L'installation et la fertilisation des parcelles fourragères

Gilles Mandret, Vincent Blanfort,
Jean-Marie Paillat, Vladimir Barbet-Massin,
Olivia Fontaine, Expédit Rivière

Les conditions particulières des Hauts — fortes pentes et sols fragiles — requièrent des recherches spécifiques sur l'utilisation de matériels agricoles adaptés et sur les itinéraires techniques raisonnés. La recherche d'un matériel adapté aux fortes pente pour la mécanisation des exploitations a débouché sur le choix du Mouflon, qui a reçu l'agrément de la Région. Les essais, qui portaient sur le travail du sol et le semis, ont mis en évidence l'intérêt du semis direct, mais aussi du matériel utilisé pour la création des prairies. Des expérimentations sur la régénération des prairies semées et la lutte contre les adventices ont débouché sur des solutions efficaces mais qui ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre. En ce qui concerne la gestion des prairies, des carences minérales ont été identifiées sur les fourrages utilisés à la Réunion. L'étude de l'activité biologique du sol a révélé que celle-ci variait en fonction de l'altitude et de la fertilisation. Des périodes de minéralisation de la matière organique ont été mises en évidence et l'efficience d'absorption de l'azote par les plantes s'est révélée assez faible. Enfin, une méthode de diagnostic de la fertilité fondé sur la nutrition minérale de la plante a été mise au point.

L'implantation des prairies

Le travail du sol

Après le défrichement mécanique, un travail du sol s'impose afin de créer un lit de semences propice à la levée des graines fourragères (Dalleine, 1980) et afin

d'aplanir suffisamment la parcelle pour une exploitation adéquate de l'herbe. Face aux difficultés rencontrées dans les Hauts de la Réunion (pente, pierres, type de sol), la simplification du travail du sol a été envisagée. En 1986, plusieurs itinéraires techniques de préparation des sols pour le semis de graminées tempérées ont été testés dans les Hauts de l'Ouest (PAILLAT, 1986a). Deux matériels travaillant superficiellement le sol — un cultivateur léger de type *tiller* et l'Actisol — ont été comparés à des techniques de préparation plus profonde (cultivateur lourd, labour, Paraplow). Les mesures d'enracinement ont été réalisées après 10 mois sur des profils verticaux avec une grille de notation (cadre de 1,10 × 0,45 mètre, maille de 5 × 5 centimètres, note de 0 à 4). Peu de différences sont alors apparues si ce n'est un meilleur enracinement pour le labour dans la zone 0-20 centimètres et, pour les outils de travail profond, dans la zone 20-40 centimètres. Ces résultats ont motivé une étude plus poussée de l'utilité du travail du sol pour améliorer l'enracinement des prairies, l'objectif étant qu'elles résistent alors mieux à la sécheresse. Cependant, un problème spécifique de métrologie des systèmes racinaires s'est posé : la séparation des racines de l'andosol par flottaison, qui permet d'apprécier quantitativement les racines présentes dans les différents horizons de sol, n'est pas possible en raison de la présence de débris végétaux. Seules les techniques de notation visuelle peuvent être utilisées dans ce cas (PERRET et PAILLAT, 1987 ; 1988) : grille de 45 × 45 centimètres avec une maille 5 × 5 centimètres présentée sur profil vertical, carotte prélevée avec un tube à glissière (60 millimètres) pour la notation racinaire (nombre de racine par section verticale de carotte), notation de présence ou d'absence sur section horizontale de cylindres prélevés à différents horizons (pas de 5 centimètres).

Des essais portant sur la comparaison entre un travail profond, entre 13 à 17 centimètres, et un travail superficiel, entre 5 à 9 centimètres, ont été mis en place sur plusieurs espèces prairiales : ray-grass anglais, dactyle, phalaris, fétuque. Les mesures ont été effectuées à différents points de chacune des parcelles. Il ressort de ces essais (figure 9) que les différentes méthodes de mesures des systèmes racinaires sont concordantes. Aucune différence de rendement n'est apparue si ce n'est en première coupe sur du dactyle en faveur du travail superficiel (essai de 1988). De plus, l'enracinement semble plus dense dans l'horizon 0-15 centimètres avec un travail profond en raison du foisonnement de la terre, mais les racines pénètrent plus profondément (horizon 20-40 centimètres) avec un travail superficiel.

Il paraît donc peu utile de travailler l'andosol en profondeur dans l'horizon B pour faire pénétrer les racines (PERRET et PAILLAT, 1988). Le développement racinaire est lié aux conditions hydriques, le travail profond a donc tendance à dessécher le sol. Le travail du sol est cependant nécessaire pour détruire le précédent cultural, affiner le profil cultural et établir le lit de semences. Ce travail devra donc être réalisé à faible profondeur, 10 à 15 centimètres au maximum, avec un pulvériseur à disques lourds et deux passages croisés, en conditions pierreuses, ou avec l'Actisol et un seul passage, en sol profond.

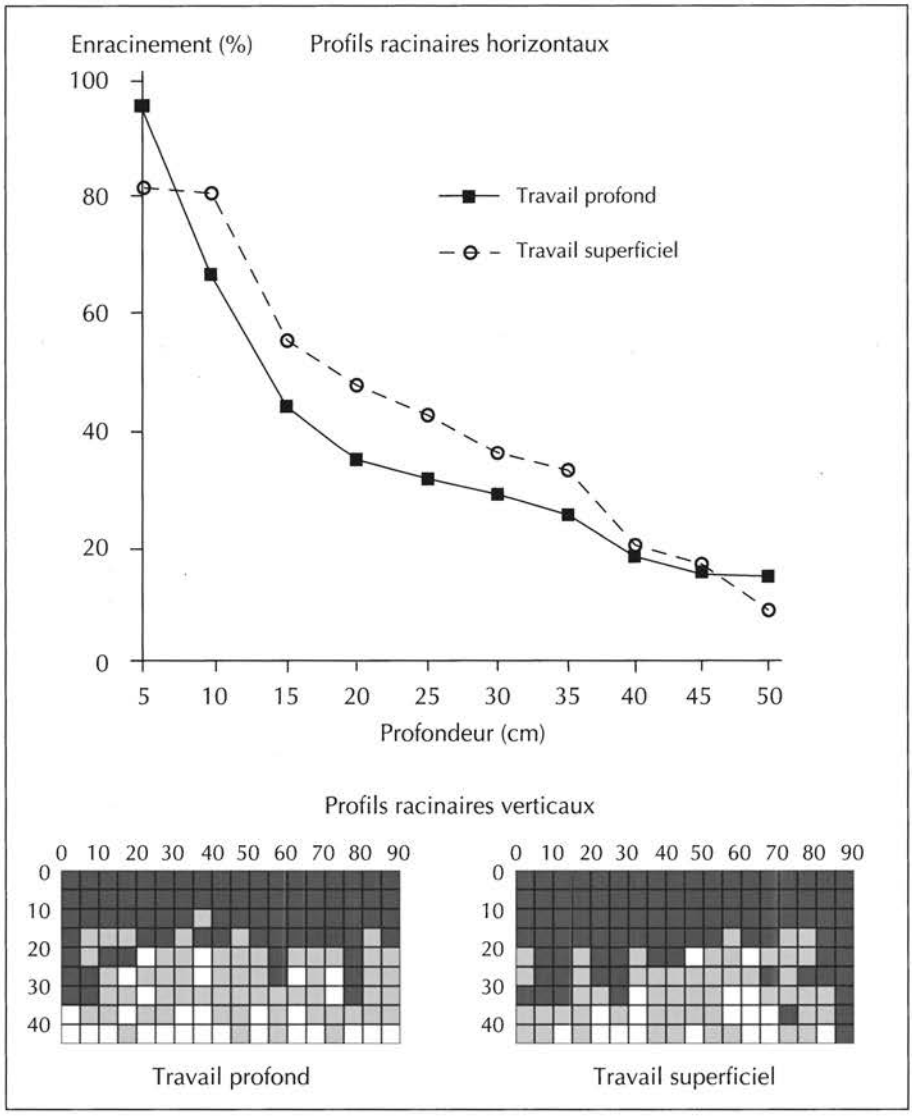


Figure 9. Profils racinaires sur ray-grass anglais, dactyle, phalaris et fétuque après un travail profond et un travail superficiel du sol.

Un tassement énergique avant et après le semis avec plusieurs passages de rouleau cultipacker est essentiel pour restaurer la conductivité hydrique du sol. Pour réaliser correctement ces travaux, il convient d'intervenir sur des sols en conditions hydriques satisfaisantes, souvent au début ou à la fin de la saison des pluies dans les Hauts de l'Ouest. Un travail en conditions trop sèches, à la fin de la saison sèche, ne permet pas de tasser le lit de semences, les jeunes plantules s'implantent alors difficilement et ne résistent pas.

Le semis et la plantation

La qualité des prairies dépend très largement des conditions d'installation, par semis pour les graminées tempérées ou par bouturage pour le kikuyu. La confection d'un lit de semences suffisamment affiné et tassé est primordial, d'autant plus que les graines sont petites. A la Réunion, la technique la plus couramment employée était le semis à la volée, avec un semoir centrifuge Vicon. Afin d'améliorer la qualité des semis et de réduire les temps de travaux, deux autres matériels ont été comparés lors de plusieurs essais : le semoir à sabots Nodet-Gougis et le semoir sur rouleau cultipacker Rollosem GN73-25 Gourdin-Souplex (PAILLAT, 1986a ; 1987a).

Aucune différence de rendement (10 prélèvements par parcelle pour chacune des trois coupes mesurées) n'a été observée entre ces trois matériels. Sur le plan de la qualité de l'implantation, les essais avec le ray-grass hybride ont mis en évidence les points suivants (tableau 8). L'épandeur centrifuge répartit mal les graines — la variabilité d'épandage est de 31 % — et requiert une dose de semences élevée, 66 kilos par hectare, car la germination au champ est faible, les graines n'étant pas recouvertes. Le semoir sur rouleau cultipacker donne les meilleurs résultats de levée au champ avec une dose de semences modérée, de 29 kilos par hectare. Le semoir à sabots permet de réduire la dose de semis à 24 kilos par hectare car les graines sont placées dans le lit de semences, mais une profondeur de semis excessive peut être un handicap pour les petites graines.

Tableau 8. Qualité d'implantation d'un ray-grass hybride, à la Plaine des Palmistes, avec différents matériels de semis.

Itinéraire	Semoir à sabots + rouleau cultipacker	Rollosem GN73-25	Epandeur centrifuge + rouleau cultipacker
Dose de semis (kg/ha)	24	29	66
Implantation (plantes/m^2)	161 ± 21	319 ± 70	116 ± 36
Coefficient de variabilité (%)	13	22	31

Les coûts des itinéraires pratiqués avec ces différents matériels ont été calculés à partir des temps de travaux enregistrés sur une trentaine d'hectares dans les Hauts de l'Ouest (tableau 9). Dans des conditions de sols soufflés, cas fréquent dans les Hauts, il est nécessaire de prévoir un ou deux passages de rouleau supplémentaires ou un passage de Rollosem supplémentaire précédant le semis. Par rapport à la technique classique, l'utilisation du semoir combiné sur rouleau assure un gain de temps de 20 %, ne nécessite pas de changement d'outils et permet de réaliser une économie de 30 % (PAILLAT, 1987a).

Actisol et crabe (photos J.M. Paillat).

Rollosem (photo J.M. Paillat).

Tableau 9. Temps de travaux et coûts pour différents itinéraires de semis dans les Hauts de l'Ouest.

Itinéraire	Rouleau cultipacker + semoir à sabots + rouleau cultipacker	Rollosem GN73-25 (1 passage lent sans semer + 1 passage rapide en semant)	Rouleau cultipacker + épandeur centrifuge + rouleau cultipacker
Temps de travaux (h/ha)	6,5	4,1	4,95
Coût des travaux (F/ha)	1 530	1 025	1 160
Coût des semences (F/ha)	625	750	1 250
Coût total (F/ha)	2 155	1 775	2 410

Pour le kikuyu, différents itinéraires de bouturage ont été testés : épandage des boutures et enfouissement avec un pulvériseur à disques légers, utilisation du rouleau cultipacker, sillonnage, épandage des boutures au fond du sillon et recouvrement des sillons avec un pulvériseur à disques légers (Paillat, 1986a). Ces essais montrent que le roulage n'a pas d'effet néfaste sur les boutures, il contribue à aplanir la parcelle. De plus, le démarrage de la prairie est plus rapide avec l'épandage des boutures sur toute la parcelle, lorsque les conditions pluviométriques sont satisfaisantes, et l'enfouissement des boutures en sillon, bien que plus coûteux en temps, est une assurance en conditions sèches, durant la période hivernale dans les Hauts de l'Ouest.

La régénération et l'entretien des pairies

L'assainissement en zones perhumides

En zone humide, les prairies implantées avec des graminées tempérées se dégradent rapidement, du fait de l'envahissement par des adventices et de l'asphyxie. Un renouvellement tous les deux à trois ans est souvent nécessaire. Plusieurs essais ont donc été mis en place à la Plaine des Palmistes pour mettre au point un itinéraire technique adapté à la création de prairies pérennes en zone humide. La technique consiste à réaliser un drainage de surface. En effet, un drainage en profondeur serait inefficace compte tenu d'une vitesse d'infiltration très faible (De Parseval, 1984) et, en outre, difficile à réaliser étant donné la présence de dalles rocheuses. Un billonnage de surface, avec des billons écartés de 20 à 25 mètres, effectué lors du travail du sol, permet de créer les conditions de ce drainage de surface. L'itinéraire retenu a été le sui-

vant : labour en adossant au centre du billon, reprise au pulvériseur en adossant, deuxième labour en faisant deux demi-ados à 1 mètre du sommet du billon et reprise de la totalité du billon, enfin troisième labour en adossant à 3 mètres du centre du billon, puis reprise de la totalité (PAILLAT, 1987b). Cet itinéraire technique est long (26 heures de travaux pour un coût de mise en place de la prairie de 8 000 à 9 000 francs par hectare en 1986), mais permet de réaliser des billons réguliers qui ne présentent pas de mouillères localisées. Pour les mouillères peu étendues, un simple sevrage par sillonnage jusqu'à l'amont de celles-ci suffit (PAILLAT, 1986b). Les sillons doivent être régulièrement entretenus. Les mesures de l'état hydrique du sol et de la densité, à l'aide d'une sonde gamma-neutronique Campbell, au sommet des billons et dans les sillons, sur la parcelle drainée et sur une parcelle non drainée, ont montré que le sol semblait mieux fonctionner de chaque côté des sillons qu'au sommet des billons, ce qui confirme la faible migration latérale de l'eau dans le sol. L'hydromorphie subsiste donc dans le sol au sommet des billons. Cependant, l'humidité et la densité sont moindres dans la couche 0-20 centimètres du sol que sur la parcelle non drainée. De plus, la prairie n'a jamais été submergée (PAILLAT, 1987b). Le ressuyage est donc accéléré et la prairie voit sa longévité accrue.

Bien qu'efficaces sur le plan agronomique, ces aménagements ont été peu pratiqués car l'exploitation mécanisée de la parcelle devient beaucoup plus difficile du fait des billons et surtout des sillons qui perturbent le passage des engins de récolte.

La lutte contre les adventices des prairies

Au début des années 80, dans un contexte de sous-fertilisation et de sous-exploitation, les prairies créées par les Afp étaient rapidement envahies par une flore adventice très compétitive (joncs, *Cyperus* sp., *Sporobolus fertilis*). Différentes techniques ont été envisagées pour restaurer les prairies : arrachage des adventices avec un cultivateur rotatif à axes verticaux (Vertiber) ou destruction chimique sélective (Round-up). Après brûlage en saison sèche, le cultivateur rotatif à axes verticaux permet un bon arrachage des joncs et de *S. fertilis,* mais ces adventices doivent ensuite être andainées puis ramassées pour éviter leur bouturage et cette opération est longue et fastidieuse (DE PARSEVAL, 1983). Avec cette technique, les coûts ne diminuent pas par rapport aux reprises traditionnelles de prairies avec un pulvériseur à disques lourds, mais l'érosion est fortement réduite. L'autre possibilité consiste à déposer un produit herbicide total comme le glyphosate avec un matériel spécifique constitué de cordes imbibées utilisées pour le traitement des betteraves montées sur les tiges et les inflorescences des adventices restées en place après pâturage de la prairie. Ces traitements chimiques se sont avérés assez efficaces sur les joncs, mais peu efficaces sur *Cyperus* sp. et sur *S. fertilis.*

La régénération des pâturages de graminées tempérées et de kikuyu

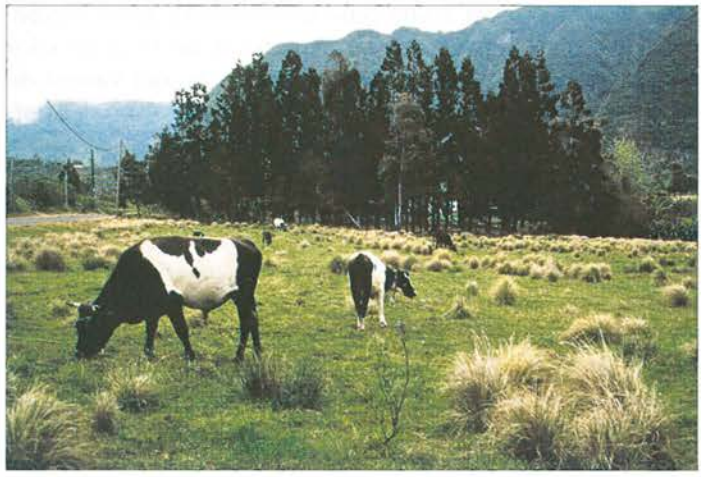
Dans certaines situations pédoclimatiques et d'exploitation du fourrage, les prairies donnent des signes de fatigue : la densité de plantes diminue, le kikuyu s'étiole. L'état de compaction du sol étant mis en cause par les agents du développement, des essais de décompaction avec différents matériels — Paraplow et Actisol — et de sectionnement du kikuyu par un pulvériseur à disques lourds et un cultivateur rotatif à axe horizontal ont été mis en place.

En réalité, la sensibilité de l'andosol à la compaction est assez faible et varie peu avec son degré d'humidité (Perret, 1993). Malgré une activité racinaire améliorée, les résultats de la décompaction ne sont concluants que si une fertilisation adéquate est appliquée (Paillat, 1986c). Pour les prairies trop dégradées, le travail d'aération avec un décompacteur léger doit être complété par un sursemis (Paillat, 1988a). De même, le sectionnement du kikuyu n'est pas une technique intéressante (Paillat, 1989). Le pulvériseur à disques lourds crée un relief très accidenté qui dégrade le pâturage. Le cultivateur rotatif, agissant sur le chevelu racinaire, réalise un travail correct, mais le sol mélangé au matelas racinaire déstructuré devient sensible à l'érosion. Aucun effet positif n'a été constaté avec ces itinéraires de régénération, l'apport d'engrais en quantité suffisante étant la solution la moins coûteuse et la plus efficace pour maintenir le pâturage en bon état.

Le semis direct et le sursemis

L'installation d'une prairie dans les Hauts est très coûteuse en raison de la topographie, de l'empierrement et de l'exiguïté des parcelles (Pocthier, 1986). Lorsque la première implantation est correctement réalisée, il est intéressant d'éviter tout bouleversement du sol. Pour cela il est possible d'avoir recours à la technique du semis direct, qui permet de renouveler des prairies dégradées, ou du sursemis, qui vise à augmenter la densité de graminées fourragères sans détruire la prairie en place. Des essais ont été menés avec cette technique pour évaluer la qualité des prairies obtenues et en estimer les coûts. Des itinéraires techniques ont été mis au point et différents matériels ont été testés : semoir à triple disque Huard SD300, semoir combinant disques et sabot Sulky Unidrill 240, semoir sur cultivateur à dents Cultisem (fabrication locale par le Cirad).

Lorsque la prairie est envahie par les adventices, le problème majeur réside dans la destruction correcte de la prairie avant le semis direct. L'itinéraire technique retenu pour le semis direct est donc assez long (Paillat, 1989). Il comprend un traitement avec du Round-up — l'emploi de plusieurs doses et adjuvants montrent qu'une dose élevée de Round-up est nécessaire (10 litres par hectare), mais l'action du surfactant, le Frigate, n'a pu être mise en évidence —, un repos de deux à trois semaines, un traitement de rattrapage



Envahissement d'une prairie à dactyle par Sporobolus fertilis *en touffes à la Plaine des Cafres, à 1 600 mètres d'altitude (photo G. Mandret).*

Paraplow (photo J.M. Paillat).

Semoir Sulky (photo J.M. Paillat).

Semoir Huard (photo J.M. Paillat).

avec du Gramoxone et le semis direct à une dose de semences assez élevée, de l'ordre de 30 à 35 kilos par hectare pour le ray-grass et de 15 à 20 kilos par hectare pour le dactyle, la fétuque et le chloris. Les coûts, qui varient de 4 500 à 6 000 francs par hectare, sont élevés, principalement en raison des herbicides, qui reviennent à 2 000 francs à l'hectare, et des semences, de 800 à 2 000 francs par hectare. Ces coûts sont cependant moindres que ceux d'un renouvellement de prairie par retournement. Le sursemis, qui ne nécessite pas d'herbicides, est en revanche peu coûteux : de 2 000 à 3 000 francs par hectare selon le coût des semences, en 1988. Le problème des adventices réglé, la qualité du semis dépend des conditions climatiques et du matériel utilisé. Le semis direct doit être réalisé dans des conditions d'humidité du sol suffisantes. Cette technique est donc adaptée à la zone est de l'île et, de novembre à mai, à l'ouest et au sud. Il est cependant préférable d'éviter les périodes de fortes pluies pour des raisons de portance. Un problème particulier est apparu lors du semis de graminées tempérées dans le kikuyu. En effet, après traitement chimique au Round-up, les racines et les stolons en décomposition du kikuyu libèrent de l'acide coumarique, qui est un antigerminatif pour nombre de plantes dont les graminées tempérées (FONTAR et THOMAS, 1987). La solution réside dans un passage, avant semis, de cultivateur rotatif à axe horizontal à très faible profondeur (5 centimètres) et avec une vitesse d'avancement élevée, de manière à mélanger les racines en décomposition avec le sol.

Sur le plan des matériels testés, le semoir Huard est peu précis dans la localisation des graines et celles-ci sont mal recouvertes. Il est en revanche très robuste et bien adapté aux zones humides et aux terrains difficiles de l'est. Le semoir Sulky est très précis, il localise bien les graines en profondeur et permet leur recouvrement. Plus fragile que le précédent, il sera employé pour le renouvellement ou le sursemis des prairies de fauche. Le Cultisem est robuste et très maniable (matériel porté). Il est utile dans les parcelles exiguës en pente. La technique du semis direct et surtout celle du sursemis ont connu un essor rapide depuis le début des années 90. La plupart des parcelles de fauche sont entretenues et renouvelées de cette manière. Grâce à l'Union des Afp, les éleveurs disposent maintenant dans chacune des régions d'élevage du matériel adéquat pour ce travail.

La mécanisation des exploitations avec du matériel adapté aux fortes pentes

Dès le début des années 80, le Ceemat puis le Cirad ont recherché des matériels utilisables pour les exploitations diversifiées des Hauts (CAUMONT, 1981 ; PAILLAT, 1983 ; ARNOLD, 1984). A l'issue de cette évaluation, il est apparu nécessaire de faire appel à des matériels adaptés à la montagne dans les

exploitations d'élevage situées sur de fortes pentes (CAUMONT, 1982 ; PAILLAT, 1986d). Parallèlement, à partir de 1984, les recherches se sont orientées vers un matériel spécifique de conception artisanale, le Mouflon, qui pouvait, à terme, être construit à la Réunion. Deux versions du Mouflon, 1700 MFT et 2700 MFT, et un tracteur de montagne Bucher TM850 ont donc été testés à la Réunion (PAILLAT, 1984 ; 1986d ; 1987c ; LEPETIT et PAILLAT, 1989 ; ADJIRI, 1991).

Bucher (photo J.M. Paillat).

Mouflon (photo J.M. Paillat).

Les besoins des exploitations

Le Mouflon, dans sa version 17 chevaux, a fait l'objet d'un suivi dans une exploitation laitière des Hauts de l'Ouest. Dans les conditions difficiles de pentes et de chemins dégradés, ce matériel a une importante fonction de transport — réfection des chemins, nettoyage des parcelles, épandage d'engrais et de fumier — mais manque de puissance (PAILLAT, 1987c). Une enquête a donc été réalisée dans une cinquantaine d'exploitations des différentes régions d'élevage afin de déterminer le type de matériel le mieux adapté (LEPETIT et PAILLAT, 1989). Dans ces exploitations, le matériel doit remplir plusieurs fonctions, dont l'importance

relative diffère selon le type d'exploitation : transport, récolte de fourrage et affouragement, épandage d'engrais, de fumier ou de lisier, travail superficiel du sol, broyage. Une typologie simplifiée des exploitations selon leurs besoins en mécanisation est présentée dans le tableau 10. Pour les exploitations de type I et II, une mécanisation spécifique se justifie. Dans le cas I, la mécanisation conventionnelle ne peut être efficace du fait de la taille des parcelles, un petit matériel polyvalent et maniable est donc nécessaire : le transporteur de montagne, Mouflon ou autre, peut convenir. Dans le cas II, les fortes pentes imposent une mécanisation de montagne : le Mouflon dans sa version 27 chevaux, robuste et adapté au transport, paraît une solution envisageable. Pour le cas III, une mécanisation conventionnelle peut convenir pour la récolte du fourrage et la confection d'ensilage d'herbe. Dans le cas IV, aucune mécanisation n'est nécessaire, si ce n'est pour l'entretien et le broyage des parcelles dégradées, qui pourraient être réalisés par une entreprise extérieure ou dans le cadre d'un groupement d'éleveurs de type Cuma (Coopérative d'utilisation du matériel en commun).

Tableau 10. Typologie des exploitations par rapport aux besoins en mécanisation.

Exploitation type	I	II	III	IV
Surface (ha)	<15	>30	15-25	>30
Parcellaire	groupé	étendu	groupé	étendu
Parcelles	très petites	grandes	moyennes	grandes
Pente	moyenne	forte	moyenne	moyenne
	1/2 des parcelles pente <25 %	90 % des parcelles non mécanisables	1/3 des parcelles pente >15 %	quelques parcelles pente >40 %
Relief	assez accidenté	très accidenté	peu accidenté	peu accidenté
Elevage	laitier intensif	32 vaches laitières	30 vaches laitières	allaitant
Système	affouragement	pâture + étable	affouragement	pâture
Intensification (UGB/ha)	3	1,5	2	1
Main-d'œuvre (UTH)	3	3,5	2	1
Contrainte majeure par rapport à la mécanisation	manque de main-d'œuvre, utilisation journalière	capacité de transport, utilisation fréquente	récolte et stockage du fourrage	entretien des parcelles, utilisation ponctuelle

Les coûts d'utilisation des matériels

Sur la base des travaux à réaliser dans les exploitations de type I et II, les coûts d'utilisation du transporteur de montagne Mouflon, dans sa version 27 chevaux, ont été calculés pour 1989 (Lepetit et Paillat, 1989). Par rapport aux coûts des travaux manuels, le Mouflon fait économiser 100 francs par jour pour l'affouragement en vert et 200 francs par hectare pour l'épandage d'engrais, à raison de 500 kilos par hectare. L'épandage de fumier, en revanche, est réalisé à un coût identique.

Des coûts ont également été déterminés pour le tracteur de montagne Bucher TM850 de 30 chevaux, en 1989. Ils correspondent à une utilisation en Cuma et tiennent compte de la rémunération du chauffeur et d'un amortissement annuel sur 700 heures de travaux. L'épandage d'engrais revient à 75 francs par hectare, le traitement herbicide, à 350 francs par hectare, la fauche, à 450 francs par hectare, le gyrobroyage, à 750 francs par hectare et le rotobroyage fin, à 920 francs par hectare.

L'aptitude au transport des matériels adaptés aux pentes

Le Mouflon 2700 MFT et le Bucher TM850 ont été testés pour leur aptitude au transport en pente. L'évaluation la plus simple des capacités d'un matériel de montagne est la mesure du glissement, qui qualifie l'adhérence de l'engin, sous différentes charges correspondant à divers besoins de traction (BOURNAS, 1979). La méthode initialement mise en œuvre par le Ceemat sur des petites cellules motrices (PAILLAT, 1983 ; ARNOLD, 1984) a été améliorée en utilisant des capteurs (inclinomètres, compte-tours, débitmètre) et une centrale d'acquisition de données Campbell 21X. La limite supérieure de glissement dépend de l'état du sol : texture, humidité, empierrement, couvert végétal. Cette limite est évaluée par interprétation graphique (LEPETIT et PAILLAT, 1989) ou statistique (ADJIRI, 1991) des ruptures dans la fonction liant le glissement à la pente pour différentes charges transportées. Dans le cas de l'ajustement graphique, la fonction retenue pour le Mouflon 2700 MFT est la suivante (figure 10) :

$$G = 8{,}3\ 10^{-7}\ e^{(20\ P + 0{,}003\ C)} + 0{,}08$$

où G est le pourcentage de glissement, P, le pourcentage de pente et C, la charge transportée en kilos. Dans le cas de l'ajustement statistique (logiciel Sas), deux fonctions linéaires relient le glissement à la pente et à la charge (régressions multiples). Les coefficients de chacune d'elles sont déterminés en minimisant la somme des carrés des écarts. Les points de rupture sont calculés au croisement des droites (figure 10), soit, pour le Mouflon, selon les charges transportées : $47\ \% < P_0 < 51\ \%$, P_0 étant la pente au point de rupture. Pour ce matériel les droites retenues sont les suivantes :

pour $P < P_0$, $G = 0{,}49\ P - 13{,}95 \times 10^{-6}\ C - 0{,}036$;

pour $P \geq P_0$, $G = 4{,}071\ P + 642 \times 10^{-6}\ C - 2{,}054$.

L'intérêt d'un matériel de traction adapté aux pentes

Ces études ont permis de mieux qualifier les matériels. Elles ont également souligner les difficultés rencontrées dans la progression en pente sous charge. Les matériels testés ont de réelles aptitudes dans ces conditions et le Mouflon 2700 MFT a reçu un agrément de la Région en tant qu'équipement spécifique aux exploitations de montagne, avec l'octroi d'une subvention pour son acqui-

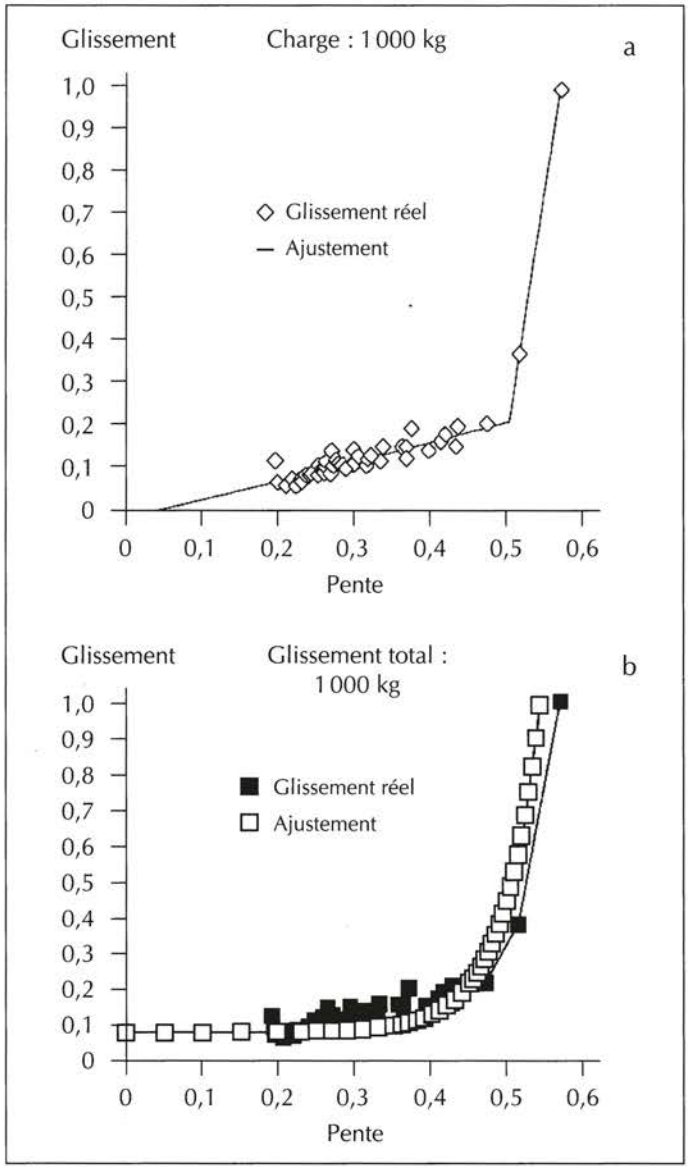


Figure 10. Construction d'un modèle expliquant le glissement par la pente et la charge transportée pour le Mouflon 2700, par ajustement graphique (a) ou par ajustement statistique (b).

sition par les éleveurs. Cependant, les besoins des exploitations concernées, pour la majorité laitières, ont évolué vers une intensification fourragère, avec la nécessité de constituer des stocks sous forme d'ensilage d'herbe. Les éleveurs ont donc aménagé leurs parcelles, en arasant les buttes, en reprenant les prairies et en installant des graminées tempérées. Ils ont, pour la plupart, investi dans une motorisation conventionnelle, qui assure la récolte en balles enrubannées, notamment. A partir des années 90, l'acquisition d'un matériel spécifique de montagne ne se justifiait plus dans ce nouveau contexte.

La fertilité des sols et la relation entre le sol et la plante

La fertilité des sols sous prairies à la Réunion mobilise le Cirad depuis longtemps. Les essais de fertilisation du kikuyu et de la houlque laineuse mis en place par l'Irat dès 1971 font état de bons rendements sans fertilisation la première année d'exploitation, mais d'une chute importante au cours de la deuxième année, avec une minéralisation de la matière organique du sol plus faible en saison froide (MICHELLON *et al.*, 1982). Ils mettent aussi en évidence l'effet de la fumure azotée, à raison de 30 ou 60 unités d'azote (exportations d'azote de 270 à 319 kilos par hectare et par an) sur les rendements et les teneurs, ainsi que celui du phosphore et du potassium.

Les teneurs en calcium, en magnésium et en sodium semblent toujours insuffisantes. Le chaulage permet d'augmenter les teneurs en calcium en hiver ; il est indispensable sur les andosols pour bien valoriser les engrais sur prairies car il réduit l'acidité et améliore en conséquence la capacité d'échange des ions. Son importance est souvent sous-estimée à la Réunion, ce qui se traduit par des carences minérales pour le fourrage et par une acidification des sols. Son intérêt pour la production fourragère a conduit le Cirad-Elevage à mener une étude plus approfondie avec cinq types d'engrais calciques (500 unités de calcium) sur la ferme de la Sedael, à 700 mètres d'altitude. Le dispositif comprenait des parcelles de 4 mètres carrés, réparties dans 5 blocs de 16 mètres carrés chacun (4 répétitions par traitement et un traitement par bloc), avec une fumure phosphopotassique de fond sur la base de 200 P et 200 K. L'amendement calcique est mieux valorisé lorsque son épandage a lieu au début de la saison froide (MANDRET *et al.*, 1995b). Il est également intéressant après les fortes pluies de la saison cyclonique, en avril et en mai. Le type de chaux employé est aussi déterminant quant à l'efficacité du calcium, les meilleurs résultats étant obtenus avec une chaux d'appellation commerciale Calco MG5, qui a une action immédiate grâce au dosage et à la forme de ses composants — présence simultanée de carbonate à action rapide et d'oxyde de calcium et de magnésium associés aux oligoéléments (MANDRET *et al.*, 1995b).

Les éleveurs n'ont pas toujours conscience qu'une alimentation minérale déséquilibrée de la plante entraîne des chutes de production fourragère. L'étude des macrominéraux (Ca, P, Mg, K) et des oligominéraux (Cu, Zn, Mn) entreprise sur les graminées fourragères par MANDRET (1996) montre l'importance des carences en cuivre, en zinc, en phosphore et, dans une moindre mesure, en calcium des prairies de l'île (voir le chapitre « Les rations en élevage laitier »). Par ailleurs, GILIBERT (1983) fait état de fortes carences en sodium sur le kikuyu et de teneurs variables, mais très faibles à faibles, sur le ray-grass. Le lessivage du sodium, du magnésium et du chlore est effectivement accentué par la fertilisation azotée (MANDRET, 1994a).

L'efficience d'absorption et l'activité microbiologique

Afin de mieux comprendre l'efficience d'absorption de l'azote par les fourrages, des études ont été entreprises sur l'activité microbiologique du sol. Celle-ci est estimée en mesurant l'activité d'une exoenzyme microbienne du sol et exprimée en unité internationale — en microgrammes de phosphonitrophénol formés par heure dans un gramme de sol sec (MANDRET *et al.*, 1996). Les essais concernent la zone littorale et les altitudes 700 et 1 900 mètres, différentes couvertures végétales et plusieurs niveaux et types de fumure (azote appliqué sous la forme NH_4NO_3 isotopique 15, seule ou associée au lisier de porc).

Dispositif avec bougies poreuses sur Chloris gayana *en zone littorale (photo O. Fontaine).*

Dispositif sur dactyle au Nez de Bœuf, à 1 900 mètres d'altitude (photo V. Blanfort).

L'application d'une fumure minérale ou organique augmente l'activité biologique du sol sous prairie mais cette activité ne dépend pas du type de fumure employé. En revanche, l'activité biologique plafonne au-delà d'une certaine quantité d'azote apportée (figure 11).

Par rapport à des parcelles sans azote, l'application de 105 kilos d'azote par hectare augmente de 31 % l'activité biologique du sol. Mais l'apport de 45 kilos d'azote supplémentaires, soit près de 50 % de l'apport initial en plus, n'entraîne qu'un surcroît de l'activité biologique de 8 %. En fait, l'analyse de l'azote 15 (excès isotopique de 2,56 %) fait apparaître que l'azote de l'engrais est surtout absorbé pendant les vingt premiers jours de repousse. La dilution de l'azote dans la matière sèche (MS, en tonnes de matière sèche par hectare) se fait alors selon les équations suivantes (MANDRET *et al.*, 1993) :

pour N0 : $N\% = 1{,}08\ MS^{-0{,}24}$, ($r^2 = 0{,}99$) ;

pour N30 : $N\% = 1{,}26\ MS^{-0{,}55}$, ($r^2 = 0{,}99$) ;

pour N60 : $N\% = 1{,}68\ MS^{-0{,}55}$, ($r^2 = 0{,}99$).

Toutefois, le coefficient réel d'utilisation de l'azote provenant de l'engrais ne dépasse pas, quelle que soit l'année, 10 % en hiver et 15 % en été, alors que le coefficient apparent d'utilisation de l'azote est bien plus élevé (figure 12). Il semble donc que l'application d'un engrais azoté permette de stimuler l'activité biologique du sol, facilitant ainsi la minéralisation de la matière organique et, par voie de conséquence, la ponction d'azote dans le sol (de 75 à 150 % en plus avec 30 à 60 unités d'azote apportées).

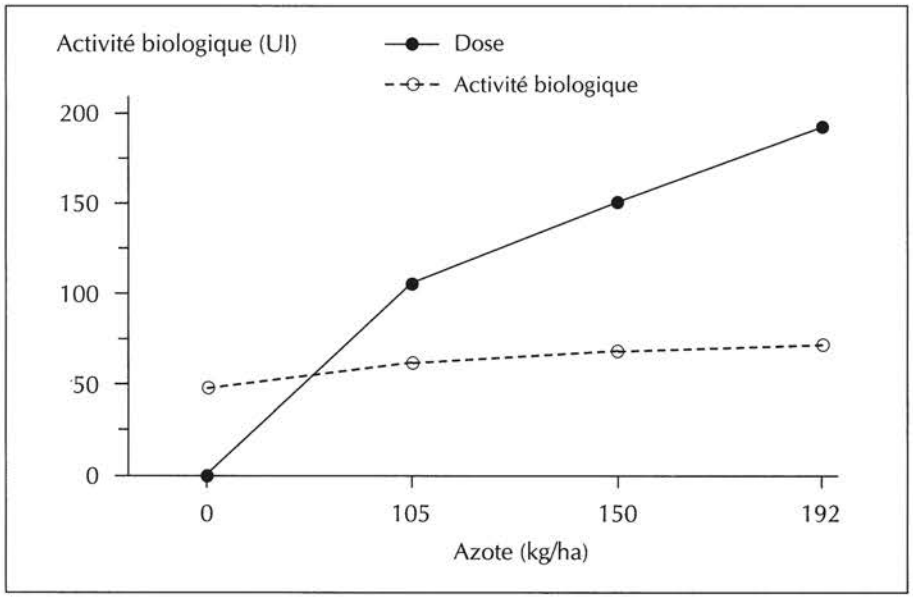


Figure 11. Activité biologique du sol en fonction de la dose d'azote apportée.

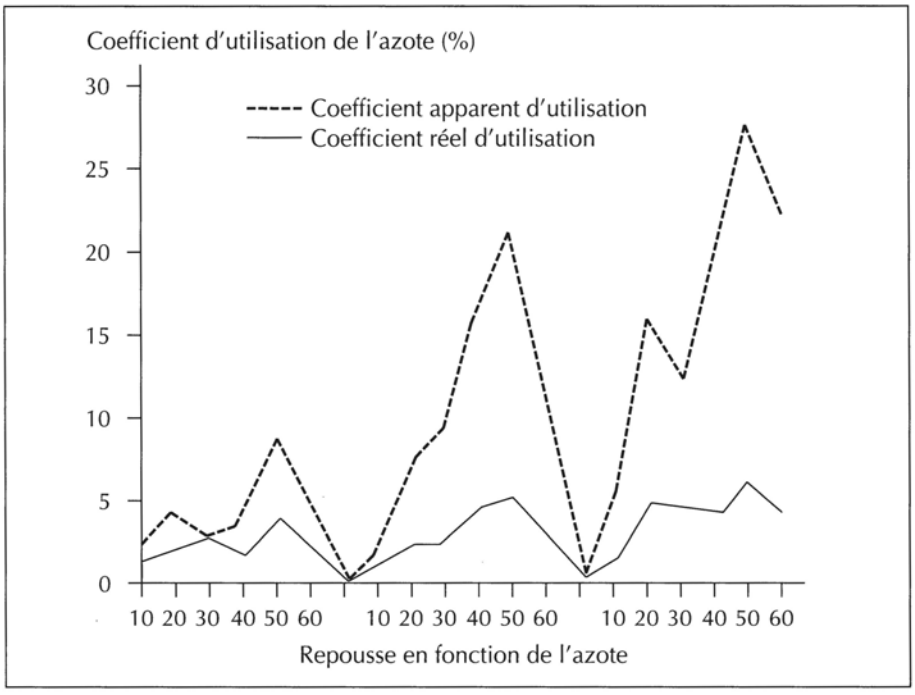


Figure 12. Efficience de l'azote sur le dactyle en été.

La minéralisation de la matière organique

Plusieurs graminées tropicales *(Brachiaria decumbens, B. ruziziensis, B. humidicola, Setaria anceps),* plus sensibles aux effets saisonniers que les graminées tempérées, ont été suivies par Mandret pendant trois ans, de 1993 à 1996, tant du point de vue des rendements que des exportations d'azote. Elles étaient soumises à des coupes régulières, tous les mois à raison de 3 répétitions par espèce, et bénéficiaient du même niveau de fertilisation. Les observations ont porté sur les périodes de minéralisation de la matière organique, propices à la valorisation de la fumure. Plusieurs périodes ont été identifiées — du 15 octobre au 15 novembre, du 15 décembre au 15 janvier, d'avril à mai — de même qu'une période d'intense lessivage et de mauvaise activité biologique du sol, de février à mars (figure 13). Il ressort de ces observations que l'engrais est d'autant mieux valorisé qu'il est épandu pendant les périodes de minéralisation. Pour compenser l'effet négatif des mois de février et mars, il est important de fertiliser les parcelles très tôt en avril, période également favorable à l'application de chaux. Toutefois l'application d'engrais dépend aussi de la stratégie de production de fourrage (voir le chapitre « Gestion agroécologique des prairies »).

L'activité biologique des sols est très variable en fonction de l'altitude (figure 14). Ainsi, l'activité biologique des sols sablo-limoneux du littoral est surprenante : elle est aussi faible que celle des sols sahéliens.

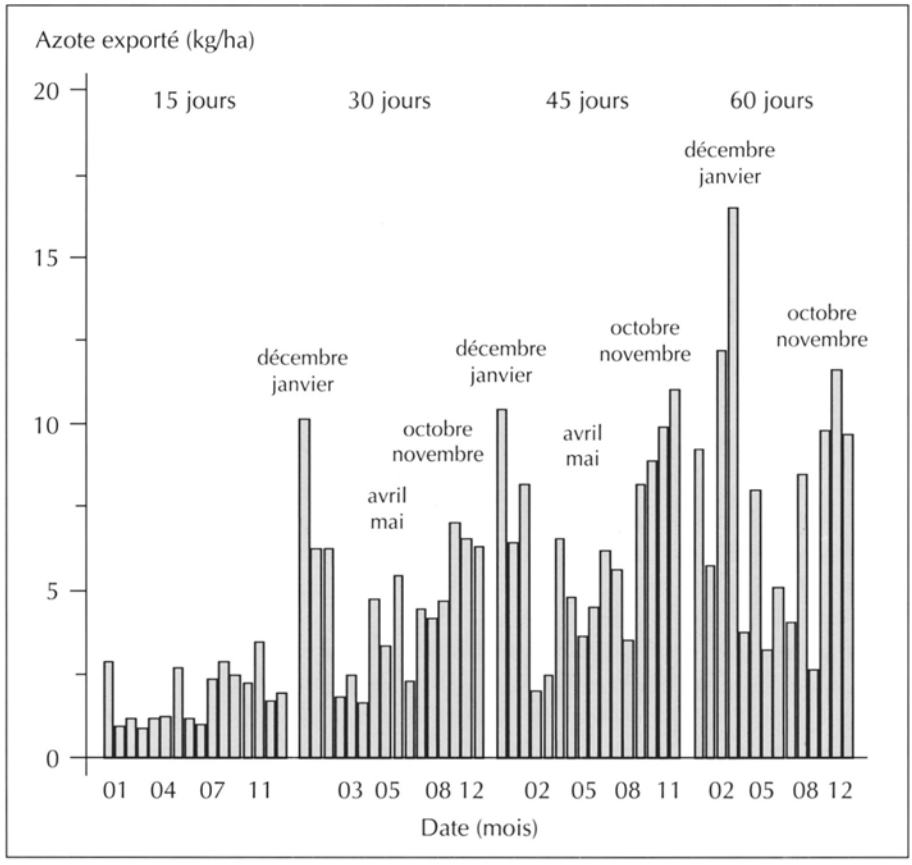


Figure 13. Périodes de minéralisation en fonction de la saison et de l'âge de repousse de Brachiaria ruziziensis.

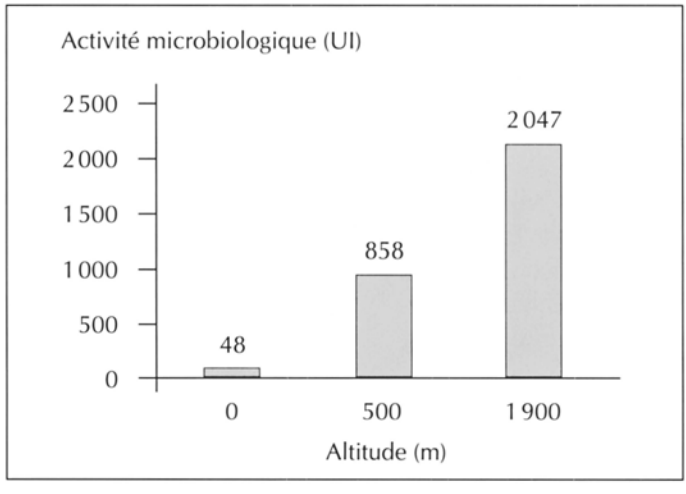


Figure 14. Activité microbiologique, exprimée en unité internationale, des sols à trois altitudes : littoral (Saint-Joseph), 500 mètres (Sedael), 1 900 mètres (Plaine des Cafres).

Le diagnostic de la fertilité du sol par la nutrition minérale de la plante

L'étude sur la gestion des prairies menée de 1992 à 1996 par le Cirad-Elevage (Blanfort, 1998) se fonde sur une approche systémique des couverts prairiaux dans laquelle sont intégrées des expérimentations analytiques. La modélisation expérimentale de certains processus biologiques, tels que la nutrition des plantes, vise à élaborer des indicateurs et des outils de diagnostic pour la gestion des pâturages. Une série d'expérimentations a donc été menée en vue de rendre utilisables dans les conditions réunionnaises les lois de dilution des éléments N, P et K établies par l'Inra en métropole.

La méthode : estimation de la fertilité par l'analyse du végétal

Traditionnellement, la fertilisation est raisonnée à partir d'analyses de sol qui impliquent des hypothèses sur les capacités d'assimilation par la plante des éléments minéraux, estimées selon des méthodes de dosage ou d'extraction variées. Mais la fertilité peut être appréciée de manière plus dynamique, en l'abordant sous l'angle de la nutrition minérale des plantes. Des méthodes établissent des relations entre la teneur en minéraux, la productivité et la dynamique de la végétation, indépendamment de l'âge physiologique de la plante, ce qui constitue un des atouts opérationnels de la démarche (Salette et Huche, 1989). Concernant l'azote, Salette et Lemaire (1981) ont proposé un modèle de dilution du type : $N\% = a\ (MS)^{-b}$, où N% est la concentration potentielle de l'azote dans la matière sèche produite, *a,* le potentiel de teneur ou la possibilité d'enrichissement théorique, MS, la quantité de matière sèche récoltée en tonnes par hectare et *b,* le coefficient de dilution. Il existe une courbe limite de référence, au-delà de laquelle tout prélèvement d'azote supplémentaire se traduit par un accroissement de teneur sans augmentation de rendement (figure 15a ; Duru, 1992a).

Cette loi de dilution a ensuite été étendue au phosphore et au potassium (tableau 11 ; Salette et Huche, 1991). Les courbes sont relativement semblables pour la plupart des graminées et des légumineuses. Etablies sur des peuplements purs, elles s'avèrent également utilisables sur des prairies à flore complexe (Duru, 1992b ; Huche *et al.*, 1992). Les courbes de dilution de référence traduisent le comportement normal de la végétation. Le diagnostic peut s'établir de façon graphique sur la mesure de l'écart à la courbe normale (figure 15b).

Une méthode de diagnostic plus opérationnelle a été établie (Duru, 1992a ; 1992b). Elle s'appuie sur le calcul d'indices de nutrition, qui dérivent des équations de dilution (tableau 12). Ces indices sont une mesure quantifiée de l'écart entre le niveau de concentration observé et le niveau potentiel théorique atteint en condition d'alimentation non limitante. Les indices de nutrition non limitants ont donc théoriquement une valeur de 100. Le déficit ou l'excès de fourniture du sol est donc proportionnel à l'écart autour de cette valeur.

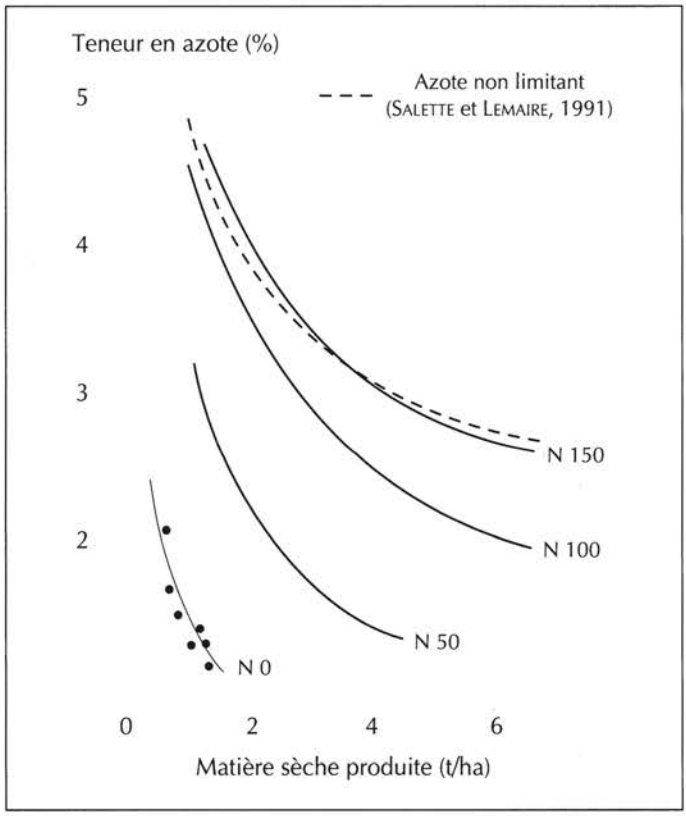


Figure 15a. Evolution de la teneur en azote en fonction de la matière sèche pour différents niveaux d'apport d'azote. Lorsque la disponibilité de l'azote dans le sol diminue, la teneur en azote dans la matière sèche et le rendement décroissent par rapport à la courbe de référence (azote non limitant).

Tableau 11. Equations de référence correspondant au comportement normal d'un peuplement en conditions de nutrition non limitantes.

Equations de dilution de l'azote		
Plante en C_3 (tempérée) :	$N\ \% = 4{,}8 \times (MS)^{-0{,}32}$	(Salette et Lemaire, 1981)
Plante en C_4 (tropicale) :	$N\ \% = 3{,}6 \times (MS)^{-0{,}4}$	(Cruz et M. Duru, comm. pers.)
Equations de dilution du phosphore et du potassium (Duru, 1992b)		
	$P\ \% = 0{,}24 \times (N\%)^{0{,}64}$	
	$K\ \% = 1{,}62 \times (N\%)^{0{,}48}$	

Pour le phosphore, l'expérience montre qu'un indice de 80 correspond en fait à un niveau de nutrition non limitant (Granger, 1992). Plus récemment, les indices concernant le phosphore (IP) et le potassium (IK) ont été ajustés de façon à obtenir un indice 100 non limitant homogène pour les trois éléments (Duru et Ducrocq, 1997) :

$IP = 100 \times P_{obs} / (1{,}6 + 0{,}525 \times N_{obs})$;

$IK = 100 \times K_{obs} / (0{,}15 + 0{,}065 \times N_{obs})$.

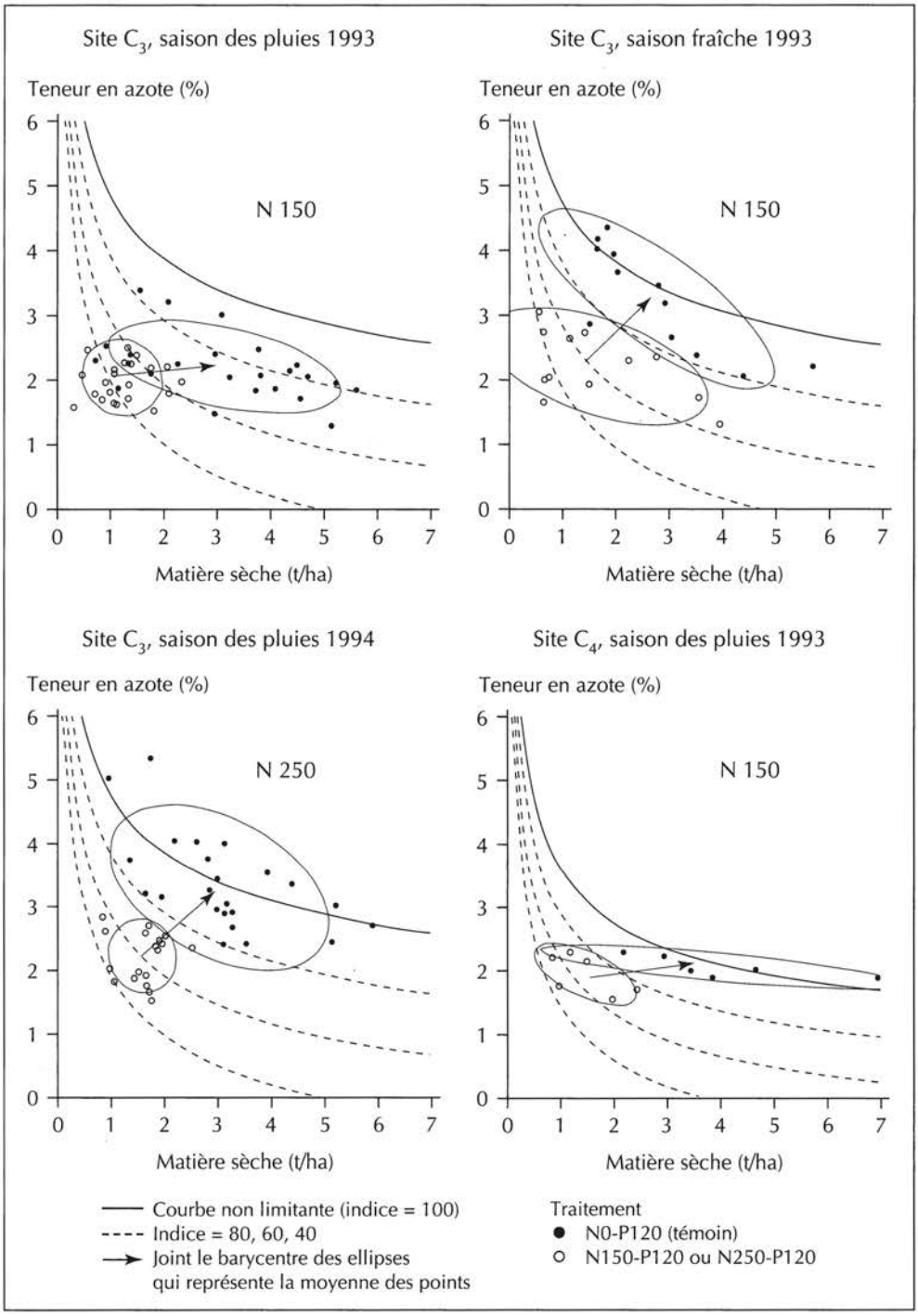


Figure 15b. Evolution des teneurs en azote au cours de la croissance sur l'ensemble des sites expérimentaux pour les graminées tempérées.

Tableau 12. Formules de calcul des indices de nutrition, à partir des valeurs observées (obs) et potentielles (pot), en pourcentage de la matière sèche.

Indice de nutrition azotée :	
Plante en C_3	$IN = 100 \times (4,8 - 4,8 \times MS_{obs}^{-0,32} + N_{obs}) / 4,8$
si biomasse récoltable < 1t*	$IN = 100 \times (N_{obs} / 4,8)$
Plante en C_4	$IN = 100 \times (3,6 - 3,6 \times MS_{obs}^{-0,4} + N_{obs}) / 3,6$
si biomasse récoltable < 1t*	$IN = 100 \times (N_{obs} / 3,6)$
Indice de nutrition en phosphore et en potassium :	
$IP = P_{obs}/P_{pot}$	$IP = 100 \times 4,17\ P_{obs} \times N_{obs}^{-0,64}$
$IK = K_{obs}/K_{pot}$	$IK = 100 \times 0,62\ K_{obs} \times N_{obs}^{-0,48}$

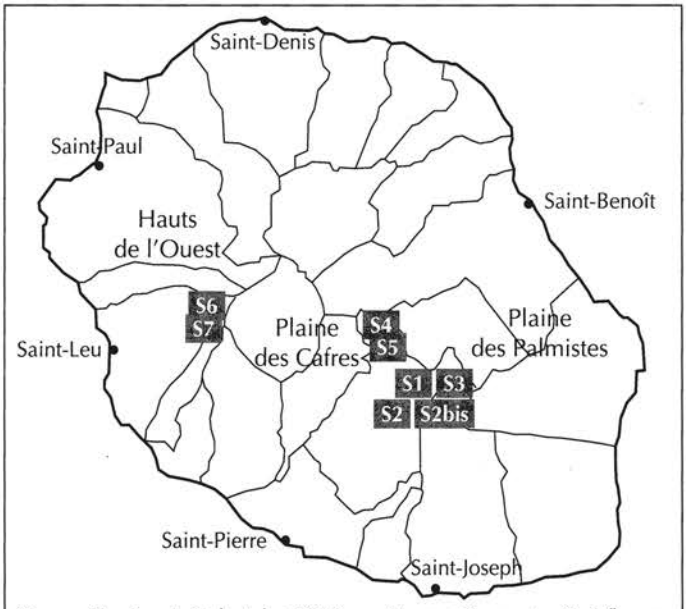
* 1t : interception maximale du rayonnement lumineux au-delà duquel la croissance se stabilise (M. Duru, comm. pers.).

L'utilisation locale des modèles de nutrition minérale

Les dynamiques de croissance et d'absorption des éléments N, P et K dans la végétation ont été observées dans des dispositifs de type diachronique à 11 cycles, sur deux années consécutives, en 1993 et 1994 (Blanfort, 1998). Plus de 2 200 prélèvements d'herbe ont donné lieu à 555 échantillons moyens à partir desquels ont été réalisés des calculs de productions de matière sèche, des analyses standards en laboratoire (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu) et 42 analyses de digestibilité de la matière organique et de la matière sèche. Plus de 40 analyses standards de sol ont été effectuées, 28 ont fait l'objet d'une double analyse selon différentes méthodes d'extraction du phosphore. Des mesures isotopiques du phosphore et des dosages de l'aluminium échangeable ont été effectuées sur 14 prélèvements de sol. Les données climatiques de Météo-France ont été complétées par des enregistrements sur les sites de prélèvement afin de vérifier les conditions de validité des résultats (figure 16).

L'azote

On observe un comportement de dilution similaire des graminées tempérées en C_3 sur chacun des cycles étudiés (figure 15b). La position du barycentre (moyenne des points) de l'ellipse des points témoins sans azote reste quasiment au même endroit, ce qui implique une minéralisation équivalente pour les deux années et donc un effet nul de l'année. Le déplacement significatif du barycentre de l'ellipse du traitement avec l'apport d'azote peut donc essentiellement être attribué à l'effet de la dose. Les résultats montre un effet marqué de la saison sur la dilution de l'azote. La courbe de référence proposée par Salette et Lemaire n'a pu être atteinte au cours de la saison des pluies de 1993 (indice azoté, IN, moyen de 80), alors qu'elle l'a été en saison fraîche. L'accélération de la croissance en saison des pluies entraîne un besoin accru d'azote que n'a pu satisfaire l'apport de 150 kilos par hectare. Durant la saison des pluies de



S1 : prairie récente à dactyle, 1 850 m ; S2 : prairie spontanée à flouve, 2 000 m ; S2bis : prairie spontanée à flouve, 1 950 m ; S3 : prairie ancienne à dactyle, 1 950 m ; S4 : prairie à dactyle, 1 600 m ; S5 : prairie à kikuyu, 1 600 m ; S6 : prairie à kikuyu, 1 600 m ; S6 et S7 : prairies spontanées à houlque, 1 600 m

Figure 16. Localisation des sites expérimentaux.

1994, une dose de 250 kilos d'azote par hectare a permis à l'ensemble des sites d'atteindre cette courbe correspondant à une nutrition non limitante.

Contrairement aux graminées tempérées, en saison des pluies, la courbe non limitante établie pour le kikuyu, une graminée tropicale en C_4, est atteinte avec un apport d'azote de 150 kilos par hectare (figure 15b). On peut supposer qu'un apport supérieur d'azote en saison des pluies aurait permis un meilleur ajustement à cette courbe.

Les équations proposées par Salette et Lemaire s'avèrent donc utilisables dans les conditions pédoclimatiques de la Réunion pour caractériser la dilution de l'azote au cours de la croissance des peuplements prairiaux à base de graminées tempérées et tropicales. On observe, pour les sites S6 et S7, un état de nutrition plus élevé et une dilution normale du phosphore au cours de la croissance. Pour les autres sites, la teneur en phosphore s'accroît au cours de la croissance, en relation avec une nutrition phosphatée très insuffisante.

On vérifie que les points successifs correspondent chronologiquement aux coupes t0 à t6. Sur les sites S6 et S7, où l'espèce dominante est la houlque, l'apport d'azote conduit à un effet dépresseur sur la teneur en phosphore, lié à une fourniture insuffisante de phosphore par rapport à l'augmentation de la biomasse, la cinétique de dilution est cependant normale. Sur les autres sites, on note le même effet dépresseur de la fertilisation azotée. La très forte indispo-

nibilité en phosphore se traduit par un accroissement anormal de la teneur en phosphore au cours de la repousse, lié à un accroissement du volume racinaire dans le temps. Dans le sol, le phosphore ne se déplace que sur des distances de l'ordre du millimètre (CALLOT *et al.*,1989), le rhyzocylindre est vite épuisé en particulier dans des sols où le phosphore est peu disponible (DURU, 1992a).

Les protocoles expérimentaux n'étant pas conçus pour établir des modèles, pour conforter les traitements graphiques ne figurent que quelques équations obtenues globalement sur les sites expérimentaux en comparaison des modèles de dilution (tableau 13). Ces équations concernent les traitements N1P120 et N1P120Ca, qui ont permis d'atteindre les tracés les plus proches des courbes non limitantes (plantes en C_3 : N (% MS) = 4,8 $MS^{-0,32}$; plantes en C_4 : N (% MS) = 3,6 $MS^{-0,4}$).

Tableau 13. Equations de dilution obtenues sur les sites.

Sites	Type	Equation N % = a MS^{-b}	r^2
S5 (saison des pluies)	C_4	N (% MS) = 3,2 $MS^{-0,38}$	0,55
Tous sites C_3 (saison des pluies 1993)	C_3	N (% MS) = 4 $MS^{-0,49}$	0,6
Tous sites C_3 (saison sèche 1993)	C_3	N (% MS) = 4,7 $MS^{-0,36}$	0,9
Tous sites C_3 (saison des pluies 1994)	C_3	N (% MS) = 4,4 $MS^{-0,28}$	0,9

Les valeurs des coefficients de dilution *b* traduisent ce qui est constaté graphiquement. Le coefficient est plus élevé pendant la saison des pluies de 1993, alors que les équations de la saison sèche de 1993 et de la saison des pluies de 1994 sont très proches du modèle de référence. Le paramètre *a,* traduisant le potentiel de teneur, apparaît également faible pendant la saison des pluies de 1993 où l'apport d'azote n'a pu satisfaire le potentiel climatique.

Ces données ont permis de calculer le taux apparent d'utilisation de l'azote après l'application d'un engrais azoté, qui s'avère relativement faible. Pour les graminées tempérées, il varie en 1993 de 22 à 30 % pour des apports de 150 kilos d'azote par hectare. En 1994, pour des apports de 250 kilos par hectare, il s'établit à 34 %. Pour les graminées en C_4 comme le kikuyu, il paraît plus faible avec des taux de 20 à 23 %. En plus de la faible minéralisation caractéristique de ces sols, le faible taux apparent d'utilisation de l'azote explique les indices azotés peu élevés constatés dans l'ensemble. Cela conduit à s'interroger sur le devenir de cet azote stocké dans le sol.

LE PHOSPHORE

Conformément aux conclusions de DURU (1992b), les cinétiques de dilution du phosphore et du potassium étant similaires à celle de l'azote, les teneurs en phosphore sont exprimées en fonction de celle de l'azote. L'ensemble permet de mettre en évidence deux schémas d'absorption du phosphore.

La courbe de dilution de l'ensemble des sites traduit un état de nutrition phosphatée très insuffisant pour cinq sites (figure 17). L'apport de 120 kilos de phosphore par hectare n'entraîne pas d'augmentation du prélèvement du phosphore. Cette forte indisponibilité provoque une dynamique d'absorption inhabituelle, illustrée par le cas représentatif du site S3 au cours de la saison des pluies de 1993 (figure 18). En l'absence de fertilisation azotée, la teneur en phosphore est inférieure à la courbe non limitante. L'apport d'azote entraîne alors un effet dépresseur sur la teneur en phosphore. Cela traduit l'incapacité du sol à fournir la demande accrue de phosphore induite par l'élaboration de tissus supplémentaires, malgré un apport de 120 kilos de phosphore par hectare. SALETTE et HUCHE (1991) lèvent facilement une carence en phosphore induite par un apport de 150 kilos d'azote par hectare par une fertilisation phosphatée de 100 kilos par hectare. On constate alors une dynamique d'absorption du phosphore contraire à la dilution. Les teneurs en phosphore augmentent au cours de la croissance sur la courbe de dilution de l'ensemble des sites (figure 17). Dans le cas type S3 (figure 18), on observe une augmentation de la teneur en phosphore dans le temps. La cinétique de dilution croissante au cours de la repousse pourrait être due au fait que l'apport d'azote favorise le développement racinaire au cours de la crois-

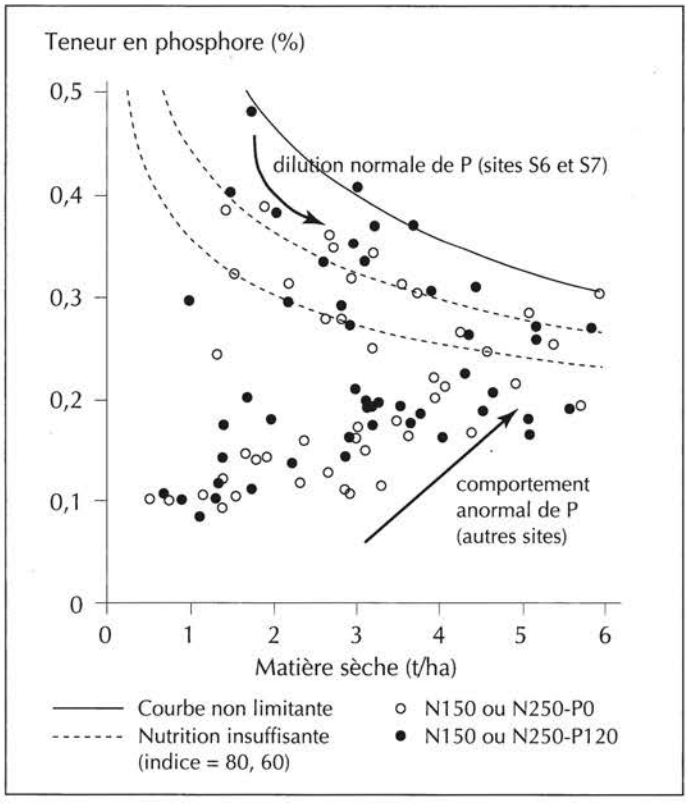


Figure 17. Mise en évidence de la cinétique de dilution du phosphore pour l'ensemble des sites (toutes saisons et années confondues).

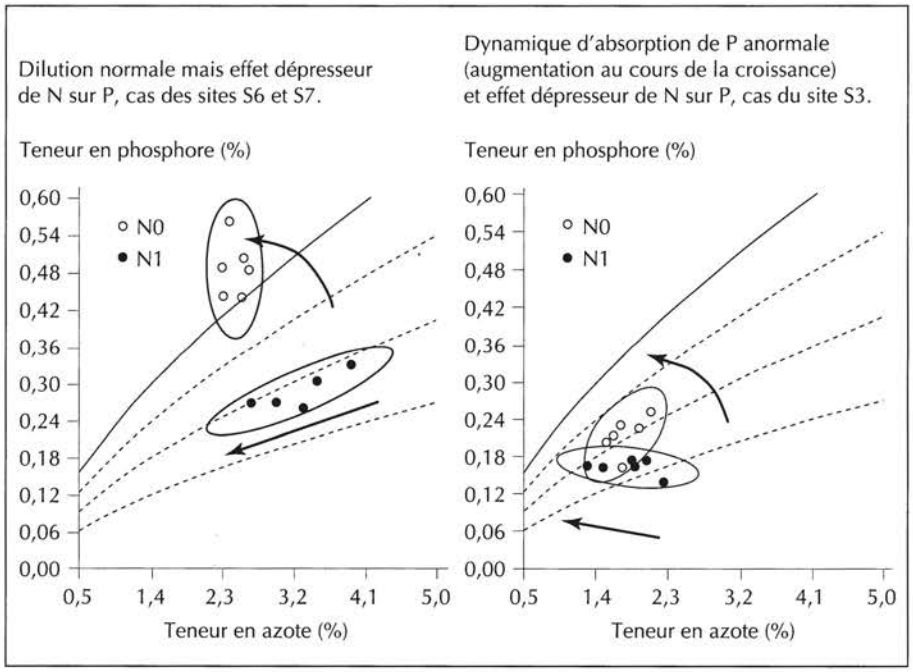


Figure 18. Evolution de la teneur en phosphore en fonction de la teneur en azote dans deux cas types illustrant la figure précédente

sance et améliore l'absorption des ions PO_4^{3-} du fait d'une exploration plus importante de la solution du sol. Le niveau de nutrition en phosphore est beaucoup moins limitant, voire satisfaisant, sur les sites S6 et S7 (figure 17). Bien que situés sur le même type d'andosol que les autres sites, les points suivent un tracé de dilution normal et proche des courbes théoriques du modèle, quel que soit le traitement. On vérifie qu'il y a bien une décroissance de la teneur en phosphore quand celle-ci est exprimée en fonction de l'azote (figure 18).

> En l'absence de fertilisation azotée, la teneur en phosphore n'est pas limitante. En revanche, elle le devient si on apporte de l'azote, l'effet dépresseur de l'azote est donc toujours très marqué.

De plus, on observe un effet de la saison sur l'absorption du phosphore. Les niveaux de nutrition sont supérieurs d'environ 20 % en saison des pluies, l'effet dépresseur de l'azote y est également moins marqué. Une partie du phosphore assimilable provient de la matière organique, le phosphore est assimilable dans la mesure où la matière organique est minéralisée. On constate une baisse de la minéralisation sous prairies en saison fraîche, liée aux baisses de température.

Sur l'ensemble des cycles expérimentaux de 1993 et de 1994, à absorption anormale, on n'observe aucun effet positif de l'apport de phosphore (60 et 120 unités) sur la teneur en phosphore de la biomasse. Seul le site S2bis, sur peuplement spontané à flouve, contredit ce schéma général. Sans antécédent de fertilisation par l'éleveur, sa position défavorable sur les courbes de 1993 et de 1994 reflète le faible niveau de fertilité des andosols désaturés. Le faible niveau azoté et un rendement modéré permettent donc une réponse à une fertilisation phosphatée à forte dose (cumul de deux apports de 120 kilos par hectare). On remarque une augmentation significative du niveau de nutrition en phosphore du site à dactyle S3 en 1994 par rapport à 1993 à la suite de deux apports cumulés de 120 kilos de phosphore par hectare. L'apport d'azote annule totalement ce phénomène. Sur les sites S6 et S7, à nutrition non limitante en phosphore, on note un effet limité de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore.

Le potassium

L'examen de l'ensemble des cycles expérimentaux sur les deux années permet d'identifier deux situations. La première concerne la zone de nutrition potassique excédentaire. Elle correspond aux sites installés sur prairies cultivées, qui bénéficient d'une rente de situation liée à plusieurs années de fertilisation avec un engrais de type 14N-7P-36K. Cet engrais « prairie », classique en métropole, a été préconisé pour compenser les exportations prévisibles de potassium dans des systèmes en voie d'intensification sur des sols désaturés, donc pauvres en bases échangeables (Cirad, 1988 ; Raunet, 1991). Cette pauvreté initiale en potassium des andosols désaturés perhydratés est confirmée par la seconde situation, qui se rencontre dans les sites sur prairies spontanées à flouve non fertilisées. Leur position est très en deçà de la courbe non limitante, ce qui traduit des déficits plus ou moins prononcés. L'effet de l'apport de 120 kilos par hectare sur ces sites est très net, il provoque une hausse moyenne de 100 % des teneurs (N0K0 à N0K120). De plus, il n'y a pas d'effet dépresseur en cas de fertilisation azotée (N1K0), la biomasse augmente sans faire baisser la teneur en potassium ; la loi de dilution reste normale.

Le comportement du cation K^+ est donc très différent de celui de PO_4^{3-} dans les andosols étudiés. Le cation K^+ se déplace sur des distances de l'ordre du centimètre (Callot *et al.*, 1989), l'enrichissement de la solution du sol permet donc une mise à disposition correcte de cet élément pour le système racinaire. Les quantités de potassium échangeable sont faibles, en relation à une faible capacité d'échange cationique, mais cette carence est facilement compensée par des apports de potassium. On peut en conclure que la cinétique d'absorption du potassium suit la loi normale de dilution.

> Sur andosols désaturés, l'apport de potassium est indispensable mais à des doses certainement moindres que celles qui ont conduit à la situation actuelle de consommation de luxe qui caractérise les prairies cultivées.

Le cas particulier du phosphore

L'évaluation quantitative du phosphore assimilable du sol

Les teneurs en phosphore total des sites expérimentaux atteignent de fortes valeurs, de 1 000 à 2 500 parties par million. Comment expliquer alors les nutritions phosphatées très insuffisantes mises en évidence par l'analyse chimique du végétal ? Les méthodes d'extraction du phosphore utilisées en routine dans les analyses de sols évaluent la fraction assimilable du phosphore. Le laboratoire du Cirad à Saint-Denis a adopté la méthode Olsen-Dabin, largement employée pour les sols tropicaux. A première vue, il y a une bonne relation (r^2 = 0,7) entre le phosphore estimé disponible par cette méthode et les indices de nutrition minérale calculés par la méthode proposée par Duru (1992a ; 1992b). Les résultats montrent que sa précision diminue dans des situations où le phosphore du sol devient plus disponible pour la plante. Elle semble donc bien apte à déceler les situations de sous-nutrition en phosphore qui prévalent sur andosols. Sur un nombre restreint d'échantillons de sols (16), elle a été confrontée à deux autres méthodes d'extraction moins agressives : la méthode Olsen et une méthode d'extraction douce « à l'eau ». Ces méthodes identifient mieux les sites à nutrition non limitante en traduisant mieux la capacité du sol à fournir du phosphore assimilable. Avant de conclure quant à la méthode la plus efficace dans le contexte local, il sera nécessaire de valider ces résultats sur un plus grand nombre de situations. Cependant, Raunet (1991) et Checkouri (1991) soulignent également les faiblesses de la méthode Olsen-Dabin dans la mise en évidence de carences nutritionnelles en phosphore.

Le pouvoir fixateur des andosols : le cas des couverts prairiaux

La méthode de cinétique d'échange isotopique permet de caractériser le pool des ions phosphates assimilés sans avoir à extraire le phosphate du sol, c'est-à-dire sans le modifier (Fardeau, 1993). La cinétique d'échange, ou délai de disponibilité du phosphore assimilable dans les différents compartiments d'ions PO_4, varie de 1 minute à plus de 1 an. Le phosphore dans le sol va d'abord remplir les compartiments à long délai puis ceux qui le libèrent plus facilement. Ces processus déterminent le pouvoir fixateur en phosphore d'un sol. Un certain nombre de paramètres permettent de le quantifier (Fardeau, 1993). Un sol aura un pouvoir fixateur d'autant plus faible que la quantité d'ions phosphates libres dans la solution du sol sera élevée. Ces méthodes ont été appliquées à trois des sites, afin de décrire les différents états du phosphore disponible en relation avec l'indice de nutrition (Blanfort, 1998).

L'ensemble des sites présente un pouvoir fixateur élevé, ce qui conforte les résultats sur le comportement anormal d'absorption du phosphore mis en évidence sur ces sites. Les sites à houlque S6 et S7 sont les seuls à avoir un faible pouvoir fixateur, ce qui explique que la dynamique d'absorption du phosphore (figure 18) y soit conforme à la loi de dilution proposée par Salette et Huche

(1991). Ces sites ont fait l'objet d'une fertilisation régulière depuis plusieurs années, ils se différencient donc nettement du site S2bis à flouve, qui n'a jamais été fertilisé. Par rapport au dactyle, la houlque est moins exigeante. Les prairies à houlque sont aussi exploitées de façon moins intensive, les prélèvements de phosphore ont donc pu y être moins forts. Enfin, l'application régulière de fumier est sans doute à l'origine d'un apport plus important de phosphore organique. L'ensemble de ces paramètres confirme le pouvoir fixateur des andosols caractérisant les sites expérimentaux sur lesquels on observe des dynamiques de dilution du phosphore anormales. L'effet du sol est donc clairement démontré par la mise en évidence d'une biodisponibilité très faible de cet élément.

Les facteurs d'indisponibilité du phosphore dans le sol

Une faible capacité d'échange cationique est l'un des éléments qui concourent à un faible niveau de nutrition phosphatée. La capacité d'échange cationique des andosols est faible au pH bas du sol, ce qui se confirme sur les sites expérimentaux, où elle se situe autour de 10 milliéquivalents pour 100 grammes, pour des pH de 4,5 à 5,9. La capacité de fixation de l'ion PO_4 sur le complexe argilo-humique est donc déjà limitée. Conformément à d'autres auteurs (Fritz, 1967 ; Truong *et al.*, 1974), la présence d'aluminium échangeable sur les sites étudiés serait aussi responsable du pouvoir fixateur des sols. On constate une relation (r^2 = 0,76) entre la baisse de la nutrition en phosphore et l'augmentation de la teneur en aluminium échangeable elle-même liée à la baisse du pH. La présence d'aluminium échangeable sur andosols serait liée à un pH égal ou inférieur à 5 (Raunet, 1990). Les ions Al^{3+} constituent des sites de piégeages pour le phosphore sous forme d'hydroxydes d'aluminium et de silicates d'alumine.

L'effet du chaulage

Sur l'ensemble des sites expérimentaux, aucun effet significatif de l'apport de 1,5 tonne de chaux par hectare n'a été observé sur la teneur en phosphore. La faible durée des expérimentations (apport cumulé sur deux ans) n'a pu lever les phénomènes de blocage du phosphore qui viennent d'être décrits. Il n'en demeure pas moins qu'avant toute fertilisation, il convient de relever le pH du sol au-dessus de 5,5 par des apports de chaux magnésienne : 1 tonne par hectare à la création de prairies et 500 kilos par hectare en entretien, en mai et en juin (Blanfort et Thomas, 1997). C'est la condition indispensable d'une bonne assimilation des engrais.

Les résultats permettent de considérer que la loi de dilution du phosphore proposée par Salette et Huche (1991) est utilisable dans les conditions locales de l'île. Les sites sur lesquels la loi s'applique parfaitement sont des sites à faible pouvoir fixateur du phosphore. Les autres sites, sur lesquels des distorsions importantes sont apparues, sont des sols à pouvoir fixateur élevé.

L'effet de la fertilisation azotée sur la flore prairiale

Les relevés floristiques, réalisés par la méthode des relevés linéaires points quadrats sur sept cycles d'observation, n'ont concerné que l'effet de l'apport d'azote sur la composition floristique de la végétation. La ressource azotée étant la plus marquante pour la croissance d'un peuplement prairial, elle constitue le facteur de compétition prédominant à court terme. Pour le phosphore et le potassium, la question sera abordée plus loin par une analyse comparative à l'échelle de la parcelle. La fertilisation azotée joue plus sur la biomasse des espèces que sur leur présence. Dans l'ensemble, l'apport d'azote augmente en moyenne de 50 % la proportion de graminées et diminue de 100 % celle des cypéracées et des dicotylédones. Les graminées fourragères comme le dactyle et le kikuyu sont deux fois plus abondantes dans les parcelles traitées à l'azote, de même que la flouve. Sans apport d'azote, le nombre d'espèces augmente, la biomasse des graminées prairiales spontanées, comme *Danthonia decumbens* et *Paspalum dilatatum,* est multipliée par deux, ainsi que celle des cypéracées comme *Carex flava,* les dicotylédones sont cinq fois plus abondantes.

A l'échelle d'un cycle d'observation de quelques mois, l'apport d'azote est donc déterminant pour la qualité et la diversité de la flore prairiale. Sur prairie cultivée, un niveau élevé de nutrition minérale azotée tend à privilégier les espèces les plus exigeantes au détriment des accompagnatrices et des adventices.