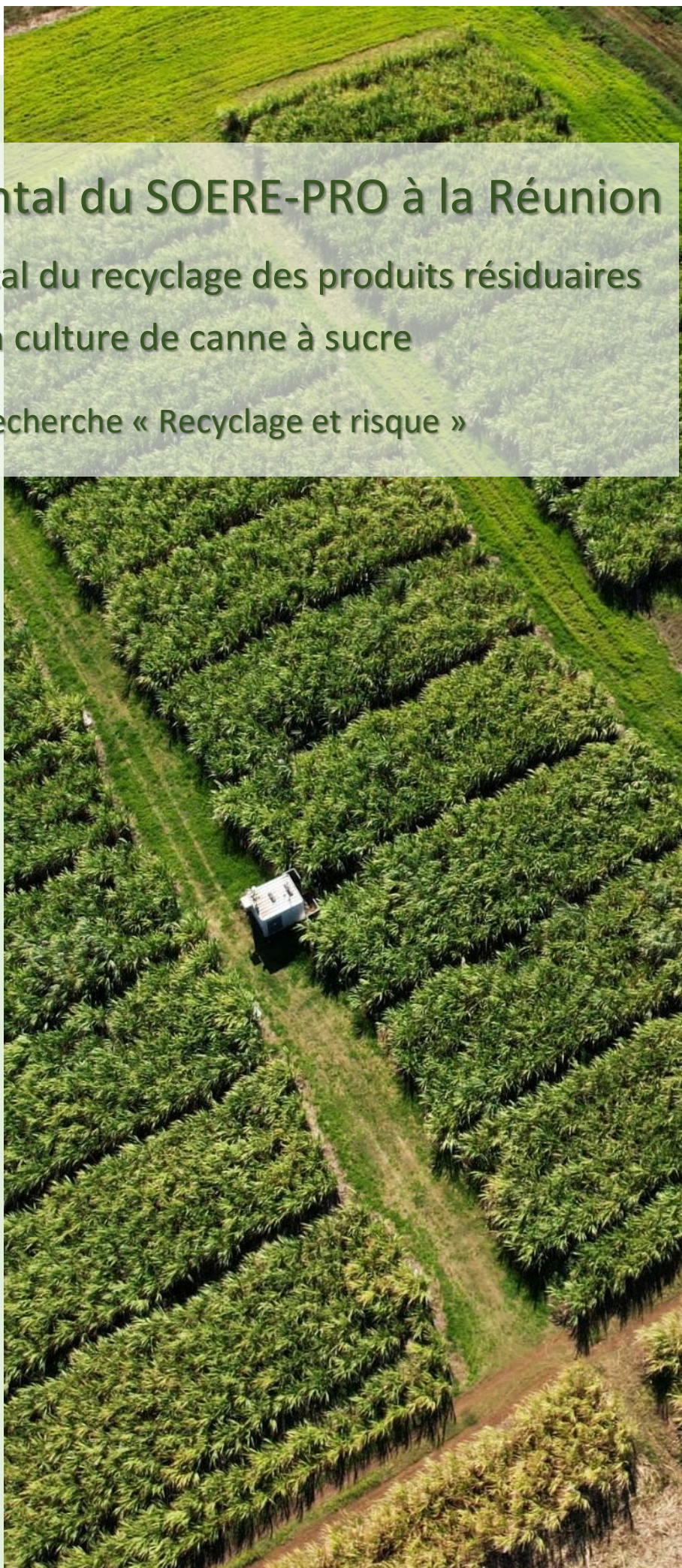


Le dispositif expérimental du SOERE-PRO à la Réunion

Impact agro-environnemental du recyclage des produits résiduaux organiques en culture de canne à sucre

CIRAD – Unité de recherche « Recyclage et risque »



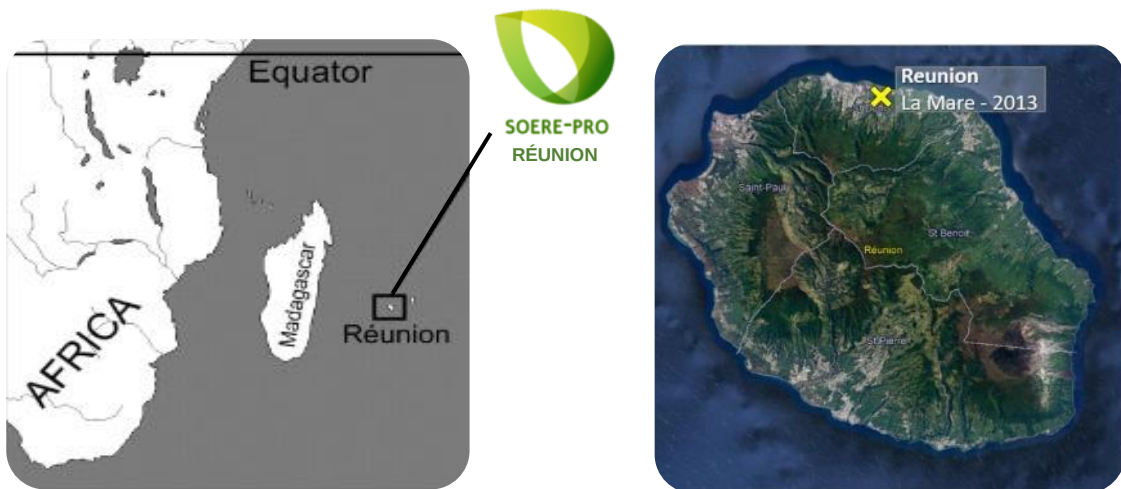
SOMMAIRE

1. Contexte
2. Dispositif expérimental
3. Suivi analytique
4. Équipements du site
5. Résultats



Contexte

Le **SOERE-PRO** ou « *Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaire*s* Organique*s** », est un **réseau de sites expérimentaux** en plein champ de longue durée ayant pour objectif d'observer les **effets agronomiques et environnementaux de l'apport de Produits Résiduaire*s* Organique*s*** (PRO) sur les différents compartiments d'un système de grandes cultures.



Implanté sur le site de **la Mare**, à **Sainte-Marie**, le site de **La Réunion** est l'un des **cinq sites expérimentaux** au champ **fortement instrumentés** du réseau, les autres se trouvant en France métropolitaine et au Sénégal.





Le site du SOERE PRO à La Réunion en quelques mots :

- issu d'un partenariat **CIRAD – Veolia Eau / Runéo** ; DPP CapTerre ; fonds européens FEADER,
- intégré dans le réseau Soere-Pro **INRAe** et l'Infrastructure de Recherche **AnaEE France**,



- essai implanté en **2013** pour une période de **20 ans**,
- en culture de **canne à sucre**,
- un contexte **pédoclimatique original**,
- comparaison de **boues séchées** de la station d'épuration du Grand Prado, de **lisiers de porc** et de **litières de volailles**.



La fertilisation organique en contexte insulaire :

- **recyclage** des matières organiques,
- économie circulaire et **autonomie** territoriale,
- **agroécologie** et **santé des sols**.



➔ Atténuation du changement climatique

Les principaux objectifs scientifiques sont :

- d'étudier les **cycles des éléments majeurs** (carbone, azote, phosphore, potassium...),
- de quantifier le flux de **contaminants** vers le sol, l'eau et la plante,
- de mesurer les **émissions de gaz** (CO_2 , N_2O , NH_3) vers l'atmosphère,
- de suivre l'évolution de la **microbiologie**, de la **faune du sol** et des **organismes pathogènes**.



Contexte pédoclimatique

- **Nitisol** (sol tropical intensément altéré)
- **État initial** (0-40 cm) :
 - $\text{pHeau} = 6,1$
 - $\text{MO} = 2,5 \%$
 - argiles = 70 % (kaolinite et oxydes de fer et d'aluminium)
- **Climat Tropical** : $T_{\text{moy}} = 25^\circ\text{C}$ / $P_{\text{moy}} = 2000 \text{ mm}$

Dispositif expérimental

Modalités expérimentales

La superficie totale de l'essai est de **1,2 ha**, répartie en **5 blocs de 6 parcelles (300m²)**. Le calcul des besoins de la canne en éléments fertilisants se base sur un objectif de rendement est de **120 T/ha**. Les modalités sont complémentées en éléments minéraux si besoin.

Premier cycle de canne 2013-2021 : « conduite réaliste »

- **Témoin minéral (T)** avec apport annuel
- **Témoin agronomique tournant (Ta)**
- **Boues de Step (BA)** avec apport annuel
- **Compost de boues de Step et de déchets verts (CB)** avec apport triennal
- **Lisier de porc (LP)** avec apport annuel
- **Litière de volaille (LV)** avec apport triennal

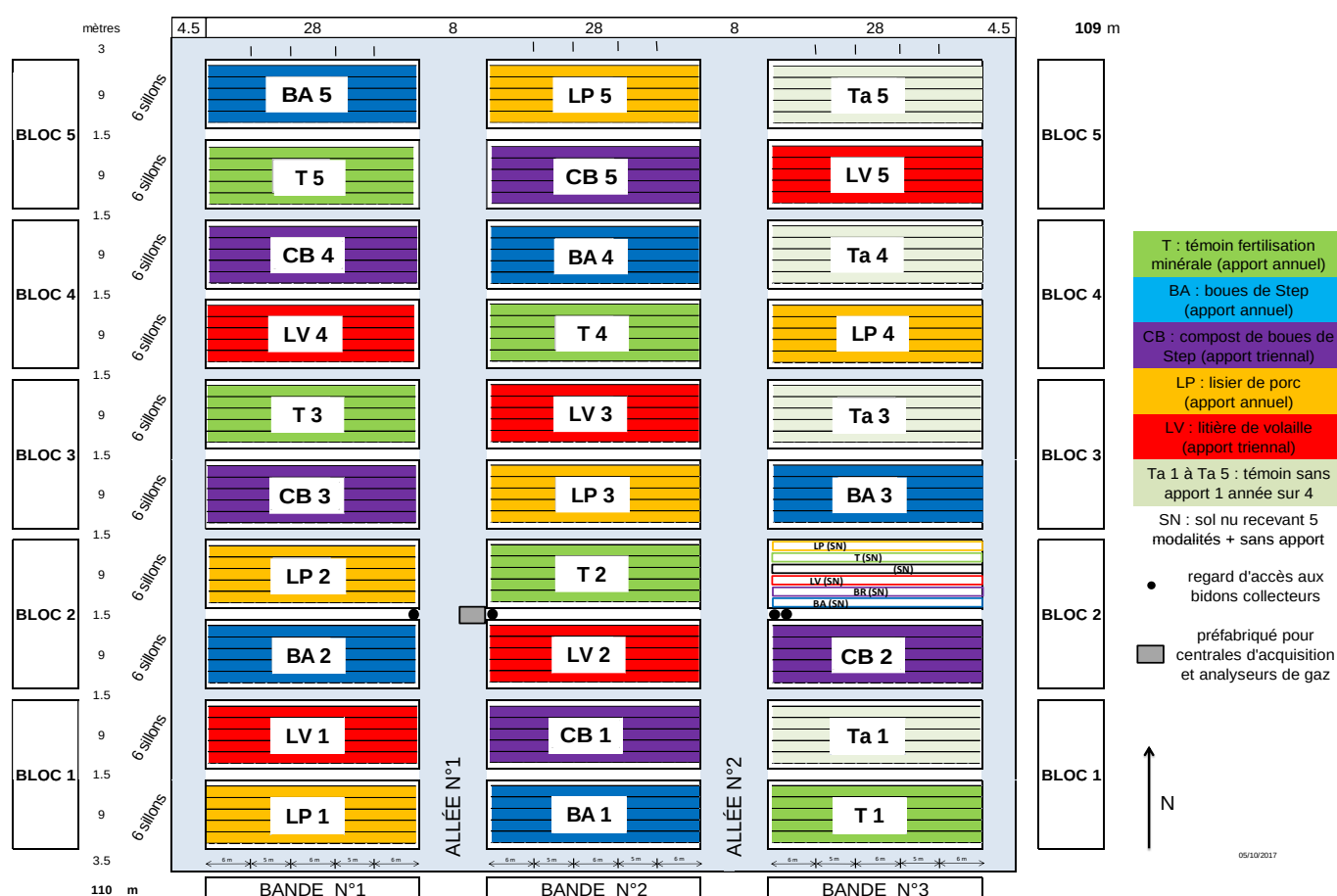


Figure 1 : Plan expérimental du dispositif SOERE PRO Réunion 2013 - 2020

Second cycle de canne 2021-2028 : « conduite organique »

Après 8 années de culture, l'essai a été labouré et replanté.

Depuis 2021, les modalités de fertilisation de l'essai Soere-Pro Réunion sont les suivantes (figure) :

- **Boues de Step avec apport annuel (BA-P)**, la dose apportée est la même que lors du cycle précédent (anciennement BA), le calcul des apports se base toujours sur une limitation par le phosphore.
- **Boues de Step avec apport annuel piloté par l'Azote (BA-N)**, (anciennement BR/CB avec apport triennal), qui amène de par la composition des boues à un quasi doublement des apports de boues sur ces parcelles en comparaison avec la modalité BA-P.
- **Lisier de porc avec apport annuel (LP)**, plus de limite en P, calcul des apports basé sur les besoins en azote.
- **Litière de volaille avec apport annuel (LV)**, plus de limite en P, calcul des apports basé sur les besoins en azote.
- **Témoin minéral (T)** avec apport annuel d'engrais minéral.
- **Zéro apport d'azote et double apport d'azote minéral (TON et T2N).**

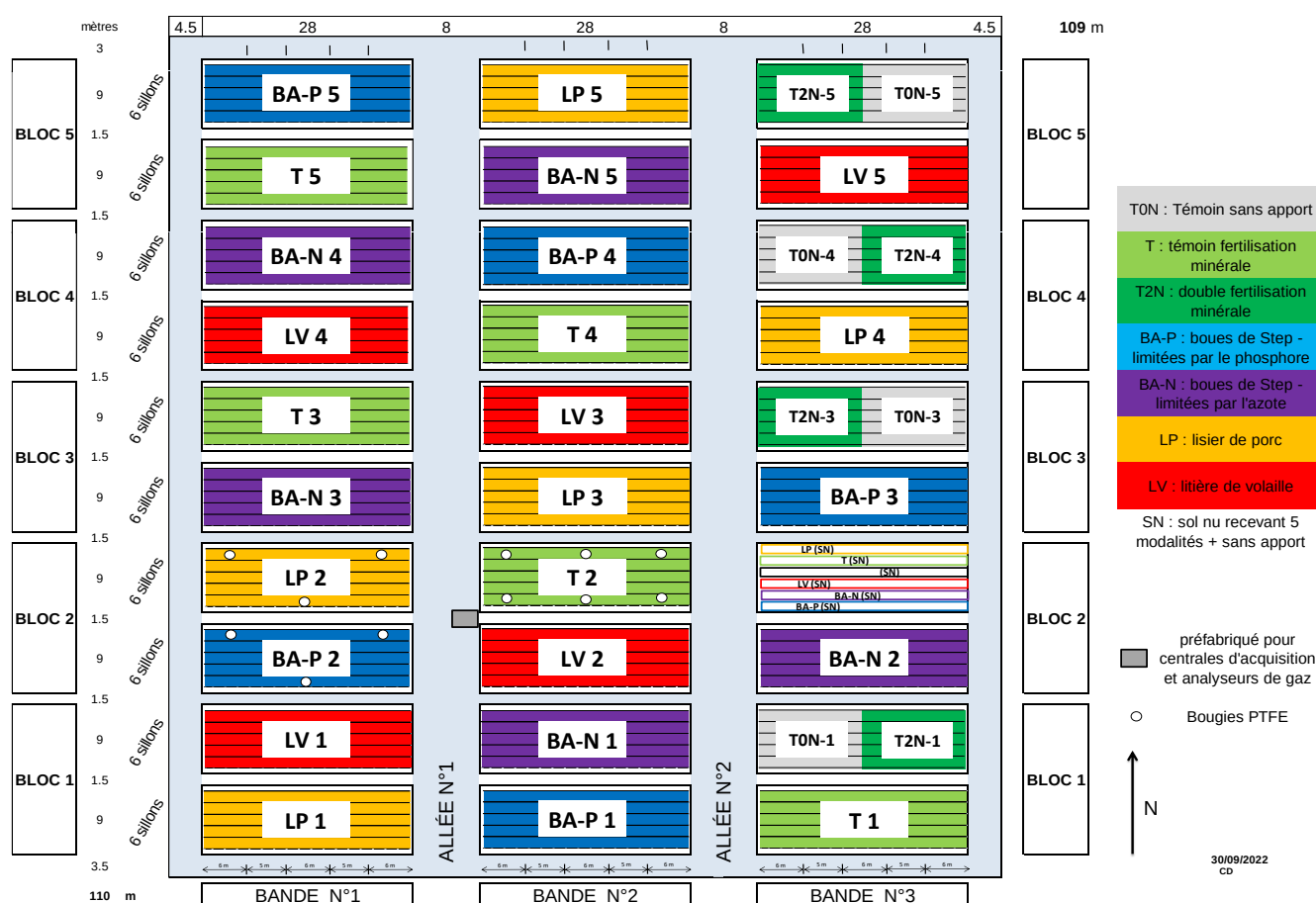


Figure 2 : Plan expérimental du dispositif SOERE PRO Réunion à partir de 2021.

Valeur fertilisante des produits apportés

Les doses de chaque modalité sont recalculées chaque année à partir de l'analyse des produits épandus et des besoins de la canne, estimés à **168 kg N, 75 kg P₂O₅ et 280 kg K₂O par hectare et par an**. Seule une partie des éléments contenus dans un produit organique est aussi disponible pour la canne qu'un engrais minéral : cette part est traduite par un **coefficient d'équivalence engrais**.

Composition moyenne des produits (2014-2026)

Produit	N total (kg/t brut)	P ₂ O ₅ (kg/t brut)	K ₂ O (kg/t brut)	Équivalence engrais N / P	N disponible (kg/t)	Pour égaler 1 t d'urée
FertilPéi (boues de STEP)	48 ± 4	55 ± 6	2,5 ± 1,2	0,56 / 0,60	27	17 t
Litière de volaille	24 ± 4	15 ± 4	24 ± 8	0,56 / 0,65	13	34 t
Lisier de porc	3,0 ± 0,8	2,1 ± 1,1	2,4 ± 0,8	0,60 / 0,85	1,8	≈ 260 t
Urée (engrais minéral)	460	–	–	1 / –	460	1 t

Tableau 1 : Composition moyenne des produits épandus (moyenne ± écart-type des analyses 2014-2026 ; FertilPéi n = 10, litière n = 7, lisier n = 11).

Couverture des besoins de la canne par modalité

La figure 3 compare, pour chaque modalité du second cycle, la part des besoins annuels couverte par le produit (en équivalent engrais) et le complément minéral nécessaire. Les doses sont calculées selon la règle de pilotage de chaque modalité, à partir de la composition moyenne des produits.

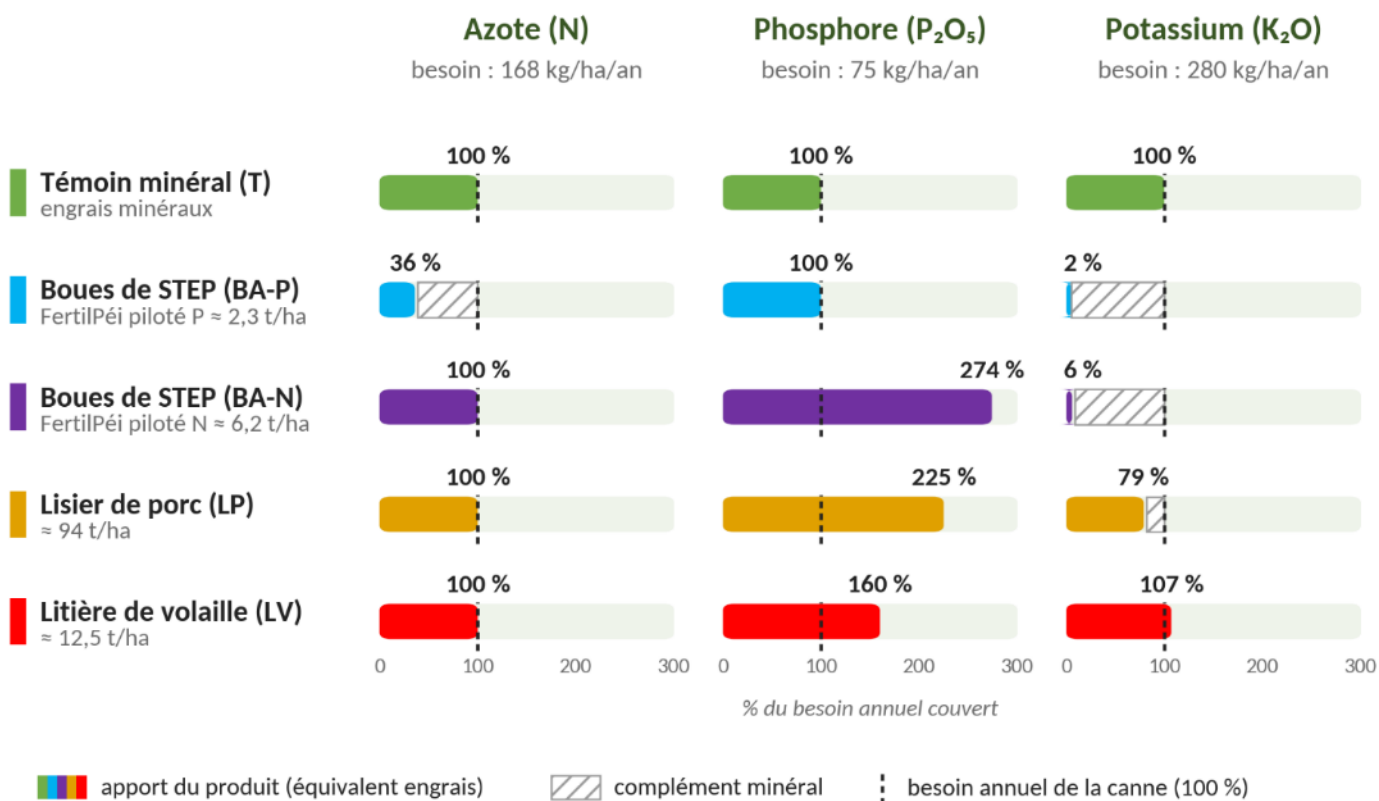


Figure 3 : Couverture des besoins annuels de la canne en azote, phosphore et potassium par modalité de fertilisation (composition moyenne des produits 2014-2026).

Doses réellement épandues en 2026 (année 14), calculées sur l'analyse de l'année : BA-P 2,5 t/ha complétées par 101 kg N d'urée ; BA-N 6,3 t/ha ; litière de volaille 10,9 t/ha ; lisier de porc 73 t/ha.

Ce qu'il faut retenir

- **FertilPéi** est avant tout un engrais phosphaté et azoté : une dose modérée (≈ 2,3 t/ha, modalité BA-P) couvre la totalité des besoins en phosphore et environ un tiers de ceux en azote. Il n'apporte presque pas de potassium, qui doit être complété par un engrais minéral.
- **Piloter les apports sur l'azote** (BA-N, lisier) conduit à apporter 2 à 3 fois les besoins en phosphore. Le phosphore en excès s'accumule dans le sol, comme les éléments traces apportés avec les produits : c'est l'un des enjeux suivis au cours du second cycle.
- **La litière de volaille** est le produit le plus équilibré pour la canne : elle couvre à elle seule l'azote, le potassium et 1,6 fois le phosphore.
- **Le lisier de porc** est très dilué (plus de 95 % d'eau) : près de 100 m³/ha sont nécessaires pour couvrir les besoins en azote, ce qui pèse sur le transport et l'épandage.

Suivi analytique

Le suivi analytique a pour objectif de **caractériser les trajectoires d'évolution** des compartiments de l'agro-écosystème soumis à des **apports répétés** de produits résiduels organiques.

- **Echantillonnage**

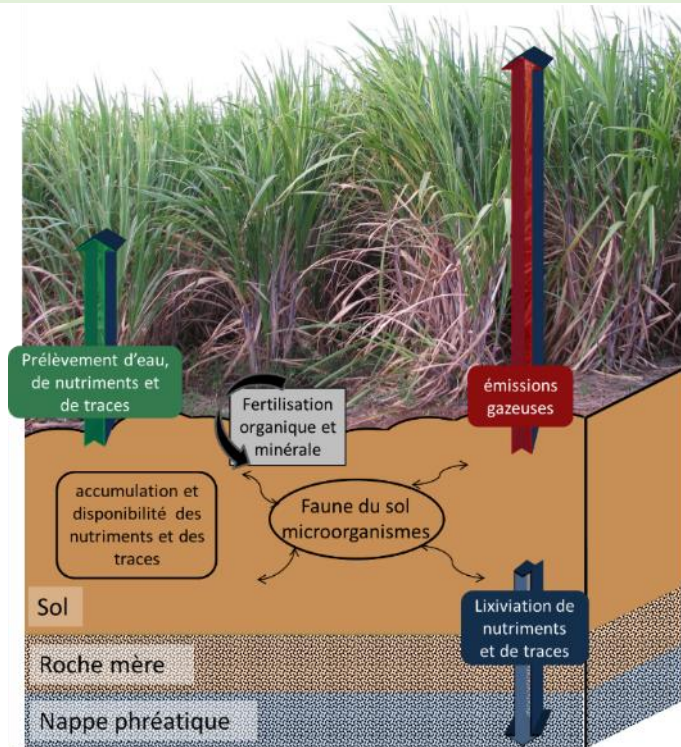
Canne



Paillis



Sol



PRO

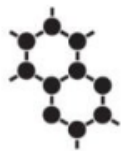


Eau du sol



Sur lesquels sont réalisés toute une batterie d'analyses :

- éléments **majeurs** (C, N, P, K, Ca, Mg, Na)
- éléments **trace métalliques** (ETM)
- **contaminants** trace organiques (CTO)
- produits **pharmaceutiques**
- microbiologie et indicateurs de la **vie du sol**
- **macrofaune du sol**
- pathogènes
- propriétés physiques du sol
- carbone organique dissous
- rendement de la culture, richesse en sucre



9 Laboratoires réalisant un panel d'analyses sur les 4 matrices échantillonnées (plante, sol, Pro, eau du sol) :

- | | |
|---------------------|-------------------|
| - UR78 Réunion | - GENOSOL |
| - US49 Montpellier | - LABOCEA |
| - INRAe LAS Arras | - USRAVE Bordeaux |
| - RIC Belgique | - eRcane |
| - INRAe Biochem-Env | |

Suivi **LIMS** et **échantillothèques** 23°C et -20°C



Equipements du site

Le site est équipé de capteurs in situ réalisant une acquisition de données **en continu** pour le suivi des émissions vers **l’atmosphère**, du **climat du sol**, et de la **météorologie** de l’essai.

COMPARTIMENT	MESURES	MÉTHODE DE SUIVI	FRÉQUENCE
émissions gazeuses du sol	CO ₂ N ₂ O	12 chambres automatiques , analyseurs de gaz infrarouge LiCor LI-820A Thermoscientific 46i	4 fois / jour
	NH ₃	méthode des badges Alpha anémomètre ultrasonique	après épandage durant 2 mois
climat du sol	température, teneur en eau volumique (permittivité)	sondes TDR jusqu'à 120 cm de profondeur	horaire
météorologie	température, humidité, précipitations, rayonnement, vitesse et direction du vent	station météorologique	horaire



Figure 4 : Enceintes climatiques pour le suivi automatisé des émissions de CO₂ et N₂O sur le SOERE PRO - Réunion



Figure 5 : Sondes TDR, anémomètre sonique, badges alpha et girouette

Résultats

Analyse multicritère : 7 ans d'effet sur la canne, le sol et l'environnement

Antoine Versini, Cécile Nobile, Samuel Legros, Charles Detaille

Méthode de calcul des indices de qualité

Etape 1

Inventaire des indicateurs par critère

Indicateurs : données mesurées
ex : pH du sol, rendement,...

Fertilité du sol

n=10

Vie du sol

n=9

Production cannière

n=8

Climat et environnement

n=4

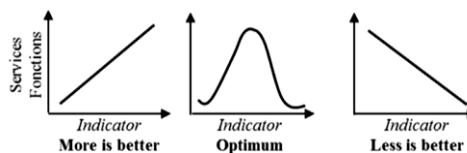
Contamination Sols

n=44

Etape 2

Sélection et transformation des indicateurs

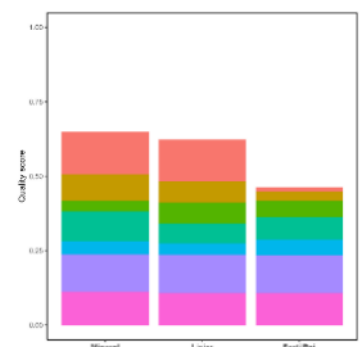
- Elimination des indicateurs corrélés ($r > 0.8$)
- Sélection de l'indicateur le plus courant en agronomie
- Normalisation tenant compte du sens de réponse de l'indicateur



Etape 3

Calcul des indices de qualité pour chaque critère

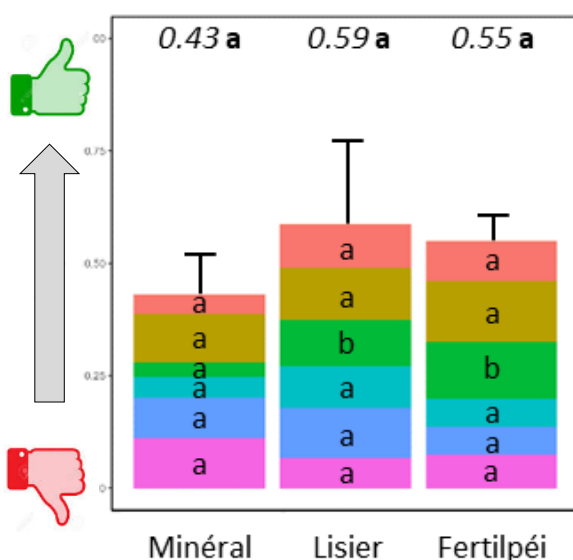
Cumul des indicateurs par critère avec pondération



La fertilité du sol

De 2013 à 2021

Prélèvements de sols et analyses



➤ Pas d'effet sur le statut acido-basique

pH

CEC

➤ Un effet des fertilisants organiques sur la fertilité phosphatée

P

➤ Peu d'effet sur la fertilité azotée et potassique

K_éch

N_min

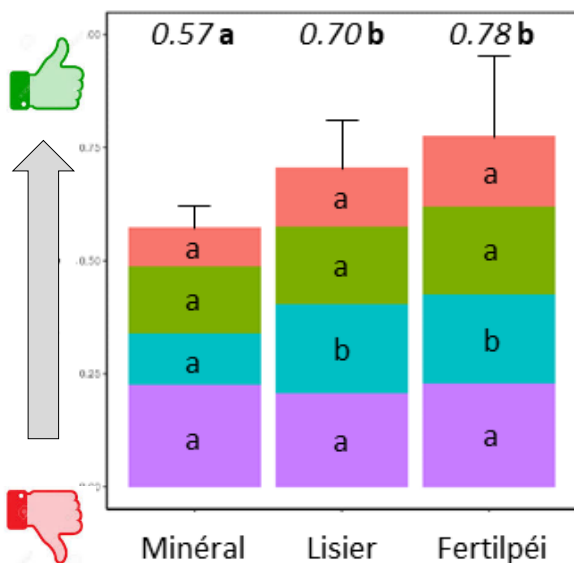
N_tot

Une tendance à l'amélioration de la fertilité phosphatée et azotée des sols avec les fertilisants organiques

La vie du sol

2013, 2016 et 2019

Tri manuel de monolithes de sol



➤ Pas d'effet sur la biodiversité du sol

Richesse bactéries

Richesse macrofaune

➤ Un effet des fertilisants organiques sur la quantité d'organismes vivants

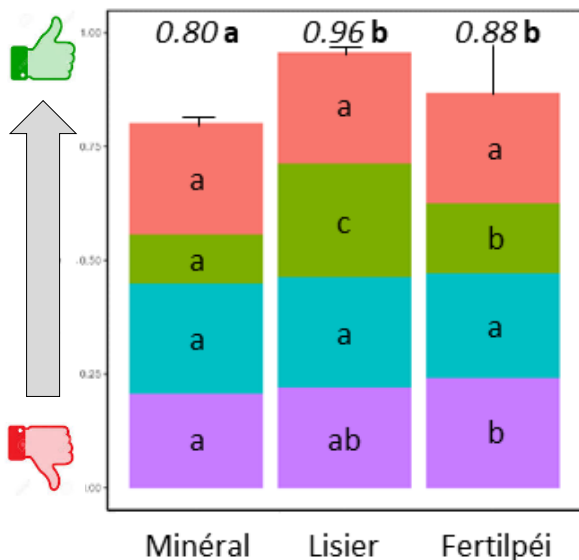
Biomasse microbienne

Abondance macrofaune

Un effet positif de Fertilpéi et du lisier de porc sur la vie du sol en comparaison d'une fertilisation conventionnelle

La production cannière

De 2013 à 2021



➤ Un effet sur les Rendements (+15 t/an)

➤ Sans répercussions sur la Richesse (15%)

➤ Des Economies significatives d'engrais

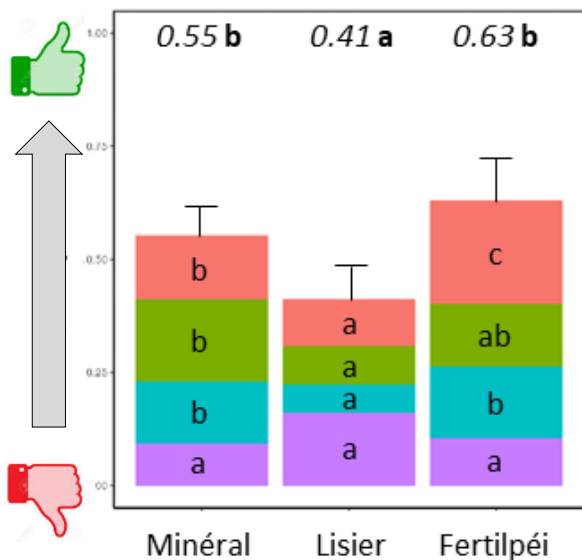
Fertilpéi 600 €/ha Lisier 1100 €/ha

➤ Peu d'effet sur le Temps de travail (+4h/ha)

Un effet positif de Fertilpéi et du lisier de porc sur la rentabilité économique de la production cannière

Climat et environnement

De 2013 à 2021



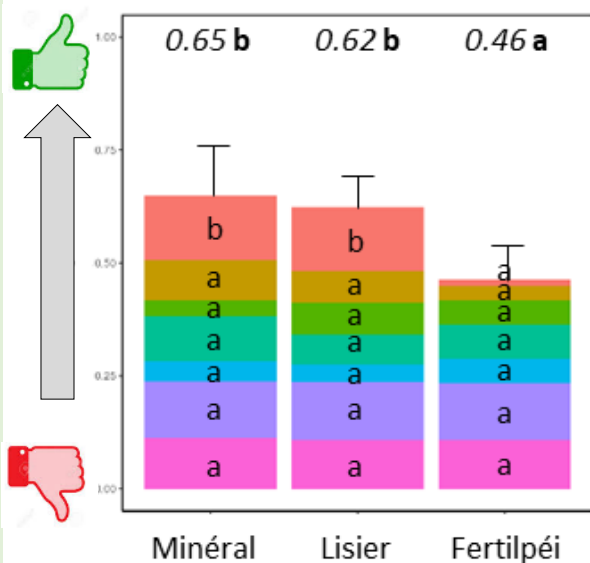
- Pas d'effet sur les stockage de C dans le sol
- Le lisier de porc produit plus de gaz à effet de serre N_2O
- Peu d'effet sur les flux de nitrates vers les eaux souterraines
- Le lisier de porc entraîne plus de volatilisation ammoniacale vers l'atmosphère

Un effet négatif du lisier de porc sur les fuites environnementales

Contamination du sol

De 2013, 2015 et 2018

102 substances traces organiques analysées dont 18 détectées appartenant à 4 familles



- Aucun effet sur les teneurs en éléments traces métalliques dans la canne
 - Cuivre
 - Zinc
 - Chrome
- Aucun effet sur les teneurs en substances traces organiques dans le sol
 - LAS
 - PCB
 - HAP
- Teneurs plus importantes en BDE avec les apports de Fertilpéi

Un impact plus marqué de Fertilpéi par rapport aux engrais et lisier de porc du fait de la présence de BDE

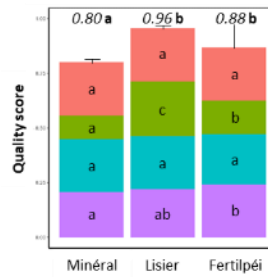
Conclusion

Minéral

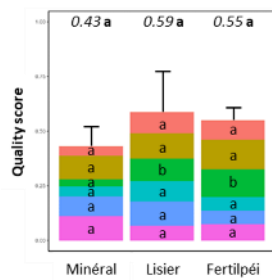
Lisier de porc

Fertilpéi

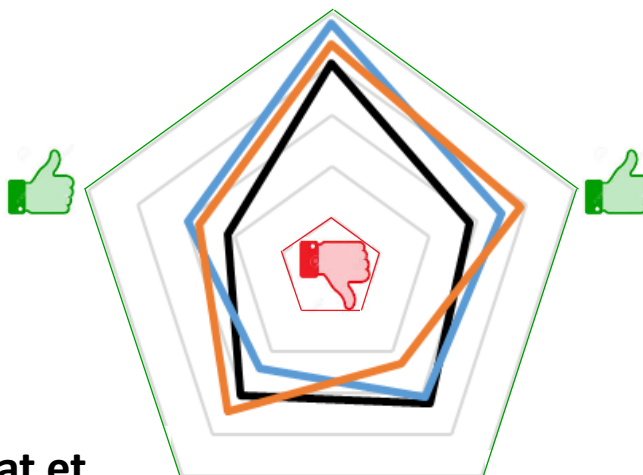
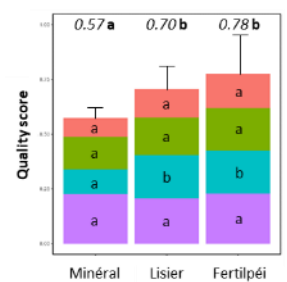
Production cannière



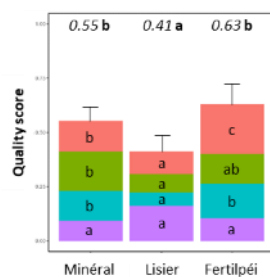
Fertilité du sol



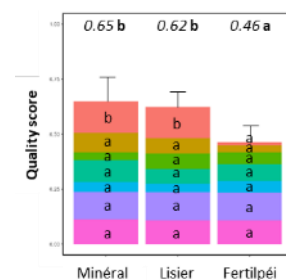
Vie du sol



Climat et environnement



Contamination Sol



Thèses

Évaluation des risques de transfert sol-plante et d'écotoxicité terrestre liés à la présence de contaminants traces organiques dans les sols agricoles recevant des apports de produits résiduels organiques en contexte tropical. **SPAUDO Antoine, 2023-2026**

Effet de la réduction des intrants de synthèse sur le développement du système racinaire de canne à sucre à la Réunion. Implication du stockage de carbone dans le sol et l'efficacité d'utilisation de l'azote par la culture. **CHEVALIER Léa, 2022-2025**

Utilisation d'une approche combinée isotopes stables - spéciation pour comprendre l'impact à long terme de l'épandage des effluents organiques sur les sols agricoles. **PAPPOE Abraham, 2021-2024**

Adaptation des méthodes utilisées en Analyse de Cycle de Vie pour évaluer l'impact éco-toxicologique des éléments trace dans les sols agricoles amendés avec des produits résiduels organiques. **CLEMENT Emma, 2021-2024**

Effet de l'apport de produits résiduels organiques sur le cycle biogéochimique de l'azote en plantation de canne à sucre à la Réunion. **POULTNEY Daniel, 2018-2021**

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. **LAURENT Céline, 2016-2019**

Émissions de gaz à effet de serre et flux de carbone du sol associés aux mélanges de résidus de récolte et de produits résiduels organiques dans la culture de la canne à sucre. **KYULAVSKI Vladislav, 2016-2019**

Spéciation chimique et phytodisponibilité du phosphore dans des sols tropicaux amendés en produits résiduels organiques. **NOBILE Cécile, 2014-2017**

Stages

Impacts of fertilizer types on the diversity and abundance of soil and sugarcane mulch macroinvertebrates. **JACQUIN E, 2023.**

Master 2, Etude de la variabilité temporelle d'émission de N₂O suite à l'apport de produits résiduels organiques en plantation de canne à sucre à la Réunion. **VIGUIER C, 2019.**

Impact de l'interaction sol-vers de terre sur la disponibilité et la biodisponibilité de Cu et Zn dans des sols agricoles fertilisés sur le long terme avec des produits résiduels organiques. **CHIARELLO L, 2018.**

Contribution du carbone des produits résiduels aux matières organiques des sols de la Réunion. Une approche isotopique. **JAMOTEAU F, 2018.**

Contribution du compartiment racinaire dans les calculs d'efficacité d'utilisation de l'azote en plantation de canne à sucre. **EL BOUHALI H B, 2017.**

Évaluation des pertes en ammoniac suite aux apports des fertilisants organiques et minéraux sur un essai agronomique de l'île de la Réunion. **KEMMOU S, 2017.**

Optimizing sampling procedures in sugarcane plantations to study nitrogen cycling with ¹⁵N labelling method. **POULTNEY D, 2017.**

Listes des publications

Auteurs	Référence	Année	Site(s) du SOERE PRO
Aurélia Marcelline Michaud, Toyin Dunsin Saliu, Gabriel Munoz, Frédéric Feder, Valérie Sappin-Didier, Françoise Watteau, Sabine Houot, Sébastien Sauvé	In situ occurrence and mobility of per and polyfluoroalkyl substances in soils amended with organic waste products, Science of The Total Environment, Volume 984, 2025, 179708, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179708 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972501349X)	2025	PROspective, QualiAgro, La Réunion, Couhins et La Bouzule
Estelle Jacquin, Marie-Liesse Vermeire, Eric Blanchart, Charles Detaille, François-Régis Goebel, Janine Jean, Malalatiana Razafindrakoto, Matthieu N. Bravin	Does fertilizer type drive soil and litter macroinvertebrate communities in a sugarcane agroecosystem? Evidence from a 10-year field trial, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 381, 2025, 109431, ISSN 0167-8809, https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109431 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880924005498)	2025	La Réunion
Abraham Pappoe, Zuzana Fekiacova-Castanet, Abel Guihou, ÀngelaD. Bosch-Serra, Pierre Deschamps, Frédéric Feder, Jakob Magid, Thierry Morvan, Denis Testemale, Emmanuel Doelsch	Stable isotopes analysis combined with X-ray absorption spectroscopy reveal the fate of organic waste-borne copper and zinc in amended soils, Journal of Hazardous Materials, b Volume 480, 2024, 136039, ISSN 0304-3894, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136039 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389424026189)	2024	La Réunion, EFELE
Poultney Daniel, Thuriès Laurent, Versini Antoine.	Importance of overlooked crop biomass components in sugarcane nitrogen nutrition studies. Nitrogen, 5 (2) : 62-78. https://doi.org/10.3390/nitrogen5010005 http://agritrop.cirad.fr/608927/1/2024%20Poultney%20NIT.pdf	2024	La Réunion
Angel Avadí, Victor Galland, Antoine Versini, Christian Bockstaller	Suitability of operational N direct field emissions models to represent contrasting agricultural situations in agricultural LCA: Review and prospectus, Science of The Total Environment, Volume 802, 2022, 149960, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149960 .	2022	La Réunion, Sénégal
Munoz G., Michaud A., Liu M., Vo Duy S., Montenach D., Resseguier C., Watteau F., Sappin-Didier V., Feder F., Morvan T., Houot S., Desrosiers M., Liu J., Sauvé S.	Target and Nontarget Screening of PFAS in Biosolids, Composts, and Other Organic Waste Products for Land Application in France. Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 10, 6056–6068 (2021). https://doi.org/doi:10.1021/acs.est.1c03697 https://hal.inrae.fr/ECOSYS/hal-03561958	2022	QualiAgro, EFELE, PROspective, Couhins, La Bouzule, La Réunion

Versini Antoine, Poultney Daniel, Bachir El Bouhali Hamza, Fevrier Amélie, Paillat Jean	Effect of nitrogen fertilisation on sugarcane root development and nitrogen accumulation in ratoon crops of Reunion Island. Sugar Tech, 22 : 1110-1121. https://doi.org/10.1007/s12355-020-00863-6	2020	La Réunion
Poultney Daniel, Christina Mathias, Versini Antoine	Optimising non-destructive sampling methods to study nitrogen use efficiency throughout the growth-cycle of giant C4 crops. Plant and Soil, 613 : 453-597. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04611-3	2020	La Réunion
Kyulavski Vladislav, Recous Sylvie, Thuriès Laurent, Paillat Jean-Marie, Garnier Patricia.	Investigating interactions between sugarcane straw and organic fertilizers recycled together in a soil using modelling of C and N mineralization. European Journal of Soil Science, 70 (6) : 1234-1248.	2019	La Réunion
Kyulavski Vladislav, Recous Sylvie, Garnier Patricia, Paillat Jean-Marie, Thuriès Laurent.	Application of N fertilizer to sugarcane mulches: Consequences for the dynamics of mulch decomposition and CO ₂ and N ₂ O fluxes. BioEnergy Research, 12 (3) : 484-496.	2019	La Réunion
Nobile Cécile, Bravin Matthieu, Tillard Emmanuel, Becquer Thierry, Paillat Jean-Marie. 2018.	Phosphorus sorption capacity and availability along a toposequence of agricultural soils : Effects of soil type and a decade of fertilizer applications. Soil Use and Management, 34 (4) : 461-471.	2018	La Réunion
Bourdat-Deschamps et al.	Fate and impacts of pharmaceuticals and personal care products after repeated applications of organic waste products in long-term field experiments Science of the Total Environment 607–608 (2017) 271–280	2017	Qualiagro, PROspective, La Réunion

Notes

Pour plus d'information, vous pouvez consulter

- le site web de l'UR Recyclage et Risque, partie dédiée au site expérimental SOERE PRO - Réunion : <http://ur-recyclage-risque.cirad.fr/principaux-projets/soere-pro-la-reunion>
- le site web Valor-Pro de l'INRAe : <https://valor-pro.hub.inrae.fr/>



Contact

Responsable scientifique : Frédéric FEDER

Responsable technique : Charles DETAILLE

CIRAD – UPR « Recyclage et risque »

