael selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.

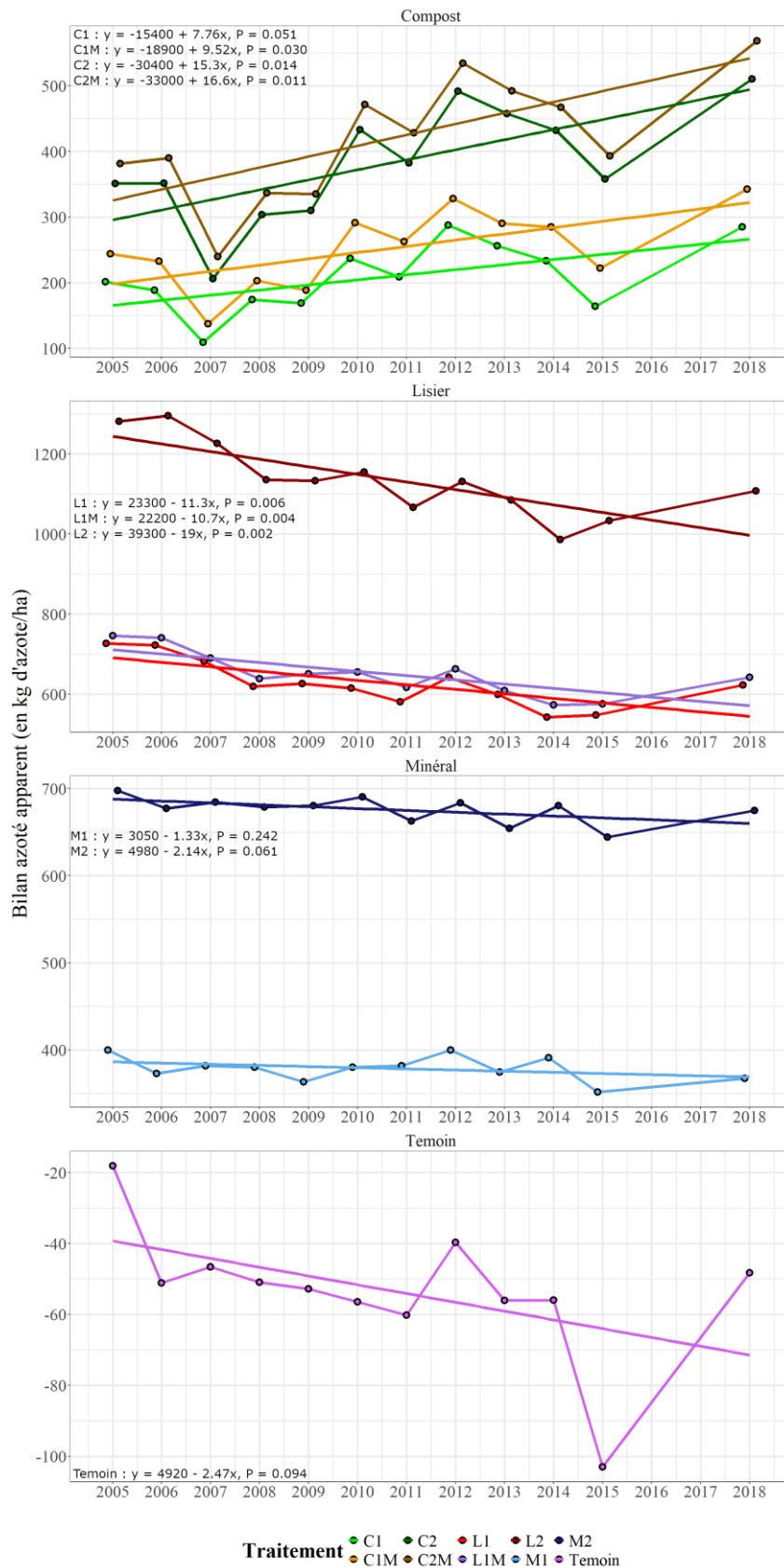


Figure 32 : Régressions linéaires  $\ln(\text{BNA} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution bilan azoté apparent (en kg d'azote/ha) sur la période 2005-2018 sur le site de la Sedael selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.

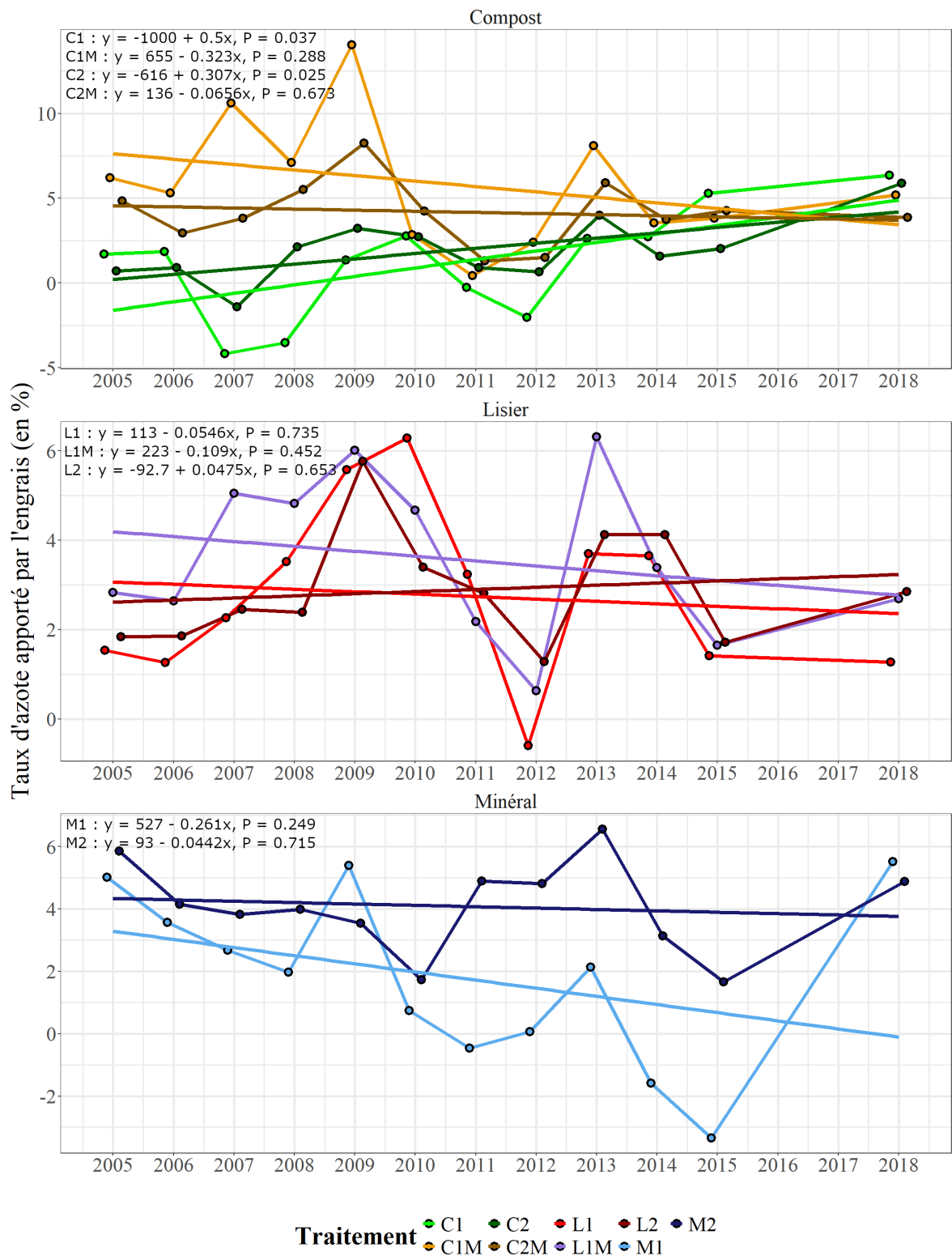


Figure 33 : Régressions linéaires  $lm(tN_{engrais} \sim Year)$  représentant l'évolution du  $tN_{engrais}$  (en %) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedaël selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les années 2016 et 2017 ne sont pas prises en compte, des valeurs étant manquantes.

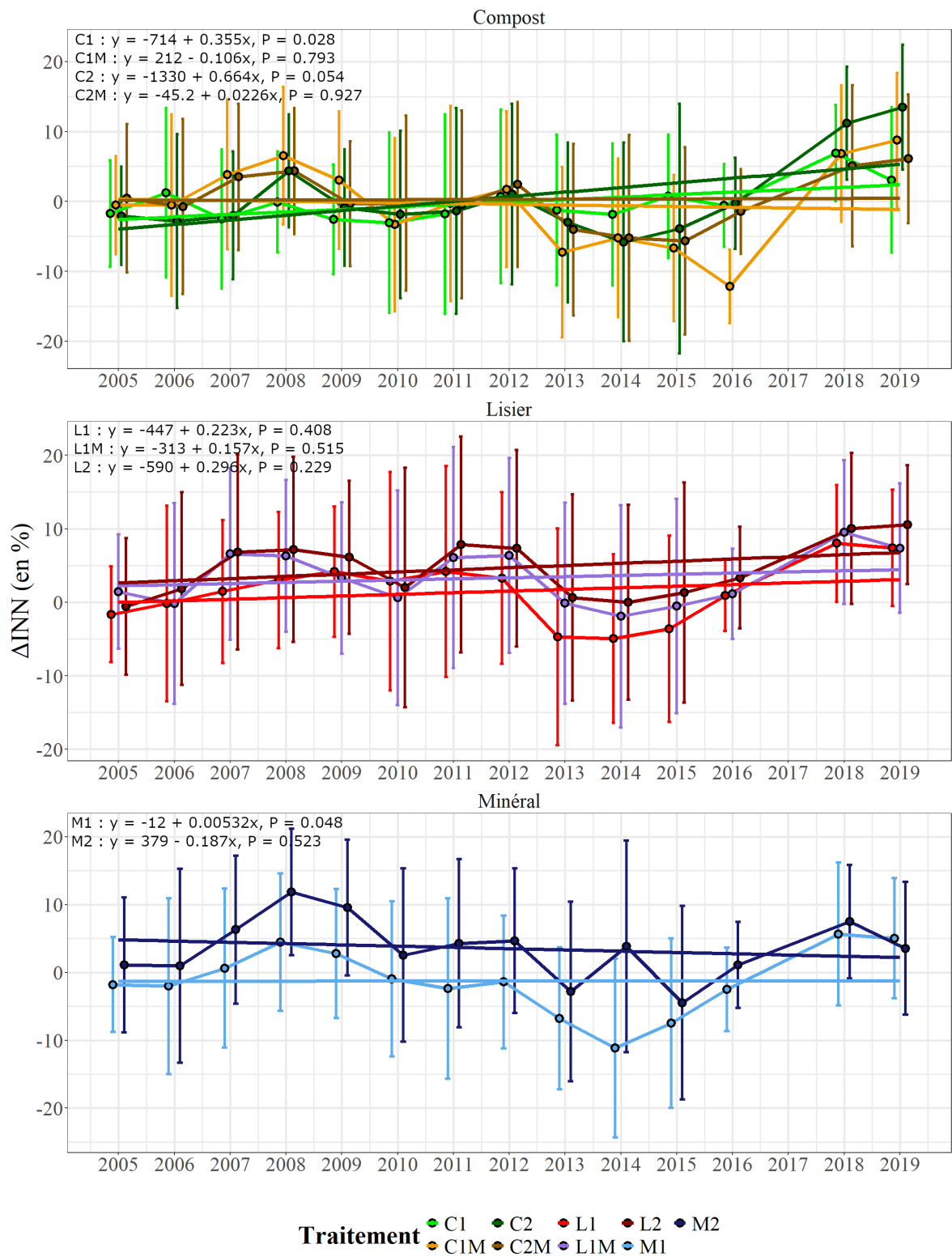


Figure 34 : Régressions linéaires  $\ln(\text{INN} \sim \text{Year})$  représentant l'évolution de la différence d'INN (en %) par rapport au témoin ( $\Delta\text{INN}$ ) sur la période 2005-2019 sur le site de la Sedael selon le traitement C1, C1M, C2, C2M, L1, L1M, L2, M1, M2. Les barres verticales sur chaque point indiquent l'écart-type.



## TABLE DES ANNEXES

Annexe I : Carte des isohyètes annuelles (en mm) de la Réunion (Meteo France 2024) .....	68
Annexe II : Carte des isothermes moyens (en °C) à la Réunion (Meteo France 2024).....	69
Annexe III : Gouvernance de la filière bovin laitier à la Réunion (Agreste 2021a) .....	70
Annexe IV : Gouvernance de la filière bovin viande à la Réunion (Agreste 2021b) .....	71
Annexe V : Gouvernance de la filière ovin et caprin viande à la Réunion (Agreste 2021c) .....	72
Annexe VI : Photographie des principales graminées des prairies de la Réunion .....	73
Annexe VII : Description détaillée du cycle de l'azote .....	75
Annexe VIII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur les exportations en azote .....	77
Annexe IX : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur les exportations en azote .....	78
Annexe X : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le bilan azoté apparent.....	79
Annexe XI : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le bilan azoté apparent .....	80
Annexe XII : Essais menés par l'IRAT sur prairie tropicale sur le CAU et le $tN_{engrais}$ .....	81
Annexe XIII : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur prairie tempérée sur le CAU et le $tN_{engrais}$ .....	82
Annexe XIV : Essais menés par l'IRAT et le CIRAD sur l'iNN .....	83
Annexe XV : Résultats de l'analyse des données sur le site du Lycée .....	84
Annexe XVI : Résultats de l'analyse des données sur le site de la Sedael.....	91