Rapport d'expertise

cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Groupe Phosphore

Synthèse et actualisation de l'exportation en phosphore par les prairies à la Réunion

Saint Pierre, La Réunion, novembre 2023

Maëva MIRALLES-BRUNEAU, Cirad - ES - UMR SELMET
Cécile NOBILE, Cirad - Persyst - UPR Recyclage et Risque
Matthieu N. BRAVIN, Cirad - Persyst - UPR Recyclage et Risque

SELMET

UR Recyclage et risque

COMPROMIS EN AGRICULTURE POUR DES TERRITOIRES DURABLES
CAP TERRE

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du programme FEADER CAPTERRE du CIRAD Réunion – Mayotte.

Référence à citer :

Miralles-Bruneau, M., Nobile, C., Bravin, M. N., 2023. Synthèse et actualisation de l'exportation en phosphore par les prairies à la Réunion. Saint Pierre (La Réunion) : Cirad, Département ES – UMR SELMET, Département Persyst – UR Recyclage et risque, 52 de pages.

© Cirad, Département ES – UMR SELMET / Département Persyst – UR Recyclage et risque / Direction régionale Réunion – Mayotte – Océan Indien, 2023.

SOMMAIRE

Table des matières

1. Contexte et objectifs 6

1.1. Contexte préliminaire à l'étude 6

1.2. Objectifs de l'étude 6

2. Etat des connaissances 8

2.1. Synthèse des connaissances sur les exportations en P 8

2.1.1. Les niveaux de rendement des prairies réunionnais 8

2.1.2. Les teneurs en phosphore des fourrages réunionnais 9

2.1.3. Les exportations de phosphore des prairies à la Réunion 13

2.2. Travaux conduits sur la nutrition en P des prairies 17

2.2.1. programme Gestion raisonnée des prairies 17

2.2.2. Les essais analytiques 20

2.1.3. Les suivis en élevage 28

2.3. Historique des préconisations et des pratiques de fertilisation 31

2.3.1. Evolutions des préconisations en matière de fertilisation en P 31

2.3.2. Evolutions des pratiques de fertilisation en p dans les élevages 35

3. Estimation des gammes d'exportations en phosphore des prairies réunionnaises 39

3.1. Typologie de prairies utilisée 39

3.1.1. Définition des cas types 39

3.1.2. Définition des niveaux de rendements annuels et saisonniers 40

3.2. Estimation de l'exportation à partir des teneurs en phosphore des prairies mesurées sur le terrain 41

3.3.1. Teneurs en phosphore utilisées 41

3.3.2. Exportations estimées 42

3.3. Estimation de l'exportation à partir des équations de dilution en azote et phosphore 42

3.2.1. Teneurs en phosphore utilisées 42

3.2.2. Exportations estimées 43

3.4. Gamme d'exportation retenue 44

4. Conclusions et perspectives 45

Sources bibliographiques 47

RESUME

Cette étude vise à la réactualisation documentée et sourcée du référentiel d'exportations de phosphore par les prairies. Elle a été conduite à la demande de la Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de La Réunion (DAAF), la Chambre d'Agriculture, et les filières d'élevages de la Réunion dans une optique de redéfinition in fine des règles d'élaboration des plans d'épandages. Dans un premier temps, une synthèse des différentes études qui ont été menées, à partir de 1962, sur le sujet, a été réalisée. Dans un second temps, une démarche a été mise en œuvre pour actualiser la gamme des exportations en P. Celle-ci s'appuie sur la définition d'une typologie des prairies réunionnaises, qui détermine des niveaux de productivité représentatifs des pratiques, en fonction de l'altitude et du niveau d'intensification. Pour chaque type de prairie de la typologie, il a été testé deux approches, en parallèle, pour définir une teneur en P du fourrage associé. La première méthode, est une approche classique, qui s'appuie sur l'analyse en P des parties aériennes des prairies faite au laboratoire du Cirad à La Réunion. La seconde méthode estime les teneurs en P à partir du niveau de rendement, et des équations de dilution de l'azote (N) et du P. Les deux approches qui ont été testées et présentées dans ce rapport aboutissent à des gammes d'exportations en P similaires à celles observées dans le cadre d'essais. C'est l'approche qui utilise les équations de dilution pour l'estimation des exportations qui apparaît comme la plus appropriée pour répondre à la demande des acteurs locaux.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1. Contexte préliminaire à l'étude

En juin 2020, l'Association Réunionnaise de Pastoralisme (ARP) a édité une fiche technique présentant les besoins théoriques en phosphore des prairies (Miralles-Bruneau et al., 2020b). Les grilles de références qu'elle contient ont été réalisées dans une optique de raisonnement de la fertilisation minérale, dans le cadre du programme RITA, pour améliorer le raisonnement de la fertilisation des prairies (Pierre, 2019). L'objectif était de fournir des quantités de phosphore (P) à apporter, pour couvrir les exportations, afin d'atteindre un objectif de rendement donné, et d'apporter juste le nécessaire en termes d'engrais chimiques. Il est apparu que les valeurs de doses fertilisantes ainsi proposées et publiées différaient de celles historiquement utilisées par la profession pour établir les plans d'épandages des effluents d'élevage.

Ces nouvelles valeurs d'exportation étaient significativement plus faibles. Cette différence entre les valeurs historiques et nouvelles pouvait a priori principalement s'expliquer par le fait que les secondes n'intégraient pas la prise en compte de coefficients multiplicateurs des exportations à même de redresser une éventuelle faible disponibilité du P dans les sols sous prairies à La Réunion. Cette différence pouvait être également liée au fait que les valeurs historiques étaient utilisées pour l'apport de P par des fertilisants organiques, alors que les nouvelles valeurs ont été développées pour l'apport de P sous forme entièrement minérale par des engrais chimique. Cela a conduit à un questionnement de l'ensemble de la profession sur 1) les valeurs de doses fertilisantes de P qui devaient être utilisées, incluant l'exportation de P par les prairies, 2) la pertinence de l'utilisation de coefficient multiplicateur de ces exportations et enfin 3) les coefficients d'équivalence engrais entre les différents engrais chimiques d'une part et les fertilisants organiques d'autre part. Parmi ces trois points de questionnement, il est apparu que la distinction faite par la profession pour les plans d'épandage entre valeurs d'exportation en P par les prairies et coefficient multiplicateur n'était ni clairement documentée, ni sourcée.

La Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de La Réunion (DAAF), la Chambre d'Agriculture, et les filières d'élevages de la Réunion ont demandé au Cirad de réactualiser les référentiels d'exportations de P par les prairies, en les différenciant clairement de l'utilisation d'éventuels coefficients multiplicateurs et ce dans une optique de redéfinition in fine des règles d'élaboration des plans d'épandages. Ce rapport s'inscrit dans le cadre de cette demande et vise à la réactualisation documentée et sourcée du référentiel d'exportations de P par les prairies.

1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif est ici de déterminer les gammes d'exportations annuelles en P des prairies réunionnaises, pour une typologie de prairies représentative des pratiques actuelles et à venir. Dans un premier temps, ce rapport fait une synthèse des différentes études qui ont été menées, à partir de 1962 par l'IRAT, puis par l'EDE et le CIRAD. Cette synthèse s'appuie sur des rapports d'essais, des rapports d'activité et de stage, des articles, des thèses, et de la documentation technique. Dans un second temps, se rapport présente la démarche mise en œuvre pour actualiser la gamme des exportations en P. Celle-ci s'appuie sur la définition d'une typologie des prairies réunionnaises, qui détermine des niveaux de productivité (en tonne de matière sèche par hectare) représentatifs des pratiques, en fonction de l'altitude et du niveau d'intensification. Pour chaque type de prairie de la typologie, il a été testé deux approches, en parallèle, pour définir une teneur en P du fourrage associé. La première méthode, est une approche

classique, qui s'appuie sur l'analyse en P des parties aériennes des prairies faite au laboratoire du Cirad à La Réunion. La seconde méthode, est l'approche qui avait été utilisée en 2020 par l'ARP, et qui a été révisée avec de nouvelles hypothèses de travail. Elle estime les teneurs en P à partir du niveau de rendement, et des équations de dilution de l'azote (N) et du P telles que les a définies Blanfort, en 1998 à la Réunion, d'après les travaux de Salette and Huché (1991).

2. ETAT DES CONNAISSANCES

On appelle « exportation en phosphore des prairies » la quantité de P sortie de la parcelle, à travers le fourrage récolté, par la récolte mécanique ou l'ingestion des animaux. Les exportations vont dépendre de la quantité de fourrage valorisée et de sa teneur en P. Les exportations en P des prairies sont déterminées en multipliant le rendement, en tonnes de matières sèches par hectare, à la teneur en P du fourrage produit, en kilogramme de P par tonne de matière sèche, en appliquant la formule suivante :

Exportation (kg P/ha) = rendement (t MS/ha) x teneur en phosphore (kg P/t MS)

Le calcul peut se faire à l'échelle de la récolte (kg P/ha/coupe), de la saison, ou de l'année (kg P/ha/an).

A titre d'exemple, en contexte tempéré, en France métropolitaine, le rendement des prairies varie de 5 à 10 t MS/ha/an (Peyraud et al., 2017). Cette production est valorisée entre mars et novembre, la pousse de l'herbe étant quasiment inexistante en hiver, en raison des températures basses. Dans certaines régions, elle est également très faible, voire nulle, en juillet-août, en raison des fortes températures et faibles précipitations. La concentration en P du couvert, quant à elle, varie entre 1 et 5 kg/t MS selon le stade de croissance (Denoroy et al., 2019). Les concentrations en nutriments majeurs diminuent avec l'accroissement de la biomasse au cours de la croissance de la plante ; on parle de dilution de P dans la biomasse (Jouany et al., 2011). La diminution de la concentration en P est une fonction linéaire de la concentration en N du fourrage (Duru and Ducrocq, 1996). Ainsi, l'intensité du flux de P quittant le système dépend directement du régime de gestion de l'N. Les exportations de P des prairies tempérées varient de 20 à 40 kg P/ha/an (Denoroy et al., 2019).

A la Réunion, en contexte tropical humide, où l'exploitation de l'herbe est possible toute l'année, et où les couverts fourragers sont composés d'espèces tropicales et/ou tempérées, on peut s'attendre à une gamme différente. Dans cette partie, nous présenterons une synthèse des connaissances sur les exportations et la nutrition en P des prairies réunionnaises, ainsi qu'un historique de l'évolution du conseil et des pratiques en matière de fertilisation en P.

2.1. Synthèse des connaissances sur les exportations en P

Nous présenterons, ici, une synthèse des connaissances, à la Réunion, sur les niveaux de rendements, les teneurs en P des fourrages, composantes du calcul d'exportation, ainsi que sur les valeurs d'exportations en P qui ont pu être mesurées. Nous présenterons également une synthèse des travaux de recherche sur les courbes de dilution, et les niveaux de nutrition des prairies en P, en tant qu'indicatif des teneurs et niveaux d'exportations en P.

2.1.1. LES NIVEAUX DE RENDEMENT DES PRAIRIES REUNIONNAIS

Les premières recherches sur les productions fourragères à la Réunion ont été initiées dès 1962, par l'IRAT (Dadant, 1974), puis reprises par l'équipe CIRAD Elevage en 1985, en partenariat avec l'EDE (Bigot and Fontaine, 1991; Gilibert, 1981). Ces différents travaux ont débouché sur des références agronomiques sur les rendements (Blanfort, 1998; Gilibert, 1981; G. (ed) Mandret et al., 2000), qui ont été régulièrement mises à jour jusqu'à aujourd'hui (Leleux, 2016; Lorre, 2019; Pierre, 2019; Thomas et al., 2004). Les conditions tropicales humides de la Réunion sont particulièrement favorables aux productions fourragères (Dadant, 1974), en raison d'une pluviométrie bien répartie, une hydrométrie généralement élevée, et des températures relativement régulières. Elles permettent une exploitation fourragère tout au long de l'année (Miralles-Bruneau et al., 2022a). La production d'herbe se caractérise

par une forte variation saisonnière : la croissance est forte en saison humide, de décembre à avril, et ralentie en saison sèche, de mai à novembre, avec des variations plus ou moins marquées entre les secteurs. Les potentiels de rendement y sont ainsi élevés. Bien gérées (exploitation régulière, fertilisation adaptée, gestion du pH du sol), les prairies peuvent produire de 10 à 30 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 sur le littoral (0 à 600 m d'altitude), où le climat de type tropical humide permet une pousse continue. On observe des rendements de l'ordre de 20 à 30 t MS/ha/an sur des prairies de chloris (*Chloris gayana*) et brachiaria (*Urochloa decumbens*) irriguées et bien gérées, avec des maximas à 35 - 43 t MS/ha/an. 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 croissance de l'herbe en hiver. Ainsi, les prairies de kikuyu (*Cenchrus clandestinus*) ou de graminées et légumineuses tempérées (*Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *trifolium repens*) peuvent atteindre des rendements moyens 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. Des études visant à étudier l'autonomie fourragère des élevages bovins ont mis en évidence une sous valorisation des prairies, au regard du potentiel permis, de l'ordre de 40 à 70 % (Leleux, 2016; Lorre, 2019; Lurette et al., 2022; Scherrer, 2017). Le rendement valorisé en élevages serait de l'ordre de 6 à 8 t MS/ha/an en moyenne sur prairies pâturées, et de 10 à 12 t MS/ha/an en moyenne pour les fauches. Les principaux facteurs de sous-valorisation identifiés sont une valorisation tardive des pâtures et des fauches, un découpage et un chargement inadapté des pâtures au regard de la croissance de l'herbe, un raisonnement de la fertilisation insuffisant, et uniquement axé sur l'N (Miralles-Bruneau et al., 2022b). Ces écarts s'expliquent par une professionnalisation récente et accélérée de l'élevage, qui s'est fait en parallèle de l'acquisition de connaissances sur les systèmes fourragers par la recherche, et où le transfert est toujours en cours (Lopez, 2021).

En conclusion, la productivité des prairies de la Réunion est très variable. On peut observer des écarts de rendements allant de 6 à 42 t MS/ha/an en fonction du type de couvert, du secteur, du mode de gestion et du type de valorisation. On observe tout de même des tendances. Les gammes de rendement évoluent avec le type de couvert et la température moyenne, et donc l'altitude. Au sein de ces zones altitudinales, on observe des variations de rendement entre exploitations en fonction du mode de valorisation (pâture, fauche, mixte), et du type de gestion (découpage du parcellaire, fertilisation, temps de repousse, entretien …), et donc du niveau d'intensification du système fourrager. Aussi, il est possible de caractériser la productivité des prairies en fonction de l'altitude, du mode de valorisation et du niveau d'intensification.

2.1.2. Les teneurs en phosphore des fourrages reunionnais

La teneur en P du fourrage a été caractérisée à plusieurs périodes du développement de l'élevage à la Réunion. Les premières analyses ont été réalisées par l'IRAT, à la fin des années 60. C'est le poste du cycle du P, dans le système sol-plante, qui a été le plus documenté. La recherche et le développement ont principalement cherché à caractériser les teneurs en P pour les principales espèces fourragères et types de couverts rencontrés à la Réunion, dans une optique de complémentation des animaux. Quelques études ponctuelles ont cherché à comprendre les facteurs de variation.

Les études successives menées, de 1970 à 2019, sur la teneur en P des fourrages de la Réunion ont montré que celle-ci variait de 0,8 à 6,2 kg/t MS, avec des teneurs majoritairement comprises entre 2 et 3,5 kg/t MS (Bigot, 1991; Bigot and Fontaine, 1991; Fritz, 1967, 1971a, 1972a, 1973; Fritz and Hubert de Fraise, 1973; Hassoun and Latchimy, 2001; Loynet, 1972, 1976; Mandret, 1996; Miralles-Bruneau and Pellier, 2019; Thomas et al., 2004).

Teneurs en phosphore des principales espèces fourragères

La teneur est variable selon l'espèce (Tableau 1), et les gammes de variations peuvent être très larges pour certaines espèces. Par exemple, parmi les graminées tempérées des hauts, la fétuque (*Scolochloa festucacea*) présente une teneur plus élevée, alors que celle du Ray-grass (*Lolium perenne*) est plus faible que celles du dactyle (*Dactylis glomerata*) et de la fétuque (*Scolochloa festucacea*). La canne fourragère (*Cenchrus purpureum*) présente une plus faible teneur que les autres espèces, quelle que soit sa zone de culture (0 – 600 m) (Mandret, 1996). Les légumineuses restent peu documentées.

Tableau 1 : Gammes de teneurs en phosphore des principales espèces fourragères de la Réunion

Espèces	Teneur en phosphore (kg/t MS)
Graminées tropicales	
Brachiaria (*Urochlora sp*)	1,0 - 3,6
Chloris (*Chloris gayana)*	1,2 - 5,5
Kikuyu (*Cenchrus clandestinum)*	0,9 - 6,2
Canne fourragère (*Cenchrus purpureum)*	2,2 - 4,8
Sétaria (*Setaria sphacelata)*	1,1 - 3,4
Graminées tempérées	
Brome (*Bromus sp)*	2,2 - 3,0
Dactyle (*Dactylis glomerata)*	1,5 - 4,5
Fétuque élevée (*Scolochloa festucacea)*	2,4 - 3,1
Ray-grass anglais (*Lolium perenne)*	1,7 - 2,5
Ray-grass hybride (*Lolium hybridum)*	1,8 - 2,5
Ray-grass italien (*Lolium italicum)*	2,5 - 2,8
Légumineuses tropicales et tempérée	
Desmodium (*Desmodium intortum)*	2,6 - 3,1
Glycine (*Neonotonia wightii)*	3,7
Stylosanthes (Stylosanthes guyanensis)	1,1 - 3,2
Trèfle blanc (*Trifolium repens)* *Luzerne (Medicago sativa*)	2,5 2,7

Evolution de la teneur en phosphore du fourrage au cours de la croissance

Deux études ont cherché à étudier l'évolution de la teneur en P dans le fourrage, au cours de la croissance. Une première, réalisée par l'IRAT, a porté sur le chloris (*Chloris gayana*) (Loynet, 1976), sur le littoral. La seconde a porté sur le Kikuyu (*Cenchrus clandestinum*), à 880 m d'altitude sur andosol (Bigot, 1991; Brunschwig, 1991).

La première étude (Loynet, 1976) obtenait une teneur moyenne en P qui variait de 2,3 à 4,1 kg/t MS (Tableau 2). La teneur en P tendait à être supérieur en saison fraîche, avec un écart variable selon le stade. Loynet n'observait pas de différence sensible entre les parties du végétal (limbes, tiges et inflorescence, plant entière). Il n'observait pas de diminution marquée de la teneur en P comme on devrait s'y attendre avec la croissance de la biomasse (cf. 2.2.1.), probablement, car le suivi n'a pas duré suffisamment longtemps (6 semaines), contrairement à l'étude de Bigot en 1991.

Tableau 2 : Absorption de phosphore de chloris gayana, des limbes, tiges et inflorescences et de la plante entière, pour différents temps de repousse, en coupe d'été et d'hiver (Loynet, 1976).

Semaine	Période	Teneur (% MS)			Vitesse d'absorption (kg/ha/jour)			Absorption cumulée (kg/ha)		
		limbes	*Tiges & inflo.*	*Plante entière*	*limbes*	*Tiges & inflo.*	*Plante entière*	*limbes*	*Tiges & inflo.*	*Plante entière*
Semaine 1	Eté	2,34	-	2,34	0,027	-	0,03	0,19	-	0,19
	Hiver	2,57	-	2,57	0,026	-	0,026	0,18	-	0,18
Semaine 2	Eté	3,24	3,08	3,23	0,255	0,0339	0,29	2,05	0,24	2,29
	Hiver	3,29	3,16	3,26	0,066	0,009	0,075	0,69	0,06	0,75
Semaine 3	Eté	3,55	3,25	3,48	0,285	0,122	0,41	4,24	1,10	5,34
	Hiver	3,50	3,17	3,48	0,125	0,009	0,134	1,61	0,13	1,74
Semaine 4	Eté	3,45	2,98	3,26	0,164	0,282	0,46	5,28	2,98	8,26
	Hiver	3,31	3,43	3,32	0,208	0 ,054	0,261	2,98	0,51	3,49
Semaine 5	Eté	3,30	2,76	3,02	0,284	0,512	0,82	7,04	6,35	13,39
	Hiver	4,27	3,90	4,18	0,311	0,166	0,472	6,02	1,68	7,70
Semaine 6	Eté	3,01	2,64	2,77	-	0,536	0,55	6,36	9,82	16,18
	Hiver	3,93	3,66	3,85	0,298	0,178	0,479	7,62	2,82	10,44

Les travaux de Bigot, sur la cinétique de la valeur alimentaire du Kikuyu (Bigot, 1991; Brunschwig, 1991) ont montré des valeurs comprises entre 2,1 et 4 kg/t MS (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elles s ont du même ordre que celles obtenues par Loynet (1976). Bigot observait une diminution de la teneur en P entre la 3^{e} et la 10^{e} semaine de repousse. Elle était de 25 % en saison des pluies et de 30 % en saison fraîche. La diminution, liée à l'âge, semblait plus forte en saison fraîche qu'en saison des pluies. Il observait une diminution de 1 g/kg MS en moyenne.

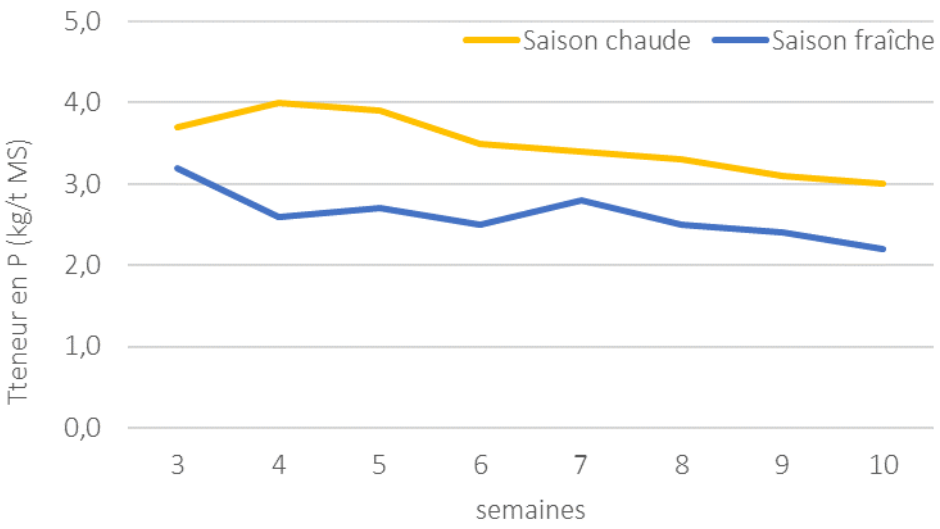

Figure 1 : Teneur en phosphore du kikuyu, en g/kg MS, selon le temps de repousse et la saison (Bigot, 1991; Brunschwig, 1991; Thomas et al., 2004)

Variation des teneurs en phosphore en fonction du contexte pédoclimatique

Plusieurs études mettent en avant un effet saisonnier et pédoclimatique sur la teneur en P du fourrage. Dans l'ouest de l'île, l'essai sur l'apport de doses croissantes de P, mené par l'IRAT aux Colimaçons (Fritz, 1971a), à 850 m d'altitude, avait montré des teneurs variables en fonction des coupes, avec des teneurs plus faibles en saison fraîche (2,6 kg/t MS en août), qu'en saison des pluies (3,1 kg/t MS en janvier). L'alimentation en P semblait meilleure en saison des pluies. Les essais de Bigot et Fontaine, dans les Hauts de l'Ouest, à 1 300 m d'altitude, mettaient également en avant une tendance générale à la baisse de la teneur en P en période fraîche (Bigot and Fontaine, 1991). Dans le sud de l'île, les travaux de Bigot (1991), à 880 m d'altitude, mettent également en avant cette tendance. Sur le littoral, Loynet (1976),

obtenait à l'inverse des teneurs en P qui tendaient à être supérieur en saison fraiche, sans qu'il n'y ait d'effet significatif.

A l'échelle de l'île, les travaux de Mandret (1996), montraient également un effet « saison froide » sur les prairies tempérées des hauts, qui se traduisait par des teneurs plus faibles. La baisse de température et le mode de fertilisation étaient également des facteurs avancés. Ces travaux (Mandret, 1996), réalisés sur 1 110 échantillons de graminées fourragères prélevés entre 1989 et 1992 sur toute l'île, ont mis en avant des différences de teneurs en fonction de l'altitude et du type de couvert (Tableau 3).

Tableau 3 : Profils minéraux des fourrages de la Réunion, exprimé en g/kg MS (Mandret, 1996).

Altitude	sols	Espèces	Teneur moyenne (kg/t MS)	Couverture des besoins des bovins
0 – 300 m	vertisol et sol brun ou ferrallitique	Chloris	3,4	Bonne
300 – 1000 m	andosol	Kikuyu, Sétaria, Brachiaria	2,6	Faible
> 1000 m	andosol	Ray-grass, Dactyle, Fétuque	1,6	Très faible

Il distingue trois « profils minéraux » : les fourrages tropicaux des bas sur vertisol et sol brun, les fourrages tropicaux de moyenne altitude et les fourrages tempérés d'altitude, tous les deux sur andosol. Ces profils présentent respectivement, des teneurs moyennes en P de 3,4 ; 2,6 et 1,6 kg/t MS.

Teneur en phosphore et niveau de fertilisation en azote et en phosphore :

Peu d'essais fertilisation ont pris en compte le P dans leur analyse. L'IRAT a mené des essais de dose croissante d'azote, entre 1966 et 1967 (Fritz, 1967), sur sol carencé en P. A l'époque, il avait été observé que plus le niveau de fertilisation N était élevé (de 0 à 80 kg N/ha/coupe), plus la teneur en P du fourrage baissait. Les valeurs obtenues variaient de 3,3 à 2, 2 kg P/t MS (Tableau 4). Ces résultats illustrent le phénomène de dilution (cf.2.2.1), où l'augmentation du rendement, lié à l'apport d'azote, induit une diminution de la teneur en P. Blanfort observait le même phénomène dans le cadre de ces travaux sur les équations de dilution et indices de nutritions (Blanfort, 1998; Mandret, 1996).

Des essais menés par l'IRAT ont montré que le taux de P dans le fourrage tendait à être très légèrement inférieur dans les parcelles sans P (Fritz, 1971a, 1972b), et que des apports de P permettaient d'augmenter légèrement la teneur en P du fourrage (Fritz, 1967, 1971a, 1972b). Les essais de Blanfort (1998) quant à eux montraient que la réponse à un apport en P (60 ou 120 kg P/ha) était variable selon le l'état du sol et son historique de fertilisation, et qu'il n'était pas toujours possible de redresser la teneur en P avec un apport même significatif de P (120 kg P/ha).

En 1997, le Cirad, en partenariat avec des distributeurs d'engrais, a mis en place un essai sur l'efficacité de neuf engrais, en termes de rendement et de la nutrition minérale. La dose d'N était constante, et la dose en P variait selon l'engrais. Il a été obtenu une différence significative du type d'engrais sur la nutrition en P. Ce sont logiquement les engrais les plus riches en P qui ont induits des indices iP quasiment non limitant (CIRAD, 1998).

Teneur en phosphore des fourrage et couverture des besoins des animaux

Dès les années 70, l'IRAT estimait que le chloris (*Chloris gayana*) était assez pauvre en P (Loynet, 1972). En 1996, les travaux de Mandret et al, ont mis en avant l'importance des carences en P des prairies de

l'île, au regard des besoins des bovins. Il distinguait deux limites nutritionnelles, chez les bovins, pour définir des carences primaires potentielles : la carence, et la subcarence (carence légère). Elles sont fixées respectivement à 2 et 4 kg P/t MS. L'intervalle entre les deux limites correspond à la zone d'incertitude, soit pour les bovins à plus ou moins fort niveau de production, soit de la définition des carences d'apport alimentaire (Mandret, 1996). Pour le P, 25,8 % des échantillons de fourrages se situaient en dessous de la limite de carence (< 2 kg P/t MS), et 68,5 % était située dans la zone d'incertitude. Seulement 5,7 % des échantillons présentaient une teneur supérieure à la limite de subcarence (> 4 kg P/t MS). La proportion des fourrages à teneur inférieure à 2 kg P/t MS (carence prononcée) et à 4 kg/t MS (subcarence), montre l'importance des carences primaires potentielles en P, quel que soit le type de fourrage. Des différences de profils minéraux étaient tout de même observées (Tableau 3). Les fourrages tropicaux des bas ne présentaient pas de déficit. Les fourrages tropicaux de moyenne altitude, principalement destinées aux bovins allaitants, présentaient des teneurs faibles. Et les fourrages tempérés d'altitude, destinés principalement à la production laitière, montraient des teneurs très faibles en P, et un déséquilibre marqué du rapport Ca/P. Mandret et al (1996) concluait que les fourrages produits à la Réunion étaient susceptibles d'induire des carences minérales chez l'animal. Ils estimaient à l'époque qu'il était peu probable qu'elles soient fréquentes en élevage laitier, dans la mesure où la complémentation minérale y est largement répandue. Le risque était plus élevé en élevage allaitant où cette pratique était moins courante. A la même période, Brunschwig préconisait une complémentation quotidienne en P (Brunschwig, 1991).

En conclusion, la teneur en P des fourrages de la Réunion varie de 0,8 à 6,2 kg/t MS, avec des teneurs majoritairement comprises entre 2 et 3,5 kg/t MS. On observe une gamme légèrement plus large que celle relevée en métropole (Castillon et al., 2007; Denoroy et al., 2019), sur couverts tempérés (1 et 5 kg/t MS). La teneur varie, comme on peut s'y attendre, en fonction du stade de récolte, de l'espèce, de la saison, et du mode de fertilisation. Les études ne permettent pas de conclure à une prédominance d'un facteur. L'effet saison semble revenir de manière récurrente dans les différents travaux. Cela peut être lié au stade de récolte, les conditions climatiques impactant la croissance, et donc la teneur en P. Les teneurs en P des fourrages ne permettent pas de couvrir les besoins des bovins, excepté ceux produits sur le littoral.

2.1.3. Les exportations de phosphore des prairies a la Reunion

Diverses études ont évalué l'exportation en P des prairies. Elles sont principalement basées sur des essais, dont les résultats ont permis entre autres le calcul d'exportation, mais sans que ce soit l'objectif premier.

Sur la zone littorale, des essais conduits par l'IRAT dans les années 1970, ont permis de définir qu'une prairie de chloris, avec une production de 25 t MS/ha/an, exportait de 52 à 65 kg P/ha/an (Fritz, 1971a; IRAT, 1978a). Un essai mené à Saint Pierre, avec une conduite irriguée et fortement fertilisé (1 000 kg N/ha/an ; 295 kg P/ha/an ; 714 kg K/ha/an) a montré une exportation de 131 kg P/ha/an, pour une production de 43 t MS/ha/an (Fritz, 1973). Les essais menés sur l'évolution qualitative de la production de Chloris gayana en été et en hiver (Loynet, 1976), ont mis en avant une augmentation linéaire des exportations en P entre une et six semaines de repousse (Figure 2). Celle-ci évolue de 0,19 à 16,18 kg P/ha en saison des pluies, et de 0,18 à 10,44 kg P/ha en saison fraîche (Tableau 2).

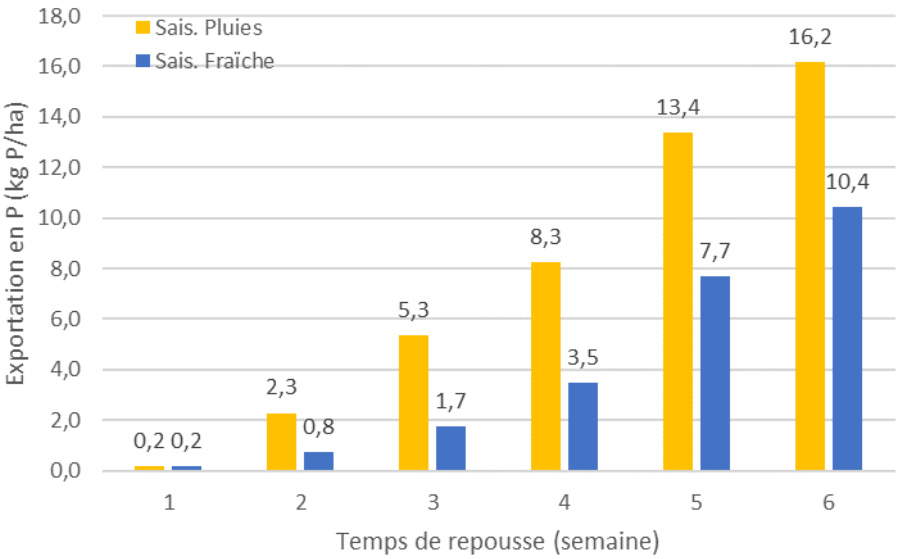

Figure 2 : Exportations en P de chloris gayana, sur le littoral, en fonction du temps de repousse et de la saison (Loynet, 1976)

Concernant les légumineuses tropicales, des essais comparatifs d'espèces et de variétés, réalisées en 1971-1972, ont obtenu des exportations de l'ordre de 47 à 61 kg P/ha/an pour Stylosanthes guyanensis, Desmodium intortum et Neonotonia wightii, pour des apports de 159 kg P/ha/an (Fritz and Hubert de Fraise, 1973).

A mi-pente, dans l'Ouest (Colimaçons), sur prairie de Chloris, les exportations obtenues étaient de l'ordre de 65 kg P/ha/an pour une production de 20 t MS/ha/an (Fritz, 1967). Des essais testant des doses croissantes d'apport d'azote (Fritz, 1967)ont montré des teneurs variant de 10,5 à 56,7 kg P/ t MS (Tableau 1).

Tableau 4 : Exportation en phosphore de chloris, dans l'Ouest, pour différentes doses d'apport d'azote (Fritz, 1967)

Modalités	Rendement	Teneur en P	Exportation de P
	(t MS/ha/an)	*(g /kg MS)*	*(kg P/ha/an)*
N0 (0 N)	3,19	3,30	10,5
N1 (20 N)	9,83	2,78	28,0
N2 (40 N)	15,55	2,47	39,7
N3 (60 N)	21,16	2,49	55,4
N4 (80 N)	24,63	2,21	56,7

Un essai de doses croissantes de P (0, 22, 44, 66, 88 kg P/ha/an), mené de 1968 à 1972 aux Colimaçons (Fritz, 1972b), sur un sol brun andique, a montré des exportations de P de 62, 67 et 69 kg P/ha/an pour des apports respectifs de 0, 22 et 44 kg P/ha/coupe.

A mi-pente, dans le Sud (Mont Vert les Hauts), sur prairie de kikuyu (*Cenchrus clandestinum)*, Bigot (1991) obtenait une exportation variant de 2,2 et 13,3 kg P/ha en fonction du temps de repousse et de la saison (Figure 3). En saison des pluies, l'exportation est croissante entre 3 et 10 semaines, et passe de 3,0 et 13,3 kg P/ha. En saison fraîche, l'exportation entre 3 et 10 semaines est moins linéaire et moins importante. Elle passe de 2,8 à 6 kg P/ha. L'écart d'exportation entre saison s'explique par une teneur en P et un niveau de rendement plus élevés en saison des pluies. Les niveaux d'exportation, à six semaines, sont très inférieurs à ceux obtenus par Loynet (1976) sur chloris gayana, sur le littoral au même stade (près de 2,5 fois moins en saison des pluies et 4 fois moins en saison fraîche). Cet écart s'explique par des teneurs en P et des niveaux de rendements plus faibles.

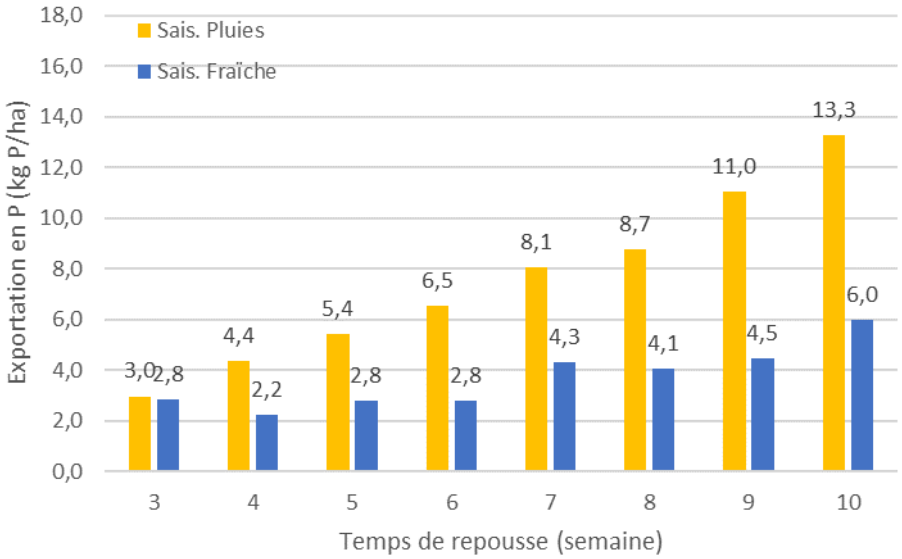

Figure 3: exportation en P de Cenchrus clandestinum, en fonction du temps de repousse et de la saison, à 880 m d'altitude (Bigot, 1991).

Dans les zones d'altitude, Bigot et Fontaine, en 1991, ont évalué une exportation variant de 48 à 78 kg P/ha/an (Tableau 5), dans les Hauts de l'Ouest (Petite France, 1 300 m d'altitude), pour les quatre espèces testées (Bigot and Fontaine, 1991).

Tableau 5 : Exportation en phosphore de trois graminées fourragères, dans les Hauts de l'Ouest (Bigot and Fontaine, 1991)

Espèce	Rendement (t MS/ha/an)	Exportation (kg P/ha/an)
Dactyle (*Dactylis glomerata*)	12	64
Kikuyu (*Cenchrus clandestinum)*	13	78
Fétuque élevée (*Scolochloa festucacea*)	14	78
Phalaris (*Phalaris arundinacea)*	11	48

De 2018 à 2019, l'ARP, la SICALAIT et Timac Agro ont réalisé, à la Plaine des Cafres, sur prairie tempérée (dactyle, brome, ray gras, trèfle blanc) un essai de démonstration (Miralles-Bruneau et al., 2020a) qui comparait quatre itinéraires techniques de fertilisation : pas de fertilisation, deux approches « éleveurs » observées sur le terrain (lisier seul, lisier + 33.11.06) et un plan de fertilisation à base de lisier, raisonné, avec des produits Timac agro. Le sol était un andosol perhydraté superficiel.

Tableau 6 : Résultats agronomiques de l'essai fertilisation ARP-Timac Agro-Sicalait (Miralles-Bruneau et al., 2020a)

Modalité*	Fertilisation	Besoins théo. en P (kg P/ha/an	Apports de P (kg P/ha/an)	Rendement (t MS/ha/an)	Teneur en P (kg P/t MS)	Indice iP	Exportation en P (kg P/ha/an)	Bilan apparent en P (kg P/ha/an)
0 ferti	pas de fertilisation	49	10	15,8	3,9 (3,4 - 4,4)	105 (90 - 121)	61	- 51
Lisier	40 m³ /ha/cpe	59	149	18,8	4,3 (3,9 - 5,1)	108 (95 - 133)	79	+ 70
Lisier + 33.11.06	40 m³/ha/cpe + 200 kg/ha/cpe	67	216	21,4	4,1 (3,7 - 4,7)	102 (87 - 125)	89	+ 127
ITK Timac agro	40 m³/ha/cpe + 200 kg Sulfammo 26/ha/cpe. Selon les besoins : 600 kg/ha Soleflor + 300 kg/ha de TOP PHOS M22 et/ou Apex	77	235	24,7	4,2 (3,6 - 4,7)	103 (86 - 115)	102	+ 133

*** *Cinq apports de lisier ont été réalisés (sur huit prévus), et un apport** d'engrais accidentel **a été fait sur la modalité « 0 ferti ».***

La teneur en P du sol (P-Olsen-Dabin) était de 319 4 mg P/kg, ce qui correspond à une forte teneur en P pour un andosol. Le pH était de 6,1, ce qui pour un andosol correspond à un pouvoir fixateur moyen. Le croisement des deux aboutit à une forte disponibilité en P du sol. La teneur en P total du lisier était de 0,7 kg P/t de matière brute. Les rendements obtenus sont dans les valeurs hautes du secteur, dont le témoin « 0 ferti » (Tableau 6). Les teneurs en P des fourrages récoltés sont bonnes. Les diagnostics d'indice de nutrition en P (iP) montrent que les besoins en P sont couverts pour les quatre modalités (> 100 %), et on observe de la consommation de luxe (> 120) dans quelques cas. Les exports en P varient de 61 à 102 kg P/ha/an. Les exports en P des quatre modalités sont supérieurs aux besoins théoriques. Les apports de P des modalités fertilisées sont de l'ordre de deux fois supérieurs aux exportations (respectivement 1,9, 2,4 et 2,3 pour les modalités lisier, lisier + 33.11.06, et Itk Timac).

En conclusion, les essais menés entre 1970 et 2019 ont mis en avant des exportations variant de 10 à 130 kg P/ha/an, toutes prairies confondues. Il est à noter, que ces valeurs ont été obtenues dans le cadre d'essais qui ne portaient pas spécifiquement sur le P. Aussi, nous ne disposons pas d'éléments explicatifs (pédoclimatique, gestion) sur les raisons de cette gamme d'exportation. Les gammes d'exportation relevées sur le littoral (44 – 131 kg P/ha/an), à mi-pente (10 - 65 kg P/ha/an), et dans les Hauts (20 – 102 kg P/ha/an) diffèrent, mais elles ne peuvent pas être considérées comme représentatives de leur secteur, car elles ne sont pas suffisamment exhaustives. Il est très probable que l'on observe des exportations inférieures à 50 kg P/ha/an sur le littoral et à l'inverse des supérieures à 65 kg P/ha/an à mi-pente. Les données disponibles ne permettent pas de définir des gammes exhaustives d'exportation par espèce, mais elles nous permettent d'en avoir un premier aperçu (Tableau 7).

Tableau 7 : Tableau de synthèse par espèce

Espèces	Altitude (m)	Rendement (t MS/ha/an)	Teneur P (kg/t MS)	Export. P essais* (kg/ha/an)	Export. P calculés** (kg/ha/an)
Graminées tropicales					
Brachiaria (*Urochlora sp*)	0 – 800	20 à 40	1,0 - 3,6	-	*20 - 144*
Canne fourragère (*Cenchrus purpureum)*	0 à 1000	20 à 40	2,2 - 4,8	-	*44 – 192*
Chloris (*Chloris gayana)*	0 à 1500	10 à 43	1,2 - 5,5	10 à 131	*12 - 236*
Kikuyu (*Cenchrus clandestinum)*	700 à 1 900	13 à 25	0,9 - 6,2	61 à 133	*12 - 155*
Sétaria (*Setaria sphacelata)*	0 à 1 200	10 à 25	1,1 - 3,4	-	*11 - 85*
Graminées tempérées					
Brome (*Bromus sp)*	1 000 - 2 000	10 à 15	2,2 - 3,0	61 - 133	*22 – 45*
Dactyle (*Dactylis glomerata)*	900 à 1 900	10 à 25	1,5 - 4,5	61 - 102	*15 - 113*
Fétuque élevée (*Scolochloa festucacea)*	1 200 - 1 500	10 à 20	2,4 - 3,1	78,00	*24 - 62*
Phalaris (*Phalaris arundinacea)*	1 000 - 2 000	11 à 25		48	-
Ray-grass anglais (*Lolium perenne)*	800 à 2 000	10 à 25	1,7 - 2,5	61 à 133	*17 – 63*
Ray-grass hybride (*Lolium hybridum)*	800 à 2 000	10 à 25	1,8 - 2,5	61 - 102	*18 – 63*
Ray-grass italien (*Lolium italicum)*	800 à 2 000	10 à 25	2,5 - 2,8	61 - 102	*25 - 70*
Légumineuses tropicales					
Desmodium (*Desmodium intortum)*	0 à 1500	6 à 15	2,6 - 3,1	57	*16 – 47*
Glycine (*Neonotonia wightii)*	0 à 800	10 à 15	3,5 - 3,7	47	*35 - 56*
Stylosanthes (Stylosanthes guyanensis)	0 à 800	5 à 15	1,1 - 3,2	61	*5,5 - 48*
Légumineuses tempérées					
Luzerne (Medicago sativa)	0 - 1 600	9 à 15	2,7	-	*24 - 41*
Trèfle blanc (*Trifolium repens)*	400 - 2 000	5 à 6	2,5	-	*13 - 15*

**valeurs issues d'essais ; **valeurs issues de la multiplication des rendements et teneurs mini et maxi de ce tableau*

2.2. Travaux conduits sur la nutrition en P des prairies

Au début des année 1990, le Cirad a en œuvre un programme de recherche sur la gestion raisonnée des prairies. Le volet sur la fertilisation N, P, K a permis d'améliorer les connaissances sur la nutrition en P des prairies, et a abouti au développement d'un diagnostic pour le pilotage de la fertilisation.

2.2.1. PROGRAMME GESTION RAISONNEE DES PRAIRIES

a) Le programme de recherche

Au début des année 1990, le Cirad – pole élevage, dans le cadre du programme « Gestion raisonnée des prairies », a mis en œuvre un programme de recherche sur la validité des lois de dilutions de l'azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K) pour les prairies réunionnaises. Ce programme expérimental visait à tester la validé de ces lois sur des couverts prairiaux réunionnais, dans l'optique de mettre en place le diagnostic de nutrition des prairies à la Réunion. Ces travaux ont été mis en place dans la continuité de ceux conduits par l'INRA, en métropole, dans les années 80-90.

Les limites des analyses de terre classiques, associée aux particularismes de la fertilité des andosols, ont amené le CIRAD, dans les années 90, à compléter les travaux sur la fertilisation des prairies déjà réalisés (CIRAD REUNION et al. 1988) par des méthodes capables de prendre en compte les contraintes de nutrition minérale du végétal (Blanfort, 1998). Le programme « Gestion raisonnée des prairies » a testé et développé, entre 1991 et 1997, le diagnostic de nutrition des prairies en N, P et K, sur des systèmes herbagers de la Réunion. Le programme s'est déroulé en trois temps. La Phase 1, une étape de recherche, visait à tester et valider l'outils de diagnostic et des règles de décisions (Blanfort and Thomas, 1995a). Elle a été conduite entre 1991 et 1994. Elle incluait des essais en parcelles expérimentales et des suivis en élevages (6 élevages du réseau EDE). Elle a été menée en partenariat avec l'EDE. Elle a abouti à la thèse de Vincent Blanfort (1998). La Phase 2, visait à mettre en place et valider l'outil auprès du développement (UAFP, EDE, SICA). Elle a démarré en janvier 1995, et a duré 2 ans (opération CIRAD EMVT N°52102). Elle a été conduite en partenariat avec l'UAFP et l'EDE. Le diagnostic de nutrition a été testé dans un réseau d'élevages plus large, dans l'optique de la mise en place d'un service d'appui pour la gestion du pâturage (Blanfort and Thomas, 1995a). A partir de janvier 1995 le suivi c'est élargi à 27 élevages (14 laitiers et 13 allaitants-naisseurs) (Blanfort and Thomas, 1995b, 1995a). La Phase 3, qui a démarré en 1997, a abouti à la création d'un service de conseil pour la gestion raisonnée des prairies par l'UAFP et le CIRAD, qui en 1998, suivait une 60^{e} d'exploitations (élevage bovin, production de foin). L'UAFP a poursuivi les diagnostics jusqu'en 2004.

Les suivis en élevages ont concerné, lors de la 1^{e} phase, les systèmes herbagers allaitants naisseurs et laitiers des Hauts de l'Ouest et de la Plaine des Cafres situées entre 1300 – 2000 m d'altitude. Lors de la phase 2, le périmètre de l'étude s'est élargi aux principales zones d'élevage bovin de l'île : les hautes plaines (Plaines des Cafres, Plaine des Palmistes), les hauts de l'Ouest (La Chaloupe, Trois Bassin, Le Guillaume), les hauts du Sud (Jean Petit, Grand Coude, Plaine des Grègues, la Crête, Le Tampon), ainsi que la région Est (Blanfort and Thomas, 1995b, 1995a). Cette diversité de situations géographiques a permis d'aborder différents contextes pédoclimatiques et systèmes d'exploitation.

b) Les lois de dilution

En condition de croissance satisfaisante, la composition des tissus végétaux présente un certain équilibre entre les différents éléments chimiques essentiels à la croissance, qui évolue au cours de la repousse. Pour chaque élément, des teneurs limites peuvent être déterminées, en deçà ou au-delà desquelles la croissance sera affectée (Salette and Huché, 1991). Cet écart prend valeur de diagnostic

(Thélier-Huché et al., 1999). Pour l'N, une relation a été établie entre la quantité de matière sèche produite au cours de la croissance et la teneur en N de ce fourrage. Cette relation, a été appelée loi de dilution de l'N, car au cours de la repousse de la prairie, la teneur en N du fourrage (%N) diminue au fur et à mesure que la production de matière sèche (Rdt) du couvert augmente. Cette loi a donné lieu à une équation de référence pour les graminées fourragères tempérées (plante en C3), dont le rendement est supérieur à 1 t M/ha (Équation 1).

Équation 1 : Equations de dilution de l'azote pour les graminées fourragères en C3

$$\%N_{C3} = 4{,}8 \times Rdt^{-0{,}32} ;$$

Cette équation de dilution de l'N est applicable aux graminées tempérées de type ray gras anglais, dactyle, fétuque élevée. Dans le cas des graminées tropicales (plante en C4), une équation de dilution de l'azote a été proposée par Duru en 1992 (Équation 2).

Équation 2 : Equations de dilution de l'azote pour les graminées fourragères en C4

$$\%N_{C4} = 3{,}6 \times Rdt^{-0{,}34}$$

Ces équations traduisent le comportement normal d'un peuplement en conditions de nutrition non limitantes.

Pour le P, en conditions de croissance et de nutrition minérale satisfaisantes, la composition des tissus végétaux présente un certain équilibre entre N et P. L'absorption de P s'ajuste à la vitesse d'élaboration des nouveaux tissus et donc à la dynamique d'absorption et de métabolisation de l'N (Farruggia et al., 2000). "*Cet équilibre et son évolution au cours de la repousse caractérisent le comportement normal d'un peuplement en cours de croissance*" (Salette et Huché, 1991). Ainsi, pour un état de nutrition en N donné, la teneur optimale de l'herbe en P (P_{opt}%) pour un niveau optimal de nutrition est fonction de sa teneur en N (N%) (Farruggia et al., 2000). Cette relation peut, par simplification, être assimilée à une droite dont l'équation est la suivante (Duru et Thélier-Huché, 1997 ; Jouany et al., 2011) :

Équation 3 : Equation de dilution du phosphore pour les graminées fourragères en C3 et C4 (Jouany et al., 2011)

$$P_{opt}\% = 0{,}15 + 0{,}065\ \%N$$

Elle est indépendante du niveau de nutrition en N, et peut être utilisée comme référence d'un niveau optimal de nutrition en P ($\%_{opt}$).

b) L'indice de nutrition en P

L'analyse de sol est le premier outil utilisé pour établir un diagnostic de l'état de fertilité du sol par l'estimation de la quantité d'un élément minéral jugé « assimilable » par la plante (Salette and Huché, 1991). Concernant les prairies, plusieurs raisons rendent difficile leur interprétation : la forte hétérogénéité intra parcellaire (particulièrement pour les pâtures), l'imprécision sur le volume de sol prospecté par les racines, et la différence dans la dynamique de prélèvement des minéraux par les racines entre espèces prairiales et espèces cultivées, pour lesquelles ont été établies des normes usuelles d'interprétation (Salette and Huché, 1991). A propos des prairies, DURU (1993), souligne que la complexité des processus intervenant au niveau du sol, rend pratiquement impossible l'établissement de relations statistiques fiables entre les éléments fertilisants apportés et les rendements en matière sèche. La grande variabilité inter annuelle rend, de plus, difficile l'estimation des quantités de fertilisant à apporter même en référence à un objectif de production (Blanfort, 1998). L'approche de la fertilité par l'analyse de la composition chimique de la végétation permet d'éviter les difficultés d'interprétation

des analyses de sols, où la dynamique de prélèvement des éléments minéraux y est difficile à établir. L'analyse du végétal évite notamment de faire des hypothèses sur l'enracinement et la disponibilité des éléments minéraux (Blanfort, 1998). Pour le P, l'analyse d'herbe rend compte a posteriori de sa disponibilité dans le sol et de l'aptitude de la prairie à les prélever. Elle offre ainsi la possibilité de contrôler le niveau de nutrition en P, mais aussi d'ajuster la fertilisation des prairies naturelles ou des prairies temporaires (Farruggia et al., 2000). La méthode de l'indice de nutrition phosphaté (iP) a été mise au point et diffusée par l'INRA en 1991 (Salette et Huché, 1991), en s'appuyant sur l'équations de dilution en P. Elle a été testée et validée sur une large gamme de prairies françaises à partir de 1994, par un groupe de travail national (INRA, l'institut de l'élevage, ITCF, Chambres d'Agriculture) (Thélier-Huché et al., 1999), avant d'être validée à la Réunion sur prairies tempérées et tropicales (Blanfort, 1998). L'indice iP permet de quantifier l'écart entre le niveau de concentration en P observé et le niveau potentiel théorique atteint en conditions d'alimentation non-limitantes en P. Il est calculé à partir de l'Équation 4 (Jouany et al., 2021), où %P est la teneur en P du fourrage (en %MS), %N est la teneur en N du fourrage (en %MS), et $\%P_{pot}$ est la teneur potentiel en P du fourrage, calculé à partir de %N selon la formule de l'Équation 3.

Équation 4 : formule de calcul de l'indice de nutrition phosphaté

$$iP = 100 \times (\%P / \%P_{pot}) \text{ ou } \quad \%P_{pot} = (0{,}15 + (0{,}065 \times \%N))$$

Dans la pratique, les indices varient entre des valeurs supérieures à 100 (signifiant un niveau de nutrition adéquat ou supérieur aux besoins pour atteindre l'objectif de rendement) et inférieures à 40 (indiquant une carence grave) (Jouany et al., 2011). L'état de nutrition en P de la prairie, quel que soit son mode d'exploitation, est considéré comme (Farruggia et al., 2000) :

- ***excédentaire si iP > 120 :*** La suppression de la fertilisation P l'année qui suit le diagnostic n'entraîne pas de diminution de la production, mais seulement éventuellement une diminution des teneurs ;
- ***satisfaisant pour des indices proches de la valeur 100***, en différenciant l'état de nutrition très satisfaisant (100 < i < 120), de l'état de nutrition satisfaisant (80 < i < 100). Dans cette zone, une augmentation des apports n'entraîne pas de gain de production, mais seulement une augmentation des teneurs. Au-delàs de 110 , on parle de consommation de luxe, dans la mesure où la plante a absorbé plus de P que nécessaire à la réalisation de son rendement;
- **insuffisant pour des indices compris entre 60 et 80.** L'effet dépressif sur la production dépend alors des conditions climatiques et du niveau de production recherché ;
- ***très insuffisant pour des indices < 60***. L'effet dépressif sur la production est très probable. Un apport plus important entraîne une augmentation de la production d'herbe et des teneurs.

L'indice iP conserve toute sa signification quels que soient le niveau d'intensification de la parcelle et le type de prairie, à l'exception des mélanges graminées - trèfle blanc présentant plus de 25 % de trèfle (Farruggia et al., 2000). Pour une prairie dont le régime de fertilisation en P (minérale et organique) est stable, l'iP de l'herbe, qui résulte de l'effet du fertilisant apporté et de la disponibilité de l'élément dans le sol, varie peu d'une année sur l'autre et pour les cycles de croissance dans lesquels d'autres facteurs limitants n'interviennent pas (éclairement, excès ou manque d'eau...). Cela signifie que l'analyse d'herbe réalisée une année donnée est utilisable pour définir la politique de fertilisation des années suivantes. On considère que les indices mesurés au printemps, au moment où la demande en P de la plante est la plus importante, sont représentatifs des états de nutrition en P de la parcelle tout au long de l'année (Farruggia et al., 2000), car on considère que si l'offre du sol en P est suffisante pour satisfaire la demande à cette période, alors elle le sera aussi le reste de l'année où la demande sera moindre.

2.2.2. LES ESSAIS ANALYTIQUES

Entre 1991 et 1994, lord de la première phase du programme « Gestion raisonnée des prairies », des essais analytiques ont été conduits par le Cirad, sur sept sites expérimentaux en élevage (Figure 4 , Tableau 8), afin de déterminer les courbes de dilution (N, P et K) (Blanfort, 1998). Cinq sites étaient situés à la Plaine des Cafres, sur pairies cultivées ou naturelle et un site dans les Hauts de l'Ouest, sur une prairie naturelle.

Tableau 8 : Description des sites d'essais

ZONES	Sites	Altitude	TYPE DE PRAIRIE	ESPECES MAJORITAIRES
Plaine des Cafres - Nez de Bœuf	S1	1850 m	Cultivée, récente	Dactyle – Ray-gras
	S2	2000 m	Spontanée	Flouve
	S2bis	1950 m	Spontanée	Flouve
	S3	1950 m	Cultivée, ancienne	Dactyle
Plaine des Cafres - Biberon	S4	1600 m	Cultivée	Dactyle – Ray-gras
	S5	1600 m	Cultivée	Kikuyu – Dactyle
Hauts de l'Ouest	S6	1600 m	Naturelle	Houlque
	S7	1600 m	Naturelle	Houlque

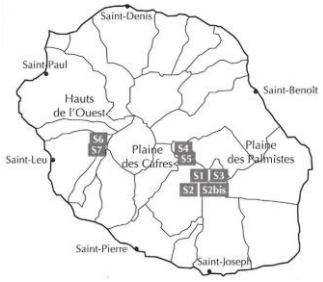

Figure 4 : Localisation des sites expérimentaux du programme Gestion raisonnée des prairies

Sur chaque site expérimental, 10 niveaux de fertilisation ont été testés (4 répétitions). Les dynamiques de croissance et d'absorption des éléments N, P, K ont été observées au sein de dispositifs de type diachronique (11 cycles expérimentaux) sur 2 années consécutives (1993-94). L'analyse porte sur la réalisation de près de 2220 prélèvements d'herbe à raison de 4 répétitions par coupe. Ils ont donné lieu à 555 échantillons moyens à partir desquels sont calculées des productions de matière sèche. Ils ont permis 555 analyses standards en laboratoire (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) et 42 analyses de digestibilité (OMO, OMS). Plus de 40 analyses de sol standards ont été effectuées. Parmi ces échantillons, 28 ont fait l'objet d'analyses avec des méthodes d'extraction particulières du P, différentes de celles réalisées en analyse standard. Quelques prélèvements de sol (14) ont donné lieu à des mesures isotopiques du P, et à des mesures de l'Aluminium échangeable.

a) Evaluation de la validité locale de la loi de dilution en P

Les essais ont mis en évidence deux schémas d'absorption du P. Le premier mettait en avant une forte indisponibilité du P. La courbe de dilution de l'ensemble des sites (Figure 5) traduit un état de nutrition en P très insuffisant pour cinq des sites toutes années et toutes saisons confondues. L'apport de 120 kg/ha de P n'a pas provoqué une augmentation du prélèvement du P. La forte indisponibilité du P entraîne une dynamique d'absorption inhabituelle.

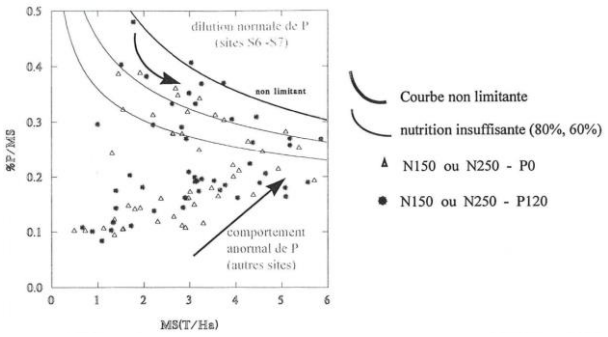

Figure 5 : Mise en évidence de la cinétique de dilution du phosphore pour l'ensemble des sites (toutes saisons et années confondues) (G. Mandret et al., 2000).

Elle est illustrée par l'examen de l'évolution de la teneur de P en fonction de N dans le cas typique du site S3 (saison des pluies 1993), représentatif de l'ensemble des autres sites (Figure 6). En absence de fertilisation N, il est observé une teneur en P inférieure à la courbe non limitante. L'apport d'N provoque un effet dépresseur significatif sur la teneur en P. Ceci traduit l'incapacité du sol à fournir une demande supplémentaire de P induite par l'élaboration de tissu supplémentaire. Ce phénomène s'observe malgré un apport de 120 kg/ha de P. La dynamique d'absorption du P est alors contraire à la dilution. Les teneurs en P augmentent au cours de la croissance sur la courbe de dilution de l'ensemble des sites (Figure 5). Dans le cas type S3, (P est exprimé en fonction de N, Figure 6), il est observé une augmentation claire de la teneur en P dans le temps (pour d'autres sites les teneurs peuvent aussi rester constantes). En effet, l'absorption du P par les plantes est liée à l'approvisionnement en ions P043- de la solution du sol et surtout à l'exploration du sol par le système racinaire. Le P ne se déplaçant que sur des distances de l'ordre du mm, le rhyzocylindre est vite épuisé en particulier dans des sols où P est peu disponible. Blanfort (1998) faisait l'hypothèse que l'apport d'N favorisait le développement racinaire au cours de la croissance et induisait une efficacité d'absorption accrue de PO_4^{3-} par une exploration plus importante de la solution du sol. Ceci expliquerait une cinétique de "dilution" croissante au cours de la repousse d'autant plus marquée qu'il y a un apport d'N.

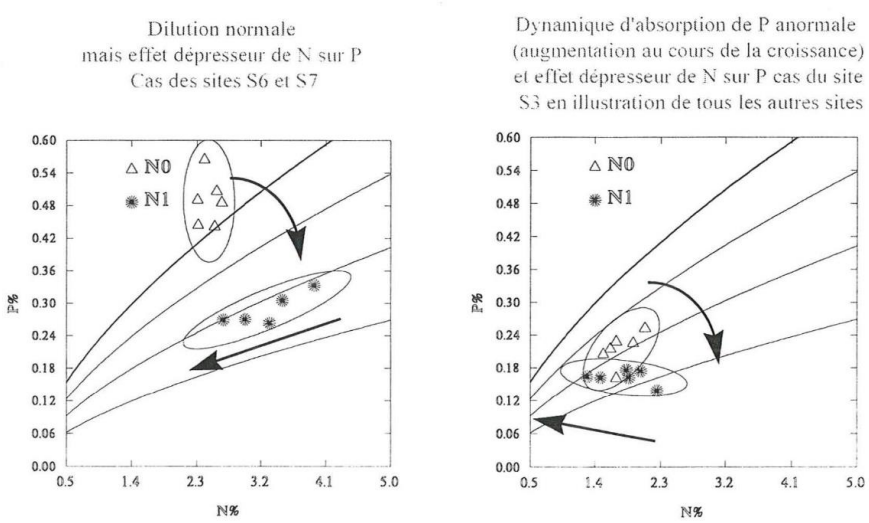

Figure 6 : Evolution de la teneur en phosphore en fonction de la teneur en azote dans deux cas types illustrant la figure précédente (G. Mandret et al., 2000)

Le second schéma d'absorption du P observé vérifie les lois de dilution du P. Les sites S6 et S7 situés sur le même type d'andosols que les autres sites sont des prairies à Holcus lanatus (houlque laineuse). Il y était observé un niveau de nutrition P beaucoup moins limitant voir satisfaisant (Figure 5). Les points y suivaient un tracé de dilution normal et proche des courbes théoriques du modèle, quel que soit le traitement (avec ou sans apport de P). Il y avait une décroissance de la teneur en P quand celle-ci est exprimée en fonction de N (Figure 6). En absence de fertilisation N, la teneur en P n'était pas limitante. Mais, elle le devenait si on apportait de l'N. L'effet dépresseur de N était donc toujours très marqué, avec cette situation de nutrition en P pourtant plus favorable. Le sol avait encore de la difficulté à libérer le P nécessaire pour satisfaire la demande supplémentaire suscitée par la fertilisation N. Il était observé un effet saison sur l'absorption du P. Les niveaux de nutrition étaient supérieurs d'environ 20 % en saison des pluies. L'effet dépresseur de N était également moins marqué. Une partie du P assimilable provenaient de la matière organique minéralisée. Mandret (Corn. pers.) constatait une baisse de minéralisation de la matière organique sous prairies en saison fraîche, principalement liée aux baisses de température. Ce phénomène pourrait expliquer une dilution plus forte du P à cette saison.

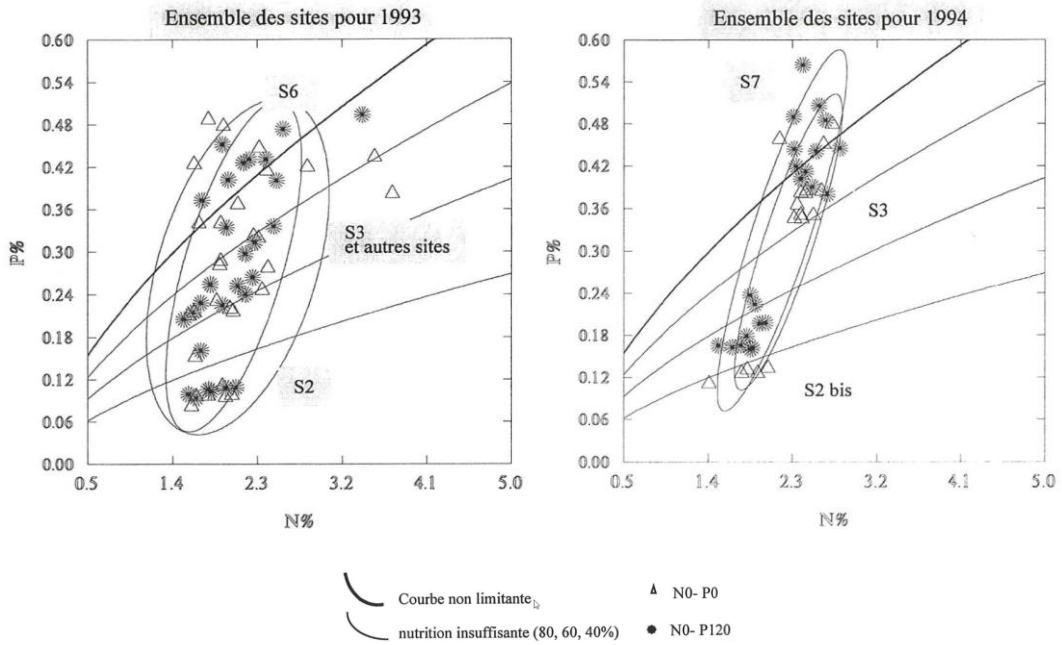

Figure 7 : Effet des apports de P sur la teneur en P exprimé en fonction de la teneur en N

Sur l'ensemble des cycles expérimentaux à absorption anormale, on n'observe aucun effet positif de l'apport de P (60 et 120 U) sur la teneur en P dans la biomasse (Figure 7). Blanfort (1998) précise que cela est d'autant plus marquant qu'il n'y a pas d'apport d'N, pour éviter l'effet dépresseur. Le P supplémentaire apporté n'est donc pas prélevé par le végétal, les teneurs restent équivalentes à celles du témoin. Seul le site S2bis (peuplement spontané d'Anthoxanthum odoratum sans antécédent de fertilisation) contredit ce schéma général. Sa position défavorable sur les courbes 1993 et 1994 (Figure 7) reflète le niveau de fertilité faible des andosols désaturés. Le faible niveau en N et un rendement modéré permettent donc une réponse à une fertilisation P à forte dose (cumul de 2 apports de 120 kg/ha). On remarque une augmentation significative du niveau de nutrition P du site à dactyle S3 en 1994 par rapport à 1993 suite à 2 apports cumulés de 120 kg/ha de P. L'apport d'N annule totalement ce phénomène. Sur les sites S6 et S7 (Figure 7), à nutrition non limitante en P, on note un effet limité de la fertilisation P sur la teneur en P. Sur les 2 années, les figures illustrent bien la gamme des niveaux de nutrition P de l'ensemble des sites d'expérimentation. Elle va d'un état de nutrition P très insuffisant (S2 et S2bis) à un état satisfaisant (S6 et S7) en passant par l'ensemble des autres sites qui reflètent des états intermédiaires où le P est peu disponible pour le végétal.

L'ensemble de ces résultats ont amené Blanfort (1998) à considérer utilisable dans les conditions locales la loi de dilution du P, proposée par Salette et Huche (1991). Elle se vérifie clairement sur 2 des sites. Sur les autres sites, la dynamique d'absorption est contrariée par une incapacité du sol à fournir les quantités de P nécessaires à une dilution "normale" dans la plante. Des travaux complémentaires ont été menés afin de comprendre quels étaient les facteurs de blocage de P sur les sites expérimentaux.

b) Evaluation de la disponibilité du P du sol

La forte indisponibilité du P dans les andosols, mise en évidence par l'analyse de la dynamique d'absorption dans la plante, a conduit Blanfort (1998) à une investigation au niveau du sol même. Il a cherché à comprendre quels étaient les éléments des processus de blocage de P observés sur les andosols.

Evaluation du P assimilable du sol : La forte indisponibilité du P dans les andosols, mise en évidence par l'analyse de la dynamique d'absorption dans la plante, a conduit Blanfort (1998) à une investigation au

niveau du sol même. Les teneurs en P total des sites enregistraient de fortes valeurs (de 1000 à 2500 ppm). La méthode d'extraction du P utilisée en routine au Laboratoire du CIRAD à St Denis évalue la fraction assimilable du P (P Olsen Dabin : extraction par le fluorure d'ammonium $Na_2C03+NH4F$). Elle est largement utilisée en sol tropical. A première vue, il y a une bonne relation entre le P estimé disponible par cette méthode et les indices de nutrition minérale calculés. Sur la trentaine de prélèvements effectués sur les sites sur deux années, le coefficient de relation entre IP et la quantité de P du sol s'élève à r^2= 0.7 (avec une probabilité p= 0.7).

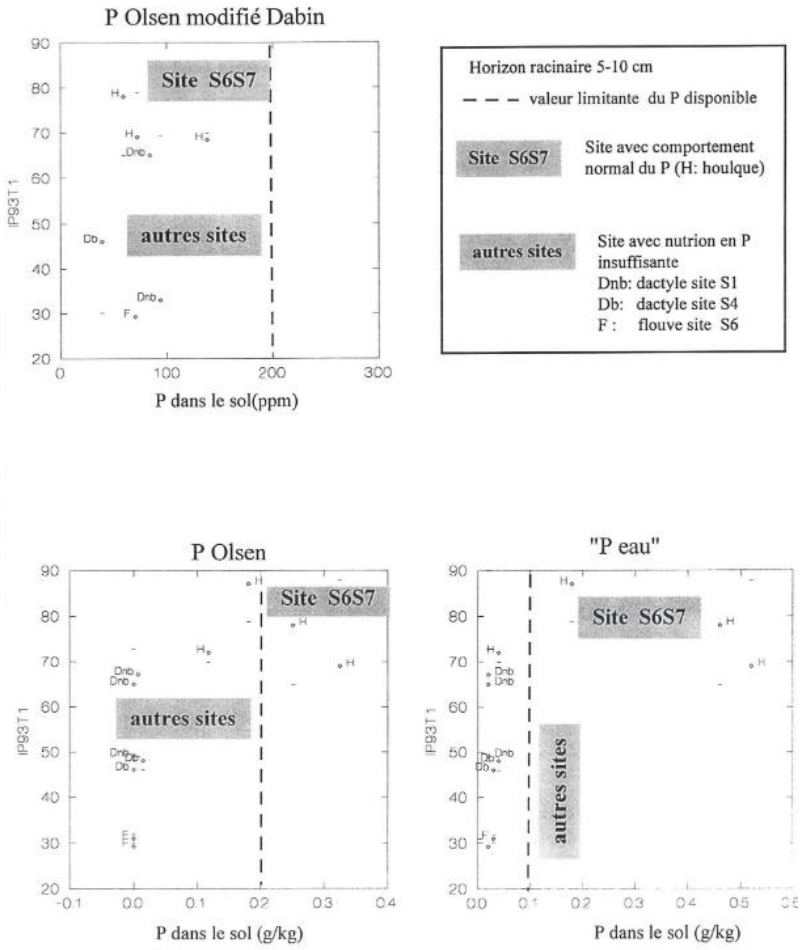

Figure 8 : Relation entre le niveau de nutrition minéral (IP) et les méthodes d'extraction d P di sol.

La méthode Olsen Dabin a été comparée, sur 16 échantillons de sols, à deux autres méthodes d'extraction moins agressives : la méthode Olsen (extraction par bicarbonate de sodium Na2C03) et une méthode d'extraction douce "à l'eau". Les performances de ces 3 méthodes ont été comparées en les mettant en relation avec les indices de nutrition IP. Pour rappel, deux types de situations vis à vis du P disponible avaient été observés sur les sites d'essais : les sites S6 et S7 avaient un comportement normal d'absorption du P, alors que les autres sites avaient une dynamique d'absorption anormal. L'examen des relations entre les indices IP et le P du sol disponible (Figure 8) montre que la méthode Olsen Dabin s'avère moins performante pour discriminer ces deux niveaux de nutrition. Les méthodes Olsen et "extraction à l'eau" placent les sites à nutrition non limitante (IP>80) au-delà de la valeur limitante du P du sol, et les sites à nutrition insuffisantes en deçà de cette valeur. Elles traduisent donc correctement la capacité du sol à fournir du P "assimilable". Ces résultats restent à valider sur un nombre de situations plus élevé avant de pouvoir conclure à une meilleure pertinence de ces méthodes au niveau local. La méthode Olsen Dabin conclue à une carence en P pour l'ensemble des sites. Elle ne décèle pas la situation de nutrition satisfaisante des sites S6 et S7. Elle semble bien adaptée à déceler les situations

de sous nutrition P qui prévalent sur andosols. Le coefficient de corrélation élevé entre IP et P Olsen Dabin, évoqué précédemment, est dû à une situation de nutrition en P majoritairement insuffisante. Nos résultats montrent que sa précision diminue dans des situations où le P du sol devient plus disponible pour la plante. Ces résultats demanderaient à être confirmés sur un plus grand nombre de cas.

Mise en évidence du pouvoir fixateur des andosols : Afin de mieux caractériser le P présent dans le sol, la méthode de cinétique d'échange isotopique (Fardeau, 1993) a été mise en œuvre sur trois des sites. Elle permet de caractériser le pool des ions phosphates assimilés sans avoir à l'extraire du sol (sans le modifier). La cinétique d'échange (le délai de disponibilité du P assimilable dans les différents compartiments d'ions PO_4) varie d'une minute à plus d'un an. Le P dans le sol va d'abord remplir les compartiments à long délai puis ceux libérant le P plus facilement. Ces processus déterminent le pouvoir fixateur en P d'un sol. Les différents états du P disponibles ont été mis en relation avec l'indice de nutrition (Figure 9).

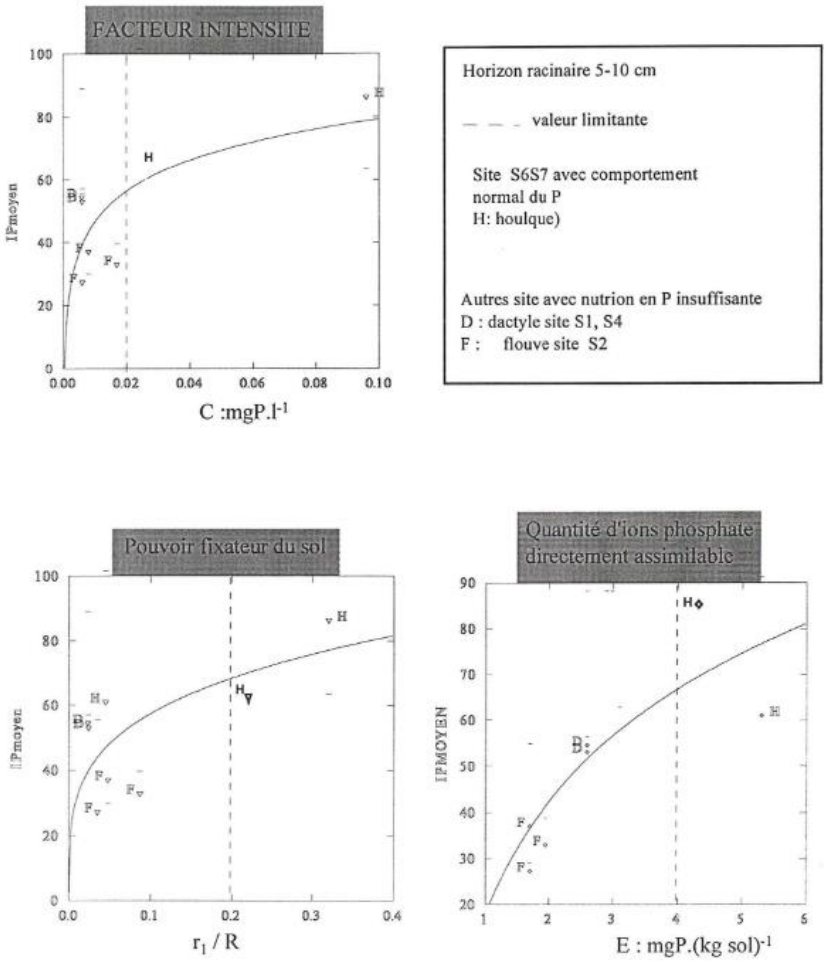

Figure 9 : Relation entre le niveau de nutrition (indice IP) et les différents états du P dans le sol.

La concentration du P dans la solution du sol (facteur intensité C) caractérise la concentration des ions phosphates libres dans la solution du sol, sa valeur limitante pour la nutrition en P des plantes est de 0.02 mg.l-1. Seuls les sites S6 et S7, ou un comportement normal de dilution a été démontré, présentent une valeur C satisfaisante. On n'observe pas d'effet de la fertilisation P. Le pouvoir fixateur des sols pour le P (facteur capacité) est déduit des valeurs du rapport q /R. Seules les valeurs prises par les sols des sites S6 et S7 sont de nouveau supérieures à la valeur militante (0.2). Celles des autres sites y sont inférieures indiquant le fort pouvoir fixateur de ces sols. Le P isotopiguement échangeable en I minute (facteur quantité E) correspond à la quantité d'ions libres directement assimilable par la plante, sans

transformation chimique. De nouveau, ce sont les sites S6 et S7 qui ont une valeur supérieure ou égale à la valeur non limitante pour la production végétale (4 mgP.(kg sol)$^{-1}$). L'ensemble de ces paramètres confirme le pouvoir fixateur des andosols caractérisant les sites expérimentaux sur lesquels il a été observé des dynamiques de dilution du P anormal. L'effet du sol est donc clairement démontré par la mise en évidence d'une bio-disponibilité très faible de cet élément. Les sites S6 et S7 se caractérisent par des sols avec une bio-disponibilité plus forte du P qui explique qu'il a pu être vérifié une dilution normale du P dans la plante. Cependant leur pouvoir fixateur n'est pas complètement nul, la quantité E d'ions libres y est très proche de la valeur limitante, ceci explique qu'on y observe un effet dépresseur de l'N sur l'assimilation du P (Figure 6). L'origine de cette différence de bio-disponibilité du P entre les sites (sur des andosols désaturés perhydratés) est difficile à expliquer. Les sites S6 et S7 ont fait l'objet d'une fertilisation régulière durant plusieurs années. Ils se différencient donc nettement du site S2bis à flouve jamais fertilisé. L'espèce dominante, la houlque, est moins exigeante que des espèces comme le dactyle, ce sont aussi des prairies qui sont exploitées de façon moins intensive, les prélèvements de P ont donc pu y être moins élevés. Cela peut-être une explication de la différence par rapport au site S4 à Dactyle. Les apports réguliers de fumier sont sans doute à l'origine d'un apport plus important de P organique.

Les facteurs d'indisponibilité du P : La Capacité d'Echange Cationique (CEC) des andosols est faible au pH bas du sol, ce qui est le cas pour les sites d'essais, qui se caractérisent dans l'ensemble par une CEC faible autour de 10 mé / 1OOg et des pH variant de 4,5 à 5,9. La capacité de fixation de l'ion PO_4 sur le Complexe Argilo-Humique est donc déjà limitée. Cette liaison chimique permet des échanges faciles avec la solution du sol où le P sera assimilable par les racines. Une CEC faible est un des éléments d'un faible niveau de nutrition P. Une faible activité biologique ne permet pas la libération du P piégé dans les complexes fulviques, eux-mêmes fortement liés à la matière minérale (Raunet, 1991). Conformément à d'autres auteurs (Fritz, 1972c; Truong Binh et al., 1974), la présence d'aluminium échangeable sur les sites serait aussi responsable du pouvoir fixateur des sols. On constate en effet une relation entre l'augmentation de la teneur en aluminium échangeable et la baisse de la nutrition en P (Figure 10).

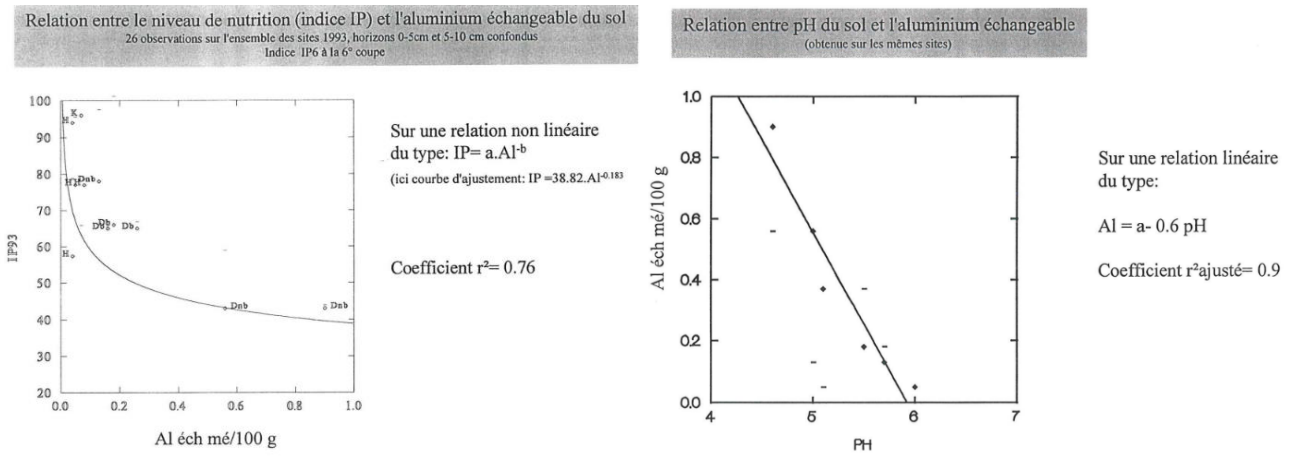

Figure 10 : Relation entre le niveau de nutrition iP, l'aluminium échangeable et le pH du sol.

Par ailleurs on constate également une relation forte entre la baisse du pH et l'augmentation de l'aluminium échangeable, phénomène classique par ailleurs. La présence d'aluminium échangeable sur andosols serait lié à un pH égal ou inférieur à 5 (Raunet, 1990). Les teneurs élevées en aluminium échangeable, entraînent une Capacité d'Echange Anionique élevée. Les ions Al^{+++} constituent des sites de piégeages pour le P sous forme d'hydroxydes d'aluminium et de silicates d'alumine. L'ion phosphate en précipitant en phosphate d'aluminium devient alors difficilement rétrogradable dans la solution du sol sous une forme soluble assimilable par les racines.

Effet du chaulage : Sur l'ensemble des sites expérimentaux, il n'a pas été observé d'effet significatif de l'apport de chaux (dose 1,5 t/ha) sur la teneur en P. La faible durée des expérimentations (apport cumulé sur 2 ans) n'a pu lever les phénomènes de blocage du P. Dans les conditions de ces protocoles (une seule dose de chaux), il n'a pas été observé d'effet négatif de l'apport de chaux sur la croissance.

L'ensemble des résultats sur les caractéristiques du blocage du P dans le sol, conforte l'hypothèse émise sur la validité de la loi de dilution du P à partir de l'analyse de la teneur du Pe dans le végétal. Les sites sur lesquels la loi s'applique parfaitement sont des sites à faible pouvoir fixateur du P. Les autres sites, sur lesquels des distorsions importantes sont apparues (augmentation de la teneur en P dans le végétal au cours de la croissance), sont des sols à pouvoir fixateur élevé. Pourtant ce sont les mêmes types d'andosols, dans des conditions climatiques certes différentes (les premiers sont dans les Hauts de l'Ouest, les seconds à la Plaine des Cafres) mais qui peuvent difficilement être la source de tels dysfonctionnements. On peut y voir plutôt un effet "pratique" ayant conduit à une histoire différente, qui se croise à un effet "espèce" (niveau d'exigence moindre de la houlque).

c) Utilisation des indices de nutrition minérale pour le diagnostic de fertilité

Les lois de dilution ayant été considérées comme applicables dans les conditions locales, avec les réserves émises, les diagnostics de nutrition, dérivés des équations de référence, ont été mis en œuvre sur l'ensemble des sites expérimentaux, pour examiner leur comportement et valider les tendances déjà perçues lors de l'analyse des courbes de dilution.

Effet de l'apport de N (Figure 11): L'effet dépresseur de l'apport de N sur l'indice iP est apparu nettement (43 % de baisse). Un test de comparaison de moyennes a conclu à une différence significative entre NO (moyenne iP = 49) et N1 (moyenne IP = 70) avec une probabilité p=1/10 000.

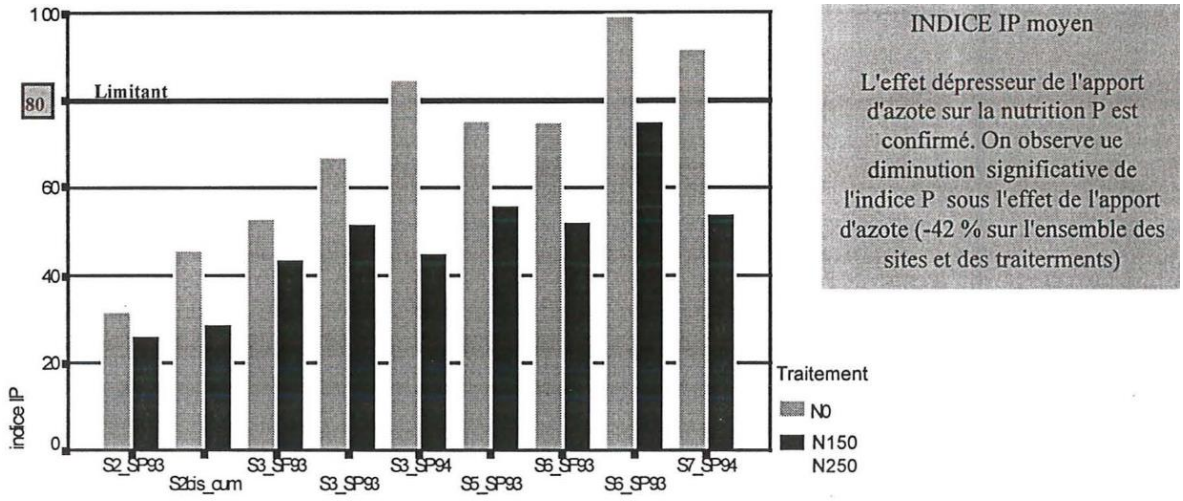

Figure 11 : Comportement des Indices de nutrition iP, en fonction des apports d'azote pour chacun des sites expérimentaux. (les indices calculés représentent la moyenne des indices pour le groupe de traitement considéré (N0, N150, N250) ; l'ensemble porte sur 550 mesures. légende: S2 N° du site, SP saison des pluies, SF saison fraiche, 93 années)

Effet de l'apport de P : La distribution des indices iP sur l'ensemble des sites illustre le constat d'une déficience générale en P (Figure 12 et Tableau 9).

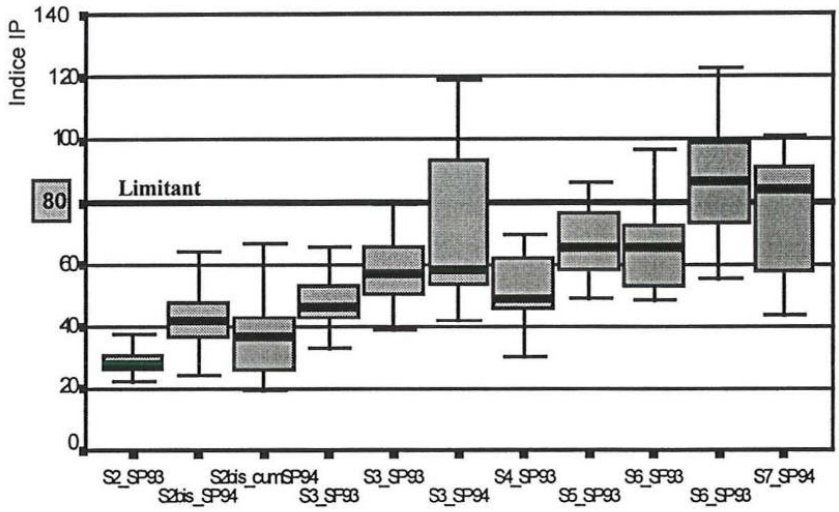

Figure 12 : Distribution des valeurs des indices IP (Légende: S2 N° du site, SP saison des pluies, SF saison fraîche, 93 année).

Seuls les sites S6 et S7 où le P s'avère beaucoup plus disponible présentent des indices non limitants sur 40 % des prélèvements. Le site S3 en saison des pluies 1994, sous l'effet d'un apport cumulé de 120 Kg/ha de P, voit son indice moyen iP remonter de 20 points par rapport à 1993.

Tableau 9 : Niveau des indices iP selon les sites et la saison.

Sites	IP moyen	% >IP80 non limitant	IP saison pluies	IP saison fraîche
S6 S7	74	40%	81	63
Autres	53	11 %	54	48

Une analyse de variance portant sur l'ensemble des traitements sans apport d'N conclue à un effet non significatif de l'apport de P et de chaux sur l'indice iP (Tableau 10).

Tableau 10 : Résultats de l'analyse de variance sur l'effet des différents traitements (NOT, NOP60, NOPI20, NOPCA, NOK) sur l'indice iP.

Variance	D.F	Carré moyen	F	p
Inter groupe	4	295	**0.48**	**0.75**
Intra groupe	264	612		

Les sites sur prairies spontanées à Flouve (S2) apparaissent comme les plus carencés en P, le site S2bis-cum94 semble le seul à répondre significativement à un apport cumulé de P par une augmentation de 20 points (Figure 13).

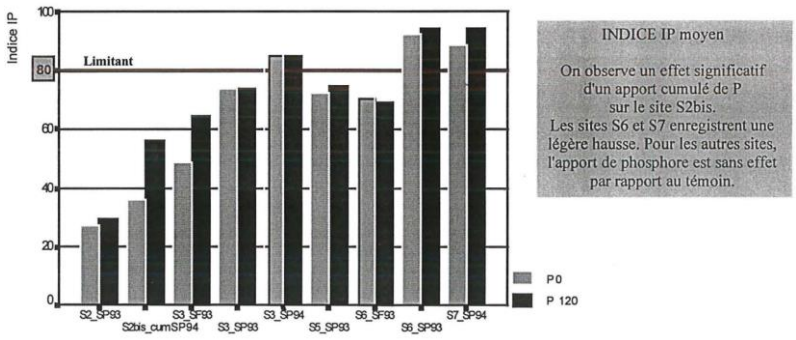

Figure 13 : Effet des apports de phosphore sur l'indice iP (Légende: S2 N° du site, SP saison des pluies, SF saison fraîche, 93 année)

d) Conclusions des essais analytiques

L'analyse de la teneur en P dans le végétal pour les divers peuplements prairiaux étudiés, montrent que le modèle de nutrition minérale de référence est utilisable dans les conditions locales. L'équation de dilution en P, l'indice de nutrition iP qui en découle sont considérés comme des outils de diagnostic de la fertilité des prairies mobilisables à la Réunion sur les peuplements prairiaux tempérés en C3 et tropicaux en C4. Malgré des teneurs élevées dans le sol en P total, il a été constaté dans l'ensemble un état de nutrition en P déficient, ce qui confirme pour les prairies un phénomène déjà constaté sur andosols. Le fort pouvoir fixateur des andosols pour le P entraîne une dynamique d'absorption anormale et un effet dépresseur marqué de l'apport d'N sur la teneur en P dans le végétal. Seuls quelques sites présentent une meilleure biodisponibilité du P. Elle est liée à une fertilisation antérieure plus favorable. Ce qui a permis de valider le modèle de dilution. Les andosols se caractérisent par un pH acide à l'origine d'une Capacité d'Echange Cationique faible et la présence d'aluminium échangeable formant des sites de piégeage du P. L'ensemble entraîne une disponibilité insuffisante du P dans la solution du sol où il est assimilable par les plantes. Un apport élevé de P (2 apports de 120 Kg/ha) conduit à une remontée progressive du niveau de nutrition en P. L'effet de l'apport de chaux sur la disponibilité du P n'a pu être mis en évidence, il a cependant été démontré par ailleurs un effet significatif sur la remontée du pH, qui devrait être favorable à une plus grande disponibilité du P. Les analyses de sols classiques, selon la méthode d'extraction utilisée, présentent des performances diverses dans l'estimation du P échangeable. L'utilisation d'indices de nutrition P pour le diagnostic de la fertilité apparaît à nettement plus précise. Leur pertinence est confirmée par des mesures de la cinétique d'échange isotopique du P.

2.1.3. LES SUIVIS EN ELEVAGE

a) Diagnostics initiaux

En 1991, des pré-diagnostics ont été réalisés en élevage pour sélectionner les sites expérimentaux du programme Gestion raisonnée des prairies. Les indices ont été calculés à l'aide des équations de métropoles. Les indices ont montré une forte disparité entre les parcelles (Figure 14). Ces premiers résultats **laissaient supposer des situations de sous-nutrition. Sur les 15 sites testés, 11 étaient en dessous de 60, et seulement 2 au-dessus de 80** (Blanfort, 1993).

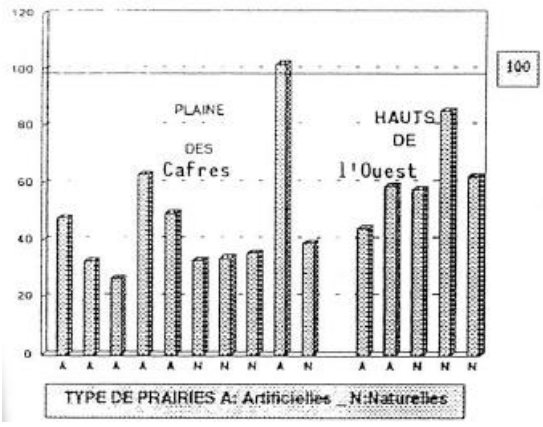

Figure 14 : Indices de nutritions en P réalisés en 1991 dans le cadre de pré diagnostic des sites expérimentaux du programme Gestion raisonnée des prairies (Blanfort, 1993).

b) Campagnes de suivis du CIRAD-UAFP

Entre 1995 et 1997, 926 échantillons de plantes et 469 échantillons de sols ont été analysés dans le cadre du suivi (Blanfort and Thomas, 1996c; Blanfort and Thomas, 1996a; CIRAD, 1998). **Les suivis 1993-**

1994 ont mis en évidence l'existence de carences. On constatait une faiblesse générale de iP, traduisant une satisfaction insuffisante des besoins (Blanfort, 1994). En altitude, les profils minéraux des fourrages cultivés montraient des teneurs très faibles en P, et un déséquilibre du rapport ca/P dû en grande partie aux pratiques de fertilisation qui minimisent l'apport de P, malgré un chaulage régulier (CIRAD ELEVAGE, 1994). Les iP étaient souvent bien corrélés aux pratiques de fertilisation (Blanfort, 1994). Les iP variaient de 22 à 105, avec une grande part en dessous de 70 (Figure 16), pour des apports de 38 à 149 kg P/ha/an (CIRAD ELEVAGE, 1994). Blanfort et Thomas, ont mis en avant, à cette époque, un déficit en P dans une majorité des prairies suivies (Blanfort and Thomas, 1995a). La faible disponibilité du P dans le sol était confirmée par un déficit en P de la prairie pour 70 % des parcelles. Dans 20 % des cas, la nutrition en P était correcte, et dans 10 % des cas, elle était en excès (Blanfort and Thomas, 1995a). Les résultats, allaient dans le sens d'un phénomène de piégeage du P par les andosols (Blanfort, 1994). Les analyses de sols ont confirmé la nature particulière des andosols caractérisés notamment par une faible disponibilité du P (Blanfort and Thomas, 1995b). Les analyses effectuées sur les échantillons de sol prélevés en exploitation concordent avec les résultats obtenus pour les diagnostics de nutrition. Soixante-cinq pourcent des sols avaient une teneur faible en P. Seulement 25 % avaient une teneur moyenne, et 10 % forte (Blanfort and Thomas, 1995c).

Cette faible disponibilité en P dans le sol, associé à des pratiques de fertilisation insuffisantes, se traduisaient par une moindre valorisation de la fertilisation en N (Blanfort and Thomas, 1995b). Blanfort et Thomas estimaient que l'N présente dans le sol était faiblement valorisé, en raison, pour partie, de la faible disponibilité de P (Blanfort and Thomas, 1995c). Ils ont constaté un effet significatif de l'apport de P, qui entraînait une augmentation de la teneur en N et par conséquent du rendement (Blanfort, 1994). Aussi, ils préconisaient d'effectuer des apports simultanés de N et de P (Blanfort, 1994). Le déficit en P induit une moindre valorisation de la fertilisation N, qui contribue à la faible nutrition minérale en N constatée dans 60 % des cas, ce qui ne permettait pas une valorisation maximale du potentiel de croissance des prairies (Blanfort and Thomas, 1995a). Cette situation n'était pas forcément un problème en saison des pluies, où le disponible fourrager était souvent mal contrôlé, mais en fin de saison des pluies, cela pouvait être un facteur limitant pour la constitution de stocks fourragers pour la saison sèche (Blanfort and Thomas, 1995a). Cette situation induisait également une baisse de compétitivité des espèces semées par rapport aux espèces envahissantes des pâturages (Blanfort and Thomas, 1996b; Blanfort and Thomas, 1995b).

Les suivis entrepris ont permis les comparaisons entre exploitations, entre saisons et entre années. L'influence qu'exercent le milieu et le climat sur la fertilité des prairies des diverses régions de l'île, en saison des pluies ou en saison sèche, restaient inférieure au poids prédominant des pratiques de fertilisation. Celles-ci, aussi diverses soient-elles, contribuaient généralement à accentuer les déséquilibres hérités des particularités des andosols d'altitude (Blanfort and Thomas, 1996b).

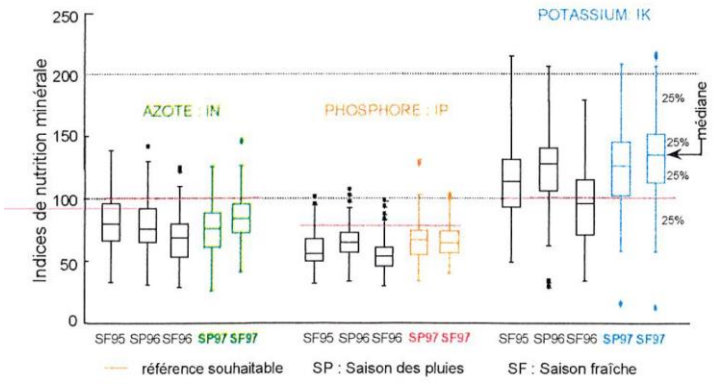

Figure 15 : Evolution des indices de nutrition minérale des parcelles suivies, de 1995 à 1997 (n = 930 observation pour chacun des indices) (Thomas, 1997a)

Des 1995, des conseils ont été fournis aux éleveurs afin qu'ils modifient leurs pratiques (cf. 2.3.1.). Les éleveurs qui ont suivi ces préconisations ont obtenu, dès la saison des pluies 1995-1996, des niveaux de nutrition en P plus élevés tout en contrôlant les niveaux de nutrition en N et K (Blanfort and Thomas, 1997, 1996d). En 1997, les résultats ont montré une évolution très nette des pratiques de fertilisation dans le sens des recommandations apportées par le suivi (Figure 15). La principale progression concernait les indices mesurés en hiver. Entre 1996 et 2004, 1261 indices ont été mesurés chez les adhérents de l'UAFP (Figure 16), soit près de 90 exploitations. Les indices iP **varient de 43 à 206, pour une moyenne globale de 91**. Ce sont 31 % des prairies qui étaient en déficit, 52 % avaient un indice correct, et 17 % étaient en consommation de luxe. Les indices sont meilleurs que ceux de la précédente période. Les auteurs l'expliquent par l'évolution du conseil et l'accompagnement rapprochée permis par le programme de recherche (cf. 2.3.2.).

c) Evolution de la nutrition en P des prairies par la suite

Treize ans plus tard, dans le cadre du programme RITA mené avec l'IDELE, pour améliorer le raisonnement de la fertilisation des prairies (Pierre, 2019), l'ARP a remis en place des diagnostics dans le cadre de ces essais et de son conseil. A partir de 2020, elle a mis en place des campagnes annuelles de prélèvements, de janvier à avril, auprès des producteurs souhaitant revoir leur fertilisation (Miralles-Bruneau, 2019). Une centaine d'élevages ont été diagnostiqués entre 2017 et 2022, et 475 indices iP ont été réalisés. Les indices variaient de **56 à 205, pour une moyenne globale de 104**. Seulement 12 % des prairies présentaient un déficit, 60 % avaient un indice correct, et 28 % étaient en consommation de luxe (Figure 16).

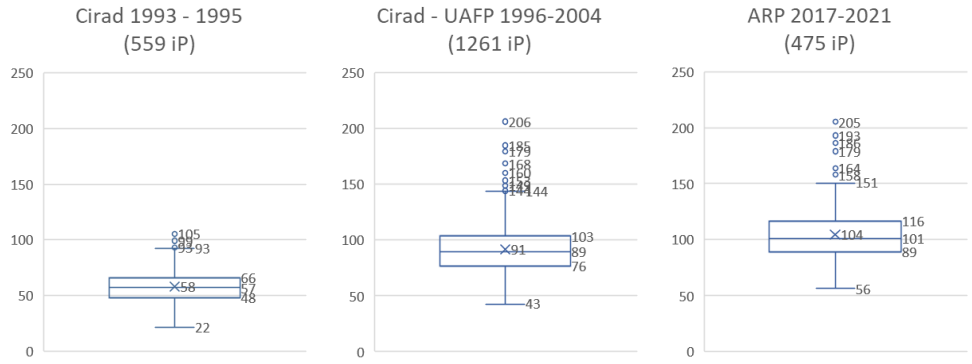

Figure 16 : Boxplot individuels et globale de trois campagnes de mesure des indices de nutrition en P (%), menés par le Cirad, l'UAFP, et l'ARP, entre 1993 et 2021.

Les résultats obtenus tendent à être un peu plus élevés (± 10 unités) que ceux de la campagne 1996-2004. Les données relatives aux échantillons ne permettent pas de dire si cette différence observée peut s'expliquer par un changement de pratiques ou un effet d'échantillons (producteurs suivis par l'ARP, volontaires et plus enclins à raisonner leurs pratiques de façon optimale). Il a été observé une évolution du statut nutritif en P des prairies entre les années 90 à aujourd'hui. Les prairies étaient majoritairement carencées au début des années 90. Les suivis d'élevages ont montré que dans l'ensemble les pratiques de fertilisation de l'époque n'étaient pas adaptées aux conditions pédo-climatiques. Celles-ci avaient plus d'impact sur le niveau de nutrition en P des prairies que l'influence du milieu et du climat. La mise en place d'un suivi régulier, dans le cadre du programme de Gestion raisonnée des prairies, à contribuer à faire évoluer les pratiques et le niveau de nutrition des prairies en P. Le niveau des iP apparaissent globalement satisfaisant à l'heure actuelle. Cependant, nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour le moment pour définir si les dernières campagnes de mesures réalisées par l'ARP sont représentatives de la diversité des élevages et producteurs de fourrages.

2.3. Historique des préconisations et des pratiques de fertilisation

2.3.1. Evolutions des preconisations en matiere de fertilisation en P

Les premiers conseils en fertilisation P des cultures sont émis par l'IRAT, à partir de la fin des années 1960. L'IRAT, dans ces préconisations, distinguait bien la fertilisation de redressement, destinée à enrichir le sol en corrigeant ses carences pour l'amener à un niveau satisfaisant en éléments nécessaires à la plante, et la fertilisation d'entretien, dont le but est d'entretenir la richesse acquise en compensant les exportations, c'est-à-dire les éléments sortis du champ avec la production, et les pertes (lessivage) (IRAT, 1967). A l'époque, sont présents sur le marché des phosphates tricalcique (30 % P_2O_5), des phosphates naturels (14% P_2O_5), ou les scories Thomas (18-22 % P_2O_5) (IRAT, 1978b, 1967). Ces engrais, d'action lente, étaient conseillés pour les terres acides (IRAT, 1967). Ils avaient l'avantage de contenir 50 % de chaux vive. Cela en faisait un engrais de choix pour la fumure des terres d'altitude où il était souvent nécessaire de corriger le pH trop acide et les carences en P (IRAT, 1978b). Ces engrais ayant une action lente, et n'étant pas immédiatement disponibles pour la plante, il était conseillé d'apporter cette fumure assez tôt, de préférence à l'enfouissement pendant le labour (IRAT, 1978b). Le Super triple (40-50 % d'acide phosphorique) était conseillé pour une action rapide (IRAT, 1978b), combiné à l'implantation ou en entretien. Concernant les engrais composés, il était conseillé d'utiliser un engrais dont l'équilibre correspond à l'équilibre des exportations de la plante (IRAT, 1978b). Pour les sols d'altitude, très organiques, qui fixent très fortement les engrais P, et n'en restituent qu'une faible partie, il était conseillé de corriger l'acidité trop élevée.

Concernant les prairies, en 1971, l'IRAT communique les premières valeurs de P exporté (Tableau 11) pour trois espèces fougères, issus de leurs essais, dans le but de permettre une approche de la fertilisation d'entretien (Fritz, 1971b).

Tableau 11 : Exportations en phosphore, par tonne produit et par hectare et par an, pour trois espèces fourragères (Fritz, 1971b).

Espèce	Exportation par tonne produite (kg /t MS)	Exportation annuelle (kg/ha/an)
Chloris gayana*	2,18 – 3,49	44 – 70
Pennisetum purpureum*	3,05 – 4,8	61 – 96
Desmodium intortum**	2,62	105

**pour une production de 20 t MS/ha/an, ** pour une production de 10 t MS/ha/an*

Les expérimentations menées par l'IRAT, en vase de végétation, et parallèlement au champ (Dadant, 1974; Fritz, 1972c), ont permis à l'époque de préciser les doses de P à apporter pour corriger des carences (Tableau 12). Quel que soit l'importance de la carence, il était souligné l'importance de ne pas négliger la fertilisation annuelle d'entretien (IRAT, 1967).

Tableau 12 : Corrections des carences en phosphore préconisées par l'IRAT (IRAT, 1967).

Importance de la carence	Correction de la carence
Forte à très forte	130 à 220 kg P/ha sous forme tricalcique
Moyenne	90 kg P/ha sous forme tricalcique
Faible	Forcer sur la fertilisation d'entretien : 45 kg P/ha

A l'époque, ils ont observé, sur prairie, une réponse à des apports de P uniquement lorsque la carence observée en vase de végétation était très forte. Dans ce cas, un apport de deux à trois fois les exportations prévues était conseillé (Dadant, 1974; Fritz, 1972c).

Pour la culture de Chloris, sur le littoral, un apport de 45 à 90 kg P/ha (sous la forme de phosphate naturel ou de scories), en fertilisation de fond avant le semis, était conseillé dans le cas de sols

suffisamment riches (IRAT, 1978a). L'IRAT préconise également de compenser les exportations, pour éviter que la fertilité du sol s'abaisse au point de diminuer la production (IRAT, 1978a). Pour une production de 25 t MS/ha/an de Chloris, il était conseillé de compenser de 50 à 65 kg P/ha, en deux ou trois apports par an (IRAT, 1978a). La fertilisation d'entretien annuelle en P d'un chloris gayana était estimée de l'ordre de 2,6 kg P/ t MS (Fritz, 1972b). Pour les pâturages naturels des Hauts, 1 000 kg/ha de phosphate tricalcique la première année (130 kg P/ha), suivi d'apports annuels de 200 kg/ha, soit 26 kg P/ha/an (IRAT, 1978c). En 1985, Audru considérait, pour les prairies de Kikuyu, qu'un apport de 20 kg P/ha/an était suffisant. La date optimal d'apport conseillée était le mois de juin, avant la période de carence de juillet à octobre (Audru, 1985).

En 1988, le Cirad édite quatre fiches techniques sur la fertilisation des prairies, dans le cadre du programme Elevage Mieux (CIRAD et al., 1988a, 1988b, 1988c, 1988d). Il préconise un apport de 21 kg P/ha/an sur les prairie dites semi-intensives, produisant de 6 à 8 t MS/ha/an (CIRAD et al., 1988c), et de 44 kg P/ha/an sur les prairie dites intensives produisant de 10 à 12 t MS/ha/an. D'après la fiche, ces valeurs prennent en compte des pertes et fixations dans le sol. Cependant, compte tenu du niveau des valeurs présentées, il semblerait que cette prise en compte soit très faible.

En 1991, Bigot et Fontaine, pour estimer la fertilisation nécessaire à des pâtures, utilisaient un coefficient compensateur de 2, afin de prendre en compte les pertes diverses et la fixation dans le sol (Bigot and Fontaine, 1991).

Afin de rendre le P du sol plus assimilable, il était préconisé l'apport de carbonates (de calcium ou de silicium) ou de matière organique, ce qui permettait de rendre le P plus assimilable (Chabalier, 1987; Raunet, 1990). Pour les andosol, qui ont un fort pouvoir tampon, de fortes doses de chaulage sont nécessaires pour remonter faiblement le pH (Raunet, 1990).

A partir de 1986, le laboratoire d'Agronomie Cirad-Reunion développe un outil d'interprétation automatique des analyses de sols, dans l'optique de donner des conseils en fertilisation aux agriculteurs (CIRAD, 1986; Pouzet et al., 1997). Il propose une fumure de correction du sol et un plan de fumure d'entretien de la culture. Le calcul des doses conseillées reposent sur les seuils (Tableau 13) et les besoins de la culture (Pouzet et al., 1997). Pour chaque échantillons analysé, l'unité de sol et la grille des seuils qui lui correspond sont déterminées par les coordonnées géographiques. Pour calculer les doses de corrections, ils prennent le parti de conseiller d'apporter la quantité capable de ramener le sol à 150 ppm de P assimilable (CIRAD, 1986). Le programme d'interprétation ne prend pas en compte les associations graminées-légumineuses, car elles sont rares (Pouzet et al., 1998). La plus part des soles fourragères sont situées en altitude sur des andosols, avec des cas de production en basse altitude essentiellement sur sols bruns irrigués (Pouzet et al., 1998).

Tableau 13 : Conseil en fertilisation d'entretien des fourrages du logiciel SERDAF (Pouzet et al., 1997)

Diagnostic potassique	Production extensive	Production intensive
Sol carencé	190 N – 60 P_2O_5 – 420 K_2O	380 N – 90 P_2O_5 – 590 K_2O
Sol normal	190 N – 60 P_2O_5 – 320 K_2O	360 N – 90 P_2O_5 – 490 K_2O
Sol riche	190 N – 50 P_2O_5 – 210 K_2O	380 N – 70 P_2O_5 – 320 K_2O

Pour la fumure de correction, les conseils en amendement P sont identiques à ceux de la canne à sucre, et dépendent du niveau du P assimilable (Très faible : correction ; Faible : entretien renforcé ; Moyen-Fort : entretien normal ; Très fort : pas d'entretien) (Pouzet et al., 1998). Le calcul repose sur la différence entre le niveau souhaitable dans le sol, et le niveau réel. Contrairement aux autres éléments, et compte-tenu de la faible migration du P dans le sol, les besoins sont alors estimés pour corriger 1 000 tonnes de terre par hectare. Le conseil minimum est fixé à 40 kg P, et est arrondi à la dizaine de kg la

plus proche du résultat calculé. Conformément aux études de dynamique du P dans les sols réunionnais (Truong Binh et al., 1974), les besoins calculés sont multipliés par deux pour tenir compte de la forte rétrogradation du P. Environ la moitié du P soluble apporté à la culture, est considéré comme fortement fixé par le sol qui le met ainsi hors de portée de la plante (Pouzet et al., 1998). Pour le plan de fumure d'entretien de la culture, la dominance d'une unité de sol (andique) permet de ne prendre en compte que les besoins de la culture pour le P. Les quantités fournies par le sol sont considérées comme constantes, et les doses sont établies en fonction du rendement (Pouzet et al., 1997). La fertilisation d'entretien des fourrages du système expert est établie d'une part pour une production « semi-intensive » (6 à 8 t MS/ha/an), et d'autre part, pour une production « intensive » (10 à 12 t MS/ha/an). Ces niveaux correspondent à des charges respectives de 1,5 et 2,5 vaches à l'hectare, ou des fourchettes de 4 à 7 ou 7 à 9 coupes annuelles (Pouzet et al., 1997). Il est à noter que les termes « semi-extensif » et « intensifs » ne sont pas adaptés compte tenu des potentiels fourragers connus à la Réunion. Ils ont certainement été retenus car représentatifs des pratiques de terrain. Le « système intensif », le plus courant, est utilisé par défaut s'il n'est pas précisé que la parcelle est irriguée (Pouzet et al., 1998). Les calculs sont basés sur des exportations minérales intermédiaires entre celles des graminées tempérées et tropicales, soit 20 kg P pour 10 tonnes de matière sèche produite. Ce chiffre a été modulé pour prendre en compte le phénomène de rétrogradation du P (Pouzet et al., 1998).

Le programme de Gestion Raisonnée des prairies, conduit entre 1992 et 1998, par le CIRAD et l'UAFP, a permis de définir de nouvelles préconisations. La nature des engrais utilisés par les éleveurs a été définie comme le facteur incontournable de l'amélioration de la fertilisation des prairies. Afin de favoriser une bonne assimilation des engrais par un bon équilibre de la nutrition de la plante (CIRAD, 1998), ils préconisent un apport systématique de P, en même temps que l'N (Blanfort, 1994), pour assurer une bonne assimilation de N. Pour les prairies de fauche à exploitation intensive, ils conseillent une fertilisation à chaque cycle d'exploitation en fonction des objectifs de production (Blanfort and Thomas, 1996d; Thomas, 1997b, 1997a). Blanfort et Thomas, préconisaient l'utilisation de formules d'engrais contenant plus de P et moins de K (Blanfort, 1994; Blanfort and Thomas, 1995a), permettant une meilleure croissance de l'herbe pour un coût d'intrants moindre (Blanfort and Thomas, 1995a). Dans un premier temps, les éleveurs ont été orientés sur des formules existante (33-11-6) (Blanfort and Thomas, 1996b). Puis, deux nouvelles formules d'engrais ont été développées, en concertation avec un fabricant de l'île (16-29-12, 16-30-15), adaptées aux différentes périodes de l'année (Thomas, 1997a). Ils conseillent de raisonner la fertilisation par saison (Blanfort and Thomas, 1996d). En début de saison des pluies, les épandages d'engrais complets devaient avant tout permettre de recharger le sol en P (Blanfort and Thomas, 1996d). Des engrais de type 16-30-15, 10-20-20, étaient conseillés. Avant l'arrivée de la saison fraîche, ce sont des engrais de type 16-29-12 ou 15-12-24 qui étaient préconisés. Pour la saison fraîche, c'était un engrais de type 33-11-06 qui était conseillé, plus riche en N, et avec un apport suffisant en P pour favoriser son assimilation. Blanfort et Thomas, préconisaient d'associer analyse de sols et indices de nutritions, afin de permettre d'apprécier la capacité de fourniture du sol et d'ajuster la fertilisation des prairies à des objectifs de production d'herbe, suffisant pour nourrir les animaux tout en évitant le gaspillage d'herbe et d'engrais, et ses éventuelles conséquences négatives sur l'environnement (Blanfort and Thomas, 1995a; Thomas, 1997a, 1997b). L'indice de nutrition informait sur le niveau de nutrition de la plante, et l'analyse de sol sur l'acidité, la matière organise, la CEC (Thomas, 1997a), indicateurs qui permettaient d'identifier les causes du niveau de nutrition, et de permettre de le corriger si nécessaire. Pour les sols présentant des iP faibles, ils préconisent d'effectuer des apports de P sur plusieurs années, et de relever parallèlement le pH du sol (Blanfort and Thomas, 1996b; Thomas, 1997a, p. 199). Ils déconseillent également, en saison fraîche, l'utilisation d'ammoniac ou d'urée seuls, et de leur préférer un complet du type 33-11-06, 30-10-10 ou 38-12-00, pour ne pas accentuer la carence en P. Pour les sols acides (pH < 5,5), ils préconisent des apports de chaux magnésienne, pour redresser le pH et favoriser l'assimilation de l'engrais (1 tonne/ha à la création de la prairie, 500 kg/ha en entretien en mai-juin. Ils conseillent également un apport de matière organique

par épandage régulier de lisier ou fumier (Thomas, 1997a, 1997b). La levée du phénomène de blocage du P dans les andosols doit être envisagée sur le long terme (Thomas et al., 2001).

Dans la continuité de ce programme, l'UAFP préconisait, au début des années 2000, dans son guide de gestion raisonnée des prairies, un apport de 100 kg P/ha/an, pour un pâturage avec une production annuelle de l'ordre de 12 t MS/ha/an (Thomas et al., 2004). A la même période, Chabalier et al, précisent, dans le guide de la fertilisation organique de la Réunion, que cette préconisation est une fertilisation de correction en P, due à une très forte fixation du P apporté dans les andosols, et donc faiblement disponible pour la culture (Chabalier et al., 2006). C'est une fertilisation définie pour répondre à un déséquilibre nutritionnel P-K fréquemment observé dans le fourrage. Cette fertilisation ne correspond pas aux niveaux d'exportation en P des prairies, et ne peut pas durer plus de quelques années sur une même parcelle (Chabalier et al., 2006). L'UAFP préconisait (Thomas et al., 2004), dans le cadre d'un redressement minéral, d'utiliser un engrais contenant du P peu soluble, pour une assimilation à moyen et long terme (ex : hyperphosphates). Pour une fumure d'entretien devant fournir du P immédiatement assimilable par les plantes, c'est du P très soluble qu'il conseillait d'épandre en même temps que l'N (ex : en binaire DAP, en ternaire 33.11.6). En saison des pluies, l'UAFP conseillait des formules d'engrais complet pour recharger le sol en P. En début de saison, ce sont les formules 16-30-15 , 15-12-24 et 10-20-20 qui étaient conseillées. Avant l'arrivée de la saison fraiche, c'était les formules 16-29-12 et 15-12-24 qui étaient préconisées pour anticiper la baisse de production (Thomas et al., 2004). En saison fraîche, ce sont des engrais « coup de fouet », tels que le 33-11-06, 30-10-10 ou 38-12-00 qui étaient conseillés, pour leur action rapide et efficace à cette saison (Thomas et al., 2004).

Au début des années 2000, le guide de la fertilisation organique à La Réunion, évaluait l'exportation à 26 , 52, 79 kg P/ha/an, respectivement pour des rendements de 10, 20 et 30 t MS/ha/an (Chabalier et al., 2006). La Chambre d'Agriculture de la Réunion s'appuiera sur ces valeurs pour définir les besoins des prairies tempérées pour le développement de leur logiciel de fertilisation Ferti-run (Van de Kerchove et al., 2018). Ils intègreront dans le calcul des besoins, un coefficient prenant en compte la faible disponibilité du P dans les andosols, principaux sols rencontrés sous prairie à l'époque. Aussi, ils communiqueront des besoins trois fois supérieurs aux exportations de Chabalier et al. (2006), et très au-dessus des valeurs d'exportations communiquées antérieurement (Tableau 14).

Tableau 14 : Valeurs de besoins en phosphore des prairies tempérées de la Réunion, en fonction du niveau de rendement, utilisées par le logiciel Ferti-Run (Van de Kerchove et al., 2018)

Rendement (t MS/ha)	10	12	15	18	20	22	25
P (kg P/ha)	78	94	118	141	157	173	196

Le choix d'un coefficient multiplicateur de 3 n'est pas documenté. Il est possible qu'il ait été fait en s'appuyant sur les expérimentations menées par l'IRAT, en vase de végétation, et parallèlement au champ (Dadant, 1974; Fritz, 1972c), ou sur les travaux de Truong Binh et al (1974) et du laboratoire d'analyse de Saint Denis (Pouzet et al., 1998, 1997). Ce sont les préconisations de Ferti-run qui ont été utilisées par la suite pour la définition des plans d'épandages.

En juin 2020, l'ARP a édité une fiche technique présentant les besoins théoriques en P des prairies (Miralles-Bruneau et al., 2020b). Elle visait à fournir des quantités de P à apporter, pour un rendement objectif donnée, afin de couvrir les exportations. Cette grille a été définie selon la méthodologie décrite par Miralles-Bruneau (2022), sur la base d'une typologie de prairies, représentative des pratiques (Miralles-Bruneau et al., 2020c; Pierre, 2019). Pour chaque type de prairie, un rendement moyen a été fixé à dire d'expert, et une teneur en P de référence a été déterminée en utilisant les équations de dilution N et P validées par Blanfort (1998) à la Réunion (cf. 2.2.1.). Les teneurs en P utilisées varient de 2,5 à 3,5 kg P/t MS, et tendent à être légèrement supérieures pour les prairies tempérées, notamment dans le cas de rotation rapides. Les rendements objectifs, pour chaque situation, ont été multipliés par

la teneur en P correspondant au type de prairie. Les résultats ont été arrondis au multiple de 5 le plus proche (Tableau 15).

Tableau 15 : Exportation en phosphore (kgP/ha/an) des prairies en fonction du type de prairie, du mode d'exploitation, du rythme d'exploitation (rapide ou lente), et du niveau de rendement

Rdt	Exploitation rapide		Exploitation lente	
(t MS/ha/an)	Tempérées	Tropicales	Tempérées	Tropicales
PATURAGE				
10	35	30	30	30
15	50	45	50	45
20	70	60	65	60
ENSILAGE ET ENRUBANNAGE				
10	30	25	30	25
15	45	40	45	40
20	60	55	55	50
25	80	70	70	65
FOIN				
10	30	30	25	25
15	40	40	40	40
20	55	55	50	50
25	70	70	65	65
30	85	80	75	75

Ces valeurs fournies par les grilles sont des valeurs théoriques d'export en P, ce qui n'est pas clairement explicité dans la fiche, et peut porter à confusion avec des doses fertilisantes. La fiche technique préconisait d'apporter au maximum 100 kg P/ha/an, et de corriger le pH si nécessaire, afin de favoriser l'utilisation effective du P de l'engrais par la culture. Cette préconisation ne concernait que les engrais chimiques, dans une optique de réduction des intrants. Elle a été définie sur la base de deux essais d'apports de doses croissantes de phosphates sur Chloris gayana, mené par l'IRAT, aux Colimaçons (Fritz, 1972b) et aux Bras de la plaine (Loynet, 1972), entre 1968 et 1972.

En conclusion, dès les débuts de l'élevage des préconisations ont été diffusées pour couvrir les exportations en P des prairies. Celles-ci ont variées de 21 à 105 kg P/ha/an. Très tôt, la faible disponibilité du P dans les sols a été pris en compte, et des coefficients multiplicateurs, variant de deux à trois, ont été appliqués aux valeurs d'exportations. Cette approche a pris différentes formes, et elle a été présente de façon discontinue dans le temps. Les doses fertilisantes préconisées ont varié de 20 à 220 kg P/ha/an. Il apparait qu'il y a confusion entre exports, besoins et apports dans les documents diffusés. Ces termes ne sont pas toujours expliqués. Les fiches techniques du CIRAD et de l'ARP parlent d'apports et de besoins pour des valeurs qui correspondent en réalité à des exportations de la culture. Celles-ci ne prennent pas en compte une éventuelle perte ou rétention au niveau du sol. A l'inverse, les préconisations de la Chambre d'Agriculture incluent une rétention au niveau du sol, mais elle ne précise pas qu'un coefficient a été appliqué aux exportations pour définir les besoins. Ces désignations non explicites sont certainement à l'origine des interrogations qu'ont suscitées les valeurs communiquées par l'ARP en 2020.

2.3.2. Evolutions des pratiques de fertilisation en P dans les elevages

Peu d'études se sont intéressées aux pratiques de fertilisation des éleveurs et producteurs de fourrages. En 1986, le laboratoire d'agronomie Cirad-Réunion constate que « les agriculteurs se préoccupent peu du facteur de rendement. Ils ne consacrent pratiquement aucun temps à l'acquisition de données, au contrôle de fertilité et au raisonnement de la fertilisation. Ils sont habitués à utiliser un engrais ternaire NPK standard, déterminés avant tout en fonction des besoins de la culture et non des caractéristiques du milieu. Le prix du sac d'engrais est aussi mis en avant comme un facteur de décision (IRAT, 1978b).

D'après eux, « cette simplification excessive a certainement engendrée de mauvaises habitudes, à la fois chez les agriculteurs, les techniciens et les fournisseurs d'engrais » (CIRAD, 1986). A l'époque, le laboratoire estime que le raisonnement de la fertilisation se heurte dans son développement à une inertie de la profession. Cette inertie, d'après l'auteur, doit être combattue à tous les niveaux, et particulièrement au niveau du terrain, par un meilleur encadrement et une meilleure formation – information des agriculteurs (CIRAD, 1986). Entre 1992 et 1998, le CIRAD et l'UAFP, ont conduits un programme de Gestion raisonnée des prairies. Les suivis d'élevages ont montré que dans l'ensemble les pratiques de fertilisation de l'époque n'étaient pas adaptées aux conditions pédo-climatiques (Blanfort et al., 1995; Blanfort and Thomas, 1995b). Les diagnostics de nutrition réalisés traduisaient l'incapacité fréquente des pratiques de fertilisation à satisfaire à des objectifs de production d'herbe, en tenant compte des contraintes de milieu (sol) et de saison, tout en évitant les gaspillages et les excès d'engrais (Blanfort and Thomas, 1995a). Les pratiques de fertilisation étaient basées soit sur l'utilisation exclusive de l'N, soit sur l'emploi d'un engrais complet (15-12-24 ou 14-7-36). La formulation des engrais employée par les éleveurs contribuait souvent à accentuer le déficit en P (Blanfort and Thomas, 1995c). Les pratiques de fertilisation minimisaient l'apport de P, malgré un chaulage régulier (CIRAD ELEVAGE, 1994). La fertilisation en P apportée variait de 38 à 149 kg P/ha/an (CIRAD ELEVAGE, 1994). Après un an de suivi, avec restitutions deux fois par an, à chaque début de saison, il a été observé une homogénéisation des pratiques, obtenue grâce à des réajustement conduisant à une meilleure valorisation des apports d'engrais (Blanfort and Thomas, 1996b). Les éleveurs ont été orientés vers des engrais plus équilibrés (plus de P, moins de K), dont le 33-11-06, qui était très peu utilisé (Blanfort and Thomas, 1996b). L'emploi de formules d'engrais tenant compte des carences en P a permis d'augmenter de façon significative le niveau en phosphore des prairies. En six ans, il a été observé une évolution des pratiques de fertilisation (nature des engrais et doses apportée) (CIRAD, 1998; Thomas et al., 2001). Une nette amélioration des indices iP a été observée en saison fraîche, avec la quasi disparition des fortes carences observées les années précédentes (Thomas et al., 2001). Deux nouvelles formules d'engrais ont été développées : 16-29-12 et 16-30-15, adaptées aux différentes périodes de l'année (Thomas, 1997a). Dans la phase opérationnelle du programme de gestion raisonnée des prairies, une restitution individuelle étaient effectuée avant chaque changement de saison afin de constituer une aide à la décision opérationnelle et dynamique (Blanfort and Thomas, 1996c; CIRAD, 1998). Cela a abouti à une évolution très nette des pratiques de fertilisation, dans le sens des recommandations apportées par le suivi. Aussi, un appui technique régulier, et pérenne dans le temps est indispensable à un changement de pratiques. Ce programme avait mis en avant une forte variabilité entre exploitations, toujours marquée après plusieurs années de suivis (CIRAD, 1998). Cela souligne la nécessité d'un suivi personnalisé considérant chaque élevage comme un cas particulier. Au début des années 2000, le CIRAD constatait que les éleveurs de bovins utilisaient toujours des formulations conçues pour la canne à sucre pour fertiliser leurs pâturages, et appliquaient également des engrais dans leurs pâturages pendant la saison sèche (Grimaud et Thomas, 2002).

Dix-sept ans plus tard, en 2015, la Chambre d'Agriculture a réalisé une enquête dans 51 élevages laitiers. 88 % des éleveurs enquêtés estiment que leur fertilisation minérale est faible (45/51). Pour ces éleveurs, dans 36 % cela ne représente pas un problème (6/15), pour 18 % cela pose problème (8/15) et 47 % ne se prononcent pas. Quatre-vingt-quatorze pourcents des élevages utilisent de l'engrais organique pour leur fertilisation (lisier, fumier). Ils l'utilisent essentiellement pour diminuer les charges d'engrais (69 %), mais aussi pour augmenter les rendements (12 %), et valoriser leur lisier (10 %). Seulement un éleveur a dit le faire pour améliorer la qualité de son sol. Pour 80 % des éleveurs, leur utilisation des déjections animales pour la fertilisation les satisfait. Pour les 14 % pour qui cela pose problème ils avancent des quantités insuffisantes au cours de l'année (4/7), des problèmes de voisinage (1/7), une dépendance à un ETA (1/7) et du matériel inadapté (1/7). Les utilisateurs réguliers de fumier (4) apportent en moyenne de 29 t /ha/an (mini-maxi : 8 à 80 t /ha/an). Les utilisateurs de lisier (28) apportent en moyenne 30 t /ha/an (mini-maxi : 9 à 80 t). La majorité réalisent les épandages après la coupe. Un seul éleveur indique

vendre son fumier de temps en temps (30 euros la tonne brute). L'apport en phosphore épandu sous la forme de lisier estimé varierait de 4,4 à 39 kg P/ha, avec une valeur moyenne de 13 kg P/ha, et 80 % des apports étant compris entre 9 et 17 kg P/ha (Tableau 16). L'apport de lisier est effectué majoritairement après chaque coupe. Au sujet de l'utilisation des engrais minéraux, seuls 21 éleveurs ont renseigné la partie quantitative. Les engrais minéraux les plus utilisés sont le **33 11 06** (42 %) et le **30 10 10** (35 %). Viennent ensuite, de façon plus marginale (4 %) le 14 08 20, le 15 12 24. Sur cet échantillon, 67 % (14/21) effectuent leur fertilisation minérale après la fauche, 10 % la font une coupe sur deux (2/21). Trois éleveurs (sur 21) annoncent fertiliser, respectivement, 1 fois par an, 2 fois par an (en hiver) et 4 fois par an. L'apport en P moyen apporté varierait de 0 à 48 kg P/ha, avec une valeur moyenne de 15 kg P/ha, et 80 % des apports étant compris entre 9 et 20 kg P/ha. Les estimations faites ici laissent supposer un apport en P plutôt faible. Ces estimations ne peuvent pas être considérées comme représentatives des pratiques compte-tenu des retours très généraux et partiels des agriculteurs interrogés.

Tableau 16 : Valeurs fertilisantes en phosphore des effluents d'élevages de la Réunion utilisés en élevages bovins (MVAD, 2020a, 2020b, 2020c)

Type d'effluent d'élevage	Nombre d'échantillons	Coef. équivalent engrais	Phosphore total (P_2O_5)
Fumier de bovin	112	1	1,1 (0,3 – 3,7)
Lisier de bovin	65	1	3,4 (0,9 – 9,6)
Lisier de porc	508	0,85	2,5 (0,1 – 19,3)

Deux ans plus tard, une enquête des pratiques fourragères a été réalisée chez 51 éleveurs allaitants de la Sicarévia, par le Cirad (Scherrer, 2017), en partenariat avec la Sicarévia, l'ARP, le Lycée agricole de Saint Joseph, et la Chambre d'Agriculture. Une partie de l'enquête était dédiée aux pratiques de fertilisation. Près de la moitié des élevages enquêtés utilisaient uniquement des engrais organiques (43 %), 27 % uniquement des engrais minéraux, et 25 % pratiquait une fertilisation mixte. Quatre pourcents des enquêté ne fertilisaient pas. Le P n'était apporté que sous la forme d'engrais composé. Les trois principaux engrais utilisés étant le 30.10.10 (30 %), 33.11.06 (23 %) et le 10.20.20 (7 %). Sont également utilisés divers engrais composés de 4 à 20 % de P. Les apports d'engrais varient de 150 à 600 kg/ha par apport, avec une moyenne de 300 kg/ha, et 80 % des apports situés entre 200 et 350 kg/ha par apport. La quantité estimée de P apportée par apport est en moyenne de 11 kg P/ha, et 80 % des apports situés entre 6 et 17 kg P/ha. Les parcelles de fauches étaient fertilisées entre 3 et 6 fois par an, dans 43 % des cas, entre 1 à 3 fois par an dans 27 % des cas, 11% étaient fertilisée plus de six fois, et 19 % n'étaient pas fertilisées. Cinquante-quatre pourcent des pâtures étaient fertilisées 1 à 3 fois dans l'année, 43 % 3 à 6 fois, et 5% plus de 6 fois. Les principaux engrais organiques utilisés étaient le fumier (27 %) et le lisier de bovin (27 %). Etaient également utilisée dans des proportions équivalentes (3 à 6 %) des fumiers de volaille et des lisiers (porc, lapin, poules). Les pratiques de fertilisation organique sont trop peu renseignées et détaillées pour être analysées. Concernant la gestion de l'acidité des sols, 76 % des enquêtés ne chaulaient pas leurs prairies, et seulement 20 % le faisait. Concernant le raisonnement de leur fertilisation, 65 % des interrogés disaient noter leurs intervention (agenda, cahier, cahier d'épandage, cahier des charges, carnet, ordinateur, téléphone), et 27 % ne notaient pas. A la question, comment est calculée la fertilisation, 31 % disent le faire par expérience, 29 % de manière visuelle, et 14 % d'après des critères de prix et de moyens financiers. Vingt pourcents n'ont pas répondu la question. Un seul éleveur disait s'appuyer sur l'analyse de sol. A la question, avez-vous réalisé une analyse de sol ces cinq dernières années, 71 % ont répondu non, 25 % oui. Une majorité d'éleveur n'est pas intéressée par des analyses de leurs engrais organiques (47 %), 24 % seraient intéressés. La moitié des personnes interrogées disait ne pas modifier la fertilisation en fonction de la saison, 37 % le faisait. Soixante-neuf % des éleveurs adaptaient la fertilisation à la taille de la parcelle, 20 % ne le faisaient pas, 12 % ne savaient pas ou n'ont pas répondus. A la question « la fertilisation est-elle différente selon le mode d'exploitation de la prairie ? », 51 % ont répondus que non, 26 % oui, 24 % n'ont pas répondu. Quand

on leur demandait ce qu'ils pensaient de leur fertilisation, 45 % la trouvait bonne, 31 % la trouvait correcte mais à améliorer, 10 % la trouvait adaptée à son système, 2 % la trouvais mauvaise. La grande majorité (88 %) des enquêtés estimait que la fertilisation était un aspect important de la conduite des cultures. Soixante-neuf pourcent disait que le prix de l'engrais impactait leur fertilisation, et 25 % non. Quand elles étaient chaulées, il n'y avait pas distinction de traitement entre pâture et fauche. Cela était fait principalement dans le cadre de l'implantation ou le re-semis d'une prairie, sous le conseil de l'ARP.

Aucune étude n'a été réalisée sur les producteurs de foin de la zone littorale, ainsi que les ateliers d'engraissement. Aussi, leurs pratiques de fertilisation ne sont pas connues.

En conclusion, il ressort de ces différentes études qu'une majorité des éleveurs ne raisonne pas leur fertilisation. Les interventions sont rarement notées, ou souvent de façon partielle, ce qui rend difficile leur exploitation. On ne sait pas comment sont définies les doses apportées. La quantité épandue ne varie pas forcément en fonction de l'engrais utilisé (et de sa concentration), et de la taille de la parcelle. Le choix de l'engrais est souvent dépendant ce qui est disponible en magasin (et le choix est limité), et du prix. Le prix de l'engrais est un facteur important. Enfin, la fertilisation est pensée pour l'N, et le P est d'autant moins raisonné. Entre les années 1990 et les années 2015-2017 on observe une réduction importante de la pratique de chaulage. Or, les sols de la Réunion sont acides, et c'est un facteur connu de blocage du P dans le sol. Les informations concernant l'apport d'effluents d'élevages sont assez partielles, et rendent difficiles leurs interprétations. Les travaux du Cirad et de l'UAFP ont montré qu'un suivi individuel, fréquent et pérenne permettait de corriger les pratiques. On observe également une dérive rapide de ces pratiques si le suivi individuel a été interrompu, comme cela a été le cas entre 2008 et 2015. Cela laisse supposer que les bases du raisonnement de la fertilisation ne sont pas acquises par les éleveurs. Il est cependant nécessaire de rappeler que la professionnalisation de l'élevage à la Réunion est récente, et qu'elle s'est construite en parallèle de l'acquisition de connaissances sur les systèmes fourragers (Lopez, 2021). Aussi, cela a généré des failles dans la formalisation du raisonnement de la fertilisation et son transfert vers l'encadrement technique et les éleveurs. Le transfert et le conseil souffre également d'un turn over important de l'encadrement technique à la Réunion.

3. ESTIMATION DES GAMMES D'EXPORTATIONS EN PHOSPHORE DES PRAIRIES REUNIONNAISES

L'état de l'art des connaissances concernant la gamme d'exportation de P par les prairies à La Réunion a montré une forte variabilité (de 10 à 130 kg P/ha/an) en fonction du mode de conduite des prairies, des espèces végétales cultivées et des conditions pédologiques et climatiques. La diversité des démarches empiriques ayant permis de déterminer cette gamme d'exportation ne permet cependant pas de la valider avec un niveau de certitude suffisant pour pouvoir l'utiliser pour anticiper l'exportation de P en fonction des pratiques de gestion des prairies et dans le cadre d'un raisonnement agronomique de la fertilisation en P. La grille théorique d'exportation proposée en 2020 par l'ARP pourrait sur le principe être utilisée à cette fin. Cependant, la gamme d'exportation à laquelle elle arrive (de 25 à 85 kg P/ha/an) est nettement inférieure à la gamme d'exportation estimée à partir des approches empiriques historiques. Il s'avère donc nécessaire de déterminer les gammes d'exportation annuelle en P des prairies réunionnaises, pour une typologie de prairies représentative des pratiques actuelles et à venir et afin de pouvoir l'utiliser dans le cadre d'un raisonnement agronomique de la fertilisation en P. Pour parvenir à cet objectif, les deux approches, empirique et théorique, ont été utilisées comparativement. L'exportation annuelle de P a été déterminée en multipliant le rendement et la teneur en P pour chaque saison, comme suit :

Exportations (kg P/ha/an) = **(**rendement saison pluies (t MS/ha) x teneur P saison pluies (kg P/t MS)**)** +
(rendement saison sèche (t MS/ha) x teneur P saison sèche (kg P/t MS)**)**

Le calcul se fait à l'échelle de la saison, et la somme des exportations saisonnières donne l'exportation annuelle.

3.1. Typologie de prairies utilisée

Une typologie de prairies réunionnaises, représentative des pratiques actuelles et à venir, a été définie, afin de permettre d'estimer une gamme d'exportation annuelle. Elle a été définie à « dire d'expert », en s'appuyant sur les études antérieures et les observations de terrain.

3.1.1. DEFINITION DES CAS TYPES

Douze cas type ont été définis selon trois zones géographiques et quatre niveaux d'intensification des prairies. Les cas type sont répartis en trois zones altitudinales, dont les conditions climatiques sont connues pour influer sur le niveau de production (Gilibert, 1981; G. (ed) Mandret et al., 2000; Thomas et al., 2004) et de teneurs en P du fourrage (Mandret, 1996) :

- Zone littorale (0 – 500 m)
- Zone de mi-pente (500 – 1000 m)
- Zone des Hauts (1000 – 2000 m)

Pour chaque zone altitudinale, on distingue quatre niveaux de productivité, associés à un itinéraire technique et un niveau de rendement (table 1) :

- *Maximum :* il représente le niveau de productivité le plus élevé permit par le climat, pour des pratiques qui optimise la production (fertilisation, rythmes d'exploitation, entretien des prairies…). Il correspond au rendement maximal moyen obtenus dans le cadre des essais menées

par l'IRAT et le CIRAD à la Réunion, pour chaque zone. Actuellement, il peut être atteint ponctuellement par quelques producteurs.

- *Optimisé :* il représente le niveau de productivité moyen permis par le climat, pour des pratiques qui optimise la production. Il correspond au rendement moyen obtenu dans le cadre des essais menés par l'IRAT et le CIRAD à la Réunion, pour chaque zone. Actuellement, il est atteint par une partie des producteurs. C'est le niveau de rendement visé, à moyen terme, par les filières, pour atteindre leurs objectifs d'autonomie fourragère et de croissance.
- *Semi-extensif :* il représente un niveau de production semi-extensif, où la productivité des prairies est partiellement optimisée (niveau de fertilisation, niveau de chargement et rythme d'exploitation), en lien avec les objectifs de productions et les contraintes organisationnelles et structurelles propres à chaque exploitation. Le rendement associé a été défini sur la base d'essais et d'enquêtes réalisées en exploitations. Actuellement, il est atteint par une grande partie des producteurs.
- *Extensif :* il représente un niveau de production extensif, où la productivité des prairies n'est pas optimisée, voire sous-valorisée (peu ou pas de fertilisation, chargement faible, rythmes d'exploitation longs, peu d'entretien des prairies) en lien avec les objectifs de productions et les contraintes organisationnelles et structurelles propres à chaque exploitation. Le rendement associé a été défini sur la base d'enquêtes réalisées en exploitations. Actuellement, ce niveau de production est atteint par la partie des éleveurs les moins productifs.

3.1.2. DEFINITION DES NIVEAUX DE RENDEMENTS ANNUELS ET SAISONNIERS

Pour chaque cas type, un rendement annuel moyen a été défini sur la base du niveau de production et d'exploitation (nombre de coupe). Ce rendement annuel de référence a été réparti sur la saison des pluies et la saison sèche en fonction de la zone géographique, à partir de résultats d'essais multisites et pluriannuels :

- Zone littorale : 55 % en saison des Pluies, et 45 % en saison sèche
- Zone mi-pente : 60 % en saison des Pluies, et 40 % en saison sèche
- Zone Hauts : 60 % en saison des Pluies, et 40 % en saison sèche

Les rendements saisonniers ainsi obtenus ont été divisés par le nombre de coupe saisonnier, défini en fonction de la zone et du niveau de productivité, afin d'obtenir un rendement moyen saisonnier de référence pour chaque cas type (Tableau 17).

Tableau 17 : Hypothèse de nombre d'exploitation, de rendements (t MS/ha), et de teneurs en azote (%) et phosphore (g / kg MS) pour les douze cas types

Zone d'étude	ITK	Nombre de coupes		Rendement (t MS/ha)		
		Sai. Pluies	Sai. Sèche	Annuel	Sai. Pluies	Sai. Sèche
Littoral (0-500 m)	Maximum	4	4	40	5,5	4,5
	Optimisé	4	4	30	4,1	3,4
	Semi-extensif	4	3	17	2,3	2,6
	Extensif	3	2	13	2,4	2,9
Mi-pente (500-1000 m)	Maximum	4	3	30	4,5	4,0
	Optimisé	4	3	25	3,8	3,3
	Semi-extensif	3	3	15	3,0	2,0
	Extensif	3	2	8	1,6	1,6
Hauts (1000-2000 m)	Maximum	4	2	25	3,8	5,0
	Optimisé	4	2	20	3,0	4,0
	Semi-extensif	3	2	12	2,4	2,4
	Extensif	3	1	7,5	1,5	3,0

On obtient une gamme de rendements variants de 7,5 à 40 t MS/ha/an qui est représentative de ce qui est observée et réalisable sur l'île.

3.2. Estimation de l'exportation à partir des teneurs en phosphore des prairies mesurées sur le terrain

La méthode, présentée ici, utilise une estimation de la teneur en P basée sur des mesures effectuées au laboratoire sur des échantillons de plantes de prairies échantillonnées sur le terrain.

3.3.1. TENEURS EN PHOSPHORE UTILISEES

Un jeu de données fourni par l'Association Réunionnaise de Pastoralisme (ARP) a été analysé ici. Il correspond à 1223 échantillons de fourrages verts prélevés sur des parcelles réunionnaises entre 1996 et 2020. Pour chaque échantillon, le jeu de données comporte notamment la teneur en P de la partie aérienne analysée par le laboratoire du Cirad de La Réunion, le type de prairie (tropicale, tempérée, mixte), l'altitude de la parcelle et la saison à laquelle l'échantillon a été prélevé (saison des pluies : de novembre à avril, saison sèche : de mai à octobre). Le stade et la biomasse au moment du prélèvement ne sont en revanche pas renseignés.

Les données ont été analysées avec le logiciel R. Une ANOVA a été réalisée afin de tester si la teneur en P variait significativement ($p \leq 0.05$) selon la saison, le type de prairie, la zone altitudinale et leurs interactions. Pour chaque zone altitudinale, la teneur en P moyenne ou médiane a été calculée par type de prairie et par saison. Dans le cas où la saison ou le type de prairie n'avait pas d'effet significatif, une seule moyenne ou médiane a été calculée pour l'ensemble des saisons ou des types de prairies. La moyenne et l'écart-type ont été calculés lorsque la distribution des données suivait une loi normale, et la médiane, le 1er quartile et le 3ème quartile ont été calculés dans le cas contraire.

La teneur en P varie significativement selon la zone altitudinale, le type de prairie et la saison (Tableau 18). La teneur en P est plus faible dans la zone littorale que dans la zone de mi-pente et dans les hauts. Dans les hauts, la teneur en P est plus faible en saison fraîche qu'en saison des pluies pour les trois types de prairies.

Tableau 18 : Teneurs en phosphore de la partie aérienne des prairies basées sur des analyses de laboratoire, selon la zone altitudinale, le type de prairie, et la saison. Dans le cas où la saison ou le type de prairie n'a pas d'effet significatif, un seul chiffre est donné. Les chiffres correspondent à la moyenne (± l'écart-type) lorsque la distribution des données suit une loi normale, ou à la médiane (1er quartile-3ème quartile) dans le cas contraire.

Zone altitudinale	Tropicales		Mixtes		Tempérées	
	Saison pluies	Saison sèche	Saison pluies	Saison sèche	Saison pluies	Saison sèche
Littoral (0-500 m)	2,47 (2,05 - 3,02)		-		-	
Mi-pente (500-1000 m)	3,06 ± 0,77	3,41 ± 0,77	3,06 ± 0,77	2,78 ± 0,67	3,06 ± 0,77	3,41 ± 0,77
Hauts (1000-2000 m)	3,04 (2,58 - 3,54)	2,55 ± 0,71	3,35 ± 0,74	2,83 ± 0,91	3,35 ± 0,74	2,85 (2,32 - 3,34)

3.3.2. EXPORTATIONS ESTIMEES

Dans chaque zone altitudinale et pour chaque type de prairie, les exportations en P augmentent logiquement de l'ITK extensif vers l'optimum, ce qui est dû à l'augmentation de rendement (Tableau 19). Les exportations varient également selon la zone, elles sont plus importantes dans la zone littorale (32 à 99 kg P/ha/an), que dans la zone de mi-pente (25 à 95 kg P/ha/an) et dans la zone des hauts (23 à 75 kg P/ha/an). Ces différences s'expliquent principalement par les différences de rendements entre ces trois zones (Tableau 17). En revanche, les exportations varient très peu selon le type de prairie (tropicales, mixtes ou tempérées), on peut ainsi considérer une unique gamme d'exportations par zone altitudinale et ITK, tous types de prairies confondus.

Tableau 19 : Exportations annuelles en phosphore des prairies déterminées à partir des teneurs en P basées sur les analyses de laboratoire selon la zone altitudinale, l'ITK et le type de prairie, ou tous types de prairie confondus. Les chiffres correspondent à la moyenne (± l'écart-type) lorsque la distribution des données des teneurs en P suit une loi normale, ou à la médiane (1er quartile-3ème quartile) dans le cas contraire.

Zone altitudinale	ITK	Exportations (kgP/ha/an)				
		Tropicales	Mixtes	Tempérées	Tous types confondus	
Littoral (0-500 m)	Maximum	99	-	-	99	(82 - 121)
	Optimisé	74	-	-	74	(62 - 91)
	Semi-extensif	42	-	-	42	(35 - 51)
	Extensif	32	-	-	32	(27 - 39)
Mi-pente (500-1000 m)	Maximum	94	93	97	95	± 23
	Optimisé	78	78	81	79	± 19
	Semi-extensif	47	47	49	47	± 12
	Extensif	25	25	26	25	± 6
Hauts (1000-2000 m)	Maximum	71	79	77	75	± 20
	Optimisé	57	63	61	60	± 16
	Semi-extensif	34	38	37	36	± 10
	Extensif	21	24	23	23	± 6

On obtient une gamme d'exportation variant de 21 à 99 kg P/ha/an. Cette gamme de valeurs présente des valeurs hautes plus faibles que celles observées dans le cadre d'essais (131 kg P/ha/an).

3.3. Estimation de l'exportation à partir des équations de dilution en azote et phosphore

3.2.1. TENEURS EN PHOSPHORE UTILISEES

Sur la base d'hypothèses de rendements moyens saisonniers définis pour chaque cas type, une teneur en N (%) et P du fourrage (g/kg MS) a été défini en appliquant les équations de dilution de l'N et du P utilisées à la Réunion (Blanfort, 1998; Grimaud et al., 2007). Pour le taux d'N, deux équations sont utilisées, respectivement pour les prairies de type tempéré, en C3 (Équation 1)et tropical, en C4 (Équation 2). Pour les zones littoral et mi-pente, c'est l'équation tropicale (C4) qui est appliquée, secteurs où ces espèces dominent. Pour la zone des Hauts, c'est l'équation tempérée (C3) qui est appliquée, car elles y sont considérées comme majoritaires. Les valeurs obtenues sont utilisées pour calculer les teneurs en P, en utilisant l'équation de dilution du P (Équation 3). On obtient des teneurs en P qui varient de 2,81 à 4,24 g/kg MS (Tableau 20).

Tableau 20 : Teneurs en azote (%) et phosphore (g / kg MS) pour les douze cas types

Zone d'étude	ITK	Teneur N (% MS)		Teneur P (g/kg MS)	
		Sai. Pluies	Sai. Sèche	Sai. Pluies	Sai. Sèche
Littoral (0-500 m)	Maximum	2,02	2,16	2,81	2,90
	Optimisé	2,22	2,38	2,95	3,05
	Semi-extensif	2,70	2,62	3,25	3,20
	Extensif	2,68	2,50	3,24	3,12
Mi-pente (500-1000 m)	Maximum	2,16	2,25	2,90	2,96
	Optimisé	2,30	2,39	2,99	3,05
	Semi-extensif	2,48	2,84	3,11	3,35
	Extensif	3,07	3,07	3,49	3,49
Hauts (1000-2000 m)	Maximum	3,14	2,87	3,54	3,36
	Optimisé	3,38	3,08	3,70	3,50
	Semi-extensif	3,63	3,63	3,86	3,86
	Extensif	4,22	3,38	4,24	3,70

Ce sont des teneurs qui correspondent aux gammes qui ont été observées aux cours des études réalisées par le passé(0,8 à 6,2 g/kg MS). Dans le cas de notre approche, on n'observe pas de teneurs en dessous de 2,5 g/kg MS. Cela s'explique par le fait que la méthode utilisée ici permet de calculer une teneur potentielle théorique atteinte en conditions non-limitantes de nutrition en P. Or, les travaux menés par le Cirad, entre 1992 et 1997 ont mis en avant une sous-nutrition des prairies en P, et donc, des teneurs en dessous des valeurs potentielles.

3.2.2. EXPORTATIONS ESTIMEES

Afin de pouvoir calculer des exportations qui prenne en compte la variabilité des situations de niveaux de nutritions en P des prairies, il a été utilisé les données issues des campagnes de mesures des indices de nutrition antérieures, pour caractériser la gamme de variation du niveau de nutrition en P des prairies à la Réunion (Figure 17).

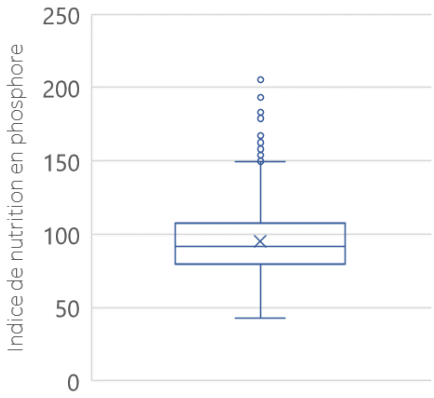

Figure 17 : Boxplot ses campagnes de mesure des indices de nutrition en phosphore (%), menés par l'UAFP, puis l'ARP, entre 1996 et 2021.

Au total, ce sont 1599 indices de nutritions phosphatées (iP) qui ont été réalisés entre 1996 et 2021 (UAFP = 1262 iP ; ARP = 337 iP). Les indices iP varient de 43 à 207, pour une moyenne globale de 95. Les 1er et 3^{e} quartile du jeu de données globales (respectivement 79 et 107) ont été utilisés pour estimer les valeurs bases et hautes d'exportation, en les arrondissant respectivement à 80 et 110. Aussi, la valeur moyenne d'exportation, pour chaque situation, correspond à indice de nutrition de 100. La valeur basse d'exportation correspond à 80 % de l'exportation moyenne. La valeur haute correspond à 110 % de la valeur moyenne d'exportation.

Tableau 21 : Estimation des exportations en phosphore de 12 types de prairies (kg P/ha/an), pour trois hypothèses de niveau de nutrition (indice de nutrition iP)

Zone d'étude	ITK	Exportation P (kg P/ha/an)		
		iP = 80	*iP = 100*	*iP = 110*
Littoral (0-500 m)	Maximum	91	**114**	126
	Optimisé	72	**90**	99
	Semi-extensif	44	**55**	60
	Extensif	33	**41**	46
Mi-pente (500-1000 m)	Maximum	70	**88**	97
	Optimisé	60	**75**	83
	Semi-extensif	38	**48**	53
	Extensif	22	**28**	31
Hauts (1000-2000 m)	Maximum	69	**87**	95
	Optimisé	58	**72**	80
	Semi-extensif	37	**46**	51
	Extensif	24	**30**	33

Les exportations estimées (Tableau 21) varient de 22 à 126 kg P/ha/an. On obtient ainsi une gamme plus large que celle estimée par l'ARP en 2020 (25 à 85 kg/ha/an), et celle obtenue à partir d'analyses de fourrages (21 à 99 kg P/ha/an), notamment pour les valeurs hautes. Elle est plus proche de la gamme obtenue par agrégation des études empiriques menées entre 1970 et 2020 (10 à 131 kg P/ha/an).

3.4. Gamme d'exportation retenue

Les deux approches testées ici obtiennent des gammes proches, qui correspondent à celles obtenues par le passé dans le cadre d'essais. Il a été fait le choix de retenir la grille déterminée avec l'approche « courbe de dilution ». Cette approche obtient la gamme la plus proche de celle obtenue par agrégation des études empiriques menées entre 1970 et 1991. L'utilisation des équations de dilutions, et d'hypothèses de niveaux de nutritions dans les calculs, permet d'obtenir une gamme assez large de situations observables sur le terrain, ce que ne permet pas l'approche par les analyses de fourrages. En effet, les analyses de laboratoires, bien que nombreuses, ne permettent pas de couvrir toutes les situations possibles, faute d'informations suffisantes sur les échantillons pour les caractériser. Enfin, cette gamme donne la gamme la plus large, et elle répond ainsi à un des objectifs de l'étude : avoir une évaluation du champ des niveaux d'exportations en P possibles.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude présentée dans ce rapport visait à déterminer les gammes d'exportations annuelles en phosphore (P) des prairies réunionnaises, en s'appuyant sur un travail de synthèse bibliographique, et l'estimation des exportations par deux méthodes de calcul basées sur un typologie de prairies représentatives des pratiques.

Le poste sol-plante du cycle du P, a été peu étudiés sur prairies à la Réunion. Les études successives réalisées par les différents organismes de R&D visaient à acquérir les premières références, dans un cadre de structuration et professionnalisation de l'élevage bovin. La teneur en P des fourrages est le poste du cycle du P qui a été le plus documenté. La recherche et le développement ont principalement cherché à caractériser les teneurs en P pour les principales espèces fourragères et types de couverts rencontrés à la Réunion, dans une optique de complémentation des animaux. Quelques études ponctuelles ont cherché à comprendre les facteurs de variation. Les études successives menées sur la teneur en P du fourrage de la Réunion ont montré que celle-ci variait de 0,8 à 6,2 g/kg MS, avec des teneurs majoritairement comprises entre 2 et 3,5 g/kg MS. La teneur va varier en fonction de l'espèce. Elle évolue avec le stade. Trois profils minéraux se distinguent, suivant un gradient altitudinal et le type de couvert. Le fourrage tend à être plus riche en saison des pluies. L'exportation en P, a été peu étudiée. C'est un indicateur secondaire mesuré dans le cadre d'essais portant sur d'autres questions, et les facteurs de variation n'ont pas été étudiés. Ces essais ont observé des exportations variant de 10 à 130 kg P/ha/an. Les valeurs d'exportation en P communiquées ont varié selon les périodes, de 26 à 80 kg P/ha/an. Elles sont cohérentes avec les résultats obtenus dans le cadre d'essais. Cependant, il apparait qu'il y a confusion entre exports, besoins et apports dans les documents diffusés. Ces termes ne sont pas toujours expliqués. Les fiches techniques du CIRAD et de l'ARP parlent d'apports et de besoins pour des valeurs qui correspondent en réalité à des exportations de la culture. Celles-ci ne prennent pas en compte une éventuelle perte ou rétention au niveau du sol. A l'inverse, les préconisations de la Chambre d'Agriculture incluent une rétention au niveau du sol, mais elle ne précise pas qu'un coefficient a été appliqué aux exportations pour définir les besoins. Ces désignations non explicites sont certainement à l'origine des interrogations qu'ont suscités les valeurs communiquées par l'ARP en 2020. Le niveau de nutrition des prairies en P est le volet qui a été le plus étudié, à travers l'indices de nutrition. Les premiers suivis, ont mis en avant un déficit en P dans une majorité des prairies suivies. Un déficit en P était confirmé dans 70 % des parcelles. Les analyses de sols réalisées en parallèle concordaient avec ces résultats : 65 % des sols avaient une teneur faible en P. Les suivis d'exploitations ont mis en avant des pratiques de fertilisation inadaptées aux conditions pédo-climatiques. Les formules d'engrais utilisés à l'époque renforçaient la forte indisponibilité du P due à la nature particulière des andosols. Il a été obtenu des résultats différents d'une région à l'autre, mais plus encore d'une exploitation à l'autre, montrant l'effet déterminant des pratiques des éleveurs sur l'état et l'évolution des prairies. Des conseils ont été fournis aux éleveurs afin qu'ils emploient des formules plus équilibrées, et plus riches en P, afin d'assurer l'entretien du sol, une production fourragère suffisante, mais non excédentaire. Les éleveurs qui ont suivi ces préconisations ont obtenu des niveaux de nutrition en P plus élevés tout en contrôlant les niveaux de nutrition en N et K. Les indices mesurés par la suite étaient dans 31 % des cas en déficit, et 52 % avaient un indice correct. Les indices mesurés depuis étaient dans 12 % des cas en déficit, 60 % avaient un indice correct. Il a donc été observé une amélioration du statut phosphaté des prairies au cours des années.

Les deux approches qui ont été testées et présentées dans ce rapport aboutissent à des gammes d'exportations en P similaires à celles observées dans le cadre d'essais. Les exportations estimées par l'approche « des analyses de laboratoire » varient de 21 à 99 kg P/ha/an. Les exportations estimées par l'approche « des équations de dilution » varient de 22 à 126 kg P/ha/an. C'est cette approche qui obtient

la gamme la plus proche de celle obtenue via des essais. Celle-ci semble plus pertinente à utiliser. Elle prend en compte l'effet du niveau de rendement sur la teneur en P du fourrage. Elle permet de couvrir l'ensemble des types de prairies rencontrée, et également de faire des hypothèses sur le niveau de nutrition des prairies, en lien avec la gestion. Les données issues d'analyses de laboratoire ne le permettent pas, car les conditions de récolte (stade, type de valorisation …) ne sont pas documentées.

La grille retenue (Tableau 21) pourrait être retravaillée, en fonction des objectifs recherchés. Dans la continuité de cette étude, la gamme d'exportation pourrait être affinée en précisant les hypothèses basses et hautes de niveau de nutrition des prairies. Elles pourraient être ajustées en fonction du niveau de productivité du type de prairies. En effet, on peut s'attendre à ce que des prairies extensives, peu chaulées et fertilisées, aient des niveaux de nutrition bas, inférieur à 80 % comparé au niveau de nutrition optimal de la prairie. Pour cela, il pourrait être envisager de regrouper les différentes campagnes d'indices de nutritions, et regarder si les gammes d'indices de nutrition varient en fonction du type de prairie, du secteur ou du niveau d'intensification. Si ces informations sont disponibles.

La grille développée dans le cadre de cette étude ne peut pas être utilisée telle quel pour du conseil. Elle n'a pas été conçu pour cela, et n'est pas adaptée. Il faudrait redéfinir les typologies de prairies, et les hypothèses de gestion et de rendement associées. C'est un travail qui doit se faire en concertation avec les organismes de conseil, en fonction des objectifs et finalités d'utilisation de la grille. Dans le cadre de ce travail, nous avons parlé en termes de P exporté par hectare et par an (kg P/ha/an) pour des gammes de rendements. Dans le cadre d'un conseil c'est le P exporté par tonne de matière sèche produite (kg P/t MS) qui pourrait être plus approprié, car il permet de s'adapter aux objectifs spécifiques de production des exploitations, et de prendre en compte l'hétérogénéité des prairies au sein de celles-ci (potentialités de rendement, gestion différentiée fauche/pâture …).

Ces valeurs d'exportation ne suffisent pas à elles seules à faire un conseil en fertilisation. Elles sont la première étape. Les valeurs d'exportations vont permettre de définir ce qui va potentiellement être exporté par la culture au cours de l'année, et qu'il faudra en général compenser pour ne pas diminuer la disponibilité de P dans le sol. La dose de P qui doit être apportée va cependant dépendre également de la disponibilité initiale de P dans le sol. Cette disponibilité peut être évaluée par la réalisation d'une analyse de sol. Le comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée (Comifer) propose en métropole d'appliquer un coefficient multiplicateur aux exportations (Denoroy et al., 2019). En cas de disponibilité faible de P dans le sol le coefficient multiplicateur est supérieur à 1, alors qu'il est inférieur à 1 lorsque la disponibilité de P dans le sol est jugée supérieure au minimum souhaitable (Figure 18). Le même type de démarche pourrait être développé pour la fertilisation en P des prairies réunionnaises.

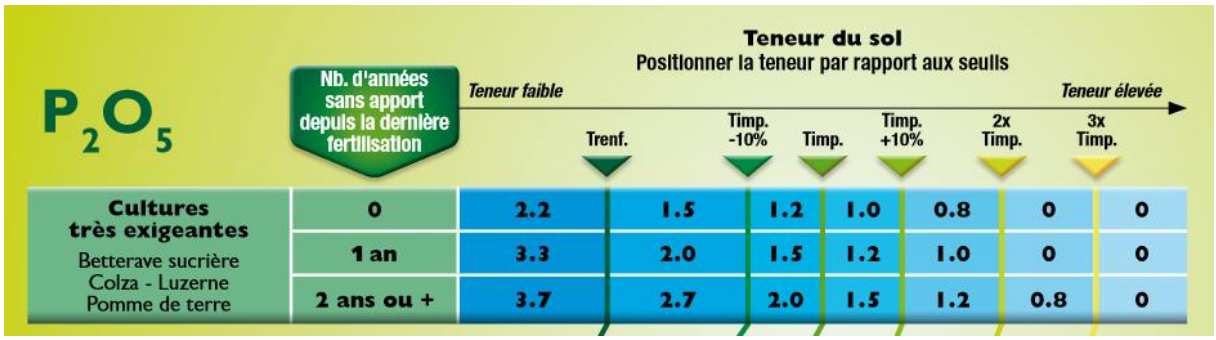

Figure 18 : Grille de coefficients multiplicatifs des exportations, appliquée à la récolte principale pour le calcul des doses de phosphore (P_2O_5) à apporter.

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

Audru, J., 1985. Identification de thèmes de recherche-développement pour l'établissement d'un programme d'activités en agropastoralisme.

Bigot, A., 1991. Cinétique de la productivité et de la valeur alimentaire du Kikuyu en fonction de la saison dans les Hauts de Montvert (ferme SEDAEL de Montvert - 1989). Ile de la Réunion (monograph). Maisons-Alfort : CIRAD-IEMVT, Ile de la Réunion.

Bigot, A., Fontaine, O., 1991. Prairies pour les hauts de l'ouest (Synthèses et études spécifiques). CIRAD - Pôle élevage Réunion, Saint Pierre - La Réunion.

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.

Blanfort, V., 1994. Les pâturages d'altitude à la Réunion : étude des écosystèmes herbagers en relation avec les pratiques d'exploitation pour une gestion durable des ssytèmes fourragers (Document de synthèse intermédiaire de thèse). CIRAD - Pôle élevage Réunion, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., 1993. Les pâturages d'altitude à la Réunion : étude des écosystèmes herbagers en relation avec les pratiques d'exploitation pour une gestion durable des ssytèmes fourragers (Document de synthèse intermédiaire de thèse). CIRAD - Pôle élevage Réunion, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Balent, G., Thomas, P., Fontaine, O., 1995. Diagnostic agro-écologique des pâturages d'altitude en relation avec les pratiques des éleveurs, in: Les méthodes participatives de recherche et de développement dans l'Océan Indien. CIRAD, La Réunion, p. 7.

Blanfort, V., Thomas, P., 1997. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement - synthèse 1997. CIRAD, UAFP, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1996a. Projet gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : compte rendu intermédiaire. CIRAD - EMVT ; Union des Associations Foncières Pastorales, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1996b. Projet gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : compte rendu technique 1996. CIRAD - EMVT ; Union des Associations Foncières Pastorales, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1996c. Gestion raisonnée des prairies en integration avec l'environnement : protocole d'intervention (Document de travail interne).

Blanfort, V., Thomas, P., 1996d. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : bilan de deux années de suivi en exploitation. CIRAD - EMVT ; Union des Associations Foncières Pastorales, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1995a. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : rapport annuel synthétique 2015 (Rapport annuel No. 1). CIRAD - EMVT, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1995b. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : modalités d'intervention et situation au 15/09/95. CIRAD - EMVT, Saint Pierre - La Réunion.

Blanfort, V., Thomas, P., 1995c. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement : rapport annuel 2015 (Rapport annuel No. 2). CIRAD - EMVT ; Union des Associations Foncières Pastorales, Saint Pierre - La Réunion.

Brunschwig, P., 1991. Le Kikuyu.

Castillon, P., Denoroy, P., Duval, R., Eveillard, P., Le Souder, C., Villette, C., 2007. Teneurs en P, K et Mg des organies végétaux récoltés pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages.

Chabalier, P.-F., 1987. Les sols (Note de synthèse). CIRAD, Saint-Denis, La Réunion.

Chabalier, 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.

CIRAD, E., 1998. Rapport annuel 1997 Cirad Réunion Filière élevage. CIRAD - EMVT, Saint Pierre - La Réunion.

CIRAD, EDE, Sicalait, SIER, 1988a. Elevage mieux - Finche n°1 : Fertilisation des prairies.

CIRAD, EDE, Sicalait, SIER, 1988b. Elevages mieux - Fiche n°2 : Plan de fumur des prairies - niveau de production intensif.

CIRAD, EDE, Sicalait, SIER, 1988c. Elevages mieux - Fiche n°3 : Plan de fumur des prairies - niveau de production semi-intensif.

CIRAD, EDE, Sicalait, SIER, 1988d. Elevages mieux - Fiche n°4 : Fumures de correction des prairies (Ca, P, K).

CIRAD ELEVAGE, 1994. Gestion raisonnée des prairies en integration avec l'environnement : projet d'appui au développement 1995-1996.

CIRAD, R., 1986. Etude des sols : résultats d'anayses 1986.

Dadant, R., 1974. IRAT. Douze ans de recherches agronomiques à la Réunion. L'Agronomie Tropicale, Etudes Techniques 29, 1159–1192.

Denoroy, P., Jordan-Meille, L., Sagot, S., 2019. La fertilisation P-K-MG : les bases du raisonnement, édition 2019. ed. Comifer.

Duru, M., Ducrocq, H., 1996. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. Nutr Cycl Agroecosyst 47, 59–69. https://doi.org/10.1007/BF01985719

Fardeau, J., 1993. Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. Agronomie 13, 317–331.

Farruggia, A., Lebrun, J.M., Besnard, A., Violleau, S., Thélier-Huché, L., 2000. L'analyse d'herbe pour piloter la fertilisation phosphatée et potassique des prairies. Exemples d'application de la méthode. Fourrages 447–459.

Fritz, J., 1973. Influence de la hauteur de coupe sur la production de Chloris gayana, in: Rapport IRAT 1973. La Réunion, pp. 119–123.

Fritz, J., 1972a. Teneurs en éléments minéraux de quelques fourrages de la Réunion. IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

Fritz, J., 1972b. Essai de fertilisation phosphatée de Chloris Gayana - Colimaçon 1968-1972 (Fiches d'essais IRAT No. 75). IRAT, La Réunion.

Fritz, J., 1972c. Recherche de carences minérales des sols de la Réunion en vase de végétation. IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

Fritz, J., 1971a. Recherches sur les productions fourragères effectuées par l'IRAT - Réunion 1963-1970. L'Agronomie Tropicale 26, 1248–1269.

Fritz, J., 1971b. Exportations d'éléments fertilisants. IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

Fritz, J., 1967. Essai de fertilisation azotée de chloris gayana aux colimaçons, in: Rapport annuel IRAT 1967. La Réunion, pp. 93–106.

Fritz, J., Hubert de Fraise, C., 1973. Comparaison d'espèces et de variétés de légumineuses fourragères - La Bretagne 1972-73 (No. Fiche d'essai n°6). IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

Gilibert, J., 1981. Productions fourragères en plein champ à la Réunion : quantités - qualités.

Grimaud, P., Thomas, P., Blanfort, V., Lecomte, P., 2007. Herbage mineral nutrition indexed as tools for rapid mineral status diagnosis in tropical pastures. African Crop Science Journal 15, 101–109.

Hassoun, P., Latchimy, J.-Y., 2001. Caractéristiques et valorisation des rations dans les troupeaux bovins laitiers à la réunion. RATION VL. Un programme pour le rationnement en exploitations laitières bovines (monograph). CIRAD - Pôle élevage Réunion, Saint Pierre - La Réunion.

IRAT, 1978a. Comment cultiver le chloris à la Réunion? (Fiche IRAT Réunion No. n°20). IRAT, La Réunion.

IRAT, 1978b. Le sol et la culture (No. Fiche N°55). IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

IRAT, 1978c. Comment augmenter la production des pâturages naturels des Hauts.

IRAT, 1967. Fumur de redressement et fumur d'entretien. IRAT Réunion, Saint-Denis, La Réunion.

Jouany, C., Cruz, P., Daufresne, T., Duru, M., 2011. Biological Phosphorus Cycling in Grasslands: Interactions with Nitrogen, in: Bünemann, E., Oberson, A., Frossard, E. (Eds.), Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 275–294. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_11

Jouany, C., Morel, C., Ziadi, N., Bélanger, G., Sinaj, S., Stroia, C., Cruz, P., Theau, J.-P., Duru, M., 2021. Plant and soil tests to optimize phosphorus fertilization management of grasslands. European Journal of Agronomy 125, 126249. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126249

Leleux, M., 2016. Etude prospective sur la ressource fourragère (Rapport d'expertise No. 3). BRL ingénierie, La Réunion.

Lopez, N., 2021. Analyse ex-post de la trajectoire d'accompagnement par la recherche, du développement de l'élevage bovin à la Réunion (rapport de stage de fin d'études). ISTOM, CIRAD, Saint Pierre - La Réunion.

Lorre, F., 2019. Evaluation du disponible fourrager à l'échelle de l'île de la Réunion et leviers pour une meilleure valorisation des surfaces fourragères. (Mémoire de fin d'étude). ESA, CIRAD, INRAE, Saint Pierre - La Réunion.

Loynet, G., 1976. Résultats d'analyses de l'essai qualité-production sur chloris gayana à Mon Caprice (Fiches IRAT Réunion No. N°29). IRAT, La Réunion.

Loynet, G., 1972. Réponse à des doses croissantes de phosphore sur chloris gayana à la station du bras de la plaine (Fiches d'essais IRAT No. 41). IRAT, Saint Pierre - La Réunion.

Lurette, A., Miralles-Bruneau, M., Lorre, F., Magnier, J., Degenne, P., Kleinpeter, V., Vigne, M., Vayssière, J., 2022. Modélisation spatialisée des besoins, de la production, et des flux de fourrages en vue de la création d'une filière « Fourrages » sur l'île de La Réunion. Fourrages 45–56.

Mandret, G., 1996. Carences minérales des prairies sur andosol à la Réunion. Fourrages 141–148.

Mandret, G., Blanfort, V., Paillat, J.-M., Barbet-Massin, V., Fontaine, O., Riviere, E., 2000. 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. (ed), Hassoun, P. (ed), Paillat, J.-M. (ed), Tillard, E. (ed), 2000. L'élevage bovin à la Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. CIRAD.

Miralles-Bruneau, M., 2022. Analyse de la méthodologie de calcul des exports de phosphore des prairies développée par l'ARP (monograph). CIRAD ES UMR SELMET, Saint Pierre - La Réunion.

Miralles-Bruneau, M., 2019. Le diagnostic de nutrition P K des prairies.

Miralles-Bruneau, M., Boyer, A., Pellier, Y., Legendre, E., Saint-Omer, C., 2020a. Essai fertilisation des prairies : bilan de la campagne 2018-2019 (rappoort d'essai). ARP.

Miralles-Bruneau, M., Dutreuil, F., Legendre, E., 2020b. Besoins en phosphore et potassium des prairies.

Miralles-Bruneau, M., Pellier, Y., 2019. Teneurs en minéraux et oligo des fourrages réunionnais.

Miralles-Bruneau, M., Pellier, Y., Pierre, P., Tillard, E., Averna, J., Delaby, luc, 2022a. Le premier observatoire de la croissance de l'herbe en Outre-Mer : présentation du dispositif de la Réunion et des premiers résultats. Fourrages 39–44.

Miralles-Bruneau, M., Pierre, P., 2020. Raisonner la fertilisation des prairies.

Miralles-Bruneau, M., Pierre, P., Boyer, A., Riviere, E., Delaby, luc, Tillard, E., 2022b. 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 69–76.

Miralles-Bruneau, M., Pierre, P., Legendre, E., Dutreuil, F., 2020c. Les besoins en azote des prairies.

MVAD, 2020a. Fiche matières organiques : lisier de porc.

MVAD, 2020b. Fiche matières organiques : lisier de bovin.

MVAD, 2020c. Fiche matières organiques : fumier de bovin.

Peyraud, J.-L., Graux, A.I., Delaby, L., Casellas, E., Faverdin, P., Le Bas, C., Meillet, A., Poméon, T., Raynal, H., Resmond, R., Ripoche, D., Ruget, F., Theron, O., Vertes, F., 2017. Les prairies françaises : production, exportation d'azote et risques de lessivage. INRAE, France.

Pierre, P., 2019. Compte Rendu de la mission Fertilisation (Rapport d'expertise). IDELE; ARP, Le Tampon, La Réunion.

Pouzet, D., Chabalier, P., Legier, P., 1998. Fertilité des sols et conseil en fertilisation, Système expert d'inerprétation des analyses chimiques des sols réunionnais.amendement et conseil en fertilisation pour la canne à sucre, les graminées fourragères, l'ananas et le bananier (monograph No. 1–98). CIRAD-CA, Montpellier.

Pouzet, D., Chabalier, P., Legier, P., 1997. Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionnaises. Agriculture et Développement.

Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'Ile de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD.

Raunet, M., 1990. Les grandes catégories de sols de l'île de la Réunion : notice de la carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000.

Salette, J., Huché, 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse du végétal : principes, mise en oeuvre, exemples. Fourrages.

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.

Thélier-Huché, L., Farruggia, A., Castillon, P., 1999. L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires.

Thomas, P., 1997a. Gestion raisonnée des prairies : Fiche d'information sur la fertilisation.

Thomas, P., 1997b. Fertilisation et maîtrise de la production d'herbe.

Thomas, P., Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A., 2004. Guide technique pour la création et la valorisation des prairies à la Réunion.

Thomas, P., Blanfort, V., Michon, A., Grimaud, P., 2001. Le suivi de gestion raisonnée des prairies à la Réunion. Presented at the Annual Meeting of Agricultural Scientists, AMAS, Le Réduit, Ile Maurice, p. 11.

Truong Binh, Bertrand, R., Burdin, S., Pichot, J.-P., 1974. Contribution à l'étude du phosphore dans les sols dérivés de roches volcaniques de l'île de la Réunion (Mascareignes). Actions du carbonate et du silicate de calcium. L'Agronomie Tropicale. Série 3, Agronomie Générale. Etudes Scientifiques.

Van de Kerchove, V., Leung, J., Quinquenel, S., 2018. Ferti-run - Manuel de l'utilisateur.

Département ES/ UMR SELMET / Direction régionale Réunion-Mayotte

Station de Ligne-Paradis - 7 chemin de l'IRAT - 97410 Saint-Pierre, La Réunion

Tél. : +262 2 62 49 27 00

www.cirad.fr