Impact agronomique et environnemental de la fertilisation sur le long terme

Bilan d'essais sur prairies à la Réunion

CC BY NC SA

SOMMAIRE

Introduction 3
Dispositif expérimental 4
Contexte géographique de l'étude 5
Contexte Climatique des zones d'essais 6
Qualité et valeur alimentaire des Fourrages 8
Production de fourrage 10
Productivité énergétique et azotée 12
Fertilité chimique des sols 14
Le stockage du carbone dans les sols 16
Emissions de gaz à effet de serre 18
La fourniture du sol en azote 20
Conclusion 21
Les porteurs de projet 22
Les partenaires 23
Productions scientifiques 24
Remerciements 26

INTRODUCTION

Le CIRAD (UMR SELMET) a réalisé, de 2004 à 2021 un programme expérimental sur la fertilisation des prairies.

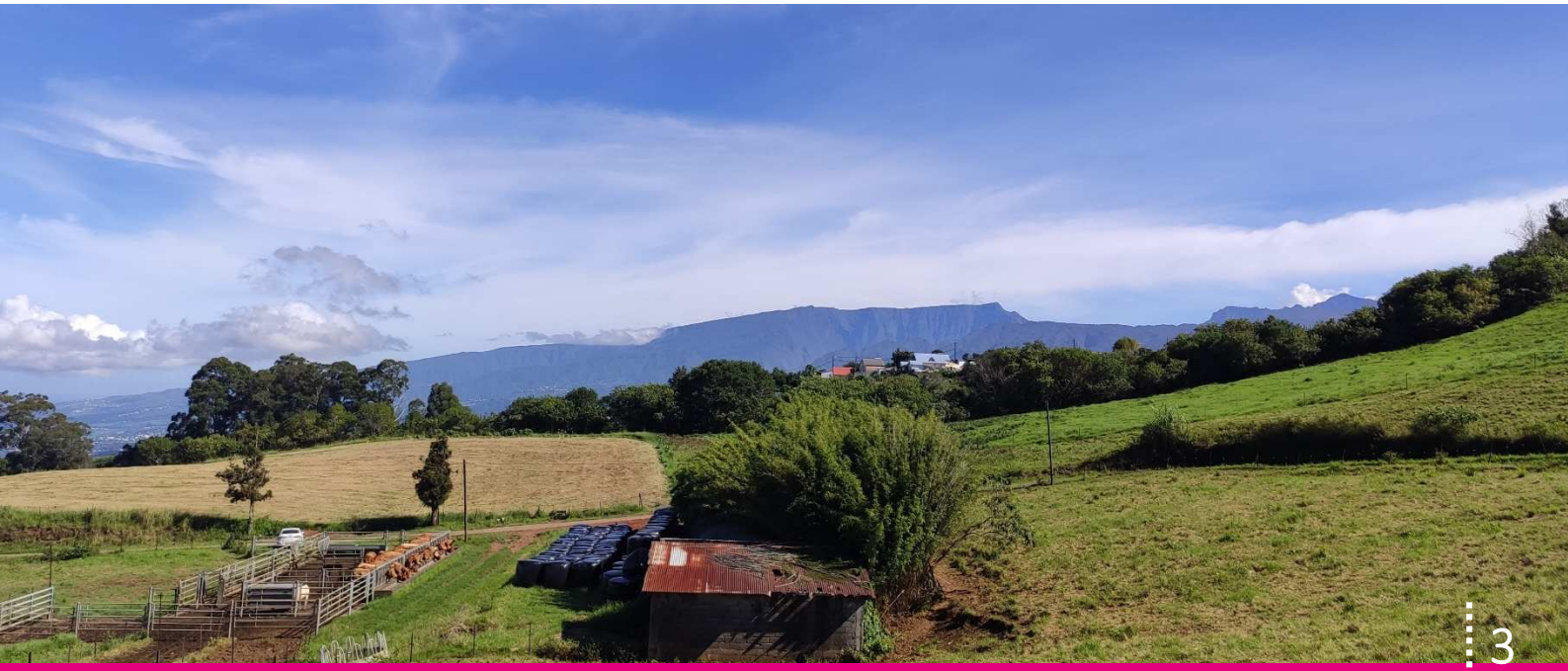
L'objectif général du dispositif était d'étudier les dynamiques agronomiques (plante et sol), et l'impact environnemental à moyen terme d'une fertilisation de prairies tropicales à base de d'effluents d'élevage ou d'azote minéral.

Le dispositif expérimental a été mis en place sur trois sites représentatifs de la diversité agroécologique des prairies à La Réunion (contexte pédoclimatique, espèces fourragères, sol) sur les exploitations des acteurs des filières bovines (SEDAEL, Lycée de Saint Joseph). Il compare, dans chacun de ces sites, les rendements fourragers et le « capital fertilité » des sols pour dix modalités de fertilisation minérale et/ou organique.

Le programme a été construit sur l'hypothèse qu'une fertilisation prolongée de prairies tropicales, à base de matière organique d'origine animale ou d'azote minéral, impactait différemment et durablement la fertilité des sols (disponibilité de l'azote, richesse en matière organique), la production fourragère et les bilans environnementaux (stocks et flux d'azote et de carbone). Il s'agissait de produire des références originales en contexte tropical sur les impacts environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, séquestration de carbone) d'une fertilisation organique et d'une fertilisation minérale, conduites sur le long terme, sur des prairies de graminées tropicales.

Ce document, qui s'appuie principalement sur le travail de thèse de Louis Axel EDOUARD RAMBAUT, rapporte les principales conclusions du programme expérimental et fournit des références locales sur les principaux indicateurs de suivi agronomiques et environnementaux des prairies.

Ces travaux ont été financés par le programme européen FEDER, dans le cadre des dispositifs de recherche KAPPA, CIEEL, SIIAM et CAPTERRE.



Dispositif expérimental

Le programme expérimental a été mis en place en 2004 et s'est terminé en 2020. Les modalités du protocole ont été définies en étroite collaboration avec les conseillers de l'ARP et des filières bovines (Sicarévia, Sicalait, Sedael).

MODALITÉS ÉVALUÉES

Six modalités de fertilisation azotée ont été évaluées. Le dispositif comprenait des modalités minérales (ammonitrate) et organiques (compost ou lisier de bovin) pures, et des modalités mixtes (engrais-lisier, engrais-compost). Le lisier et le compost provenaient de deux élevages laitiers de la Plaine des Cafres.

Modalité	Fertilisation	N *(kg/ha/an)*	P *(kg/ha/an)*	K *(kg/ha/an)*
Témoin	Pas de fertilisation	0	0	0
Minéral	70 kg N/ha d'ammonitrate	440	120	80
Lisier	40 m³/ha de lisier	720	454	958
Lisier & minéral	40 m³/ha de lisier et 30 kg N/ha d'ammonitrate	910	454	958
Compost	7,2 t/ha de compost	350	136	331
Compost & minéral	7,2 t/ha de compost et 56 kg N/ha d'ammonitrate	700	136	331

ITINÉRAIRE TECHNIQUE

De 6 à 7 coupes étaient réalisées par an. Elles étaient déclenchées en fonction du stade de maturité et de la hauteur d'herbe. C'est la parcelle la plus précoce qui déclenchait la coupe. La fauche était réalisée environ tous les 45 jours en été, et 75 jours en hiver à l'aide d'une tondeuse portative à bras, à 10 cm du sol. La fertilisation était réalisée dans les deux jours qui suivaient la coupe, à l'exception des modalités fertilisées avec du compost, où l'apport était réalisé une coupe sur deux. Du phosphore (120 kg P/ha) et du potassium (80 kg K/ha/an) étaient apportées en deux fois sur la modalité minérale, au début de la saison des pluies et de la saison fraîche.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A chaque récolte :

- Diagnostic de la composition floristique ;
- Mesure de la hauteur d'herbe ;
- Evaluation du rendement ;
- Prélèvement d'un échantillon pour analyse de la composition et valeur alimentaire du fourrage.

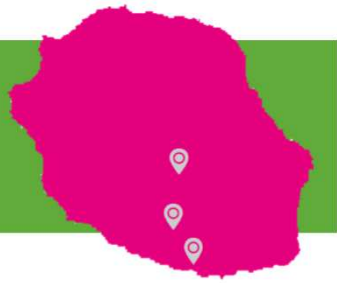
A chaque fertilisation organique :

- Prélèvement échantillons pour analyse de la composition chimique des lisiers et composts.

Sur l'année :

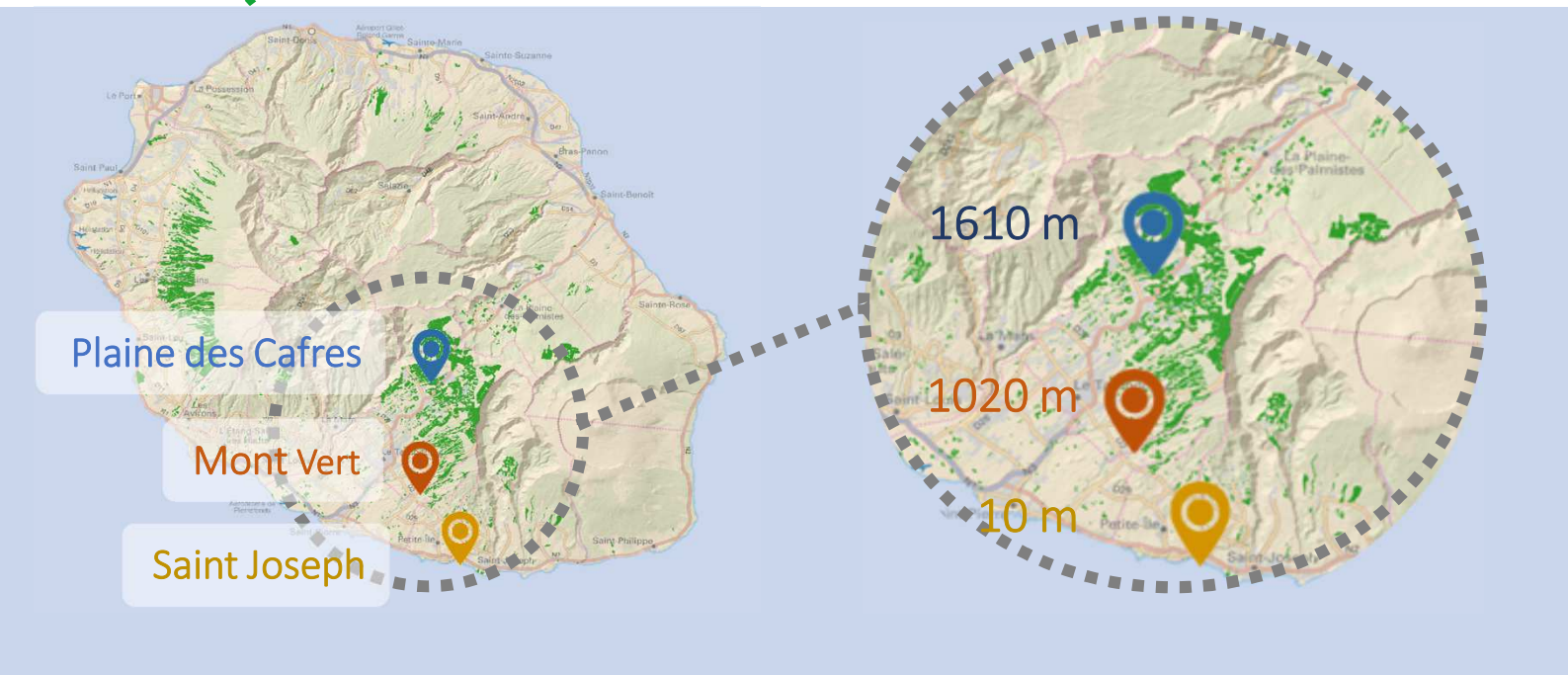
- Analyses de sol une fois par an, pour analyse de la composition chimique.

Contexte géographique de l'étude



LES SITES D'ESSAI

Les essais ont été menés sur trois sites, dans le sud de l'île, selon un gradient altitudinal. Ils ont été accueillis sur les fermes de la Sicalait, de la Sedael (Sicarévia), et du Lycée agricole de Saint Joseph. Ils ont été mis en place sur des prairies pérennes préexistantes, représentatifs de la diversité agroécologique de La Réunion.



Prairie de ray grass, dactyle, brome, sur sol volcanique (andosol perhydraté)

Prairie de Kikuyu, sur sol volcanique (andosol non perhydraté)

Prairie de chloris, sur sol sableux (arenosol)

Contexte climatique des zones d'essais

LES ZONES D'INFLUENCES

Les résultats présentés dans ce document peuvent être généralisés à des zones d'influence, dont les conditions climatiques sont similaires à celles des sites d'essai. Ces zones d'influence ont été définies en croisant les données pluriannuelles de température et de bilan climatique de chaque site.

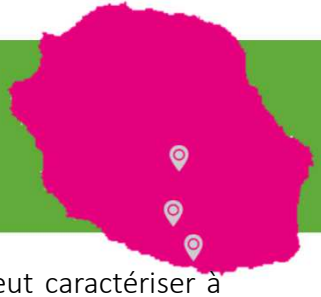
FOCUS

Le bilan climatique

Le BC donne une indication de la quantité de pluie disponible pour les cultures (mm/jour). Il se calcule en faisant la différence entre la somme des pluies et la somme des ETP (évapotranspiration potentielle).

$$BC_{mensuelle} = \frac{(Pluie - Etp)}{Nb\ de\ jours\ du\ mois}$$

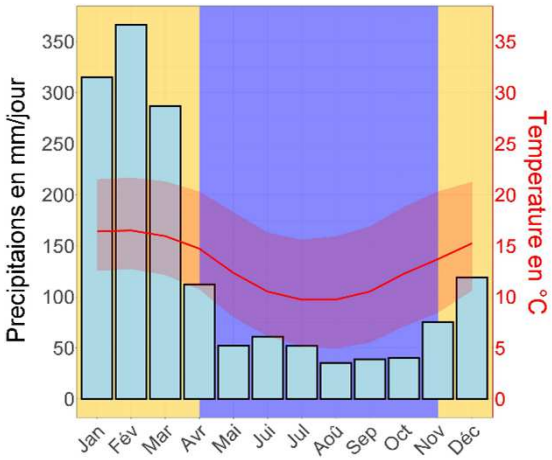
Quand le bilan climatique mensuel est négatif, la prairie a manqué d'eau. Quand il est positif, les pluies ont été suffisantes.



Chaque site d'essai présente des conditions météorologiques spécifiques, que l'on peut caractériser à travers trois indicateurs : la température (°C), la pluviométrie (mm) et le Bilan climatique (mm). L'année climatique se caractérise par deux grandes saisons : la saison des pluies, chaude et humide, de décembre à avril, et la saison fraîche, plus frais et séche, de mai à novembre, les mois d'avril et de novembre étant des mois de transition.

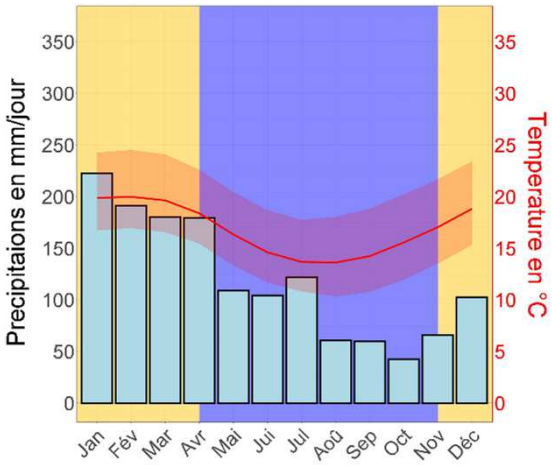
PLAINE DES CAFRES

Le climat de la ferme de la Sicalait est frais et humide, avec une température et pluviométrie moyennes annuelles de 13 °C et 1 550 mm. La saison des pluies est très pluvieuse, avec 200 à 800 mm de pluies concentrées entre janvier et mars. Les températures oscillent entre 10 et 21 °C. En saison fraîche, la pluviométrie est beaucoup plus faible, elle varie entre 39 et 75 mm par mois. La température diminue (variation de 5 à 20 °C), et les épisodes de gel sont courants. De juin à novembre, on observe un déficit hydrique, qui, cumulé à la baisse des températures, peut provoquer un arrêt de la végétation.



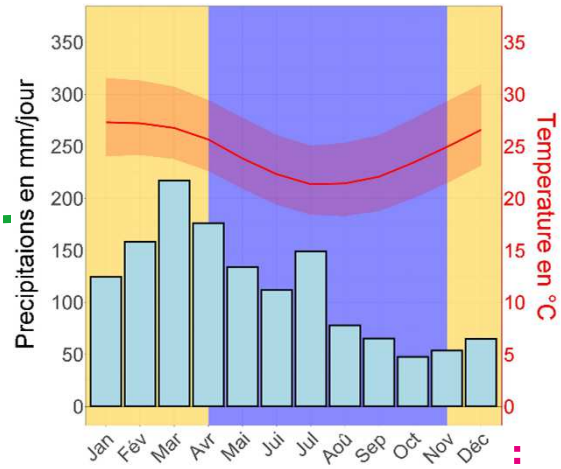
MI-PENTE

Le climat de la Sedael est chaud et humide, avec une température et pluviométrie moyennes annuelles de 17 °C et 1 440 mm. A la saison des pluies, la pluviométrie est moins importante qu'à la ferme de la Sicalait, mais plus étalée. Il pleut 900 mm en moyenne de décembre à avril. Les températures oscillent entre 15 et 24°C en moyenne. A la saison fraîche, la pluviométrie est plus faible, mais reste au-dessus de 40 mm (43 à 122 mm). La température varie de 10 à 21 °C. La période de déficit hydrique démarre en juin et se prolonge jusqu'à décembre, et est la plus forte en octobre.



LITTORAL

Le climat du Lycée est chaud et sec, avec une température et pluviométrie moyennes annuelles de 24 °C et 1 380 mm. A la saison des pluies, la pluviométrie est plus faible que pour les autres sites. Il pleut 740 mm en moyenne de décembre à avril. Les températures oscillent entre 22 et 32°C en moyenne. A la saison fraîche, la pluviométrie est légèrement plus faible (640 mm). La température varie de 18 à 29 °C. Malgré une pluviométrie plutôt régulière sur l'année, le déficit hydrique est marqué d'août à janvier, en raison des fortes températures et d'une évapotranspiration élevée.



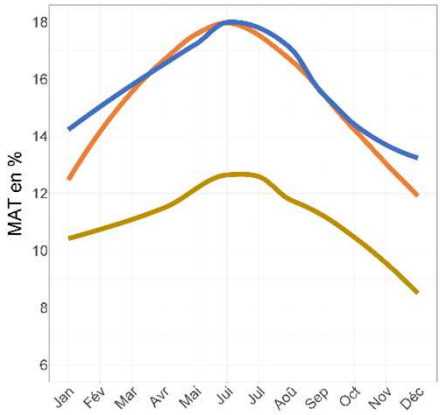
Qualité et valeur alimentaire des Fourrages

L'analyse des fourrages a porté principalement sur la MAT et la valeur UFL. Ces deux indicateurs ne sont pas impactés par le type de fertilisation. La qualité du fourrage va principalement varier en fonction du type de végétation, du stade de récolte, et de la saison. La valeur alimentaire est moins importante pour les fourrages tropicaux (chloris) que les fourrages tempérés et tropicales d'altitude.

LA MATIERE AZOTEE TOTALE

La MAT (g/kg MS) représente la teneur en azote (protéines et acides aminés) d'un fourrage. Elle varie en fonction de l'espèce, du stade de récolte, de la proportion feuille/tige, et de la saison. La variation annuelle de la MAT est assez proche pour les sites de la Sicalait et de la Sedael. Elle varie de 12 à 18 g/kg MS. Les valeurs MAT annuelles du Lycée sont beaucoup plus faibles. Elles varient de 8 à 13 g/kg MS au cours de l'année. Pour les trois sites la MAT est plus élevée durant la saison fraîche (mai - novembre).

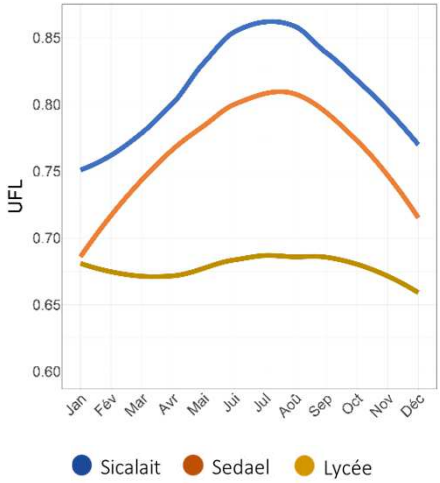
Evolution annuelle de la MAT



L'UNITE FOURRAGERE LAIT

L'UFL correspond à l'énergie nette que peut fournir le fourrage pour couvrir les dépenses d'entretien de l'animal et sa production de lait (1 UFL = 1 700 Kcal). A la ferme de la Sicalait, les valeurs UFL varient de 0,75 à 0,86 sur l'année. A la Sedael, elles sont légèrement plus faibles et varient de 0,68 à 0,81. Pour ces deux sites les UFL sont plus élevées en saison fraîche, de mai à octobre. Pour le Lycée, les UFL sont quasi-constantes au cours de l'année. Elles sont inférieures à celles des autres sites et varient de 0,66 à 0,69 en moyenne.

Evolution annuelle des UFL



FOCUS

Les autres indicateurs de la qualité et de la valeur alimentaire des fourrages

Le **taux de matière sèche (MS)** permet d'apprécier la conservation et la capacité d'ingestion du fourrage par l'animal. La **dégradabilité cellulosique des matières sèches** (dMS) permet d'évaluer la digestibilité du fourrage. La **cellulose brute** (CB) correspond à la teneur en parois végétales. Plus elle est élevée moins le fourrage est digestible. L'**Unité d'Encombrement** (UE) caractérise l'encombrement du fourrage, et permet de définir la quantité que pourra ingérer un animal en fonction de sa capacité d'ingestion. Les apports protéiques sont caractérisés par les **Protéines Digestibles dans l'Intestin** permises par l'**azote** (PDIN) et l'**énergie** (PDIE). Ils permettent d'équilibrer les apports de protéines de la ration en fonction des apports d'énergie. **Le lait permis** est la production de lait que peut atteindre une vache en consommant le fourrage. Il permet d'ajuster la complémentation.

La composition et la valeur alimentaire des fourrages varient entre sites d'essai. Cela s'explique par leurs couverts prairiaux et conditions pédo-climatiques spécifiques qui vont avoir un effet sur le potentiel nutritionnel du fourrage et sa production.

PLAINE DES CAFRES

Saison	MS (%MB)	CB (g/kg MS)	DMS (%)	MAT (g/kg MS)	UEL (g/kg MS)	UFL (u/ kg MS)	PDIE (g/kg MS)	PDIN (g/kg MS)	Lait permis (kg lait)
Sais. Des Pluies	22,6 *(19,2-24,8)*	31,4 *(31,5-32,4)*	60,3 *(58,1-63,1)*	14,7 *(12,9-15,9)*	1,11 *(1,09-1,13)*	0,76 *(0,73-0,78)*	88,2 *(82,6-92,5)*	92,6 *(81,9-101,0)*	12,6 *(11,3-16,8)*
Sais. Fraiche	23,7 *(19,1-28)*	27,9 *(23,6-29,6)*	66,5 *(63,4-70,1)*	15,3 *(12,8-17,6)*	1,08 *(1,06-1,10)*	0,82 *(0,79-0,85)*	91,9 *(84,0-99,4)*	96,5 *(81,0-111,3)*	15.5 *(14,2 - 17,0)*

MI-PENTE

Saison	MS (%MB)	CB (g/kg MS)	DMS (%)	MAT (g/kg MS)	UEL (g/kg MS)	UFL (u/ kg MS)	PDIE (g/kg MS)	PDIN (g/kg MS)	Lait permis (kg lait)
Sais. Des Pluies	20,7 *(16,8-23,8)*	31,83 *(30,5-32,8)*	55,3 *(52,3-58,3)*	13,6 *(11,6-15,2)*	1,14 *(1,11-1,17)*	0,72 *(0,69-0,75)*	86,5 *(79,4-91,7)*	86,11 *(73,1-96,0)*	11,1 *(9,8-12,6)*
Sais. Fraiche	20.4 *(16,7-24,0)*	29,9 *(28,8-31,3)*	60,2 *(57,2-63,7)*	15,2 *(13,4-16,9)*	1,1 *(1,01-1,13)*	0,76 *(0,73-0,79)*	91,8 *(85,6-97,3)*	95,95 *(84,7-106,6)*	13.1 *(11,6 - 14,6)*

LITTORAL

Saison	MS (%MB)	CB (g/kg MS)	DMS (%)	MAT (g/kg MS)	UEL (g/kg MS)	UFL (u/ kg MS)	PDIE (g/kg MS)	PDIN (g/kg MS)	Lait permis (kg lait)
Sais. Des Pluies	30,0 *(24,5-33,8)*	33,8 *(31,9-35,3)*	49 *(45,7-52,7)*	10,4 *(8,6-12,2)*	1,2 *(1,17-1,22)*	0,65 *(0,63-0,68)*	76,06 *(70,7-81,0)*	66,2 *(55,4-77,0)*	7,8 *(6,4-9,1)*
Sais. Fraiche	26,7 *(23,3-29,9)*	33,7 *(32,2-34,9)*	51,1 *(48,4-53,9)*	11,1 *(9,3-12,8)*	1,19 *(1,16-1,21)*	0,67 *(0,65-0,69)*	77,7 *(72,2-83,1)*	70,4 *(77,0-80,9)*	8,5 *(7,4-9,4)*

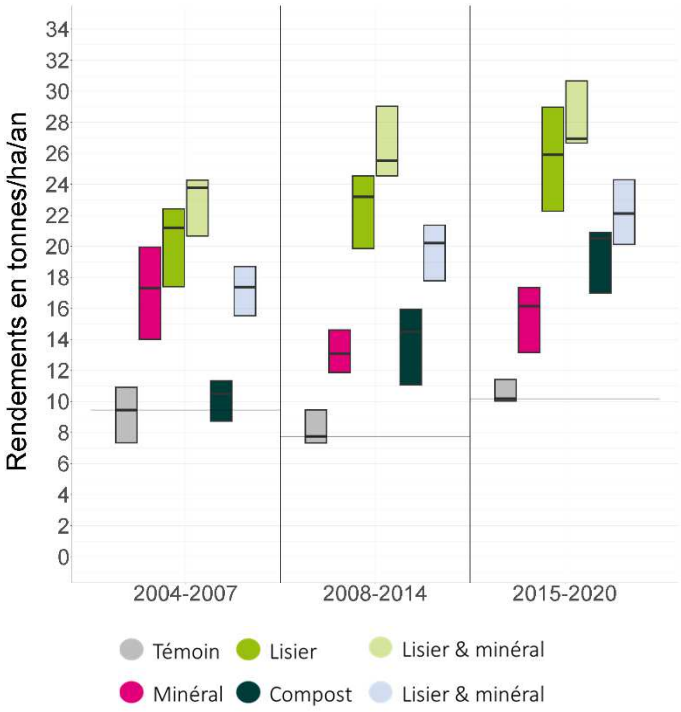
Production de fourrage

Les rendements obtenus au cours des essais ont évolué au fil des années. Sur la durée de l'essai, on observe, sur les trois sites, une variabilité interannuelle importante liée aux conditions climatiques.

Rendements annuels sur le site de la Sicalait

La gamme de variation des rendements annuels est différente en début (2004-2007), milieu (2008-2014) et fin d'essai (2015-2018). Cela s'explique par les effets sur le long terme du mode de fertilisation sur la nutrition et la croissance des prairies.

Variation des rendements, en début, milieu et fin d'essai, à la Sicalait



La fertilisation minérale seule conduit à des rendements satisfaisants les premières années, puis perd en efficacité avec le temps.

Le rendement est faible avec le compost, les premières années, car il a surtout un effet amendant. Mais les fertilisations organiques, à base de lisier ou de compost, permettent d'améliorer les rendements sur le long-terme

Les fertilisations mixtes, qui associent de l'engrais minéral au lisier ou au compost à chaque apport, offrent un bon compromis. Elles conduisent à de bons rendements immédiats, tout en permettant de forts rendements sur le long-terme. Dans la pratique, Il n'est pas nécessaire de faire un apport systématique d'engrais organiques et minéraux après chaque coupe. Il faut doser les apports en fonction des besoins de la prairie, et de la disponibilité de nutriments dans le sol au cours de l'année.

Les valeurs de rendement présentées ici ont été calculées sur les quatre dernières années d'essai (2014 - 2018), afin de montrer l'effet long terme du mode de fertilisation. Les récoltes ont été réalisées, en moyenne, après 50 jours de repousse en saison des pluies, et 80 jours de repousse en saison fraîche.

PLAINE DES CAFRES

A la ferme de la Sicalait, les rendements annuels varient de 10 à 23 t MS/ha/an. C'est la fertilisation de lisier qui obtient la valeur de rendement la plus élevée, par rapport au témoin, en fin d'essai. Le rendement par coupe est équivalent en saison des pluies et saison fraîche, avec un temps de repousse plus élevé en saison fraîche.

Mode de fertilisation	Rendement annuel (t MS/ha/an)	Rendement par coupe	
		Sai. Pluies (t MS/ha/cp)	Sai. Fraîche (t MS/ha/cp)
Non fertilisé	10,01 (8,9 - 11,8)	1,58 (1,1 - 2,1)	1,70 (1,2 - 2,1)
Ammonitrate	14,58 (11,9 - 17,3)	2,36 (1,9 - 2,9)	2,32 (2,0 - 2,8)
Lisier	22,91 (19,7 - 27,9)	4,14 (3,2 - 4,7)	3,75 (2,9 - 5,3)
Compost	17,33 (14,9 - 21,2)	3,12 (2,5 - 3,6)	2,85 (2,4 - 3,4)

MI-PENTE

A la Sedael, les rendements annuels varient de 15,5 à 18,4 t MS/ha/an. C'est la fertilisation de compost qui obtient la valeur de rendement la plus élevée, par rapport au témoin, en fin d'essai. Les rendements par coupe sont plus élevés en saison des pluies.

Mode de fertilisation	Rendement annuel (t MS/ha/an)	Rendement par coupe	
		Sai. Pluies (t MS/ha/cp)	Sai. Fraîche (t MS/ha/cp)
Non fertilisé	15,52 (11,9 - 17,7)	2,98 (2,3 - 3,4)	1,89 (1,7 - 2,8)
Ammonitrate	17,68 (16,4 – 20,0)	3,61 (2,9 - 4,5)	2,06 (1,8 - 2,6)
Lisier	17,58 (12,7 - 20,7)	3,43 (2,1 - 3,5)	2,62 (2,3 - 2,7)
Compost	18,44 (15,8 - 21,4)	3,80 (2,6 - 4,2)	2,39 (1,6 - 3,0)

LITTORAL

Au Lycée, les rendements annuels varient de 25,5 à 34 t MS/ha/an en moyenne. Ce sont les fertilisations à base de compost ou de lisier qui obtiennent la valeur de rendement la plus élevée, par rapport au témoin, en fin d'essai. Les rendements par coupe sont plus élevés en saison des pluies.

Mode de fertilisation	Rendement annuel (t MS/ha/an)	Rendement par coupe	
		Sai. Pluies (t MS/ha/cp)	Sai. Fraîche (t MS/ha/cp)
Non fertilisé	25,49 (20,5 - 29,9)	5,02 (3,1 - 6,3)	4,11 (3,0 - 4,5)
Ammonitrate	30,45 (22,3 - 40,6)	5,75 (4,0 - 7,9)	5,4 (4,0 - 6,5)
Lisier	34,08 (25,7 - 42,7)	7,18 (4,1 - 9,9)	5,6 (4,6 - 6,7)
Compost	33,93 (27,0 - 43,5)	6,89 (4,8 - 8,8)	5,67 (4,5 -7,1)

Productivité énergétique et azotée

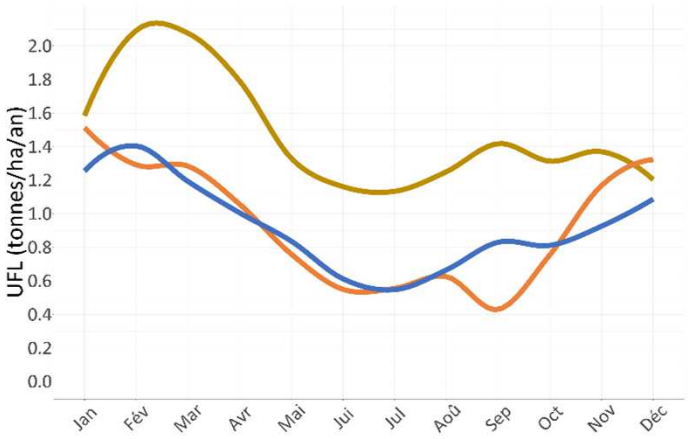
LA PRODUCTION D'UF ET DE MAT DES PRAIRIES

Le calcul de la production d'UFL et de MAT à l'hectare permet, avec le rendement en matière sèche, d'avoir une indication du niveau de couverture des besoins des animaux, et donc du niveau d'autonomie d'une exploitation. La production d'UFL et de MAT à l'hectare est calculée en multipliant le rendement par la teneur du fourrage en UFL ou MAT. Le calcul peut se faire à l'échelle de la coupe, du mois, de la saison ou de l'année.

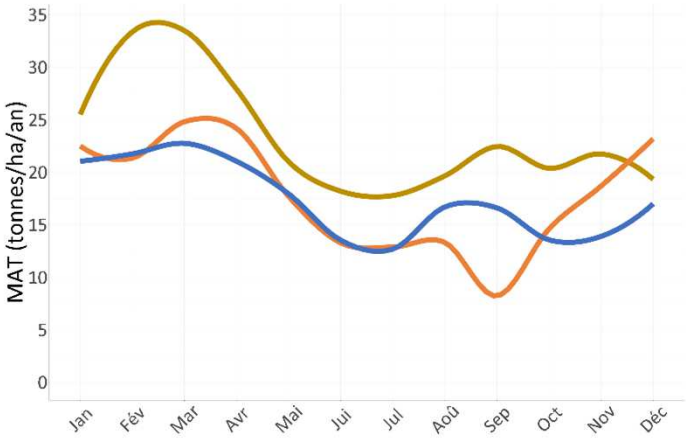
LES FACTEURS DE VARIATION

Pour les trois sites, que ce soit pour la production d'UFL ou de MAT, le principal facteur de variation est le niveau de rendement, la variation de teneur en UFL et MAT du fourrage étant moins prononcée que celle de la quantité de matière sèche. C'est pour cela qu'on observe des courbes de production annuelles d'UFL et de MAT qui ont la même forme. C'est pourquoi la productivité à l'hectare est plus importante au Lycée, malgré la plus mauvaise qualité du fourrage. Pour la même raison, la production de MAT et d'UFL est maximale en saison des pluies, quand le rendement est maximal, alors que la valeur UFL est MAT est plus faible.

Production mensuelle d'UFL des sites



Production mensuelle d'MAT des sites



Sicalait Sedael Lycée

Les valeurs présentées ici ont été calculées sur toute la durée du dispositif expérimental. La croix indique la moyenne par traitement.

Gamme de variation de la production annuelle de MAT et UFL selon le mode de fertilisation.

PLAINE DES CAFRES

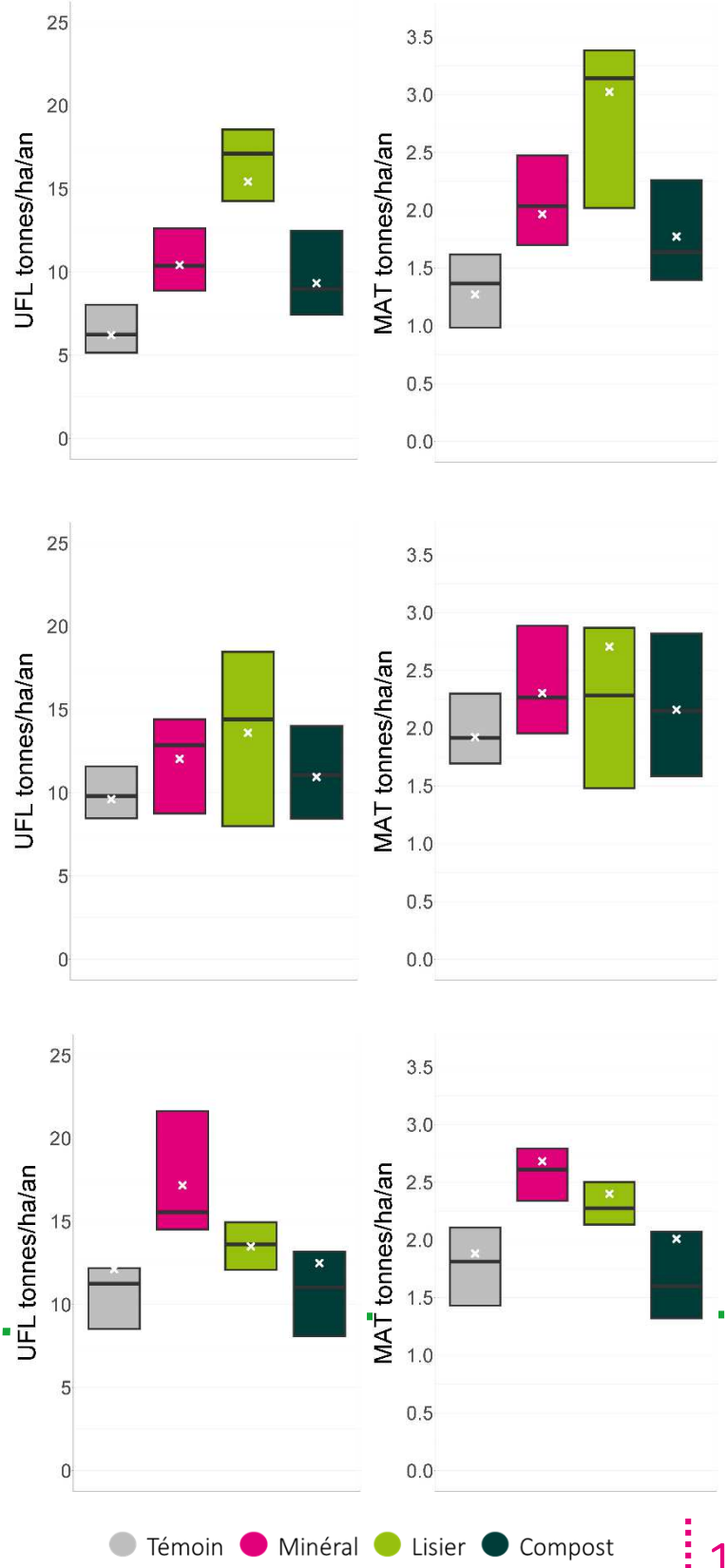
A la ferme de la Sicalait, la production d'UFL varie de 6,75 à 16,73 t/ha/an en moyenne. Elle est plus importante pour la fertilisation au lisier La fertilisation minérale a une production plus variable, entre années, que les autres, une année sur l'autre. La production de MAT varie de 1,28 à 3,04t/ha/an. Elle est la plus importante pour la fertilisation au lisier.

MI-PENTE

A la Sedael, la production d'UFL varie de 9,99 à 14,51 t/ha/an en moyenne. La production de MAT varie de 1,98 à 2,84 t/ha/an. Elle est plus importante pour la fertilisation au lisier. Les différences entre valeurs moyennes des modalités de fertilisation sont moins prononcées. La variabilité est plus importante pour la production de MAT. La fertilisation au lisier présente la plus grande gamme de variation dans les deux cas.

LITTORAL

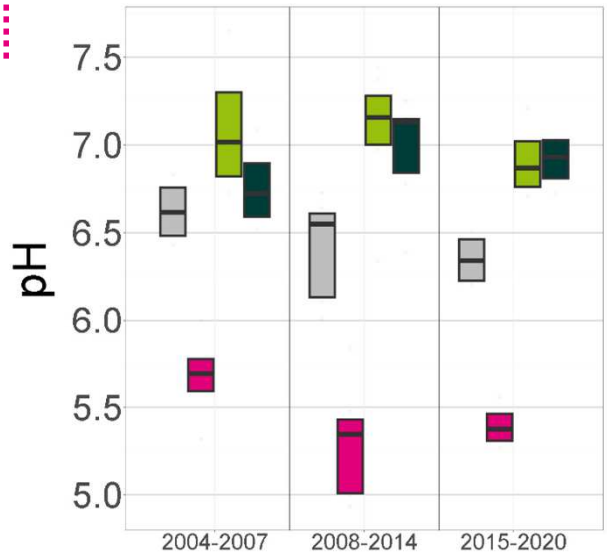
Au Lycée, la production d'UFL varie de 12,12 à 17,18 t/ha/an en moyenne. Les gammes de variation sont plus importante pour la fertilisation minérale. La production de MAT varie de 1,88 à 2,82 t/ha/an. Elle tend à être plus importante les fertilisations minérales et au lisier.



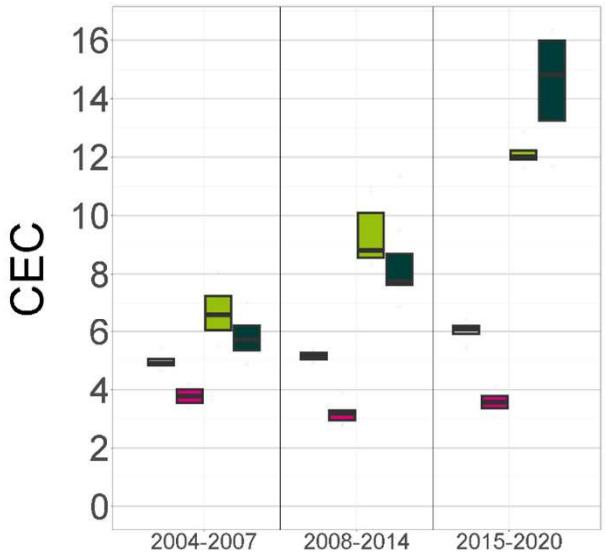
Fertilité chimique des sols

Les différentes fertilisations ont un effet sur le statut nutritif du sol (pH du sol, CEC, teneurs en nutriments).

Evolution du pH du sol, au Lycée



Evolution de la CEC du sol, au Lycée



Témoin Minéral Lisier Compost

Dans le cas d'une fertilisation minérale exclusive, il a été observé pour les trois sites, une acidification des sols, une baisse de la CEC et leur appauvrissement en nutriments, sauf pour l'azote.

Les applications de lisier et de compost maintiennent ou augmentent le pH du sol. Elles entraînent également une augmentation importante des concentrations du sol en nutriments (azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium). Les fertilisations organiques permettent de maintenir le statut du sol dans le temps, et donc de maintenir la production.

Les fertilisations mixtes maintiennent le pH et les concentrations en nutriments (azote, phosphore) dans le sol au même niveau qu'une fertilisation organique pure.

FOCUS

Le pH et la CEC du sol

Le **pH** traduit l'acidité d'un sol. Les sols prairiaux de la Réunion ont un pH qui varie de 4 à 8,5. Un pH proche de 7 optimise la disponibilité des éléments minéraux pour la plante. En dessous de 5,5 il est considéré comme très acide.

La **CEC** (Capacité d'Echange Cationique) apprécie la réserve en cations du sol (potassium, magnésium, calcium, sodium). La taille de ce "réservoir" va conditionner la fréquence et la dose des apports. Nos sols prairiaux ont une CEC qui varie de 2 à 45 mé/100 gr. La CEC est considérée comme normale entre 10 et 18 mé/100 gr, selon le type de sol, et faible en dessous de 10 mé/100 gr. Une faible CEC accroît le risque de pertes des nutriments par lessivage.

Les résultats d'analyse présentés ici sont les valeurs moyennes des deux dernières années de l'essai. Les échantillons de sols ont été prélevés entre 0 et 15 cm de profondeur. Ils ont été analysés au laboratoire d'analyse du Cirad de La Bretagne.

PLAINE DES CAFRES

A la ferme de la Sicalait, le pH du sol est bon, excepté pour la fertilisation minérale où il est un peu faible. La CEC est forte à très forte, la réserve en cations est bonne.

Traitement	pH eau	CEC *(cmol/kg sol)*	Azote *(g/100g)*	Phosphore *(mg/kg)*	Potassium *(mg/100g)*	Calcium *(mg/100g)*	Magnésium *(mg/100g)*	Sodium *(mg/100g)*
Non fertilisé	6,6	26,8	11,7	268	0,25	18,9	5,6	0,13
Amonitrate	5,6	17	11,9	262	0,21	18,6	2,8	0,06
Lisier	6,8	42,6	14,2	669	3,54	28,3	14,7	0,69
Compost	6,7	40,8	13,5	690	0,34	33,2	11,2	0,30

MI-PENTE

A la Sedael, le pH est faible pour le témoin et la fertilisation minérale. Il est normal pour les fertilisations organiques. La CEC est faible et très faible pour le témoin et la fertilisation minérale, alors qu'elle est très forte pour les fertilisations organiques.

Traitement	pH eau	CEC *(cmol/kg sol)*	Azote *(g/100g)*	Phosphore *(mg/kg)*	Potassium *(mg/100gr)*	Calcium *(mg/100g)*	Magnésium *(mg/100g)*	Sodium *(mg/100g)*
Non fertilisé	5,1	7,5	12,4	255	0,32	4,0	1,8	0,17
Amonitrate	4,8	6,2	13,9	323	0,35	3,5	1,2	0,11
Lisier	5,9	19,5	13,9	515	1,39	11,1	7,6	0,27
Compost	6	33,6	15,5	841	0,65	22,4	11,3	0,35

LITTORAL

Au Lycée, le pH du sol est bon, excepté pour la fertilisation minérale où il est un peu faible. La CEC est très faible pour la fertilisation minérale et le témoin. Elle est normale pour les fertilisations organiques.

Traitement	pH eau	CEC *(cmol/kg sol)*	Azote *(g/100g)*	Phosphore *(mg/kg)*	Potassium *(mg/100g)*	Calcium *(mg/100g)*	Magnésium *(mg/100g)*	Sodium *(mg/100g)*
Non fertilisé	6,2	6,1	1,5	151	0,19	3,9	1,98	0,25
Amonitrate	5,8	4,5	1,8	264	0,13	3,7	1,3	0,16
Lisier	6,8	10,6	2,4	357	1,36	6,8	3,6	0,21
Compost	6,9	14,4	3,2	523	1,21	9,7	4,5	0,28

Le stockage du carbone dans les sols

CARBONE ET ENJEU CLIMATIQUE

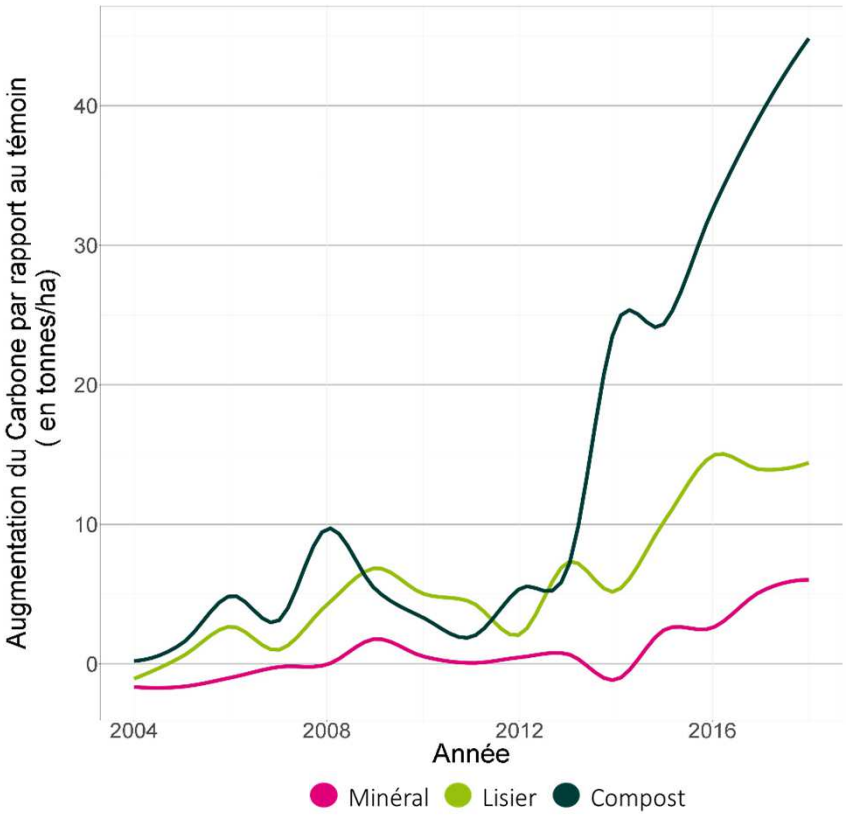
Le stockage de carbone dans le sol est au cœur des considérations climatiques et notamment du rôle de l'élevage. Selon le rapport du GIEC, la séquestration du carbone dans les sols est le mécanisme qui a le plus grand potentiel (90%) de réduction des émissions agricoles. Les prairies ont une réelle capacité à stocker du carbone, capacité renforcée par de bonnes pratiques agricoles, notamment la fertilisation. Bien que les systèmes de production de ruminants soient considérés comme une source majeure d'émissions de GES, le recyclage des effluents d'élevages sous formes de fertilisants contribuent à réduire le bilan GES de l'élevage sur le climat.

LE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS

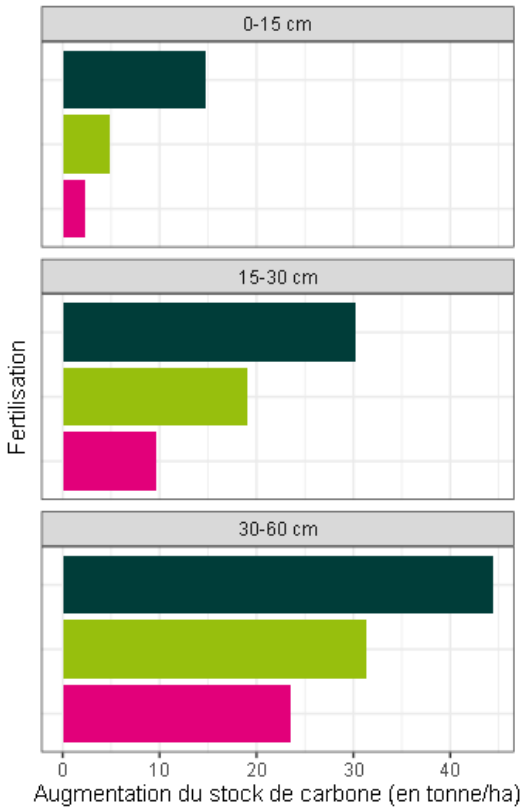
Tous les modes de fertilisation permettent d'augmenter le carbone du sol : jusqu'à plus de 3 t/ha/an.

On observe que les augmentations sont bien plus importantes quand la fertilisation est organique, en raison de l'apport direct de carbone. Le reste de l'augmentation du carbone du sol est dû aux dépôts racinaires associés à l'accroissement de la production végétative.

Pour l'andosol de la SEDAEL, l'augmentation du stock de carbone s'observe principalement dans les horizons les plus profonds (au-delà de 15 cm).



Augmentation du stock de carbone (0-15cm) par rapport au témoin sur le site du Lycée de St Joseph



Stock final de carbone, par rapport au témoin, à la SEDAEL en fonction de la profondeur

Ici sont présentés les valeurs de stockage de carbone (t/ha) par rapport au témoin, en 2018, sur les horizons de sol (0-15 cm) et (0-60 cm).

PLAINE DES CAFRES

Pour l'andosol de la ferme de la Sicalait le stockage de carbone sur l'horizon superficiel (0-15cm) est de 1,4 t/ha/an pour le compost, 0,75 t/ha/an pour le lisier, 0,4t/ha/an pour le minéral

Traitement	Stock Final (0-60 cm)	Gain par rapport au témoin	
		(0-15)	(0-60)
Non Fertilisé	214,18	-	-
Minéral	233,70	6,1	19,52
Lisier	254,54	11,52	40,36
Compost	265,05	22,15	50,87

MI-PENTE

Pour l'andosol de la Sedael le stockage de carbone sur l'horizon superficiel (0-15cm) est de 1,1t/ha/an pour le compost, 0,2 t/ha/an pour le lisier, 0,09t/ha/an pour le minéral. Jusqu'à 90 % du stockage de carbone lié à la fertilisation a lieu en dessous de 15cm.

Traitement	Stock Final (0-60 cm)	Gain par rapport au témoin	
		(0-15)	(0-60)
Non Fertilisé	327,66	-	-
Minéral	343,67	1,29	16,0
Lisier	381,79	2,93	54,1
Compost	401,58	16,2	74,0

LITTORAL

Pour l'arenosol du Lycée, le stockage de carbone sur l'horizon superficiel (0-15cm) est de 1,82t/ha/an pour le compost, 0,96 t/ha/an pour le lisier, 0,4 t/ha/an pour le minéral. Le sol étant très pauvre en carbone en début d'essai, la fertilisation a permis de doubler la teneur en carbone de sol.

Traitement	Stock Final (0-60 cm)	Gain par rapport au témoin	
		(0-15)	(0-60)
Non Fertilisé	88,46	-	-
Minéral	110,50	6,02	21,78
Lisier	129,90	14,41	41,20
Compost	184,74	27,40	96,03

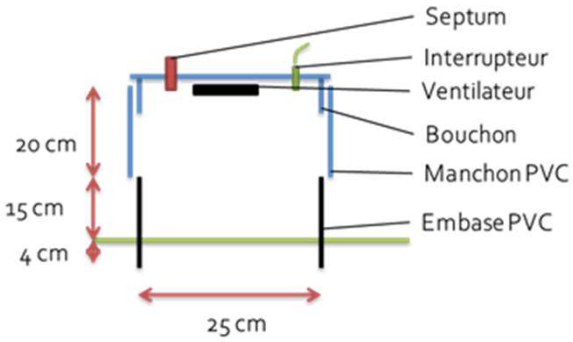
Emissions de gaz à effet de serre

Des mesures d'émissions de gaz à effet de serre (CO_2, N_2O) des parcelles d'essai ont été effectuées entre 2013 et 2021, sur les sites SEDAEL et SICALAIT, en saison fraiche et saison humide.

POURQUOI ?

Mesurer les émissions de CO2 et N2O permet de quantifier une part des pertes d'azote attribuables aux pratiques de fertilisations. Ces mesures permettent également de compléter l'évaluation environnementale des pratiques de fertilisation, notamment sur leur impact sur le réchauffement climatique.

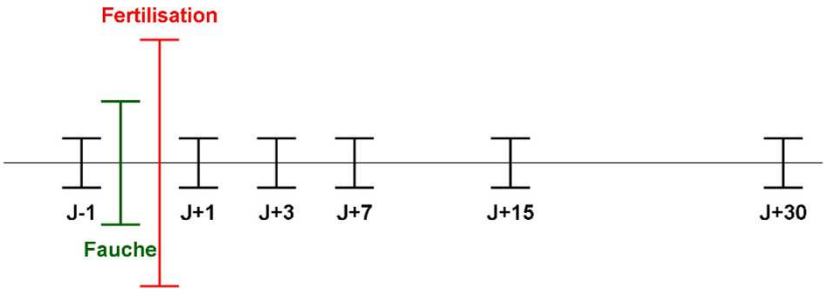
Chambre statique utilisée pour mesurer les émissions de gaz



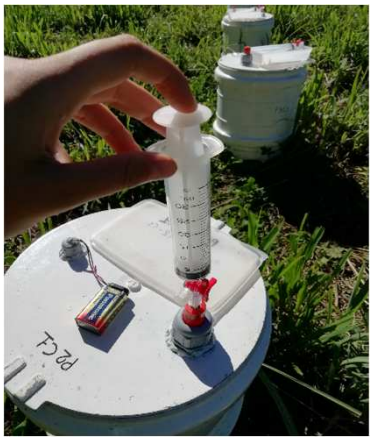
COMMENT ?

Les mesures ont été effectuées grâce à des chambres statiques positionnées sur les parcelles expérimentales. Elles ont été réalisées à des dates successives suivant de fertilisation. La mesure consistait à relever les changements de concentrations en CO2 et N2O au sein des chambres pendant 1 heure. Les variables environnementales étaient mesurées en parallèle (température et humidité de l'air et du sol).

Dates de prélèvements au sein d'une campagne



Prélèvement de gaz



EFFETS DU CLIMAT

Les mesures montrent des émissions bien plus importantes en saison des pluies qu'en saison fraiche. Elles sont jusqu'à 3 fois plus importantes pour les fertilisations à base de lisier, dues à l'effet- positif de la température et des précipitations sur les émissions.

EFFETS DE LA FERTILISATION

Tous les modes de fertilisation entrainent une augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Le lisier entraine les émissions de N_2O les plus importantes, suivi de l'ammonitrate puis du compost. Cela est dû à leur teneur en azote réactif pouvant être dénitrifié.

L'utilisation de compost à la place du lisier semble pertinent pour limiter les pertes en azote. Sa lente dégradation permet une disponibilité plus diffuse de l'azote. Cela même en prenant en compte les émissions en amont.

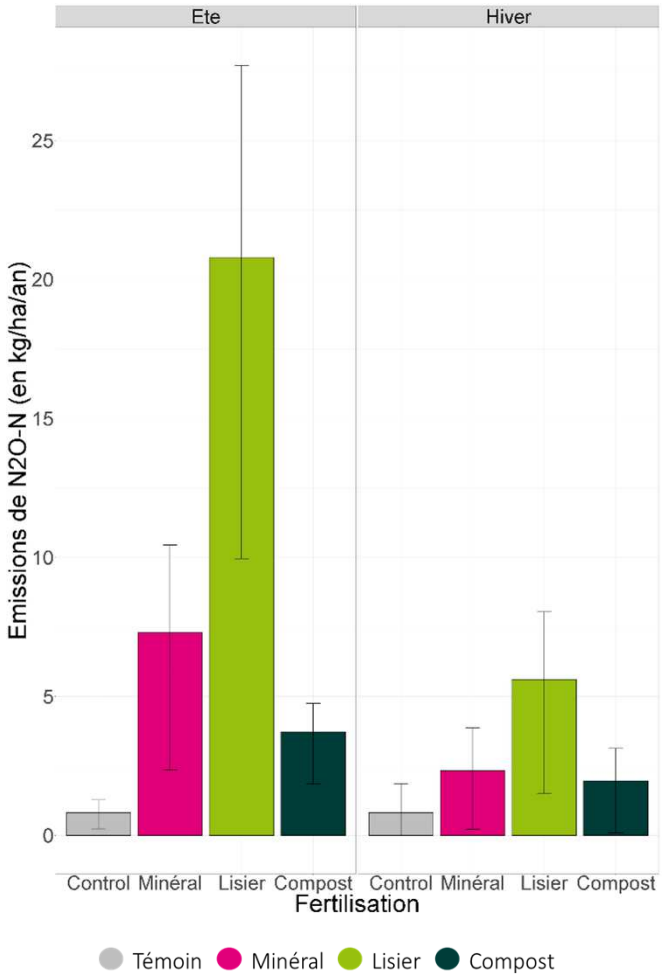
Raisonner la fertilisation, surtout en été, permet de limiter les pertes en azote, et les émissions de gaz à effet de serre.

FACTEUR D'EMISSION

Le facteur d'émission (%) représente les pertes d'azote sous forme de N_2O par la quantité de N apporté.

$$Facteur\ d'émission = N_2O_{émis} / N_{apporté}$$

Emissions de N_2O-N selon la période de l'année au site de la SICALAIT



Facteurs d'émissions moyens estimées

Traitement	Saison Fraîche	Saison Pluies
Non Fertilisé	-	-
Minéral	0,25 ± 0,16	1,09 ± 0,82
Lisier	0,49 ± 0,2	2,05 ± 1,35
Compost	0,15 ± 0,14	0,37 ± 0,34

La fourniture du sol en azote

LA MINERALISATION DU SOL

Le sol fournit de l'azote minéral à la prairie tout au long de l'année. Cette fourniture d'azote, prélevé par la plante, est issue de la minéralisation de l'azote organique du sol et des reliquats d'azote minéral de l'année précédente. L'azote organique qui s'accumule dans le sol provient des apports de matière organique provenant des engrais de ferme, des restitutions au pâturage et des tiges, feuilles et racines sénescentes, mais aussi d'une fraction des apports d'azote minérale de l'année précédente, transformé et réorganisé par les bactéries et les champignons. Cette dernière constitue un compartiment très actif, facilement minéralisable. Elle est d'autant plus importante que le sol a reçu des apports d'azote importants au cours des années précédentes.

EVALUATION DE LA FOURNITURE DU SOL

Les essais ont permis d'estimer la fourniture moyenne du sol en azote , et sa gamme de variation, pour chaque site. Pour cela, nous avons calculé l'exportation en azote des parcelles témoins, en multipliant le rendement de la prairie par sa teneur en azote, sur l'année. Les témoins n'étant pas fertilisés, nous avons fait l'hypothèse que l'azote qui a été absorbé et exporté par la prairie a été fourni par le sol.

VALEURS DE FOURNITURE EN AZOTE DES SOL

Les fournitures en azote du sol pour les sites d'essais varient de 170 à 340 kg N/ha/an. Ces valeurs moyennes peuvent être appliquées aux zones représentées sur la carte, tout en sachant que de fortes variations peuvent être observées selon le type de sol, son pH, le secteur et les pratiques de fertilisation.

Sites	*Année* *(kg N/ha/an)*	*Sais. Pluies* *(kgN/ha/sais.)*	*Sais. Sèche* *(kgN/ha/sais.)*
Sicalait	220 (170-255)	125 (105-150)	90 (55-115)
Sedael	300 (260-340)	180 (135-235)	115 (95-130)
Lycée	270 (230-290)	160 (120 - 180)	110 (100 - 130)

CONCLUSION

Ce programme expérimental a permis d'identifier les effets agronomiques et environnementaux d'une fertilisation organique et/ou minérale, sur le long-termes sur les prairies de la réunion.

Les résultats soulignent les bénéfices à long terme d'une fertilisation organique à base d'effluents d'élevage liquides ou solides. Ses avantages se manifestent au niveau du statut nutritif du sol, influençant ainsi positivement la production fourragère sur le long terme. Elle a de plus un effet positif majeur sur le stockage du carbone dans le sol.

Ces essais mettent également en avant les impacts négatifs à long terme d'une fertilisation minérale systématique, sans apport de matières organiques. Bien qu'elle ait des effets immédiats sur les rendements, elle présente des désavantages pour la production fourragère et le statut nutritif du sol sur le long terme.

Les fertilisations mixtes, quant à elles, combinent l'efficacité immédiate des fertilisations minérales avec les avantages à long terme des fertilisations organiques. Elles montrent l'importance d'équilibrer et de complémenter les fertilisations en fonction des besoins des prairies au fil des saisons et des années.

Ce projet long-termes a permis de produire des références locales sur les principaux indicateurs de suivi agronomiques et environnementaux des prairies.

Le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement est un organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes. Le Cirad est présent dans plus d'une centaine de pays des zones tropicales et méditerranéennes avec lesquels il mène des activités de coopération. Il joue un rôle d'appui au développement agricole et rural des territoires d'outre-mer français.

Le Cirad œuvre depuis 60 ans à La Réunion. C'est sa première base ultramarine. Ses actions de recherche et développement ont contribué à l'essor des filières agricoles et alimentaires réunionnaises d'aujourd'hui. Elles accompagnent désormais leur transition écologique et leur adaptation au changement climatique. Les projets à La Réunion sont financés par l'Union européenne (Feader et Feder), l'État, la Région et le département de La Réunion.

L'unité mixte Systèmes d'ELevage MEditerranéens et Tropicaux est un collectif qui intervient à l'échelle internationale sur l'élevage en zones méditerranéennes et tropicales. L'unité regroupe une centaine d'agents issus du Cirad, de l'INRAE et de l'Institut Agro Montpellier. Elle conduit des recherches, des enseignements et des expertises dans le but d'accompagner les transitions durables des activités d'élevage.

L'unité est présente à La Réunion depuis la fin des années 80. Le Pôle Elevage de Saint-Pierre a accompagné le développement et la professionnalisation des filières d'élevage. Il a entre autres fortement contribué à caractériser le contexte écologique des systèmes fourragers pour élaborer des itinéraires techniques adaptés, et développer des outils d'aide à la décision pour les piloter. Actuellement, une quinzaine d'agents sont rattachés au Pôle Elevage de Saint-Pierre.

La SICA Réunion Viande fédère 330 éleveurs de bovins viande à La Réunion assurant 94 % de la production locale. Elle a été créée en 1979. Elle assure l'organisation de la production de viande bovine sur l'île, le conseil aux éleveurs, et la mise sur le marché de la viande de bœuf locale, sous l'appellation Bœuf Pays.

Lancée en 1962 à l'initiative d'éleveurs laitiers réunionnais, la Société Intérêt Collectif Agricole du Lait est une coopérative agricole réunionnaise organisatrice de la production et de la collecte de lait à La Réunion. La SICALAIT collecte le lait d'une cinquantaine de fermes, soit environ 18 millions de litres de lait en 2019.

Créé en 1950, le lycée professionnel agricole de Saint-Joseph a été le premier établissement d'enseignement agricole à La Réunion. Il est aujourd'hui constitué de 4 entités ; un lycée professionnel agricole (LPA), un centre de formation professionnelle et de promotion agricoles (CFPPA), un centre de formation d'apprentis agricoles (CFAA) et une exploitation agricole.

L'Association Réunionnaise de Pastoralisme est un organisme de conseil et de développement agricole qui accompagne les éleveurs bovins, ovins, caprins et équins dans la gestion de leur système fourrager, de l'implantation des prairies à la valorisation finale du fourrage produit.

RAPPORTS

- Darroux, S.-C., 2014. Etude de l'impact du niveau et du type de fertilisation sur les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre N2O et CO2 sur les prairies d'altitude à la Réunion (Mémoire de fin d'étude). ISTOM, CIRAD, Saint Pierre - La Réunion.

- Detaille, C., 2013. Création d'un nouveau module de croissance prairiale pour le modèle de simulation d'exploitations bovines laitières G AMEDE (Mémoire de fin d'étude). ESA Anger- La Réunion.

- Henri, J., 2018. Étude de l'impact du niveau et du type de fertilisation sur les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre N2O et CO2 sur les prairies d'altitude à la Réunion (rapport de stage de césure). AgroParisTech, Cirad, Saint Pierre - La Réunion.

- Lepabic, L., 2013. Analyse des effets du type et du niveau de fertilisation sur l'évolution du rendement fourrager, la teneur du sol en Azote et la CEC à la Réunion (rapport de stage de fin d'études). Ensai; CIRAD - UMR SELMET, Saint Pierre - La Réunion.

- Miralles-Bruneau, M., 2013. Première approche des émissions de protoxyde d'azote (N2O) en prairie fauchée, pour différentes modalités de fertilisation, à la Réunion (Rapport d'expérimentation). CIRAD ES UMR SELMET, Saint Pierre - La Réunion.

THESES

- Edouard Rambaut, L.-A.E. 2022. Impact agronomique et environnemental d'une fertilisation long-terme Mixte-Minérale et Organique - sous prairies tropicales le long d'un gradient altitudinal

- Laurent, C. 2019. Biodisponibilité du cuivre et du zinc pour les plantes et les vers de terre: interactions entre les effets de fertilisants organiques sur le long-terme et des organismes sur l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol.

- Nobile, C. 2017. Phytodisponibilité du phosphore dans les sols agricoles de La Réunion fertilisés sur le long-terme avec des résidus organiques : la dose d'apport est-elle le seul déterminant à prendre en compte ?. Sciences agricoles. Université de la Réunion.

ARTICLES

- Edouard Rambaut, L.-A., Vayssières, J., Versini, A., Salgado, P., Lecomte, P., Tillard, E., 2022. 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. Geoderma 425, 116025.

- Edouard Rambaut, L.-A.E., Tillard, E., Vayssières, J., Lecomte, P., Salgado, P., 2022. Trade-off between short and long-term effects of mineral, organic or mixed mineral-organic fertilisation on grass yield of tropical permanent grassland. European Journal of Agronomy 141, 126635.

- Laurent, C., Bravin, M.N., Blanchart, E., Crouzet, O., Pelosi, C., Lamy, I., 2022. Does a decade of soil organic fertilization promote copper and zinc bioavailability to an epi-endogeic earthworm? Environ Sci Pollut Res 30, 17472–17486.

- Laurent, C., Bravin, M.N., Crouzet, O., Pelosi, C., Tillard, E., Lecomte, P., Lamy, I., 2020. Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. Science of The Total Environment 709, 135927.

- Laurent C, Bravin M, Pelosi C, Crouzet O, Lamy I. 2018. Drivers of copper availability in agriculturals soils receiving long-term applications of organic fertilizers. . SETAC Europe. Rome : SETAC Europe, 1 p. SETAC Europe Annual Meeting. 28, Rome, Italie, 13 Mai 2018/17 Mai 2018.

- Laurent C, Bravin M, Crouzet O, Pelosi C, Lamy I. 2020. La fertilisation organique augmente-t-elle à long terme la biodisponibilité du cuivre et du zinc dans les sols agricoles ?. In : 7ème séminaire du Réseau d'Ecotoxicologie terrestre et aquatique, programme et livre des résumés. Lamy Isabelle (ed.), Coutellec Marie-Agnès (ed.), Denaix Laurence (ed.), Faburé Juliette

- Miralles-Bruneau Maëva, Pierre Patrice, Boyer A., Riviere Expédit, Delaby Luc, Tillard Emmanuel. 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. *Fourrages* (249) : 69-76.

- Nobile, C.M., Bravin, M.N., Becquer, T., Paillat, J.-M., 2020. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation. Chemosphere 239, 124709.

- Nobile, C.M., Bravin, M.N., Tillard, E., Becquer, T., Paillat, J.-M., 2018. Phosphorus sorption capacity and availability along a toposequence of agricultural soils: effects of soil type and a decade of fertilizer applications. Soil Use Manage 34, 461–471.

- Nobile C., Bravin M., Ravelet M., Tillard E., Becquer T., Paillat J.M.. 2015. In : Körner Ina (Ed.). *Book of abstracts RAMIRAN 2015*. Hambourg : Hamburg University of Technology, p. 54-54. International conference rural-urban symbiosis RAMIRAM 2015. 16, 2015-09-08/2015-09-10, Hambourg (Allemagne).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à ce programme expérimental.

Un grand merci à Expédit RIVIERE, qui a mis en place et conduit ce projet toutes ces années, ainsi qu'à Philippe LECOMTE, Paulo SALGADO, et Emmanuel TILLARD qui ont assuré la coordination du programme expérimental, et assuré sa pérennité. Merci aux membres de l'équipe qui ont participé à leur niveau à la réalisation du projet : Louis-Axel EDOUARD RAMBAUT, Serge NABENEZA, Gisèle MOREL, Xavier JUANES, Maëva MIRALLES BRUNEAU, Jonathan VAYSSIERE.

Merci à l'équipe du laboratoire Cirad UR Recyclage et Risque, de Saint Denis, pour la réalisation des analyses de sols : Patrick LEGIER, Marion COLLINET, Jocelyn IDMOND, Marie-Charlyne GAUVIN, Aïdée LOMBARD, Dolin MOUNY-LATCHIMY, Charles HOAREAU, Marie-Frède GAUVIN, David DIOT, Lisa LLOSE. Merci également aux chercheurs de l'UR pour l'analyse des données de sol : Matthieu BRAVIN, Céline LAURENT, Cécile NOBILE, Laurent THURIES, Antoine VERSINI.

Merci à INRAE Transfert EnVisaGES et l'UMR R&R pour les analyses des gaz à effet de serre en laboratoire : Anne-Sophie LISSY, Claire CHEVASSUS-ROSSET.

Merci à l'UMR AIDA, pour la mise à disposition des données météorologiques et cartographiques : Mickaël MEZINO, Raymond NATIVEL, Pierre TODOROFF.

Un grand merci aux étudiants et ingénieurs en volontariat de service civique qui ont participé aux suivis à l'analyse des données : Sophie-Charlotte DARROUX, Charles DETAILLE, Juliette HENRY, Lore LEPABIC, Amandine PIERRE, Camille TOURANGIN.

Merci aux partenaires du projet, pour la mise à disposition des sites d'essai et leur participation à la conception du projet : Vladimir BARBET-MASSIN (ARP), Jean-Luc BENARD (SEDAEL), Charles-Emile BIGOT (Sicarévia), Jacques LE PETIT (SICALAIT), George MAHE (Lycée agricole de Saint Joseph), Alex MICHON (ARP).

REDACTION

Louis-Axel EDOUARD RAMBAUT

Maëva MIRALLES BRUNEAU

PARTICIPATION

Mickaël MEZINO (fonds cartographiques)

Jean-Philippe CHOISIS (révision)

CREDITS PHOTO

Maëva MIRALLES BRUNEAU

Louis-Axel EDOUARD RAMBAUT

Marie DERESSE

Emmanuel TILLARD

EDITION

octobre 2023, à Saint Pierre, La Réunion

Cette œuvre est mise à disposition selon les conditions de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International

cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT

SELMET

COMPROMIS EN AGRICULTURE POUR DES TERRITOIRES DURABLES
CAP TERRE

UNION EUROPÉENNE

l'Europe s'engage à La Réunion

PRÉFET DE LA RÉGION RÉUNION
Liberté
Égalité
Fraternité

REGION REUNION

DÉPARTEMENT DE LA Réunion

DISPOSITIF DE PROGRAMMATION EN PARTENARIAT
PROGRAMME DE RECHERCHES
CIRAD À LA RÉUNION