

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

M. Miralles-Bruneau¹, P. Pierre², A. Boyer³, E. Rivière¹, L. Delaby⁴, E. Tillard¹

Depuis 2019, l'Association Réunionnaise de Pastoralisme a engagé un travail approfondi sur la mise en place d'outils de raisonnement et de pilotage de la fertilisation des couverts prairiaux. Différentes approches développées en métropole ont été transposées au contexte de l'île de La Réunion. En matière de fertilisation azotée, l'adaptation de la méthode du bilan a été initiée en référençant les différents postes du bilan. Le poste « fourniture d'azote par le sol » a fait l'objet d'une analyse spécifique, basée sur la valorisation d'expérimentation à long terme menées sur l'île.

RESUME

La valorisation des travaux analytiques conduits par le CIRAD sur l'île de la Réunion au cours de la période 2005 à 2012 a permis de préciser les fournitures en azote associées à la minéralisation de l'azote organique en l'absence d'apport d'azote exogène (témoins 0N). Quatre contextes pédoclimatiques sont décrits en intégrant différentes altitudes et pluviométries. A l'échelle de l'année, le prélèvement d'azote par la prairie associé à la minéralisation de l'azote du sol dépasse les 200 kg N/ha/an. Sur le littoral, ce prélèvement varie de 200 à 380 kg N/ha/an. A 1 600 m d'altitude, il varie de 170 à 280 kg N/ha/an. Ces quantités d'azote disponibles pour le couvert doivent être prises en compte dans les prévisions de fertilisation en lien notamment avec les profils de croissance de l'herbe observés à La Réunion. La variabilité observée sur les différents sites renforce la nécessité de compléter ces données par de nouvelles références issues de sites complémentaires et de les intégrer dans un modèle de prévision.

SUMMARY

Adaptation of the nitrogen balance method to the context of grasslands in Réunion. Contribution to the analysis of the nitrogen supply of grassland soils in Reunion Island

An evaluation of previous analytical work carried out by CIRAD on the island of Réunion during the period 2005 to 2012 made it possible to specify the nitrogen supplies associated with the mineralization of organic nitrogen in the absence of exogenous nitrogen supply (controls 0N). Four pedoclimatic contexts are described integrating different altitudes and rainfall. Annually, the nitrogen uptake and associated to the soil mineralization exceed 240 kg N/ha/year. These quantities of nitrogen available for the canopy must be taken into account in the fertilization forecasts, particularly in relation to the grass growth profiles observed in La Réunion. The variability observed on the different sites reinforces the need to supplement with new references acquired from data from complementary sites and to integrate into a forecasting model.

1. Prairies et pratiques de fertilisation de la Réunion

Sur l'île de la Réunion, les conditions pédoclimatiques très favorables permettent une production et valorisation de l'herbe toute l'année. Les potentiels de rendement y sont élevés. Bien gérées

(exploitation régulière, fertilisation adaptée, gestion du pH du sol), les prairies peuvent produire de 18 à 35 t de MS/ha/an, selon les espèces et les secteurs (Blanfort, 1998 ; Leleux, 2016 ; Mandret *et al.*, 2000b ; Thomas *et al.*, 2004). Les potentiels de rendements les plus élevés sont observés dans les Bas (0 à 600 m d'altitude), où le climat de type tropical humide permet une pousse continue. Des rendements de l'ordre de 20 à 35 t de MS/ha/an sur des prairies de Chloris (*Chloris gayana*)

AUTEURS

1 : CIRAD – UMR SELMET (Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux), 7 chemin de l'Irat, 97410 Saint Pierre ; maeva.miralles-bruneau@cirad.fr

2 : IDELE – Institut de l'Elevage, 42 rue Georges Morel – CS 60057, 49071 Beaucouzé Cedex, patrice.pierre@idele.fr

3 : Association Réunionnaise de Pastoralisme, 97418 La Plaine des Cafres

4 : INRAE – Institut Agro, Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage, F-35590 Saint Gilles

MOTS-CLES : Fertilisation minérale, fertilisation organique, production fourragère

KEY-WORDS: Mineral fertilization, organic fertilization, forage production

REFERENCE DE L'ARTICLE : Miralles-Bruneau M., Pierre P., Boyer A., Rivière 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* 249, 69-76

et *Brachiaria (Urochloa decumbens)* irriguées et bien gérées sont observés. Aux altitudes intermédiaires (600 à 1 000 m) et dans les Hauts (1 000 à 2 000 m), les potentiels de rendements sont un peu plus faibles du fait des variations de température saisonnières qui ralentissent, voire arrêtent la pousse de l'herbe en hiver. Ainsi, une prairie de kikuyu (*pennisetum clandestinum*) ou de graminées et légumineuses associées (ray-grass, dactyle, trèfle blanc) peut atteindre un rendement moyen de l'ordre de 18-20 t MS/ha/an, avec des pics à 25-28 t de MS/ha/an. Ces niveaux de rendements sont cependant rarement observés en élevage. Une étude visant à identifier les causes de la sensibilité des élevages bovins, en termes d'autonomie fourragère, a mis en évidence une sous valorisation des prairies au regard du potentiel permis, de l'ordre de 40 à 70 % (Leleux, 2016). Aussi, le rendement valorisé serait de 6 à 8 t MS/ha/an en moyenne sur prairie pâturée, et de 10 à 12 t MS/ha/an en moyenne pour les fauches.

Au-delà de la sous-valorisation, un des principaux facteurs identifiés porte sur les pratiques de fertilisation des prairies. Des enquêtes réalisées chez des éleveurs bovins allaitants et laitiers (Scherrer, 2017; communication Chambre d'Agriculture de la Réunion) ont révélé que très peu d'éleveurs raisonnent la fertilisation des prairies. La majorité n'enregistrent pas, ou partiellement, leurs interventions, et ne connaissent pas précisément les niveaux d'apports. Les prairies fauchées font l'objet d'une fertilisation plus régulière que les pâtures (4 à 8 apports par an, contre 0 à 5). Les engrais minéraux sont utilisés dans la moitié des élevages (53 % des allaitants, 51% des laitiers). Le choix de la nature de l'engrais va dépendre principalement des disponibilités en magasins, et les quantités apportées sont rarement raisonnées en fonction de la composition du produit épandu. Les doses d'apport varient de 20 à 130 unités d'azote par hectare et par apport. Les engrais organiques sont fréquemment utilisés (43 % des allaitants, 94 % des laitiers), quand ils sont produits sur l'exploitation ou disponibles dans le voisinage (lisiers, fumiers). 60% des éleveurs interrogés ne sont pas en mesure de dire précisément quelle quantité d'engrais organique ils ont épandu. Leur valeur fertilisante est rarement prise en compte dans le raisonnement de la fertilisation. Pour la majorité, leur valeur fertilisante est considérée comme faible, et cela malgré des travaux de caractérisation et de vulgarisation (Busson *et al.*, 2010; Chabalié *et al.*, 2006). Globalement, les éleveurs déclarent suivre les préconisations diffusées par l'encadrement technique (ARP, EDE, CIRAD, Chambre d'Agriculture, coopératives, commerciaux), mais on observe avec le temps une dérive des pratiques. En effet, par le passé, de nombreux travaux ont été menés pour définir les pratiques de fertilisation les plus appropriées aux espèces fourragères locales et aux différents contextes pédoclimatiques de La Réunion (Blanfort, 1998; Fritz and Loynet, 1973; Mandret *et al.*, 2000a; Michellon *et al.*, 1982). A cette période, l'encadrement technique accompagne les jeunes filières bovines, en

phase de développement et de professionnalisation. Depuis les années 2000, la réorientation des activités de cet encadrement technique, ainsi qu'un turnover important, a eu pour conséquence une moindre présence en élevages sur ces thématiques considérées, à tort, comme acquises.

Les dernières préconisations en matière de fertilisation azotée (Thomas *et al.*, 2004) sont basées sur la compensation des exportations d'azote, et la prise en compte de la saisonnalité pour lisser la productivité au cours de l'année. Elles préconisent à ne pas faire d'apport en saison des pluies, pour limiter la croissance de l'herbe à une période où elle est très importante (croissances de 80 à 130 kg MS/ha/jour) et difficile à valoriser (fortes pluies), et d'apporter de l'azote en fin de saison des pluies et en début de saison sèche, pour maintenir un bon niveau de croissance le plus longtemps possible, et limiter les déficits fourragers en saison sèche. Cette approche ne prend pas en compte la fourniture du sol en azote, qui est potentiellement élevée à la Réunion. Aussi, les marges de progrès sont importantes, en termes d'actualisation des connaissances, de démarches de conseils et d'accompagnement technique des éleveurs dans la mise en œuvre d'un raisonnement global de la fertilisation des prairies à l'échelle de l'exploitation. La démarche définie par l'ARP et l'IDELE, avec l'appui du CIRAD, s'appuie sur l'utilisation de deux principaux outils dédiés au raisonnement de la fertilisation sur les prairies : la méthode du bilan azoté, utilisée en amont pour définir le plan prévisionnel de fertilisation annuelle en azote, et les diagnostics de nutrition phosphatée et potassique utilisés en aval pour piloter la fertilisation à venir pour ces deux éléments. La méthode du bilan azoté est la méthode préconisée par le COMIFER (Comifer, 2013) pour établir un bilan prévisionnel de fertilisation azotée sur prairie. Elle a été paramétrée selon les conditions de la métropole. L'ARP a donc engagé en novembre 2018, un travail d'adaptation de cette approche au contexte des prairies réunionnaises, en valorisant les travaux menés ces dernières années par le CIRAD.

2. La méthode du bilan azoté appliquée à la prairie

Deux approches sont classiquement utilisées en matière de gestion de la fertilisation azotée des prairies :

- Une approche prévisionnelle reposant sur une estimation du besoin en azote du couvert prairial minorée des différentes sources d'azote disponibles pour la prairie (minéralisation de la matière organique, contribution des légumineuses et restitution par les animaux). Ce raisonnement reposant sur la méthode du bilan est proposé par le COMIFER. Ces approches prévisionnelles sont très souvent mobilisées dans les textes réglementaires (Directives Nitrates) encadrant au niveau

départemental les pratiques de fertilisation azotée sur les différentes cultures et prairies.

- Une approche relevant du pilotage de la fertilisation des couverts en lien avec la réalisation de diagnostic de nutrition foliaire. En matière de fertilisation azotée, cet outil développé sur prairie de graminées permet un ajustement des doses d'azote à la dynamique d'absorption de l'azote dans la plante *via* le calcul de l'indice de nutrition azoté. Sur un plan opérationnel, cet outil nécessite en temps réel une quantification du rendement sur pied de la végétation et la réalisation d'une analyse de la valeur minérale de l'herbe.

En pratique, ces deux approches se révèlent complémentaires dans un objectif de proposer aux éleveurs et aux techniciens une démarche cohérente de raisonnement de la fertilisation azotée des prairies. Ces deux approches seront abordées dans la suite de cet article.

En matière de fertilisation azotée, le raisonnement et la prévision des quantités à apporter sur les prairies s'appuient sur la méthode du bilan. Cet outil est utilisable sur les prairies à dominante de graminées. Son principe repose sur l'ajustement de la dose d'azote minéral aux exportations par le couvert végétal minoré d'une quantité d'azote provenant de 3 origines :

1. la fourniture par le sol,
2. les restitutions au pâturage,
3. la contribution des légumineuses.

Les références relatives à ces différents postes sont issues de travaux expérimentaux qu'il importe de caractériser localement. C'est le cas de l'estimation de la fourniture en azote par le sol qui présente une variabilité interannuelle importante et est fortement influencée par les caractéristiques pédoclimatiques locales. Concernant la contribution des légumineuses, elles sont peu présentes dans les prairies réunionnaises. C'est un volet qui ne peut pas être défini localement pour le moment. Aussi elle sera évaluée, comme pour les restitutions au pâturage, *via* des référentiels métropolitains. Dès 1986, de Montard avait proposé pour les prairies du Massif Central une démarche de raisonnement qui s'apparentait à l'équation d'efficacité développée pour les cultures annuelles. Depuis, des travaux d'adaptation de cette démarche ont été réalisés (Bonnet, 1992 ; Chambre Régionale des Pays-de-la-Loire, 1998; Farruggia, 1994; Grenet, 1991). La méthode de calcul de la dose d'azote pour la prairie, adoptée par l'ensemble des organismes de développement agricole repose sur l'équation d'efficacité d'utilisation de l'engrais :

$$N_{exp} = (NO + N_{leg} + N_{rest}) + CAU (X + X_a)$$

N_{exp} est la quantité totale d'azote exportée par la prairie au cours de la saison de croissance.

NO représente la quantité totale d'azote exportée par une prairie fauchée sans légumineuse, sans

pâturage et en l'absence de fertilisation azotée au cours de l'année.

N_{leg} est l'azote provenant de la fixation symbiotique des légumineuses.

N_{rest} est la contribution directe des restitutions au pâturage de l'année.

CAU est le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais : la fraction de l'azote apportée sous forme d'engrais, qui est absorbée par la prairie et retrouvée dans la partie aérienne des plantes.

(X + X_a) est la quantité totale d'azote à apporter : X étant la quantité d'engrais minéral et X_a, l'effet direct des apports d'engrais de ferme en équivalent engrais.

Cette équation reposant sur l'additivité de ces différents termes ne prend pas en compte la capacité d'absorption et de croissance de la végétation, ainsi que les interactions qui peuvent exister entre les différents postes du bilan (Briat *et al.*, 2020, Lemaire *et al.*, 2021). Ces effets peuvent conduire à une sous-estimation des quantités d'azote fournies par le sol.

3. La fourniture en azote par le sol : NO

Ce terme de l'équation du bilan désigne la quantité d'azote que la plante a été en capacité d'absorber dans les parties aériennes d'une prairie fauchée en l'absence de légumineuses et de toute fertilisation azotée d'origine minérale et organique au cours de l'année de suivi. Les conditions de croissance et d'absorption de la végétation influence donc cette estimation des fournitures d'azote permises par le sol.

Ces fournitures d'azote minéral par le sol prélevé par la plante proviennent de deux origines : la minéralisation de l'azote organique du sol et le reliquat d'azote minéral de l'année précédente présent dans le sol. L'azote organique qui s'accumule dans le sol a deux principales sources: 1) les apports de matière organique provenant des engrais de ferme, des restitutions au pâturage et des tiges, feuilles et racines sénescents ; 2) la fraction des apports d'azote d'origine minérale de l'année précédente, transformée et réorganisée par les bactéries et les champignons. Cette dernière fraction constitue un compartiment très actif de la matière organique. On le qualifie de « facilement minéralisable » ou labile. Elle est d'autant plus importante que le sol a reçu des apports d'azote importants au cours de son passé récent (Recous *et al.*, 1996). Les prairies recevant sur une longue période des quantités d'azote minérale ou organique élevées présentent ainsi des taux de minéralisation nette supérieurs aux prairies peu fertilisées sur une longue période. Recous *et al.*, (1996) ont montré que dans un régime d'apport d'azote constant, la minéralisation de l'azote issu de cette fraction peut représenter un tiers de la fourniture en azote par le sol.

3.1. Des conditions de minéralisation soumises à de multiples facteurs

La vitesse de minéralisation de l'azote organique dépend avant tout de la température et de l'humidité du sol. Les optima se situent aux alentours de 30°C pour des conditions d'humidité voisines de la capacité au champ. En lien avec son aération et des conditions de réchauffement plus rapide du sol, le drainage augmente la minéralisation (Gill *et al.*, 1995). Un sol bien drainé présente un potentiel de minéralisation supérieur à un sol hydromorphe ou encore engorgé.

moyenne sur la côte, 12°C à 1 500 m d'altitude). Les précipitations y restent importantes sur la partie Est de l'île et notamment sur les flancs du Volcan. Avril et décembre sont des **mois d'intersaison**, parfois très pluvieux mais pouvant également être parfois très secs.

Les andosols dominent dans les zones de prairies des Hauts (Blanfort, 2000). Dans les Bas, on trouve les sols ferrallitiques au nord-est, et des sols bruns et ferrallitiques à l'ouest. Les andosols sont riches en matière organique, leur capacité d'échange cationique et anionique est très élevée, et ils retiennent beaucoup d'eau tout en la laissant bien circuler. Les sols bruns et ferrallitiques présentent une capacité d'échange d'éléments nutritifs avec la plante plus faible, et une réserve en eau utile pour la plante moyenne à faible (< 100 mm). Les travaux de recherche menés par l'IRAT et le CIRAD par le passé, ont approché la dynamique de minéralisation des sols prairiaux de la Réunion, à travers l'observation du comportement de parcelles témoins non fertilisées dans des essais de fertilisation (Michellon *et al.*, 1982), ou le suivi de l'activité biologique des sols (Blanfort, 1998 ; Mandret *et al.*, 2000a). Ils ont montré que la minéralisation de la matière organique du sol se faisait potentiellement toute l'année, avec un niveau plus faible en saison sèche et froide, et que celle-ci pouvait être parfois quasiment nulle en altitude. Les essais de Mandret et Blanfort ont montré que l'activité biologique des sols était très variable en fonction de l'altitude et du niveau de fertilisation. Celle-ci a été estimée en mesurant l'activité d'une exocoenzyme microbienne du sol (exprimée en unité internationale, en microgrammes de phosphonitrophénol formés par heure dans un gramme de sol sec) pour différentes altitudes et plusieurs niveaux et types de fumure. L'activité biologique s'est avérée faible sur le littoral, sur sols sablo-limoneux, et elle augmentait très fortement avec l'altitude, sur andosol (Tableau 1).

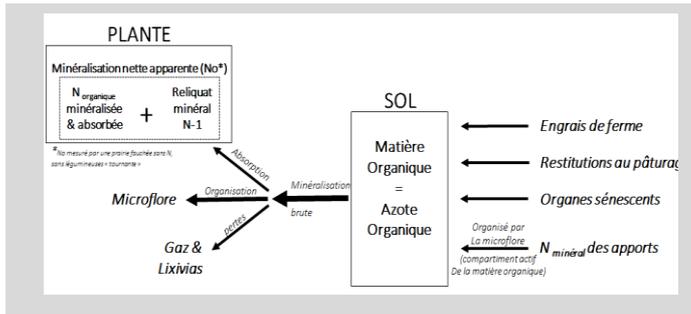


FIGURE 1 : Origine de l'azote prélevé par la prairie, sans apport azoté et légumineuses (d'après Farruggia *et al.*, 1999).

Figure 1 : Origin of nitrogen taken by the grassland, without nitrogen input and legumes

Des conditions de déficit hydrique en période estivale viennent également perturber ce potentiel de minéralisation sur l'année. Le taux de minéralisation est également influencé par la texture et la structure du sol. Ce potentiel de minéralisation serait d'autant plus élevé que la texture du sol est fine (Hassink *et al.*, 1994). Le pH n'a que peu d'influence dans une gamme de valeur moyenne.

3.2. Les premières approches d'estimation de la minéralisation du sol dans les sols de prairies de la Réunion

Le contexte pédoclimatique de la Réunion est favorable à la minéralisation des sols. Le climat, de type tropical humide d'altitude, regroupe une variabilité de caractéristiques climatiques plutôt tropicales ou tempérées selon les situations (Blanfort, 2000). Le gradient altitudinal marqué entraîne une baisse de la température et une augmentation de la pluviométrie et de l'humidité en altitude. Les pluies abondantes, notamment en période cyclonique, sont inégalement réparties dans le temps. A l'Est, la côte est la plus arrosée (plus de 3 m d'eau), alors que la région ouest est la plus sèche (500 mm d'eau). L'année se découpe en deux saisons marquées (Météo France, 2021). **La saison des pluies**, de janvier à mars, est chaude (26°C en moyenne sur la côte, 17°C à 1 500 m d'altitude) et pluvieuse, avec des perturbations dépressionnaires et des cyclones. **La saison sèche**, de mai à novembre, présente un temps beau, sec mais frais (21°C en

Commune	Altitude	Activité microbologique
Saint Joseph	0 m	48 UI
Saint Pierre	500 m	858 UI
Plaine des Cafres	1 900 m	2047 UI

TABLEAU 1 : Activité microbologique des sols pour trois altitudes de la Réunion (Mandret *et al.*, 2000a)

Table 1 : Microbiological activity of soils for three altitudes of Reunion Island (Mandret *et al.*, 2000a)

Le suivi de l'activité biologique du sol, 50 jours après fertilisation (ammonitrate, lisier, ou combinaison des deux) a montré que celle-ci augmentait indépendamment du type d'engrais employé. Elle plafonnait au-delà d'une certaine quantité d'azote apportée. L'application de 105 kg N/ha augmentait de 31 % l'activité biologique par rapport au témoin non fertilisé. L'apport de 45 kg N supplémentaires (150 kg

N/ha) n'entraînait qu'une augmentation de 8 % de l'activité biologique.

4. Analyses du poste fournitures en azote dans le contexte des prairies réunionnaises

4.1. Méthode d'évaluation

Le jeu de données mobilisé correspond aux résultats d'essais fertilisation réalisés par le CIRAD – UMR SELMET, sur la période 2004 à 2020 (Lepabic, 2013). Différentes modalités de fertilisation, organique et/ou minérale, sont testées sur quatre sites, dans le sud de l'île, à quatre altitudes croissantes. Le dispositif expérimental mis en place sur chaque site était un dispositif en bloc, à trois répétitions, avec des parcelles élémentaires de 4 m².

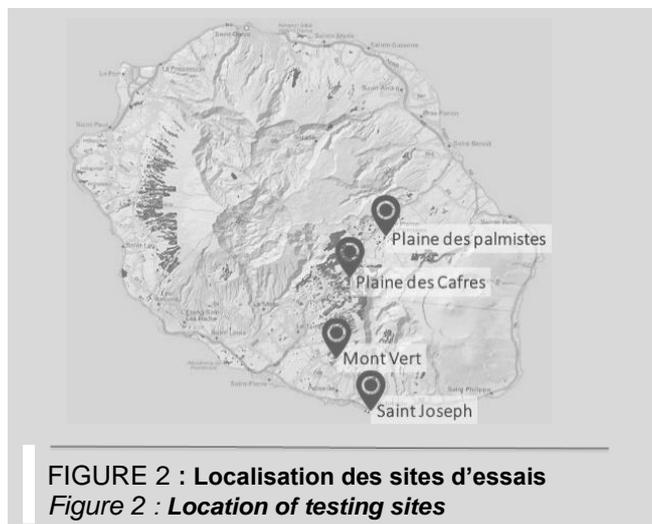


FIGURE 2 : Localisation des sites d'essais
Figure 2 : Location of testing sites

Les résultats des parcelles témoins non fertilisées (0 N) obtenus sur la période 2005-2012 ont été valorisés pour cette étude (Tableau 2).

La fourniture d'azote a été quantifiée en partant de l'hypothèse que l'azote exporté par le couvert correspond à la fourniture en azote du sol. Cette hypothèse s'appuie

sur le fait que les compositions floristiques des parcelles des quatre sites sont représentatives des principaux types de prairies rencontrées à la Réunion. Les mesures de rendements (appelé « rdt » exprimé en t MS/ha/coupe) réalisées lors de chaque fauche, couplées à l'analyse de la teneur en N des fourrages (%N exprimé en %MS) ont permis de quantifier les quantités d'azote exportées dans les parties aériennes (en kg N/ha/an) et ainsi d'approcher les fournitures en azote permises par le sol. Les données disponibles pour chaque fauche ont permis de quantifier la fourniture d'N à l'échelle de l'année et de la saison.

Exportation d'azote (kg N/ha/période) =

$$\Sigma[(\text{rdt} \times 1000) \times ((\%N)/100)] = \text{Fourniture du sol}$$

La fourniture du sol en azote ainsi évaluée ne prend pas en compte l'azote fixée dans les parties racinaires. Elle ne prend pas en compte l'azote fourni par les légumineuses. De manière générale, les légumineuses sont très peu présentes dans les prairies réunionnaises (moins de 5 % du couvert). Dans le cas des essais valorisés ici, seul le site de la Plaine des Cafres présente une légumineuse dans son couvert (trèfle blanc), qui représente 2 % du couvert, tout au long de l'année.

Les parcelles 0 N mobilisées pour cette évaluation sont des parcelles élémentaires fixes, qui n'ont pas été fertilisées sur toute la durée de l'étude. Aussi, le suivi de ces parcelles ne permet pas d'approcher les arrière effets des pratiques de fertilisation des années antérieures.

4.2. Fourniture en azote des différents sites d'essais

Les quatre sites étaient fauchés entre 6 et 7 fois par an. Sur le site de Saint Joseph (80 m d'altitude), les conditions météorologiques favorables toute l'année, et les saisons peu marquées permettent une fauche supplémentaire par an. Le rendement y est le plus élevée (17 t MS/ha/an), et la teneur en azote de l'herbe récoltée est constante au cours de l'année (1,6 %MS) (Tableau 3).

Commune	Site	Période	Altitude (m)	Pluies* (mm/an)	Température* (°C)	Sol	Espèces fourragères
Saint Joseph	Lycée	2006-2012	71	2660 (1620-4170)	22 (16-29)	andique perhydraté	<i>Chloris</i>
Mont vert	SEDAEL	2006-2008	821	1300 (730-2230)	19 (12-27)	andique non perhydraté	<i>Kikuyu, Brome, Paspalum</i>
Plaine des Cafres	SICALAIT	2005-2012	1550	1320 (640-2710)	14 (6-22)	andique perhydraté	<i>Fétuque, Dactyle, Brome, Kikuyu, Trèfle blanc</i>
Plaine des Palmistes	Marianne	2006-2012	1025	3 400 (1770-5700)	16 (10-24)	andique perhydraté	<i>Dactyle, Kikuyu, Paspalum, Hématría</i>

TABLEAU 2 : Descriptif des quatre sites d'essai (*données climatiques moyennes, minimales et maximales, sur la période du 01/01/1998 au 31/12/2017 (Mézino, 2018))
Table 2 : Description of the four testing sites

Sites	Saint Joseph (Lycée)	Mont vert (Sedael)	Plaine des Cafres (Sicalait)	Plain des palmistes (Marianne)
Nombre de coupe/an	7	6	6	6
(sais. pluie - sais. sèche)	(2 - 3)	(2 - 4)	(2 - 4)	(2 - 4)
Rendement moyen (min - max)				
Année (t MS/ha/an)	17 (11 - 25)	14 (10 - 17)	9 (7 - 12)	11 (8 - 13)
Sais. Pluies (t MS/ha/sais.)	6,6 (3,0 - 11,3)	6,4 (3,8 - 9,3)	4,2 (2,0 - 6,8)	3,6 (1,5 - 6,6)
Sais. Sèche (t MS/ha/sais.)	6,4 (4,4 - 8,0)	5,9 (3,9 - 9,2)	4,4 (3,0 - 6,6)	4,6 (2,4 - 8,6)
Teneur en azote moyenne (%MS)				
Année (sais. Pluie - sais. Sèche)	1,6 (1,6 - 1,6)	2,3 (2 - 2,4)	2,5 (2,3 - 2,5)	1,8 (1,9 - 2,2)
Indice de nutrition azotée				
Année (sais. Pluie - sais. Sèche)	64 (68 - 63)	83 (79 - 77)	57 (63 - 50)	72 (68 - 71)
Exportation d'azote (min - max)				
Année (kg N/ha/an)	270 (230-290)	300 (260-340)	220 (170-255)	210 (190-240)
Sais. Pluies (kg N/ha/sais.)	160 (120 - 180)	180 (135-235)	125 (105-150)	125 (115-145)
Sais. Sèche (kg N/ha/sais.)	110 (100 - 130)	115 (95-130)	90 (55-115)	85 (65-125)

TABEAU 3 : Production, teneur en azote moyenne du fourrage et exportation d'azote obtenus sur les quatre sites (saison des pluies : de janvier à mars, saison sèche : de mai à novembre, intersaison : avril et décembre)
Table 3 : Production, average forage nitrogen content and nitrogen export obtained at the four sites

A Mont Vert (800 m d'altitude), les saisons sont plus marquées, mais la pluviométrie et la température y sont plus favorables à la pousse que dans les plaines. On y observe les rendements les plus élevés après Saint Joseph (14 t MS/ha/an). La teneur en azote du fourrage est plus faible et plus variable en saison des pluies (1,4 - 2,4 %). Dans les plaines, les gammes de rendements sont proches (7 à 13 t MS/ha/an). En saison sèche, la diminution de la température diminue la croissance de l'herbe. La productivité est un peu plus importante à la Plaine des Palmistes en saison des pluies. La teneur en azote du fourrage y est également plus faible. Dans les deux secteurs, cette teneur est plus variable en saison des pluies.

Les indices de nutrition des quatre sites montrent globalement un état de nutrition azoté légèrement insuffisant (< 80 %). Les quantités d'azote exportées et mesurées dans les parties aériennes sont donc résultat de la dynamique d'absorption de l'azote traduite dans les INN. Le site de Saint Joseph et celui de la Plaine des Cafres présentent des indices plus faibles que les autres sites. La fourniture en azote par le sol des prairies (=exportation d'azote par les plantes) est de 240 kg N/ha/an en moyenne. Elle varie de 170 à 380 kg

N/ha/an. Elle est variable selon le site, et selon la saison. Elle est la plus élevée sur le Site de Mont Vert, avec 290 kg N/ha/an puis sur le site de Saint Joseph, avec 270 kg N/ha/an. Les sites de la Plaine des Cafres et de la Plaine des Palmistes ont des niveaux de fourniture similaires, avec respectivement 220 et 210 kg N/ha/an. La répartition de cette fourniture est assez similaire entre les quatre sites. Entre 29 et 44 % de la fourniture en azote est prélevée à la saison des pluies, et entre 42 et 47 % l'est pendant la saison sèche.

5. Discussion et perspectives

Les travaux présentés dans cet article ont permis une première approche indirecte et quantifiée de la fourniture en azote des sols de prairies de la Réunion. Ils confirment les hypothèses d'une fourniture d'un niveau élevé et distribuée tout au long de l'année. Celle-ci varie de 170 à 280 kg N/ha/an. Ces résultats mettent également en avant une fourniture différenciée selon les secteurs. En France métropolitaine, les grilles de références régionales de fourniture en azote des sols varient de 40 à 120 kg N/ha/an, pour des prairies peu ou pas fertilisées (Comifer, 2013). Le niveau très élevé

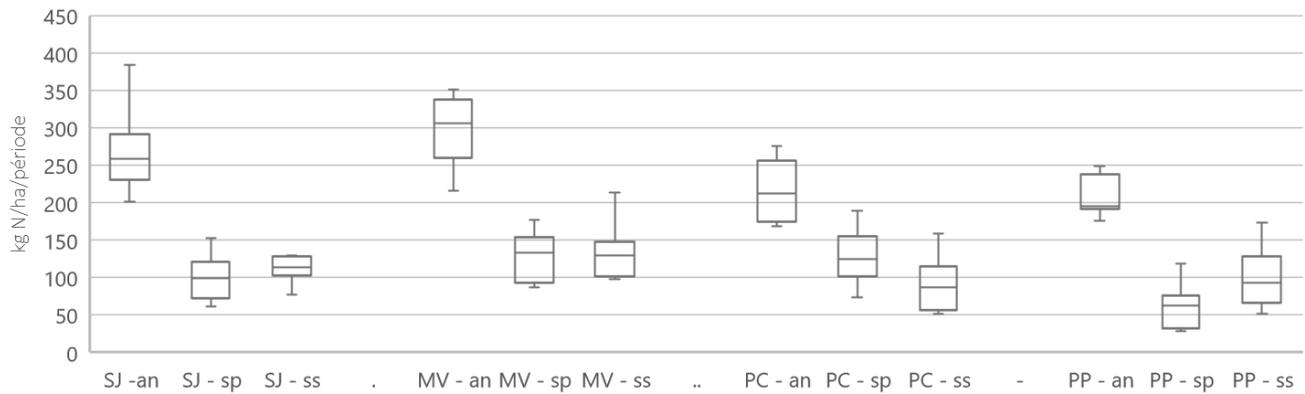


FIGURE 3 : Exportation d'azote annuelle et saisonnière sur le quatre sites (SJ : Saint Joseph ; MV : Mont Vert ; PC : Plaine des Cafres ; PP : Plaine des Palmistes ; an : année ; sp : saison des pluies ; ss : saison sèche)
Figure 3 : Annual and seasonal nitrogen export on the four sites

évalué dans cette étude, par rapport à la métropole, peut s'expliquer par le contexte météorologique. Contrairement à la métropole, à la Réunion, les températures et la disponibilité en eau sont favorables toute l'année. Il n'y a pas d'arrêt prolongé de la minéralisation au cours de l'année, associé à la période hivernale froide et/ou la période estivale chaude et sans pluie.

Les résultats obtenus ont permis d'aboutir à la création d'une grille de référence, intégrée au bilan prévisionnel de fertilisation azotée adapté localement. L'ARP a développé une application sous Excel® permettant la réalisation d'un bilan azoté annuel, à l'échelle de l'exploitation et de lots de prairies, pour la réalisation de diagnostics et de programmes prévisionnels de fertilisation.

Ces résultats sont également à prendre en compte à l'échelle de la saison, en s'appuyant sur les courbes de croissance de l'herbe produites par l'Observatoire de la croissance de l'herbe local (Miralles-Bruneau *et al.*, 2022). Les courbes de croissance annuelles de l'herbe se déclinent en quatre grandes périodes :

- **Période de démarrage en végétation** : Elle s'étend de septembre à décembre. L'augmentation des températures combinée à un retour des pluies contribue à relancer la croissance du couvert. A cette période, les conditions de minéralisation redeviennent favorables. Des apports d'azote d'origine minérale et organique peuvent contribuer à accélérer la reprise de la végétation et à renforcer le potentiel de production avant la phase d'accélération de la croissance.
- **Période de pleine pousse** : elle coïncide avec le pic de minéralisation observé de janvier à mars. Température et pluviométrie offrent des conditions de fournitures en azote maximales. Une réduction des apports de fertilisants azotés est préconisée à cette période au cours de laquelle la croissance de l'herbe très favorable est largement excédentaire.

- **Phases de décroissance et de pousse ralentie**. Au cours de cette période estivale qui dure d'avril à septembre, les conditions d'humidité et de température deviennent limitantes pour la croissance de graminée tropicale comme le Kikuyu. Seules les graminées tempérées peuvent répondre à des apports d'azote exogène d'origine minérale ou organique.

◆ De la nécessité de poursuivre ce travail de référencement

Ce travail de paramétrage des différents postes du bilan azoté doit se poursuivre au travers plusieurs chantiers, notamment pour affiner ces premiers résultats et mieux intégrer la variabilité. Une seule partie du jeu de données disponible a été traitée à ce jour. Les données agronomiques et climatiques acquises entre 2005 et 2020 vont être analysées afin d'étudier les facteurs de variation intra et interannuel de la fourniture en azote du sol.

La mise en place et le suivi d'un réseau de parcelles témoin 0 N complémentaires pourrait s'avérer intéressante pour couvrir la diversité des contextes pédoclimatiques de l'île de la Réunion. Par ailleurs, à l'échelle d'une parcelle, ces témoins 0 N pourront poursuivre deux objectifs à l'image des réseaux mis en place en métropole.

Les conditions pédoclimatiques de la Réunion étant très diversifiées (11 petites régions fourragères ; Mézino, 2018), ce travail de référencement devra aussi s'accompagner d'un travail de modélisation visant à prédire le potentiel de minéralisation des sols prairiaux. Le modèle SERDAF développé par le CIRAD sur la canne à sucre (Auzoux *et al.*, 2008; Pouzet *et al.*, 1997) pourrait permettre d'apporter ces références localisées.

Enfin, sur les autres postes du bilan (contribution des légumineuses, évaluation du CAU, prise en compte des restitutions au pâturage), des travaux de calibration de ces postes ont été également initiés et viendront compléter les référentiels mis à disposition des éleveurs et techniciens.

6. Conclusion

La valorisation d'essais de longue durée sur la fertilisation a permis une première évaluation de la fourniture en azote des sols de prairies de la Réunion. Le niveau de fourniture en azote des sols est en moyenne de l'ordre de 240 kg N/ha/an. Il est élevé en comparaison des référentiels définis en métropole. Mais il est cohérent avec les conditions pédoclimatiques de l'île et les observations faites par le passé. On observe une variation de la fourniture de l'azote intra et inter annuelle, ainsi qu'entre les sites. Cette variation n'a pas pu être expliquée dans le cadre de ce travail. Celui-ci doit être poursuivi, afin d'approcher au plus près la fourniture en azote des sols, et de chercher à en expliquer les facteurs de variations. Il doit également être complété par la mise en place d'essais et suivis complémentaires, permettant d'affiner et d'élargir ce premier référentiel local. La modélisation à partir des données climatiques pourrait également être une approche intéressante. Ces premiers résultats ont été valorisés sous différentes formes. La méthode du bilan azoté a été adaptée aux prairies réunionnaises, en y intégrant ces valeurs. Un livret de présentation de la méthode du bilan a également été édité, et présenté à l'encadrement technique ainsi que dans le cadre de formation. En parallèle de ce projet, un travail autour de l'indice de nutrition azoté a été amorcé afin de piloter de façon dynamique la fertilisation. Le programme visant à étalonner un spectromètre dans le proche infra-rouge pour évaluer cet indice donne de bons résultats. Cet outil pourrait être utilisé en routine d'ici un an. Il est envisagé de poursuivre la valorisation des données des essais fertilisation des prairies du CIRAD en se penchant spécifiquement sur les indices de nutrition, leur évolution en fonction du type et du niveau de fertilisation, du type de sol et de la saisonnalité. Enfin, une fois la technique d'estimation de l'indice de nutrition azoté par spectrométrie proche infrarouge développée, il pourra être envisagé d'intégrer cette mesure en routine, dans le suivi de la pousse de l'herbe.

Article accepté pour publication le 21 mars 2022

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Auzoux S., Chabalière P., Borot C., (2008). « Cahier des charges. Système expert réunionnais d'aide à la fertilisation » (SERDAF) (*Cahier des charges*). CIRAD, Montpellier.
- Blanfort V., (2000). « Le contexte écologique ». In: L'élevage bovin à la Réunion : *Synthèse de quinze ans de recherche, Repères*. CIRAD, Montpellier, pp. 35-42.
- Blanfort V., (1998). « Agroécologie des pâturages d'altitude à l'île de la Réunion : pratiques d'éleveurs et durabilité des ressources herbagères dans un milieu à fortes contraintes » (*thesis*). CIRAD-EMVT.
- Bonnet P., (1992). *Références Rhône-Alpes*, « Fertilisation azotée des prairies ».
- Busson S., Chabalière P.-F., Cottineau J.-S., De Laburthe B., Fournier P., Leroux K., Van de Kerchove V., Salgado P., (2010). « Amendements et engrais ». In: *Guide des bonnes pratiques agricoles à la Réunion. Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt de la Réunion, Saint-Denis, La Réunion*, p. 52.
- Briat J.F., Gojon A., Rouached H., Plassard C., Lemaire G., (2020). « Reappraisal of the concept of nutrient availability for plants in soils at the light of the recent molecular physiology advances ». *European Journal of Agronomy*, 116.
- Chabalière P.-F., Van de Kerchove V., Saint-Macary H., (2006). « Guide de la fertilisation organique à la Réunion ». CIRAD, Chambre d'Agriculture de la Réunion, Saint-Denis, La Réunion.
- Chambre Régionale des Pays-de-la-Loire, (1998). « Fertilisation des prairies : comprendre pour décider ». 16 p.
- Comifer, 2013. « Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales pour les cultures annuelles et les prairies ». 159 p.
- Farruggia A., (1994). « Fertilisation azotée des prairies ». *Presented at the Colloque bovins viande, Châteauroux*.
- Fritz J., Loynet G., (1973). « Facteurs agissant sur l'efficacité des engrais azotés, en production intensive de fourrage de *Chloris gayana* ». *Fourrages* 55, pp 83-91.
- Grenet N., (1991). « Chapitre 3. Les surfaces fourragères et l'alimentation du troupeau ». In: *Troupeau allaitant, mode d'emploi*. ITEB, Paris, pp. 123-202.
- Lemaire G., Tang L., Belanger G., Zhu Y., Jeuffroy M.-H., (2021). « Forward: New paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture ». *European Journal of Agronomy*, 2021 v.125 pp. 126-248
- Leleux M., (2016). « Etude prospective sur la ressource fourragère (Rapport d'expertise No. 3) ». *BRL ingénierie*, 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) ». Ensayi; CIRAD - UMR SELMET, Saint Pierre - La Réunion.
- Mandret G., Blanfort V., Paillat J.-M., Barbet-Massin V., Fontaine O., Rivière E., (2000a). « L'installation et la fertilisation des parcelles fourragères ». In: L'élevage bovin à la Réunion : *Synthèse de quinze ans de recherche, Repères*. CIRAD, Montpellier, pp. 97-127.
- Mandret G., Paillat J.-M., Bigot A., Fontaine O., Latchimy J.-Y., Rivière E., (2000b). « Le comportement des espèces fourragères ». In: L'élevage bovin à la Réunion : *Synthèse de quinze ans de recherche, Repères*. CIRAD, Montpellier, pp. 65-96.
- Météo France, (2021). Climat de la Réunion [WWW Document]. Météo France La Réunion. URL <http://www.meteofrance.re/climat/description-du-climat> (accessed 12.15.21).
- Mézino M., (2018). « Caractérisation du climat à La Réunion sur les zones fourragères définies par l'Association Réunionnaise de Pastoralisme » (*Rapport d'expertise*). CIRAD - UR AIDA, Saint Pierre - La Réunion.
- Michellon R., Pichot J., Cahagniet A., (1982). « Comportement et réponse du Kikuyu à l'azote et au chaulage dans les hauts sous le vent » (*Fiche d'essai No. 54*). IRAT, Saint-Denis, La Réunion.
- Miralles-Bruneau M., Pellier Y., Pierre P., Tillard E., Delaby L., (2022). « Le premier observatoire de la croissance de l'herbe en Outre-Mer : présentation du dispositif de la Réunion et des premiers résultats ». *Fourrages* 249, pp. 37-42
- Pouzet D., Chabalière P., Legier P., (1997). « Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionnaises ». *Agriculture et Développement*, pp 18-37.
- Recous S., Loiseau P., Machet J.M., Mary B., (1996). « Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies ». In: *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Presented at the Colloque, INRA Editions, pp. 105-120.
- Scherrer L., (2017). « Caractérisation des élevages bovins allaitants réunionnais par leurs pratiques et stratégies fourragères en vue d'améliorer le suivi et le conseil de ces exploitations ». (*Mémoire de fin d'étude*). ISTOM, CIRAD, Saint Pierre - La Réunion.
- Thomas P., Barbet-Massin V., Grimaud P., Michon A., (2004). « Guide technique pour la création et la valorisation des prairies à la Réunion ». Plaine des Cafres : UAFFP; CIRAD, 106 p