



## **Fertilité des sols et conseil en fertilisation**

Systeme expert d'interprétation  
des analyses chimiques  
des sols réunionnais

---

D. POUZET, P.-F. CHABALIER, P. LEGIER

Département des cultures annuelles  
Documents de travail du CIRAD-CA  
N° 1-98 - Avril 1998

## **Fertilité des sols et conseil en fertilisation**

Systeme expert d'interprétation  
des analyses chimiques  
des sols réunionnais

**Amendement et conseil en fertilisation  
pour la canne à sucre, les graminées fourragères,  
l'ananas et le bananier**

Programme canne à sucre

D. POUZET, P.-F. CHABALIER

Laboratoire d'analyse au Cirad Réunion

P. LEGIER

Centre de coopération internationale  
en recherche agronomique pour le développement

## RESUME

Le laboratoire d'analyse des sols du CIRAD Réunion dispose d'un système expert écrit sous FOX PRO ®, qui procède à l'interprétation automatique des résultats d'analyse, à l'élaboration de conseils en fumure de fond ainsi qu'aux conseils en fertilisation d'entretien pour la canne à sucre, les graminées fourragères, l'ananas et le bananier. Ce système édite automatiquement les bulletins d'analyse où figurent un diagnostic de fertilité du sol et des conseils en fertilisation. Les cinq dernières années de fonctionnement démontrent la cohérence du système.

Le diagnostic de fertilité est basé sur des seuils qui permettent de qualifier les résultats de l'analyse chimique. Les seuils sont spécifiques à chacun des six types de sol réunionnais : ferrallitique, andique perhydraté, andique non perhydraté, vertique, brun et brun andique. Ces sols ont été identifiés et localisés à partir des unités morphopédologiques et de la distribution des caractéristiques chimiques de 15.000 analyses. La localisation cartographique de l'échantillon à analyser permet au système expert d'identifier le type de sol et de charger la grille d'interprétation qui lui est adaptée.

Des informations spécifiques aux cultures sont ensuite utilisées par le système pour calculer des conseils en fumure de fond et d'entretien adaptés aux besoins des cultures et au niveau de production escompté. Les résultats sont traduits sur les bulletins d'analyse par des plans de fumure faisant intervenir lorsque nécessaire le calendrier d'apport et les doses traduites en engrais commercial.

Une analyse détaillée et critique des bases du système expert, de son fonctionnement et de l'application des résultats est développée par les auteurs parallèlement à des propositions d'amélioration.

**Mots Clefs :** *île de La Réunion, typologie des sols, système expert, analyse de sol, diagnostic de fertilité des sols, amendement calco-magnésien, correction en phosphore, conseil en fertilisation, fumure d'entretien, azote, potasse, canne à sucre, graminées fourragères, ananas, bananier.*

## SUMMARY

The soil analysis laboratory of CIRAD Réunion diffuses fertilization advice to the island's farmers, using an expert system under FOX PRO ®. Inputs are chemical characteristics of the soil and crop information. Chemical data processing allows to built a soil fertility diagnosis on which are based (a) soil correction with lime, phosphorus and sometimes potash requirement and (b) crop fertilization with nitrogen, phosphorus, potash and sometimes micronutrients needs for a production estimate. Four crops are now included in the system : sugarcane, forage grasses, pineapple and banana. The system output is an analytical and advise bulletin mailed to farmers. The last five years of the expert system uses highlights its relevance.

Soil fertility diagnosis is drawn by comparison of the soil sampled characteristics with threshold values. Threshold values were assessed from agronomic research results and statistic studies of the soils characteristics stored in the laboratory database. There are six different packs of thresholds values for the six types of soils identified in the island : ferralsols, andosols (two types), vertisols and cambisols (two types). Types of soils were deducted from a bulk of morphopedological information and chimical data distribution. Fifteen thousand soil analysis results of the laboratory database were involved in the process. The soil sample localisation allows the expert system to identify the type of soil and use the fitting threshold pack.

The system uses the soil diagnosis to calculate soil requirement and along with crop information, nutrient needs for production. The system formats the results according to crop, calendar of fertilizer application, expected production and commercial fertilizer availability. Final results are automatically printed and mailed.

An itimized and critical analysis of the system is made along with results application and improvements proposals.

**Keywords :** *Reunion island, soil typology, expert system, soil analysis, diagnosis of soil fertility, lime requirement, phosphorus requirement, crop fertilization advice, nitrogen, potash, sugarcane, grass fodder, pineapple, banana.*

## SOMMAIRE

<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	6
<i>LISTE DES CARTES</i> .....	7
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	7
<i>LISTE DES DOCUMENTS</i> .....	7
<i>AVANT-PROPOS</i> .....	8
<i>INTRODUCTION</i> .....	10
Historique.....	10
Principe Général.....	10
Plan.....	11
<i>FERTILITE DES SOLS - 1. Typologie morphopédologique et chimique</i> .....	12
Introduction.....	12
Informations source de la typologie.....	12
Zonage géographique.....	12
Unités de milieu et domaines pédogénétiques.....	12
Caractérisation chimique géoréférencée.....	13
Identification des unités de Sol.....	13
Méthodologie.....	13
Résultats.....	13
Distribution des variables chimiques par types de sol.....	13
Groupement des types de sol en unités.....	14
Introduction.....	14
Découpage géographique.....	14
Regroupement géographique.....	15
Ajustement des cas indéterminés.....	16
Contrôle des classements.....	16
Liens entre variables chimiques par unité de sol.....	17
Situation actuelle.....	18
Stockage des informations.....	18
Codage des sols.....	18
Représentation géographique.....	20
Discussion.....	20
<i>FERTILITE DES SOLS - 2. Caractérisation des Seuils</i> .....	25
Introduction.....	25
Le Principe des Seuils.....	25
Les Seuils de l'Amendement calco-magnésien.....	26
Le pH.....	26
Les Bases.....	26
Le Calcium.....	26
Le Magnésium.....	27
Le Rapport Mg/Ca.....	27



Les seuils de la fertilisation potassique .....	27
La capacité d'échange cationique (CEC) .....	27
Le Potassium .....	28
Les seuils de la fertilisation phosphorique .....	29
Introduction .....	29
Le phosphore assimilable .....	29
Le phosphore total .....	30
Les seuils de la fertilisation azotée .....	30
Les autres seuils .....	30
Le taux de saturation .....	31
Le Carbone .....	31
Le Rapport C/N .....	31
Les oligo-éléments .....	31
<b>FERTILITE DES SOLS - 3. Le Diagnostic de Fertilité.....</b>	<b>33</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>33</b>
<b>L'acidité.....</b>	<b>33</b>
Diagnostic pH / Ca.....	33
Diagnostic Mg .....	33
Diagnostic du statut calco-magnésien.....	34
<b>Diagnostic P .....</b>	<b>35</b>
<b>Diagnostic K .....</b>	<b>35</b>
<b>Diagnostic N/matière organique .....</b>	<b>36</b>
<b>Diagnostic oligo-élément .....</b>	<b>36</b>
<b>Données manquantes.....</b>	<b>36</b>
<b>Utilisation du Diagnostic Sol.....</b>	<b>36</b>
<b>Discussion .....</b>	<b>37</b>
Les Seuils .....	37
La Profondeur Utile .....	37
L'Echelle de Travail .....	38
L'Echantillonnage .....	38
Le Repérage Géographique .....	38
Les Indices de Fertilité.....	39
<b>LA PLANTE.....</b>	<b>40</b>
<b>Le Choix des Cultures .....</b>	<b>40</b>
<b>Méthodologie .....</b>	<b>40</b>
<b>LA CANNE A SUCRE.....</b>	<b>42</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>42</b>
<b>L'amendement et l'entretien calco-magnésien.....</b>	<b>42</b>
Les Besoins de la Culture .....	42
Le choix des amendements.....	43
La dose conseillée .....	43
Le calcul des doses .....	43
L'Ajustement des Résultats .....	44
Le détail du conseil .....	44
Distribution géographique des conseils .....	46
Discussions .....	49

Problématique.....	49
<i>Calendrier d'intervention</i> .....	49
<i>L'amendement</i> .....	49
<i>La dose</i> .....	50
Rappel de la méthode réunionnaise.....	50
La méthode guadeloupéenne.....	50
La méthode hawaïenne.....	51
La méthode brésilienne.....	51
Eléments de choix.....	52
<b>Le Phosphore.....</b>	<b>52</b>
Méthodologie.....	52
Amendement.....	52
Entretien annuel.....	53
Le Conseil.....	53
<b>L'Azote.....</b>	<b>55</b>
<b>Le Potassium.....</b>	<b>57</b>
<b>Le Plan de Fumure.....</b>	<b>60</b>
Les Principes.....	60
Le Conseil.....	60
Discussions.....	61
Représentation et représentativité du conseil.....	61
Politique de la fertilisation azotée de la canne.....	61
<i>Pratique &amp; tendances</i> .....	61
<i>Lixiviation</i> .....	63
<i>Forme chimique</i> .....	63
<i>Dénitrification</i> .....	63
<i>Le fractionnement</i> .....	63
<i>Politique de la fertilisation azotée</i> .....	63
<b>LES GRAMINEES FOURRAGERES.....</b>	<b>66</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>66</b>
<b>Méthodologie.....</b>	<b>66</b>
<b>La correction du pH et du phosphore.....</b>	<b>68</b>
<b>La fumure d'entretien.....</b>	<b>68</b>
L'Azote et le Phosphore.....	68
Le Potassium.....	68
<b>Le Conseil.....</b>	<b>69</b>
L'Amendement du sol.....	69
L'Entretien de la culture.....	69
La Potasse.....	69
Le Plan de Fumure.....	69
<i>Production semi Intensive</i> .....	69
<i>Production Intensive</i> .....	70
Discussions.....	70
<b>L'ANANAS.....</b>	<b>72</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>72</b>
<b>La Correction du pH.....</b>	<b>72</b>
<b>Le Phosphore.....</b>	<b>73</b>
<b>Le Potassium.....</b>	<b>74</b>

L'Azote .....	74
Les Oligo-éléments.....	74
Plan de Fumure.....	74
<b>LE BANANIER</b> .....	<b>76</b>
Introduction.....	76
Correction du pH et du Phosphore.....	76
Le Phosphore d'entretien.....	76
Le Potassium.....	76
L'objectif.....	77
La Dose.....	77
Le Magnésium.....	78
L'Azote.....	78
Le plan de fumure.....	78
<b>L'ENVIRONNEMENT DU SYSTEME</b> .....	<b>80</b>
Introduction.....	80
La Vitesse de Diffusion du Conseil.....	80
L'Analyse.....	80
La Diffusion.....	80
Les Contraintes Agricoles.....	80
La Compréhension du Conseil.....	81
La Cohérence du Conseil.....	81
La Diffusion du Logiciel.....	81
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>82</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>86</b>
<i>I. Méthodes d'Analyse du Laboratoire CIRAD/Réunion</i> .....	<i>87</i>
<i>II. Limites Supérieures des Variables de Fertilité</i> .....	<i>89</i>
<i>III. Conseils en Chaulage (canne, fourrages et bananier)</i> .....	<i>90</i>
<i>IV. Détail des Conseils en NPK</i> .....	<i>92</i>
Fertilisation Phosphatée.....	92
Amendement (canne, fourrage, bananier).....	92
Entretien (canne).....	92
Fertilisation Azotée (canne).....	92
Fertilisation Potassique.....	93
<i>V. Code des micro-régions</i> .....	<i>94</i>
<i>VI. Engrais disponibles à La Réunion</i> .....	<i>96</i>
<i>VII. Codes des Types de Sol de La Réunion</i> .....	<i>97</i>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sous types de sols créés par les études de distribution des variables chimiques (code STIPA).....	14
Tableau 2 : Description des principales caractéristiques de fertilité par unité de sol.....	17
Tableau 3 : Correspondance entre unités et types de sol.....	20
Tableau 4 : Unités de milieu hétérogènes pour les variables chimiques.....	20
Tableau 5 : Seuils (S) de caractérisation du pH.....	26
Tableau 6 : Seuils du Calcium (mé/100 g).....	26
Tableau 7 : Relations entre pH et teneur en calcium (mé/100g).....	27
Tableau 8 : Seuils du Magnésium (mé/100 g).....	27
Tableau 9 : Seuils du Rapport Mg/Ca.....	27
Tableau 10 : Relations entre CEC & teneur en Ca (mé/100 g).....	28
Tableau 11 : Seuils de la CEC.....	28
Tableau 12 : Seuils du rapport en pour-cent entre le potassium et la CEC.....	28
Tableau 13 : Seuils du potassium.....	28
Tableau 14 : Seuils du Phosphore Assimilable.....	29
Tableau 15 : Seuils du Phosphore Total.....	30
Tableau 16 : Densité apparente et coefficient de minéralisation.....	30
Tableau 17 : Seuils de l'Azote.....	30
Tableau 18 : Seuils du Taux de Saturation.....	31
Tableau 19 : Seuils du Carbone.....	31
Tableau 20 : Seuils du rapport C/N.....	31
Tableau 21 : Seuils pour les oligo-éléments.....	32
Tableau 22 : Diagnostic de pH du sol.....	33
Tableau 23 : Diagnostic de fertilité du sol en Magnésium.....	33
Tableau 24 : Diagnostic d'acidité du sol.....	34
Tableau 25 : Diagnostic de fertilité du sol en phosphore.....	35
Tableau 26 : Diagnostic simplifié de fertilité du sol en phosphore.....	35
Tableau 27 : Diagnostic de la fertilité potassique du sol.....	36
Tableau 28 : Diagnostic de fertilité du sol en azote.....	36
Tableau 29 : Fonctionnement du diagnostic de sol par défaut.....	37
Tableau 30 : Quelques productions végétales de La Réunion en 1993 (AGRESTE, 1994).....	40
Tableau 31 : Conseil en amendement calco-magnésien pour la canne à sucre.....	43
Tableau 32 : Doses recommandées d'apport calco-magnésien sur canne à sucre.....	44
Tableau 33 : Identification des phrases définissant le conseil en amendement calco-magnésien.....	46
Tableau 34 : Distribution des conseils en amendement calco-magnésien.....	46
Tableau 35 : Chaulage moyen exprimé en $t \cdot ha^{-1}$ de $CaCO_3$ pour 5 andosols de la Réunion.....	52
Tableau 36 : Conseil en fertilisation phosphatée de la canne à sucre.....	52
Tableau 37 : Distribution des conseils en correction du sol en phosphore (période du 01/91 au 06/97).....	53
Tableau 38 : Détail des conseils en fertilisation phosphatée de la canne à sucre.....	55
Tableau 39 : Distribution des conseils en fumure d'entretien de la canne (unités pour 80-100 t produites).....	55
Tableau 40 : Conseil en fertilisation azotée de la canne à sucre.....	55
Tableau 41 : Conseil en fertilisation potassique de la canne à sucre.....	57
Tableau 42 : Distribution des combinaisons de plan de fumure du laboratoire (01/91 au 07/97).....	61
Tableau 43 : Composition azotée des principaux engrais canne et prairie.....	62
Tableau 44 : Conseil en fertilisation azotée et phosphatée pour l'entretien des graminées fourragères.....	68
Tableau 45 : Diagnostic de fertilisation potassique pour les graminées fourragères.....	68
Tableau 46 : Plan de fumure conseillé en système fourrager semi intensif.....	69
Tableau 47 : Plan de fumure conseillé en système fourrager intensif.....	70
Tableau 48 : Diagnostic d'acidité pour l'ananas.....	72
Tableau 49 : Diagnostic de fertilité en phosphore pour l'ananas.....	73
Tableau 50 : Diagnostic de la fertilité potassique du sol pour l'ananas.....	74
Tableau 51 : Analyses effectuées par le laboratoire depuis 1991.....	81
Tableau 52 : Limites supérieures des variables utilisées pour l'interprétation graphique des analyses.....	89
Tableau 53 : Localisation des phrases définissant le conseil en amendement calco-magnésien.....	90
Tableau 54 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation phosphatée.....	92



Tableau 55 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation azotée .....	92
Tableau 56 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation potassique .....	93
Tableau 57 : Micro-régions et lieux-dits (partie 1) .....	94
Tableau 58 : Micro-régions et lieux-dits (partie 2) .....	95
Tableau 59 : Liste et composition des engrais commerciaux .....	96
Tableau 60 : Typologie des sols réunionnais selon des critères pédogénétiques et chimiques .....	97

## LISTE DES CARTES

Carte 1 : Unités de sol par carrés de 500 m de la base de données du laboratoire (2927 carrés de 25 ha au 1/8/97). 19	
Carte 2 : Distribution des unités de sol par micro-régions.....	21
Carte 3 : Zones climatique (22) adaptées au découpage des micro-régions (155) .....	22
Carte 4 : Micro-régions repérées par leurs codes postaux (Annexe V).....	23
Carte 5 : Répartition des 7553 analyses de sol sous canne réalisées depuis janvier 1991 .....	47
Carte 6 : Répartition des conseils en amendement calco-magnésien des sols sous canne.....	48
Carte 7 : Répartition des conseils en correction phosphatée des sols sous canne (période du 01/91 au 06/97). .....	54
Carte 8 : Tendances de la fertilisation phosphatée d'entretien de la canne à sucre après correction du sol .....	56
Carte 9 : Tendances de la fertilisation azotée d'entretien de la canne à sucre .....	58
Carte 10 : Tendances de la fertilisation potassique d'entretien de la canne à sucre.....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme simplifié du programme.....	10
Figure 2 : Distribution de quelques variables par type de sol.....	14
Figure 3 : Plan principal de projection des 35 types de sol avec introduction des principales variables chimiques .....	15
Figure 4 : Plan principal de projection de 28 types de sol caractérisés par 9 variables.....	15
Figure 5 : Plan principal de projection des 28 types de sol après introduction des variables associées aux pH.....	16
Figure 6 : Relations entre le pH et le Ca pour les 6 unités de sol .....	17
Figure 7 : Relations entre la CEC et le Ca pour les 6 unités de sol .....	18
Figure 8 : Origine des seuils d'interprétation des analyses de sol.....	25
Figure 9 : Relation entre le phosphore total et le phosphore assimilable.....	29
Figure 10 : Organigramme de fonctionnement du système expert pour la canne à sucre .....	42
Figure 11 : Organigramme des conseils pour les graminées fourragères.....	66
Figure 12 : Organigramme des conseils pour l'ananas.....	72
Figure 13 : Organigramme des conseils pour le bananier .....	76

## LISTE DES DOCUMENTS

Document 1 : Bulletin d'analyse canne à sucre.....	45
Document 2 : Bulletin d'analyse fourrage.....	67
Document 3 : Bulletin d'analyse ananas.....	75
Document 4 : Bulletin d'analyse bananier .....	79

## AVANT-PROPOS

Le système expert d'interprétation des analyses de sol du CIRAD Réunion est à la base de tous les conseils en fertilisation diffusés depuis une dizaine d'années dans l'île pour les cultures de canne à sucre, de graminées fourragères, d'ananas et de bananier. Le laboratoire du CIRAD gère ainsi les demandes émanant des trois quarts de la surface agricole utile de l'île (Tableau 30 et page 40). Il était donc important de décrire de manière critique ce système tout en indiquant les normes et modalités de son utilisation afin de répondre :

- aux demandes d'information des agriculteurs et des structures de développement relatives aux justifications des conseils en fertilisation ;
- aux besoins de transparence de la recherche, face à la complexité des critères aboutissant à la décision de conseil, pour promouvoir des améliorations et ;
- aux besoins d'appui pour la mise au point de systèmes d'interprétation automatique des analyses de sol exprimés par de nombreux usagers et laboratoires extérieurs avec lesquels nous sommes en rapport, notamment à Madagascar, à Mayotte, aux Comores où dans des complexes sucriers.

Le système que nous décrivons repose sur un état des connaissances établi en 1992. Une actualisation pourra être envisagée car le nombre d'analyses de sol disponibles a plus que doublé depuis, pour dépasser les 30 000.

Le système n'est pas transposable en l'état à d'autres situations géographiques, où les types de sol, les conditions climatiques, les cultures et l'environnement économique sont différents de ceux de La Réunion. Ses fondements dépendent en effet des sources d'informations disponibles et de leurs traitements. Ils dépendent aussi d'approximations destinées à ajuster les résultats aux réalités économiques et à combler des manques de connaissances scientifiques relatives aux sols, aux cultures et aux relations entre les deux. Il est évident que plus la pression de recherche sera grande et les données analytiques nombreuses, plus les approximations seront limitées. Il est aussi évident que plus les conditions économiques seront contraignantes, plus il sera fait appel aux stocks du sol et aux possibilités de restitution pour assurer l'alimentation minérale des cultures.

Les fondements du système dépendent aussi des méthodes d'analyse des sols mises en œuvre, notamment pour la CEC et le phosphore assimilable, deux méthodes différentes n'aboutissant pas forcément à des résultats corrélés.

Toute analyse de sol fait l'objet d'une interprétation qui implique l'existence de clefs d'interprétation et l'élaboration possible d'un système expert. Celui-ci va constituer un outil de réflexion et d'amélioration du conseil. Le système réunionnais peut servir de canevas, d'exemple ou de modèle à la construction de versions adaptées aux sols et aux cultures spécifiques à d'autres sites. Les grilles d'interprétations de la fertilité des sols réunionnais sont adaptables à partir de résultats locaux d'essais de fertilisations et de connaissance des sols. Ce travail doit être réalisable notamment en Afrique de l'Ouest où nous disposons de synthèses agronomiques (Pieri, 1989) et de nombreuses études pédologiques et morphopédologiques. La transposition à Mayotte et aux Comores est facilitée par la proximité de certains types de sol (Brouwers, 1973 ; Latrille, 1975, 1977, 1981), mais le conseil devra être adapté aux cultures spécifiques de ces îles et à l'environnement économique et notamment aux possibilités d'utilisation d'engrais minéraux.

Les informations conduisant aux conseils ont été séparées, lorsque cela était possible, selon qu'elles caractérisent le sol ou la culture. Le sol ne peut en effet être réduit au seul rôle de magasin de stockage minéral temporaire que lui est implicitement attribué lorsque la fertilisation ne prend en compte que la restitution des exportations minérales des cultures. La séparation n'est cependant jamais complète, la production végétale étant forcément à la base de l'élaboration des diagnostics de fertilité du sol. Cette séparation est schématisée sous forme d'organigramme pages 42, 66, 72 et 76.

La programmation qui permet de passer automatiquement du résultat analytique au conseil imprimé sur le bulletin d'analyse n'a pas été développée. Elle n'intègre pas de concepts novateurs particuliers et peut être mise en œuvre à partir de nombreux outils informatiques.

Les ressources utilisées pour ce travail, hors bibliographie et données du laboratoire, sont le découpage climatique de la météorologie nationale et les cartes IGN. Nous avons bénéficié pour conduire à terme cette synthèse, de l'appui de Blaise Rochet, VAT au CIRAD Réunion, qui a notamment participé à la vérification des abaques employées pour les diagnostics de fertilité et à la cartographie des pixels de localisation des analyses de sol sous MapInfo ®.



# INTRODUCTION

## Historique

Un système expert de conseil en fertilisation a été écrit sous FOX-PRO © par Patrick Legier, responsable du laboratoire d'analyse du CIRAD CA à la Réunion, à partir des informations et des résultats de recherche de Pierre-François Chabalière, agronome au CIRAD CA.

La construction du programme a débuté en 1986. Elle s'est inspirée des recherches dans le domaine de l'interprétation automatique des analyses de sol (Remy et Martin-Lafliche, 1973) et de modèles tels que ceux de la SCPA (société commerciale des potasses et de l'azote), décrits par Quemener (1985) ou développés par Snoeck et Snoeck (1988) et Snoeck et Jardin (1990) pour le caféier.

Les conditions pédo-climatiques propres à la Réunion ont tout d'abord été introduites dans un modèle destiné à la canne à sucre. De nombreuses améliorations furent ensuite apportées au cours du temps, en fonction des résultats de la recherche de données bibliographiques et de la cohérence des conseils. Des cultures autres que la canne furent introduites par la suite, au fil des demandes de la profession.

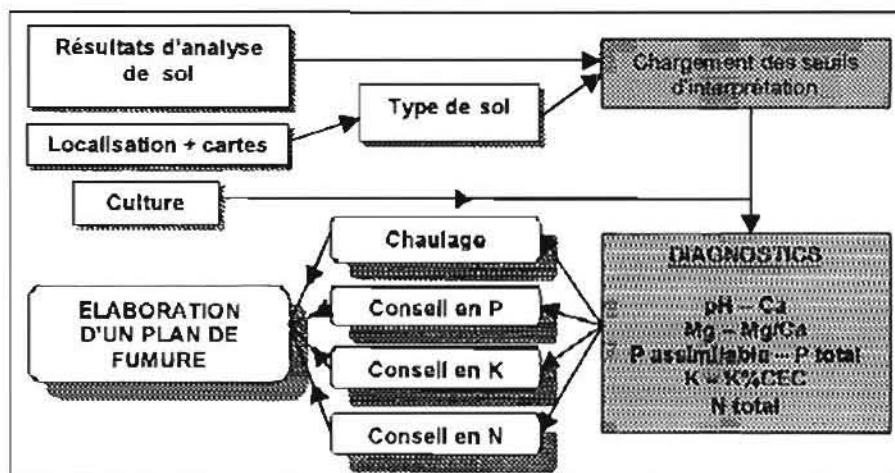
Les améliorations successives furent intégrées au système, sans qu'aucun descriptif n'ait été publié. Il nous est donc apparu opportun d'en faire un compte rendu détaillé afin d'identifier les seuils retenus pour chaque décision, et de faire la part entre les résultats de la recherche et les hypothèses de travail. Ces informations sont en effet indispensables à la compréhension et à l'amélioration des conseils proposés par le système. Elles définissent aussi le cheminement scientifique, clef de l'adaptation du programme à d'autres conditions de milieu et à d'autres cultures.

## Principe Général

Les informations prises en compte sont la culture, le type de sol et ses caractéristiques chimiques. Le résultat est une proposition de fertilisation adaptée à chaque situation (Chabalière, 1989). Le programme actuel traite quatre productions agricoles de l'île : La canne à sucre, les Graminées fourragères, l'ananas et le bananier.

Le logiciel repose sur la notion de fertilité chimique des sols. Il est construit autour d'un axe pédologique, sur lequel les besoins spécifiques des cultures viennent se greffer (Chabalière et al., 1984 ; Chabalière et Gaudy, 1988 ; Chabalière, 1988). Il définit d'une part les corrections nécessaires pour amener les caractéristiques chimiques du sol à un niveau acceptable pour la culture et d'autre part un plan de fumure permettant son entretien.

Figure 1 : Organigramme simplifié du programme



Les différentes phases du fonctionnement du programme (Figure 1) se résument comme suit :

- Les sols arrivent au laboratoire avec leurs références géographique et l'indication de la culture.
- Les résultats d'analyse sont transférés dans la base de données du système (transfert automatique depuis les appareils d'analyse chimique du laboratoire).
- La référence géographique permet au système d'identifier le type de sol. Les sols non

géoréférencés ne sont pas interprétés, ou reçoivent un code générique correspondant au type de sol probable selon leur lieu approximatif d'origine.

- Un diagnostic qualitatif de fertilité du sol, basé sur 5 niveaux croisés de fertilité (4 seuils) est alors établi selon le type de sol.
- Des propositions d'amendements calco-magnésiens et de fumure de correction (P mais aussi K pour le bananier) sont alors évaluées pour amener le sol à un niveau compatible avec une production agricole satisfaisante.
- La capacité du sol corrigé (amendement et corrections supposés réalisés) à alimenter la plante est ensuite mise en concordance avec les besoins de la culture afin d'élaborer des conseils en fumure d'entretien en rapport avec le rendement estimé.
- Des commentaires sont ensuite choisis par culture dans une bibliothèque de phrases pour établir des conseils en amendement et fertilisation par élément (N, P, K, Ca, Mg).
- Un plan de fumure synthétique est finalement élaboré à partir des conseils par élément. Il donne un conseil en engrais du commerce à partir d'une liste de formulations binaires ou ternaires élaborées par les fabricants d'engrais local.

## Plan

La caractérisation de la fertilité des sols fait l'objet des trois premiers chapitres, où sont traités respectivement la typologie des sols, les seuils de teneur minérales et les diagnostics de fertilité.

L'établissement des conseils en fertilisation pour la canne à sucre est analysé dans le détail après un court chapitre présentant les productions agricoles réunionnaises. Les conseils en fertilisation des graminées fourragères, de l'ananas et du bananier sont abordés dans les trois chapitres suivants en limitant les informations à celles qui différencient ces conseils spécifiques de ceux de la canne à sucre. Des informations concernant la mise en oeuvre du système sont fournies en fin de rapport.

# FERTILITE DES SOLS - 1. Typologie morphopédologique et chimique

## Introduction

La notion de fertilité repose sur un classement et un regroupement des sols en fonction de leurs origines et de leurs caractéristiques chimiques. La phase initiale de cette typologie est une identification géographique de zones cultivées qui présentent des conditions pédoclimatiques uniformes. Ce découpage a été amélioré par la suite en introduisant des caractéristiques morphopédologiques et chimiques.

## Informations source de la typologie

### Zonage géographique

Le premier zonage géographique de l'île date de 1986. Il a été conçu par Chabalier en collaboration avec les agents techniques du développement. Le but était de faciliter le repérage des types de sol lors des prélèvements pour analyse. Il s'agissait aussi de mieux adapter les conseils en fertilisation des cultures aux micro conditions pédoclimatiques. Ce travail antérieur à la publication des cartes morphopédologiques de l'île par Raunet (1988), repose sur la connaissance :

- Des potentialités de production et du caractère agricoles uniformes des régions (estimation des agents de terrain du développement).
- De la classification pédologique des sols provenant des études de Riquier (1960), Didier de Saint-Amand (1965), Bertrand (1972) et Riquier et Zebrowski (1975).
- De caractéristiques morphopédologiques éparses issues de prospections localisées à des projets. Les principales études mises en jeu sont celles de Angé (1974), Brouwers et Raunet (1981), Brouwers (1982, 1984) et Raunet (1986).
- Du découpage climatique de la météorologie nationale (Carte 3).
- Des limites naturelles susceptibles de servir de frontières entre zones (ravines, réseau de communication...).
- Des limites des secteurs d'activité des agents du développement.
- Des limites administratives correspondant aux codes postaux.

Cent vingt micro-régions au climat homogène et caractérisées par un seul type de sol ou un type dominant ont ainsi été créées. L'identification des types de sol a été par la suite largement améliorée grâce à la couverture morphopédologique de l'ensemble de l'île et l'accumulation de résultats d'analyses chimiques.

### Unités de milieu et domaines pédogénétiques

Les **unités de sol** sont définies à partir de l'étude morphopédologique de l'île au 1/50.000 (Raunet, 1988). L'auteur y cartographie 93 **unités de milieu** décrites dans des publications ultérieures (Raunet, 1990, 1991). Chaque unité de milieu est un ensemble morphopédologique homogène, à l'échelle considérée, pour le matériau constitutif, le climat, le modelé, le sol qui en résulte, la végétation naturelle spécifique et par voie de conséquence le fonctionnement hydrique.

Ces unités ont été groupées en 27 **domaines pédogénétiques** dans une carte simplifiée au 1/250.000 (Raunet, 1989). Ce groupement synthétique des 93 unités est basé sur les caractéristiques des **sols**. Il a été codifié à partir des normes STIPA (1982) élaborées par l'INRA et l'IRAT. Ces normes ont été adaptées aux conditions réunionnaises par PF Chabalier. Le détail de cette classification est publié en annexe (page 97). Seuls 24 des 27 domaines pédogénétiques ont été conservés, par élimination des unités sans intérêt pour l'agriculture. N'ont pas été retenus :

- Les landes éricoides de haute altitude constituées de placages cendreaux à andosols perhydratés cryptopodzoliques, saupoudrage de lapilli à andosols vitriques, rocaillies et dalles affleurantes, cônes de scories...
- Les coulées de lave non altérées sans recouvrement cendreaux composées de coulées brutes et cônes de scories.
- Les remparts constitués de lithosols et placages colluvionnés brunifiés ou andiques.

Ces domaines pédogénétiques ainsi définis, qui constituent des **types de sols**, sont à l'origine de l'identification des **unités de sol**.

### Caractérisation chimique géoréférencée

La troisième source d'information est la banque de données du laboratoire d'analyse chimique des sols. Sa création sous forme informatique date de 1985. Lors de son utilisation pour définir les types de sol en 1992, elle contenait les résultats analytiques complets et vérifiés (élimination de tous les échantillons présentant des données incomplètes) de 15.000 échantillons de sol géoréférencés.

La localisation géographique est réalisée pour chaque échantillon par le relevé des coordonnées Gauss-Laborde des cartes IGN au 1/25.000 du lieu de prélèvement. La précision du repérage se situe au départ entre 100 et 500 m. Elle est désormais inférieure à 100 m.

Les mailles retenues pour regrouper les informations sont des 'pixels' de 25 hectares, qui correspondent à des carrés de 500 m. de côtés, soit, pour La Réunion, 0,271' en latitude et 0,289' en longitude (IGN, 1993). Seuls les pixels associés à des données sont représentés dans la base (Carte 1). Un nouveau pixel est créé lorsqu'une analyse provient d'un site non encore répertorié.

Le fichier de résultats des analyses est constitué automatiquement par relais informatique à partir des appareils d'analyse chimique. Il renferme des informations caractérisant la fertilité chimique des échantillons : humidité de travail (séchage à l'air), pH-eau, pH-KCl, N total, P total et assimilable, bases échangeables (Ca, Mg, K) et capacité d'échange (CEC). Ces variables chimiques caractérisent les 30 premiers centimètres du sol (profondeur théorique de prélèvement). Les méthodes d'analyse du laboratoire sont indiquées en annexe 1.

### Identification des unités de Sol

L'unité de sol est définie par un ensemble de type de sols aux caractéristiques morphopédologiques et chimiques proches et différentes de celles d'autres unités. Leur définition repose sur les informations précédentes. Les résultats sont utilisés pour parfaire le micro-zonage de l'île.

### Méthodologie

La typologie des unités de sol est bâtie sur le traitement statistique des variables chimiques provenant des 15.000 analyses des 24 types de sol (C. Descuns, 1992).

L'étude descriptive met en jeu l'analyse de la distribution des variables et des analyses en composantes principales (ACP). Les variables étudiées sont groupées par type de sol et par micro-région géographique.

- L'analyse des distributions permet de créer, par des découpages géographiques adaptés, des unités de sol homogènes pour l'ensemble des variables. Le caractère homogène correspond à une distribution unimodale de l'ensemble des variables du domaine.
- L'ACP est utilisée pour regrouper de manière objective des types de sol en unités de sol et étudier les liaisons entre les variables.

L'homogénéité des unités de sol identifiées par l'ACP est contrôlée par comparaison d'une part des moyennes (moyenne  $\pm$  écart type) des types de sols par unités et d'autre part des régressions entre les principales variables corrélées par type de sol.

Le caractère uniforme des micro-régions pour les unités de sol est contrôlé par l'évaluation des indices comparant les caractéristiques moyennes de la région à celle de l'unité de sol (écart des moyennes entre région et unité rapporté à l'écart type de l'unité de sol soit  $Indice = (X_{région} - X_{unité}) / \sigma_{unité}$ ).

Les liaisons à l'intérieur de chaque unité de sol, entre les variables pH, Ca et CEC, servent au calcul de certains seuils de fertilité.

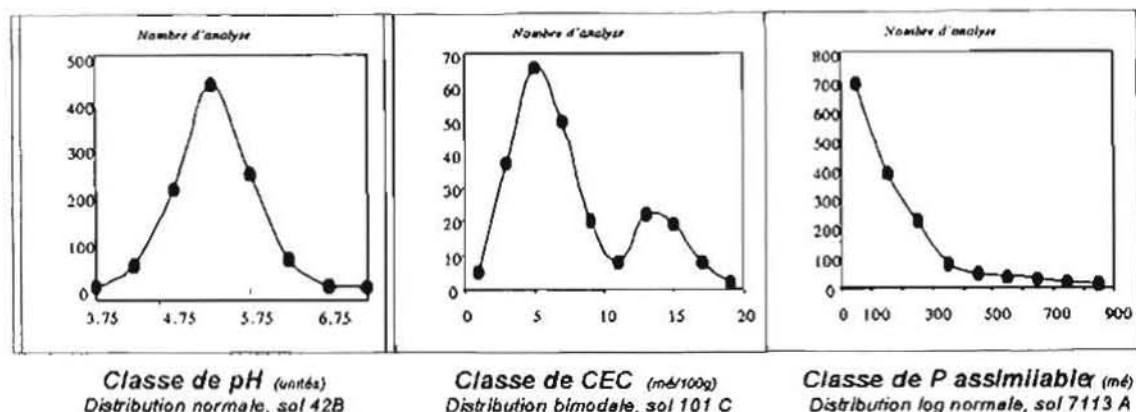
### Résultats

#### Distribution des variables chimiques par types de sol

La distribution des variables chimiques pour chacun des types de sol est généralement unimodale. Elle est le plus souvent normale pour le pH et log normale pour les bases et le phosphore (Figure 2).



Figure 2 : Distribution de quelques variables par type de sol



Le tri des types de sol est basé sur l'hypothèse que les distributions bimodales des variables correspondent à un mélange de deux types de sol différents. Cinq des 23 types de sol présentent des distributions bimodales pour certaines variables chimiques qui les caractérisent. Ces cinq types hétérogènes ont été découpés en 13 sous types (Tableau 1) identifiés par leur position géographique et caractérisés chacun par une distribution unimodale de l'ensemble des variables chimiques.

Tableau 1 : Sous types de sols créés par les études de distribution des variables chimiques (code STIPA)

TYPE DE SOL AVEC DISTRIBUTION MULTIMODALE	SOUS TYPES GEOGRAPHIQUES AVEC DISTRIBUTION UNIMODALE APRES DECOUPAGE	TYPES DE SOL RETENUS APRES ACP
42AA	42AA sud, 42AA nord, 42AA ouest	42 AA
101 C	101C est, 101C nord	101 C, 101 D
103	103A nord, 103A sud, 103B	103A, 103 B
1132	1132 nord, 1132 sud, 1132 ouest	1132n, 1132s, 1132wt
2430	2430 sud, 2430 nord	2430n, 2430s

Cette première étude de distribution des variables chimiques a ainsi conduit à créer 31 domaines pédogénétiques aux caractéristiques chimiques homogènes. Ce découpage présente cependant des limites. Le nombre insuffisant d'analyses chimiques pour certains types de sol a en effet conduit à réaliser des classements reposant sur la connaissance du milieu, sans support statistique de confirmation.

### Groupement des types de sol en unités

#### **Introduction**

Des séries d'ACP portant sur les variables chimiques ont été réalisées par type de sol et par micro-région afin de grouper les types de sol en unités. Les variables chimiques sont représentées par leur moyenne centrée réduite (matrice des corrélations).

Le nombre de types de sol traités varie d'une ACP à l'autre. Certains sols sont en effet mal représentés (cas des types STIPA 3100 et 1132w) ou modifie la représentation des autres sols (cas du type 7115 B). Les types de sols divisés en sous types géographiques ont été conservés dans certaines ACP afin de mieux évaluer le découpage en projetant ensembles et sous ensembles sur les mêmes plans.

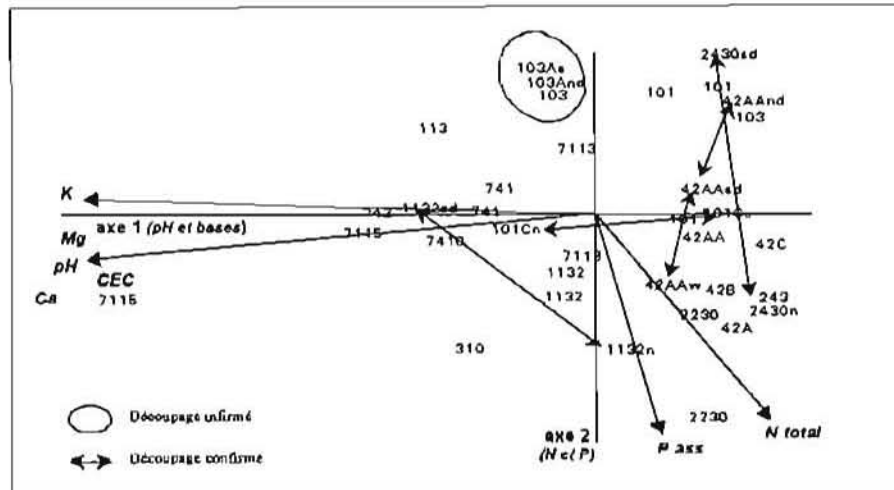
Certains sols ne sont pas toujours représentés du fait d'un nombre insuffisant d'analyses pour quelques variables chimiques (cas de l'humidité de travail qui correspond à l'humidité du sol après séchage à l'air). Le sol 42CA (andosols désaturés perhydratés chromiques cryptopodzolique sur cendre), localisé dans une zone non cultivée n'a pas fait l'objet de traitement statistique faute d'un nombre suffisant d'analyses. Il a été classé dans l'unité des andosols perhydratés. Il en est de même du type 711C (zones effondrées des cirques à matériaux détritiques)

#### **Découpage géographique**

Le découpage géographique a été étudié à partir de 35 types de sols constitués par les 24 types d'origine augmenté des 13 sous types (Tableau 1) et diminué des type 42CA et 711C. Huit variables sont introduites dans l'analyse : pH, N total, P assimilable, Ca, Mg, K, CEC et taux de

saturation. A noter que le phosphore total n'a pas été retenu comme variable du fait d'un nombre insuffisant d'analyses et de son lien généralement fort avec le phosphore assimilable (Figure 9). La contribution respective des trois axes principaux est de 68,6%, 13,5% et 8,8% de la variation totale. La valeur propre de l'axe 3 est suffisamment faible (0,706) pour limiter l'interprétation au plan 1-2. L'axe 1 est caractérisé par le pH et les bases. L'axe 2 est surtout formé des variables N total et P assimilable (Figure 3).

Figure 3 : Plan principal de projection des 35 types de sol avec introduction des principales variables chimiques

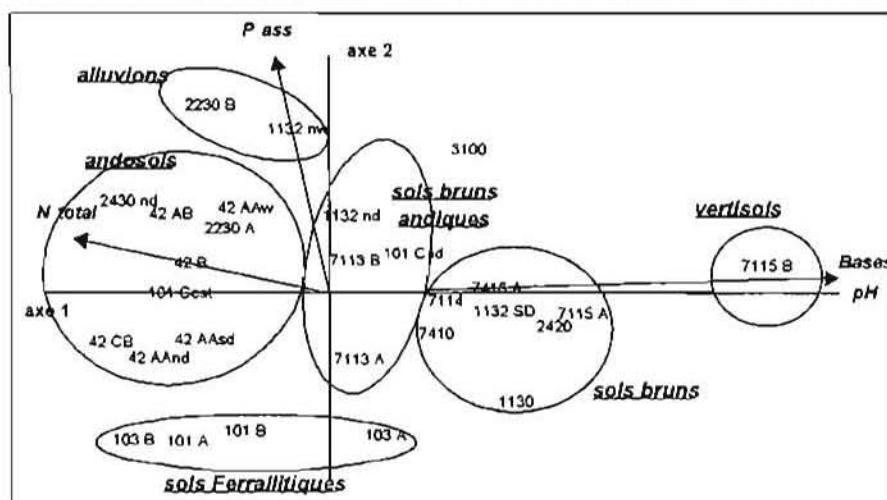


L'étude du plan principal de l'ACP confirme la validité du découpage des types 42AA, 101C, 1132, et 2430. Par contre, le découpage géographique du type 103A n'est pas justifié compte tenu de la proximité des sous types géographiques créés. Ces résultats sont confirmés par une ACP des mêmes 36 types de sol, portant sur 3 variables (pH, N et P ass), après élimination des variables fortement corrélées au pH (CEC, Ca, Mg, K).

### Regroupement géographique

Les mêmes variables ont été analysées pour 29 types de sols constitués des 35 précédents diminués des 4 types dont le découpage est confirmé (42AA, 101C, 1132 et 2430) et des deux sous types géographiques regroupés (103An et 103As).

Figure 4 : Plan principal de projection de 28 types de sol caractérisés par 9 variables.



Les axes sont formés par les mêmes variables que dans le cas précédent. L'axe 1 explique 69,3% de la variation totale tandis que les contributions respectives des axes 2 et 3 sont de 13,9% et 8,7%. L'axe 3 dont la valeur propre est de 0,692 n'a pas été retenu. La projection sur le plan principal fait apparaître 6 groupes de sol dont les caractéristiques chimiques sont voisines (Figure 4). Les sols 1132nw et 3100 sont cependant

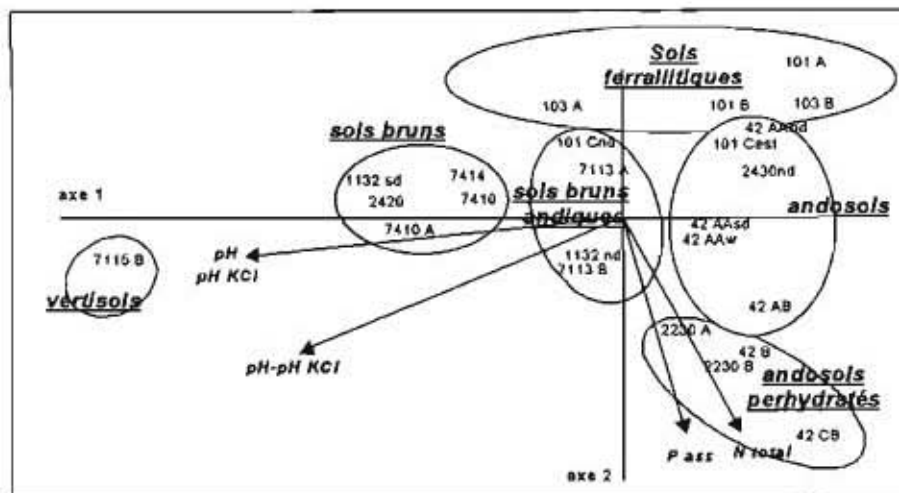


assez mal représentés sur ce plan.

L'étude des autres plans ne permet pas une meilleure représentation de ces deux sols. Comme dans le cas précédent, la projection n'est pas modifiée en éliminant les bases, fortement liées au pH.

L'introduction de pH-KCl et de  $\Delta(\text{pH})$  (différence entre pH-eau et pH-KCl) et l'élimination des variables corrélées (CEC, Ca, Mg et K) permet d'affiner le regroupement précédent (Figure 5).

Figure 5 : Plan principal de projection des 28 types de sol après introduction des variables associées aux pH



Les contributions des 3 axes à la variation totale sont de 69.2%, 17.2% et 6.2%. L'axe 3 qui a une valeur propre de 0.559 n'apporte pas d'autre information particulière. L'axe 1 représente les pH et leurs différences. L'axe 2 est surtout lié au phosphore assimilable et un peu moins à l'azote total.

L'introduction de la variable humidité du sol après séchage confirme l'identité de deux groupes d'andosols. Dans cette ACP que nous n'avons pas représenté ici, la variation totale est de 65.4% pour l'axe 1, 17.8% pour l'axe 2 et 12.4% pour l'axe 3. La valeur propre de ce dernier est proche de 1 (0.988). L'humidité est surtout représentée par l'axe 2.

Notons que l'humidité du sol au prélèvement est le critère de base de distinction des deux unités d'andosols. Sa mesure n'est pas réalisable dans la pratique. Les sols parviennent au laboratoire dans des délais très variables donc dans des états de déshydratation plus ou moins poussés.

#### Ajustement des cas indéterminés

Quelques ajustements ont été réalisés suite à cette étude statistique descriptive, afin de classer certains types de sol mal définis.

Le type 2230 B apparaît dans le groupe des alluvions et des andosols perhydraté. Il s'agit d'alluvions sableuse présentant des caractéristiques chimiques andiques et une humidité résiduelle qui les situent entre les deux unités d'andosols. Les caractéristiques chimiques des alluvions des cônes de déjection sont dans tous les cas très proches de celles des sols situés en amont dont ils sont issus (plus ou moins andique selon le climat). Ce résultat a été utilisé pour classer certains sols selon leur localisation. Ainsi, le type 101C Est (cône ancien à sols caillouteux andiques faiblement ferrallitiques) a été classé comme andique perhydraté. Le type 101C Nord (cône ancien à sols caillouteux bruns andiques faiblement ferrallitiques) a été classé comme brun andique. Enfin, les sols bruns argileux plus ou moins hydromorphes du type 1132 sud ont été classés comme sol brun.

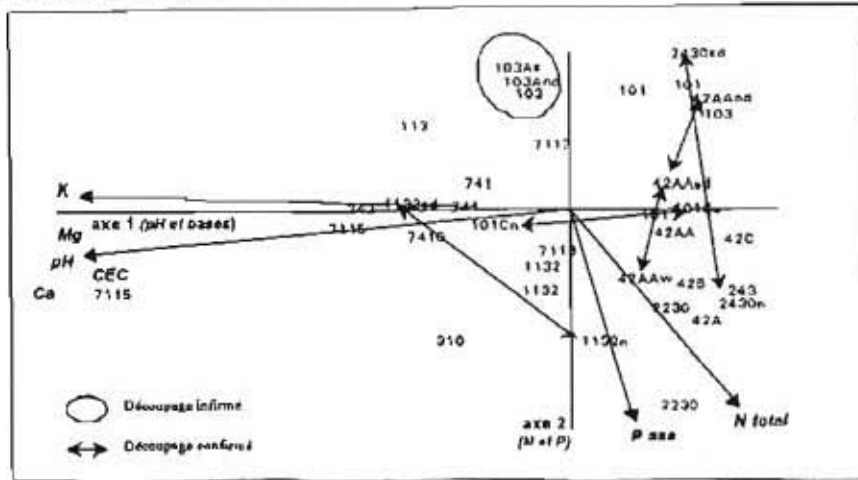
Quelques ajustements complémentaires ont été réalisés pour les sols mal représentés dans les différentes projections. Il en est ainsi du sol du 3100 de nature brun vertique qui a été classé comme sol brun. Le sol 1132nw a été considéré comme andosol à l'issue de cette étape.

#### Contrôle des classements

Les différentes opérations de découpage, regroupement et ajustement, qui aboutissent aux six unités de sol, sont basées sur des statistiques descriptives et des choix. L'étude comparée entre unités des moyennes et écarts types de chaque variable confirme les résultats. Les caractéristiques chimiques permettent de distinguer les unités entre elles (Tableau 2). Ainsi, les vertisols s'individualisent par les caractéristiques du complexe absorbant et le pH, les sols bruns par leur richesse en base et les andosols

3).

Figure 3 : Plan principal de projection des 35 types de sol avec introduction des principales variables chimiques

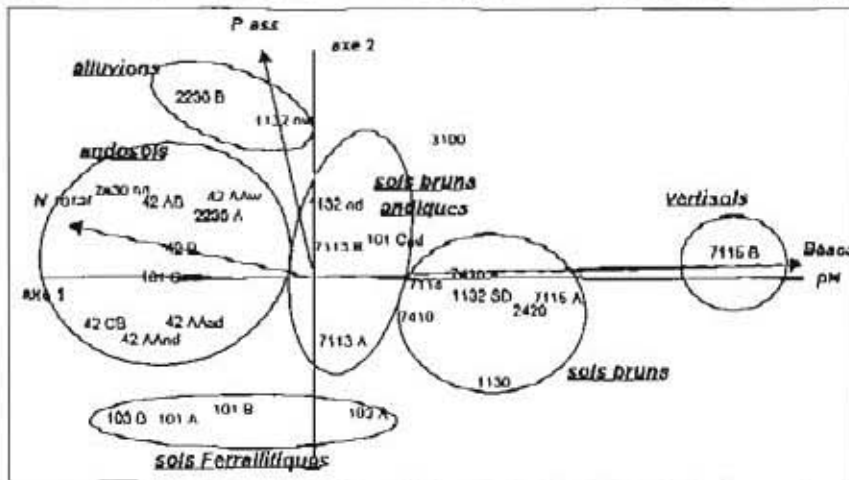


L'étude du plan principal de l'ACP confirme la validité du découpage des types 42AA, 101C, 1132, et 2430. Par contre, le découpage géographique du type 103A n'est pas justifié compte tenu de la proximité des sous types géographiques créés. Ces résultats sont confirmés par une ACP des mêmes 36 types de sol, portant sur 3 variables (pH, N et P ass), après élimination des variables fortement corrélées au pH (CEC, Ca, Mg, K).

#### Regroupement géographique

Les mêmes variables ont été analysées pour 29 types de sols constitués des 35 précédents diminués des 4 types dont le découpage est confirmé (42AA, 101C, 1132 et 2430) et des deux sous types géographiques regroupés (103An et 103As).

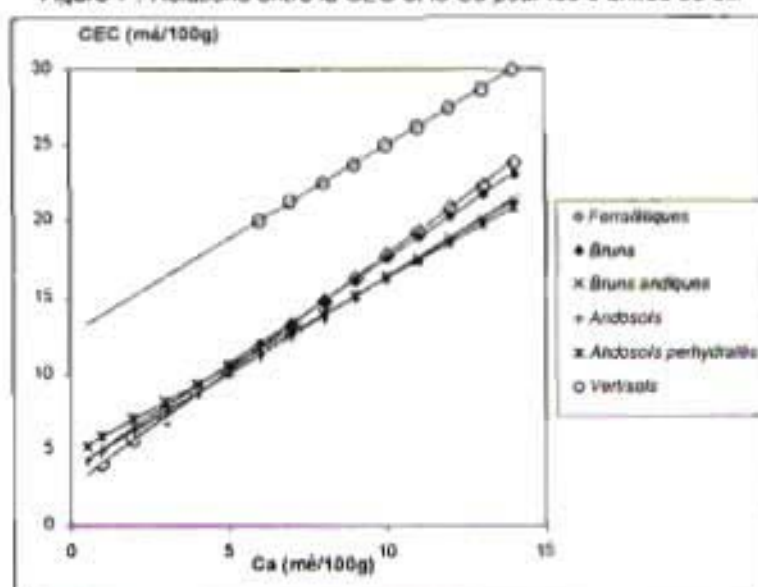
Figure 4 : Plan principal de projection de 28 types de sol caractérisés par 9 variables.



Les axes sont formés par les mêmes variables que dans le cas précédent. L'axe 1 explique 69.3% de la variation totale tandis que les contributions respectives des axes 2 et 3 sont de 13.9% et 8.7%. L'axe 3 dont la valeur propre est de 0.692 n'a pas été retenu. La projection sur le plan principal fait apparaître 6 groupes de sol dont les caractéristiques chimiques sont voisines (Figure 4). Les sols 1132nw et 3100 sont cependant

Les liens entre le calcium et la capacité d'échange cationique (CEC) sont plus faibles (Tableau 10). Les ajustements sont linéaires. Leur signification statistique est cependant suffisante et caractéristique de chaque unité de sol pour être employée au calcul des seuils (Figure 7).

Figure 7 : Relations entre la CEC et le Ca pour les 6 unités de sol



### Situation actuelle

#### *Stockage des informations*

La banque de données du laboratoire comprend, pour chaque pixel ayant fait l'objet d'au moins une analyse de sol, les informations suivantes :

- Dates (prélèvement, entrée et sortie du laboratoire) ;
- Identification du technicien qui a réalisé le prélèvement ;
- Identification de l'agriculteur demandeur ;
- Culture ayant fait l'objet de la demande (y compris cultures non traitées par le programme comme les cultures maraîchères ou fruitières) ;
- Objet des analyses ne correspondant pas à des conseils en fertilisation ;
- Coordonnées et altitude du prélèvement de sol (parcelle échantillonnée) ;
- Résultats de l'analyse chimique de chaque échantillon ;
- Identification géographique du pixel avec ses coordonnées, le code de la micro-région, la commune, et le lieu-dit ;
- Code STIPA du type de sol ;
- Unité de sol ;
- Altitude moyenne du pixel où le prélèvement a été réalisé ;
- Zone climatique.

Le nombre d'analyses de sol s'accroît annuellement de 2 à 3000 tandis que le repérage géographique des zones de prélèvement tend à devenir de plus en plus précis.

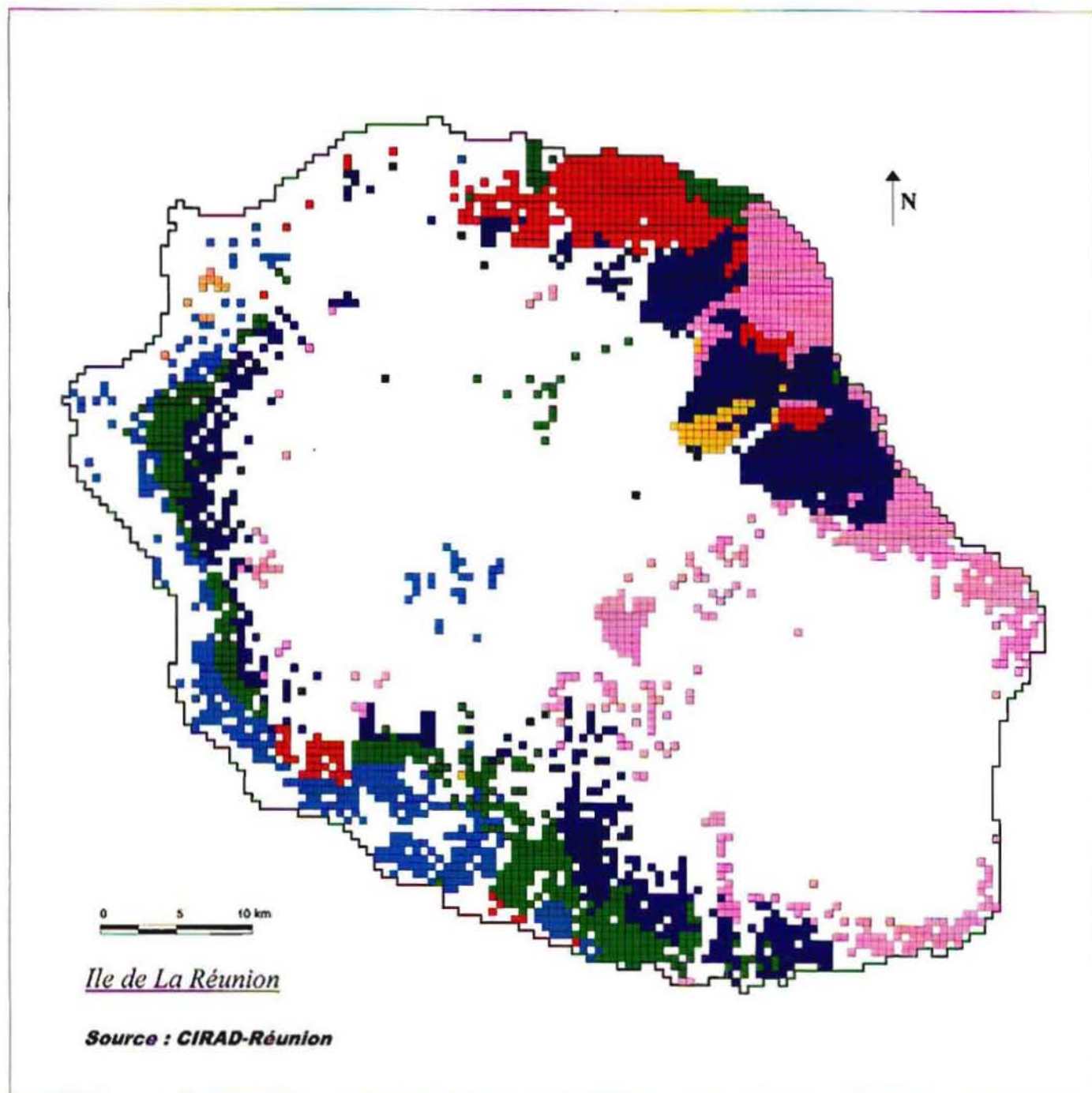
#### *Codage des sols*








La banque de données du laboratoire contient actuellement (fin 1997) 36 types de sol identifiés par leur code STIPA (page 97) répartis en 6 unités de sol (Tableau 3 et Carte 1). Ils correspondent aux types issus de l'étude précédente auxquels s'ajoutent 9 nouveaux types de sol. Ces derniers ont été introduits pour traiter des sols mal géoréférencés. Une unité de sol doit leur être associée pour l'analyse. Elle est déterminée en fonction de la localisation approximative du lieu de prélèvement. Il s'agit donc de codes génériques : 3000 (vertisols), 42P (andosols perhydratés), 42NP (andosols non perhydratés), 7000 (sols bruns), 74CIL (sols de Cilaos), 7113 (sols bruns andiques), 711C (zones à ravinement très actif), 7113C (sols de Salazie) et 10000 (sols ferrallitiques).

Les codes 74CIL et 7113C proviennent d'un découpage du type STIPA 711C. Les sols des zones à ravinement très actifs des cirques sont en effet plutôt de type bruns à Cilaos et andiques à Salazie. Le type 711C a été conservé pour caractériser les prélèvements provenant de zones à ravinement autres que celles des deux cirques (Cilaos et Salazie).



**Carte 1 : Unités de sol par carrés de 500 m  
(2927 carrés de 25 ha au 1/8/97)**



Type_Simple	Count	Intérieur
Ferrallitique	369	
Brun andique	477	
Andique non perhydraté	989	
Andique perhydraté	661	
Indéterminé	43	
Brun	377	
Vertique	11	

La nomenclature a également été modifiée pour certains types de sol. Ainsi :

- Les types 42AA nord, sud et ouest classés en andosols non perhydratés ont été regroupés dans leur type d'origine (42AA).
- les types 2430 nord et sud ont été regroupés en type 2430 pour les mêmes raisons.
- Les types 101 Est et 101 Nord ont été rebaptisés 101C et 101 D.
- Par contre, la nomenclature géographique a été conservée pour les types 1132 nord, sud et ouest (types de sols mal représentés dans les ACP).

Tableau 3: Correspondance entre unités et types de sol

UNITES DE SOL	DOMAINE PÉDOGÉNÉTIQUE (23 UNITÉS ETENDUES À 31, CODES STIPA adaptés*)
Ferrallitique	1000, 101A, 101B, 103A, 103B
Vertisol	3000, 7115B
Brun	7000, 2420, 7414, 7410, 3100, 1130, 7115A, 7410A, 711C, 1132S, 74CB
Brun Andique	7113, 101D, 1132N, 7113A, 7113B, 1132W, 7113C
Andosol non perhydraté	42NP, 42AA, 42AB, 101C, 2430
Andosol perhydraté	42P, 42CA, 42B, 42CB, 2230B, 2230A

La correspondance de ces codes STIPA avec les unités de milieu de la carte morphopédologique de Raunet est donnée en annexe VII. Il est à noter que cette correspondance n'est pas bijective. Les variables chimiques introduisent en effet des disparités dans certaines unités (Tableau 4).

Tableau 4 : Unités de milieu hétérogènes pour les variables chimiques.

UNITES DE MILIEU	TYPE DE SOL (code STIPA)	PARTITION
18	103A	Nord
	103B	Est
44	7410A	Saint Pierre
	7410	Saint Louis
52	7410A	Le Cafrin
	42AB	Saint Joseph
58	7113B	Petite Ile
	42AB	Vincento
60	101D	Nord
	101C	Est
82	2230B	Est
	2420	Nord
84	2230B	Est
	2420	Ouest et Sud
86	1132n	Nord
	1132s	Sud
	1132w	Ouest

Les unités de milieu 76, 77, 78 et 79 restent indéterminées dans la typologie. Onze unités sans intérêt agricole ne sont pas représentées (1, 2, 3, 4, 27, 60, 61, 66, 67, 90 et 91).

### Représentation géographique

Les 120 micro-régions d'origine ont été découpées dans chaque situation où les distributions faisaient apparaître plusieurs unités de sol (Chabalière et Legier, 1992 ; CIRAD, août 1995). Ce travail a permis de constater que le découpage de départ, basé sur la connaissance de terrain des techniciens, était très proche du découpage reposant sur l'analyse statistique des caractéristiques chimiques des sols. La méthode s'est ainsi trouvée confortée. Deux unités de sols différentes apparaissent dans les micro-régions où un découpage plus fin ne conduisait pas à une amélioration de la représentation géographique (Carte 2). Le zonage climatique, inspiré de celui proposé par la météorologie nationale a été adapté aux limites géographiques naturelles et au découpage de la base de données en pixels de 500m de côté (Carte 3). Le découpage actuel correspond à 155 micro-régions identifiées par les codes postaux et les noms de lieux-dits (Carte 4, Tableau 57, Tableau 58).

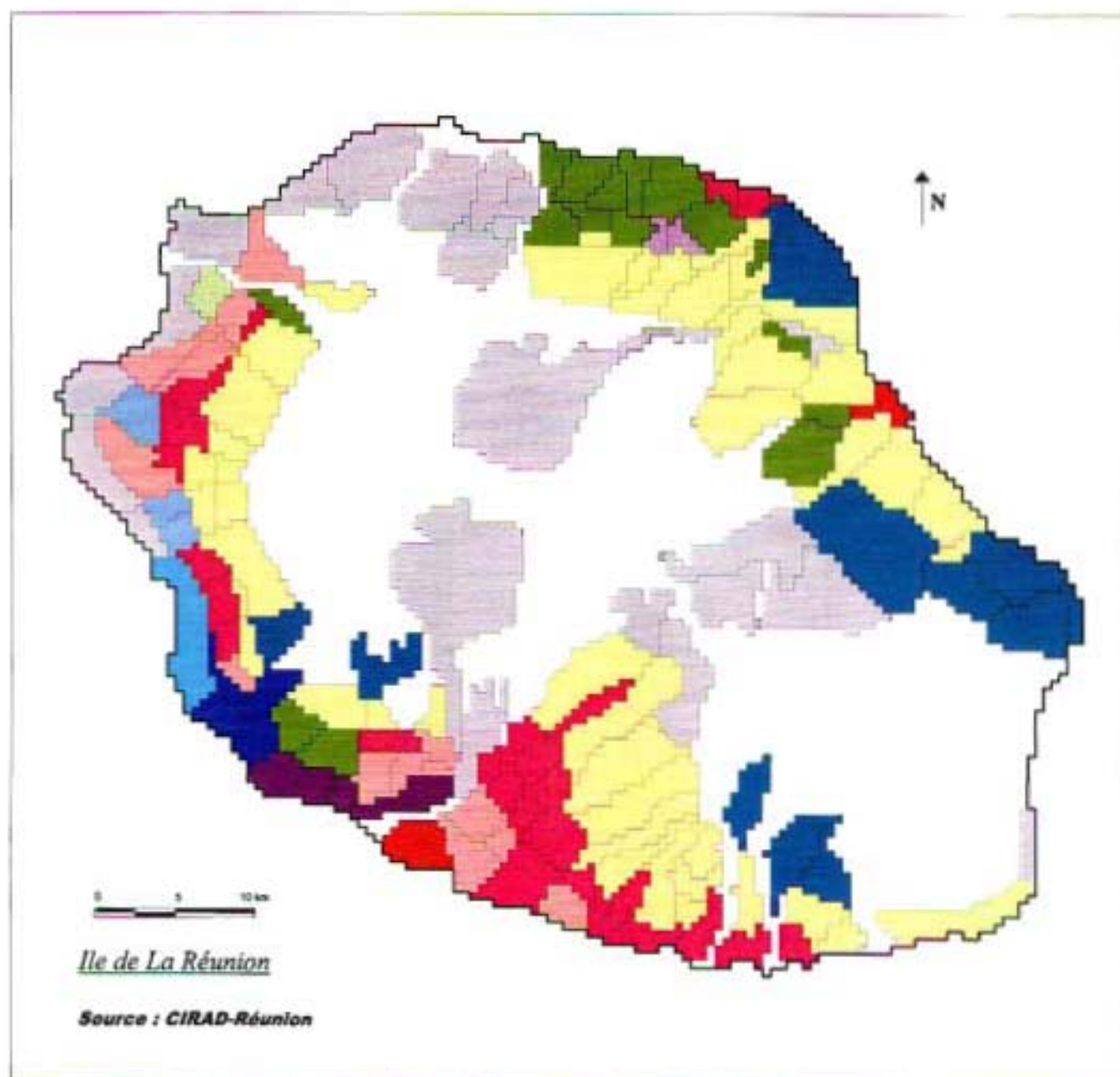
### Discussion

La codification STIPA n'est pas conçue pour les sols réunionnais. Elle a été adaptée au cours du temps et au fil des analyses en créant de nouveaux codes, ou des codes dérivés. Il en résulte une nomenclature pas toujours rationnelle où coexistent des indications non homogènes. Elle devra donc être reponsée à l'occasion d'une reprise des études de la banque de données.

Les unités de sol constituées sur des critères morphopédologiques et chimiques sont cohérentes mais ne représentent pas parfaitement certains types de sol localisés à l'intersection de deux groupes. Il en est ainsi



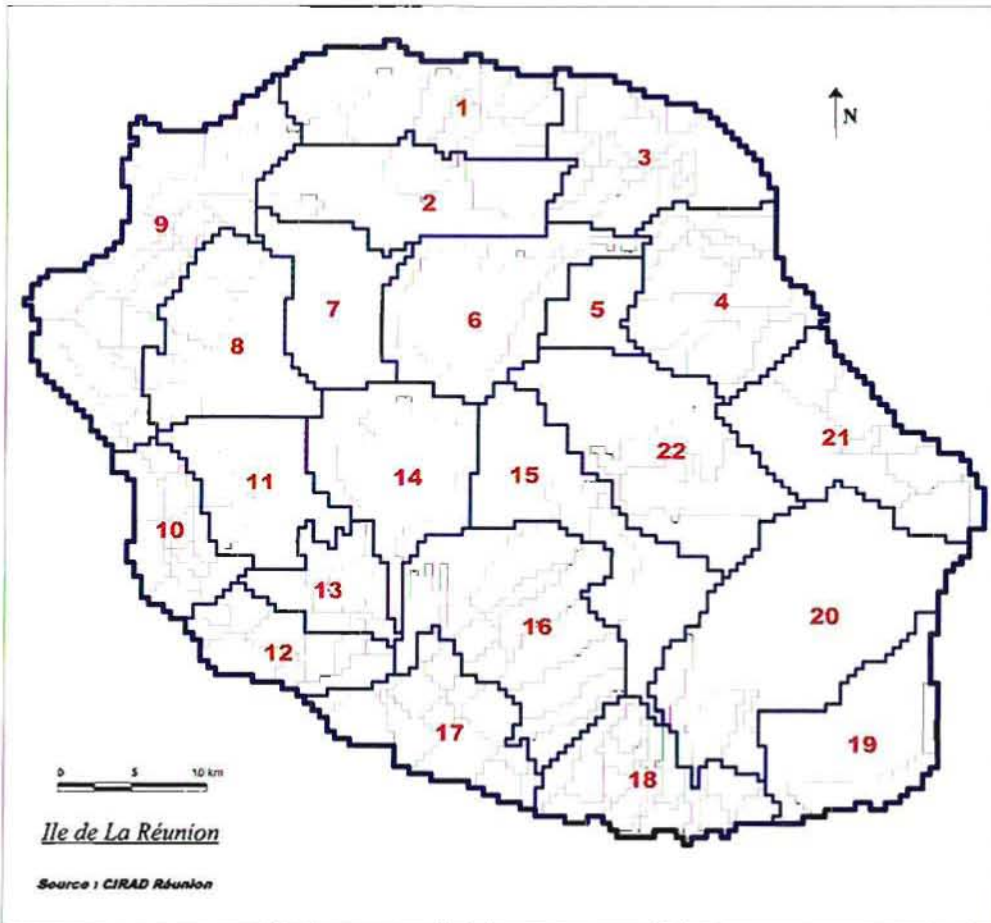
**Carte 2 : Distribution des unités de sol par micro-région  
(typologie morphopédologiques et chimiques)**



Sol	Count	Intérieur
Peu évolué	2	■
Brun	14	■
Brun andique	27	■
Andique	44	■
Ferrallitique	16	■
Vertique	1	■
Indéterminé	22	■
Andique perhydraté	13	■
Brun & Vertique	2	■
Brun & Ferrallitique	6	■
Brun andique & Brun	3	■
Alluvions	3	■
Ferrallitique & Andique	2	■

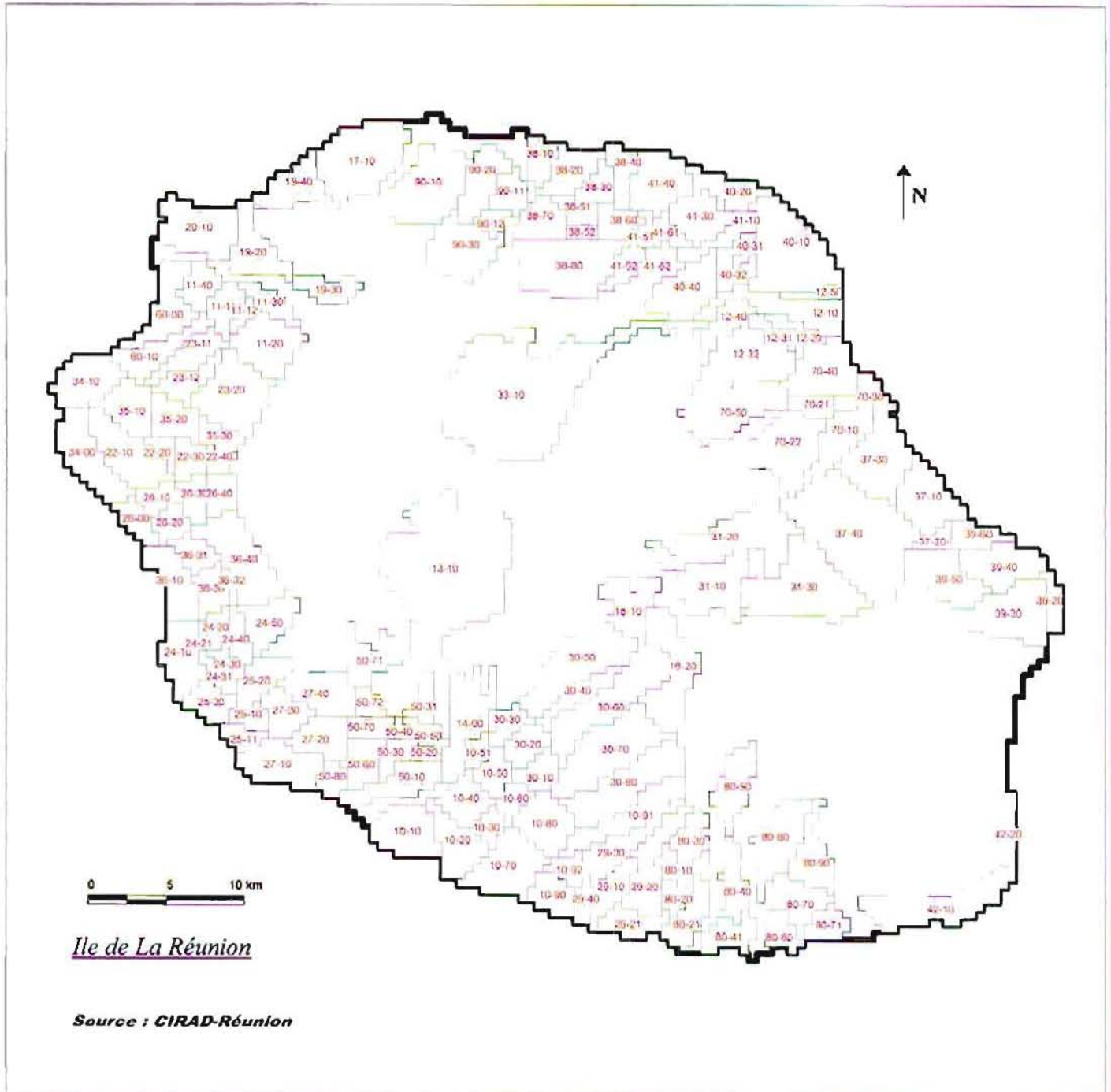


**Carte 3 : Zones climatiques (22) adaptées au découpage des micro-régions (155)**



Zone	Pluviométrie	TempMoyen	Microzone
1	1000-2000	16° - 24°	11
2	2000-4000	12° - 20°	3
3	2000-4000	16° - >24°	15
4	3000-5000	16° - >24°	12
5	4000-6000	12° - 20°	0
6	3000-4000	12° - 20°	1
7	1500-3000	<12° - 20°	0
8	1200-1800	<12° - 20°	7
9	500-1200	16° - >24°	20
10	700-1500	16° - >24°	12
11	1500-1800	<12° - 20°	2
12	700-1800	12° - 24°	10
13	1800-2000	12° - 20°	7
14	1300-1900	<12° - 20°	1
15	2000-4000	12° - 20°	2
16	1500-2000	12° - 22°	11
17	700-1500	20° - 24°	12
18	1500-5000	16° - 24°	12
19	8000-6000	16° - 24°	2
20	4000-8000	<12° - 20°	3
21	4000-8000	16° - >24°	9
22	4000-6000	12° - 20°	3

## Carte 4 : Micro-régions repérées par leurs codes postaux



LEGENDE : Annexe V, page 94 et 95

des sols ferrallitiques à caractères andiques, des sols bruns à caractères vertiques ou des alluvions andiques au caractère perhydraté incertain. De même, les zones d'alternance ou de recouvrements de sol ferrallitiques et andiques ne sont représentés que par le type dominant. Les unités sont en fait définies avec la précision du 1/50 000. Il est possible, au moins pour certaines zones du sud et de l'ouest, de reprendre l'étude de manière beaucoup plus précise, en la basant sur les cartes au 1/10 000, élaborées pour les périmètres irrigables.

Cette étude repose sur les 15.000 analyses disponibles en 1992. Ce nombre est relativement faible comparé au nombre de types de sol existant sur l'île. Notons l'exemple d'une étude comparable en Bretagne qui met en jeu 340.000 analyses (Leleux et al., 1988). De plus, certains types de sol étaient très mal représentés lors de l'étude du fait d'un faible nombre d'analyses (cas du type 42CA qui n'a pas pu être inclus dans l'étude statistique). Nous envisageons donc de reprendre périodiquement le classement des sols pour des pas d'accroissements significatifs de taille de la banque de données du laboratoire. Le nombre actuel d'analyses est légèrement supérieur à 30 000.

L'importance relative de chaque type de sol par rapport à la surface cultivée peut être appréciée à partir du comptage des pixels. Les pixels correspondent en effet à des sites au moins partiellement cultivés puisqu'ayant fait l'objet d'analyses de sol en vue d'une production agricole. Il ne faut pas cependant perdre de vue que le découpage en pixels donne une représentation par excès et non exhaustive des zones cultivées puisque :

- Les informations sont relatives à des analyses et non à des surfaces ;
- Les 25 ha de chaque pixel recouvrent forcément des parties non cultivées (route, habitation, ravines, affleurement rocheux, jachères, zones arborées, friches...) et des zones non terrestres (pixels de bordure de l'île qui incluent par découpage l'ensemble de la partie terrestre et donc une partie maritime) ; et
- Les pixels ne représentent pas forcément l'ensemble des surfaces cultivées, puisque des zones cultivées ont très bien pu ne jamais faire l'objet d'analyse de sol au laboratoire du CIRAD.

A ces incertitudes près, les 73.175 ha des 2927 pixels correspondant à une réalité approximative de 60.000 ha agricoles utiles (voir SAU page 30) sont constitués pour 33,8% d'andosols non perhydratés, 22,6% d'andosols perhydratés, 16,3% de sols brun andiques, 12,9% de sols bruns 12,6% de sols ferrallitiques et moins d'un demi pour-cent (0,4%) de sols vertiques. Le reste, 1,4%, représente des sols indéterminés par manque d'informations ou existence d'informations contradictoires.

Le découpage géographique adapté aux unités de sol présente dans certaines situations des limites de précision. Unités géographiques et unités de sol ne coïncident pas toujours de manière correcte. Dans de telles situations, le découpage géographique prévaut car il correspond bien à des unités de travail des agents du développement. Nous envisageons donc dans ces situations de représenter les informations destinées au développement à l'échelle du pixel à l'intérieur de la micro-zone.



Centre de Coopération Internationale  
En Recherche Agronomique pour le Développement  
Agence Réunion  
97408 St Denis Messag Cedex 09 - Tel : 0262.50.80.19 - Fax : 0262.52  
EPIC - Siret : 775665920 00119

N° CIRAD : 97/024/01/38465  
Organisme ou Service : SCICA PROMOCANNE  
Technicien : BOYER JF  
Votre référence : 7786  
Lieu de prélèvement : Le CRATERE / 97470 ST-BENOIT  
Coordonnées / alt. : 176,2 / 58.8 150 m  
Région CIRAD : 70-21  
Date d'entrée : 03/03/97  
Date de sortie : 21/03/97  
Interprétation : SOLS FERRALLITIQUES

(NOM/ADRESSE de l'agriculteur)

ANALYSE DE SOL

Caractéristiques	Teneur de votre sol	Niveau souhaitable	Très faible	Faible	moyen	Fort	Elevé
pH H2O	4.70	5.50	■■■■■				
pH KCl	4.60						
pH NaF							
Matière Organique							
Azote g/kg	1.80	2.00	■■■■■	■■■■■			
Carbone g/100g							
C/N							
Phosphore							
Assimilable mg/kg	19	80	■■■				
Total mg/kg							
Complexe Absorbant (au cobalt)							
Calcium me/100g	0.19	5.50					
Magnésium me/100g	0.24	2.70	■				
Potassium me/100g	0.04	0.40	■■■				
Sodium me/100g	0.08						
Somme des bases me/100g	0.58						
CEC (capacité d'échange)	3.06	10.80	■■■				
Saturation en %	18.30	80.00	■■■				
K%CEC	1.3	4.00	■■■■■				
Mg/Ca	1.26	0.50	■■■■■				

INTERPRETATION N° 38465 POUR LA CANNE A SUCRE EN FERTILISATION CLASSIQUE

PH - CALCIUM - MAGNESIUM

Votre sol est très acide et carencé en magnésium.  
- un apport de chaux magnésienne est indispensable.  
- dose préconisée : 5.3 t/ha pour la somme des éléments CaO + MgO contenus dans l'amendement utilisé

PHOSPHORE

Votre sol est très carencé en phosphore.  
- une fumure de correction à la plantation est indispensable.  
- dose préconisée : 280 kg/ha de P2O5.

POTASSE

Votre sol est très carencé en potasse.  
- effectuez une fertilisation d'entretien renforcée en potasse, en apportant environ 400 unités à chaque cycle.

AZOTE - MATIERE ORGANIQUE

Votre sol est correctement pourvu en matière organique.  
- apportez uniquement la dose d'azote nécessaire à l'entretien, soit 120 unités

PLAN DE FUMURE PROPOSEE

- à la plantation : effectuez le chaulage et la correction en phosphore.  
- à chaque cycle, apportez : 120 N - 70 P2O5 - 400 K2O.  
soit par exemple : 750 kg de 16-8-24 + 370 kg de chlorure de potasse.

Toutes les doses d'entretien indiquées ci-dessus sont basées sur des rendements moyens de 80-90 t/ha. Les moduler en fonction du rendement escompté et des conditions climatiques.

-ATTENTION : Le schéma de fumure qui vous est proposé est volontairement déséquilibré par rapport aux besoins de la culture, afin de tenir compte des particularités de votre sol. Appliquez cette fumure pendant 4 ou 5 ans, et effectuez alors une nouvelle analyse de sol afin d'en vérifier les réserves.

- 'Mg S2' indique que le calcul est basé sur l'écart entre le sol et le seuil S2 (valeur qui sépare les sols carencés des sols moyens).
- 'Mg (S1+ 0,5)' indique que le calcul est basé sur une valeur intermédiaire entre les seuils S1 et S2, qui est égale au seuil S1 augmenté de 0,5 unités.

Tableau 32 : Doses recommandées d'apport calco-magnésien sur canne à sucre

DIAGNOSTICS		ACIDITÉ						
		Très Acide	Acide	Peu Acide	Normal	Basique	Anormal 1	Anormal 2
FERTILITÉ MG	Très Carencé	N	N	Mg S1	Mg (S1 + 0,5)	N	Mg S1	N
	Carencé			Mg S2			Mg S2	
	Faible				500 kg/ha tous les 3 ans	Pas d'amendement		
	Normal							
	Riche							
	Très Riche							

Si la valeur de Ca n'est pas disponible (pas d'analyse), le programme utilise une valeur faible de substitution égale à S1+ 0,1. Le rapport Mg/Ca est alors fixé à 0,2 (faible).

Le calcul correspond à la quantité d'amendement nécessaire pour accroître les caractéristiques chimiques de 3.000 t de terre du niveau analytique actuel au niveau souhaitable.

### L'Ajustement des Résultats

Les résultats du calcul sont ajustés par les règles suivantes :

- La quantité minimale de CaO est de 500 kg. ha<sup>-1</sup>, qui correspond à la correction d'un sol situé au seuil S2 (entre acide et légèrement acide).
- La quantité minimale d'apport de MgO est de 300 kg. ha<sup>-1</sup> (seuil S2 également).
- Les quantités de CaO et MgO sont arrondies à la centaine la plus proche du résultat.
- La quantité de chaux à apporter est la somme des écarts entre le souhaitable et l'existant des deux bases (CaO + MgO).
- La quantité de chaux magnésienne à apporter est évaluée en fonction de la somme (CaO + MgO) des éléments contenus dans l'amendement.
- Si les doses d'apport sont supérieures à 3 t. ha<sup>-1</sup>, l'apport de Mg est automatiquement préconisé, quelque soit l'état du magnésium dans le sol.
- Pour le Ca comme le Mg, un coefficient 'd'activité' de 1,2 est appliqué à la dose calculée pour compenser les pertes (avant arrondissement).
- La dose normale d'entretien de la culture sur un sol peu acide et normalement pourvu en magnésium est fixée à 167 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de CaO (500 kg pour 3 ans).

### **Le détail du conseil**

Les conseils imprimés sur les bulletins d'analyses (Document 1) proviennent d'un dictionnaire de phrases en deux ou trois parties :

1. La première correspond au diagnostic descriptif porté sur le sol (bien pourvu, carencé,...) dont le détail est indiqué à la suite du Tableau 24 page 34.
2. La seconde est un conseil en fertilisation, suivi de la dose préconisée (#) précédemment calculée si une correction s'impose.
3. une troisième série de phrases est imprimée. Elle concerne la nécessité d'un suivi analytique du sol dans le temps si le conseil situe le sol dans une 'zone à risque' (phrases soulignées dans la liste suivante).

Ces phrases sont choisies dans un répertoire, en fonction des caractéristiques chimiques du sol analysé (Tableau 33). Le module de calcul détermine ensuite les doses préconisées, qui sont inscrites sur le bulletin d'analyse.

d'autres cultures telles que haricot, soja ou maïs (Hetherington et al., 1988).

Le principe général de correction de l'acidité du sol adopté pour la canne à sucre, consiste à apporter la quantité d'amendement calco-magnésien permettant un accroissement du pH de sa valeur mesurée à 5,5. Cet objectif est comparable à celui adopté sur canne à sucre à l'île Maurice (NG Kee Kwong et al, 1980) où les auteurs conseillent un amendement calco-magnésien pour les sols à pH inférieur ou égal à 5. La dose préconisée a pour objectif de porter le pH à 5,5. Les raisons de ce choix sont diverses :

- L'amendement calco-magnésien, peu soluble et peu mobile, doit être enfoui dans le sol pour présenter une bonne efficacité. Il ne peut donc être apporté qu'à la mise en place de la culture. Il en résulte une périodicité minimale de 5 à 8 ans des apports.
- Les corrections du pH doivent tenir compte de ces 5 à 8 ans d'acidification sans correction possible, acidification notamment liée à l'utilisation massive d'engrais et à la lixiviation des bases du complexe absorbant.
- La toxicité aluminique sur canne n'apparaît que lorsque le pH devient inférieur à 5.

La cinétique d'évolution du pH sous monoculture intensive de canne à sucre à La Réunion (Hubert De Fraise, 1978) met en évidence une durée d'action de la chaux sur 5 à 6 ans au maximum. Le pH visé, supérieur au pH minimum de la culture, correspond en fait à l'hypothèse d'une chute de pH de 0,5 à 0,7 points en 5 à 8 ans de culture.

### Le choix des amendements

Le conseil est bâti à partir d'un tableau croisant les diagnostics d'acidité et de fertilité magnésienne (Tableau 24). Le sol analysé est situé dans le tableau. Sa position est alors associée à un conseil (Tableau 31).

Tableau 31 : Conseil en amendement calco-magnésien pour la canne à sucre

DIAGNOSTICS		ACIDITÉ						
		Très Acide	Acide	Peu Acide	Normal	Basique	Anormal 1	Anormal 2
FERTILITÉ MG	Très Carencé	Ca+Mg Indispensable		Ca+Mg riche en Mg	Mg Indispensable		Ca+Mg riche en Mg	Ca+Mg Indispensable
	Carencé	Ca+Mg		Recommandé			Recommandé	Ca+Mg
	Faible	Souhaitable			Mg Entretien		riche en Mg recommandé	
	Normal	Ca ou Ca+Mg si dose>3t Indispensable		Ca Entretien		Rien	Eviter les plantes acidophiles	
	Riche	Ca		Ca				
Très Riche	Indispensable		Souhaitable					

La lecture du tableau se fait comme suit :

- Pour 'Ca' : chaux ou carbonate de calcium.
- Pour 'Ca + Mg' : chaux magnésienne.
- Pour 'Ca + Mg riche en Mg' : chaux magnésienne avec plus de 30% de MgO.
- Pour 'Mg' : Kiésiérite ou sulfate de magnésium.

### La dose conseillée

La dose conseillée repose en premier lieu sur le calcul des quantités à apporter pour que le sol passe du niveau analytique à un niveau souhaitable. Les résultats obtenus sont ensuite ajustés.

### Le calcul des doses

Les modalités de calcul des doses (Tableau 32), se lisent de la manière suivante :

- 'N' signifie Normal. Le calcul de la dose repose sur l'écart entre le niveau recherché et le niveau existant donné par l'analyse.
- 'Mg S1' indique que le calcul de la quantité de magnésium est basé sur l'écart entre le sol et le seuil S1 (valeur qui sépare les sols très carencés et carencés).



# LA CANNE A SUCRE

## Introduction

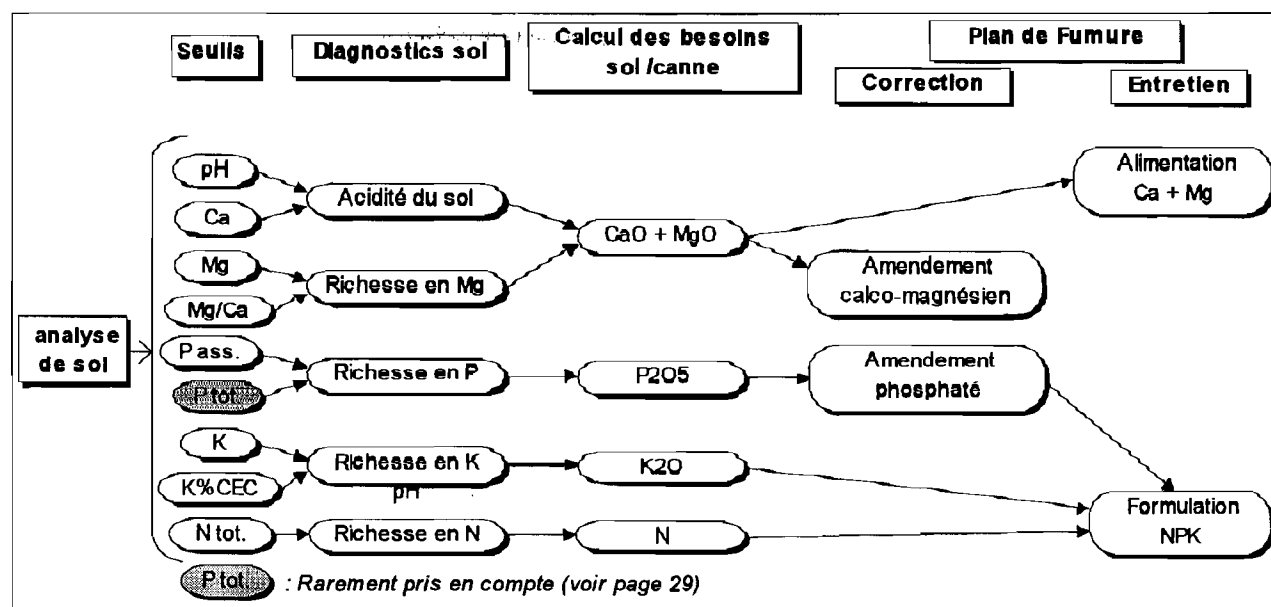
La fertilisation de la canne à sucre à La Réunion et dans la région de l'océan indien (île Maurice) a été très étudiée, notamment à partir de diagnostics foliaires (Halais, 1951,1967; Chenet, 1962). Cependant, les informations prises en compte par le système expert reposent sur un diagnostic sol. Ce dernier est mieux adapté que le diagnostic foliaire (DF) à la structure de production cannière de La Réunion. La sole cannière est en effet divisée en petites exploitations familiales, dont les parcelles dispersées aux sols parfois variables, totalisent rarement plus de 10 ha. La technique de prélèvement des feuilles et la correction 'a posteriori' de la fumure ne peuvent donc y être envisagées pour des raisons de logistique et de technicité. De plus, les impératifs d'amendement du sol avant replantation imposent un diagnostic sol par parcelle (surfaces inférieures le plus souvent au demi hectare), là où le DF peut suffire dans le cas de grosses exploitations bien gérées où les sols sont parfaitement connus.

Le système expert est donc basé sur le comportement de la canne à sucre dans une large gamme de conditions de climat et de sol (Fritz, 1971; Chabaliier et al., 1984 ; Chabaliier, 1988, Chabaliier et Gaudy, 1990). Le DF est envisagé pour les grosses exploitations cannières réunionnaises surtout concentrées dans le nord et l'est de l'île. Il est prévu d'écrire un système expert sous Visual Basic ® en s'appuyant sur les résultats de recherche de Chabaliier (1995) en matière de DRIS (*Diagnosis and Recommendation Index System*).

## L'amendement et l'entretien calco-magnésien

Le chaulage est le problème le plus complexe traité par le système expert. Il fait en effet intervenir trois paramètres chimiques que sont le pH, et les teneurs en calcium et en magnésium (Figure 10). Nous avons en conséquence séparé les informations concernant le conseil lui-même (diagnostic du sol et choix des produits à apporter) du calcul des doses.

Figure 10 : Organigramme de fonctionnement du système expert pour la canne à sucre



## Les Besoins de la Culture

Les recherches du CIRAD indiquent une assez bonne tolérance de la variété de canne la plus cultivée (R570) à la toxicité aluminique, mais la tolérance reste un caractère variétal (Du Hamel de Milly, 1981).

La variété R570, considérée comme très rustique supporte jusqu'à 30% de la CEC du sol saturée par de l'aluminium échangeable. Ce seuil correspond à un pH de l'ordre de 4,8.

Rien ne permet d'affirmer que la nouvelle variété en cours de diffusion (R579) réputée beaucoup moins rustique que la R570 présente les mêmes caractéristiques de tolérance à l'aluminium échangeable. Il faut cependant rappeler que la canne à sucre est considérée comme plus tolérante à la toxicité aluminique que

capacités du sol à y pourvoir. Ils sont synthétisés sous la forme de plan de fumure basé sur les engrais du marché réunionnais (Tableau 59, page 96).

Le système expert utilise les diagnostics de fertilité pour identifier dans un dictionnaire de phrases, celles correspondant à l'analyse en cours. Le calcul des recommandations est basé dans le cas général sur une profondeur de sol de 30 cm et une densité de sol de 1, soit 3.000 t/ha de sol à traiter. Le phosphore fait exception puisque sa très faible vitesse de migration conduit à limiter les calculs à une profondeur de 10 cm (1.000 t.ha<sup>-1</sup>).

Le principe du calcul est de traduire en terme de recommandation, les fumures de redressement ou d'entretien correspondant à la différence entre le niveau de fertilité souhaitable du sol et son niveau analytique.

## LA PLANTE

Les chapitres suivants donnent le détail de la conception et de la rédaction du conseil en fertilisation pour la canne à sucre. Les autres cultures sont traitées en limitant les informations à celles qui leur sont spécifiques.

### Le Choix des Cultures

Le programme expert a été élaboré au départ pour la canne à sucre, culture qui occupait en 1993 (Tableau 30) 51% de la SAU (60.219 ha). A noter que les statistiques de 1996 font état de 26.000 ha de cannes pour une SAU comparable (45% de la SAU).

Graminées fourragères, ananas et bananier furent ajoutés ultérieurement pour répondre aux demandes des filières, justifiées par les surfaces ou par la valeur ajoutée importante des productions. Le programme de conseil pour ces cultures est forcément moins élaboré que pour la canne, compte tenu :

1. Des surfaces limitées (ananas, bananier) qui réduisent les informations disponibles au niveau de la base de données et,
2. De la pression de recherche locale limitée pour l'ensemble de ces productions.

La plupart des informations relatives à ces cultures sont donc actuellement d'origine bibliographique et proviennent de conditions écologiques extérieures à l'île.

*Tableau 30 : Quelques productions végétales de La Réunion en 1993 (AGRESTE, 1994)*

Conseil	Culture		Surface 93	% SAU 1993	Evolution ( % surface an <sup>-1</sup> )
Sol et culture	Canne à sucre		30.900	51,3	2,39 (sur 8 ans)
	Surface toujours en herbe	Total	12.390	20,6	3,27 (sur 8 ans)
		Prairies	10.590	17,6	5,69 (sur 8 ans)
		Parcours	1.800	3,0	5,29 (sur 8 ans)
	Banane		900	1,49	1,48 (sur 8 ans)
	Ananas		800	1,33	12,25 (sur 6 ans)
Sol (culture envisagée)	Légumes (1)		3.600	5,98	5,17 (sur 6 ans)
	Fruitier (sans le verger créole qui représente 2.431 ha)	Total	1.220	2,03	16,07 (sur 5 ans)
		Litchi	630	1,05	28,47 (sur 5 ans)
		Agrume	274	0,46	15,38 (sur 5 ans)
		Mangue	210	0,35	4,32 (sur 5 ans)

(1) la surface développée par rapport à la culture principale correspond à 6.699 ha de cultures de légumes.

Parmi les nombreuses autres cultures présentes dans l'île, le laboratoire reçoit de fréquentes demandes d'interprétation d'analyses de sol pour des productions maraîchères et fruitières. Des contacts ont été établis entre le laboratoire et les chercheurs et agents de développement intéressés par ces productions. L'objectif est de mettre au point un conseil spécifique aux principales cultures maraîchères et fruitières. Le conseil maraîcher apparaît cependant difficile à aborder compte tenu de la grande diversité des cultures et du caractère forcément artificiel des sols maraîchers. Pour les cultures fruitières (mangue, litchi, agrumes et éventuellement pêcher) les recherches en cours devraient permettre de proposer à court terme des conseils mieux adaptés. En attendant, le conseil se limite à une interprétation globale de la fertilité du sol. Les cultures couvertes par le système expert représentaient 44.990 ha en 1993, soit 74,7% de la surface agricole utile. En outre, nous traitons régulièrement la partie sol pour les cultures maraîchères et fruitières, qui correspondent à environ 8% de la SAU.

### Méthodologie

La méthode programmée qui aboutit aux conseils est identique pour toutes les cultures. Le programme expert procède à une analyse des diagnostics sols précédents par culture et pour un rendement type. Les conseils en fertilisation (Chabalière, 1989) tiennent compte des besoins minéraux de la culture et des

sol).

Une amélioration de la fiabilité du repérage est donc à l'étude. Nous comptons en effet généraliser l'emploi de système de repérage par satellite de type GPS (*Global Positioning System*) par les techniciens. Des essais sont déjà en cours au niveau des deux principales SICAs chargées des analyses.

### **Les Indices de Fertilité**

Des tentatives ont été faites pour cartographier à partir des résultats d'analyse, la 'fertilité' des sols par micro-zone (Descuns 1992). Elles débouchent sur des cartes de fertilité par 'élément' (P assimilable, pH...) basées sur les seuils. La cartographie des diagnostics de fertilité est en cours pour la canne à sucre. Nous l'avons limitée dans ce rapport aux informations en ligne (période du 01/91 au 07/97) et à la distribution des conseils. Nous prévoyons à court terme de travailler sur l'ensemble de la base de données (86 – 97).

L'utilisation de la banque de données du laboratoire pour cartographier des caractéristiques chimiques géoréférencées pose de nombreux problèmes. Un tri justifié de la banque est nécessaire pour éliminer :

- Des données non représentatives comme les analyses portant sur des sols artificiels (soles maraîchères...),
- Des données qui introduisent un biais dans les calculs de moyennes, comme des analyses à caractères scientifiques où de nombreuses données proviennent du même site (analyses de profil...),
- Des données aberrantes (prélèvement après apport d'engrais...).

Il s'agit donc d'un travail long qui ne peut être réitéré en temps réel. L'actualisation annuelle des informations n'est pas nécessaire. Elle porterait sur moins de 10% d'informations nouvelles. Un pas de temps de l'ordre de 5 ans semble plus judicieux.

L'élaboration d'indices de fertilité reste un sujet de réflexion complexe. La conception d'indices associant aux caractères chimiques des sols leurs contraintes édaphiques et les contraintes climatiques locales, reste encore dans le domaine de la réflexion.



réalité technique de prélèvement de sol.

La pertinence de la valeur prise pour la densité du sol pourrait également être discutée bien que la plupart des auteurs utilisent une même valeur égale à l'unité.

### **L'Echelle de Travail**

Certaines unités morphopédologiques conduisent à des types de sols hétérogènes, sans qu'il soit possible, à l'échelle où nous opérons, d'en réduire la variabilité par des découpages appropriés. Il en résulte forcément des conseils en fumure localement inadaptés. Il en est ainsi des sols de type ferrallitique de la partie nord, nord-est de l'île correspondant aux unités morphopédologiques 17, 18, 30 et 31 (Raunet, 1991, p 142-176). Ces sols présentent des 'poches' de résidus remaniés à la fois andiques et ferrallitiques, que la surface souvent réduite et le nombre important empêche de cartographier.

Ces sols ont été classés comme ferrallitiques (type dominant) et sont interprétés comme tels par le système expert, quand il peut s'agir de sols andiques dont la grille d'interprétation diffère.

Les résultats de l'analyse chimique d'un sol ne permettent pas dans la grande majorité des cas d'identifier le type de sol. Le type de sol a une origine statistique. Il est caractérisé par une distribution à peu près homogène de caractéristiques chimiques et de nombreux échantillons peuvent se situer à la jonction entre deux distributions. L'origine morphopédologique, donc géographique est ainsi indispensable pour identifier le type de sol.

Il est possible de prévenir l'agriculteur sur le bulletin d'analyse de la présence possible de ces mélanges dans la zone géographique qu'il exploite. Cette information aura cependant une portée réduite car le découpage parcellaire généralement sans liens avec le type de sol est une contrainte sérieuse à l'adaptation de la fertilisation. En conséquence, lorsqu'une telle situation se présente, seule la connaissance que l'agriculteur a de son sol lui permettra de détailler le conseil.

### **L'Echantillonnage**

La qualité de l'analyse résulte de celle de l'échantillonnage et du repérage cartographique de la parcelle analysée. Nous savons de manière certaine par des recoupements divers que l'échantillonnage n'est pas toujours correctement réalisé. Les principaux problèmes sont :

- L'absence de tarière au moment du prélèvement, qui entraîne des prélèvements obliques et dont la profondeur n'est pas maîtrisée (prélèvement le plus souvent à la houe) ;
- Le prélèvement 'facile' en bordure de parcelle, lié souvent à la difficulté de pénétrer dans le couvert (cas de la canne la dernière récolte) ;
- Des prélèvements beaucoup trop tardifs, postérieurs au premier apport d'engrais, qui entraînent une contamination de l'échantillon (anomalie généralement détectée et traitée par le programme).

Deux pistes sont en cours d'exploration pour tenter de réduire l'impact de ces différents problèmes :

- Si l'expérience d'autres organismes chargés de faire des prélèvements de sol montre qu'il n'est pas réaliste de faire faire l'échantillonnage par l'agriculteur, la présence de l'agriculteur au moment du prélèvement par le technicien devrait permettre d'améliorer de manière notable la qualité de l'échantillonnage.
- Nous prévoyons de remplacer la tarière classique, la houe, voir la machette, par un tube biseauté et affûté muni d'une poignée. Un tel outil permet lorsque le sol est humide, de multiplier les prélèvements sur chaque parcelle pour constituer un échantillon moyen qui sera ensuite sous échantillonné. Ce type de prélèvement intéresse en principe une épaisseur d'une vingtaine de 20 cm, correspondant en gros à la zone travaillée et exploitée par les racines. La pioche s'impose dès que les sols sont secs ou caillouteux.

### **Le Repérage Géographique**

Le repérage de la parcelle est réalisé à partir d'une carte IGN au 1/25.000. De nombreuses erreurs ont été constatées à ce niveau, qu'il s'agisse d'un défaut de lecture ou d'une méconnaissance du protocole de localisation liée à des mouvements dans le personnel chargé des prélèvements. Il en résulte des échantillons ininterprétables car non localisés ou localisés de manière aberrante 'hors limite de l'île'. Certains des échantillons présentent en outre des caractéristiques chimiques différentes du type de sol indiqué par le repérage (erreur de localisation ou imprécision dans les limites cartographique des types de

Le diagnostic de fertilité du sol constitue le seul conseil disponible aux agriculteurs intéressés par des productions autres que celles traitées par le système expert. Il permet en particulier de guider les choix des maraîchers et des producteurs de fruits, pour lesquels nous ne disposons pas encore de conseils spécifiques.

Tableau 29 : Fonctionnement du diagnostic de sol par défaut.

Valeur manquante	Valeur attribuée
PH	Diagnostic impossible
Ca	Ca=S1de Ca du sol+0,1 (valeur faible)
Mg	impossible
Mg/Ca	0,2 (faible)
K	impossible
K%CEC	3% (faible)
N	Diagnostic impossible
P assimilable	Diagnostic impossible
P total	Même classe que le P assimilable (faible, fort...).

## Discussion

### Les Seuils

Le système des seuils est simple à manipuler. Il pose cependant des problèmes d'interprétation lorsque les sols sont très proches, mais situés de part et d'autre d'un seuil. Il introduit en effet des discontinuités qui peuvent générer des écarts de conseils pour des sols similaires. Nous considérons cependant que ce défaut est négligeable. Sa correction impliquerait en effet de concevoir et programmer un nouveau système de diagnostic continu pour résoudre quelques anomalies.

Les seuils qui conduisent à l'interprétation du programme expert dépendent de la méthode d'analyse du laboratoire. Cela est surtout vrai pour la CEC et le phosphore assimilable.

La méthode d'analyse de la CEC à la cobaltihexamine est plus facile à mettre en œuvre que la méthode à l'acétate d'ammonium pour déterminer la CEC effective. Elle s'impose sur les andosols car elle permet un dosage au pH effectif du sol, donc sans modification induite de la CEC.

La méthode d'analyse du phosphore est quant à elle incontournable, car il n'existe pas de relations entre les résultats d'analyses obtenus avec deux méthodes différentes. Ainsi, le phosphore évalué avec la méthode du laboratoire de la Réunion (Olsen Dabin) n'aura aucune relation avec l'ancienne méthode Olsen utilisée antérieurement par le même laboratoire ou la méthode Truog utilisée par d'autres laboratoires. Cela implique que les études conduites antérieurement avec d'autres méthodes analytiques ne peuvent servir à l'amélioration du système expert. Il en résulte aussi que tout changement de méthode implique la constitution d'un nouveau référentiel pour l'élaboration de nouveaux seuils.

### La Profondeur Utile

La profondeur de sol est un paramètre de base, utilisé pour calculer les réserves minérales utiles du sol et les corrections à y apporter. Son incidence sur les corrections est considérable puisqu'il y a proportionnalité directe entre profondeur et doses. Or, il apparaît difficile de lui donner un sens agronomique.

La profondeur moyenne est le plus souvent sans rapport avec la profondeur réelle voire utile. Ainsi, dans le cas des andosols profonds, le système racinaire ne pénètre pratiquement pas dans l'horizon b et n'exploite réellement qu'une quinzaine de cm de sol. Son lien avec la profondeur d'enracinement et la migration dans le sol des amendements correctifs peut aussi être discuté. Ainsi, la limitation à 10 cm pour le phosphore qui migre très peu et à 30 cm pour l'amendement calco-magnésien qui migre aussi très lentement n'est pas logique. Un choix doit être fait entre la profondeur moyenne d'enracinement, la profondeur effective d'enfouissement des amendements et leur vitesse annuelle de migration dans le profil.

Le rapport avec la profondeur de l'échantillon analysé n'est pas non plus évident si l'on considère que les analyses portent le plus souvent sur des échantillons prélevés sur 20 cm de profil. La règle est en effet de prélever le sol sur l'épaisseur labourée et d'éliminer les parties caractérisées par un changement de couleur (changement d'horizon).

La profondeur est en fait employée comme un coefficient d'ajustement des résultats du calcul à la réalité économique de la culture. Ainsi, (page 50 et 51) la profondeur prise en compte pour le chaulage de la canne est de 30 cm à La Réunion, 20 cm en Guadeloupe et 15 cm à Hawaï. Elle ne correspond pas à une

7. *Votre sol est relativement riche en potasse, mais sa valeur par rapport à la CEC est faible. Le complexe est certainement saturé en Ca et Mg (vertisols, sables basaltiques...), la potasse est de ce fait très fortement retenue par celui-ci. Raisonner la fertilisation comme pour un sol plutôt pauvre en potasse.*

Tableau 27 : Diagnostic de la fertilité potassique du sol

Variables		K (me/100 g)				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
K%CEC	TRES FAIBLE	1		2	3	
	FAIBLE		2		3	
	MOYEN	2		3	4	
	FORT	3			4	
	TRES FORT					5

### Diagnostic N/matière organique

Le diagnostic correspond aux classes qualitatives de teneur en azote total (Tableau 28).

Tableau 28 : Diagnostic de fertilité du sol en azote.

N (g/kg)				
Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
1	2	3	4	5

Les commentaires illustrant les 5 situations sont les suivants :

1. *Votre sol est très pauvre en matière organique.*
2. *Votre sol est pauvre en matière organique.*
3. *Votre sol est correctement pourvu en matière organique.*
4. *Votre sol est riche en matière organique.*
5. *Votre sol est très riche en matière organique. Dans des conditions favorables (chaleur, humidité), il peut libérer une forte quantité d'azote minéral pour les plantes*

### Diagnostic oligo-élément

Les commentaires reprennent directement les seuils du tableau 20 en limitant les interprétations aux risques identifiés de carence ou de toxicité qui sont associés à des résultats analytiques respectivement inférieurs au seuil S1, ou supérieur au seuil S4. Le programme édite en tout les cinq commentaires suivant en associant les risques de carence en zinc et cuivre, et en fer et manganèse :

1. *Risque de carence en cuivre.*
2. *Risque de carence en zinc.*
3. *Risque de carence en zinc et cuivre.*
4. *Risque de carence en fer et manganèse.*
5. *Risque de toxicité en zinc.*

### Données manquantes

Le système expert a été muni de sécurités pour interpréter des sols dont une partie des caractéristiques chimiques n'a pas ou n'a pu être analysée (Tableau 29). Ces valeurs automatiquement attribuées évitent un arrêt du système en cours de traitement.

### Utilisation du Diagnostic Sol

La finalité du programme expert est d'élaborer un conseil en fertilisation. Le diagnostic de fertilité du sol n'est donc qu'une étape intermédiaire dans l'élaboration de plans de fumure adaptés aux besoins des cultures. Cependant, le résultat du diagnostic de fertilité du sol est systématiquement rappelé sur les bulletins d'analyses que ce soit sous forme de commentaire ou sous forme graphique. Il donne en effet de précieuses indications sur la valeur agricole du sol et les corrections à y apporter pour l'exploiter sans risque majeur, quelle que soit la culture.

31.  *Votre sol a un pH correct malgré des teneurs en calcium et en magnésium très faibles. (1) S'il s'agit d'un andosol : cas fréquent dans les andosol sinon (2) cas anormal. Ce sol est désaturé en base et présente des risques de carence en Ca et en Mg.*
32.  *Votre sol a un pH correct malgré des teneurs en calcium et en magnésium plutôt faibles. (1) S'il s'agit d'un andosol : cas fréquent dans les andosol sinon (2) cas anormal. Ce sol est désaturé en base et présente des risques de carence en Ca et en Mg.*

## Diagnostic P

Le statut du phosphore dans le sol (Tableau 25) est évalué à l'origine par le tableau croisé des classes de sol pour le phosphore assimilable (Tableau 14) et le phosphore total (Tableau 15).

Tableau 25 : Diagnostic de fertilité du sol en phosphore

Variables		P assimilable				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
P total	TRES FAIBLE	1	2	3		
	FAIBLE	2	3	4		
	MOYEN	5				
	FORT			6		
	TRES FORT	6				

Les chiffres du tableau indiquent les phrases suivantes, imprimées sur les bulletins d'analyse :

1.  *Votre sol est très carencé en phosphore.*
2.  *Votre sol est carencé en phosphore.*
3.  *Votre sol est légèrement déficient en phosphore.*
4.  *Votre sol est correctement pourvu en phosphore.*
5.  *Votre sol est relativement riche en phosphore.*
6.  *Votre sol est très riche en phosphore.*
7.  *La teneur en phosphore assimilable est anormalement faible par rapport à la teneur en phosphore totale. Vérifiez la nutrition de la plante en phosphore avant d'effectuer une correction avec un phosphate soluble.*
8.  *La teneur en phosphore assimilable est très élevée par rapport à la teneur totale en phosphore de votre sol. Cas anormal sans doute dû à des apports récents de phosphates solubles.*

Dans la pratique (voir page 29), le phosphore total n'est pas analysé et le système lui donne pour valeur par défaut la classe attribuée au phosphore assimilable (Tableau 26).

Tableau 26 : Diagnostic simplifié de fertilité du sol en phosphore

P assimilable				
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
1	3	4	5	6

## Diagnostic K

Le diagnostic de fertilité potassique (Tableau 27) est basé sur le croisement des classes de sol pour la teneur en potassium (Tableau 13) et de celles définies par les seuils de pourcentage de la CEC occupé par du potassium (Tableau 12).

A noter qu'en cas de calcul impossible du rapport K%CEC, le système expert simule une valeur faible (Tableau 29). Les commentaires concernant la fertilité potassique du sol, qui sont imprimés sur les bulletins d'analyse sont indiqués à la suite. Les numéros correspondent à ceux du Tableau 27.

1.  *Votre sol est très carencé en potasse.*
2.  *Votre sol est légèrement déficient en potasse.*
3.  *Votre sol est correctement pourvu en potasse.*
4.  *Votre sol est riche en potasse.*
5.  *Votre sol est très riche en potasse.*
6.  *Cas anormal*



## Diagnostic du statut calco-magnésien

Le programme effectue un diagnostic d'acidité du sol (Tableau 24), en croisant le diagnostic pH (Tableau 22) avec ce diagnostic Mg (Tableau 23). Ce diagnostic prend en compte :

- le pH qui est une mesure physique du phénomène d'acidité ;
- les principaux facteurs susceptibles de le modifier (Ca et Mg échangeable) ; et
- le rapport de ces deux bases échangeables (Mg/Ca).

Le pH n'est pas un indicateur suffisant d'acidité du sol car il ne peut seul rendre compte des phénomènes de libération d'ions aluminium dans le sol et n'est pas directement corrélé avec le rendement de cultures comme la canne à sucre (Lyonnaz-Perroux, 1982).

Tableau 24 : Diagnostic d'acidité du sol.

DIAGNOSTICS		ACIDITÉ						
		Très Acide	Acide	Peu Acide	Normal	Basique	Anormal 1	Anormal 2
FERTILITÉ MG	Très Carencé	1	2	5	7	10	28	31
	Carencé	2	3		8	11	29	32
	Faible		4	6	9	12	30	
	Normal	13	16	19	22	25		
	Riche	14	17	20	23	26		
	Très Riche	15	18	21	24	27		

Si le pH n'a pas été mesuré, le système indique un diagnostic impossible.

Les chiffres du tableau font référence aux phrases suivantes imprimées par le programme sur les bulletins d'analyse, quelle soit la culture :

1. *Votre sol est très acide et très carencé en magnésium.*
2. *Votre sol est très acide et carencé en magnésium.*
3. *Votre sol est acide et carencé en magnésium.*
4. *Votre sol est acide et légèrement déficient en magnésium.*
5. *Votre sol est légèrement acide et très carencé en magnésium.*
6. *Votre sol est légèrement acide et légèrement carencé en magnésium.*
7. *Votre sol a un pH correct, mais il est très carencé en magnésium.*
8. *Votre sol a un pH correct, mais il est carencé en magnésium.*
9. *Votre sol a un pH correct avec une légère déficience en magnésium.*
10. *Votre sol est basique mais très carencé en magnésium.*
11. *Votre sol est basique mais carencé en magnésium.*
12. *Votre sol est basique et légèrement déficient en magnésium.*
13. *Votre sol est très acide.*
14. *Votre sol est très acide bien que relativement riche en magnésium.*
15. *Votre sol est très acide bien que très riche en magnésium.*
16. *Votre sol est acide.*
17. *Votre sol est acide bien que relativement riche en magnésium.*
18. *Votre sol est acide bien que très riche en magnésium.*
19. *Votre sol est légèrement acide.*
20. *Votre sol est légèrement acide, mais relativement riche en magnésium.*
21. *Votre sol est légèrement acide, mais très riche en magnésium.*
22. *Votre sol a un pH correct et il est normalement pourvu en magnésium.*
23. *Votre sol a un pH correct et il est relativement riche en magnésium.*
24. *Votre sol a un pH correct et il est très riche en magnésium.*
25. *Votre sol est basique. Eviter la culture de plantes acidophiles.*
26. *Votre sol est basique et relativement riche en magnésium. Evitez la culture de plantes acidophiles.*
27. *Votre sol est basique et relativement riche en magnésium. Déséquilibres possibles avec calcium et avec potasse. Evitez la culture de plantes acidophiles.*
28. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium très faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants.*
29. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants.*
30. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium un peu faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants.*

## FERTILITE DES SOLS - 3. Le Diagnostic de Fertilité

### Introduction

Les seuils précédents sont utilisés pour élaborer des diagnostics de fertilité qui sont censés caractériser la fertilité du sol, indépendamment de la culture. Notons cependant qu'ils sont basés sur de nombreuses études, dont celles de Fritz (1967) qui mettent en relation les caractéristiques chimiques et des rendements en biomasse.

Pour chaque échantillon analysé, le type de sol est déterminé par les coordonnées géographiques. La classe qualitative des variables chimiques de l'échantillon est déterminée par les seuils de fertilité. Un diagnostic de fertilité est alors construit par élément en croisant les classes de fertilité en fonction des équilibres minéraux des sols.

Un commentaire caractérisant le résultat du diagnostic sol est systématiquement imprimé sur le bulletin analytique, afin de mieux renseigner l'agriculteur et de permettre une approche de la fertilisation de cultures non traitées par le système expert.

### L'acidité

#### Diagnostic pH / Ca

Le diagnostic du système expert (Tableau 22), provient du positionnement de l'échantillon de sol analysé dans un tableau croisé des classes de sol définies par les seuils des variables pH (Tableau 5) et Ca (Tableau 6).

Tableau 22 : Diagnostic de pH du sol

Variables		pH				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
Ca (mé/100 g)	TRES FAIBLE	TRÈS ACIDE	ACIDE	ANORMAL		
	FAIBLE			NORMAL		
	MOYEN					
	FORT	PEU ACIDE	BASIQUE			
	TRES FORT					

Les cas anormaux sont soit des indicateurs permettant de détecter des erreurs analytiques ou d'échantillonnage, soit des cas particuliers de sol nécessitant des corrections spécifiques.

#### Diagnostic Mg

Le diagnostic de richesse du sol en magnésium est résumé Tableau 23. Il dépend d'une part de la teneur du sol en cet élément (Tableau 8) et d'autre part de son importance relative par rapport au calcium (Tableau 9).

Tableau 23 : Diagnostic de fertilité du sol en Magnésium

Variables		Mg					
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT	
Mg/Ca	TRES FAIBLE	TRÈS CARENCÉ	CARENCÉ	ANORMAL			
	FAIBLE		FAIBLE	NORMAL			
	MOYEN						
	FORT	CARENCÉ					RICHE
	TRES FORT						RICHE

Si le rapport Mg/Ca ne peut être calculé parce que le calcium ou le magnésium n'ont pas été analysés, le système simule une valeur faible du rapport (Tableau 29).

Tableau 21 : Seuils pour les oligo-éléments.

SOLS	mg/kg	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Tous	Fe DTPA		10		20		100		150	
	Mn DTPA		5		10		50		80	
	Zn DTPA		0,4		0,8		5		10	
	Cu DTPA		0,4		0,8		10		30	

Les analyses d'oligo-éléments ne sont pas courantes. La base de données du laboratoire ne dispose donc pas d'informations suffisantes pour élaborer des bases de diagnostic.

En cas de besoin, des seuils plus discriminants pourraient être proposés, en prenant en compte des variables telles que le pH et la teneur en matière organique (N total dans notre étude), qui ont une incidence majeure sur l'apparition de carences ou de toxicité.

Ces seuils ne sont pas tous utilisés par le système expert mais peuvent servir à des interprétations ponctuelles en manuel pour des besoins spécifiques, comme ils pourront être utilisés pour de nouvelles cultures. Ils sont le plus souvent visualisés sous forme graphique sur les bulletins d'analyse (documents 1 à 4).

### Le taux de saturation

Les seuils du taux de saturation sont définis à partir des seuils de Ca, Mg, et de la CEC (Tableau 18). La saturation peut être supérieure à 100% pour les pH élevés dans le cas des sols à charge variable (variation de la CEC avec le pH).

Tableau 18 : Seuils du Taux de Saturation.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Taux de Saturation %	Ferrallitique		60		80		90		95	
	Vertique		12		25		50		99	
	Brun		41		71		90		99	
	Brun andique		60		85		99		105	
	Andique non perhy.		40		85		99		105	
	Andique perhydraté		16		76		99		105	

### Le Carbone

Les seuils du carbone proviennent de l'étude de la distribution des données analytiques (Tableau 19).

Tableau 19 : Seuils du Carbone

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Carbone (mg/kg)	Ferrallitique		1,0		2,0		3,0		4,0	
	Vertique		0,5		1,0		1,5		2,0	
	Brun		0,8		1,5		2,2		3,0	
	Brun andique		1,8		3,6		5,4		7,2	
	Andique non perhy.		3,6		7,2		10,8		14,4	
	Andique perhydraté		5,5		12,0		17,5		23,0	

### Le Rapport C/N

Les seuils ont été établis à partir de la base de données du laboratoire. On distingue, pour le rapport C/N les sols non andiques des sols andiques. De plus, les résultats conduisent à une subdivision des sols andiques en perhydratés et non perhydratés (Tableau 20).

Tableau 20 : Seuils du rapport C/N.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN N	S3	FORT	S4	TRES FORT
Rapport C/N	Non andiques (ferrallitique, brun & vertique)		8		10		14		16	
	Brun andique & andique non perhydraté		10		12		16		18	
	Andique perhydraté		12		14		18		20	

### Les oligo-éléments

Les seuils en Oligo-éléments (Tableau 21) ne sont pas spécifiques des cultures ou des types de sols réunionnais. Peu d'études ont en effet été réalisées à La Réunion dans ce domaine. Les normes utilisées par le programme découlent principalement de celles établies par A. Loué (1993) et de celles publiées par les chambres d'agriculture de l'Ain et de la Saône-et-Loire (CA, 1983).

## Le phosphore total

Nous retrouvons ces deux mêmes groupes de sol pour les seuils du phosphore total (Tableau 15).

Tableau 15: Seuils du Phosphore Total.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Phosphore Total (mg/kg)	Non andiques		1550		1650		2100		2600	
	Andiques		1750		2100		3150		4700	

## Les seuils de la fertilisation azotée

Les seuils de l'azote ont été déterminés à partir des travaux de Meyer et Wood (1986) en Afrique du Sud. Les résultats bien qu'obtenus sur la canne caractérisent les sols et s'adaptent à toute culture.

Les seuils en azote sont fonction de l'azote minéralisable potentiel. La quantité potentielle d'azote minéralisable  $N_{min}$ . (kg/ha) dans les 30 cm de sol est donnée par la formule :

$$N_{min} = C_m \times d_a \times N_t \times 0,3 \times 10^4$$

Avec :  $C_m$  = taux de minéralisation en %;  $d_a$  = densité apparente en  $kg/dm^3$  et  $N_t$  = azote total en g/kg).

Les taux de minéralisation des principaux types de sol réunionnais proviennent des travaux de Fritz (1973) et de Checkouri (1990) Les valeurs de  $d_a$  sont celles de Clarion (1991) pour les sols ferrallitiques, et de Perret (1989, 1993) pour les autres sols. Les valeurs de  $d_a$  et de  $C_m$  sont indiquées dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Densité apparente et coefficient de minéralisation

SOL	Ferrallitique	Vertique	Brun	Brun and.	Andique np.	Andique p.
DENSITÉ APPARENTE $kg/dm^3$	1,2	1,4	1,3	0,9	0,8	0,6
COEFFICIENT DE MINÉRALISATION (%)	2,0	2,8	2,5	1,8	1,0	1,0

Faute d'élément pour les chiffrer, les pertes d'azote par lixiviation et dénitrification ne sont pas prises en compte dans ce raisonnement. Il en va de même de paramètres tels que la température et l'humidité, qui conditionnent la minéralisation. La fourniture théorique d'azote par le sol a été reliée aux besoins minéraux de la culture. Les seuils (S) furent déterminés dans un premier temps pour des fournitures Q d'azote par le sol correspondant à 75, 150, 225 et 300 unités d'azote ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) :

$$S = Q / (C_m \times d_a \times 0,3 \times 10^4)$$

Ces niveaux de fourniture d'azote encadrent les besoins d'une culture de canne à sucre. Les seuils ainsi définis (Tableau 17) prennent donc en compte les caractéristiques des sols, les besoins de la culture, et ne considèrent pas les autres éléments du cycle de l'azote comme la lixiviation.

Tableau 17 : Seuils de l'Azote

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Azote total (g/kg)	Ferrallitique		1,0		2,0	(2,1)	3,0	(3,1)	4,0	(4,2)
	Vertique		0,5	(0,6)	1,0	(1,3)	1,5	(1,9)	2,0	(2,6)
	Brun		0,8		1,5		2,2	(2,3)	3,0	(3,1)
	Brun andique		1,5		3,0	(3,1)	4,5	(4,6)	6,0	(6,2)
	Andique non perhy.		3,0	(3,1)	6,0	(6,3)	9,0	(9,4)	12,0	(12,5)
	Andique perhydraté		4,0	(4,2)	8,5	(8,3)	12,5		16,5	(16,7)

Les valeurs entre parenthèse indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues

## Les autres seuils

Les autres seuils proviennent de l'actualisation des anciennes grilles d'interprétation du laboratoire à partir des études de distribution des variables.



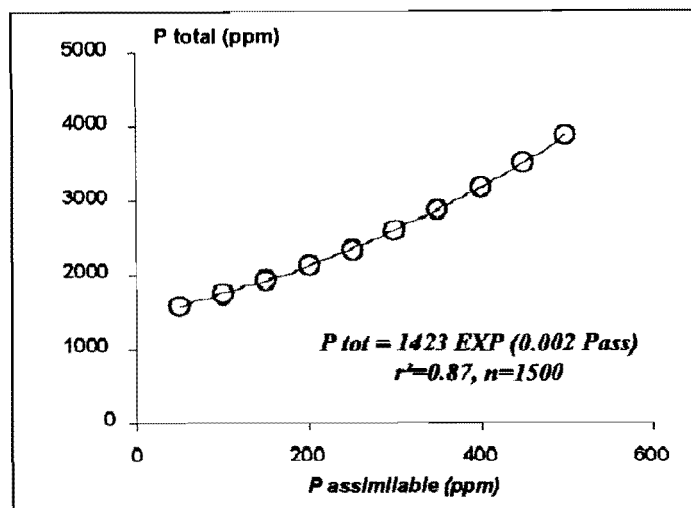
## Les seuils de la fertilisation phosphorique

### Introduction

Le conseil de fertilisation en phosphore repose à l'origine sur l'interprétation du rapport entre le phosphore total et le phosphore assimilable. Les résultats agronomiques anciens ne peuvent être utilisés pour fixer les seuils du phosphore, car les méthodes d'analyses du phosphore assimilable ont changé et les liens entre les résultats de deux méthodes différentes sont généralement indéterminés.

Le phosphore total est fortement lié au phosphore assimilable, comme la corrélation suivante (Figure 9) portant sur un échantillon de 1500 analyses, le démontre.

Figure 9 : Relation entre le phosphore total et le phosphore assimilable



L'étude, réalisée sur des fichiers de résultats antérieurs à 1990 ne porte pas sur les types ou les unités de sol. La plupart des échantillons analysés à cette époque n'étaient pas en effet correctement géoréférencés. La corrélation est suffisamment forte, tous sols confondus, pour que le phosphore total ne soit plus qu'exceptionnellement analysé. Sa détermination est longue et met en jeu une attaque à l'acide perchlorique difficile à réaliser dans des conditions non polluantes. Le phosphore total n'est donc analysé qu'en cas d'anomalies, afin de vérifier une erreur ou une contamination de l'échantillon ou dans le cadre d'une demande spécifique.

Le diagnostic de fertilité du sol en phosphore repose donc actuellement sur les seuils du phosphore assimilable, avec la possibilité d'introduire le phosphore total en cas de nécessité.

### Le phosphore assimilable

La base de données permet de distinguer deux groupes de sols (Tableau 14). Les sols bruns, ferrallitiques et vertiques qui sont pauvres en phosphore mais le fixent peu. Les sols à caractère andique (brun andique, et andique perhydraté ou non), qui sont riches en phosphore, mais le fixent fortement (peu disponible pour les plantes).

La détermination de phosphore assimilable est effectuée avec le même protocole Olsen modifié Dabin, quelque soit l'unité de sol. Cette méthode est l'une des plus efficaces pour exprimer la fertilité phosphorique des sols tropicaux (Roche et al., 1978). Elle s'adapte bien à une large gamme de sol tropicaux. Elle donne en outre des résultats qui sont bien reliés à la croissance de matière sèche de graminées en vase de végétation (méthode Chaminade, 1960). La méthode Olsen Dabin s'avère plus facile à mettre en œuvre que la méthode IMPHOS de désorption par résine échangeuse d'anions (Roche et al., 1980).

Tableau 14 : Seuils du Phosphore Assimilable.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Phosphore Olsen-Dabin (mg/kg)	Non andiques		50		80		200		300	
	Andiques		100		200		400		600	

Tableau 10 : Relations entre CEC & teneur en Ca (mé/100 g).

UNITE DE SOL	COURBES DE RÉGRESSION	r <sup>2</sup>
Ferrallitique	CEC=1,52 Ca + 2,56	0,74
Vertique	CEC= 1,24 Ca + 12,5	0,85
Brun	CEC= 1,39 Ca + 3,61	0,79
Brun andique	CEC= 1,27 Ca + 3,60	0,83
Andique non perhydraté	CEC= 1,25 Ca + 3,68	0,76
Andique perhydraté	CEC= 1,16 Ca + 4,62	0,54

Les calculs et les ajustements graphiques conduisent aux seuils de la CEC pour chaque unité de sol (Tableau 11).

Tableau 11 : Seuils de la CEC.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
CEC en mé/100g	Ferrallitique		6,8		10,8	(10,9)	14,5	(14,7)	18,0	(17,8)
	Vertique		7,0	(13,1)	14,5	(14,4)	18,5	(18,7)	40,0	(39,8)
	Brun		5,6	(5,7)	10,0	(9,9)	14,5	(14,7)	17,0	(20,3)
	Brun andique		7,4		11,0	(11,2)	16,0	(16,3)	18,0	(18,8)
	Andique non perhy.		5,5	(5,6)	11,0	(11,2)	16,0	(16,2)	18,0	(18,7)
	Andique perhydraté		5,0	(5,2)	10,5	(10,4)	16,0	(16,2)	19,0	(22,0)

Les valeurs entre parenthèse indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues

A noter que la CEC est déterminée par dosage à la cobaltihexamine (page 87) qui ne modifie pas le pH du sol contrairement à l'ancienne méthode à l'acétate d'ammonium (valable pour les sols à charge fixe). L'analyse de la CEC à la cobaltihexamine s'impose dans le cas des sols à charge variable qui dominent à la Réunion. Elle dose en fait la somme des cations échangeables présents dans le sol, ce que les auteurs, utilisant l'acétate d'ammonium, appellent la CEC effective. Elle présente en outre l'avantage d'être beaucoup plus simple et rapide à mettre en œuvre.

## Le Potassium

Le rapport du potassium à l'argile n'est pas pris en compte, comme classiquement, car le taux d'éléments fins varie peu d'un sol à l'autre (sauf pour les alluvions à galet). Le système considère la proportion de potassium dans le complexe absorbant (K% CEC). Les seuils retenus (Tableau 12) découlent d'études multilocales conduites entre 1980 et 1984 sur les principaux types de sol (Chabalier & al, 1984). Ces études montrent la pertinence du rapport K%CEC pour apprécier la nutrition de la canne à sucre.

Tableau 12 : Seuils du rapport en pour-cent entre le potassium et la CEC.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
K% CEC	Tous		2,0		4,0		6,0		8,0	

Les seuils du potassium (Tableau 13) sont déduits des seuils K%CEC et CEC précédemment définis. Pour des raisons déjà évoquées, quelques ajustements ont été réalisés à partir des résultats calculés.

Tableau 13 : Seuils du potassium.

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
K mé/100 g	Ferrallitique		0,10		0,40		0,90		1,50	(1,44)
	Vertique		0,30	(0,15)	0,60		1,10		3,20	
	Brun		0,10		0,40		0,90		1,40	
	Brun andique		0,15		0,45	(0,44)	1,00		1,50	(1,44)
	Andique non per.		0,10		0,40	(0,44)	1,00		1,50	(1,44)
	Andique per.		0,10		0,40		1,00		1,50	

Les valeurs entre parenthèse indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues

extrémités.

En conséquence, le calcul réalisé à partir des équations moyennes (régressions basées sur l'ensemble des informations par unité de sol) ne donne pas toujours exactement les valeurs retenues pour les seuils.

Tableau 7 : Relations entre pH et teneur en calcium (mé/100g).

SOL	COURBES DE RÉGRESSION $r^2 > 0,9$
Ferrallitique	$pH = 4,53 \cdot \exp(0,03 \text{ Ca})$
Vertique	$pH = 7,01 / (1 + 0,38 \cdot \exp(-0,24 \text{ Ca}))$
Brun	$pH = 6,98 / (1 + 0,54 \cdot \exp(-0,15 \text{ Ca}))$
Brun andique	$pH = 0,12 \text{ Ca} + 4,72$
Andique non perhydraté	$pH = 4,9 \cdot \exp(0,02 \text{ Ca})$
Andique perhydraté	$pH = 6,04 / (1 + 0,22 \cdot \exp(-0,19 \text{ Ca}))$

### Le Magnésium

Les seuils du magnésium dérivent directement du Tableau 6, en divisant les seuils du calcium par 2. Le rapport généralement admis pour un développement végétal satisfaisant est en effet Ca/Mg=2. Comme dans le cas du calcium, les valeurs calculées ont dû être ajustées pour tenir compte des imprécisions dans les régions extrêmes des graphiques (Tableau 8).

Tableau 8 : Seuils du Magnésium (mé/100 g)

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Mg (mé/100 g)	Ferrallitique		1,4		2,7	(2,8)	4,0		5,0	
	Vertique		0,4	(0,3)	0,8		2,5		11,0	
	Brun		0,7	(0,8)	2,2	(2,3)	4,0		5,0	(6,0)
	Brun andique		1,5		3,0		5,0		6,0	
	Andique non perhydr.		0,7	(0,8)	3,0		5,0		6,0	
	Andique perhydraté		0,3		2,5		5,0		7,0	(7,5)

Les valeurs entre parenthèse indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues

### Le Rapport Mg/Ca

Nous venons de voir que l'optimum du rapport Ca/Mg était de 2, soit 0,5 pour le rapport inverse Mg/Ca. Les seuils du rapport Ca/Mg, basés sur la distribution des données du laboratoire, qualifient l'écart par rapport à cette valeur souhaitable (Tableau 9). Des problèmes apparaissent en effet sur les cultures, lorsque que l'on s'écarte trop de l'optimum.

Tableau 9 : Seuils du Rapport Mg/Ca

CARACTERE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Mg/Ca	Tous		0,1		0,5		0,8		1,5	

## **Les seuils de la fertilisation potassique**

### **La capacité d'échange cationique (CEC)**

Les seuils de CEC sont utilisés pour évaluer la fertilisation potassique. Leurs évaluations résultent des relations par unité de sol entre la CEC et la teneur en calcium (Tableau 10, Figure 7).

Le lien théorique entre la capacité d'échange et le calcium est partiellement justifié par la présence de colloïdes à charge variable (allophanes) dans la plupart des sols de l'île (sols à caractère andique). Il repose sur les faibles variations constatées du taux de saturation qui se situe généralement entre 70 et 80%. La CEC est alors une fonction croissante du pH, lui-même étroitement corrélé au calcium.

## Les Seuils de l'Amendement calco-magnésien

### Le pH

La plupart des seuils relatifs à la capacité d'échange en cations sont fixés à partir des seuils de pH. Les seuils retenus pour le pH (Tableau 5) sont identiques pour les 6 types de sol, exception faite des sols andiques pour lesquels le seuil supérieur a été diminué de 0,5 unités, afin de tenir compte de la distribution de la base de données du laboratoire

Tableau 5 : Seuils (S) de caractérisation du pH

CARACTÈRE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
pH eau	Ferrallitique		5,0		5,5		6,0		7,0	
	Vertique		5,0		5,5		6,0		7,0	
	Brun		5,0		5,5		6,0		7,0	
	Brun Andique		5,0		5,5		6,0		7,0	
	Andique non perh.		5,0		5,5		6,0		6,5	
	Andique perh.		5,0		5,5		6,0		6,5	

En dehors de ces deux cas, les seuils sont basés sur les normes généralement admises, avec :

- Des risques de toxicité aluminique en dessous de 5;
- Une possibilité de toxicité manganique entre 5 et 5,5;
- Des conditions normales jusqu'à 7 et;
- Des conditions basiques au-delà de 7 (rare à La Réunion).

Le seuil entre fort et très fort n'est pas traité par la suite car, sauf exception ponctuelle (quelques sols vertiques), il ne correspond pas à une réalité réunionnaise.

### Les Bases

Le diagnostic et les conseils en fertilisation calco-magnésienne reposent sur les seuils du pH, du calcium et du magnésium. Ils ont le double objectif (1) de corriger une éventuelle toxicité aluminique et (2) d'assurer les besoins nutritifs de la plante en calcium et en magnésium. Notons qu'il existe des risques de carence en Ca dans certains andosols très désaturés de la Réunion,

### Le Calcium

Les seuils du calcium (Tableau 6) ont été estimés graphiquement à partir de courbes reliant la teneur en calcium des sols à leur pH eau (Tableau 7, Figure 6).

Tableau 6 : Seuils du Calcium (mé/100 g)

CARACTÈRE CHIMIQUE	SOL	TRES FAIBLE	S1	FAIBLE	S2	MOYEN	S3	FORT	S4	TRES FORT
Ca (mé/100 g)	Ferrallitique		2,8	(3,3)	5,5	(6,5)	8,0	(9,4)	10	(14,5)
	Vertique		0,5	-	1,5	(1,4)	5,0	(3,4)	22	(23,3)
	Brun		1,5	(2,1)	4,5	(4,6)	8,0		12	-
	Brun andique		3,0	(2,3)	6,0	(6,5)	10	(10,7)	12	(19,0)
	Andique non perhydr.		1,5	(1,0)	6,0	(5,8)	10	(10,1)	12	(14,1)
	Andique perhydraté		0,5	(0,3)	5,0	(4,2)	10	(18,4)	15	-

Les valeurs entre parenthèse indiquent les résultats du calcul lorsqu'ils diffèrent des valeurs seuil retenues

Certaines valeurs ont dû être ajustées afin :

- de rendre l'ensemble cohérent par des arrondis appropriés,
- de quantifier certains seuils pour lesquels le nombre de données était insuffisant,
- d'évaluer les informations situées dans des zones très dispersées, notamment aux



## FERTILITE DES SOLS - 2. Caractérisation des Seuils

### Introduction

Le diagnostic de fertilité chimique est construit à partir des unités de sol précédemment déterminées. Il repose sur des valeurs seuils (Chabaliér, 1982; SCPA, 1981) qui permettent d'une part de qualifier le résultat analytique pour chaque variable chimique et d'autre part de réaliser un diagnostic débouchant sur un conseil quantifié. Ces seuils sont détaillés sous forme de tableaux, que nous avons classés dans l'ordre d'utilisation par le système expert pour élaborer les conseils en fertilisation. Ont été ainsi regroupés les seuils permettant de définir l'amendement calco-magnésien puis ceux déterminant les fumures potassiques, phosphoriques et azotées. Les autres seuils sont indiqués en fin de paragraphe. L'ordre dans lequel les différents éléments ont été traités (Ca, Mg, K, P, N) correspond grossièrement à l'ordre de déduction des seuils à partir du pH.

### Le Principe des Seuils

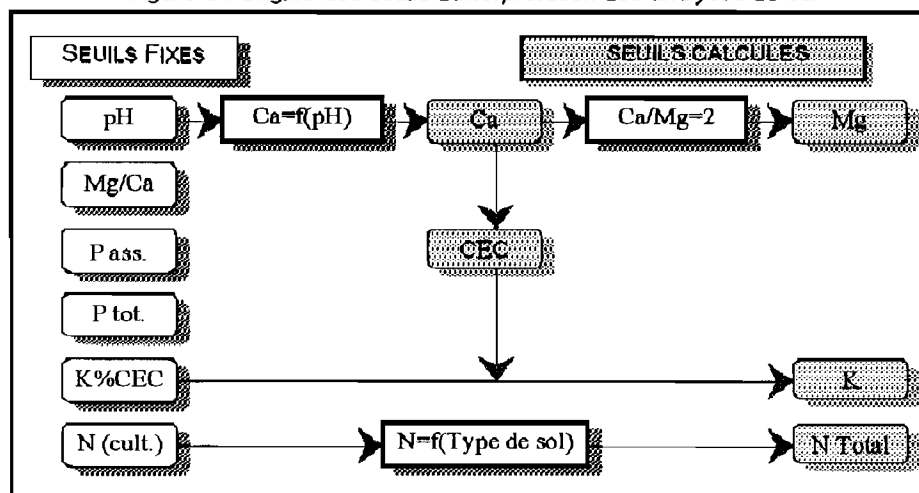
Chaque type de sol est caractérisé par une grille d'interprétation spécifique. La grille est basée selon les variables chimiques sur :

- Les corrélations entre les différentes caractéristiques chimiques de la banque de données ;
- La distribution des valeurs de chaque caractéristique chimique ;
- Des expériences spécifiques et;
- Des informations bibliographiques.

La grille est formée pour chaque variable chimique de 4 seuils nommés S1 à S4, définissant 5 classes qualitatives : très faible, faible, moyen, fort et très fort. La classe moyenne est le lieu d'une croissance 'normale' des plantes. Les classes intermédiaires (faible et fort) constituent des zones de transition 'à risque' avec les classes extrêmes qui correspondent à des problèmes de croissance

La valeur des seuils caractérise chaque type de sol. Certains seuils sont fixés en fonction des connaissances acquises sur les conditions de croissance et de développement des cultures (expérimentation agronomique et résultats bibliographiques). D'autres sont calculés à partir des corrélations entre les variables chimiques (Figure 8).

Figure 8 : Origine des seuils d'interprétation des analyses de sol



Afin de disposer d'échelles pour l'interprétation graphique des analyses (documents 1 à 4), le système expert utilise deux seuils supplémentaires qui sont d'une part la valeur zéro des variables comme origine et d'autre part une valeur élevée légèrement supérieure au maximum constaté dans la base de données des valeurs de chaque variable (Tableau 52).

Tableau 33 : Identification des phrases définissant le conseil en amendement calco-magnésien.

DIAGNOSTICS		ACIDITÉ						
		Très Acide	Acide	Peu Acide	Normal	Basique	Anormal 1	Anormal 2
FERTILITÉ MG	Très Carencé	1		3	4	6	3	15
	Carencé		2					14
	Faible				5	7		
	Normal		8	10				
	Riche		9	11	12	13		
	Très Riche							

Le signe # indique l'emplacement où va figurer le résultat chiffré du calcul des doses de calcium et de magnésium conseillées.

1. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #
2. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée : #
3. Un apport de chaux magnésienne riche en Mg (30 à 40% MgO) est recommandé. Dose préconisée : #
4. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #
5. Pensez, sur cultures exigeantes, à effectuer des apports d'entretien en Mg. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
6. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
7. Pensez, sur cultures exigeantes, à effectuer des apports d'entretien en Mg. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
8. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : # ou, si # > 3 t/ha : un apport de chaux magnésienne est indispensable.
9. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : #
10. Un amendement d'entretien d'environ 500 kg/ha de chaux magnésienne tous les 3 ans serait souhaitable.
11. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux serait souhaitable. Dose préconisée : #
12. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.
13. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.
14. Un apport de chaux magnésienne riche en Mg (30 à 40% MgO) est recommandé. Dose préconisée : #
15. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #

Les phrases complètes associant les trois types de phrases précédentes sont détaillées en annexe à titre d'illustration (page 90).

### Distribution géographique des conseils

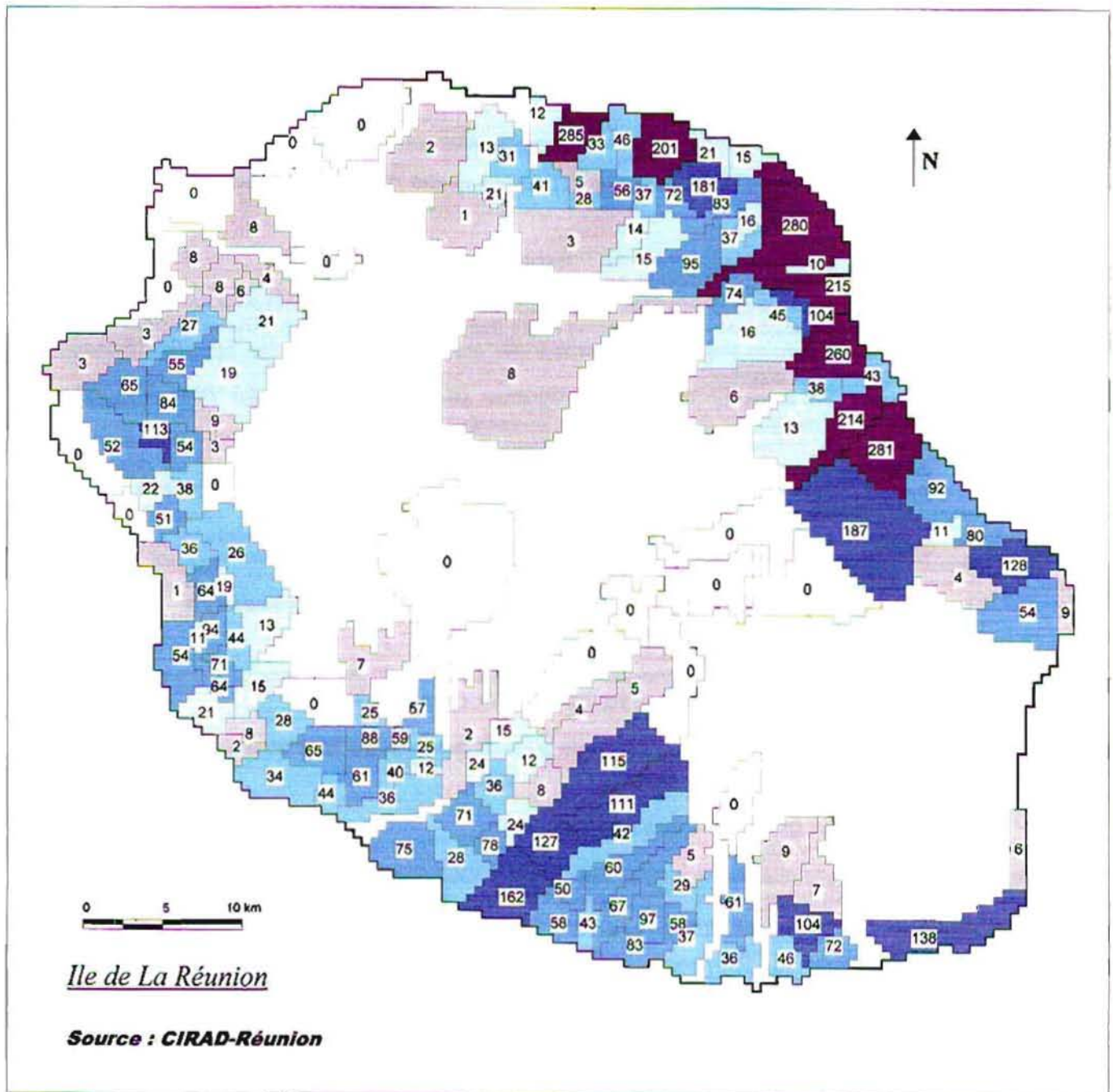
La distribution des conseils réalisés de janvier 1991 à juillet 1997 (Carte 5), montre qu'une correction calco-magnésienne est recommandée dans 50% des cas (Tableau 34). L'amendement moyen conseillé est de 1,8 t.ha<sup>-1</sup> de CaO + MgO avec des variations de 0,5 à 6 t.ha<sup>-1</sup>.

Tableau 34 : Distribution des conseils en amendement calco-magnésien

Variables	Classe de dose conseillée t/ha					Total
	0	- de 1	1-1,5	1,5-2	+ de 2	
Nombre d'Analyses	3726	89	784	1590	1326	7517
Pourcentage de conseil	49,6	1,2	10,4	21,2	17,7	100
Dose moyenne en t/ha	0	804	1267	1764	2385	1865

L'amendement calco-magnésien du sol concerne surtout la côte Est de l'île (Carte 6). Cependant, des pourcentages significatifs de conseil en chaulage sont à peu près généralisés exception faite, pour le moment d'une dizaine de micro-zones sur les 155 concernées par la culture de la canne à sucre. Ces résultats montrent la variabilité importante des paramètres physico-chimiques utilisés pour déterminer le conseil en chaulage (Fallavier, 1995). Il en résulte forcément qu'un conseil bâti sur la moyenne des résultats de la micro-zone est peu pertinent. Une analyse chimique du sol doit donc être réalisée à chaque replantation.

## Carte 5 : Répartition de 7553 analyses de sol sous canne réalisées depuis janvier 1991.

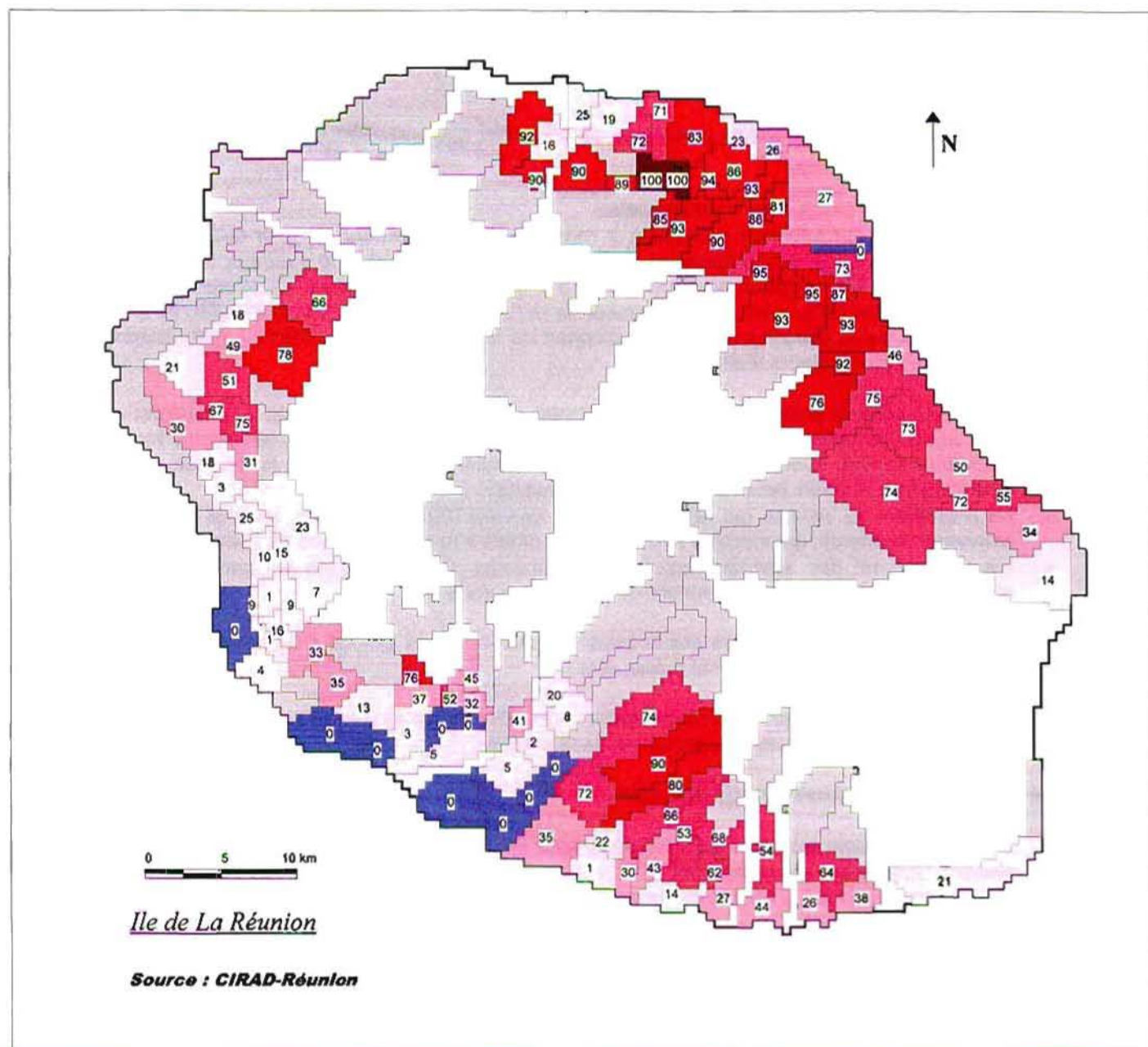


17 micro-zones	Pas d'analyse de sol canne
29 micro-zones	0 < nombre d'analyses < 10
25 micro-zones	10 ≤ nombre d'analyses < 25
30 micro-zones	25 ≤ nombre d'analyses < 50
36 micro-zones	50 ≤ nombre d'analyses < 100
11 micro-zones	100 ≤ nombre d'analyses < 200
7 micro-zones	200 ≤ nombre d'analyses

Les chiffres indiquent le nombre total d'analyses réalisées dans chaque micro-zone pendant la période considérée



## Carte 6 : Répartition des conseils en amendement calco-magnésien des sols sous canne



	Moins de 10 analyses : Conseil en chaulage indéterminé
0	Plus de 10 analyses : Aucun conseil en chaulage
	Plus de 10 analyses : Conseil en chaulage dans 1 à 25% des cas
	Plus de 10 analyses : Conseil en chaulage dans 26 à 50% des cas
	Plus de 10 analyses : Conseil en chaulage dans 51 à 75% des cas
	Plus de 10 analyses : Conseil en chaulage dans 76 à 99% des cas
	Plus de 10 analyses : Conseil en chaulage dans tous les cas

Les chiffres indiquent le pourcentage d'analyse aboutissant à un conseil en amendement calco-magnésien



Notons que certains sols de l'île présentent des carences en calcium et en magnésium, sans problème d'acidité. Le diagnostic conduit alors à préconiser une fumure d'entretien calco-magnésienne, qui ne constitue pas un amendement. Cette situation est mentionnée figure 10, dans le plan de fumure. La représentation cartographique sera complétée en introduisant les informations non directement disponibles collectées entre 1986 et 1991 (changement de format et tri / interprétation en cours).

## Discussions

### Problématique

La mise en œuvre du conseil pose des problèmes de calendrier d'intervention, de nature de l'amendement et de dose d'épandage.

#### **Calendrier d'intervention**

Le conseil en amendement doit être accessible à l'agriculteur suffisamment tôt pour que celui-ci soit en mesure d'effectuer l'épandage à la préparation du sol. Il est en effet nécessaire d'enfouir la chaux dans le profil ou de la localiser dans le sillon de plantation. Cette dernière technique est excellente car elle traite l'environnement immédiat de la zone d'enracinement de la canne avec un produit dont l'effet, lié à la faible migration « n'apparaît qu'au voisinage des points d'apport de chaux » (Fallavier, 1995). L'enfouissement ou la localisation ne sont pas toujours réalisables :

- Les délais entre le prélèvement du sol et la mise à disposition des résultats à l'exploitant ne sont pas toujours suffisants pour de nombreuses raisons liées à la chaîne des intervenants (agriculteur pour l'information, agent des SICA pour le prélèvement et l'expédition au laboratoire, laboratoire pour l'analyse et poste pour l'expédition des résultats).
- Le prestataire de service qui effectue le plus souvent l'épandage a ses propres contraintes de calendrier de travail, qui ajoutent forcément des délais à la mise en place de l'amendement.
- L'enfouissement des amendement n'est pas toujours réalisable dans les zones à fort risque d'érosion (pente des parcelles, nature des sols, pluviométrie).

Nous essayons d'inciter les agriculteurs par le biais des techniciens à prévoir longtemps à l'avance leur replantation afin que le prélèvement de sol puisse être fait :

- Soit l'année précédent la replantation, entre la dernière coupe et la mise en place des engrais;
- Soit au pire un mois avant la replantation de la parcelle.

Dans les autres cas, deux situations sont possibles :

- Le conseil parvient trop tard à l'agriculteur pour un enfouissement et nous conseillons alors de réaliser l'épandage en surface en prévoyant un effet forcément différé de l'amendement. Le même conseil est proposé si les problèmes d'érosion ne permettent pas un travail d'enfouissement.
- L'analyse n'a pas pu être réalisée et nous conseillons à l'agriculteur d'employer une dose moyenne correspondant au conseil le plus fréquent dans sa micro-région.

Ce dernier point nous a conduits à entreprendre (travail en cours) des études de distribution des conseils à l'échelle des micro-zones et des pixels, par zone d'encadrement (travail en prévision).

#### **L'amendement**

En l'absence de sources de calcium utilisable à La Réunion (calcaire corallien protégé et traces de calcaire d'origine hydrothermal), l'amendement doit être importé. Le produit actuel est de chaux vive calco-magnésienne titrant entre 57 et 59 CaO et 37 et 39 MgO. Sa forte concentration permet de limiter les coûts de transport et d'épandage par unité fertilisante.

Si la chaux vive est très active sous forme pulvérulente, son utilisation est délicate dans les conditions humide et ventées de La Réunion. Son hygroscopicité se traduit souvent par des prises en masse dans le dispositif d'épandage et son caractère caustique s'accommode mal du vent. Des formes compactées lui ont donc été préférées, mais leur efficacité est discutable. L'observation montre en effet que le produit se retrouve en quantité importante non solubilisé dans le profil 4 ou 5 ans après l'épandage. Les analyses de résidus de chaux vive compactée prélevée dans le sol 3 ans après épandage indiquent une carbonatation importante et une activité chimique réduite (faible solubilité). La taille importante des restes carbonatés ne



permet pas en outre leur biodégradation rapide (faible surface spécifique et action forcément limitée de la micro-faune du sol).

Concernant la chaux vive, il est donc préférable, là où la manipulation est possible (matériel d'épandage adapté, conditions climatiques convenables) d'utiliser le produit pulvérulent. Il est également nécessaire, quelque soit la forme du produit, de procéder à son enfouissement en profondeur au moment de l'épandage.

Concernant la nature de l'amendement, le choix d'un calcaire dolomitique très finement broyé semble judicieux. Si le produit est deux fois plus onéreux au transport (environ deux fois moins dosé que la chaux vive), il est peu hygroscopique et pas caustique. Il sera donc facilement épandable dans les conditions climatiques locales. La rapidité de son action est liée à la finesse du broyage. Incorporé, il permet de traiter le sol de manière beaucoup plus homogène que la chaux vive compactée.

L'emploi de gypse (sulfate de calcium) est aussi envisageable (sources d'approvisionnement possibles en Afrique du Sud où il est couramment employé sur canne à sucre). Ce produit migre très vite dans le profil et y accroît légèrement le pH (Fallavier, 1995). Il présente donc un intérêt dans des conditions où l'amendement ne peut être enfoui (risque d'érosion, décision trop tardive).

#### **La dose**

Le programme conduit à des conseils dépassant fréquemment les capacités financières des planteurs ou leur seuil de perception temporel du bénéfice de l'investissement chaulage. Les doses proposées font fréquemment l'objet de critiques qui entraînent parfois un discrédit de l'ensemble du processus analytique.

Dans la pratique, les agriculteurs dépassent rarement la barre des 2 t.ha<sup>-1</sup> de chaux vive calcico-magnésienne par cycle alors que les conseils peuvent atteindre 5 à 6 t.ha<sup>-1</sup>. A noter que les sols tamponnés de l'île correspondent aux situations décrites par Fallavier (1995) : difficiles à corriger économiquement pour l'acidité. La comparaison avec d'autres méthodes de calcul des amendements calco-magnésiens est nécessaire à la justification des choix faits à La Réunion et à leurs améliorations.

#### **Rappel de la méthode réunionnaise**

Schématiquement, les calculs sont basés sur des seuils déterminés de la manière suivante pour chaque type de sol :

- Les seuils du pH H<sub>2</sub>O sont fixés. La relation  $Ca = f(pH_{H_2O})$  établie à partir de 15.000 analyses permet de calculer les seuils en Ca pour chaque type de sol.
- Les seuils en Mg sont calculés à partir du rapport Mg/Ca fixé (valeur optimale généralement admise de 0,5) pour chaque type de sol.
- Les seuils Mg/Ca sont fixés pour l'ensemble des sols.

Le conseil est réalisé par culture, à partir du positionnement de l'échantillon analysé par rapport aux seuils pH, Ca et Mg. Les modalités sont les suivantes :

- Caractérisation du pH par croisement dans un tableau des 5 classes déterminées par les 4 seuils des deux variables : pH et Ca. Ce tableau croisé permet de définir 7 diagnostics dont deux types d'anomalies prises en compte dans les conseils.
- Caractérisation du magnésium par croisement comparable au précédent des variables Mg et Mg/Ca qui aboutit à 6 diagnostics et une anomalie considérée comme erreur par le programme.
- Recommandation en matière de chaulage à partir des 42 situations obtenues en croisant les 7 diagnostics de pH aux 6 diagnostics Mg précédemment décrits.

Le calcul des doses vise à obtenir un pH de 5,5 (absence d'aluminium échangeable) sur une épaisseur de sol de 30 cm et pour une densité de 1 (3.000 t.ha<sup>-1</sup> à traiter). Dans la pratique, les doses proposées sont calculées par la différence entre la situation analytique et l'objectif recherché. Elles sont corrigées par un coefficient d'activité de 1,2 (pertes par lixiviation) et modulées par des seuils d'apports (minimum respectif de 500 et 300 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de CaO et MgO). Le conseil nuancé (doses d'entretien, apports indispensables, recommandés, souhaitables...) associe un dictionnaire de 36 phrases typés aux doses préconisées.

#### **La méthode guadeloupéenne**

Le LAPRA, laboratoire professionnel régional d'analyses de la chambre d'agriculture de la Guadeloupe (Pouzet, 1996) utilise pour les sols ferrallitiques au caractère acide marqué une méthode développée par l'INRA (Cabidoche, 1989). L'amendement y est limité à la quantité nécessaire pour que l'aluminium libre



soit maintenu au niveau du coefficient de Kamprath (Kamprath, 1967) de la culture (rapport de l'aluminium échangeable à la somme des bases échangeables additionné de l'aluminium échangeable). Les besoins en amendement calcaïque proviennent de l'estimation, pour chaque unité morphopédologique cartographiée :

- De la relation  $K = f(\text{pH}_{\text{KCl}})$  qui donne la valeur du  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  correspondant au coefficient  $K$  recherché (fonction de la culture) ;
- De la relation  $\text{Ca}/\text{CEC} = g(\text{pH}_{\text{KCl}})$  qui va permettre de calculer l'accroissement de Ca sur la capacité d'échange nécessaire pour obtenir le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  précédent.
- de la relation  $\text{CEC} = h(\text{MO})$  autorisant le calcul de la CEC par simple détermination de la matière organique (hypothèse de charges variables peu abondantes contrairement aux sols réunionnais). Il s'agit dans le cas présent d'une relation linéaire dont le terme résiduel est la CEC due aux argiles. Elle suppose une part à peu près constante de la CEC d'origine minérale.

Dans la pratique le LAPRA reporte les valeurs analytiques de la MO et du  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  sur un abaque qui donne la quantité de calcium à apporter pour atteindre le coefficient  $K$  de la culture. L'inconvénient principal de la méthode est que l'on ne connaît pas la durée de la correction et que la culture de la canne à sucre ne permet pas un ajustement du pH par une intervention culturale annuelle. Le LAPRA (LAPRA, sd) évalue la correction pour une épaisseur de sol de 20 cm, soit  $2.000 \text{ t.ha}^{-1}$  de sol à traiter.

#### La méthode hawaïenne

La méthode basée sur les travaux de Kamprath (CSR, 1986) est très proche de la méthode guadeloupéenne. Le principe est le même mais l'acidité d'échange est prise en compte alors que seul l'aluminium intervient en Guadeloupe. Ces deux méthodes dosent la CEC à l'acétate d'ammonium, ce qui impose de doser les bases les unes après les autres pour définir ce que les auteurs appellent la CEC effective (somme des bases). Ces informations sont directement accessibles sans modification du pH du sol donc de la CEC pour les sols à charge variable par le dosage à la cobalthexamine que nous utilisons. La méthode s'applique aux Ultisols, Oxisols et Inceptisols. Les points suivants sont pris en compte par le système qui opère à partir de l'analyse du sol :

- La toxicité résultant de l'acidité d'échange  $AE$  (somme de l'aluminium libre et de l'hydrogène), qui est supposée être étroitement reliée au taux de saturation en  $(\text{Al} + \text{H})$ ,
- La capacité de la culture à tolérer l'acidité qui est exprimée par un taux critique de saturation en aluminium de la capacité d'échange ( $\text{Al sat} = \text{coefficient de Kamprath divisé par H}$ ), taux estimé à 50% pour la canne qui est considérée comme tolérante à l'acidité d'échange.
- La présence de matière organique qui contribue à réduire la toxicité et intervient avec un abattement approximatif de  $1 \text{ t.ha}^{-1}$  de chaux pour 10 de matière organique fraîche.

Comme dans le cas précédent, le calcul correspond à l'estimation des quantités de chaux nécessaires au maintien de l'acidité d'échange au niveau du taux de saturation critique de la culture. La différence réside dans la prise en compte de l'acidité d'échange au lieu de l'aluminium échangeable seul.

La quantité de chaux permettant de neutraliser l'acidité d'échange est directement déduite de l'équation suivante qui fait intervenir la chaux sous forme  $\text{CaCO}_3$  et la capacité d'échange effective du sol (CEC) :

$$\text{Chaux } (\text{t.ha}^{-1}) = 1,4 (\text{AE} - (\text{Al sat} \cdot \text{CEC}/100))$$

La densité du sol est fixée à 1 et la profondeur à 15 cm, ce qui correspond à  $1.500 \text{ t.ha}^{-1}$  de sol à traiter.

#### La méthode brésilienne

Cette méthode a été élaborée pour évaluer les besoins en chaulage de la canne à sucre sur les sols acides de l'état de Pernambuco au Brésil (Dos Santos et al, 1980). Elle repose également sur les études de Kamprath (1967). Le calcul ne fait intervenir que le taux d'aluminium échangeable. La formule donne la dose de chaux exprimée en hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

$$\text{Chaux } (\text{t.ha}^{-1}) = 1,5 \cdot \text{Al ech.}$$

Une telle simplification est possible car le conseil ne s'applique qu'à un seul type de sol chimiquement homogène (latosol rouge jaune du sud de l'état). L'expression du résultat sous forme d'hydroxyde de calcium ne reflète pas les problèmes d'équilibre calco-magnésien pris en compte dans l'étude.



## Éléments de choix

La méthode guadeloupéenne est très proche de celle développée par le projet Tropsoil (méthode hawaïenne). Elle est économique, perturbe peu les équilibres du sol et s'adapte bien à la physiologie de chaque culture. De nature homéopathique, elle est forcément très sensible à la qualité de l'échantillonnage et de l'analyse chimique. Elle impose de plus un contrôle annuel et des corrections fréquentes peu compatibles avec la culture de la canne à sucre.

La méthode réunionnaise, beaucoup plus rustique est peu sensible à la qualité de l'échantillonnage. Elle est adaptée aux sols de l'île et permet de maintenir le pH à un niveau acceptable sans risque pendant un cycle complet de culture de la canne à sucre (5 à 8 ans).

La comparaison des doses proposées par les méthodes réunionnaise, hawaïenne et brésilienne a été entreprise sur un échantillon de 5 andosols de La Réunion (Albertelli, 1987). Les résultats montrent bien l'écart important des différents types de conseils (Tableau 35) ainsi que la sensibilité du résultat obtenu au taux critique d'aluminium toléré par la canne à sucre dans le cas de la méthode hawaïenne et donc guadeloupéenne.

*Tableau 35 : Chaulage moyen exprimé en t.ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> pour 5 andosols de la Réunion*

Méthode de calcul		t.ha <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>
Réunion		3,25
Hawaii	Taux critique Al 0%	1,74
	Taux critique Al 50%	0,25
Brésil		1,05

La méthode réunionnaise devra être révisée dans le cas des sols les plus acides pour que les doses proposées s'accordent avec les capacités économiques des agriculteurs. Le mode d'évaluation des besoins n'est pas en cause. Les doses de correction sont acceptables jusqu'à 2 t.ha<sup>-1</sup>.

Si une décision est prise pour limiter le conseil à un maximum de 2 t.ha<sup>-1</sup>, le suivi analytique des sols requérant des doses supérieures devra être renforcé, avec une analyse dans l'intercycle de culture pour envisager une correction de plus de 2 t.ha<sup>-1</sup> à la replantation.

## Le Phosphore

### Méthodologie

Les conseils et les doses de fertilisation phosphatée (Tableau 36) sont directement issues du tableau de diagnostic (Tableau 25 ou Tableau 26). Le programme identifie 4 situations qui déterminent les conseils en amendement (1 cas) et en fertilisation d'entretien (3 cas).

*Tableau 36 : Conseil en fertilisation phosphatée de la canne à sucre*

DIAGNOSTICS		P assimilable				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
P total	Très Faible	Correction	Entretien renforcé	Anomalie		
	Faible			Entretien normal		
	Moyen	Anomalie		Entretien normal		
	Fort			Entretien normal		
	Très Fort			Pas d'entretien		

Si le phosphore total n'a pas été analysé, le système le positionne automatiquement dans la classe obtenue pour le phosphore assimilable.

### Amendement

Si le sol analysé se situe dans la zone où le phosphore total et le phosphore assimilable sont à un niveau très faible ; il est considéré comme fortement déficient et une correction s'impose. Un conseil en amendement phosphaté est alors calculé.



Le calcul repose sur la différence entre le niveau souhaitable dans le sol, et le niveau réel donné par l'analyse. Contrairement aux autres éléments et compte tenu de la faible migration du phosphore dans le sol, les besoins sont alors estimés pour corriger 1.000 tonnes de terre par hectare. Le conseil minimum est fixé à 100 kg, et est arrondi à la dizaine de kg la plus proche du résultat calculé.

Conformément aux études de dynamique du phosphore dans les sols réunionnais (Truong binh et al., 1974), les besoins calculés sont multipliés par deux pour tenir compte de la forte rétrogradation du phosphore. Environ la moitié du phosphore soluble apporté à la culture, est considéré comme fortement fixé par le sol qui le met ainsi hors de portée de la plante.

Près des trois quarts des analyses conduisent à une absence de conseil en fumure phosphatée de correction (Tableau 37). Pour les 25% résiduels, la correction moyenne conseillée est de l'ordre de 550 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Tableau 37 Distribution des conseils en correction du sol en phosphore (période du 01/91 au 06/97).

Caractéristiques	Classes de doses conseillées en centaines d'unités de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .ha <sup>-1</sup>									Total
	0	<2	2-3[	3-4[	4-5[	5-6[	6-7[	7-8[	>8	
Nombre d'analyses	5406	50	291	28	63	217	1175	73	15	7318
Pourcentage de conseil	74	1	4	0	1	3	16	1	0	100
Doses moyennes kg/ha	0	185	238	360	461	568	646	737	821	557

La répartition géographique des conseils en fumure phosphatée de correction (Carte 7) indique un large éparpillement des sols insuffisamment pourvus en phosphore pour assurer une bonne croissance de la culture sans correction préalable. Seules cinq micro-zones n'ont fait l'objet d'aucun conseil en correction ces 6 dernières années.

### Entretien annuel

**La fertilisation d'entretien est évaluée sur la base de l'amendement réalisé**, c'est à dire pour un sol normalement pourvu en phosphore. Ainsi, un sol présentant de très faibles teneurs en phosphore total et assimilable est traité par le programme comme ayant été déjà corrigé par une fumure de fond au moment de l'évaluation de la fumure d'entretien.

Les conseils sont simplifiés du fait des faibles exigences de la canne à sucre en matière de fertilisation phosphatée. Les trois situations suivantes sont prises en compte par le programme :

- Dose moyenne de 200 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par hectare pour les sols légèrement déficients.
- Dose moyenne de 70 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par hectare pour l'entretien de la culture dans les zones (a) correctement pourvues en phosphore ou (b) très fortement carencées et préalablement corrigées. Cette dose correspond aux besoins de la culture pour une production de 80 à 100 t/ha de canne usinable.
- Pas de fertilisation phosphatée pour les sols très riches en phosphore.

### Le Conseil

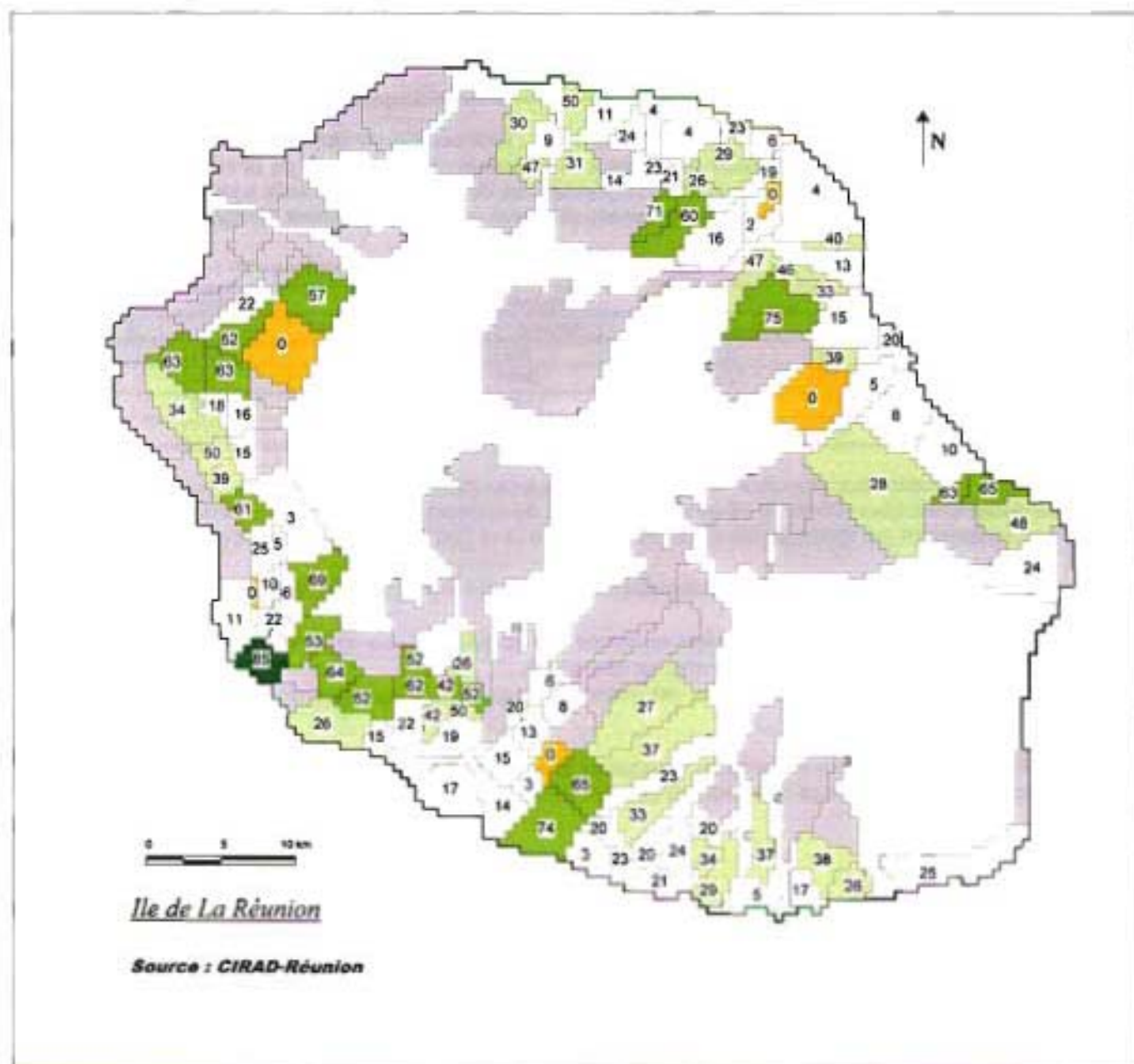
Le conseil imprimé sur le bulletin d'analyse (Document 1) provient du dictionnaire de phrases déjà décrit pour l'amendement calco-magnésien. Les phrases associées à celles du diagnostic de fertilité du sol sont répertoriées à partir des indications du Tableau 38.

1. *Une fumure de correction à la plantation est indispensable. Dose préconisée # kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.*
2. *Votre sol est légèrement déficient en phosphore. Pratiquez une fumure d'entretien renforcée en phosphore, en apportant environ 200 unités chaque année.*
3. *Apportez environ 70 unités chaque année pour l'entretien. La canne n'étant pas très exigeante en phosphore, vous pouvez supprimer complètement pendant quelques années la fertilisation phosphatée.*

Les zones hachurées du tableau, qui correspondent à des anomalies détectées par le programme sont commentées sur les bulletins par des phrases associées au diagnostic sol (Tableau 25).

Le conseil complet associant les différents groupes de phrases est indiqué en annexe (page 92).

## Carte 7 : Répartition des conseils en correction phosphatée des sols sous canne



	Moins de 10 analyses. Conseil en correction phosphatée indéterminé
	Plus de 10 analyses. Aucun conseil en correction phosphatée
	Plus de 10 analyses. Conseil en correction phosphatée dans 1 à 25% des cas
	Plus de 10 analyses. Conseil en correction phosphatée dans 26 à 50% des cas
	Plus de 10 analyses. Conseil en correction phosphatée dans 51 à 75% des cas
	Plus de 10 analyses. Conseil en correction phosphatée dans plus de 75% des cas

Les chiffres indiquent le pourcentage d'analyse conduisant à un conseil de correction du sol en phosphore



Tableau 38 : Détail des conseils en fertilisation phosphatée de la canne à sucre

DIAGNOSTICS		P assimilable				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
P total	Très Faible	1	2			
	Faible					
	Moyen			3		
	Fort					
	Très Fort			4		

La répartition des conseils pour la décennie en cours (Tableau 39) montre qu'à peine plus de 10% des analyses conduisent à une économie de fertilisation d'entretien en phosphore de la culture. Un peu moins du quart des conseils conduit à une fumure renforcée. Les deux tiers des conseils sont associés à des sols normalement pourvus en phosphore ou fortement déficients mais préalablement corrigés.

Tableau 39 : Distribution des conseils en fumure d'entretien de la canne (unités pour 80-100 t produites)

Azote			Phosphore			Potassium		
Conseil	Analyses	%	Conseil	Analyses	%	Conseil	Analyses	%
80 N	239	3,2	0 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	764	10,4	0 K <sub>2</sub> O	385	5,2
120N	5745	77,9	70 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4883	68,2	200 K <sub>2</sub> O	5468	74,1
160N	1393	18,9	200 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1730	23,4	400 K <sub>2</sub> O	1524	20,7
Total	7377	100,0	Total	7377	100,0	Total	7377	100,0

La grande diversité des situations rend difficile la représentation géographique des conseils en fumure phosphatée d'entretien (Carte 7). Nous avons procédé au classement des micro-zones où les trois types de conseils subsistent, en qualifiant les situations extrêmes (0 et 200 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) par le rapport de leur fréquence :

- L'absence de fertilisation est considérée comme dominante si elle est 2 fois plus fréquente que la fumure renforcée
- Réciproquement la fertilisation renforcée est dominante si sa fréquence est au moins deux fois supérieure à celle de l'économie en phosphore.
- Si le rapport des fréquences est inférieur à deux, les deux types de conseils sont considérés équivalents.

La tendance moyenne des conseils en fertilisation phosphatée de la canne à sucre ont été cartographiés par micro-régions sur la base des données disponibles en 1995 (Carte 8).

## L'Azote

Le conseil en fertilisation azoté ne traite que trois des cinq situations du diagnostic sol (tableau 26) en regroupant les trois situations centrales (Tableau 40).

Tableau 40 : Conseil en fertilisation azotée de la canne à sucre

DIAGNOSTIC N				
TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRÈS FORT
160 N kg/ha (1)	120 N kg/ha (2)		80 N kg/ha (3)	

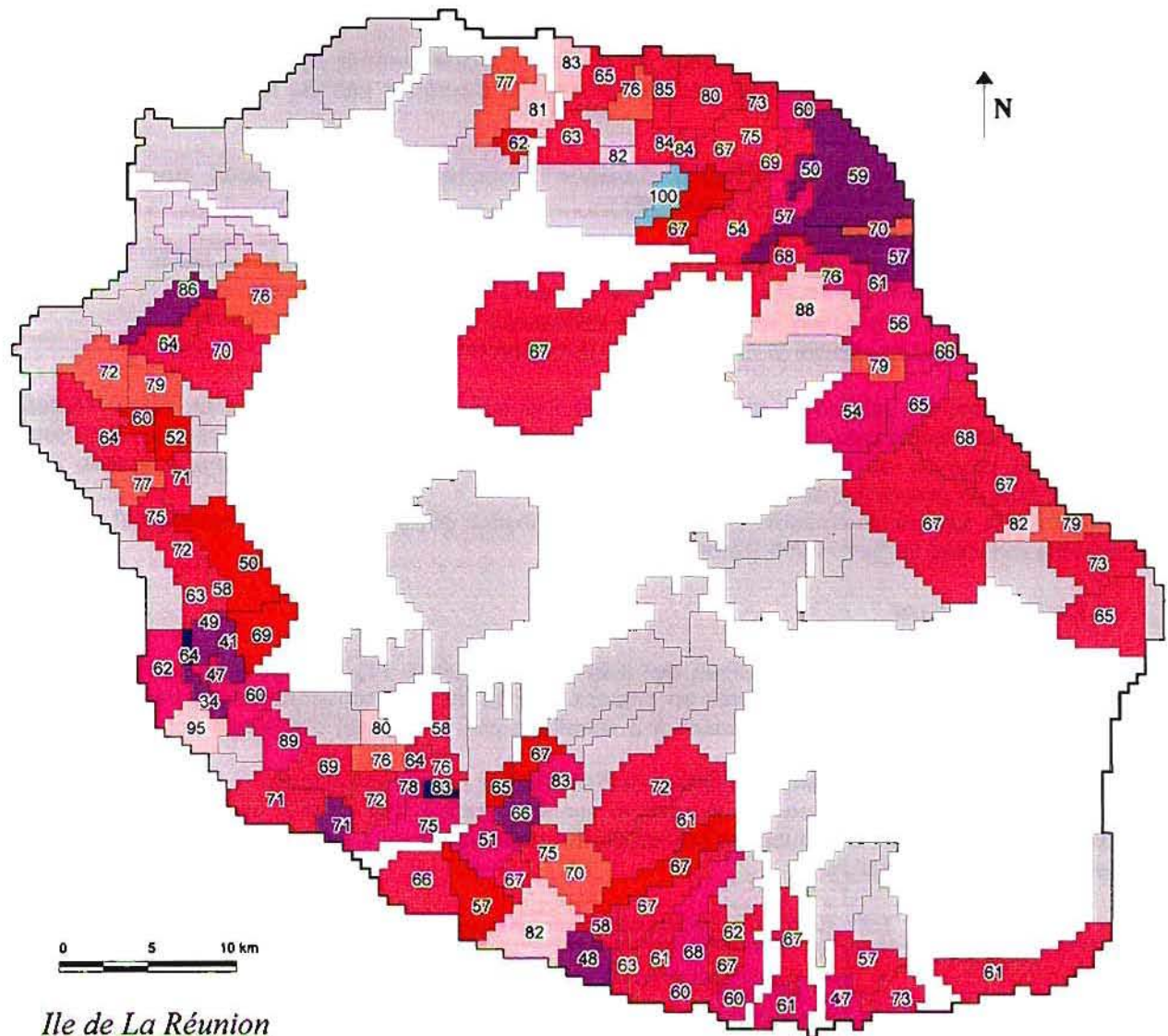
(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

Le calcul ne prend pas en compte les pertes (lessivage, dénitrification), les doses conseillées intègrent une efficacité apparente de 50% des engrais azotés. Ce coefficient d'utilisation est une approximation faite à partir des coefficients d'utilisation réels mesurés à l'aide d'azote marqué. Elle prend en compte d'une part le décalage positif entre les coefficients d'utilisation apparents et réels et d'autre part les contraintes économiques qui conduisent à restreindre autant que possible le coût du conseil.

Selon les plus récentes recherches conduites en Australie avec de l'azote marqué, la minéralisation de la matière organique contribue aux besoins azotés annuels de la canne à hauteur de 59 à 76% (Keating et al., 1993). La fertilisation minérale azotée retrouvée dans la canne l'année de l'application de l'engrais varie de 20 à 40% (Chapman et al., 1994 ; Vallis et al., 1995). A l'île Maurice, le coefficient réel d'utilisation ne dépasse pas 40% dans les meilleures conditions possibles de distribution de l'azote à la plante, c'est à dire



## Carte 8 : Tendances de la fertilisation phosphatée d'entretien de la canne à sucre, après correction du sol



Source : CIRAD-Réunion

Répartition des pourcentages de conseil par classe de doses de phosphore			Tendance des conseils en fertilisation phosphatée d'entretien	Nombre de microzones
Pas de P (P0)	70 P	200 P (P200)		
≥ 15%	< 85%	0%	Cas fréquents d'économie de fumure phosphatée d'entretien	2
0%	100%	0%	Fumure phosphatée normale (70 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> pour 80 à 100 t de canne produit)	1
2 fois plus de conseil en P0 que en P200			Trois types de conseils avec dominance des conseils P0 sur P200	10
% équivalent de conseil en P0 et P200			Trois types de conseils avec équivalence des situations extrêmes	20
2 fois plus de conseils en P200 que en P0			Trois types de conseils avec dominance des conseils P200 sur P0	48
0%	80% ou plus	20% ou moins	Fumure normale ou renforcée dans 1 à 20% des cas	8
0%	De 70 à 79%	de 21 à 30%	Fumure renforcée dans 20% à 30% des cas	11
0%	Moins de 70%	Plus de 30%	Fumure renforcée dans plus de 30% des cas	10
Indéterminé			Zones peu cultivées en canne à sucre	45

Les chiffres inscrits dans les microzones correspondent aux pourcentages de conseil en fumure phosphatée normale (70 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)



par fertirrigation en goutte à goutte (Ng Kwong et Deville, 1992). La différence entre ces résultats (utilisation réelle) et le coefficient employé par le système (utilisation apparente) correspond à la libération d'azote minéral par la matière organique sous l'effet de l'engrais. Les phénomènes de réorganisation de la matière organique ne permettent pas en effet de détecter cette minéralisation provoquée par l'apport d'engrais avec l'azote marqué. Nous avons donc considéré que 30 à 40% de l'azote minéral provenant de l'engrais était assimilé par la culture et que l'engrais agissait sur la matière organique du sol pour libérer 10 à 20% d'azote supplémentaire, qui n'auraient pas été minéralisés sans cet apport d'engrais

Les conseils imprimés sur les bulletins d'analyse associent les trois phrases suivantes aux cinq précédemment décrites pour le sol (Tableau 28).

1. *Effectuez si possible des apports de matière organique (fumier, lisier, paille...). Renforcez la fumure minérale azotée : apportez sur chaque cycle environ 160 unités.*
2. *Apportez uniquement la dose d'azote nécessaire à l'entretien, soit 120 unités.*
3. *Vous pouvez réduire la fumure azotée et n'apporter que 80 unités sur chaque cycle.*

Le conseil complet est indiqué en annexe (page 92). Les tendances de la décennie en cours (Tableau 39) montrent un très faible pourcentage de cas où la fertilisation azotée peut être réduite. Les sols sont correctement pourvus en matière organique dans près de 80% des cas. La fumure azotée doit être renforcée dans un peu moins de 20% des conseils.

Comme pour la fumure phosphatée d'entretien, la distribution géographique des conseils est complexe et caractérise rarement la micro-zone (Carte 8).

## Le Potassium

Le conseil dérive directement du tableau des diagnostics (Tableau 27) avec pour la canne un traitement commun des sols légèrement déficients en potassium avec les sols convenablement pourvus et les sols riches (Tableau 41). Ceci limite le conseil à 3 situations parmi les 5 du diagnostic sol (non compris les anomalies).

La formulation standard pour une production de 100 t/ha de canne, est estimée à 200 unités de potasse. Cette dose doit être doublée en cas de culture sur sol carencé. Par contre, pour éviter tout risque de consommation de luxe, préjudiciable au processus de cristallisation du sucre, aucun apport de potasse n'est conseillé si le sol est très riche.

Tableau 41 : Conseil en fertilisation potassique de la canne à sucre

DIAGNOSTICS		K				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
K%CEC	Très Faible	Entretien renforcé (1)			Anomalie	
	Faible	Entretien renforcé (1)			Anomalie	
	Moyen	Entretien normal (2)				
	Fort	Anomalie		Entretien normal (2)		
	Très Fort	Entretien normal (2)				Rien (3)

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

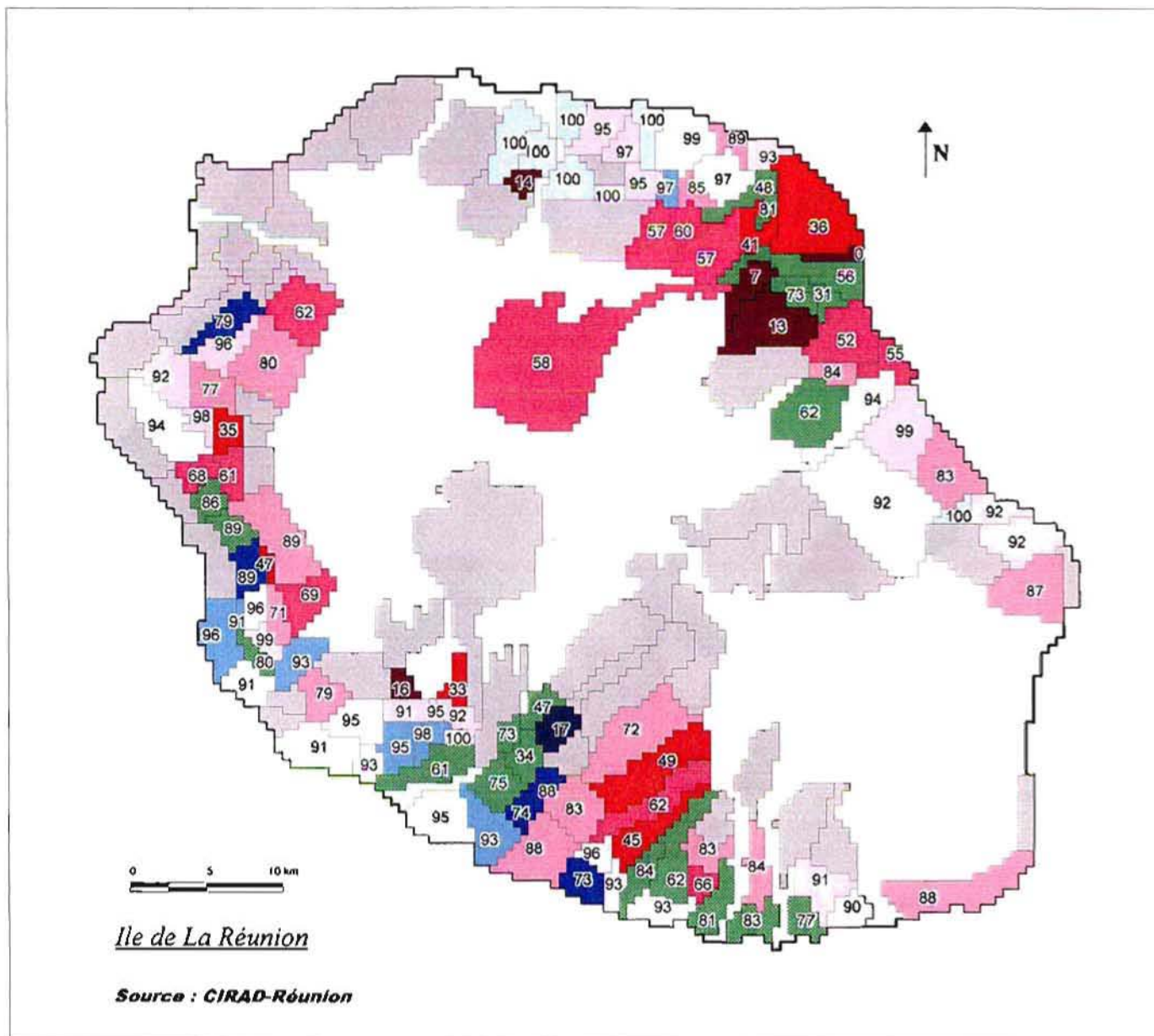
Les phrases imprimées sur le bulletin (Document 1), associent au diagnostic sol les informations suivantes :

1. *Effectuez une fertilisation d'entretien renforcée en potasse, en apportant environ 400 unités à chaque cycle.*
2. *Votre sol est correctement pourvu en potasse pour la culture de la canne. Apportez à chaque cycle la dose d'entretien, soit environ 200 unités.*
3. *Vous pouvez supprimer complètement pendant 4 ou 5 cycles la fertilisation potassique.*

Les anomalies détectées par le programme sont traitées et commentées dans le diagnostic sol. Trois quarts des analyses de la période considérée (Tableau 39) conduisent à un statut potassique normal du sol (200 K<sub>2</sub>O). Le quart restant correspond à 5% de conseil sans fumure et 20% de fumure renforcée. L'analyse spatiale de la distribution des conseils (Carte 10) souligne la grande diversité des situations. Comme pour le phosphore, nous avons procédé au tri des micro-zones où les trois types de conseils coexistent, par rapport aux situations extrêmes (0 et 400 K<sub>2</sub>O).



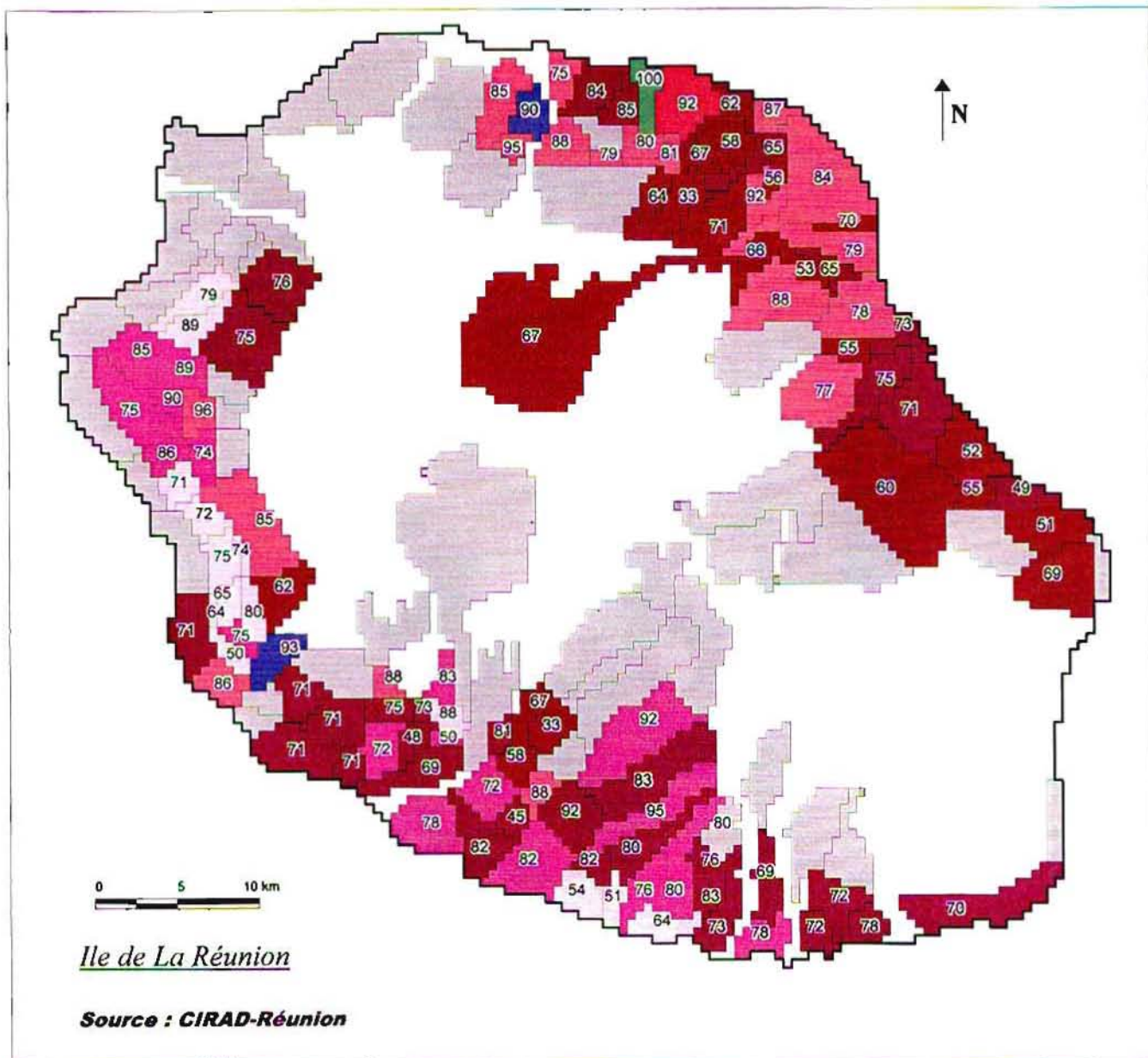
## Carte 9 : Tendances de la fertilisation azotée d'entretien de la canne à sucre



Répartition des pourcentage de conseil par classe de dose d'azote			Tendance du conseil en entretien azoté	Nombre de microzones
80 N	120 N	160 N		
30% et +	< 70%	0%	Réduction de l'entretien azoté (% croissant de conseils 80 N)	1
10 à 29%	70 à 89%	0%		5
1 à 10%	90 à 99%	0%	Entretien normal (120N pour 80-100 l de canne)	7
0%	100%	0%		8
< 9%	90 à 99%	< 9%	Renforcement de l'entretien azoté (% croissant de conseils 160N)	15
0%	90 à 99%	1 à 9%		15
0%	70 à 89%	10 à 29%	% significatif des trois types de conseils associés dans la même zone	16
0%	50 à 69%	30 à 49%		12
0%	25 à 49%	50 à 74%	Zones peu cultivées en canne à sucre	7
0%	< 25	> 75%		5
> 0%	< 90%	> 0%		19
Indéterminé				45

Los chiffres inscrits dans les microzones correspondent aux pourcentages de conseils en fumure azotée normale (120N)

## Carte 10 : Tendances de la fertilisation potassique d'entretien de la canne à sucre



Répartition des pourcentages de conseil par classe de doses de potassium			Tendances des conseils en fertilisation potassique d'entretien	Nombre de microzones
Pas de K (0K)	200 K	400 K (K400)		
Plus de 7%	Moins de 93%	0%	Cas fréquents d'économie en fumure potassique d'entretien	2
0%	100%	0%	Fumure potassique normale (200 K <sub>2</sub> O pour 80 à 100 t de canne produit)	1
2 fois plus de conseils en K0 qu'en K400			Trois types de conseils avec dominance du conseil K0 sur le conseil K400	14
% équivalent de conseils en K0 et en K400			Trois types de conseils avec équivalence des conseil K0 et K400	18
2 fois plus de conseils en K400 qu'en K0			Trois types de conseils avec dominance du conseil K400 sur le conseil K0	34
0%	75% et plus	Moins de 25%	Fumure renforcée dans moins de 25% des cas	19
0%	Moins de 75%	25% et plus	Fumure renforcée dans plus de 25% des cas	21
Indéterminé			Zones peu cultivées en canne à sucre	45

Les chiffres inscrits dans les microzones correspondent aux pourcentages de conseils en fumure potassique normale (200 K<sub>2</sub>O)



## Le Plan de Fumure

### Les Principes

Le système expert apporte une conclusion aux conseils précédents, sur la base des besoins en correction et en entretien. Le traitement des informations débute par les corrections à effectuer à la plantation. Les trois possibilités sont traitées : (1) chaulage et correction en phosphore; (2) chaulage; et (3) correction en phosphore.

Les propositions d'entretien identifiées pour N, P et K sont ensuite traitées. Le programme recherche la formule la mieux adaptée, dans une liste d'engrais disponibles à La Réunion (page 96). Les règles de calcul sont les suivantes :

- La formulation ternaire qui évite l'apport de deux engrais est privilégiée grâce à une marge de 10% lors de l'ajustement des besoins aux disponibilités.
- En cas d'impossibilité, le plan de fumure indique la formulation ternaire ou binaire la plus proche des besoins, avec l'adjonction d'un engrais simple pour compenser l'écart entre le calcul et le disponible.

Ce dernier cas est à éviter, car l'expérience montre que l'engrais complémentaire à apporter en entretien est rarement pris en considération par le planteur.

Il est enfin précisé sur chaque analyse que les fumures conseillées sont basées sur des rendements de l'ordre de 80 à 100 t.ha<sup>-1</sup> de canne (les bulletins d'analyse indiquent en réalité 80 à 90 t.ha<sup>-1</sup> de rendement) et que ces propositions doivent être modulées en fonction des rendements escomptés, qui dépendent des conditions de culture.

### Le Conseil

En cas de fumure de correction, le plan de fumure est imprimé à partir de la liste suivante de phrases adaptées aux différentes situations possibles :

1. *A la plantation : effectuez le chaulage et la correction en phosphore.*
2. *A la plantation : effectuez le chaulage.*
3. *A la plantation : effectuez la correction en phosphore.*

Pour la fumure d'entretien de la canne à sucre, deux cas sont possibles selon que le conseil est réalisable avec un seul engrais ou en nécessite deux :

1. *A chaque cycle, apportez : (x) N - (y) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - (z) K<sub>2</sub>O. Soit par exemple (dose 1) kg de (engrais 1).*
2. *A chaque cycle, apportez : (x) N - (y) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - (z) K<sub>2</sub>O. Soit par exemple (dose 1) kg de (engrais 1) + (dose 2) kg de (engrais 2).*

Ces propositions sont suivies de la mise en garde suivante destinée à rappeler à l'agriculteur qu'il est nécessaire d'ajuster sa fertilisation d'entretien en fonction du rendement en canne qu'il envisage de faire ainsi que des conditions climatiques (risques de lixiviation et de ruissellement selon la date d'apport et la région) :

*Toutes les doses d'entretien indiquées ci-dessus sont basées sur des rendements moyens de 80-90 t/ha. Les moduler en fonction du rendement escompté et des conditions climatiques.*

Le plan de fumure est conclu par l'avertissement suivant qui est imprimé sur les bulletins si les apports NPK conseillés ne sont pas normaux :

*ATTENTION : le schéma de fumure qui vous est proposé est volontairement déséquilibré par rapport aux besoins de la culture, afin de tenir compte des particularités de votre sol. Appliquez cette fumure pendant 4 ou 5 ans et effectuez alors une nouvelle analyse afin d'en vérifier les réserves*



## Discussions

### Représentation et représentativité du conseil

La synthèse cartographique des fumures de corrections, couplant l'amendement calco-magnésien à la correction phosphatée ne peut être reproduite à l'échelle de la micro-zone pour l'ensemble de l'île. Les informations à reproduire sont en effet trop nombreuses et imposent un changement d'échelle. Il en va même, de la synthèse par micro-zone des conseils en fumure d'entretien. Il n'est pas possible de cartographier les 27 possibilités issues des trois niveaux des trois éléments majeurs sans une réduction importante de la variabilité des conseils. Une telle réduction serait préjudiciable à la qualité du conseil et à la connaissance de la fertilité du sol. La grande diversité des situations (Tableau 42) pose un double problème de représentativité des données et d'évolution de fertilité des sols cultivés :

- L'historique de la parcelle va conduire selon l'intensification et la technicité de l'agriculteur à une grande variété de l'évolution de la fertilité d'un même sol pour chaque élément.
- La typologie pour la fertilité apparaît réductrice à l'échelle pour laquelle nous sommes en mesure de localiser les sols. Le pixel de 25 ha, qui constitue l'unité de base du type de sol homogène, correspond en fait bien souvent une association de plusieurs types de sol (page 20).

L'évolution de la fertilité liée à l'exploitation agricole est caractérisée par l'analyse chimique. Elle est donc nécessairement prise en compte pour l'élaboration du diagnostic de fertilité.

Tableau 42 : Distribution des combinaisons de plan de fumure du laboratoire (01/91 au 07/97).

Combinaisons		Nombre d'analyse				% d'analyse			
		0 K <sub>2</sub> O	200 K <sub>2</sub> O	400 K <sub>2</sub> O	Somme	0 K <sub>2</sub> O	200 K <sub>2</sub> O	400 K <sub>2</sub> O	Somme
80N	0 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15	69	10	94	0.20	0.9	0.14	1.3
	70 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6	80	39	125	0.08	1.1	0.53	1.7
	200 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1	5	14	20	0.01	0.1	0.19	0.3
120N	0 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	90	468	56	614	1.22	6.3	0.76	8.3
	70 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	188	2832	760	3780	2.55	38.0	10.30	51.0
	200 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	54	1028	269	1351	0.73	14.0	3.65	18.0
160N	0 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3	44	9	56	0.04	0.6	0.12	0.8
	70 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20	676	282	978	0.27	9.2	3.82	13.0
	200 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8	266	85	359	0.11	3.6	1.15	4.9
Total		385	5468	1524	7377	5.22	74.0	20.70	100

Le conseil en fertilisation prend donc en compte la diversité des situations morphopédologique et chimique des sols et indirectement celle du niveau technique de leur exploitation. Une généralisation des conseils par micro-zone n'est donc pas envisageable. A de rares exceptions près, seule la tendance des conseils peut être cartographiée à cette échelle mais le conseil lui-même ne sera pas représenté. Il est donc indispensable de procéder à une analyse chimique régulière des sols pour disposer d'un conseil adapté. Le principe actuel d'une analyse de sol à chaque replantation, c'est à dire tous les 5 à 8 ans est donc essentiel :

- Il permet de proposer un plan de fumure adapté au sol et à l'historique de la parcelle et ;
- Il donne accès à l'information au seul moment où les techniques indispensables d'enfouissement des fumures de correction du sol sont possibles.

Nous envisageons désormais de compléter l'analyse cartographique des données en travaillant au niveau du pixel et non plus seulement de la micro-zone et à l'échelle des zones géographiques couvertes par agent du développement (une dizaine de micro-zones) plutôt qu'à l'échelle de l'île (cartes 1 à 9).

### Politique de la fertilisation azotée de la canne

#### *Pratique & tendances*

Le calendrier d'apport de la fumure d'entretien de la canne à sucre dépend pour l'essentiel :

- Du conseil ;
- De la nature chimique de l'engrais employé ;

- Des dates de coupe ou de replantation qui déterminent le calendrier de travail de l'agriculteur ; et
- De la perception des risques climatiques par l'agriculteur.

L'engrais utilisé en culture pluviale est généralement un composé ternaire NPK sans apport complémentaire d'engrais simple. Il s'agit le plus souvent de *bulk-blending* (mélange en vrac) local dont la source d'azote est l'urée, le DAP ou un engrais ternaire complexe, le 15-12-24, qui constitue une source d'azote nitrique (Tableau 43).

Tableau 43 : Composition azotée des principaux engrais canne et prairie.

Culture	Engrais	Type	Base du mélange				Azote				
							NO3	NH4	Urée	Total	
Canne	00-23-30	BB			TSP	KCI					0
	00-26-26	BB			TSP	KCI					0
	04-11-46	BB		DAP		KCI			4		4
	06-23-30	BB		DAP	TSP	KCI			6		6
	09-23-30	BB		DAP		KCI			9		9
	10-26-26	BB		DAP		KCI			10		10
	12-09-30	BB				KCI	15-12-24	4.4	7.6		12
	12-10-36	BB	Urée	DAP		KCI			3.7	8.3	12
	15-00-40	BB	Urée			KCI				15	15
	15-06-32	BB	Urée			KCI	15-12-24	2.75	4.75	7.5	15
	15-12-24	C						5.5	9.5		15
	15-20-24	BB	Urée	DAP		KCI			7.75	7.25	15
	16-07-29	BB	Urée			KCI	15-12-24	3.2	5.5	7.3	16
	17-12-28	BB	Urée	DAP		KCI			4.7	12.3	17
	18-07-30	BB	Urée	DAP		KCI			2.7	15.3	18
	20-00-33	BB	Urée			KCI				20	20
	20-05-30	BB	Urée	DAP		KCI			1.9	18.1	20
33-11-06	BB	Urée	DAP		KCI			4.3	28.7	33	
16-00-40	BB	Urée			KCI				16	16	
20-00-34	BB	Urée			KCI				20	20	
Prairie	07-18-36	BB		DAP		KCI			7		7
	09-23-30	BB		DAP		KCI			9		9
	13-36-13	BB		DAP		KCI			13		13
	14-07-36	BB	Urée	DAP		KCI			2.7	11.3	14
	16-29-12	BB		DAP			15-12-24	2.8	13.3		16
	16-30-15	BB	Urée	DAP		KCI			11.7	4.3	16
	30-10-10	BB	Urée	DAP		KCI			4	26	30
	38-12-00	BB	Urée	DAP					4.7	33.3	38

BB= *bulk blending* ; C = Complexe

Le phosphore comme la potasse ne posent pas de problèmes particuliers de calendrier d'épandage. Celui-ci est donc basé sur l'azote. Le conseil (CIRAD-IRAT, 1986) est d'apporter de préférence l'azote :

- Un à deux mois après plantation pour les vierges ; et
- A partir de la coupe pour les repousses ;
- Jamais au-delà de 6 mois de croissance (situation que l'on rencontre lorsque l'agriculteur diffère la fertilisation après la période cyclonique).

A noter qu'en Australie, le BSES (*Bureau Sugar Experiment Station, Queensland*) conseille sur repousse d'apporter l'engrais après développement du nouveau système racinaire, lorsque la hauteur de canne est de 0,5 m. Ce différé permettrait un gain de rendement par rapport à une fertilisation suivant immédiatement la récolte (Calcino et Burgess, 1995). Dans tous les cas, les auteurs s'accordent à conseiller les apports au début de la phase de croissance de la culture et lorsque le système racinaire est bien établi.

La tendance actuelle à La Réunion comme dans beaucoup de pays producteurs de canne est de récolter en vert (cannes non brûlée). La biomasse végétale de résidus de canne peut atteindre 20 t/ha de matière sèche. Lorsque cela est possible, une partie de cette biomasse est récoltée à l'usage des élevages bovins des hauts, déficitaires en matière carbonée. Dans la majorité des cas, la présence de ce mulch après récolte s'oppose à une incorporation au sol de la fumure d'entretien des repousses de canne (culture pluviale ou irriguée par aspersion).

### ***Lixiviation***

Les pertes d'azote sous canne par lixiviation sont négligeables dans les conditions tropicales de Maurice, que les apports proviennent de nitrates ou d'ammoniac (Ng Kee Kwong et Deville, 1987). Des résultats similaires sont signalés à Hawaii, en dépit de fortes pluies (Takahashi, 1968). A Taiwan, Tsai et al. (1992) n'ont pas trouvé non plus de pertes d'azote significatives par lessivage lors d'apport d'urée en goutte à goutte à des cannes poussant sur sol argileux. Les pertes par lessivage sont toujours plus élevées sous sol nu que sous sol cultivé en canne à sucre. Les risques de lessivage sous canne devraient surtout concerner les sols sableux dont l'occurrence à La Réunion est exceptionnelle.

### ***Forme chimique***

Selon Takahashi (1968) les nitrates semblent affecter un peu plus que l'ammoniac l'efficacité de l'azote et le rendement de la canne à sucre. Pour Ng Kee Kwong et Deville (1992) la différence n'est pas significative et la forme sous laquelle l'azote est apporté a peu d'effet sur l'efficacité de l'azote et le rendement de la canne.

Rappelons que si l'azote nitrique est directement exploitable par la culture, l'azote ammoniacale agit plus lentement et l'azote apporté sous forme d'urée aura un délai d'action encore plus important, surtout en zone sèche.

### ***Dénitrification***

Les pertes d'azote par dénitrification de l'urée peuvent être très importantes. Des pertes de plus de 50% sont signalées lorsque l'engrais est épandu sur un mulch de résidus de cannes récoltées en vert et de 40% sous le mulch (Wood et al., 1989). Le mécanisme de volatilisation des apports est lié à la présence d'eau dans les résidus et à son évaporation (Freney et al., 1992). L'urée est dissoute par l'eau (rosée, pluies, condensation de l'humidité du sol) et s'hydrolyse (urease). L'évaporation provoque alors des pertes d'ammonium (instabilité du carbonate d'ammonium provenant de l'hydrolyse). Les conditions climatiques jouent donc un grand rôle dans les pertes :

- En zone sèche, les pertes sont limitées car l'eau disponible (rosée et condensation) est insuffisante pour hydrolyser l'urée.
- En zone très humide, l'urée hydrolysée est entraînée vers le sol et les pertes sont de l'ordre de 17%.
- En zone intermédiaire, caractérisée par des alternances d'hydrolyses et d'évaporation, les pertes enregistrées se situent entre 32 et 39%.

Pour ces mêmes auteurs, le remplacement de l'urée par du sulfate d'ammoniac réduit pratiquement les pertes à néant (1,8% de la dose apportée).

Lorsque l'urée est enfouie, les pertes dépendent des caractéristiques du sol. Selon Campbell et al. (1984), elles sont d'autant plus faibles que le taux d'argile est élevé, le pH est bas et la capacité d'échange est importante. Elles diminuent avec la profondeur d'enfouissement de l'urée (Biggs et al., 1996).

On peut donc considérer que les pertes par dénitrification ne concernent pas la fertilisation en goutte à goutte mais englobent la fertilisation par aspersion et l'agriculture pluviale.

Ces données confirment les conclusions beaucoup plus anciennes de Soubiès et al. (1955) qui déconseillent l'utilisation d'urée : en couverture, sur sols sableux, sur sol sablo-calcaires et surtout en période sèche.

### ***Le fractionnement***

Le fractionnement des apports affecte généralement l'efficacité de l'azote avec un optimum logique lorsque les apports coïncident avec les phases de croissance de la culture. Cependant, le fractionnement ne modifie pas le rendement en culture pluviale (Chapman, 1996). L'auteur cite un résultat comparable obtenu en goutte à goutte en Australie. A Maurice, l'apport d'azote en fertilisation par goutte à goutte avec fractionnement journalier pendant 10 à 20 semaines ne modifie en rien le rendement de la canne à sucre (Ng Kee Kwong et Deville, 1992).

Ng Kee Kwong (1995) s'appuyant sur un accroissement moyen de 30% du coefficient d'utilisation de l'azote minéral en goutte à goutte, conclue à une économie possible de 30% des apports d'engrais azoté avec cette technique d'irrigation, sans modification de rendement. Il faut cependant rappeler ici que les exportations minérales de la culture demeurant inchangées, les 30% économisés le seront au détriment du stock organique du sol.

### ***Politique de la fertilisation azotée***

En conclusion, nous adoptons les règles suivantes pour traiter des problèmes relatifs à la fertilisation

azotée de la canne à sucre :

- Pertes d'azote négligeables par lessivage, quelle que soit la forme chimique de l'apport ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  ou urée).
- Pertes d'azote importantes par dénitrification de l'urée surtout lors des apports en surface sur mulch pailleux.
- Absence de pertes par dénitrification, si l'azote est apporté sous forme de nitrate ou de sulfate d'ammonium.
- Intérêt d'enfouir l'urée, surtout lorsque la canne est récoltée en vert
- Effet différé de l'urée surtout en zone sèche et lors de l'application sur mulch de résidus de canne récoltée en vert.
- Effets comparables des nitrates et de l'ammoniac sur le rendement de la canne.
- Pas d'effet du fractionnement des apports d'azote sur le rendement en pluvial et en irrigué par aspersion ou par goutte à goutte.
- Economie possible de 30% des apports d'azote en goutte à goutte sans modification de production sous réserve d'un suivi rigoureux du stock d'azote du sol par analyses chimiques au moins bisannuelle et retour à une fertilisation normale dès qu'une baisse sensible du stock est constatée. Ce type de conseil que le programme ne prend pas en compte actuellement devra être limité à des sols riches ou moyens Le conseil serait alors de 56N pour 100 tonnes de canne en sol riche, et de 84N pour des sols normalement pourvus en matière organique. Maintien du conseil à 160N pour les sols pauvres.
- Pas de nécessité économique ou technique de recherches complémentaires pour adapter les résultats bibliographiques aux conditions locales de la Réunion.

Ces règles sous-entendent bien entendu que :

- La dose d'apport conseillée est respectée, et que
- L'épandage est réalisé à la période conseillée.

Nous ne prenons pas en compte le coefficient d'utilisation de l'engrais azoté dans ces principes de base. Celui-ci est en effet sans lien avec le rendement sur lequel le conseil est construit. Nous aurons toutefois intérêt à optimiser le coefficient d'utilisation si cela n'entraîne pas de surcoût économique. On peut en effet penser qu'une utilisation optimum est un facteur favorable à une réduction de la variabilité des rendements et des risques agricoles courants. Les principes à suivre sont alors basés sur :

- Une meilleure efficacité des nitrates par rapport aux autres formes azotées.
- Une meilleure efficacité de l'azote lorsque les apports coïncident avec le début de la phase de croissance de la plante.

Les nitrates et le goutte à goutte accroissent la proportion d'azote provenant de l'engrais qui est absorbé par la culture (augmentation de l'efficacité de l'engrais pour la culture). La part résiduelle de l'apport recyclée sous forme organique dans le sol est alors diminuée (diminution de l'efficacité de l'engrais pour la matière organique). Le rendement de la culture est indépendant de la source d'azote apporté ( $\text{NO}_3$  ou  $\text{NH}_4$  sous forme minérale et organique) dans les conditions normales de culture. Les équilibres entre les fournitures minérales et organiques ne justifient pas le fractionnement des apports minéraux. Il existe donc une grande souplesse dans le calendrier des apports minéraux lorsque le fractionnement est possible (goutte à goutte essentiellement).

En culture pluviale, l'enfouissement de l'engrais à base d'urée n'est réalisable que dans des parcelles mécanisables de terres franches. Cette situation n'est pas courante à La Réunion où la plus part des sols contiennent des proportions importantes de cailloux. Dans d'autres situations, si le risque de pertes par volatilisation est grand, la substitution de l'urée par un autre engrais azoté devient un choix économique ; l'urée demeurant la source d'azote la moins chère.

En culture irriguée, des études de mobilisation et de dilution minérale dans la plante sont en cours pour identifier avec précision la répartition des besoins de la culture au cours de son cycle, en condition non limitante de croissance et de développement. L'objectif est de définir les conditions d'apport minéraux correspondant à une efficacité maximum des engrais pour modéliser l'absorption minérale et optimiser les apports.

Des tentatives ont été faites pour conseiller d'employer de préférence de l'urée en zone humide (essentiellement dans l'Est) et du nitrate d'ammonium en zone sèche (hauts de l'Ouest), afin d'optimiser la vitesse de mise à disposition de l'azote pour la culture. Ces conseils n'ont pas eu de suite. Les agriculteurs pour de nombreuses raisons liées au temps de travail aux engrais disponibles sur le marché n'utilisent en effet que la forme azotée proposée dans l'engrais ternaire habituel.

# LES GRAMINEES FOURRAGERES

## Introduction

Le terme fourrage regroupe un certain nombre de graminées semées (ou repiquées) dont les principales sont le kikuyu, le dactyle, les Ray grass, la fétuque élevée, le chloris et le brome cathartique. Les surfaces en prairies naturelles et les parcours sont en régression au profit des prairies semées. On constate aussi un accroissement régulier des surfaces fourragères (Tableau 30) lié notamment au dynamisme de la production laitière.

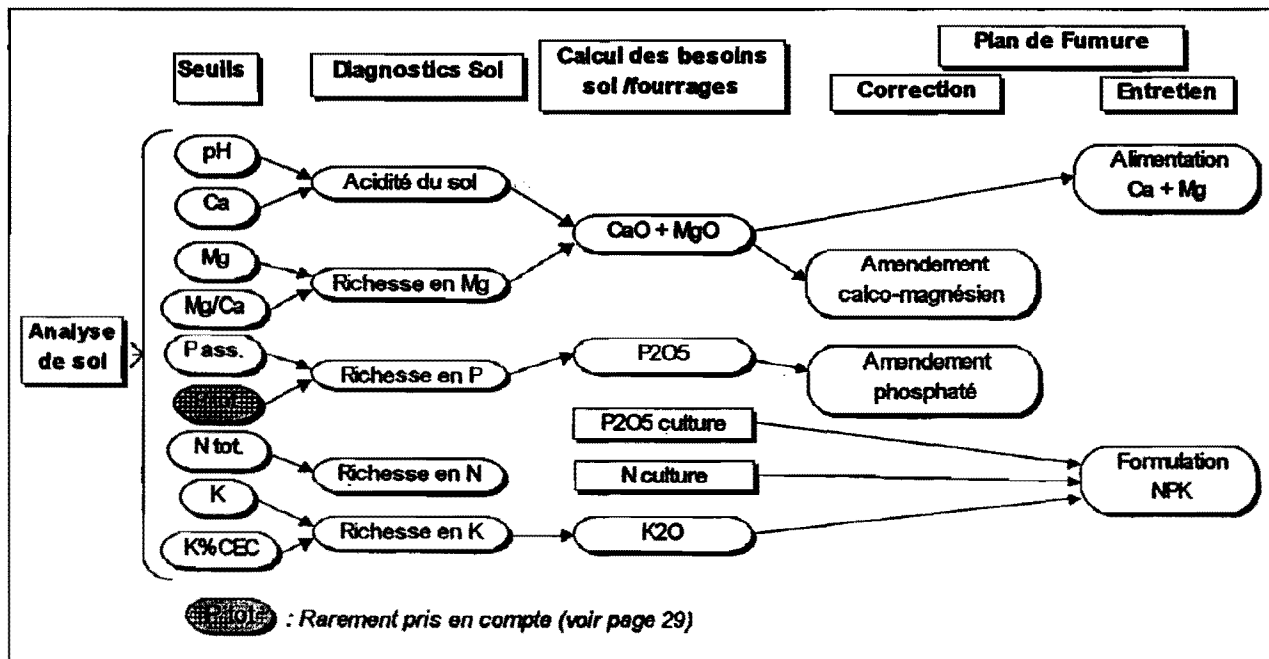
Les associations de graminées avec des légumineuses sont rares ce qui justifie que le programme d'interprétation ne prenne en compte que les graminées.

Contrairement à la canne à sucre que l'on rencontre sur tous types de sol, la plus part des soles fourragères sont situées en altitude sur des andosols. Il existe cependant des cas de production fourragère en basse altitude essentiellement sur sols bruns irrigués (culture de chloris).

## Méthodologie

Les modalités de fertilisation des prairies (Figure 11) utilisées par le programme sont celles décrites pour les éleveurs dans des fiches techniques rédigées conjointement par le CIRAD et les intervenants de la filière (Fiche 1 à 4, 1988).

Figure 11 : Organigramme des conseils pour les graminées fourragères



Deux hypothèses de production sont prises en compte pour les conseils en fertilisation (Document 2) :

- le système intensif, qui correspond à une charge supérieure à 2,5 vaches par hectare de prairie, soit 7 à 9 exploitations annuelles (coupe et/ou pâturage) et une production de matière sèche de 10 à 12 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>.
- le système semi-intensif dont la charge par hectare est de l'ordre de 1,5 vaches, et qui produit 6 à 8 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de matière sèche avec 4 à 7 exploitations.

Le système intensif, le plus courant à La Réunion, est utilisé par défaut si la fiche de demande d'analyse ne comporte pas d'indication.

Ces hypothèses fixent, par le volume de biomasse produit, les quantités d'éléments minéraux exportées, qui servent de base au calcul des restitutions.





## La correction du pH et du phosphore

La mise en place d'une prairie doit être précédée de la mise à un niveau convenable du pH du sol et du phosphore assimilable. Une analyse chimique périodique du sol est recommandée pour contrôler l'acidification et d'éventuelles limitations en nutrition phosphatée.

Les bases du calcul décrit pour la canne à sucre pour l'amendement calco-magnésien (page 42) et l'amendement phosphaté (page 52), s'appliquent aux fourrages. Ceci revient à admettre la double hypothèse d'un comportement comparable de la canne et des fourrages vis à vis (1) de la toxicité aluminique et (2) de besoins minéraux en Ca et Mg.

### La fumure d'entretien

#### L'Azote et le Phosphore

Les calculs sont basés sur des exportations minérales intermédiaires entre celles des graminées tempérées et tropicales, soit 270 kg de N et 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O pour 10 t de matière sèche produite (CIRAD et al., 1988, fiche N°1). Ces chiffres ont été modulés pour tenir compte des pertes en azote par lixiviation et des phénomènes de rétrogradation du phosphore et de la matière organique, particulièrement marqués dans le cas des andosols.

Le conseil en fertilisation azotée et phosphorique des fourrages ne prend en compte que les rendements de la prairie (Tableau 44).

Tableau 44 : Conseil en fertilisation azotée et phosphatée pour l'entretien des graminées fourragères

Production	matière sèche (T.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	Fumure d'Entretien en Unités.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>	
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Semi intensive	6 à 8	200	50
Intensive	10 à 12	380	100

Le conseil en fumure d'entretien pour ces deux éléments majeurs ne tient donc pas compte des réserves du sol. Cette première ébauche de la fumure d'entretien qui mérite d'être améliorée est justifiée par la présence quasi exclusive d'un seul type de sol (andosol) dans des conditions climatiques relativement homogènes (plaines d'altitude). Seules les surfaces fourragères limitées, implantées sur sol brun irrigué échappent à cette logique analytique.

### Le Potassium

Les doses conseillées sont établies à partir des disponibilités en potassium du sol. En effet, si le potassium est accessible en excès, il est consommé au-delà des besoins physiologiques des graminées fourragères, sans effet additionnel sur la production (consommations de luxe). Il est donc économiquement important de limiter la fertilisation potassique aux besoins de la culture, en tenant compte des disponibilités du sol.

La grille d'interprétation des analyses de sol pour les fourrages est basée sur un tableau croisé des teneurs du sol en potassium, et du taux de saturation de la CEC par ce même potassium (Tableau 45).

Tableau 45 : Diagnostic de fertilisation potassique pour les graminées fourragères

DIAGNOSTIC		K				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
K%CEC	Très Faible	Carencé en Potassium				Correctement pourvu en K
	Faible					
	Moyen	Correctement pourvu en potassium				Riche en Potassium
	Fort					
	Très Fort					
* Attention : risque de contamination						

Ce tableau diffère de celui élaboré pour la canne à sucre (Tableau 38). Les besoins de la canne sont en effet spécifiques. Le potassium joue un rôle important dans la synthèse des sucres. La différence des tableaux porte sur une extension des domaines extrêmes où l'alimentation potassique est jugée faible et

forte et une réduction du domaine moyen au profit des fourrages.

Afin de permettre au programme de fonctionner en dépit de données manquantes, le rapport K%CEC prend la valeur par défaut de 5% s'il ne peut être calculé. Si K%CEC est supérieur à 20 (zone hachurée du tableau), l'échantillon est considéré comme contaminé. Ce cas correspond notamment à un prélèvement de l'échantillon de sol postérieur à l'épandage de la fumure d'entretien.

## Le Conseil

### L'Amendement du sol

Les propositions d'amendement calco-magnésien que le programme imprime sur les bulletins d'analyse sont détaillées en annexe (page 90), tandis que celles de correction du sol en phosphore sont indiquées en annexe page 92.

### L'Entretien de la culture

#### La Potasse

La fumure d'entretien comporte un commentaire relatif à la classe de fertilité potassique du sol (Tableau 45), selon que celui-ci est carencé (1), normalement pourvu (2) ou riche en potassium (3). Ce commentaire qui est indépendant du niveau d'intensification fait référence au plan de fumure, imprimé à la suite sur la feuille d'analyse (Document 2) :

1. *Votre sol est carencé en potasse pour la culture de graminées fourragères. Le déficit est supérieur à 300 unités de K<sub>2</sub>O. Le schéma de fumure proposé ci-dessous tient compte de cette carence en renforçant la fertilisation potassique.*
2. *Votre sol est correctement pourvu en potasse pour la culture de graminées fourragères.*
3. *Votre sol est riche en potasse pour la culture de graminées fourragères. Le schéma de fumure proposé ci-dessous réduit d'environ 30% la fertilisation potassique normalement nécessaire.*

#### Le Plan de Fumure

Le conseil en fumure d'entretien est élaboré par le programme à partir du dictionnaire de phrases qui rappelle systématiquement le niveau d'intensification. Le fractionnement des apports s'inspire notamment des études de la Société Commerciale des Potasses et de l'Azote (SCPA, 1981) sur les fourrages tempérés (Drouin, 1988).

#### ***Production semi intensive***

En semi intensif, le commentaire suivant est imprimé sur le bulletin d'analyse :

*ce schéma est établi pour un chargement annuel de 1,5 vaches/ha et 4 à 7 exploitations annuelles de la prairie en fauche ou en pâture, soit 6 à 8 t.ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> de matière sèche.*

Le plan de fumure apparaît à la suite selon le diagnostic de fertilité potassique (Tableau 46).

Tableau 46 : Plan de fumure conseillé en système fourrager semi intensif

Date d'apport	Diagnostic potassique du sol					
	Carencé (1)		Normal (2)		Riche (3)	
	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>
Début novembre	14-7-36	450	14-7-36	450	18-7-30	350
Mi-mars	14-7-36	450	14-7-36	450	18-7-30	350
Fin juin	20-0-33	300	Ammonitrate ou urée	250 140	Ammonitrate ou urée	250 140

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

Un résumé du plan de fumure est ensuite imprimé pour chacun des trois cas traités :

1. Soit un total annuel de : 190 N - 60 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 420 K<sub>2</sub>O.
2. Soit un total annuel de : 190 N - 60 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 320 K<sub>2</sub>O.
3. Soit un total annuel de : 190 N - 50 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 210 K<sub>2</sub>O.

Le bulletin s'achève sur le commentaire suivant, commun aux trois cas :

A titre indicatif, 6 tonnes de fourrage sec ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> exportent en moyenne 160 N - 30 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 250 K<sub>2</sub>O - 30 MgO.

### **Production Intensive**

En intensif, situation par défaut, le commentaire suivant est imprimé sur le bulletin d'analyse:

*ce schéma est établi pour un chargement annuel de 2,5 vaches/ha ou plus et 7 à 9 exploitations annuelles de la prairie en fauche ou en pâture, soit 10 à 12 t.ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> de matière sèche.*

Le plan de fumure apparaît à la suite de même manière qu'en semi intensif, selon le diagnostic de fertilité potassique (Tableau 47).

Tableau 47 : Plan de fumure conseillé en système fourrager intensif

Date d'apport	Diagnostic potassique du sol					
	Carencé (1)		Normal (2)		Riche (3)	
	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>	Engrais	Kg.Ha <sup>-1</sup>
Mi-novembre	Ammonitrate ou urée	250 ou 140	Ammonitrate ou urée	250 ou 140	Ammonitrate ou urée	250 ou 140
Début janvier	14-7-36	450	14-7-36	450	18-7-30	350
Fin février	20-0-33	300	Ammonitrate ou urée	250 ou 140	Ammonitrate ou urée	250 ou 140
Mi-avril	14-7-36	450	14-7-36	450	18-7-30	350
Début juillet	Ammonitrate ou urée	250 ou 140	Ammonitrate ou urée	250 ou 140	Ammonitrate ou urée	250 ou 140
Mi-septembre	14-7-36	450	14-7-36	450	18-7-30	350

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

Un résumé du plan de fumure est ensuite imprimé pour chacun des trois cas traités :

1. Soit un total annuel de : 380 N - 90 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 590 K<sub>2</sub>O.
2. Soit un total annuel de : 360 N - 90 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 490 K<sub>2</sub>O.
3. Soit un total annuel de : 360 N - 70 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 320 K<sub>2</sub>O.

Le bulletin s'achève sur le commentaire suivant, commun aux trois cas :

1. A titre indicatif, 12 tonnes de fourrage sec ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> exportent en moyenne 325 N - 60 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 500 K<sub>2</sub>O - 60 MgO.

### **Discussions**

Le conseil actuel en fumure d'entretien du programme expert n'est encore qu'une ébauche basée sur des données bibliographiques et quelques résultats de la recherche et du développement disponible en 1988 à La Réunion. Il est limité dans son évaluation aux mobilisations minérales en azote et phosphore des fourrages. Il ne prend en compte les réserves du sol que pour le potassium. Il ne prend pas non plus en compte la diversité des fourrages.

La correction phosphatée des sols cultivés en fourrage est en cours d'amélioration par les chercheurs du

CIRAD Réunion (EMVT). En effet, les doses appliquées à la canne pourraient s'avérer insuffisantes pour compenser la forte rétrogradation du phosphore dans les andosols. Or, une alimentation phosphatée déficiente entraîne une réduction du phosphore contenu dans les fourrages, réduction qui a des répercussions sur l'alimentation animale et plus particulièrement celle des bovins (Gros, 1979).

Nous envisageons d'améliorer le conseil en fertilisation des graminées fourragères, en associant désormais l'analyse des fourrages aux analyses de sol. Les travaux en cours du CIRAD Réunion et de l'union des Associations Foncières Pastorales (Blanfort et Thomas, 1997) montrent en effet l'intérêt de compléter le diagnostic sol par un diagnostic nutritionnel plante qui repose sur des indices de nutrition minérale (Salette et Huche, 1991; Duru, 1992). Le complément d'information provenant de la plante permet de fait de s'affranchir des normes du système qui ne correspondent pas toujours à la réalité de la parcelle échantillonnée (profondeur du sol, profondeur de l'enracinement, présence localement de mosaïques de sol mal décrit par le type de sol du pixel...).

En attendant que ces nouveaux éléments soient intégrés au programme, le conseil aux éleveurs reste établi sur les bases que nous venons de décrire.



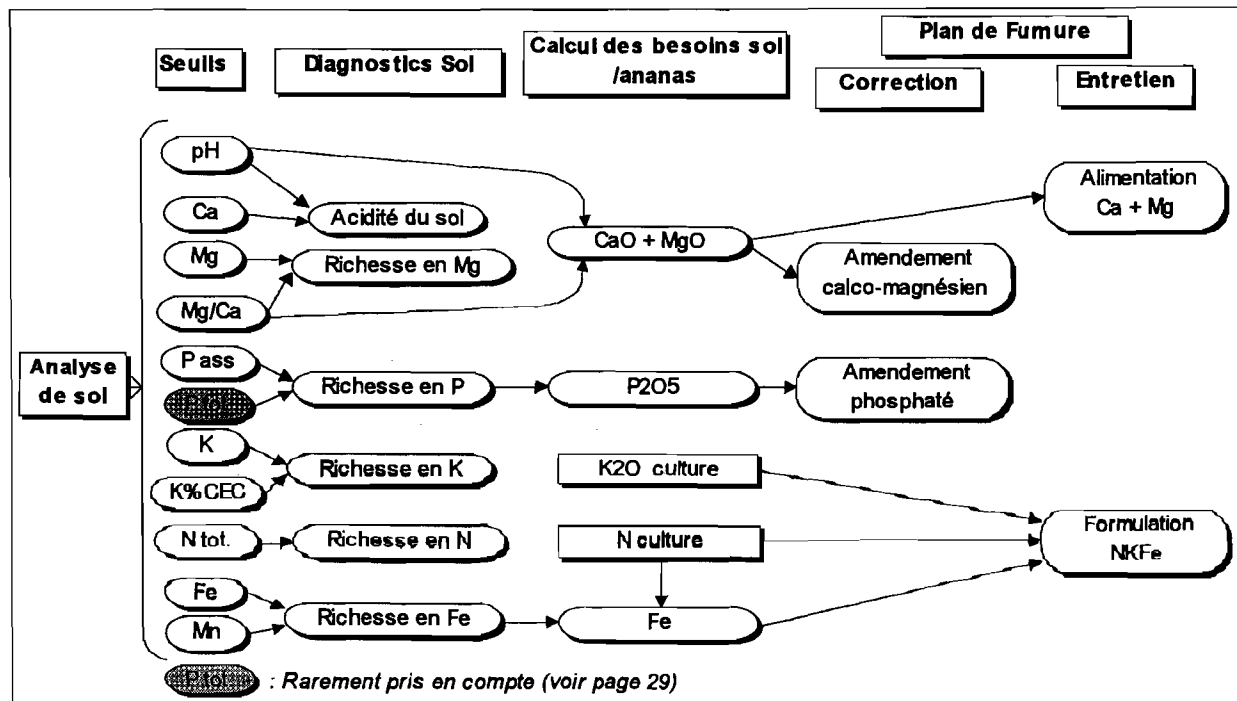
# L'ANANAS

## Introduction

Les informations de base sur la fertilisation de l'ananas dérivent des études du CIRAD (Bouffin et Ducelier, 1987; IRFA et Chambre d'Agriculture, mai 1992).

Cultivé de manière intensive le plus souvent sur des sols ferrallitiques acides, l'ananas requiert une fertilisation importante et fractionnée. Il en résulte que contrairement à la canne à sucre et aux graminées fourragères, les caractéristiques chimiques du sol ne sont prises en compte que pour l'ajustement du pH (amendement calco-magnésien) et la mise à niveau du phosphore (fumure de fond). Pour les autres éléments minéraux majeurs, seuls les besoins de la culture, liés au rendement, sont pris en compte (Figure 12). Concernant les oligo-éléments, l'alimentation en fer est prise en compte pour pallier à de fréquentes chloroses ferriques.

Figure 12 : Organigramme des conseils pour l'ananas



## La Correction du pH

L'ananas est une culture de sol acide. Les corrections du sol du programme expert, visent à situer le pH entre 4,5 et 5,5. Le calcul des amendements calco-magnésiens diffère donc de celui employé pour la canne à sucre et les graminées fourragères. Le diagnostic d'acidité du sol pour l'ananas (Tableau 48) est basé sur les seuils de pH (Tableau 5) et ceux du rapport Mg/Ca (Tableau 9).

Tableau 48 : Diagnostic d'acidité pour l'ananas

Variables		pH				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
Mg/Ca	TRES FAIBLE	un peu acide, pauvre en Mg Chaux Mg (1)	Normal (3)		Trop basique pour l'ananas (4)	
	FAIBLE					
	MOYEN					
	FORT					
	TRES FORT	Légèrement acide				
		Chaulage normale(2)				

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

Les commentaires imprimés sur les bulletins d'analyse, sont déduits de la position du sol dans le tableau :

1. votre sol est un peu acide pour la culture de l'ananas et plutôt pauvre en magnésie. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée # pour la somme des éléments CaO + MgO contenus dans l'amendement utilisé.
2. Votre sol est légèrement acide pour la culture de l'ananas. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux serait souhaitable. Dose préconisée # de CaO.
3. Votre sol a un pH correct pour la culture de l'ananas. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.
4. Le pH de votre sol est trop élevé pour la culture de l'ananas. Celui-ci exige en effet des sols acides dont le pH se situe entre 4,5 et 5,5. Il serait prudent d'envisager une autre culture sur cette parcelle pour éviter tout problème d'ordre agronomique.

Le calcul des doses préconisées (#) prend en compte :

- un apport minimum 500 kg de CaO déjà décrit pour la canne et,
- la différence entre le Calcium échangeable du sol (résultat de l'analyse) et le seuil S1 qui sépare les sols à très faible teneur en Ca des autres sols (Tableau 6).

## Le Phosphore

La fumure de redressement de la fertilité du sol en phosphore est légèrement différente de celle évoquée pour la canne à sucre et les graminées fourragères.

Le programme propose un redressement si le diagnostic indique une correction indispensable (Tableau 49). Par rapport aux deux cultures précédentes, le redressement est étendu aux sols à faible teneur en P assimilable et très faible teneur en P total et réciproquement. Aucun redressement n'est conseillé pour les sols faiblement pourvus en P.

Tableau 49 : Diagnostic de fertilité en phosphore pour l'ananas

Variables		P assimilable				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
P total	TRES FAIBLE	Carencé		Faible non (2)		
	FAIBLE	redressement (1)	Faible non (2)			
	MOYEN	Faible non (2)		Normal		
	FORT	Carencé				
	TRES FORT					

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

Les propositions de redressement (Document 3) sont illustrées par les commentaires suivants :

1. L'ananas n'est pas très exigeant en P, une correction avant plantation de # unités est suffisante.
2. L'ananas n'est pas très exigeant en P, une correction n'est pas nécessaire.

Calcul des doses conseillées (#) prend en compte :

- un apport minimum de 100 unités de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, et
- un apport égal à 4,6 fois la différence entre le P assimilable du sol que donne le résultat de l'analyse et le seuil S1 en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Le seuil S1 est celui qui sépare les sols à très faible teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des autres sols (Tableau 14). Le facteur 4,6 traduit :

- (1) la rétrogradation du phosphore dans le sol (coefficient 2);
- (2) l'équivalence entre P et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (facteur 2,29 arrondi à 2,3) ;et
- (3) le volume de sol à traiter (1.000 t.ha<sup>-1</sup>).

## Le Potassium

On ne tient pas compte de la fertilité potassique de départ du sol, pour le calcul de la fertilisation potassique de l'ananas compte tenu des besoins importants de la culture. Le programme fait toutefois intervenir le diagnostic potassique du sol, pour imprimer un commentaire de mise en garde contre une fertilisation potassique mal conduite si le sol s'avère très carencé

Ce commentaire associé au Tableau 50 est le suivant :

- *Votre sol est très carencé en potassium. Sur ananas la fumure potassique est apportée directement sur la plante tout au long du cycle sans tenir compte de la teneur du sol. Respectez toutefois scrupuleusement le schéma de fumure pour éviter une carence en K.*

Tableau 50 : Diagnostic de la fertilité potassique du sol pour l'ananas

Variables		K (meq/100 g)				
		TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRES FORT
K%CEC	TRES FAIBLE	Très Carencé (1)			Ananas	
	FAIBLE	Autre				
	MOYEN					
	FORT					
	TRES FORT					

(#) : référence des commentaires choisis et imprimés par le programme expert.

## L'Azote

La richesse du sol en azote et en matière organique n'est pas prise en compte dans le cadre de la fertilisation azotée du sol. Le commentaire azote matière organique est unique, quelque soit le sol :

*Pas de problème particulier sur ananas. Il est conseillé toutefois de réenfouir les résidus après le cycle cultural.*

## Les Oligo-éléments

Des études conduites par le CIRAD en collaboration avec la chambre d'agriculture (travail non publié) ont permis de mettre en évidence la présence de symptômes chlorotiques lorsque le rapport fer / manganèse est inférieur à 1,5. Ces symptômes disparaissent par simple application de fer. Ces résultats sont confirmés par des observations réalisées sur des plantations mauriciennes.

Le programme prend en compte le rapport Fe/Mn si les teneurs en Fe et en Mn sont significatives, c'est à dire supérieures au seuil très carencé (Tableau 21). Dans ce cas, si le rapport Fe/Mn est inférieur à 1.5, le commentaire suivant est imprimé sur le bulletin:

*vous sol possède une rapport fer /manganèse défavorable pour l'ananas. Effectuez des apports de fer avec un produit contre la chlorose ferrique selon les indications du fabricant.*

## Plan de Fumure

Il correspond à la fiche technique de l'IRFA où figure un calendrier d'apport d'engrais lié au cycle de la culture (40 jours entre les apports en début de cycle et 15 jours en fin de cycle). Il apparaît sur le bulletin d'analyse (Document 3) de la manière suivante :

*Apport tous les 40 à 15 jours selon l'avancement du cycle de :*

- *115 kg d'urée + 165 kg de sulfate de potasse dans 3500 l d'eau par hectare, appliqué en foliaire, ou :1,7 g d'urée + 2,5 g de sulfate par plan, à la base des premières feuilles.*
- *Respectez pour chaque apport un rapport K<sub>2</sub>O / N supérieur ou égal à 1,5.*
- *Stoppez tout apport à la floraison*



**Centre de Coopération Internationale  
En Recherche Agronomique pour le Développement  
Agence Réunion**

97408 St Denis Messag Cedex 09 - Tel : 0162.46.53.19 - Fax : 0262.52  
EPIC - Siret : 775665920 00119

N° CIRAD : 96/163/02/36436

Organisme ou Service : SCICA PROMOCANNE. Technicien : TOURVILLE S. Votre référence : 7190  
Lieu de prélèvement : Les Jachères Bel Air/ 97441 St SUZANNE (NOM/ADRESSE de l'agriculteur)  
Coordonnées / alt. : 166.9 / 74.2 90 m  
Région CIRAD : 41-40  
Date d'entrée : 28/06/96  
Date de sortie : 21/03/97  
Interprétation : SOLS FERRALLITIQUES

**ANALYSE DE SOL**

Caractéristiques	Teneur de votre sol	Niveau souhaitable	Très faible	Faible	moyen	Fort	Elevé
pH H <sub>2</sub> O	4.50	5.50	■				
pH KCl	4.00						
pH NaF							
<b>Matière Organique</b>							
Azote g/kg	2.30	2.00	■	■	■		
Carbone g/100g							
C/N							
<b>Phosphore</b>							
Assimilable mg/kg	117	88	■	■	■		
Total mg/kg							
<b>Complexe Absorbant (au cobalt)</b>							
Calcium me/100g	1.14	5.50	■				
Magnésium me/100g	0.92	2.70	■				
Potassium me/100g	0.49	0.40	■	■	■		
Sodium me/100g	0.10						
Somme des bases me/100g	2.65						
CEC (capacité d'échange)	6.70	10.90	■	■	■		
Saturation en %	39.55	80.00	■	■	■		
K%CEC	7.31	4.00	■	■	■	■	
Mg/Ca	0.80	0.50	■	■	■		
<b>Oligo-éléments mg/kg</b>							
Fer	36.1		■	■	■		
Manganèse	34.9		■	■	■		
Zinc	0.3		■	■	■		
Cuivre	0.7		■	■	■		

**INTERPRETATION N° 36436 POUR ANANAS**

**PH - CALCIUM - MAGNESIUM**

Votre sol est légèrement acide pour la culture de l'ananas.  
- un apport de chaux ou de carbonate de chaux serait souhaitable.  
- dose préconisée : 500 kg/ha de CaO

**PHOSPHORE**

Votre sol est correctement pourvu en phosphore

**POTASSE**

Votre sol est riche en potasse.  
- sur ananas la fumure potassique est apportée directement sur la plante tout au long du cycle, sans tenir compte de la teneur du sol.

**AZOTE - MATIERE ORGANIQUE**

Pas de problème particulier sur ananas.

**OLIGO-ELEMENTS**

- votre sol possède un rapport fer / manganèse défavorable pour l'ananas.  
- effectuez des apports de fer avec un produit contre la chlorose ferrique selon les indications du fabricant.

**SCHEMA DE FUMURE TYPE SUR ANANAS**

- apport tous les 40 à 15 jours, selon l'avancement du cycle, de :  
- 115 kg d'urée + 165 kg de sulfate de potasse dans 3500 l d'eau par hectare appliqués en foliaire, ou  
- 1,7 g d'urée + 2,5 g de sulfate par plant, à la base des premières feuilles  
- respectez pour chaque apport un rapport K<sub>2</sub>O / N supérieur ou égale à 1,5.  
- stoppez tout apport à la floraison



# LE BANANIER

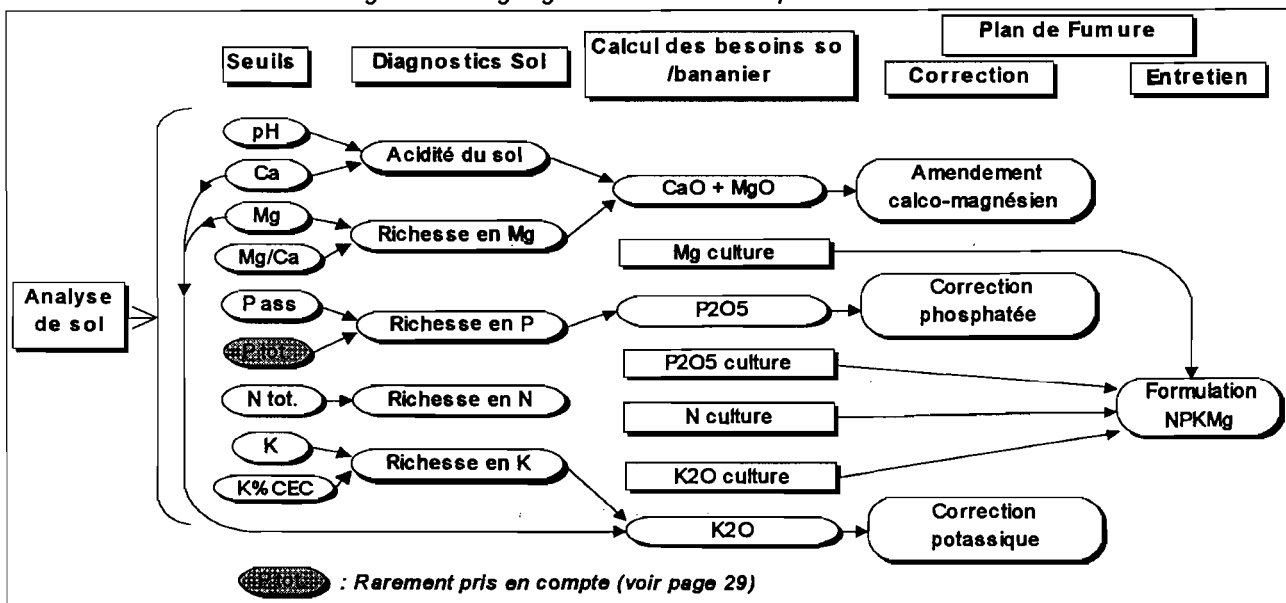
## Introduction

Les études sont basées en partie sur les recherches du CIRAD (Martin-Plével et Charpentier, 1963; IRFA et Chambre d'Agriculture, août 1992) et les nombreuses études conduites en Guadeloupe par l'IRFA et la SICA ASSO BAG (Dessert, 1980; Bourgade, 1986; Anonyme, 1987).

Ces résultats ont été complétés par des tests non publiés, que PF Chabaliér, a conduits à la demande de la SICA Banane, dans l'optique d'une amélioration de la qualité des fruits.

Comme l'ananas, le bananier, plante exigeante cultivée de manière intensive doit recevoir régulièrement d'importantes doses d'éléments fertilisants. Il en résulte une moindre importance des réserves du sol dont la prise en compte par le programme expert est forcément limitée (Figure 13).

Figure 13 : Organigramme des conseils pour le bananier



## Correction du pH et du Phosphore

Les conseils (Document 4) destinés à corriger l'acidité du sol et les calculs des doses, sont identiques à ceux décrits pour la canne à sucre. Le commentaire suivant est systématiquement imprimé par le programme quelque soit le type de correction :

*Attention : la fertilisation intensive nécessaire au bananier implique des apports réguliers de chaux magnésienne pour éviter une acidification rapide du sol.*

Les conseils de corrections phosphatées sont également identiques à ceux de la canne. Ils sont détaillés en annexe page 92.

## Le Phosphore d'entretien

La fumure phosphatée d'entretien du bananier est indépendante des réserves du sol. Les apports de phosphore à la plante sont uniquement calculés sur le rendement escompté de la culture.

## Le Potassium

Le bananier est une culture très exigeante en potassium. La fertilisation potassique est évaluée à partir des quatre informations suivantes :

1. le niveau de potassium échangeable dans le sol,
2. la CEC effective (cobaltihexamine),

3. la somme du calcium et du magnésium échangeable dans le sol après correction du pH et,
4. la teneur en magnésium du sol.

### L'objectif

Le programme calcule la teneur souhaitée du sol en potassium après correction du pH selon les modalités suivantes :

1. La CEC mesurée est comparée à la somme des teneurs en calcium et en magnésium échangeable théoriquement atteinte après chaulage. Le programme retient la plus grande de ces deux valeurs. Cette comparaison a pour origine le comportement des sols à charge variable de La Réunion, dont la CEC augmente avec le pH, donc après chaulage. L'hypothèse est que la CEC après amendement est au moins équivalente à la somme des deux principales bases échangeables (Ca + Mg).
2. Une première estimation de la teneur en potassium souhaitée est alors obtenue en prenant 6% de la valeur précédente. Les recherches montrent en effet que l'alimentation potassique du bananier n'est correcte que si le potassium échangeable correspond au moins à 6% de la CEC effective du sol.
3. Le programme calcule ensuite une estimation plafond de la valeur en potassium souhaitée en prenant 70% de la teneur en magnésium après chaulage. Cette seconde valeur constitue un maximum à ne pas dépasser pour une alimentation potassique équilibrée.
4. La teneur en potassium souhaitée est la première valeur calculée (6% de la CEC corrigée) avec la seconde pour plafond (70% de Mg).

### La Dose

Le programme estime ensuite la dose de potassium à apporter sur la base de la différence entre l'analyse et la valeur souhaitée précédemment calculée. Les bases du calcul sont :

- 3.000 t.ha<sup>-1</sup> de sol à traiter et,
- Un coefficient d'efficacité de 1,5 pour tenir compte des pertes.

Une sécurité intervient si le rapport analytique K%CEC est supérieur à 10 en imprimant le commentaire suivant :

*Teneurs anormalement élevées. Vérifiez que l'échantillon n'ai pas été contaminé.*

Trois cas sont pris en compte selon les résultats du calcul :

1. Si la dose calculée est inférieure à 60 unités de K<sub>2</sub>O (100 kg.ha<sup>-1</sup> de KCl), aucun apport de potassium n'est proposé.
2. Si la dose est supérieure à 300 unités de K<sub>2</sub>O (500 kg.ha<sup>-1</sup> de KCl), elle est limitée à cette dernière valeur afin d'éviter des problèmes de salinité et de brûlure.
3. Si la dose se situe entre 60 et 300 unités, le résultat arrondi du calcul apparaît comme conseil.

Les commentaires qui illustrent le conseil sont tous précédés de la mise en garde générale suivante :

*Attention ; l'interprétation de la potasse pour la banane est liée au statut calco-magnésien du sol. Les calculs ci-dessous ne sont valables que si vous effectuez le chaulage préconisé.*

Les commentaires correspondant aux trois cas précédents sont les suivants :

1. Votre sol est correctement pourvu en potasse.
2. Votre sol est très carencé en potasse pour la culture du bananier.
  - le déficit est de # unités : il n'est pas possible d'effectuer cette correction en une seule fois sans risque pour la culture. Apportez donc seulement 500 kg / ha de KCl à la plantation ou en début de cycle et respectez soigneusement le schéma de fumure ci-dessous pour l'entretien.
3. Votre sol est carencé en potasse pour la culture du bananier. Apportez # unités supplémentaires à la

*plantation ou en début de cycle, soit la dose # de KCl.*

## **Le Magnésium**

Le bananier est une culture exigeante en magnésium. Une fertilisation magnésienne d'entretien est conseillée par le système expert quelle que soit la richesse du sol en magnésium. Le sol n'est cependant pas oublié puisque des doses de chaux magnésienne ou de kiésierite sont préconisées par le système expert pour corriger le pH du sol et établir un équilibre calco-magnésien correct. Cette correction du sol est indépendante de la culture. Elle est commune à la canne à sucre et aux fourrages. A noter qu'elle n'est pas appliquée sur ananas du fait du caractère acidophile de cette dernière culture.

## **L'Azote**

Le conseil en fertilisation azoté, qui est reporté dans le plan de fumure ne prend pas en compte les réserves du sol en matière organique (azote total).

## **Le plan de fumure**

Le plan de fumure proposé à la suite des conseils en amendement calco-magnésiens et en phosphore est le suivant :

*Ce Schéma est établi pour une production d'environ 40 t/ha avec une densité de 2000 pieds.*

- *A la plantation effectuez les éventuelles corrections mentionnées plus haut*
- *De la plantation à la jetée (environ 8 mois) : 1,2 t/ha (600 g/pied) de 18-7-30 ou d'un autre engrais canne à répartir en 4 à 8 apports.*
- *De la jetée à la récolte : 700 kg/ha (350 g/pied) de 9-0-30 S + 4 Mgo en 2 ou 3 fois.*

*Soit un total pour le cycle de : 280 N - 85 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 570 K<sub>2</sub>O - 30 MgO.*

- *Dans le cas d'une fertilisation au pied, épandre l'engrais sur un cercle d'environ 1,3 m de rayon pour éviter une trop forte concentration (risques de brûlures et pertes).*
- *Adaptez la fréquence des apports en fonction de la pluviométrie et du développement des bananiers.*
- *Analysez le sol tous les 3 à 4 ans pour éviter tout déséquilibre.*

La formulation 9-0-30 est préparée de manière spécifique pour le bananier. Elle contient des sulfates à la place des chlorures (apport de S) et quelques unités de MgO additionnel.



**Centre de Coopération Internationale  
En Recherche Agronomique pour le Développement  
Agence Réunion**

97438 St Denis Messag Cedex 09 - Tel : 0262.50.80.19 - Fax : 0262.52.8700 - Site : 775663920 00119

**N° CIRAD**

Organisme ou Service : SCICA BANANE . Technicien  
Lieu de prélèvement : 057/ 97437/ Ste ANNE  
Coordonnées / alt. : 183,3 / 50,2 270 m.  
Région CIRAD : 37-10  
Date d'entrée : 16/07/96  
Date de sortie : 21/03/97  
Interprétation : ANDOSOLS PERHYDRATES

: 96/177/01/36449

: AMILY M. Votre référence : CA

(NOM/ADRESSE de l'agriculteur)

**ANALYSE DE SOL**

Caractéristiques	Teneur de votre sol	Niveau souhaitable	Très faible	Faible	moyen	Fort	Elevé
pH H2O	5.20	5.50	[Barre pleine]				
PH KCl	4.30		[Barre pleine]				
PH NaF			[Barre pleine]				
<b>Matière Organique</b>							
Azote g/kg	4.00	8.50	[Barre pleine]				
Carbone g/100g			[Barre pleine]				
C/N			[Barre pleine]				
<b>Phosphore</b>							
Assimilable mg/kg	23	200	[Barre pleine]				
Total mg/kg			[Barre pleine]				
<b>Complexe Absorbant (au cobalt)</b>							
Calcium me/100g	2.04	5.00	[Barre pleine]				
Magnésium me/100g	4.09	2.50	[Barre pleine]				
Potassium me/100g	0.24	0.40	[Barre pleine]				
Sodium me/100g	0.21		[Barre pleine]				
Somme des bases me/100g	6.58		[Barre pleine]				
CEC (capacité d'échange)	15.50	10.50	[Barre pleine]				
Saturation en %	42.45	76.00	[Barre pleine]				
K%CEC	1.54	4.00	[Barre pleine]				
Mg/Ca	2.00	0.50	[Barre pleine]				
<b>Oligo-éléments mg/kg</b>							
Fer	42.0		[Barre pleine]				
Manganèse	0.1		[Barre pleine]				
Zinc	0.1		[Barre pleine]				
Cuivre	0.4		[Barre pleine]				

**INTERPRETATION N° 36499 POUR BANANIER**

**PH - CALCIUM - MAGNESIUM**

Votre sol est acide.

- un apport de chaux magnésienne est indispensable.

- dose préconisée : 3 t/ha pour la somme des éléments CaO + MgO contenu dans l'amendement utilisé.

-attention : la fertilisation intensive nécessaire au bananier implique des apports réguliers de chaux magnésienne pour éviter une acidification rapide du sol.

**PHOSPHORE**

Votre sol est très carencé en phosphore.

- une fumure de correction à la plantation est indispensable.

- dose préconisée : 810 kg/ha de P2O5.

**POTASSE**

Votre sol est très carencé en potasse pour la culture du bananier.

- le déficit est de 1460 unités : il n'est pas possible d'effectuer cette correction en une seule fois sans risque pour la culture.

- apportez donc seulement 500 kg/ha de KCl à la plantation ou en début de cycle, et respectez soigneusement le schéma de fumure ci-dessous pour l'entretien.

- attention : l'interprétation de la potasse pour le banane est liée au statut calcio-magnésien du sol. Les calculs ci-dessus ne sont valables que si vous effectuez le

chaulage préconisé.

**AZOTE - MATIERE ORGANIQUE**

Votre sol est pauvre en matière organique.

- il fournit peu d'azote minéral aux cultures.

- effectuez des apports massifs de matière organique (fumier, lisier, compost, pailles...) avant chaque mise en culture et enfouissez les résidus de récolte.

- renforcez la fertilisation minérale azotée selon les exigences des cultures.

**SCHEMA DE FUMURE TYPE**

Ce schéma est établi pour une production d'environ 40 t/ha avec une densité de 2000 pieds.

- à la plantation effectuez les éventuelles corrections mentionnées plus haut.

- de la plantation à la jétée (environ 8 mois) : 1,2 t/ha (600 g/pied) de 10-7-30. Ou d'un autre engrais canne, à répartir en 4 à 6 apports.

- de la jétée à la récolte : 500 kg/ha (350 g/pied) de 9-0-30S + + 4 MgO, en 2 ou 3 fois, soit un total pour le cycle de : 280 N - 85 P2O5 - 570 K2O - 30 MgO

- dans le cas d'une fertilisation au pied, épandre l'engrais sur un cercle de 1,3 m de rayon pour éviter de trop fortes concentrations (risques de brûlures et pertes).

- adaptez la fréquence des apports en fonction de la pluviométrie et du développement des bananiers.

- analysez le sol tous les 3 ou 4 ans pour éviter tout déséquilibre



# L'ENVIRONNEMENT DU SYSTEME

## Introduction

Le bulletin d'analyse (documents 1 à 4), est le vecteur de l'information issue de l'analyse du sol. Il doit répondre à un cahier des charges assez strict qui a des conséquences sur l'établissement de la demande d'analyse, le calendrier de diffusion et la rédaction du conseil.

La demande doit indiquer clairement le nom et l'adresse de l'agriculteur, la date de prélèvement, la culture, le niveau d'intensification pour les graminées fourragères et la localisation géographique de la parcelle.

Le laboratoire doit réaliser l'analyse dans des délais compatibles avec l'application du conseil. L'agriculteur doit en effet être en mesure de mobiliser les fonds nécessaires à l'acquisition des engrais, les acheter, les transporter et les appliquer dans des conditions optimales qui imposent notamment un enfouissement pour les amendements et les fumures de correction.

Le bulletin doit enfin parvenir à l'agriculteur sous une forme compréhensible.

## La Vitesse de Diffusion du Conseil

### L'Analyse

Le laboratoire d'analyse est généralement en mesure de respecter un délai d'une semaine entre la livraison de l'échantillon et l'impression du bulletin d'analyse. Les bulletins d'analyse des échantillons livrés le vendredi sont édités le vendredi suivant. Ceci est notamment possible grâce à des méthodes de dosage plus rapides (en particulier pour la CEC) et à l'informatisation très poussée du laboratoire (de la prise en charge des échantillons au publipostage des bulletins d'analyse, en passant par le transfert automatique des relevés des appareils de dosage dans la banque de données. Cependant, la mise en œuvre d'une série d'analyses de routine ne peut se faire qu'une fois par semaine. En conséquence, les échantillons livrés du lundi au vendredi ne seront analysés que la semaine suivante et le délai peut ainsi atteindre deux semaines. La plupart des techniciens informés de ces contraintes livrent leurs échantillons le vendredi.

La capacité de traitement du laboratoire peut être momentanément dépassée lors de l'afflux massif d'échantillons, notamment en pleine période de replantation. Lorsqu'une telle situation se produit, nous faisons appel à de la main d'œuvre saisonnière. Cependant les délais d'accumulation des échantillons avant décision d'embauche et les délais d'embauche et de formation entraînent invariablement des retards sur le calendrier théorique.

### La Diffusion

La distribution des bulletins était à l'origine assurée par les techniciens chargés des prélèvements, qui commentaient les conseils aux intéressés. Suite à des retards importants de distribution, liés notamment aux activités multiples des techniciens, nous avons décidé d'envoyer le bulletin à l'agriculteur par la poste avec copie au technicien.

Cette solution résout une partie des problèmes de vitesse de transfert de l'information avec cependant quelques aspects pervers :

- l'agriculteur ne contacte pas toujours le technicien pour avoir des explications,
- des bulletins nous sont retournés par la poste pour adresse incomplète,
- le technicien est partiellement dépossédé de son rôle de conseiller en matière de fertilisation car il n'est plus systématiquement contacté par l'agriculteur.

### Les Contraintes Agricoles

La vitesse d'information reste cependant inadaptée à la canne à sucre dans de nombreuses conditions. Ainsi, lorsque le délai entre la dernière récolte et la replantation est trop court ou que le technicien est prévenu trop tardivement par l'agriculteur, le conseil en chaulage et correction en phosphore peut intervenir trop tard pour que l'amendement soit enfoui au cours des phases de préparation du sol. Une perte d'efficacité en résulte. Or, il n'est guère possible de raccourcir les délais. Les deux voies déjà évoquées que nous explorons pour limiter ce problème sont :

- L'élaboration et la diffusion de cartes actualisées par pixel, de conseil en chaulage et en fumure

de correction en phosphore. Ce travail sera utile sous réserve d'une variabilité intra pixel limitée des conseils. Dans ce cas, le conseil prédictif sera rectifié à moyen terme en fonction du résultat de l'analyse.

- La mise en œuvre d'analyses précoces, un an avant la replantation, partout où cela sera possible. Le prélèvement peut être réalisé dès l'avant dernière coupe achevée et avant la mise en place de la fertilisation d'entretien.

## La Compréhension du Conseil

La rédaction des bulletins n'est pas toujours formulée dans des termes compréhensibles par les agriculteurs. Il apparaît notamment, sans qu'on ne puisse généraliser dans ces propos, que :

- De nombreux agriculteurs ne comprennent pas le sens des explications concernant les éléments nutritifs et les principaux défauts du sol, mais le plan de fumure, qui fait référence directement aux formulations d'engrais commercialisés est beaucoup mieux compris.
- Certains agriculteurs ne maîtrisent pas bien le concept de formulation des engrais (unités). Ainsi, suite à la réception du bulletin, ils auront tendance à utiliser n'importe quel engrais ternaire à la dose conseillée et par forcément l'engrais conseillé.

Nous envisageons de faire figurer désormais sur le bulletin les coordonnées du technicien qui a fait le prélèvement, en proposant à l'agriculteur de le contacter pour information.

## La Cohérence du Conseil

Si l'on fait exception du conseil en chaulage techniquement justifié mais économiquement inapplicable lorsque le sol est très acide (page 50), les conseils issus du programme expert peuvent être qualifiés de cohérents. Aucune anomalie n'a en effet été enregistrée depuis sa mise en œuvre. Quelques 4.300 analyses portant sur les quatre cultures traitées par le système et les sols, ont été contrôlées avec succès et envoyées aux agriculteurs depuis 1991 (Tableau 51).

Tableau 51 : Analyses effectuées par le laboratoire depuis 1991

Nature	Nombre	Pourcentage
Canne à Sucre	2.390	55,8
Divers (sol, maraîchage, fruitiers...)	1.223	28,7
Fourrage intensif	500	11,7
Fourrage semi intensif	72	1,7
Ananas	78	1,8
Bananier	18	0,4

## La Diffusion du Logiciel

L'utilisation du logiciel à l'extérieur de La Réunion impose des modifications, parmi lesquelles :

1. L'adaptation aux types de sol de l'environnement où il doit être utilisé.
2. L'adaptation aux techniques d'analyses locales.
3. L'insertion dans le logiciel des nouvelles normes de diagnostic adaptées à ces sols et ces méthodes d'analyse.

Ce travail d'adaptation au sols et aux méthodes de dosage n'est pas à priori insurmontables dans la mesure où il existe déjà des normes 'manuelles' d'interprétations des résultats d'analyse et que des résultats d'essais permettent de caler les conseils

Par contre, l'adaptation du logiciel ainsi d'ailleurs que la poursuite de son développement nécessitent une réécriture. Le programme est en effet écrit sous FOX-PRO ®, version 2.6, qui constitue la dernière version sous DOS ®. Microsoft ® ne développe plus désormais que des versions orientées objet (Visual Foxpro 3.0 ®) sous Windows ®. Une écriture du programme sous ce langage ou toute autre plate-forme Xbase Windows ® devrait être envisagée afin de l'adapter aux environnements informatiques actuels.

Compte tenu de la taille croissante de la base de données, on peut également penser à utiliser un SGBD plus puissant de type Oracle ®.

## BIBLIOGRAPHIE

- AGRESTE, 1994. La Statistique Agricole. Annuaire de Statistique Agricole. Réunion, année 1993. Ministère de l'agriculture et de la pêche, 60 p.
- Albertelli, C., 1987. Comparaison de tests de chaulage et étude des caractéristiques d'andosols acides à La Réunion. IRAT/CIRAD Réunion, Service d'agronomie, ISTOM, Juillet-août 1987. 69 p.
- Angé, A., 1974. Plaine des Palmistes. Etude morphopédologique. Cartes au 1/25 000. IRAT, 65 p.
- Anonyme, 1987. Alimentation Minérale et Fertilisation. In Banane Information N° 45, Spécial Technique. Guadeloupe, SICA ASSOBAG, p 19-32.
- Bertrand, R., 1972. Compte rendu provisoire de mission pédologique. IRAT n° 52, 32 p.
- Biggs, J.S., Vallis, I., Korot, S. & Keating, B.A., 1996. Effects of depth of urea application on loss of nitrogen by volatilisation from acid soils. ? In *Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production*. Wilson JR, Hogarth DM, Campbell JA & Garside AL (Edts). CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, pp. 198-199.
- Blanfort, V., Thomas, P., 1997. Gestion raisonnée des prairies en intégration avec l'environnement. Bilan de deux années de suivi en exploitations. CIRAD, AFP, Région Réunion. CIRAD Réunion, 18 p.
- Bouffin J. & Ducelier, D., juin 1987. Note technique. La culture de l'ananas Victoria pour l'exportation à la Réunion. CIRAD - IRFA. St Pierre. 11 p.
- Bourgade, J., 1986. L'Alimentation Minérale du Bananier. IN Banane Information N° 42, 1er Trimestre 1986. SICA ASSOBAG, Guadeloupe. P. 34-39.
- Brouwers, M., 1973. Anjouan, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales (Archipel des Comores). Paris, Rapport IRAT, 3 fasc., rapport 101 p., annexes 336 p., 8 cartes.
- Brouwers, M., Raunet, M., 1981. Inventaire morphopédologique dans les hauts de la Réunion. Aptitude agricole des terres. IRAT, DDA Réunion. Cartes au 1/25.000.
- Brouwers, M., 1982. Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de Saint Paul. Aptitude à la canne à sucre. IRAT, DDA Réunion. Cartes au 1/25.000.
- Brouwers, M., 1984. Reconnaissance pédologique de la zone de moyenne altitude de la Saline à Saint Leu. IRAT, DDA Réunion. Cartes au 1/25.000.
- CA, 1983. Fertilité chimique et fertilisation. Programme d'agronomie. Chambre d'Agriculture de l'Ain et de la Saône et Loire. Polycop, 92 p.
- Cabidoche Y-M, 1989. Problèmes soulevés par la caractérisation, à l'échelle de la parcelle, du statut cationique des sols ferrallitiques de Guadeloupe. In 25<sup>e</sup> congrès de la Société Caraïbe des plantes alimentaires. Gosier, 2-8 juillet 89, INRA Centre Antilles-Guyane. 11 p., 4 tab., Figures.
- Calcino D.V. & Burgess D.J., 1995. Effect of urea placement on crop cycle yields of green trash blanketed sugarcane ratoons. Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists Conference. 17, pp. 193-198.
- Campbell C.A., Myers R.J., Catchpool, V.R., Vallis, I., Weier K.L., 1984. Laboratory study of transformation and recovery of urea-nitrogen in three Queensland soils. Australian Journal of Soil Research. 22, pp. 433-441.
- Chabalier, P-F., juillet 1982. Fertilisation NPK. Document destiné aux élèves de l'IAB. IDESS/DCV. Côte d'Ivoire, Institut Agricole de Bouaké. 78 p. + 25 p. Annexes.
- Chabalier P-F., Helmann, M., Pichot J., 1984. Nutrition de la Canne à Sucre dans plusieurs écologies de La Réunion : Différents comportements de quelques variétés. 8<sup>e</sup> Congrès S.T.A.S.M., Revue Sucrière de l'île Maurice. Vol 63, Nos 2 & 3, Mai-Dec 1984, p 178-186.
- Chabalier, P-F. & Gaudy F., 1988. Influence de la Fertilité du Sol et de la Fertilisation NPK sur les Rendements et la Nutrition NPK de la Canne à Sucre. Association Réunionnaise pour le Développement de la Technologie Agricole et Sucrière. 3<sup>e</sup> Congrès International, du 16 au 23 octobre 1988. P 368-382.
- Chabalier, P-F, 1988. Schéma de fumure sur canne. Association Réunionnaise pour le Développement de la Technologie Agricole et Sucrière. 3<sup>e</sup> Congrès International, du 16 au 23 octobre 1988. P 162-168.
- Chabalier, P-F., 1989. Organisation et Impact du Conseil en Fertilisation. L'exemple du CIRAD à la Réunion. Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier. 12-15 septembre 1989. Edt IRAT Montpellier 1990. P 439-451.
- Chabalier, P-F., Gaudy, F., 1990. Influence de la fertilité du sol et de la fertilisation NPK sur les rendements et la nutrition de la canne à sucre. L'agronomie Tropicale 1990, 45-3 P. 233-238.
- Chabalier P-F. & Legier P., 1992. Synthèse Cartographique de la Fertilité des Sols de La Réunion. L'agronomie Tropicale, 1992, 41-6. P 65-71.

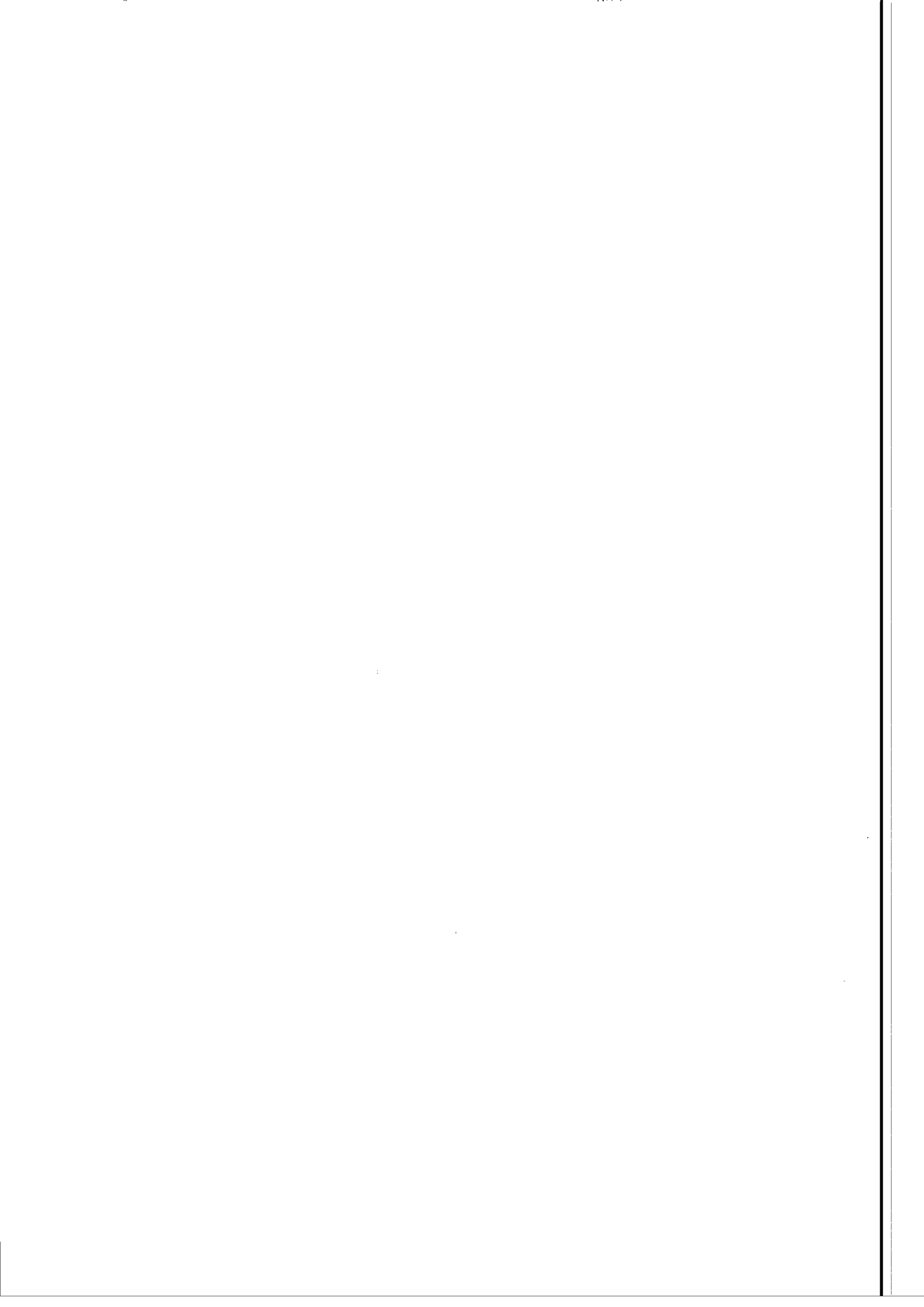
- Chabalier, P-F., Août 1995. Le Point sur les diagnostics nutritionnels de la canne à sucre. Utilisation du DRIS. Doc. CIRAD Réunion, 7p., annexes 12 p.
- Chaminade, R., 1960. Expérimentation en vase de végétation. *Agronomie Tropicale*, 2, p. 265-269.
- Chapmans, L. S., Hayson, M. B., & Saffigna, P. G., 1994. The recovery of  $^{15}\text{N}$  from labelled urea fertilizer in crop component of sugarcane and in soil profiles. *Australian Journal of Agricultural Research*. 45, pp. 1577-1585.
- Chapmans, L.S., 1996. Splitting N fertilizer application – Does it increase production efficiency of sugarcane?. In. *Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production*. Wilson JR, Hogarth DM, Campbell JA & Garside AL (Edts). CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, pp. 194-197.
- Checkouri I., 1990. Appréciation du pouvoir minéralisateur des sols réunionnais par différentes méthodes chimiques et biologiques. Rapport de maîtrise. Univ. De Perpignan. CIRAD Réunion, 40 p. + annexes.
- Chenet, 1962. Fumure de la canne à sucre à la Réunion. *L'agronomie tropicale*, Juillet-Août 1962, N° 7 & 8, P 681-684.
- CIRAD, Août 1995. Fertilisation Canne à Sucre. Conseil par micro-zone. Service d'Agronomie CIRAD, Station de La Bretagne, La Réunion. 50 p.
- CIRAD-IRAT, 1986. Le plan de fumure. Fiche N° 310, Dossier Fertilisation, Canne Progrès La Réunion. Opération de vulgarisation agricole de l'Association Réunionnaise pour la Modernisation de l'Economie Sucrière (ARMES).
- CIRAD, EDE, SICA-LAIT, SIER, Avril 1988. Fiche N°1, Fertilisation des prairies, 2 p.
- CIRAD, EDE, SICA-LAIT, SIER, Avril 1988. Fiche N°2, Niveau de production intensif. Plan de Fumure des prairies, 2p.
- CIRAD, EDE, SICA-LAIT, SIER, Avril 1988. Fiche N°3, Niveau de production semi-intensif. Plan de Fumure des prairies, 2 p.
- CIRAD, EDE, SICA-LAIT, SIER, Avril 1988. Fiche N°4, Fumure de correction des prairies, 2 p.
- Clarion A., 1991. Lutte contre la compaction en culture de canne à sucre à l'île de La Réunion. Caractérisation de l'espace poral du sol. Incidences agronomiques. CEEMAT Réunion. Laboratoire de physique des sols. Doc. CIRAD-CEEMAT Réunion 26 p.
- CSR, UH, NCSU, 1986. Tropsoils. An expert system to determine lime requirements for soils of the humid tropics. Centre for Soils Research, Bogor, Indonesia. University of Hawai and North Carolina State University. Version ACID3B, 19 p.
- Descuns, C., 1992. Valorisation Agronomique et Cartographique de la Base d'Analyses de Sol de La Réunion. CIRAD ENITA, mémoire de fin d'étude. CIRAD Réunion. Saint Denis. 36 p., 13 annexes.
- Dessert, M., 1980. Engrais et plan de fumure. In *Banane Information*, N° 21, oct.nov.dec. Guadeloupe. SICA ASSO BAG, p. 29-30.
- Didier de Saint Amand, D., 1965. Etude pédologique de la plaine des galets. Champ Borne, Bra Panon, Etang Salé à Saint Leu, Bras de la plaine. IRAT, GR. Cartes au 1/10 000.
- Dos Santos, M. A. C., De Sobral, A. F., Pinto Medeiros, A., 1980. Effect of liming on the production of sugarcane and on the fertility of the soil in the state of Pernambuco. *ISSCT - Proc Manila, T1 Agronomy*, p 233-243.
- Drouin, G. Avril 1988. Fumure potassique des prairies : le fractionnement a le vent en poupe. *Cultivar 2000*, N° 230, p48-50.
- Du Hamel de Milly, A., 1981. Etude de la variété Salpan 17 de *Saccharum officinarum* (L.) pour expliquer ses chutes de rendement. DAA ENSAM Laboratoire d'agronomie de l'IRAT Réunion. Polycop. 34 p + annexes 28 p.
- Duru, M., 1992. Diagnostic de la nutrition minérale des prairies permanentes au printemps. II, Validation de références. *Agronomie*, 12, 345-357.
- Fallavier, P., 1995. Physico-chimie des sols tropicaux acides. Séminaire 'Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. 13-17 novembre 1995, Montpellier, France. CIRAD, Ministère de la Coopération. Thème 1, Milieux et utilisations agricoles. P. 9-25.
- Frenay, J.R., Denmead, O.T., Wood, A.W., Saffigna, P.G., Chapman, L.S., Ham G.J., Hurney A. P. & Steward R.L., 1992. Factors controlling ammonia loss from trash covered sugarcane fields fertilized with urea. *Fertilizer Research. Kluwer Academic Publisher*. 31 : 341-349.
- Fritz, J., 1967. Recherche des carences minérales des sols de La Réunion en vases de végétation. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), 19-25 novembre 1967. Tome 1. 381-390.
- Fritz, J., 1971. Fertilisation de la canne à sucre à la Réunion. *Fertilité* N° 39 – Novembre Décembre 1971. p. 17-32.
- Fritz J., 1973. Dynamique de l'azote minérale dans le sol en deux situations de La Réunion. IRAT Réunion. Nov 1973. 81 p.
- Gros, A., 1979. Engrais, Guide pratique de la fertilisation. La Maison Rustique, Paris. Septième édition, 382 p. pp 146-148.
- Halais, P., 1951. Foliar diagnosis, a new guide to fertilization of sugarcane in Mauritius. *Proceeding ISSCT*. 7 congress, Brisbane, 1950. p 218-232.
- Halais P., 1967. Normes du diagnostic foliaire pour les repousses de canne à sucre récoltables annuellement en

- région tropicales. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive (Madagascar), 19-25 novembre 1967. Tome 1. 169-180.
- Hetherington, S., J., Asher, C., J. & Blamey, F., P., C., 1988. Comparative Tolerance of Sugar Cane, Navybean, Soybean and Maize to aluminium toxicity. *Aust. J. Agric. Res.*, 1988, 38, 171-176.
- Hubert De Fraisse, C., 1978. Influence du chaulage sur une plantation de canne à sucre. *Franche terre* 1978, Essai N° 2. IRAT Réunion, Fiche d'essai N° 52, octobre 1978, 6 p.
- IGN, 1993. Institut Géographique National, Paris. COREU, Logiciel de coordonnées cartographiques de La Réunion, V1.00, 09/12/93.
- IRFA Réunion, Chambre d'Agriculture Réunion, mai 1992. La culture des ananas à l'île de la Réunion. In *Fiches Techniques des Cultures Fruitières à la Réunion*. IRFA Réunion, Station de bassin martin 97455 St Pierre. Fiche technique, 8 p
- IRFA Réunion, Chambre d'Agriculture Réunion, août 1992. La culture du bananier à l'île de la Réunion. In *Fiches Techniques des Cultures Fruitières à la Réunion*. IRFA Réunion, Station de bassin martin 97455 St Pierre. Fiche technique, 14 p.
- Kamprath, E; J., 1967. Soil acidity and response to liming. *Rech. Bull. 4 International Soil Testing Series.*, Univ. Agri. Exp. Sta. Raleigh .USA, North Carolina.
- Keating, B.A., Vallis I., Hughes, M. & Ridge D.R., 1993. Strategic directions for nitrogen research. A view from the south. *Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists Conference.* , 15, pp. 276-284.
- LAPRA, sd. Seuils d'interprétation des analyses de sol pour la canne à sucre et le bananier. Documentation interne du Laboratoire Professionnel Régional d'Analyses du SUAD de la chambre d'agriculture de Guadeloupe. 23 p.
- Latrille, E., 1975. Grande Comore, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales (Archipel des Comores). Paris, rapport IRAT 3 fasc., rapport 308 p.. Annexe 545 p., 2 cartes.
- Latrille, E., 1977. Mohéli, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales (Archipel des Comores). Paris, rapport IRAT 3 fasc., rapport 208 p.. Annexe 178 p., 2 cartes.
- Latrille, E., 1981. Mayotte, inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales. Exploitation agronomique de la carte de l'inventaire des terres cultivables. Conclusions générales. Paris, 3 rapports IRAT de 96, 82 et 39 p, 2 cartes.
- Leleux, A., Arousseau, P., Roudaut, A., 1988. Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre . *Science du sol*, vol. 26 (1), pp 29-39.
- Loué, A., 1993. Oligo-éléments en agriculture. Edition élargie aux cultures tropicales. Edt. SCPA, NATHAN. ISBN 2-09-176828-1. France, 577 p.
- Lyonnaz-Peroux, B., Septembre 1982. Influence des facteurs édaphiques et climatiques sur la croissance de la canne à sucre. Comparaison en parcelle industrielle et en essai variétal, de la variété S17 à quelques variétés réunionnaises récentes. DAA CNEARC Montpellier, ENSSAA Dijon. Laboratoire d'agronomie IRAT Réunion. Plycop. 48 p. + annexes 34 p.
- Martin-Prével P. & Charpentier J.-M., 1963. Culture sur milieu artificiel. Symptômes de carences en six éléments minéraux chez le bananier. In : *Fruits*, Vol. 18, N° 5, 1963. p. 221-247.
- Meyer J.H., Wood R.R., Liebbrandt N.B., 1986. Recent advances in determining the N requirement of sugarcane in South Africa Industry. *Proceeding S. Af. Sug. Tech. Ass.* 60, pp. 205-211.
- Ng Kee Kwong, K., F., Ross, L., Cavalot, C., 1980. Liming soils under sugarcane in Mauritius. *ISSCT, Proc 17 Congres, Manilla, T1, Agronomy.* P 244-252.
- Ng Kee Kwong K.F. & Deville J., 1987. Résidual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane in Mauritius. *Martinus Nijhoff publisher, The Netherlands. Fertilizer Research*, 14, pp. 219-226.
- Ng Kee Kwong K.F. & Deville J., 1992. Nitrogen fertilizer use by sugarcane ratoon crops in Mauritius. *ISSCT Proc. 21 Congres, Bangkok Thailand, 5-14 March 1992, Vol 2*, pp. 42-55.
- Ng Kee Kwong, R.K.F., 1995. L'engrais azoté à travers le goutte à goutte. *Recherche sucrière, PROSI*. Janvier 1995, N° 312, pp. 26-28.
- Perret, S., 1989. Caractéristiques physiques et mécaniques des sols andiques de l'île de La Réunion. *CEEMAT Réunion. Laboratoire de physique des sols. Doc CEEMAT Réunion*, 13 p.
- Perret, S., 1993. Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. *Facteurs d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques*. Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, ENSAM. Thèse. Génie Génétique et Mécanisation. CIRAD-SAR, Montpellier. Num. 01/93. Janvier 1993. 279 p. et annexes 34p.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 années de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, Ministère de la Coopération et du Développement. IRAT-CIRAD. 444 p.
- Pouzet, D., 1996. Mission en Guadeloupe du 5/6 au 15/6/96. CIRAD-CA CAS/FCM, Saint Denis le 30 Août 1996. Doc CIRAD Réunion 14 p.



- Quemener, J., 1985. L'interprétation des analyses. Cultivar, Dossier analyse, juin 1985, N° 184. p 107-117.
- Raunet, M., 1986. Morphopédologie et aptitude à la mise en valeur des périmètres de Saint Gilles et de Saint Leu. Cartes au 1/5000 et cartes de reconnaissance de la zone ouest au 1/25.000.
- Raunet, M., 1988. Carte morphopédologique au 1/50.000 de l'île de La Réunion. CIRAD-IRAT, Département de La Réunion. 4 feuilles.
- Raunet, M., 1989. Carte morphopédologique au 1/250000 de l'île de La Réunion. IRAT.
- Raunet, M., 1990. Les grandes catégories de sol de l'île de La Réunion. Notice de la carte morphopédologique à l'échelle du 1/50.000. CIRAD-IRAT, Conseil Régional, FIDAR. 17 p.
- Raunet, M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. 438 p., 4 cartes couleur au 1/50000.
- Remy J-C., & Martin-Lafliche A, 1973. L'analyse de terre : Réalisation d'un programme d'interprétation automatique. INRA, Station agronomique de l'Aisne, 02011, Laon. 19 p.
- Riquier, J., 1960. Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/10.000. ORSTOM, IRSM, Pédologie. Tananarive, 72 p.
- Riquier, J., Zebrowsky, C., 1975. Pédologie. Atlas de La Réunion. CGET et IGN.
- Roche, P., Grière, L., Calba, H., Fallavier, P., 1978. La carence en phosphore des sols intertropicaux et ses méthodes d'appréciation : premières conclusions. 11<sup>ième</sup> congrès ISSS. 1,24.
- Roche, P., Grière, L., Babre, D., Calba, H., Fallavier, P., 1980. Le phosphore dans les sols intertropicaux : appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore. IMPHOS, GERDAT, Paris. 48 p.
- Salette, J., Huche, L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par analyse du végétal : principes, mise en œuvre, exemples. Fourrages, 125, 3-18.
- SCPA, 1981. Pratique de la Fertilisation Raisonnée. Grande culture et prairie. Société commerciale des potasses et de l'azote, Mulhouse. 25 p.
- Snoeck, D., Snoeck, J., 1988. Programme informatisé pour la détermination des besoins en engrais minéraux pour les caféiers arabica et robusta à partir des analyses du sol. Café, Cacao, Thé, vol. XXXII, n°3, Juil.-sept.1988. p 201 - 212.
- Snoeck, J., Jardin, P., 1990. Mode de calcul pour l'étude de la fertilisation minérale des caféiers basée sur l'analyse du sol. Café, Cacao, Thé, vol. XXXIV, n°1, Janv.-mars 1990. p 3 - 21.
- Soubiès, L., Cadet, R., Lemain, M., 1955. Recherches sur l'évolution de l'urée dans les sols et sur son utilisation comme engrais azoté. INRA Paris. Annales Agronomiques, N°6, 1955, p. 997-1033.
- STIPA, 1982. Notice pour l'entrée des descriptions et d'analyses de sol en banque de données. Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique STIPA, 2<sup>e</sup> édition, 1982. INRA, IRAT, 125p. Annexes.
- Takahashi, D.T., 1968. Fate of ammonium and nitrate fertilizers in lysimeter studies with <sup>15</sup>N. Experiment Station, Hawaiian sugar planters'association. Hawaiian Planters'record, Vol 58, N°, 11 p.
- Truong binh, Bertrand, R., Burdin, S., Pichot, J., 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, Vol. XXIX, N° 6-7, Juin-juillet 1974. 1-12.
- Tsai C.S., Fang, Y.T., Chen, Y.Y., Chen C.F., 1992. Fertigation with urea solution of sugarcane in clay soil. ISSCT Proc. 21 Congres, Bangkok Thailand, 5-14 March 1992, Vol 2, pp. 56-66.
- Vallis, I., Catchpool V.R., Hughes, R.M., Myers R.J., & Weier, K.L., 1996. Recovery in crops and soils of <sup>15</sup>N applied as sub-surface bands of urea to sugarcane. Australian Journal of Agricultural Research. 47, pp. 355-370.
- Wood, A.W., Saffigna, P.G., Prammanee, P. & Freney, J.R., 1989. Loss of nitrogen from urea applied to sugarcane trash in North Queensland. ISSCT Proc. 20 Congs ; Sao Paulo, Brasil. Vol 2, Agronomy, pp. 481-488

## **ANNEXES**



# I. Méthodes d'Analyse du Laboratoire CIRAD/Réunion

## Analyses chimiques des sols

Humidité pondérale : séchage étuve 105 C

pH eau (NF X31-103), pHKCl (NF X31-104), pHNaF

Mesure électrométrique au pH-mètre sur extrait 1/2,5 (M/V)

**Azote total** (NF X31-111) : minéralisation Kjeldahl, dosage en flux continu (Berthelot modifiée)

**C organique** (NF X31-109, méthode Anne) : oxydation sulfochromique, titrimétrie automatique

**P assimilable** (NF X31-116, Olsen-Dabin modifiée) : extraction du phosphore soluble, dosage en flux continu du complexe phospho-molybdique

**P total** : extraction par attaque perchlorique, dosage en flux continu du complexe phosphomolybdique

**CEC et cations échangeables** (NF X31-130) : extraction par l'hexamine-cobalt chlorure, spectrométrie d'absorption atomique pour Ca, Mg, Co, spectrométrie d'émission pour K et Na

**Oligo-éléments** (NF X31-121) : extraction DTPA, spectrométrie d'absorption atomique pour Fe, Mn, Zn, Cu

**Conductivité électrique** (NF X31-113) : mesure conductrimétrique sur extrait 1/5 (M/M)

**Cl** : extrait 1/5 (M/M), dosage en flux continu du complexe thiocyanate ferrique

**B** (NF X31-122) : extraction à l'eau bNonllante, dosage en flux continu à l'azométhine H

**Calcaire actif** (NF X31-106) : extraction à l'oxalate d'ammonium, titrimétrie

## Analyses physiques des sols

**Granulométrie** (NF X31-107, modifications CIRAD pour les andosols) : tamisage, sédimentométrie

## Analyses de plantes

(Sources : CIRAD-GERDAT, Montpellier)

### Préparation des échantillons

Séchage des échantillons bruts en étuve ventilée à 75 C, broyage à 1 mm

### Éléments minéraux

Minéralisation voie sèche à 550 C

Dosage en flux continu de P

Spectrométrie d'absorption atomique pour Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu

Spectrométrie d'émission pour K, Na

**N** : minéralisation Kjeldahl, dosage en flux continu (Berthelot modifiée)

**S** : minéralisation voie sèche spécifique à 520 C, dosage en flux continu (néphélométrie)

**Cl** : (Institut expérimental du tabac de Bergerac) : minéralisation voie sèche spécifique à 430 C, dosage en flux continu.

**B** : minéralisation voie sèche spécifique à 520 C, dosage en flux continu

**SiO<sub>2</sub>** : extraction par HF+HCl, dosage en flux continu du complexe silici-molybdique, ou minéralisation avec élimination de la silice, gravimétrie

## Amendements organiques

**Dénominations et spécifications** : NF U44-051

**Préparation des échantillons** : NF U44-110

**Matière sèche** (NF U44-171) : séchage jusqu'à masse constante à l'étuve à 105 C

**pH eau** : mesure électrométrique au pH-mètre

**Matière organique** (NF U44-160) : méthode par calcination à 480 C, gravimétrie

**N** : minéralisation Kjeldahl, dosage en flux continu (Berthelot modifiée).

**P, K, Ca, Mg, oligo-éléments** : minéralisation voie sèche à 550 C, dosage en flux continu pour P, spectrométrie d'absorption atomique pour Ca, Mg et oligo-éléments, spectrométrie d'émission pour K et Na

## Amendements calco-magnésiens

**Déterminations et spécifications** : NF U44-001

**Préparation des échantillons** : broyage à 0,5 mm

**CaO total, MgO total** (NF U44-140) : attaque chlorhydrique, spectrométrie d'absorption atomique

Valeur neutralisante (NF U44-173) : solubilisation en milieu HCl, titrimétrie

### Supports de cultures

Dénominations et spécifications : NF U44-551

Matière sèche (NF U44-171) : séchage jusqu'à masse constante à l'étuve à 105 C

Capacité de rétention en eau (NF U44-175) : ressuyage à pF 1, gravimétrie

Conductivité (NF U44-172) : mesure conductimétrique sur l'extrait 1/1,5 (V/V)

pH (NF U 44-172) : mesure électrométrique sur l'extrait 1/1,5 (V/V)

Anions, cations : dosages sur l'extrait 1/1,5 (V/V)

### Analyses d'eau et de solutions nutritives

Anions, cations : dosage de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ , P, K, Ca, Mg, Na, Cl,  $\text{SO}_4$ , Fe, Mn, Zn, Cu en flux continu ou absorption atomique

pH (NF T90-008) : mesure électrométrique

Conductivité (NF T90-031) : mesure conductimétrique

Alcalinité (NF T90-036) : titrimétrie

Quantité pour pH 5,6 : titrimétrie

Matières en suspension (NF T90-105) : gravimétrie

DCO/DBO (NF T90-101/NF T90-103) : oxydo-réduction, titrimétrie

Dureté totale (NF T90-003) : spectrométrie d'absorption atomique de Ca et Mg

### Qualité fermentaire des ensilages

(Sources : BIPEA, Recueil méthodologique ; INRA, Theix [Dulphy, Demarquilly])

Matière sèche : étuve ventilée 80 C

Azote total : minéralisation Kjeldahl, colorimétrie en flux continu (Berthelot modifiée)

pH : pH-métrie sur jus centrifugé

Azote soluble : minéralisation Kjeldahl, colorimétrie en flux continu (Berthelot modifiée)

Azote ammoniacal : colorimétrie en flux continu avec dialyse sur jus (Berthelot modifiée)

Acide lactique : méthode enzymatique de Noll (1974)

Acide gras volatils : acétique, propionique, isobutyrique, butyrique, isovalérique et valérique : dosage sur jus stabilisé par chromatographie en phase gazeuse

Alcools : méthanol, éthanol, propanol et butanol : dosage sur jus stabilisé par chromatographie en phase gazeuse

### Valeurs alimentaires des fourrages

(Sources CIRAD-EMVT, INRA)

Cellulose brute : méthode de Weende : double attaque acide puis alcaline, gravimétrie (FIBERTEC).

NDF,ADF,ADL : méthode S. GIGER REVERDIN : attaques successives par détergents neutres puis acides, gravimétrie (FIBERTEC).

Digestibilité à la pepsine cellulase : méthode HCl 0,1N (Aufrère, 1982) : digestion des fourrages par voie enzymatique, gravimétrie.

Glucides solubles : extraction à l'eau chaude, oxydo-réduction des sucres réducteurs.

Amidon : méthode Edwards modifiée INRA : dispersion alcaline, hydrolyse par amyloglucosidase, dosage enzymatique du glucose.

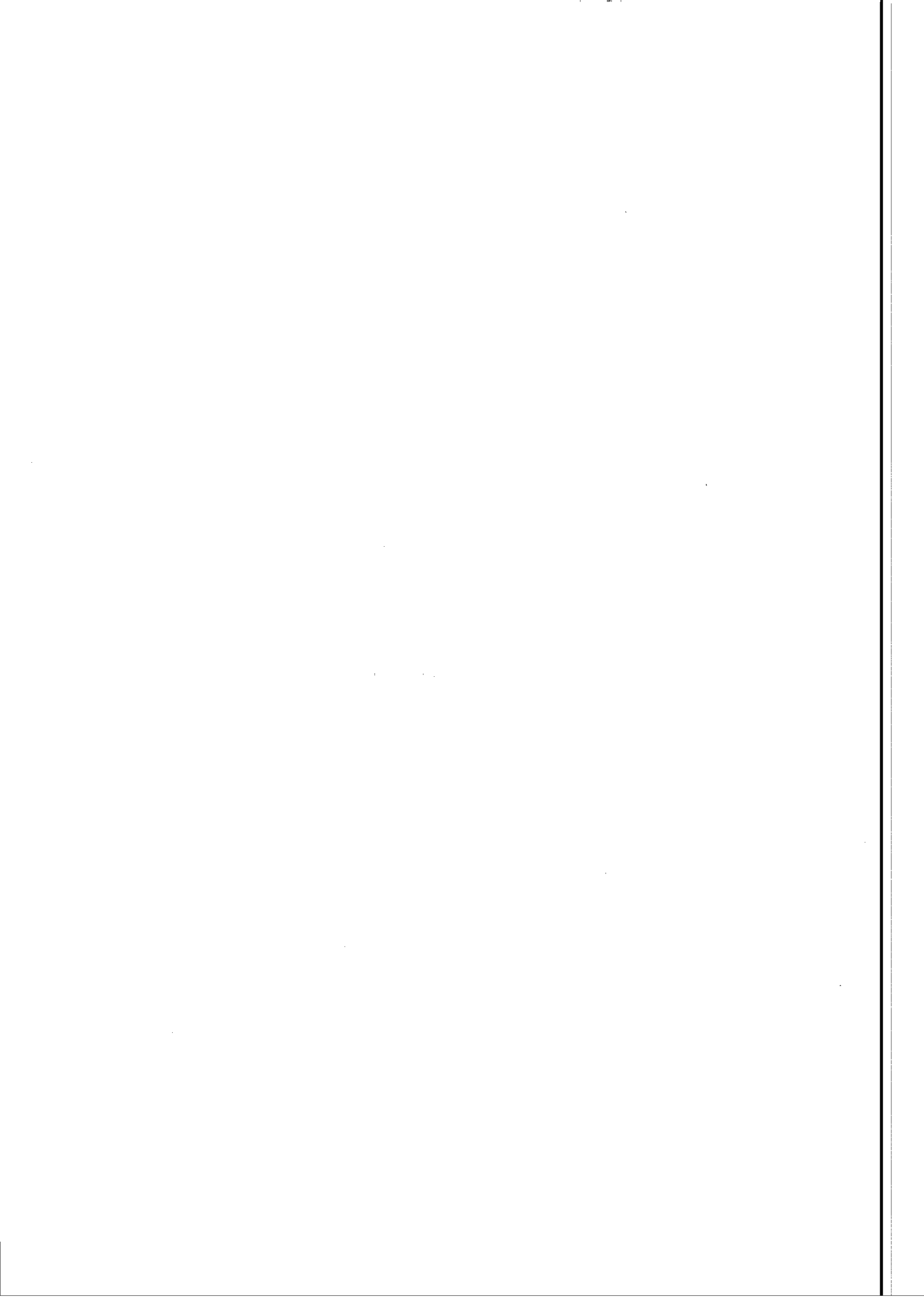


## II. Limites Supérieures des Variables de Fertilité

Des limites supérieures ont été imposées aux variables dans le programme, afin de contrôler les résultats analytiques (Tableau 52).

Tableau 52 : Limites supérieures des variables utilisées pour l'interprétation graphique des analyses.

VARIABLE	SOL					
	Ferrallitique	Vertique	Brun	Brun Andique	Andique n p.	Andique perh.
PH	7,5	8	8	8	7	7
N	6	5	5	8	15	18
C	6	5	5	10	18	25
C/N	25	25	25	25	25	25
Ca	15	30	20	15	15	18
Mg	8	15	10	8	8	9
K	2	5	3	3	3	2
CEC	25	50	30	30	25	25
Tx Saturation	100	110	110	110	110	110
K%CEC	10	10	10	10	10	10
Mg/Ca	3	3	3	3	3	3
P Assimilable	600	600	600	900	900	900
P Total	4700	4700	4700	8600	8600	8600
Fe	200	200	200	200	200	200
Mn	100	100	100	100	100	100
Zn	15	15	15	15	15	15
Cu	40	40	40	40	40	40



### III. Conseils en Chaulage (canne, fourrages et bananier).

Tableau 53 : Localisation des phrases définissant le conseil en amendement calco-magnésien.

DIAGNOSTICS		ACIDITÉ						
		Très Acide	Acide	Peu Acide	Normal	Basique	Anormal 1	Anormal 2
FERTILITÉ MG	Très Carencé	1	4	7	10	13	31	34
	Carencé	2	5	8	11	14	32	35
	Faible	3	6	9	12	15	33	36
	Normal	16	19	22	25	28		
	Riche	17	20	23	26	29		
	Très Riche	18	21	24	27	30		

1. Votre sol est très acide et très carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #
2. Votre sol est très acide et carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #
3. Votre sol est très acide et déficient en magnésium. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #
4. Votre sol est acide et très carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée : #
5. Votre sol est acide et carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée : #
6. Votre sol est acide et légèrement déficient en magnésium. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée : #
7. Votre sol est légèrement acide et très carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne riche en Mg (30 à 40 % de MgO) est recommandé. Dose préconisée : #
8. Idem 7.
9. Votre sol est légèrement acide et légèrement carencé en magnésium. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée : #
10. Votre sol a un pH correct, mais il est très carencé en magnésium. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésiérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #
11. Votre sol a un pH correct, mais il est carencé en magnésium. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésiérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #
12. Votre sol a un pH correct avec une légère déficience en magnésium. Pensez, sur cultures exigeantes, à effectuer des apports d'entretien en Mg. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
13. Votre sol est basique mais très carencé en magnésium. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésiérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
14. Votre sol est basique mais carencé en magnésium. Effectuez une correction avec un sel magnésien (kiésiérite, sulfate de Mg). Dose préconisée : #. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
15. Votre sol est basique et légèrement déficient en magnésium. Pensez, sur cultures exigeantes, à effectuer des apports d'entretien en Mg. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant. Surveillez l'évolution des teneurs par des analyses régulières.
16. Votre sol est très acide. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : # ou, si # < 3 t/ha : un apport de chaux magnésienne est indispensable.
17. Votre sol est très acide bien que relativement riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : #
18. Votre sol est très acide bien que très riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : #
19. Votre sol est acide. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée : #, ou si # < 3 t/ha : un apport de chaux magnésienne est indispensable.
20. Votre sol est acide bien que relativement riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée #.
21. Votre sol est acide bien que très riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux est indispensable. Dose préconisée #.
22. Votre sol est légèrement acide. Un amendement d'entretien d'environ 500 kg/ha de chaux magnésienne tous les 3 ans serait souhaitable.

23. *Votre sol est légèrement acide, mais relativement riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux serait souhaitable. Dose préconisée #.*
24. *Votre sol est légèrement acide, mais très riche en magnésium. Un apport de chaux ou de carbonate de chaux serait souhaitable. Dose préconisée #.*
25. *Votre sol a un pH correct et il est normalement pourvu en magnésium. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.*
26. *Votre sol a un pH correct et il est relativement riche en magnésium. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.*
27. *Votre sol a un pH correct et il est très riche en magnésium. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant.*
28. *Votre sol est basique. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant. Éviter la culture de plantes acidophiles.*
29. *Votre sol est basique et relativement riche en magnésium. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant. Évitez la culture de plantes acidophiles.*
30. *Votre sol est basique et relativement riche en magnésium. Déséquilibres possibles avec calcium et avec potasse. Pas de correction particulière à envisager pour l'instant. Évitez la culture de plantes acidophiles.*
31. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium très faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants. Un apport de chaux magnésienne riche en Mg (30 à 40 % de MgO) est recommandé. Dose préconisée : #*
32. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants. Un apport de chaux magnésienne riche en Mg (30 à 40 % de MgO) est recommandé. Dose préconisée : #*
33. *Votre sol est très acide malgré une teneur en calcium correcte, mais avec une teneur en magnésium un peu faible. Cas anormal de pH faible pouvant être dû à l'utilisation massive d'engrais solubles acidifiants. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée #.*
34. *Votre sol a un pH correct malgré des teneurs en calcium et en magnésium très faibles. (1) Si il s'agit d'un andosol : cas fréquent dans les andosol sinon (2) cas anormal. Ce sol est désaturé en base et présente des risques de carence en Ca et en Mg. Un apport de chaux magnésienne est indispensable. Dose préconisée #.*
35. *Votre sol a un pH correct malgré des teneurs en calcium et en magnésium plutôt faibles. (1) Si il s'agit d'un andosol : cas fréquent dans les andosol sinon (2) cas anormal. Ce sol est désaturé en base et présente des risques de carence en Ca et en Mg. Un apport de chaux magnésienne serait souhaitable. Dose préconisée #.*
36. *Idem 35.*

## IV. Détail des Conseils en NPK

### Fertilisation Phosphatée

Les conseils correspondant à la fertilisation phosphatée sont numérotés dans le Tableau 54 et énumérés à la suite.

Tableau 54 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation phosphatée

DIAGNOSTICS		P assimilable				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
P total	Très Faible	1	3	4		
	Faible			5		
	Moyen			5		
	Fort	2				
	Très Fort					6

### Amendement (canne, fourrage, bananier)

1. *Votre sol est très carencé en phosphore. Une fumure de correction à la plantation est indispensable. Dose préconisée # kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.*

### Entretien (canne)

2. *La teneur en phosphore assimilable est anormalement faible par rapport à la teneur en phosphore total. Vérifier la nutrition de la plante en phosphore avant d'effectuer une correction avec un phosphate soluble.*

3. *Votre sol est légèrement déficient en phosphore. Pratiquez une fumure d'entretien renforcée en phosphore, en apportant environ 200 unités chaque année.*

4. *La teneur en phosphate assimilable est très élevée par rapport à la teneur totale en phosphore de votre sol. Cas anormal sans doute dû à des apports récents de phosphate soluble.*

5. *Votre sol est correctement pourvu en phosphore. Apportez environ 70 unités chaque année pour l'entretien.*

6. *Votre sol est très riche en phosphore. La canne n'étant pas très exigeante en phosphore, vous pouvez supprimer complètement pendant quelques années la fertilisation phosphatée.*

### Fertilisation Azotée (canne).

Les phrases imprimées sur les bulletins d'analyse sont répertoriées par leur numéro (Tableau 55).

Tableau 55 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation azotée

DIAGNOSTIC N				
TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT	TRÈS FORT
1	2		3	

2. *Votre sol est très pauvre en matière organique. Effectuez si possible des apports de matière organique (fumier, lisier, paille...). Renforcez la fumure minérale azotée : apportez sur chaque cycle environ 160 unités.*

2. *Votre sol est correctement pourvu en matière organique. Apportez uniquement la dose d'azote nécessaire à l'entretien, soit 120 unités.*

3. *Votre sol est très riche en matière organique. Dans des conditions favorables (chaleur, humidité), il peut libérer une forte quantité d'azote minéral pour les plantes. Vous pouvez réduire la fumure azotée et n'apporter que 80 unités sur chaque cycle.*



## Fertilisation Potassique.

Les phrases imprimées sur les bulletins d'analyse sont répertoriées ci-dessous à partir des numéros du Tableau 56.

Tableau 56 : Localisation des phrases définissant le conseil en fertilisation potassique

DIAGNOSTICS		K				
		Très Faible	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
K%CEC	Très Faible	1				
	Faible					
	Moyen	2				
	Fort					
	Très Fort			3		

1. Votre sol est très carencé en potasse. Effectuez une fertilisation d'entretien renforcée en potasse, en apportant environ 400 unités à chaque cycle.
2. Votre sol est correctement pourvu en potasse pour la culture de la canne. Apportez à chaque cycle la dose d'entretien, soit environ 200 unités.
3. Votre sol est très riche en potasse. Vous pouvez supprimer complètement pendant 4 ou 5 cycles la fertilisation potassique.

Remarque : les cas anormaux ne sont pas traités.

## V. Code des micro-régions

Tableau 57 : Micro-régions et lieux-dits (partie 1).

CODE	COMMUNE	LIEU DIT	CODE	COMMUNE	LIEU DIT
10-10	Saint-Pierre	Pierrefonds	27-30	Etang-Salé	Ravine Sèche
10-20	Saint-Pierre	Mon Repos	27-40	Etang-Salé	Piton de l'Entre-Deux
10-30	Saint-Pierre	Mon Caprice	29-10	Petite-Ile	Ravine du Pont
10-40	Saint-Pierre	Ravine des Cabris	29-20	Petite-Ile	Manapany les Hauts
10-50	Saint-Pierre	Les Quatre Cents	29-21	Petite-Ile	Manapany les Bas
10-51	Saint-Pierre	Mahavel les Hauts	29-30	Petite-Ile	Piton Goyave
10-60	Saint-Pierre	Condé	29-40	Petite-Ile	Anse les Bas
10-70	Saint-Pierre	Saint-Pierre	30-10	Le Tampon	Le Tampon
10-80	Saint-Pierre	Bassin Martin	30-20	Le Tampon	Les Trois-Mares
10-90	Saint-Pierre	Montvert les Bas	30-30	Le Tampon	Bras de Ponteau
10-91	Saint-Pierre	Montvert les Hauts	30-40	Le Tampon	Trois Mares les Hauts
10-92	Saint-Pierre	Piton de Montvert	30-50	Le Tampon	Bois Court
11-11	Bois de Nèfles	Bois de Nèfles	30-60	Le Tampon	La Petite Ferme
11-12	Bois de Nèfles	Bois de Nèfles	30-70	Le Tampon	Petit Tampon
11-20	Bois de Nèfles	Haut de Bois de Nèfles	30-80	Le Tampon	Grand Tampon
11-30	Bois de Nèfles	Sans-Souci	31-10	Plaine des Palmistes	Piton des Fées
11-40	Bois de Nèfles	Savannah	31-20	Plaine des Palmistes	RN3
12-10	Bras-Panon	Bras-Panon	31-30	Plaine des Palmistes	Piton Cabris
12-20	Bras-Panon	Rivière Bras-Panon	33-10	Salazie	Salazie
12-31	Bras-Panon	La Caroline	34-00	Saint-Gilles	Saint-Gilles
12-32	Bras-Panon	La Caroline	34-10	Saint-Gilles	Pointe des Aigrettes
12-40	Bras-Panon	Belle-Vue	35-10	Saint-Gilles les Hts	L'Eperon
12-50	Bras-Panon	La Rivière du Mât	35-20	Saint-Gilles les Hts	Tan-Rouge
13-10	Cilaos	Cilaos	35-30	Saint-Gilles les Hts	Les Palmistes
14-00	Entre-Deux	Entre-Deux	36-10	Saint-Leu	Saint-Leu
17-10	La Montagne	Saint-Bernard	36-30	Saint-Leu	La Fontaine
18-10	Plaine des Cafres	La savanne Mare à Boue	36-31	Saint-Leu	Bras Mouton
18-20	Plaine des Cafres	Piton des Songes	36-32	Saint-Leu	La Fontaine
19-20	Possession	Sainte-Thérèse	36-40	Saint-Leu	La Chaloupe Saint-Leu
19-30	Possession	Dos d'Ane	37-10	Sainte-Anne	Petit Saint-Pierre
19-40	Possession	La Ravine à Marquet	37-20	Sainte-Anne	Bonne Espérance
20-10	Le Port	Le Port	37-30	Sainte-Anne	Saint-François
22-10	La Saline	L'Hermitage la Saline	37-40	Sainte-Anne	Cambourg
22-20	La Saline	Vue-Belle	38-10	Sainte-Marie	Gillot
22-30	La Saline	La Saline les Hauts	38-20	Sainte-Marie	Sainte-Marie
22-40	La Saline	Bras d'Agnel	38-30	Sainte-Marie	Flacourt
23-11	Guillaume	Bellemène	38-40	Sainte-Marie	La Convenance
23-12	Guillaume	Bellemène	38-51	Sainte-Marie	La Ressource
23-20	Guillaume	La Petite-France	38-52	Sainte-Marie	La Ressource
24-10	Piton Saint-Leu	Stella	38-60	Sainte-Marie	Belle-Vue
24-20	Piton Saint-Leu	Pierre Paillard	38-70	Sainte-Marie	Moka
24-21	Piton Saint-Leu	Pierre Paillard	38-80	Sainte-Marie	Piton Cailloux
24-30	Piton Saint-Leu	Maduran	39-20	Sainte-Rose	Piton Sainte-Rose
24-31	Piton Saint-Leu	Maduran	39-30	Sainte-Rose	Piton Moka
24-40	Piton Saint-Leu	Le Plate	39-40	Sainte-Rose	Brûlé de Sainte-Rose
24-50	Piton Saint-Leu	Tan Rouge	39-50	Sainte-Rose	Mourouvin
25-10	Les Avirons	Les Avirons	39-60	Sainte-Rose	Sainte-Rose
25-11	Les Avirons	Bois Blanc	40-10	Saint-André	Champ-Borne
25-20	Les Avirons	Tévelave	40-20	Saint-André	Bois-Rouge
25-30	Les Avirons	Piton Saint-Leu	40-31	Saint-André	Bocage
26-00	Trois-Bassins	Grande Ravine	40-32	Saint-André	Bocage
26-10	Trois-Bassins	Le Bois-Nèfles	40-40	Saint-André	Bras des Chevrettes
26-20	Trois-Bassins	Les Colimaçons	41-10	Sainte-Suzanne	Commune Bègue
26-30	Trois-Bassins	Trois-Bassins	41-20	Sainte-Suzanne	Sainte-Suzanne
26-40	Trois-Bassins	Trois-Bassins les Hts	41-30	Sainte-Suzanne	Commune Caron
27-10	Etang-Salé	Etang-Salé	41-40	Sainte-Suzanne	Bel Air
27-20	Etang-Salé	Le Maniron	41-51	Sainte-Suzanne	Decolte

Tableau 58 : Micro-régions et lieux-dits (partie 2)

CODE	COMMUNE	LIEU DIT	CODE	COMMUNE	LIEU DIT
41-52	Sainte-Suzanne	Decotte	70-30	Saint-Benoit	Beaufond
41-61	Sainte-Suzanne	Mare à Songes	70-40	Saint-Benoit	Bourbier
41-62	Sainte-Suzanne	Mare à Songes	70-50	Saint-Benoit	Grand Baltoir
42-10	Saint-Philippe	Saint-Philippe	80-10	Saint-Joseph	Les Lianes
42-20	Saint-Philippe	Le Tremblet	80-20	Saint-Joseph	Carosse
50-10	Saint-Louis	Le Bois-Nèfles	80-21	Saint-Joseph	Les Grègues-Manapany
50-20	Saint-Louis	La Rivière	80-30	Saint-Joseph	Plaine des Grègues
50-30	Saint-Louis	Terre Rouge	80-40	Saint-Joseph	Jean Petit
50-31	Saint-Louis	Le Tapage	80-41	Saint-Joseph	Saint-Joseph
50-40	Saint-Louis	Le Gol les Hauts	80-50	Saint-Joseph	Grand Coude
50-50	Saint-Louis	Le Ruisseau	80-60	Saint-Joseph	Pointe de Vincendo
50-60	Saint-Louis	Maison Rouge	80-70	Saint-Joseph	Bras Jacques Payot
50-70	Saint-Louis	Bellevue	80-71	Saint-Joseph	Matouta
50-71	Saint-Louis	Plaine des Makes	80-80	Saint-Joseph	La Crête
50-72	Saint-Louis	Les Makes le Serré	80-90	Saint-Joseph	Jacques Payot
50-80	Saint-Louis	Plaine du Gol	90-10	Saint-Denis	Le Brûlé
60-00	Saint-Paul	Saint-Paul	90-11	Saint-Denis	La Bretagne
60-10	Saint-Paul	Les Combavas	90-12	Saint-Denis	La Bretagne
70-10	Saint-Benoit	La Confiance	90-20	Saint-Denis	Moufia
70-21	Saint-Benoit	Le Cratère	90-30	Saint-Denis	Cascade du Chaudron
70-22	Saint-Benoit	Le Cratère			

## VI. Engrais disponibles à La Réunion

Le Tableau 59 donne une liste actualisée des principaux engrais commercialisés à La Réunion lors de la campagne agricole 1997-1998. Cette liste n'est pas exhaustive car n'y figurent que les engrais des fournisseurs qui nous ont répondu. En outre, nous n'avons pas mentionné les engrais « spécialisés » (maraîchage, arbres fruitiers, espaces vert...).

Ces engrais sont pris en compte par le système expert pour élaborer le plan de fumure proposé aux agriculteurs, conformément aux règles indiquées dans la partie consacrée à la canne à sucre (page 60).

Tableau 59 : Liste et composition des engrais commerciaux

Engrais	N	P2O5	K2O	MgO	CaO	SO3	Cl	F/kg
00-23-30	0	23	30	0	0	0	oui	2
00-26-26	0	26	26	0	0	0	oui	2
04-11-46	4	11	46	0	0	0	oui	1,9
06-23-30	6	23	30	0	0	0	oui	1,9
09-23-30	9	23	30	0	0	0	oui	1,9
10-26-26	10	26	26	0	0	0	oui	2,1
12-09-30	12	9	30	0	0	0	oui	1,85
12-10-36	12	10	36	0	0	0	oui	2
15-00-40	15	0	40	0	0	0	oui	1,9
15-06-32	15	6	32	0	0	0	oui	1,85
15-12-24	15	12	24	0	0	0	oui	1,9
15-20-24	15	20	24	0	0	0	oui	2,05
16-07-29	16	7	29	0	0	0	oui	1,88
17-12-28	17	12	28	0	0	0	oui	1,88
18-07-30	18	7	30	0	0	0	oui	1,9
20-00-33	20	0	33	0	0	0	oui	1,85
20-05-30	20	5	30	0	0	0	oui	1,88
33-11-06 Compl vinasse	33	11	6	0	0	0	oui	2,2
16-00-40 Fertirrigation	16	0	40	0	0	0	oui	2,26
20-00-34 Fertirrigation	20	0	34	0	0	0	oui	2,26
07-18-36	7	18	36	0	0	0	oui	1,9
09-23-30	9	23	30	0	0	0	oui	1,9
13-36-13	13	36	13	0	0	0	oui	2,54
14-07-36	14	7	36	0	0	0	oui	1,87
16-29-12	16	29	12	0	0	0	oui	2,49
16-30-15	16	30	15	0	0	0	oui	2,44
30-10-10	30	10	10	0	0	0	oui	2,1
38-12-00	38	12	0	0	0	0	oui	2,15
Ammonitrate	26						non	2,1
Sulfate d'ammoniac	21					60	non	1,59
Urée	46						non	2,2
DAP	18	46					non	2,68
TSP		46				12	non	2,24
Tricalcique		28,5			40		non	2,65
Hyper		28,5			40		non	1,74
Chlorure de potasse			60				oui	1,85
MOP			62				oui	2,35
Sulfate de potasse			50			46	non	2,99
Solupotasse			50			46	non	3,2
Kiésérite				26			non	2,945
Chaux vive gr (106)				39	59		non	1,95
Chaux vive poudre				39	59		non	1,85
Dolomie 1-3mm (59)				20	30		non	en cours

Le prix moyen des engrais au kg n'est qu'indicatif, car il s'agit d'un prix de gros. Nous avons dû renoncer à éditer une estimation du coût du conseil sur le bulletin d'analyse. Les règles commerciales et les variations de prix selon le lieu d'achat et les quantités traitées ne permettent pas en effet de faire une estimation suffisamment précise des coûts.

La colonne indiquant la présence ou l'absence de chlore dans la formulation était destinée aux cultures maraîchères. Celles-ci sont en effet sensibles au chlore (pomme de terre, tomates, concombre, tabac...). Le programme n'a pas été élaboré plus avant pour ces cultures et ne tient donc pas compte de l'existence sur le marché d'engrais NPK-S sans chlore, dans lesquels le potassium se trouve sous forme de sulfate. Ce tableau sera réactualisé fin 1997, pour prendre en compte les nouvelles formulations disponibles à La Réunion sur le marché des engrais.

## VII. Codes des Types de Sol de La Réunion

Tableau 60 : Typologie des sols réunionnais selon des critères pédogénétiques et chimiques.

Code STIPA adapté	Caractère	Description du type de sol	Unités de milieu (numérotation de Raunet)	Unités de sol
10000		Sols ferrallitiques	Code générique pour prélevement mal localisé	Ferrallitique
101A		Sols faiblement ferrallitiques andiques	30, 31	
101B		Plantées à sols faiblement ferrallitiques	17, 18	
103A		Plantées à sols ferrallitiques épais	6, 7, 8, 9, 16 nord, 45	
103B		Plantées à sols ferrallitiques andiques épais	15 est	
3000		Sols vertiques	Code générique pour prélevement mal localisé	Vertique
7115B		Cônes anciens à sols calcaireux vertiques	41, 63	
7000		Sols bruns	Code générique pour prélevement mal localisé	Brun
2420		Cônes récents à sols sablo-calcaireux peu évolués (alluvions)	82 nord, 83, 84 ouest et sud	
7414		Plantées à sols bruns ferrugineux et ferrallitiques	14, 15, 21, 22, 23	
7410		Plantées à sols bruns non ferrugineux	13, 19, 20, 44 Saint Louis	
3100		Plantées à verticaux et affaissements calcaireux (Brun vertique)	24, 25, 26	
1130		Regoils et sols peu évolués sablo-eux	62, 63	
7115A		Sols bruns peu épais et sols vertiques (Brun vertique)	10, 11, 12	
7410A		Sols bruns sur grès désagrégés	44 Saint Pierre, 51, 52 La Caille	
711C		Zones à ruissellement très actif		
1132S		Sols argileux plus ou moins hydromorphes sud (alluvions)	66 sud, 68	
740L		Sols brun de Cécès	68, 69, 70, 71	
7113		Sols brun andiques	Code générique pour prélevement mal localisé	Brun andique
101D		Cônes anciens à sols calcaireux ferrallitiques	80 nord	
1132N		Sols argileux plus ou moins hydromorphes nord (alluvions)	66 nord, 66 nord, 68	
7113A		Sols bruns andiques sur cendres épaisses continues	28, 29	
7113B		Sols bruns andiques sur cendres peu épaisses discontinues	53, 59 Petite Ile	
1132W		Sols argileux plus ou moins hydromorphes ouest (alluvions)	66 ouest, 68	
7113C		Sols brun andiques de Salade	72, 73, 74, 75	Andique non perhydraté
42NP		Andosols non perhydraté	Nombre le suffisant d'analyses pour choisir une des 2 unités	
42AA		Andosols désaturés non perhydraté chroniques sur cendres	32, 33, 46	
42AB		Andosols désaturés non perhydraté sur cendres	40, 41, 42, 43, 52 Saint Joseph, 54, 59 Venceado	
101C		Cônes anciens à sols calcaireux ferrallitiques andiques	80 est, 84-est	Andique perhydraté
2430		Relief de dissection à sols peu évolués	5	
42P		Andosols perhydraté	Code générique pour prélevement mal localisé	
42CA		Andosols désaturés perhydraté chroniques cryptopodzoliques	36	
42B		Andosols désaturés perhydraté chroniques sur cendres	34, 35, 36, 37, 38, 39, 47, 48, 49, 50	
42CB		Andosols désaturés perhydraté cryptopodzoliques sur cendres	55, 56, 57, 58, 67	
2230B		Cônes récents à sols sablo-calcaireux andiques	82 est	
2230A		Sols peu évolués humifères sur grès	62, 63, 64, 65	

\* les cases hachurées correspondent en majorité à des sols cultivés en canne à sucre, pour lesquels nous disposons d'un nombre significatif d'analyses chimiques.



## Ouvrages parus depuis 1995

- n° 1-95 CLAVEL D., WELCKER C., GUNET I.  
Projet CIRAD-INRA Guadeloupe. Synthèse des principaux résultats  
d'amélioration variétale du maïs pour la zone caraïbe, 1989-1993, 16 p.
- n° 2-95 GUIBORDEAU P., 1995.  
L'amélioration variétale du cotonnier au Sénégal, 36 p.
- n° 3-95 RENOU A., MARTIN T.  
50 ans de recherches phytosanitaires sur la culture cotonnière au Tchad,  
133 p.
- n° 4-95 HOMMAN N.  
Propriété et protection du matériel végétal, 152 p. et annexe.
- n° 5-95 LUCE C.  
Le sorgho. Création variétale et étude de la diversité génétique, 72 p.
- n° 6-95 JOURDAIN D.  
Utilisation des modèles bio-économiques pour l'analyse des stratégies  
de protection des plantes, 39 p. et annexes.
- 
- n° 1-96 MORANT P., BALIMA M., KOHE N., OUARO S., PARE S., SANOU P., ZERBO L.  
Création d'une cellule de traitements d'images satellitaires et d'applications  
thématiques au sein de l'INERA, 63 p. et annexes.
- n° 2-96 SEGUY L., BOUZINAC S.  
Le soja au Brésil : production et systèmes de culture, 42 p.
- n° 3-96 SEGUY L., BOUZINAC S. (éditeurs)  
Systèmes de culture mécanisés en zone tropicale humide.  
Expériences de recherche-développement au Brésil, 130 p.
- n° 4-96 MORANT P., RENEAUD H., GOUNEL C., GRELLET G., GUILLOBEZ S., LHERBET A.  
Base de données géographiques pour la mise en place des pôles régionaux  
de recherche. Savanes d'Afrique centrale PRASAC.  
Savanes d'Afrique de l'Ouest, 31 p.
- n° 5-96 LICAPE J.-M.  
Effets de la sécheresse sur le cotonnier et amélioration génétique  
de son adaptation au déficit hydrique. Revue bibliographique, 35 p.
- 
- n° 1-97 BOUSSOU C., ALLAFORT M.-T.  
Comment valoriser vos études de terrain ? A quelles revues confier  
votre expérience d'agronome ? 25 p.
- n° 2-97 CHARPENTIER H.  
Fixation de l'agriculture dans le nord de la Côte d'Ivoire, 142 p.  
et planches en couleurs.
- n° 3-97 DEGUINE J.-P., MARTIN J., MIRLIER H., LECLANT F.  
Inventaire des plantes-hôtes d'*Aphis gossypii* Glover (Hemiptera, Aphididae)  
en Afrique, 17 p.
- n° 4-97 BACHELIER B., DEGUINE J.-P., EKORONG J., KLASSOU C., MARTIN J.  
Le cotonnier à feuilles okra. Synthèse des études réalisées au Cameroun, 33 p.



Centre  
de coopération  
internationale  
en recherche  
agronomique  
pour le  
développement

Département  
des cultures  
annuelles  
CIRAD-CA

Avenue  
d'Agropolis  
BP 5035  
34032 Montpellier  
Cedex 1  
France

téléphone :  
04 67 61 58 00

télécopie :  
04 67 61 59 86

télex :  
480762 F