

Rapport technique

Bilan des gisements de MAFORs et des besoins des cultures à l'échelle des communes de La Réunion en vue de l'autonomisation en fertilisants de l'île



Manon Alvanitakis⁽¹⁾, Corentin Kerdodé^(1, 2), Antoine Versini⁽³⁾,
Rémi Conrozier⁽⁴⁾, Jonathan Vayssières⁽¹⁾

décembre 2023

(1) Cirad UMR Selmet, Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux, Ligne Paradis, La Réunion

(2) ESA, Ecole supérieure des agricultures, Angers

(3) Cirad, UPR Recyclage et Risques, Saint-Denis

(4) Chambre d'agriculture de La Réunion, MVAD, Saint-Denis, La Réunion

Préambule:

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet ACOBiom « Analyse des COMpromis d'usage des BIOMasses à l'échelle territoriale » et des activités du DPP CAPTerre « Compromis en Agriculture Pour des TERRitoires durables ». Ce rapport technique est une synthèse du rapport de stage de (Kerdode, 2023) à destination des partenaires techniques du Cirad et des décideurs politiques intervenants sur l'île. Ce rapport focalise sur un certain nombre de résultats en faveur d'une meilleure substitution des engrais de synthèse (importés par bateau) par les apports d'engrais organiques ou MAFORs.

Résumé :

A La Réunion, la gestion des MAFORs (matières fertilisantes d'origine résiduaire) devient stratégique pour mieux fertiliser les cultures, entretenir la fertilité des sols et permettre le développement de l'élevage avec un risque environnemental contrôlé.

Cette étude quantifie les gisements de MAFORs (effluents d'élevage, boues d'épuration, compost et co-compost, déchets verts, coproduit de l'agro-industrie) et les besoins des cultures (canne à sucre, prairie, maraîchage et arboriculture) sur la base des dernières connaissances acquises ces dernières années par le Cirad et ses partenaires. Des bilans offre-besoin pour les 3 nutriments majeurs (N, P, K) sont proposés à l'échelle de l'île et des communes.

Aujourd'hui les MAFORs couvrent chaque année 36%, 63% et 48% des besoins en N, P, K équivalent engrais des cultures. Seul quelques communes sont en excédent de nutriments d'origine organique (5 communes pour l'azote, 9 pour le phosphore et 5 pour le potassium sur un total de 24 communes).

Ce diagnostic permet d'identifier les zones de surplus et de déficit en nutriments. Il permet de mieux raisonner la gestion territoriale des MAFORs, et ainsi réfléchir à une réduction de l'importation des engrais de synthèse, par une meilleure répartition spatiale de l'épandage des MAFORs et par la mobilisation de nouveaux gisements tels que les biodéchets ménagers.

Comment citer ce document :

Alvanitakis M., Kerdodé C., Versini A., Conrozier R., Vayssières J., 2023. Bilan des gisements de MAFORs et des besoins des cultures à l'échelle des communes de La Réunion en vue de l'autonomisation en fertilisants de l'île. Rapport technique Cirad - Chambre d'Agriculture, 24 p.

Légende et copyright des photos de la page de garde :

A gauche : épandage de lisier sur prairies à la Plaine des Grègues, © J.M. Médoc

A droite : broyage de déchets verts sur la plate-forme de Pierrefonds, © J. Vayssières



Table des matières

1	INTRODUCTION	3
2	MATERIEL ET METHODE	4
2.1	Les étapes de travail de la création de bilans.....	4
2.2	Méthodologie du calcul de l'offre en N, P, K apporté par les MAFORs	6
2.2.1	Les effluents d'élevage	6
2.2.2	Les Autres MAFORs	7
2.3	Méthodologie du calcul du besoin en N, P, K des cultures	7
2.3.1	La canne.....	7
2.3.2	La prairie.....	8
2.3.3	Maraîchage et arboriculture	9
2.4	Incertitude liée aux sources de données disponibles	10
3	RESULTATS ET DISCUSSION	11
3.1	L'offre en MAFORs.....	11
3.2	Les besoins des cultures	13
3.3	Les bilans offre-demande	16
3.4	Typologie des communes en excédents.....	18
3.4.1	Les communes en excédent de MAFORs autres que les effluents d'élevage	18
3.4.2	Les communes en excédent d'effluents d'élevage transportables.....	18
3.4.3	Les communes en excédents d'effluents peu transportables : Salazie et la Plaine des Palmiste	19
4	DISCUSSION	20
4.1	Autonomie de l'île à court terme	20
4.2	Dynamique de stockage dans les sols sur le long terme	20
4.3	De nouveaux gisements mobilisables à l'avenir.....	21
4.4	Comparaison avec les études antérieures à La Réunion.....	21
5	Conclusion	22
6	Bibliographie.....	23

1 INTRODUCTION

La Réunion importe chaque année de grandes quantités de nutriments (azote N, phosphore P et potassium K) sous forme d'engrais de synthèse (35 000 tonnes/an) pour fertiliser les cultures. Pourtant, l'île dispose d'importants gisements de matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFORs), issus des secteurs agricole, agro-industriel et urbain. Sur l'île, les différents projets d'identification, de transformation et d'utilisation de ces MAFORs, montrent la volonté des acteurs de réduire les risques environnementaux associés et d'économiser des intrants de synthèse (dont le coût augmente en lien avec le prix croissant de l'énergie fossile) par l'utilisation de ces matières, dans une logique d'économie circulaire (Vigne et al., 2021).

Cependant la spécialisation des exploitations agricoles, la ségrégation spatiale entre les cultures et l'élevage (canne à sucre dans les "Bas" et élevage dans les "Hauts" de l'île), et l'urbanisation croissante pose des contraintes d'utilisation de ces MAFORs. Ainsi dans certaines zones, les éleveurs rencontrent des difficultés croissantes à épandre les effluents de leurs exploitations d'élevage. Cette situation appelle à spatialiser les gisements de MAFORS et les besoins des cultures afin d'identifier les zones en "surplus" et les zones en "déficit" de fertilisants d'origine organique.

Cette étude effectue un bilan de nutriments (N, P et K) entre les gisements des MAFORs et les besoins des cultures à l'échelle des communes et de l'île de La Réunion. Il s'agit ainsi de produire un diagnostic qui serve de support de discussion avec les acteurs du monde agricole (cultures et élevage) afin de mieux raisonner la gestion territoriale des MAFORs, faciliter leur répartition spatiale et ainsi réduire l'importation d'engrais de synthèse.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 Les étapes de la création de bilans

Dans cette section, nous décrivons la méthodologie utilisée pour créer des **bilans offre-besoin en nutriments** (azote, phosphore, potassium) par commune à l'île de La Réunion.

Il s'agit d'évaluer d'une part, l'**offre** en nutriments issus des MAFORs, et, d'autre part, **les besoins** spécifiques des différentes cultures, par commune. Le rapport entre ces deux composantes représente le bilan offre-besoin en nutriment de la commune (Fig. 1). Les valeurs sont données en tonnes de nutriment **équivalent engrais pour l'année 2020**. Ainsi, la fraction organique, non disponible l'année de l'épandage, mais qui se minéralisera dans les années suivantes et viendra enrichir le sol, n'est pas prise en compte. L'étude est donc valable sur le court terme, et les besoins sont calculés selon l'état du sol. Il est aussi à noter que les contraintes d'épandage (par exemple la surface épandable par rapport à la distance aux habitations ou aux cours d'eau, et l'appareillement réglementaire entre les MAFORs et les cultures) n'est pas pris en compte dans le calcul du bilan.

Selon le bilan, on détermine si la commune est en excédent de nutriments organiques, à l'équilibre ou en déficit par rapport aux besoins des cultures (Fig. 1). Pour les communes en excédent on fait la différence entre les excédents en produits facilement transportables vers une commune en déficit (fumiers, fientes et MAFORs autres que les effluents d'élevage) et les excédents en produits plus difficilement transportables (lisiers et excrétiens directes au pâturage non manipulables).

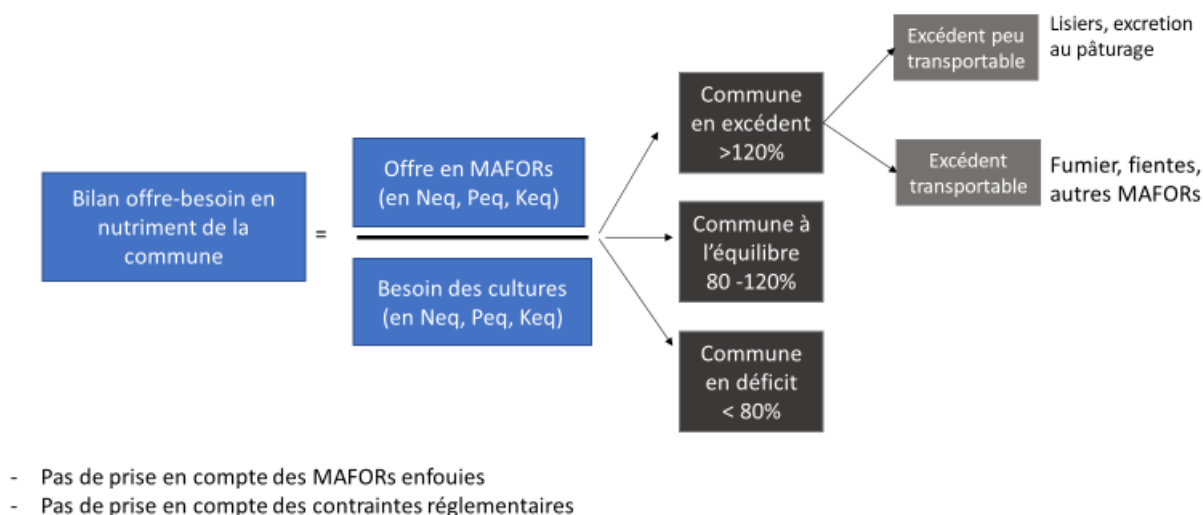


Figure 1 : Calcul des bilans offre-besoin en nutriments par commune

Par un travail de bibliographie et de contact d'experts, nous avons récolté les données à l'échelle la plus fine possible. La synthèse des données récoltées pour le calcul du bilan est représenté en (Fig. 2)

Echelle de précision des sources

Métropole : 1
 Île : 2
 Bassin de production : 3
 Commune : 4
 Parcelle : 5

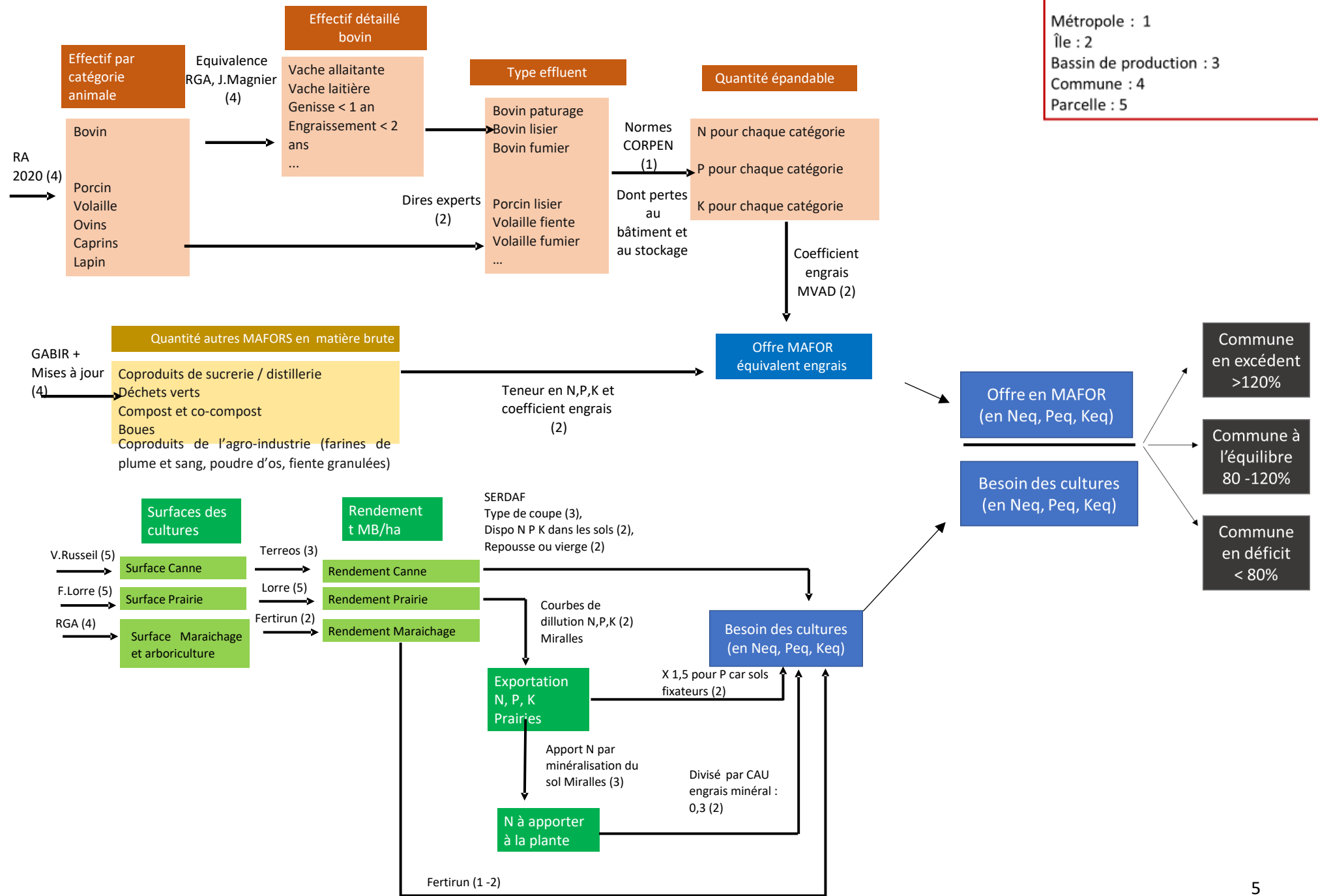


Figure 2 : Synthèse de la méthodologie du bilan offre-besoin en nutriments par commune, les numéros en parenthèse sur les flèches se réfèrent au degré de précision de la source de donnée

2.2 Méthodologie du calcul de l'offre en N, P, K apporté par les MAFORs

2.2.1 Les effluents d'élevage

Pour chaque catégorie animale, et pour chaque commune, le calcul de la quantité d'azote (N), de phosphore (P) et de potassium (K) en équivalent engrais (Neq, Peq et Keq) s'est réalisé selon la formule suivante :

$$\text{Quantité NPK en équivalent engrais} = (\text{Effectif} * \text{Quantité excrétée NPK par animal} - \text{Pertes}) * \text{Coefficient d'équivalence engrais}$$

a). Les Effectifs

Pour obtenir les effectifs d'animaux dans chaque commune, nous avons utilisé les données du recensement agricole (RA, 2020).

b). Quantité de Nutriments (N, P, K) Excrétée par Catégorie d'Animal

L'estimation de la quantité de nutriments excrétée par chaque catégorie d'animal s'est basée sur les normes CORPEN, largement reconnues en France métropolitaine (CORPEN, 2003; Giovanni and Dulphy, 2008; ITAVI, 2013)

c). Attribution du mode de gestion des effluents.

Le mode de gestion des effluents (en bâtiment fumier, lisier, au pâturage) est important car il détermine les pertes d'azote au bâtiment et au stockage et détermine le type d'effluent produit : lisier, fumier ou excréments au pâturage.

Les bovins

La typologie du recensement agricole (RA, 2020) permet d'associer à chaque catégorie d'âge de bovin une excrétion en N, P, K grâce aux normes CORPEN. Cependant, cette typologie ne nous permet pas de dire si l'excrétion animale se fait au champ, au bâtiment avec paille ou sans paille

La typologie et les effectifs de 2018 de (Magnier et al., 2019) est plus précise que celle du RA. Elle différencie les animaux par catégories d'âge, mais également par type d'élevage. Nous avons considéré que les bovins viande à l'engraissement et les génisses laitières en croissance produisaient du fumier, que les vaches laitières produisaient du lisier, et que les vaches allaitantes et les animaux de renouvellement excrétaient au pâturage.

Une équivalence a été établie entre la typologie de Magnier et celles du RA, permettant de calculer, pour chaque catégorie d'âge de bovin du RA et par commune, le pourcentage d'animaux produisant du lisier, du fumier ou de l'excrétion au pâturage. En faisant cela nous faisons l'hypothèse que la structure du cheptel (répartition entre allaitant/laitiers/engraisseurs) n'a pas changée entre 2018 et 2020.

Les autres animaux

Nous avons considéré que les porcins produisaient du lisier, les poules pondeuses des fientes, les petits ruminants, les volailles et les lapins du fumier.

d). Pertes au bâtiment et au stockage

Les pertes d'azote par volatilisation lors du bâtiment et du stockage sont issues de (Doublet and Le Gall, Guillaume, 2013) et dépend du type d'animal et du mode de gestion des effluents. L'objectif de ce calcul est d'obtenir la quantité de N dans les effluents en sortie de stockage, qui seront épandus sur les parcelles.

Les pertes par volatilisation à l'épandage ne sont pas déduites à ce stade puisqu'elles sont intégrées dans le coefficient équivalent engrais. En effet, les besoins des cultures sont calculés en « équivalent engrais » en prenant en compte la volatilisation d'un engrais minéral à l'épandage (2.3 Méthodologie du calcul du besoin en N,P,K des cultures). Le coefficient équivalent engrais, lui, donne une estimation de la part de l'azote minéral dans la MAFOR. On estime donc que cette part minérale se comporte comme un engrais minéral, avec les pertes qui lui sont associées.

e). Coefficient équivalent engrais

Les coefficients sont issus de (Chabalier et al., 2006) et des fiches techniques du site de la MVAD (<https://www.mvad-reunion.org/>).

2.2.2 Les Autres MAFORs

L'évaluation de la quantité N,P,K en équivalent engrais des MAFORs ne provenant pas des effluents d'élevage (composts, co-produits et déchets de l'industrie, déchets verts, autres biodéchets urbains) se fait en deux étapes.

Tout d'abord, nous avons déterminé la **quantité en matière sèche** (MS) ou en matière brute (MB) pour chaque type de MAFORs en utilisant les données issues du rapport du projet GABIR . Nous avons également mis à jour les tonnages de certaines MAFORs par enquêtes des détenteurs de MAFORs.

Nous avons appliqué à ses tonnages des teneurs **en éléments nutritifs** (N, P, K) et **des coefficients équivalents engrais** en utilisant le Guide Fertilisation organique (Chabalier et al., 2006) et les fiches techniques du site de la MVAD (<https://www.mvad-reunion.org/>).

2.3 Méthodologie du calcul du besoin en N, P, K des cultures

2.3.1 La canne

Nous avons estimé le besoin en N, P, K équivalent engrais de chaque parcelle de canne, en utilisant le parcellaire de canne en 2020 produit par (Russeil et al., 2023) et la méthodologie (SERDAF, 2011). Voici comment nous procédons :

a). Azote

La dose recommandée en azote équivalent engrais est calculée à l'aide de la formule suivante (SERDAF 2011)

$$Dose_{Neq} (kgN/ha) = -0.000004 \cdot rdt^2 + 0.00172 \cdot rdt - 0.0153 - (0.12 - doseN \cdot coeff_abat_N) + majN \cdot 100rdt$$

- rdt : Le rendement par hectare est déterminé à partir de la carte des rendements commerciaux de Tereos en 2019 disponible dans le rapport de (Lorre, 2019) et du parcellaire de (Ruissel et al, 2023).
- doseN : C'est la dose de base pour un rendement de canne à 100 tonnes/ha. SERDAF propose une grille en fonction de la teneur azotée des sols. Nous faisons l'hypothèse que tous les sols sont « correctement pourvus en azote minéralisable ». DoseN est donc de 120 kg/ha.

- coeff_abat_N : Ce coefficient varie en fonction du statut de la canne (0,7 en vierge ou en repousse). Par simplification, nous avons considéré que les parcelles de cannes étaient en repousse une fois sur dix.
- majN : La majoration prend en compte l'exportation des pailles de canne et dépend du type de coupe. Nous avons attribué une majoration « moyenne » à chaque parcelle en prenant en compte les % de coupes pratiquées dans la zone de production de la parcelle (Lorre, 2019). Ainsi si une parcelle se trouvait dans une zone pratiquant à 60% la coupe manuelle et à 40% la coupe mécanique, le majN de la parcelle est calculé comme suit : $MajN_{parcelle} = 60\% * MajN_{coupemanuelle} + 40\% * MajN_{coupemecanique}$

b). Phosphore

La dose recommandée en phosphore équivalent engrais est calculée selon la formule suivante :

$$Dose_{Peq}(kgP/ha) = -0.000003 \cdot rdt^2 + 0.0011 \cdot rdt - 0.012 - (0.072 - dose_P) + majP \cdot 100rdt$$

dose_P : C'est la dose de base pour un rendement de canne à 100 tonnes/ha. Cette valeur dépend de la disponibilité en phosphore (P) du sol basée sur la teneur en P du sol (classe tp) et le pouvoir fixateur du sol (classe pf). Une étude d'échantillons de sols analysés au laboratoire du CIRAD entre 2008 et 2020, montre que la majorité des parcelles de canne se trouve dans une classe de disponibilité « faible » en phosphore (Nobile 2023, communication personnelle). Nous prenons une dose_P correspondant à cette classe de disponibilité, de 100 kg de P2O5/ha en repousse et 200 kg de P2O5/ha en vierge.

c). Potassium

La dose recommandée en potassium équivalent engrais est calculée selon la formule suivante :

$$Dose_{Keq}(kgK/ha) = -0.0000073 \cdot rdt^2 + 0.00295 \cdot rdt - 0.029 - (0.2 - doseK) + majK \cdot 100rdt$$

dose_K : C'est la dose de base pour un rendement en canne à 100 tonnes/ha. Cette valeur dépend de la disponibilité en potassium (K) du sol, évaluée en utilisant l'hypothèse d'une classe de fixation (K_cec) et d'une teneur en potassium (tk) moyennes. Elle est donc de 160 kg K2O/ha pour la canne en repousse et 200 kgK2O/ha pour la canne vierge.

Les données collectées ont permis d'obtenir un rendement et un besoin pour chaque parcelle. Les résultats révèlent une moyenne de rendement de 78 tonnes par hectare, avec des besoins moyen en nutriments de 124 Kg N/ha, 52 Kg P/ha, et 169 Kg K/ha en équivalent engrais.

2.3.2 La prairie

Nous avons estimé le besoin en N, P, K équivalent engrais de chaque parcelle de prairie, en utilisant le parcellaire de prairie 2018 de (Lorre, 2019). Nous calculons dans un premier temps l'exportation en nutriments par la fauche ou le pâturage pour en déduire les besoins. Voici comment nous procédons :

a). Calcul des exportations en N, P, K

L'exportation des nutriments est calculée à la parcelle :

$$Exportation\ en\ N,\ P,\ K = surface * rendement * teneur\ en\ N,\ P,\ K\ du\ fourrage$$

- Le rendement est donné en tonnes de matière sèche (TMS) pour chaque parcelle par (Lorre, 2019). Ce rapport attribue un rendement à la parcelle grâce à une typologie de 26 types de

prairies en fonction de différents facteurs, notamment l'utilisation, les espèces, les zones pédoclimatiques et le niveau d'intensification à la Réunion.

- La teneur en azote est évaluée en utilisant la courbe de dilution de l'azote (Miralles et al., 2020) qui illustre la diminution de la teneur en nutriments au fur et à mesure de la repousse de la prairie. Chaque mode d'exploitation se voit ainsi attribuer un rendement et une teneur en azote spécifiques. .
- La teneur en potassium et en phosphore est calculé grâce aux équations de dilution du phosphore et du potassium. Ces relations traduisent la relation entre la teneur en azote, en phosphore et en potassium des graminées (Miralles-Bruneau, 2022).

b). Azote

La détermination des besoins en azote des prairies à La Réunion est exprimée en azote équivalent engrais, et repose sur la méthode de bilan azoté. L'idée est de déterminer la dose d'engrais chimique théorique nécessaire pour couvrir les exportations en azote de la prairie, en prenant compte de l'azote déjà fourni par le sol.

Les besoins en azote sont donc calculés à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Besoin en azote équivalent engrais de la prairie} = (\text{Exportation en azote de la prairie} - \text{fourniture en azote du sol}) / \text{CAU Urée}$$

- Fourniture du Sol : On utilise la carte de fourniture du sol en prairie de (Miralles, 2020). Cette carte a été construite selon les données de (Miralles-Bruneau et al., 2022).
- CAU Urée : Le coefficient d'utilisation apparent de l'engrais chimique (CAU) pour l'urée est fixé à 0.3, conformément aux résultats d'essais réalisés sur des prairies entre 2014 et 2012 (Pierre, 2018).

Dans les cas où la fourniture du sol excède l'exportation en azote à la prairie, le besoin en azote équivalent engrais est ramené à 0.

c). Phosphore et Potassium

Les doses recommandées sont calculées de la manière suivante :

- Dose en P = (Rendement prévu * Teneur en P dans les exportations) * Coeff P
- Dose en K = (Rendement prévu * Teneur en K dans les exportations) * Coeff K

En s'appuyant sur des dires d'experts et des analyses de sol, nous avons établi un Coeff P = 1.5 (Nobile 2023, communication personnelle). Le Coeff K est établi à 1.

Les données collectées ont permis d'obtenir un rendement et un besoin pour chaque parcelle. Les résultats révèlent une moyenne de rendement de 78 tonnes par hectare, et un besoins moyen en nutriments de 224 Kg N/ha, 45 Kg P/ha, et 287 Kg K/ha en équivalent engrais.

2.3.3 Maraîchage et arboriculture

Les besoins en azote, phosphore et potassium pour l'arboriculture sont calculés par commune grâce aux surfaces du recensement agricole (RA, 2020) et aux recommandations du logiciel FERTIRUN (FERTIRUN and CIRAD et Chambre d'agriculture, 2018). Des rendements moyens à l'échelle de l'île ont été considérés pour le choix de la dose de fertilisant.

Les besoins en azote, phosphore et potassium pour le maraîchage sont calculés par commune à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Besoin en engrais (kg/ha/cycle)} = \text{Surface développée (ha * cycles)} * \text{Besoin en engrais équivalent FERTIRUN (unités équivalent engrais/ha/cycle)}$$

Le besoin en engrais pour le maraîchage est déterminé en fonction de la surface développée, qui est le produit de la surface cultivée (en ha) et du nombre de cycles de culture, selon les données du RA de l'année 2020. Les besoins en engrais sont exprimés en unités équivalent engrais par hectare et par cycle. Les recommandations quant aux besoins équivalents en engrais, exprimés en kilogrammes par hectare par cycle sont issues des données du logiciel FERTIRUN (FERTIRUN and CIRAD et Chambre d'agriculture, 2018). Des rendements moyens à l'échelle de l'île ont été considérés pour le choix de la dose de fertilisant.

2.4 Incertitude liée aux sources de données disponibles

Nous revenons dans cette section sur l'hétérogénéité des sources de données disponibles qui peuvent générer un certain nombre d'incertitudes sur l'offre en MAFORs et sur les besoins des cultures.

a). Incertainces liées à l'offre en nutriments

Les effluents d'élevage constituent la plus grande part de l'offre en nutriment et sont évalués grâce aux normes CORPEN. Les normes CORPEN évaluent les nutriments excrétés par les animaux en effectuant la différence théorique entre les nutriments ingérés par l'alimentation, et les nutriments fixés dans la viande et le lait. Ces normes sont donc construites sur des hypothèses sur la ration et la productivité des animaux (nombres de bandes dans une année pour les monogastriques, poids à l'abattage, production de lait par an, etc.). Nos calculs reprennent les normes CORPEN basées sur les rations alimentaires et la productivité métropolitaine. Actuellement, ces normes n'ont pas encore été recalculées en tenant compte des rations alimentaires spécifiques à La Réunion.

b). Incertainces liées aux besoins des cultures en nutriments

L'incertitude varie avec la culture : les données disponibles quant aux besoins de la canne sont plus précises que les données disponibles quant aux besoins des prairies et du maraîchage.

Les prairies

En prairie, les rendements par zones pédoclimatiques sont plutôt précis. L'incertitude vient principalement de l'état du sol et des coefficients multiplicateurs permettant de passer de l'export de nutriment au besoin équivalent engrais.

Les coefficients de fertilisation en phosphore (P) et potassium (K) sont couramment utilisés dans le cadre de la méthode du COMIFER (<https://comifer.asso.fr/>), pour établir un besoin en nutriment à partir de l'export en nutriment des plantes. Ces coefficients peuvent varier de 0 à 2 en fonction du type de sol, des exigences spécifiques de la culture et du nombre d'années sans apport de ces éléments. On multiplie ces coefficients par l'exportation en P ou K pour obtenir une dose de fertilisation recommandée.

Le COMIFER ne fournit pas de coefficients adaptés aux sols réunionnais. Des coefficients ont été empiriquement établis en fonction de classes de disponibilité du P dans le sol pour la canne à sucre, par la méthode SERDAF.

Cependant, des mesures de (Nobile, 2023, communication personnelle) montre que la majorité des parcelles de prairie se trouve en classe de disponibilité de P « très faible », selon les classes établies par SERDAF. Bien que ces classes aient été établies en premier lieu pour la canne à sucre, ces mesures

suggèrent que les prairies requièrent un apport en P supérieur à celui des exportations. Nous avons donc établi un coefficient égal à 1,5.

En ce qui concerne le potassium (K), aucune information n'est disponible, et par défaut, un coefficient Coeff K de 1 est utilisé pour estimer les besoins en K des prairies de l'île.

De plus, la carte de minéralisation de l'azote des sols en prairie a été construite à partir de seulement quatre stations expérimentales, dans 4 contextes pédoclimatiques différents (Miralles-Bruneau et al., 2022).

Des informations plus précises sur l'état du sol permettrait donc de sensiblement améliorer l'évaluation du besoin en nutriment des prairies.

Le maraîchage

Pour le maraîchage, les rendements spatialisés selon les cultures ne sont pas établis. Il est donc difficile d'établir précisément l'export en N, P, K de ces cultures. Comme pour la prairie, nous manquons d'information sur l'état du sol et de grilles adaptées pour les coefficients multiplicateurs de l'exportation en P et en K. En absence de ces informations, nous utilisons un rendement moyen à l'échelle de l'île et les données de besoin du logiciel FERTIRUN. Ces données sur le maraîchage, sont essentiellement issues de la bibliographie métropolitaine.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 L'offre en MAFORs

L'offre en nutriment par les MAFORs sur l'île sont de 1740 tonnes d'azote équivalent engrais (Neq), 1130 tonnes de phosphore équivalent engrais (Peq) et 3690 tonnes de potassium équivalent engrais (Keq). La répartition des gisements sont représentés en Fig. 3 a,b,c. On remarque que les MAFORs autres que les effluents d'élevage représentent 44% du gisement en Peq, alors qu'elles ne représentent que 28% et 24% du gisement en Neq et Keq respectivement. Cela s'explique par les hautes teneurs en phosphore de certaines matières comme la cendre de bagasse, l'écume de sucrerie ou les farines de déchet d'abattoir.

Les gisements par commune sont représentés en Fig. 5 a,b,c. Les communes à fort gisements sont Le Tampon et Saint-Paul pour le N ; Le Tampon, Saint-Louis, Saint-Paul et Saint-André pour le P ; Le Tampon et Saint-Paul pour le K. Ces différences s'expliquent notamment par les forts gisements de coproduits de sucrerie riches en phosphore à Saint-Louis et Saint-André.

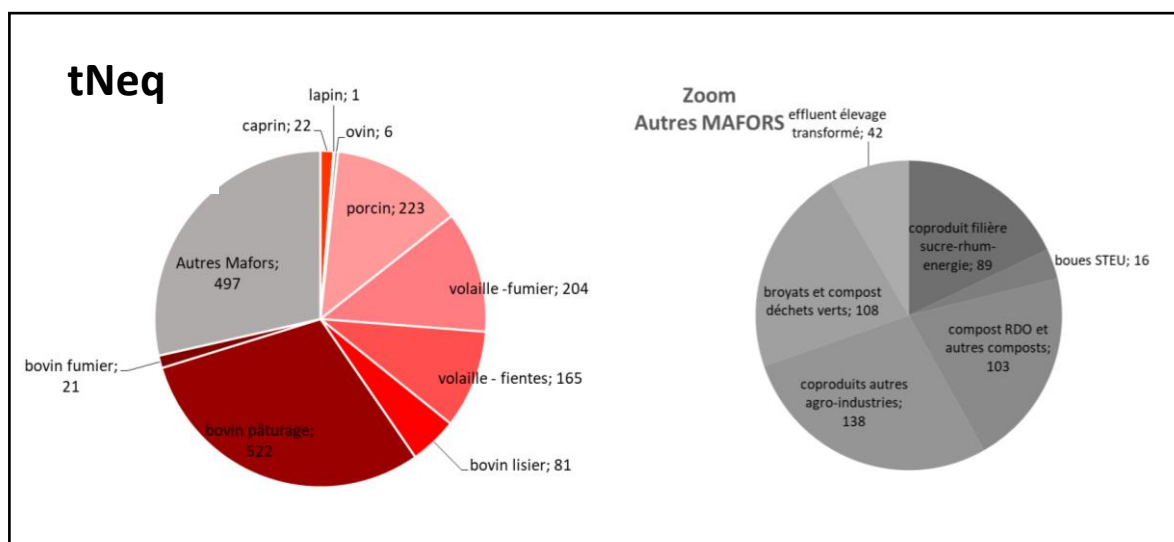


Figure 3a : Gisement de MAFORs en tonne d'azote équivalent engrais (tNeq)

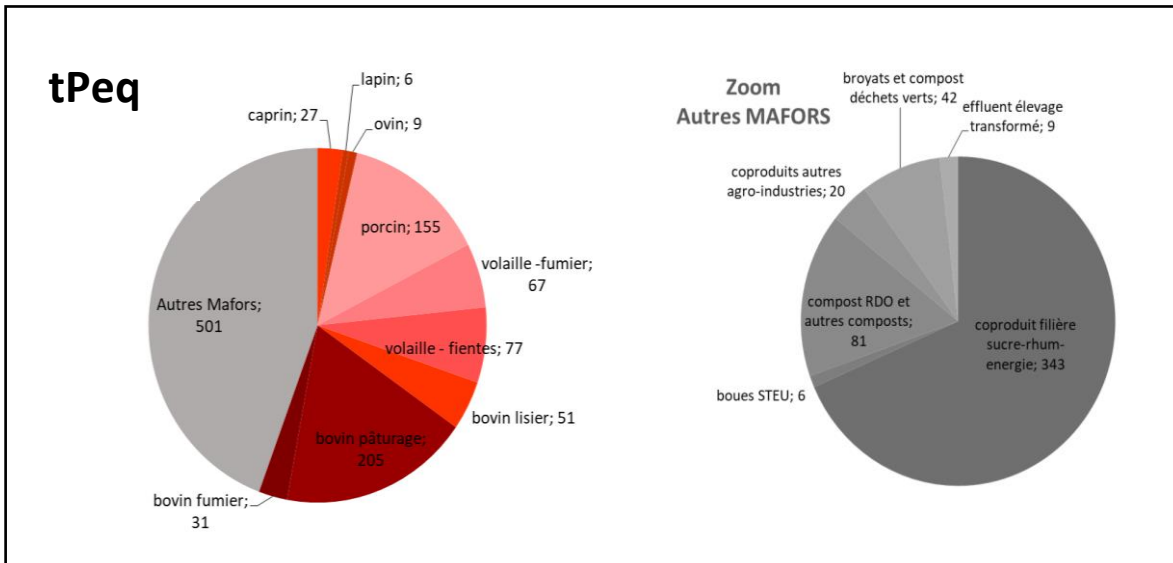


Figure 3b: Gisement de MAFORS en tonne de phosphore équivalent engrais (tPeq)

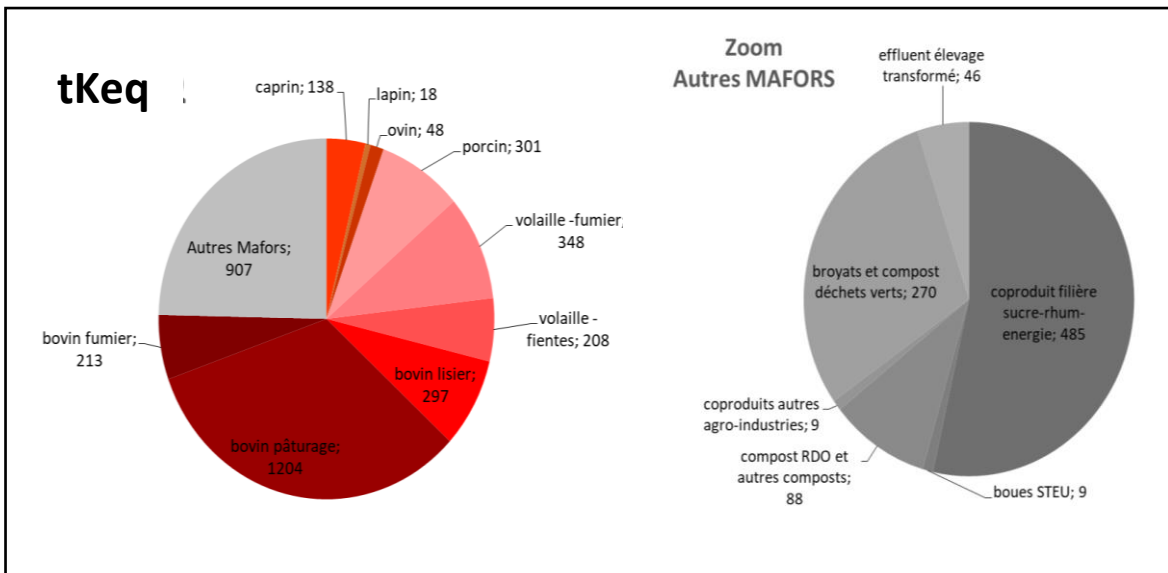


Figure 3c: Gisement de MAFORS en tonne de potassium équivalent engrais (tKeq)

3.2 Les besoins des cultures

Les besoins totaux pour la canne à sucre, les prairies et les cultures maraîchères et arboricoles ont été établis à 4800 tonnes, 1800 tonnes et 7700 tonnes en Neq, Peq et Keq respectivement. Les besoins de la canne représentent plus de 50% des besoins pour les trois nutriments (Fig. 4).

Les communes à fort besoin sont similaires pour les trois nutriments : Saint-Pierre, le Tampon, Saint-Benoit et dans une moindre mesure Saint-Paul, Saint-Joseph, Saint-André, Sainte-Suzanne et Sainte-Marie (Fig. 5 a,b,c).

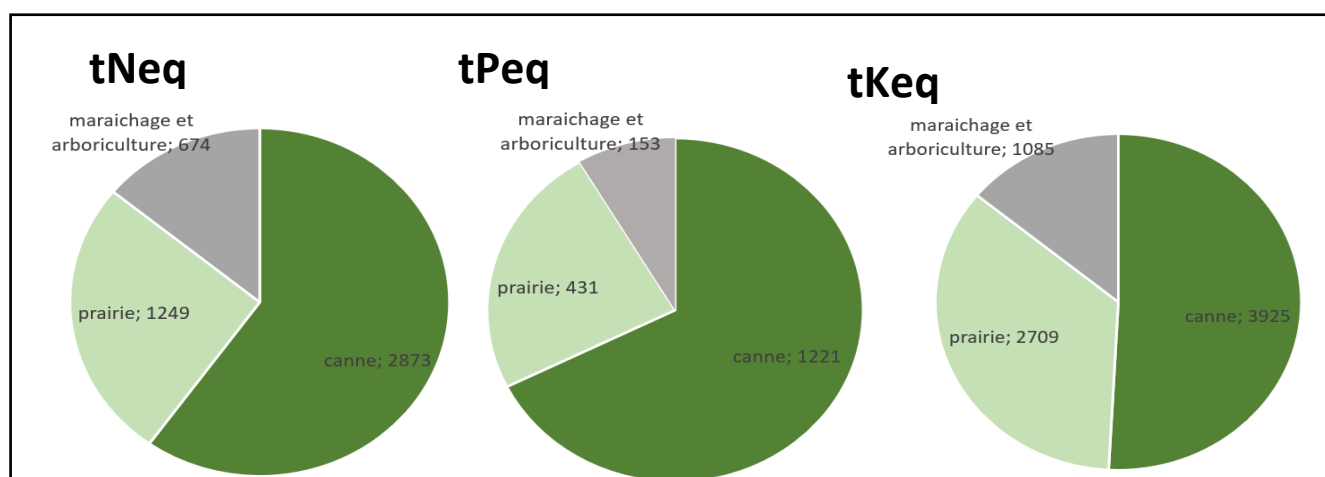


Figure 4 : Besoins des cultures en tonnes d'azote équivalent engrais (tNeq), tonnes de phosphore équivalent engrais (tPeq) et tonnes de potassium équivalent engrais (tKeq)

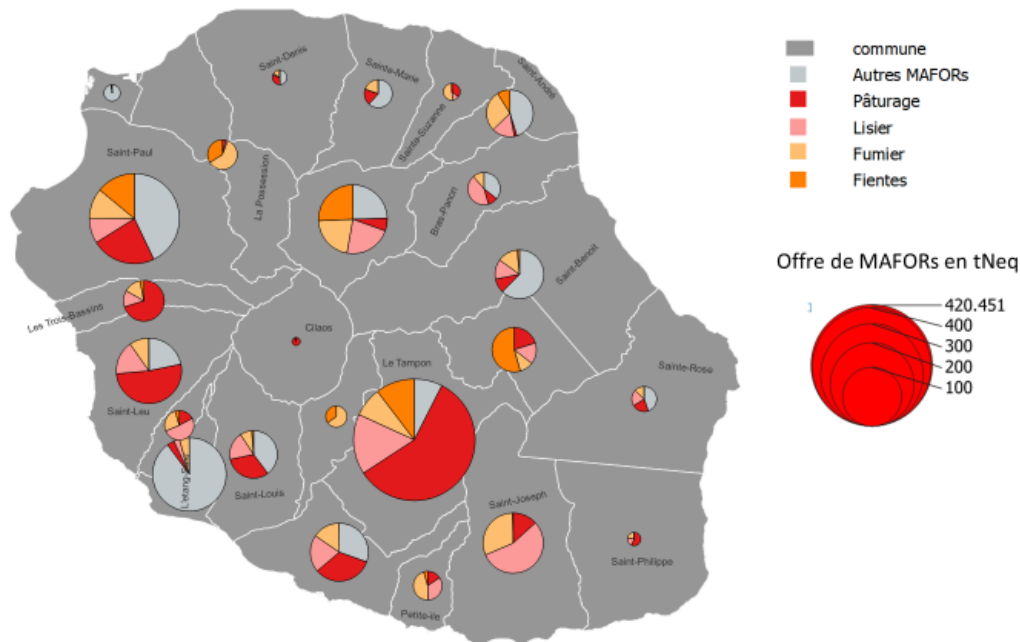


Figure 5a: Offre en tonnes N équivalent engrais par commune

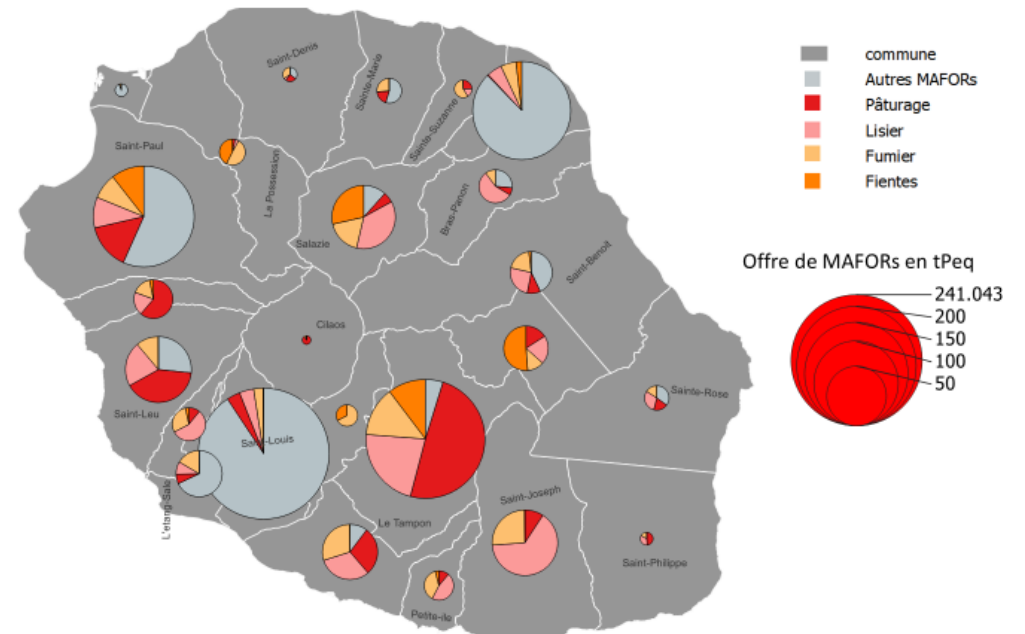


Figure 5b: Offre en tonnes P équivalent engrais par commune

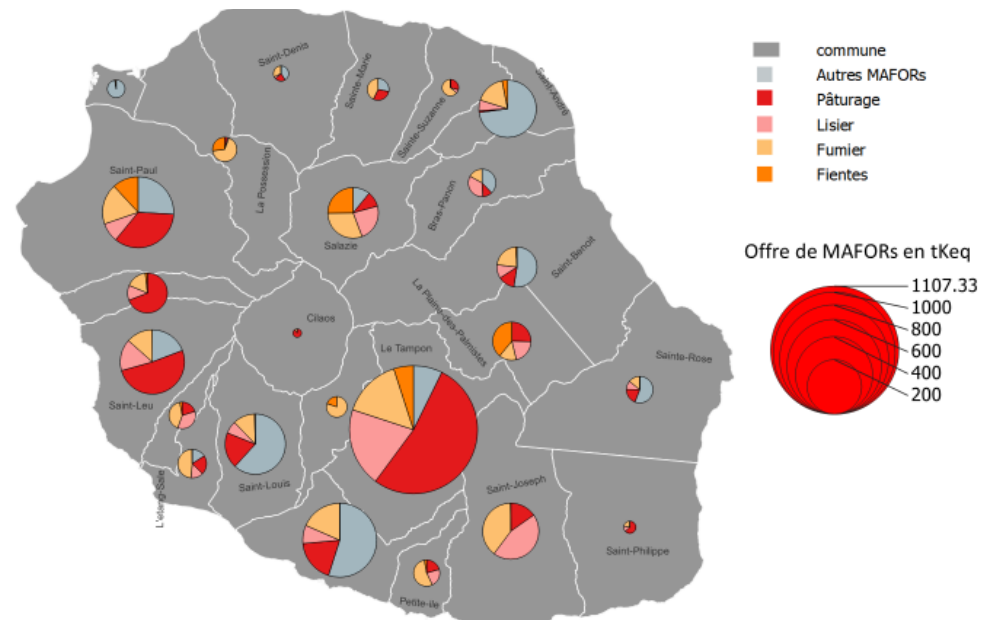


Figure 5c: Offre en tonnes K équivalent engrais par commune

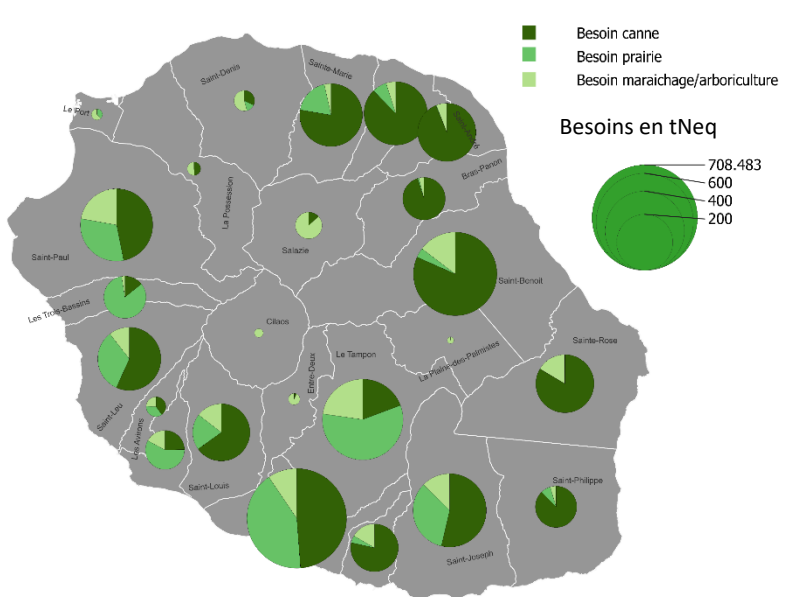


Figure 4a : Besoins en tonnes N équivalent engrais par commune

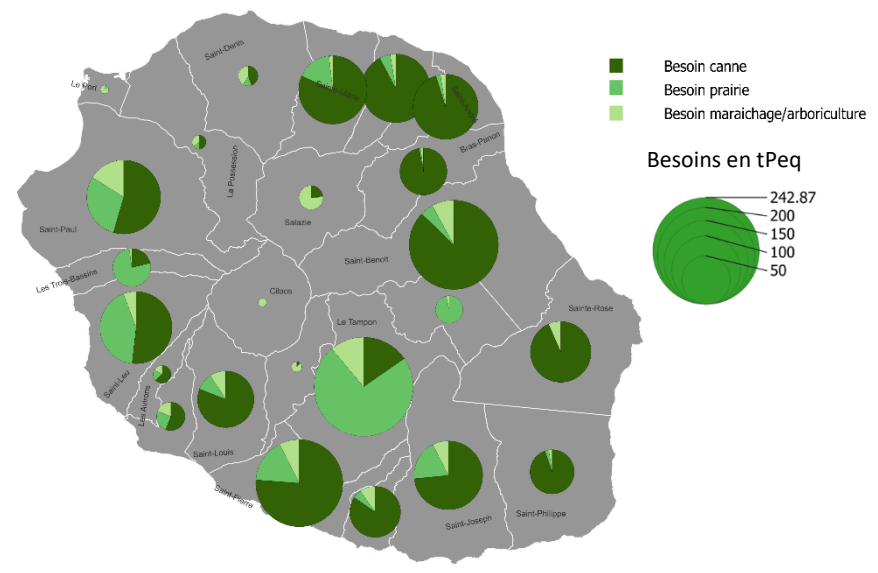


Figure 5b: Besoin en tonnes de P équivalent engrais par commune

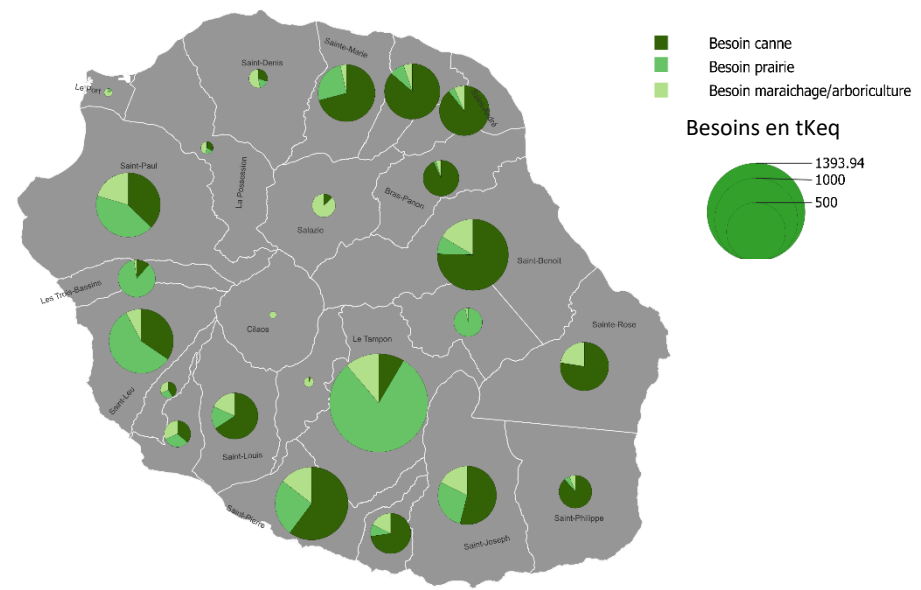


Figure 3c: Besoin en tonnes de K équivalent engrais par commune

3.3 Les bilans offre-demande

A l'échelle de l'île, les MAFORS couvrent 36%, 63% et 48% des besoins en N, P, K équivalent engrais des cultures (Fig. 6). Par ailleurs, l'analyse spatiale montre une disparité à l'échelle des communes (Fig. 7). Une majorité de communes (entre 13 et 18 communes selon les nutriments) sont en déficit de nutriments organiques par rapport aux besoins des cultures. Le phosphore est l'élément le plus souvent en excès avec 9 communes en excédent. Aucune commune n'est à l'équilibre pour les trois nutriments à la fois. Seul 3 communes sont à l'équilibre pour l'N (Le Tampon, Les Avirons, Le Port), 2 communes pour le P (Saint-Paul et le Tampon) et 1 commune pour le K (La plaine des palmistes).

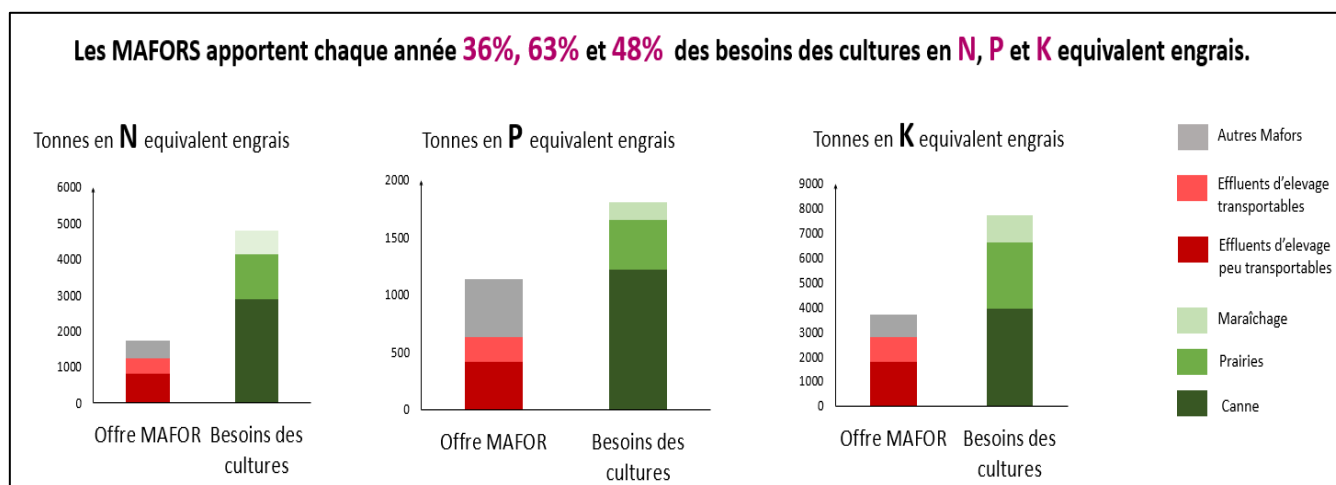
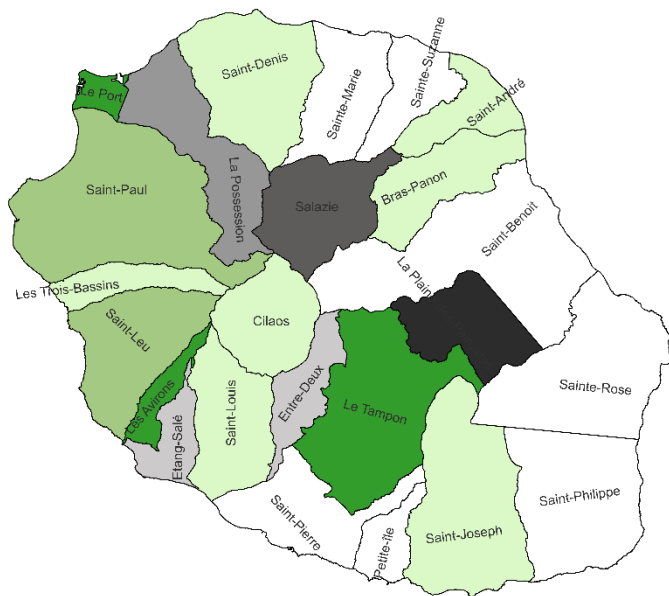
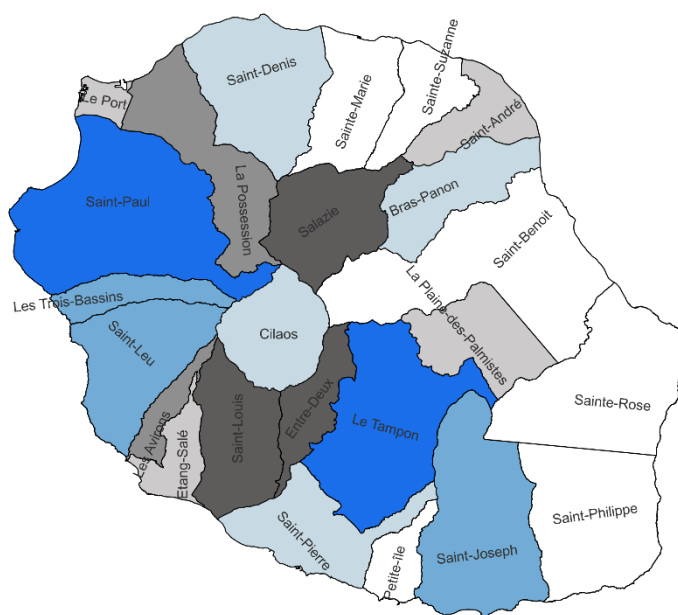
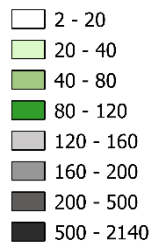


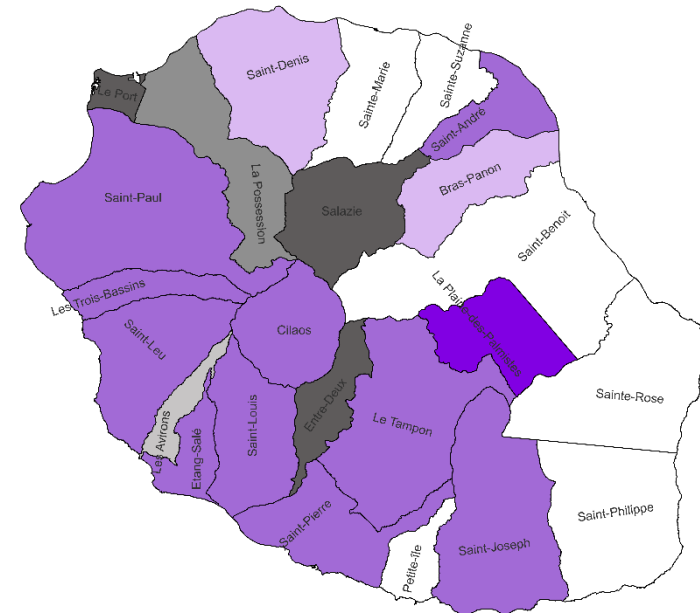
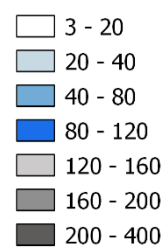
Figure 6 : Bilans offre-besoin en nutriments à l'échelle de l'île



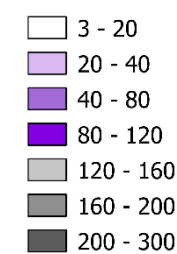
% de couverture **Neq**



% de couverture **Peq**



% de couverture **Keq**



	N	P	K
Communes en déficit (couverture < 80%)	16	13	18
Communes à l'équilibre (couverture entre 80% et 120%)	3	2	1
Communes en excès (couverture > 120%)	5	9	5

Neq = Azote équivalent engrais Peq = Phosphore équivalent engrais Keq = Potassium équivalent engrais

Figure 7 : Bilans offre-besoin en nutriments par commune

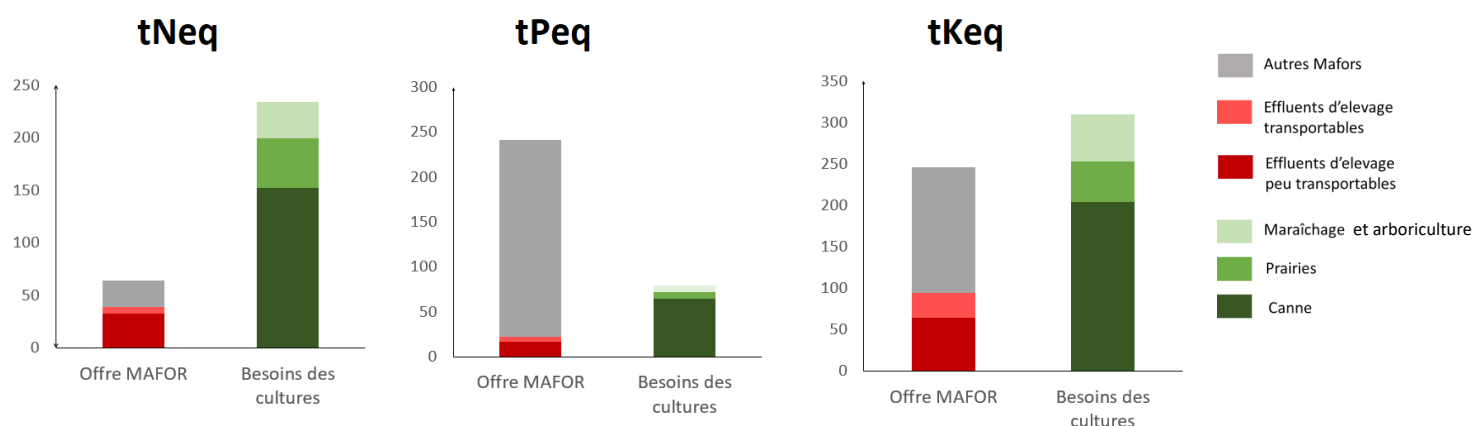
3.4 Typologie des communes en excédents.

Comme précédemment observé, plusieurs municipalités présentent des excédents en nutriments organiques, soit 5 pour l'azote (N), 9 pour le phosphore (P) et 3 pour le potassium (K) (Fig. 7). Cette section propose des exemples illustrant différentes situations d'excédents.

3.4.1 Les communes en excédent de MAFORs autres que les effluents d'élevage

Il s'agit de communes dont le surplus est causé par un gisement de matière issue de l'agro-industrie ou du traitement des déchets. Ce surplus est facilement mobilisable car concentré au lieu de production, et facilement exportable dans des communes en déficit de nutriments. Les communes concernées sont Saint-Louis et Saint-André (coproduits de sucrerie), Etang-Salé (farines du traitement de déchet d'abattoir), Le Port (déchets verts).

Ci-dessous on observe le bilan en nutriments de la commune de Saint-Louis (Fig. 8). L'excès en phosphore (en tPeq) est dû au gisement important d'écume de sucrerie sur la commune.



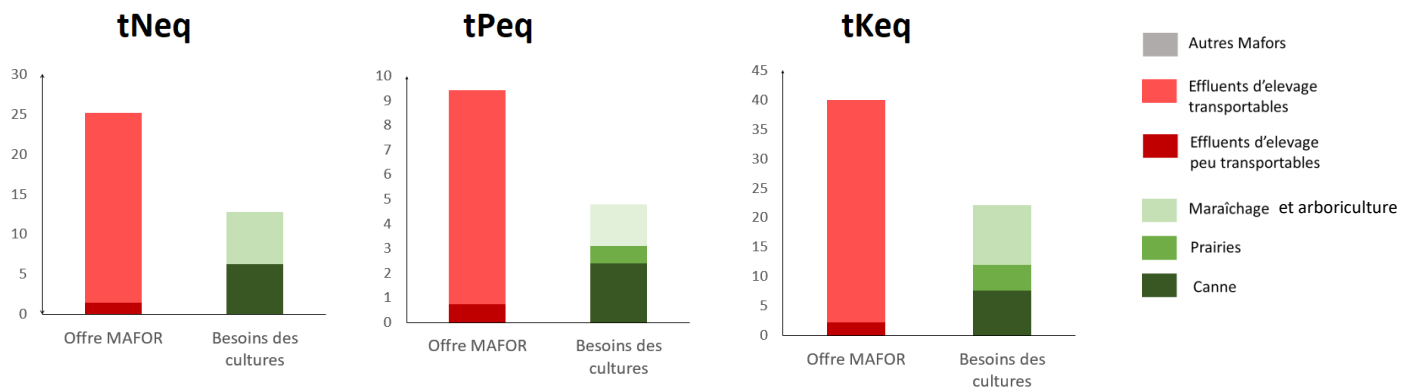
tNeq = tonnes d'azote équivalent engrais, tPeq = tonnes de phosphore équivalent engrais, tKeq = tonnes de potassium équivalent engrais

Figure 8 : Bilan offre-besoin en nutriments pour la commune de Saint-Louis

3.4.2 Les communes en excédent d'effluents d'élevage transportables

Il s'agit des communes qui pourraient se retrouver à l'équilibre si les fumiers et les fientes animales étaient exportés dans une commune en déficit. Le gisement est plus difficile à mobiliser que dans le cas précédent car il est plus diffus (il faut collecter l'effluent dans chaque exploitation). Les communes concernées sont la Possession, les Aviron et l'Entre deux.

Ci-dessous on observe le bilan de nutriment de la commune de la Possession (Fig. 9). L'excédent est dû au surplus de fumier de volaille. Dans le cas de cette commune, la collecte, le transport et l'exportation vers d'autres communes est d'autant plus facile que le gisement de fumier de volaille provient principalement d'un élevage de taille particulièrement importante.



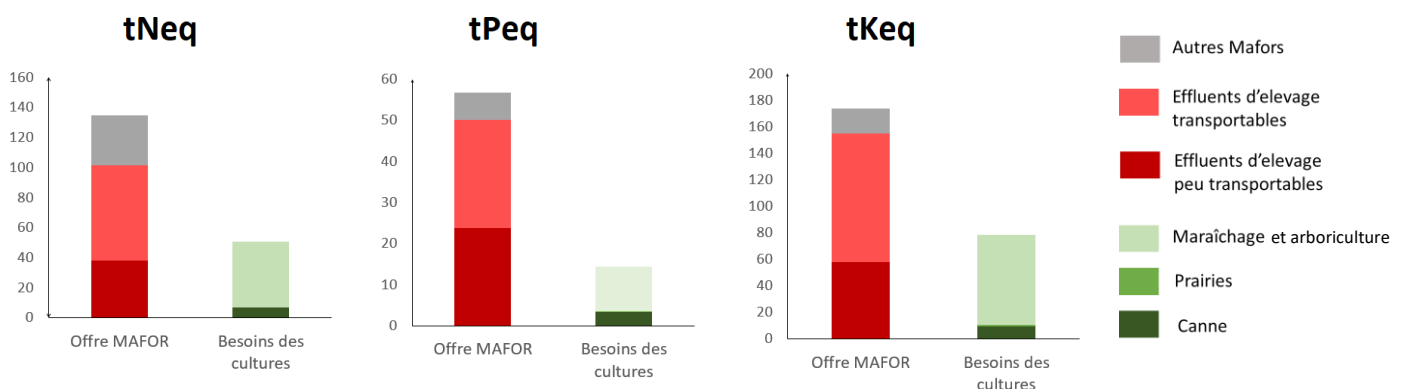
tNeq = tonnes d'azote équivalent engrais, tPeq = tonnes de phosphore équivalent engrais, tKeq = tonnes de potassium équivalent engrais

Figure 9 : Bilan offre-besoin en nutriments pour la commune de La Possession

3.4.3 Les communes en excédents d'effluents peu transportables : Salazie et la Plaine des Palmiste

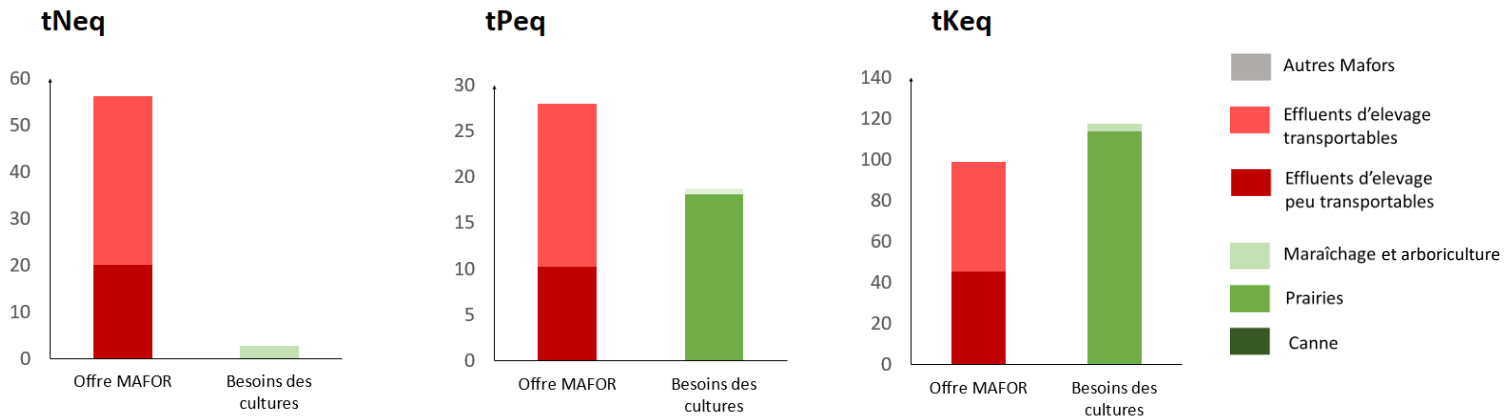
Deux communes sont en excès d'effluents peu transportables, pour des raisons différentes :

- Salazie est en excès sur les trois nutriments dû à un surplus de lisier porcin par rapport à la surface agricole limitée de la commune (Fig. 10). De plus, le lisier étant proscrit en maraichage, cela diminue d'autant plus les possibilités d'épandage dans la commune. Les solutions de co-compostage lisier-broyat de déchets verts, de séparation de phase, ou de développement du porc sur paille sont en réflexion afin d'obtenir un effluent plus transportable.
- La Plaine des Palmistes est en surplus d'azote à cause d'un besoin en azote des prairies très faible (Fig. 11). Cela s'explique par le fait que l'apport d'azote par la minéralisation du sol dépasse l'export par la fauche ou le pâturage. Les niveaux de prélèvement dans ces prairies sont bien en dessous du rendement potentiel. L'intensification de ces prairies (par l'augmentation du nombre de fauches, la mise en place du pâturage tournant et un chargement animal plus élevé) permettrait d'augmenter l'export de nutriment et de rétablir l'équilibre.



tNeq = tonnes d'azote équivalent engrais, tPeq = tonnes de phosphore équivalent engrais, tKeq = tonnes de potassium équivalent engrais

Figure 10 : Bilan offre-besoin en nutriments de la commune de Salazie



tNeq = tonnes d'azote équivalent engrais, tPeq = tonnes de phosphore équivalent engrais, tKeq = tonnes de potassium équivalent engrais

Figure 11: Bilan offre-besoin en nutriments de la commune de la Plaine des Palmistes

4 DISCUSSION

4.1 Autonomie de l'île à court terme

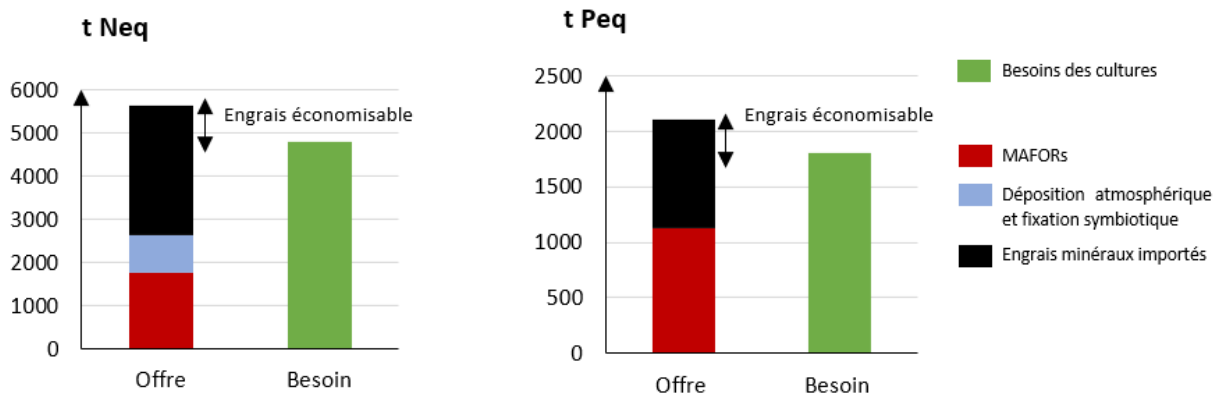


Figure 12 : Bilan offre-demande en nutriments en intégrant la fixation symbiotique, la déposition atmosphérique et l'engrais importé

Actuellement, les besoins des cultures ne sont pas couverts par les MAFORs à l'échelle de l'île. Les cultures ont donc besoin d'un autre apport en nutriments. Aujourd'hui ce besoin est essentiellement comblé par l'import d'engrais chimique, et en moindre mesure par la déposition atmosphérique et la fixation symbiotique de l'azote (Alvanitakis et al., 2024; Kleinpeter et al., 2023) L'analyse des données des douanes (Kleinpeter et al., 2023) montre que l'apport total de nutriment sous forme organique (par les MAFORs) et minérale (par les engrais de synthèse) dépasse le besoin total des cultures sur l'île (Fig. 12). Une économie d'engrais chimique semble donc être possible sur le court terme, avec un potentiel maximum de 800 tonnes d'azote et 300 tonnes de phosphore économisables, soit environ 30% des nutriments minéraux importés. Mais cette économie ne peut se faire qu'à la condition d'une meilleure répartition spatiale des épandages de MAFORs dans les différentes communes de l'île.

4.2 Dynamique de stockage dans les sols sur le long terme

Le bilan équivalent engrais utilisé dans cette étude ne donne qu'une vision de court terme de la situation. En effet les besoins équivalent engrais des cultures s'estiment à partir de l'état du sol actuel.

De plus, les apports équivalents engrais des MAFORs comptabilisent uniquement les nutriments immédiatement disponibles ou disponibles dans l'année de l'épandage. La part organique stabilisée, qui sera minéralisée lentement dans les années suivantes (n+1 à n+3 principalement), n'est pas comptabilisée. Le bilan devra être recalculé après quelques années pour tenir compte de l'enrichissement des sols par les matières organiques.

Le bilan en nutriment brut est une approche complémentaire qui permet de se faire une idée de la dynamique de stockage dans les sols.

$$\text{Bilan en nutriment brut} = \text{Apports en nutriments bruts} - \text{Exports par la récolte} - \text{Pertes par lessivage ou volatilisation}$$

Les pertes d'azote sont estimées par (Kleinpeter et al., 2023). Par cette seconde méthode on estime ainsi un surplus d'environ +3 600 tonnes d'azote et +1 500 tonnes de phosphore soit un stockage potentiel dans les sols, à l'échelle de l'île, de +90 kgN/ha/an et +40 kgP/ha/an (Fig.13). On peut donc faire l'hypothèse d'une hausse de la disponibilité du N et du P dans les sols à long terme, et donc d'une baisse du besoin d'importation d'engrais de synthèse.

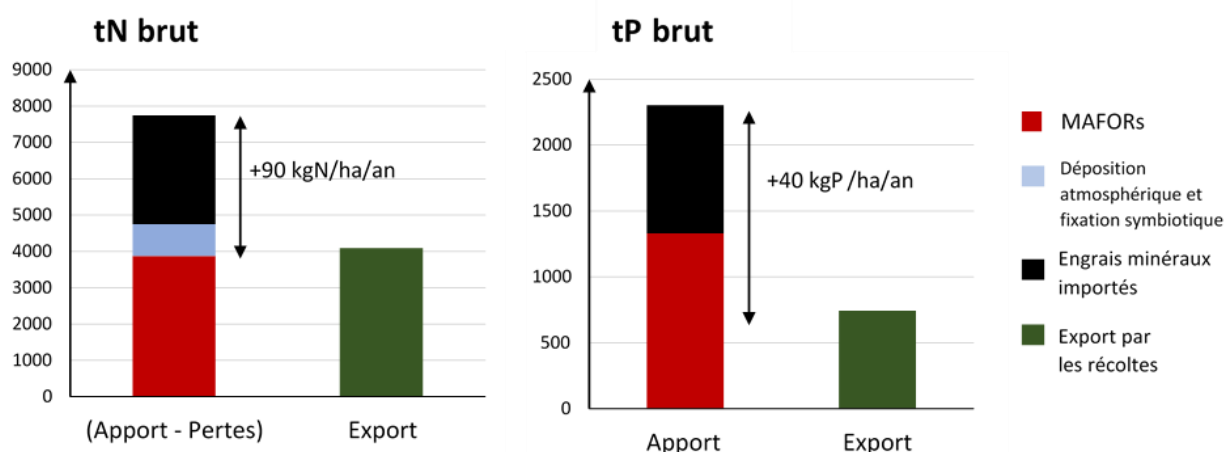


Figure 13: Bilan Apport-Export en nutriments et dynamique de stockage dans les sols

4.3 De nouveaux gisements mobilisables à l'avenir

La Loi pour la Transition Énergétique et la Croissance Verte, promulguée en 2015, impose un tri à la source et une valorisation par compostage et/ou méthanisation des biodéchets d'ici 2024. Selon (ADEME, ECOGEOS / ESPELIA., 2019), 40 200 tonnes de biodéchets sont produites chaque année par les ménages réunionnais. En appliquant une teneur en N, P, K de 1.88%, 2.04% et 2.34% respectivement, on obtient 754 tN, 160 tP et 940 tK de biodéchets enfouis chaque année à La Réunion. En admettant une perte d'azote de 30% au compostage, et une équivalence engrais du compost obtenu de 0.25 pour N, 0.85 pour P et 1 sur K, on obtient un gisement supplémentaire de 132 tNeq., 136 tPeq. et 940 tKeq. équivalent engrais.

Ainsi si on compostait l'ensemble des biodéchets ménagers, le taux de couverture des besoins des cultures en équivalent engrais passerait à **39%, 70% et 60% pour N,P,K**. Ce calcul rapide montre la capacité des surfaces agricoles de l'île à absorber de nouvelles sources de fertilisants organiques.

4.4 Comparaison avec les études antérieures à La Réunion

Cette étude est difficilement comparable avec l'Atlas des matières organiques à La Réunion (Sinoir, 2007). En effet, dans cette précédente étude concentrée sur l'azote, le bilan entre offre et besoin pour chaque commune est effectué en prenant en compte un « besoin en azote organique utilisable », qui est défini comme le besoin annuel en azote de la culture divisé par 2. Ce facteur est utilisé dans l'objectif de représenter la surface des cultures potentiellement épandable. Ce chiffre ancien est aujourd'hui débattu demanderait à être établi précisément par une étude cartographique.

De plus, l'étude de 2007 ne prend en compte que les effluents d'élevage et les boues de STEP, tandis que la présente étude de 2023 prend également en compte les autres MAFORS (déchets verts, coproduits de sucrerie, farine de viande et d'os, farine de plumes et de sang, fientes granulées)

Notre étude est également difficilement comparable avec celle de (Coronzier, 2022) qui avait estimé une couverture potentielle des cultures par les MAFORS de 23% pour l'azote, 100% pour le phosphore, et 30% pour le potassium (contre 36%, 63% et 48% pour la présente étude). Ces différences s'expliquent principalement par des différences d'hypothèses dans les besoins des cultures. Par exemple, (Conrozier, 2022) utilise un besoin moyen de 70 kgP₂O₅/ha pour la canne à sucre, alors que notre méthode abouti à un besoin moyen de 52 kgP/ha soit 119 kgP₂O₅/ha. De plus l'étude de (Conrozier, 2022) considère uniquement les besoins des prairies de fauche alors que notre étude considère l'ensemble des prairies fauchées et pâturées. Notre étude prend également en compte le pâturage dans le gisement des MAFORS ce qui n'est pas le cas dans l'étude de (Conrozier, 2022). Enfin, (Conrozier, 2022) effectue un appariement entre les MAFORS et les cultures, ce que nous ne faisons pas dans notre étude.

5 Conclusion

À l'échelle de l'île, les MAFORS couvrent aujourd'hui, en équivalent engrais, **36%**, **63%** et **48%** des besoins des cultures en azote (Neq), phosphore (Peq) et potassium (Keq) respectivement. De plus, le compostage des biodéchets des ménages, en tant que nouveau gisement MAFORS potentiel épandable augmenterait la couverture des besoins des cultures à 39% pour l'azote, 70% pour le phosphore et 60% pour le potassium (toujours en équivalent engrais).

À l'échelle des communes, des disparités significatives sont observées. Aujourd'hui dans la plupart des communes les gisements de nutriments organiques sont inférieurs aux besoins en nutriment des cultures. 5 communes sont en excès d'azote organique par rapport aux besoins, 9 en excès de phosphore et 5 en excès de potassium. La plupart des communes en excédent ont la possibilité de transporter leurs MAFORS (fumiers, fientes, MAFORS autres que les effluents d'élevage) vers les autres communes en déficit. Cependant, deux communes, Salazie et la Plaine des Palmistes, font face à un excès de MAFORS non transportables (lisier et excréation des animaux au pâturage non manipulable) par rapport aux besoins des plantes, nécessitant un changement profond de mode de gestion des effluents d'élevage (à Salazie) ou une intensification de la conduite des prairies, pâturées notamment (à la Plaine des Palmistes).

Nous avons montré qu'il y a un surplus positif de +800 tonnes Neq et +300 tonnes Peq entre l'offre totale de fertilisants sur l'île (organique produit localement et minéral importé) et les besoins totaux des cultures. Une réduction de l'importation des engrais de synthèse semble donc possible à la condition que les épandages de MAFORS soient bien répartis entre les différentes communes de l'île, en respectant les besoins des cultures et les restrictions d'épandage sur certaines cultures (le maraichage notamment).

Enfin, la seconde méthode de bilan complémentaire en nutriment brut (sans conversion en équivalent engrais) nous montre une dynamique de stockage d'azote et de phosphore dans les sols de l'ordre

d'en moyenne +90 KgN/ha/an et +40 KgP/ha/an à l'échelle de l'île. Cette dynamique de stockage pourrait augmenter la disponibilité des nutriments dans le sol sur le long terme et ainsi encore accroître la possibilité de réduction des importations d'engrais de synthèse.

6 Bibliographie

- ADEME, ECOGEOS / ESPELIA., 2019. Caractérisation des déchets sur l'île de la Réunion.
- Alvanitakis, M., Kleinpeter, V., Vigne, M., Vayssières, J., 2024. A substance flow analysis to assess the potential benefits of livestock based circularity for nutrient use efficiency and carbon return to soils in the agrofood-waste system of a tropical Island- Submitted to agricultural systems.
- Chabalière, P.-F., van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006. Guide de la fertilisation organique à la Réunion.
- Coronzier, R., 2022. FICHE TECHNIQUE Estimer ce que peuvent apporter les matières fertilisantes d'origine résiduaire aux cultures.
- CORPEN, 2003. « Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. » Groupe Porc - Juin 2003. 27.
- Doublet, S., Le Gall, Guillaume, 2013. NOPOLU-Agri, Outil de spatialisation des pressions de l'agriculture, Méthodologie et résultats pour les surplus d'azote et les émissions de gaz à effet de serre, Campagne 2010-2011.
- FERTIRUN, CIRAD et Chambre d'agriculture, 2018. FERTIRUN.
- Giovanni, R., Dulphy, J., 2008. Présentation de références Corpen simplifiées pour l'évaluation des rejets et des pressions d'azote et de phosphore des troupeaux bovins.
- ITAVI, 2013. Estimation des rejets d'azote – phosphore - potassium calcium - cuivre – et zinc par les élevages avicoles.
- Kerdode, C., 2023. Nutrient self-sufficiency in agriculture on La Réunion - Analysis of the balance between crop needs and availability of residual fertilizing materials by commune - Rapport de stage de fin d'étude - ESA Angers.
- Kleinpeter, V., Alvanitakis, M., Vigne, M., Wassenaar, T., Lo Seen, D., Vayssières, J., 2023. Assessing the roles of crops and livestock in nutrient circularity and use efficiency in the agri-food-waste system: A set of indicators applied to an isolated tropical island. Resources, Conservation and Recycling 188, 106663. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106663>
- Lorre, F., 2019. Évaluation du disponible fourrager à l'échelle de l'île de la Réunion et leviers pour une meilleure valorisation des surfaces fourragères.
- Magnier, J., Lurette, A., Vayssières, J., 2019. Evaluation de la consommation fourragère à La Réunion. Mémoire ingénieur, École supérieure d'agriculture d'Angers, 166p.
- Miralles, M., 2020. Raisonner la fertilisation azotée des prairies.
- Miralles, M., Pierre, P., Legendre, E., Dutreuil, F., 2020. Les besoins en azote des prairies.
- Miralles-Bruneau, M., 2022. Analyse de la méthodologie de calcul des exports de phosphore des prairies développée par l'ARP.
- Miralles-Bruneau, M., Pierre, P., Boyer, A., Riviere, E., Delaby, L., 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. Fourrages.
- Pierre, P., 2018. Compte Rendu de la mission Fertilisation du 8 au 12 Avril 2019.
- RA, 2020. Recensement agricole 2020, <https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2020-r952.html>.
- Russeil, V., Lo Seen, D., Broust, F., Bonin, M., Praene, J.-P., 2023. Food and electricity self-sufficiency trade-offs in Reunion Island: Modelling land-use change scenarios with stakeholders. Land Use Policy 132, 106784. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106784>

- SERDAF, 2011. Système Expert Réunionnais D'Aide à la Fertilisation (SERDAF), Cahier des charges Version 7.5.
- Sinoir, M., 2007. Atlas des matières organiques issues des activités d'élevage et d'assainissement urbain à la Réunion. Direction de l'agriculture et de la forêt de la Réunion CIRAD [Station de la Bretagne], Saint-Denis.
- Vigne, M., Achard, P., Alison, C., Castanier, C., Choisis, J.P., Conrozier, R., Courdier, R., Degenne, P., Deulvot, A., Dupuy, S., Février, A., Hatik, H., Huat, J., Kleinpeter, V., Kyulavskim, V., Lurette, A., Payet, A.L., Rondeau, P., Soulié, J.C., Thomas, P., Thuries, L., Tillard, E., Van de Kerchove, V., Vayssières, J., 2021. Une agronomie clinique et territoriale pour accompagner la transition vers une économie circulaire autour de l'agriculture : mise à l'épreuve et enseignements du projet GABiR à La Réunion. AE&S 11. <https://doi.org/10.54800/bir974>