

THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ PARIS 6

Spécialité:
SCIENCES DE LA TERRE
PÉDOLOGIE

présentée par

Lydie CHAPUIS LARDY

pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS 6

**RÉSERVES ET FORMES DU PHOSPHORE
DE SOLS FERRALLITIQUES
SOUS VÉGÉTATION NATURELLE DE CERRADOS
ET SOUS PÂTURAGES (BRÉSIL).
Stabilité du phosphore organique**

soutenue le 25 novembre 1997 devant le jury composé de :

Mme M.L. Lopes Assad	Professeur à l'Université de Brasilia (Brésil)	Présidente
Mr F. Andreux	Professeur à l'Université de Dijon	Rapporteur
Mr E. Frossard	Professeur à l'EPF Zurich (Suisse)	Rapporteur
Mr M. Brossard	Chargé de Recherche ORSTOM (Brésil)	Examineur
Mr A. Mariotti	Professeur à l'Université Paris 6	Examineur
Mr P. Lavelle	Professeur à l'Université Paris 6	Directeur de thèse

Ce travail est dédié

*à Sylvain,
à l'enfant qui va naître,
à Joli Papa, parti trop vite.*

Avant-Propos

Le travail présenté dans ce mémoire repose sur une étude de terrain et n'aurait pu être réalisée sans la bienveillance des autorités brésiliennes du CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa Científica, de l'EMBRAPA-Cerrados (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados) et de l'IBGE-Reserva Ecológica do Roncador (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Mr Michel Brossard qui voici trois ans m'a proposé de continuer avec lui l'aventure commencée en DEA. Il m'a fait découvrir le travail de terrain avec une bonne humeur et une disponibilité dont je lui suis gré. Sans son enthousiasme et son appui constant, il m'aurait été difficile de mener à son terme cette thèse. Je remercie également l'ensemble de la famille Brossard, Christine, Manuel et Denis, pour m'avoir accueilli, avec bonne humeur, plusieurs mois dans le cercle familial. Je leur garde toute mon amitié.

Je suis particulièrement reconnaissante à M. le Pr. Patrick Lavelle, directeur du Laboratoire d'Écologie des Sols Tropicaux du centre ORSTOM de Bondy pour m'avoir accueillie dans son laboratoire et pour avoir accepté de diriger ce travail. Je remercie également M. Turenne, directeur du centre ORSTOM de Bondy.

Je tiens à dire ma gratitude à M. le Pr. A. Mariotti qui m'a permis de m'inscrire dans la formation doctorale "Fonctionnement Physique, Chimique et Biologique de la Biosphère Continentale" de l'Université Pierre et Marie Curie, PARIS VI. Je le remercie également de bien vouloir juger ce travail.

Mme Staunton et Mr Quiquampoix m'ont accueillie au sein de l'unité Science du Sol de l'INRA de Montpellier. J'ai ainsi pu réaliser des parties importantes de mon travail. Je leur suis profondément reconnaissante pour leur bonne humeur, leur aide et leurs conseils. Tous mes remerciements à Mme Le Guernevé, du Laboratoire des Polymères et Techniques Physico-chimiques du centre INRA de Montpellier qui a participé avec Mr Quiquampoix à la réalisation des spectres RMN. Je tiens à préciser que ce séjour à Montpellier a été fort agréable, et je remercie tous ceux qui ont participé à cette ambiance.

Je remercie vivement Mme Elisabeth Schouller du Centre de Pédologie Biologique du CNRS, Vandœuvre-lès-Nancy. Son aide et son savoir-faire m'ont été précieux.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Mr Jean-Claude Leprun, Directeur de Recherche à l'ORSTOM, pour avoir consacré un peu de son temps sur le terrain à me guider dans l'examen des caractéristiques d'une fosse pédologique. Je le remercie également pour son aide et pour

l'intérêt qu'il a porté à mes travaux. Pendant la réalisation des travaux de terrain, plusieurs personnes ont participé de part leurs compétences, je tiens à les remercier pour leur soutien amical. Un grand merci, notamment, au Professeur Maria Léonor Lopes-Assad de l'Université de Brasília. Je lui suis également reconnaissante d'avoir accepté d'être membre du jury. Mr Alexandro Barcellos, chercheur au CPAC nous a facilité l'accès aux parcelles d'essais, je l'en remercie sincèrement.

Je remercie infiniment Mr le Pr. Francis Andreux, directeur de l'Unité Sciences du sol, Université de Bourgogne, pour avoir accepté d'être rapporteur.

Et j'exprime toute ma reconnaissance à Mr Emmanuel Frossard, Professeur à l'École Polytechnique Fédérale (ETH) de Zurich, pour avoir accepté de participer au jury et pour ses critiques constructives.

Je tiens également à remercier :

- Mr Francis Sondag, directeur du Laboratoire des Formations Superficielles (L.F.S.) du centre ORSTOM de Bondy, qui m'a permis d'utiliser des locaux suffisamment équipés pour la pratique des analyses chimiques du Phosphore.

- les membres du L.F.S. qui ont participé au bon déroulement des analyses de laboratoire, spécialement Marie-Lou, Alice et Isabelle.

- Mme Huguette Génin pour l'apprentissage de la pratique des analyses minéralogiques des sols. Je n'oublierai pas les petites astuces de laboratoire qu'elle a bien voulu me transmettre.

- Mr Fabien Thomas, du Laboratoire d'Environnement et de Minéralurgie pour son appui logistique lors de mon passage à Nancy.

- Mme Hélène Paquet, du laboratoire de Spectrochimie, Centre de Géochimie de Surface, CNRS (Strasbourg) pour avoir consacré un peu de son temps à l'analyse minéralogique (RX) de mes échantillons.

- Mr Jean-Yves Laurent, ORSTOM Fort-de France, pour les analyses Carbone-Azote.

- Mme Françoise Pelletier pour ces nombreux dépannages informatiques.

- Mme Catherine Pusic et Mr Yves Blanca pour leur disponibilité et leur aide pour scanner cartes et documents.

- Mme Annick Aing, pour son aide à la préparation de la présentation orale de ce travail.

- L'ensemble du personnel administratif du centre ORSTOM de Bondy et spécialement, France Toma, Véronique Gaston, Isabelle Lecubin, Jacqueline Paolela, et Jacqueline Coquenot pour le bon déroulement de ces trois années.

Enfin, je ne serai oublier les membres du Laboratoire d'Écologie des Sols Tropicaux, qu'ils soient chercheurs, techniciens ou étudiants, je ne peux tous les nommer mais je tiens à les remercier. Merci à tous pour les p'tits coups de main, pour la bonne humeur. Je garde toute mon amitié à Fabienne, Jocelyne, Eleusa et Johnny.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	2
CHAPITRE I	5
LES CERRADOS	
I.- LE MILIEU NATUREL	6
1.- Localisation géographique	6
2.- Éléments de géologie	7
3.- Le climat	9
4.- La végétation	11
4.1.- Les différents types de végétation	11
4.2.- Spécificité et richesse des cerrados	12
4.3.- Hypothèses sur la persistance des cerrados	13
II.- LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE	15
III.- LE PHOSPHORE DANS LES LATOSOLS DE LA RÉGION DES CERRADOS	21
1.- Dynamique du phosphore dans les sols	21
1.1.- Phénomènes d'Adsorption-Désorption	21
1.2.- Phénomènes biologiques	23
2.- Les ions phosphates dans les latosols brésiliens	23
2.1.- Capacité d'adsorption des ions phosphates	23
2.2.- Extractibilité et désorption des ions phosphates	24
2.3.- Conséquences agronomiques	25

CHAPITRE II LES SITES ÉTUDIÉS

26

I.- LE DISTRICT FÉDÉRAL	27
1.- Géologie et géomorphologie	27
2.- La couverture pédologique	29
2.1.- Les principaux types de sols	29
2.2.- Différenciation latérale de la couverture pédologique	30
II.- LES SITES D'ÉTUDE	32
1.- Rappels climatologiques	32
2.- Localisation et description des stations	33
2.1.- La réserve écologique de l'IBGE	33
2.2.- La station expérimentale de l'EMBRAPA	34
2.3.- Analyse floristique de la végétation naturelle	36
3.- Les sols	37
3.1.- Méthodes de prélèvements	38
3.2.- Principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques	38
3.2.1.- Dans la réserve écologique du Roncador	39
3.2.1.1.- Latosols rouge foncé (LE)	39
3.2.1.2.- Latosol rouge jaune (LV)	44
3.2.1.3.- Latosol jaune (LA)	46
3.2.2.- Dans la station expérimentale de l'EMBRAPA	49
3.2.3.- Discussion - Conclusions partielles	53
3.3.- Description des profils racinaires	55
4.- Stocks de carbone	57
5.- Le Phosphore total, organique et inorganique	58
5.1.- Matériels et méthodes	58
5.2.- Résultats	59
5.2.1.- Teneurs en Phosphore des sols	59
5.2.2.- Réserves de Phosphore	61
5.2.3.- Rapports C/Po	66
5.3.- Discussion - Conclusions	68

CHAPITRE III	72
LES FORMES DU PHOSPHORE	
Première Partie	73
Introduction et Données bibliographiques	
I.- MÉTHODE D'ÉTUDE DU PHOSPHORE DES SOLS : LE FRACTIONNEMENT CHIMIQUE	73
II.- LES FORMES DU PHOSPHORE ORGANIQUE	76
Deuxième Partie	78
Extraction séquentielle des compartiments de phosphore	
I.- MATÉRIELS ET MÉTHODES	78
1.- Méthodes	78
2.- Échantillons analysés	79
II.- RÉSULTATS	79
1.- Taux d'extraction du phosphore et limite de la méthode	79
2.- Le phosphore total (Pt) des extraits	81
3.- Le phosphore inorganique (Pi) des extraits	83
4.- Le phosphore organique (Po) des extraits	84
5.- Le fer et l'aluminium des extraits	85
6.- Analyses en Composantes Principales : Teneurs en phosphore des extraits et caractéristiques chimiques des strates 0-10 cm	85
6.1.- ACP avec les variables Po, Al, Fe et C	85
6.2.- ACP avec les variables Pi, Pt, Al, Fe et C	87
III.- DISCUSSION	89

Troisième Partie	92
Caractérisation des formes de Phosphore par ^{31}P-RMN	
I.- MATÉRIELS ET MÉTHODES	92
1.- Matériels	92
2.- Rappel du principe de la méthode de RMN	92
3.- Préparation des échantillons pour le passage au spectromètre RMN	93
II.- RÉSULTATS	94
1.- Analyse chimique : Phosphore total, organique et inorganique	94
2.- Les spectres ^{31}P -RMN	95
III.- DISCUSSION	97
Quatrième Partie	101
Conclusions	
CHAPITRE IV	103
ACTIVITÉ PHOSPHATASE DES SOLS ET ÉTUDE DES INTERACTIONS PHYTASE-PHOSPHATE-SOL	
Première Partie	105
Synthèse bibliographique	
I.- GÉNÉRALITÉS	105

II.- INFLUENCE DES SURFACES ADSORBANTES DU SOL SUR LES ACTIVITÉS PHOSPHATASES	108
1.- Les forces d'interactions mises en jeu	108
2.- Les interactions Protéines-surfaces	110
3.- Adsorption des protéines sur les surfaces	110
 Deuxième Partie	 112
Activité phosphomonoestérase (phosphatase)	
 I.- QUANTIFICATION DE L'ACTIVITÉ PHOSPHATASE SELON LA MÉTHODE TABATABAI (1982)	 112
1.- Matériels et méthode	112
1.1.- Échantillons analysés	112
1.2.- Méthode (Tabatabai, 1982)	112
2.- Résultats	113
2.1.- Activité phosphatase alcaline	113
2.2.- Activité phosphatase acide	114
2.2.1.- Les sites sous végétation naturelle	114
2.2.2.- Les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA	116
 II.- INFLUENCE DU pH SUR L'ACTIVITÉ PHOSPHATASE ACIDE	 117
1.- Matériels et méthode	117
2.- Résultats	118
2.1.- Dans la couche de sol 0-10 cm	118
2.2.- Dans la couche de sol 10-20 cm	120
 III.- DISCUSSION - CONCLUSIONS	 121
1.- Activité phosphatase alcaline	121

2.- Activité phosphatase acide	121
3.- Conclusions	127
Troisième Partie	128
Étude des interactions Phytase-Phosphate-Sol	
I.- ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE DES IONS PHOSPHATES ENTRE LES SURFACES ET LA SOLUTION DU SOL	129
1.- Principe de la méthode de dilution isotopique	129
2.- Matériels et méthodes	130
3.- Résultats	131
4.- Discussion	131
II.- EFFET DE L'APPORT D'UN ENTRAINEUR SUR LES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE	133
1.- Matériels et méthodes	133
2.- Résultats	133
3.- Discussion	134
III.- EFFET DE L'APPORT D'UNE PHYTASE EXOGÈNE SUR LES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE	135
1.- Choix de l'enzyme	136
2.- Adsorption compétitive d'ions phosphates et de phytase sur la phase solide du sol	136
2.1.- Matériel et Méthodes	136
2.2.- Paramètres descriptifs du sol	138
2.3.- Adsorption dans les systèmes à un adsorbat	138
2.3.1- Résultats	138
2.3.2- Discussion	139
2.4.- Adsorption compétitive	143
2.4.1.- Résultats	143
2.4.2.- Discussion	146

3.- Effet de l'apport de la phytase sur les paramètres descriptifs des phénomènes d'échange	143
3.1.- Test préalable : Recherche d'interactions hydrophobes en présence d'une interface Gaz/Liquide	147
3.2.- Matériels et méthodes	148
3.3.- Résultats	148
3.3.1.-Effet de l'apport de la phytase sur les paramètres descriptifs des phénomènes d'échange	148
3.3.2.-Effet du pH de la solution du sol	149
3.4.- Discussion	150
IV.- CONCLUSIONS	153
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	155
BIBLIOGRAPHIE	162
ANNEXES	

Liste des annexes

Annexe I	Relevé floristique
Annexe II	Fiches de description morphologique des profils de sols
Annexe III	Méthodes de caractérisation générale des sols
Annexe IV	Caractéristiques générales des sols Profils : RON 1 / RON 2 / RON 3 / RON 4 / RON 5 / BAR 1 / BAR 2 Squelette granulométrique des sols Teneurs en carbone, azote et rapports C/N pH des sites de la station expérimentale de l'Embrapa Densité apparente
Annexe V	Profils racinaires
Annexe VI	Teneurs ($\mu\text{g P / g sol}$) et réserves (kg P / ha) en phosphore total, organique et inorganique
Annexe VII	Fractionnement chimique (Hedley, 1982)
Annexe VIII	Matrice de corrélation des A.C.P. (Fractionnement chimique Hedley)
Annexe IX	Fractionnement chimique de la matière organique (RON 1 & RON 4, 0-10 cm)
Annexe X	Extractibilité du P par NaOH 0,5M et Spectroscopie ^{31}P -RMN
Annexe XI	Activité phosphatase Pase = f (Profondeur) Pase = f (pH)
Annexe XII	Adsorption des ions phosphates et de la phytase sur la phase solide du sol RON 1 (0-10 cm)

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure 1	Localisation du Brésil et de la province phyto-écologique des Cerrados Brésiliens	6
Figure 2	Carte structurale schématique du Brésil	8
Figure 3	Distribution des unités dominantes de sols au sein de la province des Cerrados (Latossolo Vermelho-Escuro et Latossolo Vermelho-Amarelo)	18

CHAPITRE II

Figure 4	A : Esquisse géologique du District Fédéral B : Esquisse géomorphologique du District Fédéral	28
Figure 5	Distribution des sols (A) de la séquence étudiée par Macedo & Bryant (1987) et séquence pédologique sur la "chapada"	31
Figure 6	Précipitations, taux d'évaporation et températures (valeurs mensuelles moyennes) à Brasilia	32
Figure 7	Réseau hydrographique principal et localisation des sites dans le District Fédéral : réserve écologique de l'IBGE et station expérimentale de l'EMBRAPA	33
Figure 8	Implantation actuelle des différents types de pâturages étudiés à la station expérimentale de L'EMBRAPA	35
Figure 9	Analyse différentielle des relevés floristiques par ordre d'affinité	36
Figure 10	Principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous Cerradão (RON 1) et Cerrado (RON 2)	40
Figure 11	Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous Campo limpo (RON 4)	42
Figure 12	Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous Campo sujo (RON 3)	45
Figure 13	Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous forêt galerie (RON 5)	48

Figure 14	Principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous Cerrado pâturé (BAR 1) et pâturage de 12 ans (BAR 2)	50
Figure 15	Teneurs en carbone des échantillons moyens prélevés dans les parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA	56
Figure 16	Répartition des teneurs moyennes, minima et maxima, en phosphore total ($\mu\text{g/g}$ sol) des différents horizons pédologiques des latosols LE et LV sous végétation naturelle	60
Figure 17	Répartition des teneurs moyennes, minima et maxima, en phosphore organique ($\mu\text{g/g}$ sol) des différents horizons pédologiques des latosols LE et LV sous végétation naturelle	60
Figure 18	Teneurs ($\mu\text{g/g}$ sol) en phosphore total, organique et inorganique des échantillons moyens de la station expérimentale	62
Figure 19	Stocks (kg P/ha) de phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) dans les couches de sol (0-210) et (0-100) cm	64
Figure 20	Stocks (kg P/ha) de phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) dans les couches de sol (0-50) et (0-10) cm	65
Figure 21	Rapports C/Po des échantillons prélevés par incrément de 10 cm dans les profils	67
Figure 22	Relation entre les teneurs en phosphore total et en carbone (mg/g sol) des couches de sol 0-10 cm	69
Figure 23	Relation entre les teneurs en phosphore organique et en carbone (mg/g sol) dans les couches de sol 0-50 cm et 0-210 cm	70

CHAPITRE III

Figure 24	Quantités de phosphore total et de phosphore organique ($\mu\text{g P/g}$ sol) extraites par le bicarbonate de sodium et la soude. Relation avec les teneurs totales de l'échantillon	80
Figure 25	Teneurs en phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) ($\mu\text{g P/g}$ sol) des extraits bicarbonate et soude	82
Figure 26	Graphes issus de l'analyse en composantes principales effectuée sur les données des extractions séquentielles. Variables : Teneurs en Po, Al et Fe ($\mu\text{g/g}$ sol) des extraits A et B et teneur en carbone (mg/g sol) de l'horizon 0-10 cm	86
Figure 27	Graphes issus de l'analyse en composantes principales effectuée sur les données des extractions séquentielles. Variables : Teneurs en Po, Al et Fe ($\mu\text{g/g}$ sol) des extraits A et B et teneur en carbone (mg/g sol) de l'horizon 0-10 cm	88
Figure 28	Spectre ^{31}P -RMN de l'extrait alcalin concentré du site RON 1	96

Figure 29	Composition du phosphore des extraits alcalins concentrés (en % du signal total) donnée par spectroscopie ^{31}P -RMN	97
-----------	--	----

CHAPITRE IV

Figure 30	Activité phosphatase acide ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des sols sous végétation naturelle (RON)	115
Figure 31	Activité phosphatase acide ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des sites de la station expérimentale (BAR m)	116
Figure 32	Variations de l'activité phosphatase des strates 0-10 cm en fonction du pH	119
Figure 33	Adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm) : quantité adsorbée ($\mu\text{g P/m}^2$), évolution du potentiel zéta (mV) et du pH au cours de l'adsorption	140
Figure 34	Adsorption de la phytase sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm) : quantité adsorbée ($\mu\text{g Phytase/m}^2$), évolution du potentiel zéta (mV) et du pH au cours de l'adsorption	141
Figure 35	Effet de l'apport de phytase sur l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm)	144
Figure 36	Effet de l'apport de phosphate sur l'adsorption de la phytase sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm)	145
Figure 37	Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions à l'équilibre, avec et sans contrôle du pH et, sans et avec addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système	151
Figure 38	Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, sans et avec addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système	152

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau 1	Moyennes des précipitations, températures et évaporations enregistrées dans différentes stations de la province	10
Tableau 2	Composition botanique et couverture arborée (%) des types "campo sujo", "cerrado" et "cerradão" à Planaltina, DF	12
Tableau 3	Comparaison des Cerrados avec d'autres savanes en terme de disponibilité de l'eau et des nutriments	14
Tableau 4	Les principales classes de sols des Cerrados	16
Tableau 5	Caractéristiques chimiques et physiques des 20 premiers centimètres de cinq latosols des Cerrados (DF)	19

CHAPITRE II

Tableau 6	Distribution des sols dans le District Fédéral	29
Tableau 7	Historique des parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA	35
Tableau 8	Correspondance entre le nom du site, la couverture végétale et le type de sol et position géographique des sites	37
Tableau 9	Profils racinaires sur un mètre de large et proportions de racines fines	56
Tableau 10	Stocks de carbone total (kg C/m ²) des couches de sol 0-100 cm et 0-210 cm	57

CHAPITRE III

Tableau 11	Schéma du fractionnement chimique utilisé par Hedley <i>et al.</i> (1982)	75
Tableau 12	Teneurs en phosphore inorganique (Pi), total (Pt) et organique (Po) (µg/g sol) des extraits alcalins et proportions de phosphore organique (% Pt de l'extrait)	94

CHAPITRE IV

Tableau 13	Activité phosphatase alcaline ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des échantillons 0-10 cm	113
Tableau 14	Activité phosphatase ($\mu\text{g pN/g sol/h}$), des couches de sol 10-20 cm, à pH proche du pH_{eau} du sol et à pH 6,5	120
Tableau 15	Coefficients de corrélation (R^2) entre activité phosphatase et rapport C/Po, teneurs en carbone, en azote et en phosphore organique (de l'échantillon et des extraits NaHCO_3 et NaOH)	123
Tableau 16	Teneurs en carbone, en argiles granulométriques, caractéristiques minéralogiques et valeurs d'activité phosphatase acide (Pase) de différents sols	124
Tableau 17	Coefficients d'activité phosphatase, reliés à la teneur en carbone (selon Feller <i>et al.</i> , 1994) ou à la teneur en phosphore organique des extraits NaHCO_3	125
Tableau 18	Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre	131
Tableau 19	Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, après apport de $25 \mu\text{g P/g sol}$	134
Tableau 20	Pourcentages de recouvrement du P introduit dans le système sol/solution	135
Tableau 21	Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, après addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système	149

Principales Abréviations

Sols (classification brésilienne)

LE : Latossolo Vermelho-Escuro, *latosol rouge foncé*,

LV : Latossolo Vermelho-Amarelo, *latosol rouge jaune*,

LA : Latossolo Amarelo, *latosol jaune*.

Sites

RON : Réserve écologique "Roncador"

RON 1 : Site sous végétation de **Cerradão**, savane arborée dense à espèces sclérophyles,

RON 2 : Site sous végétation de **Cerrado** (s.s.), savane présentant strates herbacée, arbustive et arborescente,

RON 3 : Site sous végétation de **Campo sujo**, savane herbacée comprenant quelques arbustes et arbres,

RON 4 : Site sous végétation **Campo limpo**, savane dominée par les graminées,

RON 5 : Site sous forêt galerie.

BAR : Parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA (gérées par A. Barcellos)

BAR 1 : Cerrado parfois pâturé,

BAR 2 : Pâturage de *Brachiaria brizantha* âgé de 12 ans,

BAR 3 : Pâturage de *Brachiaria brizantha* âgé de 3 ans, après une culture de maïs,

BAR 4 : Pâturage de *Brachiaria brizantha* âgé de 4 ans, après une culture de maïs,

BAR 5 : Pâturage de *Brachiaria brizantha* âgé de 5 ans, après une culture de maïs.

Formes du phosphore

Pt : Phosphore total

Po : Phosphore organique

Pi : Phosphore inorganique

Paramètres descriptifs des phénomènes d'échanges des ions phosphates

Cp : Concentration en ions PO_4^{3-} dans la solution du sol (exprimée en $\mu\text{g P/ml}$ ou $\mu\text{g P/g sol}$)

R.A.S. : Radioactivité spécifique d'une solution contenant des ions $^{32}\text{PO}_4^{3-}$, donnée par le rapport

$$^{32}\text{P} / [\text{PO}_4^{3-}]$$

RÉSUMÉ

Depuis 30 ans, la région des Cerrados, savanes sub-tropicales du Brésil central, a connu un large développement agricole. Elle contribue aujourd'hui activement à la production nationale de grains et de bovins. L'agriculture intensive repose essentiellement sur des sols ferrallitiques acides, profonds, très altérés, argileux ou sableux, à capacité d'échange cationique faible. La carence en phosphore est l'un des principaux obstacles à la productivité de ces milieux.

Le statut du phosphore de latosols sous végétation naturelle et sous pâturages (*Brachiaria brizantha*) a été caractérisé en détail par un ensemble d'analyses et d'expériences complémentaires. Des expérimentations utilisant isothermes d'adsorption ou outil isotopique ^{32}P ont permis de montrer le pouvoir d'adsorption élevé de ces sols vis à vis des ions phosphates. Le premier mètre de sol contient 47 à 62 % du phosphore total (Pt) et 57 à 71 % du phosphore organique (Po) de la couche de sol 0-210 cm. Dans les horizons superficiels, les teneurs en phosphore total s'échelonnent de 269 à 456 $\mu\text{g Pt/g sol}$, ce qui correspond à une réserve comprise entre 195 et 360 kg Pt/ha. Entre 23 et 75 % du phosphore total de ces horizons est sous forme organique.

L'extractibilité du phosphore des horizons superficiels a été caractérisée par un fractionnement chimique. Cette méthode permet de quantifier des compartiments de phosphore potentiellement échangeables et assimilables à court terme par les plantes. Elle extrait de 50 à 72 % du Po des échantillons de la strate 0-10 cm. Les variables "phosphore organique extractible", "fer extractible par les mêmes agents" et "matière organique" apparaissent liées. Le phosphore, extractible par la soude et caractérisé en ^{31}P -RMN, se compose essentiellement de phosphore organique (esters de phosphates). Quel que soit le site, la composition des extraits est similaire, le phosphore organique est essentiellement sous forme stable (phosphomonoesters : 73 à 84 % du Po extrait). L'absence de polyphosphates et de phosphonates témoigne d'une activité biologique intense. L'introduction de *Brachiaria brizantha* ne modifie pas la composition du P extractible par NaOH 0,5M.

L'activité monophosphoestérase (ou *phosphatase*, *Pase*) acide des strates 0-10 cm des sols est élevée : de 284 à 420 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ sous végétation naturelle et de 144 à 209,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ sous pâturages. A 50 cm de profondeur, elle est encore conséquente. Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'une mesure d'activité phosphatase sur une gamme de pH large (de 4 à 6,5), comprenant notamment le pH du sol. Le calcul d'un coefficient [$\text{Pase pH}_{\text{sol}} / \text{Po NaHCO}_3$] permet d'apprécier le potentiel d'activité hydrolytique du phosphore organique facilement extractible. Ainsi, le pâturage de 12 ans et les sites naturels présentent les potentiels d'hydrolyse du phosphore organique les plus élevés.

L'introduction d'une phytase exogène dans la solution du sol favorise l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol et gêne la distribution du ^{32}P dans le système sol-solution, mais elle peut également conduire à un apport de PO_4^{3-} par hydrolyse de phosphore organique ; cet apport se fait au profit de compartiments du P potentiellement assimilables par les plantes, mis en évidence par les résines anioniques.

Pour ces milieux, les recherches futures doivent porter sur les conditions environnementales qui favoriseraient une hydrolyse du phosphore organique.

MOTS-CLÉS

Phosphore, Sols ferrallitiques, Brésil, Cerrados, Pâturages, ^{31}P -RMN, Activité phosphatase, ^{32}P , Phytase

RESUMO

Reservas e formas do fósforo de latossolos sob vegetação dos Cerrados e sob pastagens

Nos últimos trinta anos, no bioma dos Cerrados, região subtropical do Brasil Central, um intenso processo de desenvolvimento agrícola tem acontecido. Esta região contribui atualmente ativamente na produção nacional de grãos e gado. A agricultura intensiva é estabelecida principalmente sob latossolos ácidos, profundos, altamente intemperizados, argilosos e arenosos, em baixa capacidade de troca de cations. Uma das restrições à produtividade é a carência em fósforo.

O fósforo de latossolos sob vegetação natural e pastagens (*Brachiaria brizantha*) foi caracterizado em detalhe por um conjunto de análises físico-químicas. Experimentos utilizando isotermas de absorção ou a metodologia isotópica ^{32}P permitiram a demonstração da capacidade de absorção de fosfato elevada desses solos. O primeiro metro de profundidade contém 47 a 62 % do fósforo total (Pt) e 57 a 71 % do fósforo orgânico (Po) da camada de 0 a 210 cm de profundidade. Nos horizontes superficiais, os teores de Pt são de 269 até 456 ug Pt/g solo, o que corresponde a uma reserva de 195 até 360 kg Pt/ha. Entre 23 e 75 % de fósforo total destas camadas é orgânico. A estatilidade do fósforo das camadas superficiais foi caracterizada por fracionamento químico. Este método quantifica as frações de fósforo potencialmente trocáveis e assimiláveis pelas plantas. A taxa de extração é de 5 a 72% de Po nas camadas 0 - 10 cm. Os parâmetros "Po extraível" (%), "ferro extraível" (%) com a mesma metodologia e "matéria orgânica" (%) estão ligados na análise estatística. O fósforo extraível pela soda e caracterizado por ^{31}P -RMN, é essencialmente composto de Po (éster de fosfato). Qualquer que seja o sítio a composição dos extratos é similar, o Po é formado de compostos estáveis (fosfomonoéster 73 a 84 % do Po extrato). A ausência de polifosfatos e fosfonatos enfatiza uma atividade biológica intensa. A introdução de *Brachiaria brizantha* não modifica a composição do P estável pela soda 0,5M. A atividade monofosfoesteásica (fosfatasas, Pase) ácida das camadas 0 - 10 cm é elevada : de 284 até 420 ug pN/gsolo/h sob vegetação nativa, e de 144 até 210 mg pN/g solo /h sob pastagens. A 50 cm de profundidade ela é ainda significativa. Os resultados obtidos mostram o interesse de medição de atividade fosfatásica em uma gama de pH extensa (4 até 6,5), levando em conta o pH do solo. O cálculo de um coeficiente (Pase pH solo / Po NaHCO_3) aprimora o potencial de atividade hidrolítica do Po facilmente extraível. Assim, a pastagem mais antiga (12 anos) e os sítios nativos ou pouco perturbados apresentam os potenciais hidrolíticos os mais elevados. A introdução de uma fitasa exógena na solução do solo favorece a absorção dos íons fosfato sob a fase sólida dos solos, e impede em parte a distribuição do ^{32}P dentro do sistema solo-solução. Ela pode além do mais favorecer parcialmente a hidrólisis de Po, fomentando íons fosfato que foram avaliados por resinas amónicas.

Nesses ambientes as futuras pesquisas deveriam orientar-se nas condições ambientais que favoreceriam a hidrólisis do fósforo / orgânico.

Palavras-chave

Fósforo, Latossolos, Brasil, Cerrados, Pastagens, atividade fosfatásica, ^{32}P , fitasa, ^{31}P -RMN

ABSTRACT

STOCKS AND FORMS OF PHOSPHORUS IN OXISOLS UNDER CERRADO SAVANNAS AND PASTURES. Stability of organic phosphorus.

The Cerrado savanna region of central Brazil contributes to a large proportion of the national crop and cattle production. Nonetheless, development of intensive agriculture has been limited by soil-related constraints. Oxisols are acid and with very low native fertility, especially in terms of phosphorus.

The phosphorus status of oxisols on natural vegetation or pastures has been characterized in details. Experiments using adsorption curves or isotopic tool (^{32}P) demonstrate the high potential of these soils for phosphorus fixation. Phosphorus is concentrated in the first meter of soil. In the 0-10 cm layer total P content is low, between 269 and 456 $\mu\text{g P/g}$ soil. Organic phosphorus represents 23-75 % of total phosphorus in these layers. P forms have been characterized by chemical fractionation. This study allowed us to quantify exchangeable P pools that are suitable for plants nutrition. Between 50 and 72 % of organic phosphorus of 0-10 cm samples are in extracts. ^{31}P -NMR analysis has been used to examine the structural composition of alkali-soluble Po and Pi . The spectra revealed large proportion of organic forms, principally phosphomonoesters (73-84% of P in extracts). Signals accounting for polyphosphates and phosphonates were not identified, in relation with intense microbial activity in soils. No change in the distribution of P forms due to the introduction of pastures has been shown .

Acid phosphomonoesterase activity (called phosphatase or Pase) is high in the 0-10 cm layers, between 284 and 420 $\mu\text{g pN/g soil/hr}$ on natural vegetation and 144 to 210 $\mu\text{g pN/g soil/hr}$ on pastures. Results show that the study must be done with different pH values between 4 and 6.5, including soil pH. The potential of hydrolytic activity of the easier extractable Po can be calculated by the ratio $[\text{Pase } \text{pH}_{\text{sol}} / \text{Po NaHCO}_3]$. Old pasture and native soils present higher ratios than recent pastures. Introduction of an external phytase in soil solution promotes P adsorption on soil surfaces and limits the distribution of ^{32}P in soil-solution system. It can also lead to an augmentation of the amounts of phosphates by Po hydrolysis in P pools suitable for plants.

Future research needs a characterization of environmental conditions that enhanced Po hydrolysis.

Key-Words : Phosphorus, Oxisol, Brazil, Cerrados, Pastures, ^{31}P -NMR, Phosphatase activity, ^{32}P , Phytase

INTRODUCTION

Le Brésil, avec ses huit millions et demi de kilomètres carrés, est un pays dont l'économie s'appuie fortement sur l'agriculture et pour lequel la connaissance de la ressource "sol" est fondamentale.

Jusqu'au XVIII^e siècle, les Cerrados, zone de savane sub-tropicale humide des hauts plateaux du Brésil central, étaient le siège de sociétés issues des premiers peuples qui colonisèrent l'intérieur des terres, et dont l'économie était basée sur la chasse et la cueillette. Des années 1930 aux années 1950, malgré l'arrivée de nouveaux occupants, attirés par les ressources minières (or, pierres précieuses), cette région sera considérée comme un environnement naturel marginal peu propice à l'agriculture. Son exploitation se limite alors à une agriculture de subsistance et à l'élevage extensif. Cependant la poussée démographique, les impératifs économiques, la volonté affichée du Pouvoir d'étendre les peuplements humains vers l'intérieur des terres, et les progrès des techniques agricoles, ont contribué au rapide essor agricole de la région. L'intérêt des scientifiques pour les Cerrados remonte au début des années 70 lorsque l'éventualité de leur mise en culture a été prise au sérieux par le gouvernement. En 1973, le ministère de l'Agriculture crée l'EMBRAPA, *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, entreprise brésilienne de recherche agronomique. A partir de 1975, le programme de développement du Centre-Ouest, POLOCENTRO, donne un nouvel élan à l'agriculture régionale. Actuellement, les sols des Cerrados sont occupés approximativement par 39 % de pâturages naturels, 15 % de pâturages plantés, 8 % de cultures annuelles et pérennes et 38 % de végétation naturelle. Ils fournissent 27 % de la production nationale de grains et plus de 42 % de celles des bovins.

La majorité des sols brésiliens présente des limitations à la productivité agricole (Madeira Netto *et al.*, 1982). Les *Latosolos* (sols ferrallitiques ou oxisols) font partie de cette catégorie, ils couvrent 46 % de la superficie des Cerrados et sont couramment utilisés pour l'agriculture, notamment lorsqu'ils se situent sur des modelés permettant la mécanisation. Pour ces deux raisons, notre étude portera sur ce type de sols. Ce sont des sols acides, profonds, très altérés, à texture variable, la plupart étant toutefois argileux. Tout au long de leur processus de formation, ces sols ont connu une intense lixiviation des bases et de la silice. La nature des minéraux secondaires, kaolinite, gibbsite, oxydes de fer, leur confère une capacité d'échange cationique faible et un pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphates élevé.

Le phosphore est un élément considéré comme l'un des principaux obstacles à la productivité de ces milieux. Les teneurs en phosphate dans la solution du sol sont faibles (0,4 µg P/ ml en moyenne) (Lopes & Cox, 1977 ; Le Mare, 1982) et l'apport d'engrais phosphatés se révèle bien souvent nécessaire pour l'obtention de rendements agricoles satisfaisants.

L'utilisation de ces sols à des fins agricoles nécessite donc la compréhension des phénomènes régissant la dynamique du phosphore, qu'ils soient d'ordre biologiques ou abiotiques.

Ce travail vise à étudier le phosphore de sols sous végétation naturelle et sous pâturages. Une attention particulière sera apportée à l'étude des différentes formes du phosphore et à la description des paramètres qui permettent de décrire le phosphore échangeable du sol et les potentiels de minéralisation du phosphore organique.

Après une première partie consacrée à la présentation de la région des Cerrados, nous nous attacherons à la description pédologique des sites d'étude et à la quantification de leur réserve en phosphore.

Deux hypothèses ont permis d'orienter la suite du travail :

1- la matière organique est une source essentielle d'éléments minéraux et notamment de phosphore. Le mode de gestion du sol a, par son effet sur la dynamique de la matière organique, un impact sur la nature et les quantités de phosphore présent dans le sol.

Aussi, nous nous attacherons à étudier les formes du phosphore par des méthodes chimiques et physico-chimiques (fractionnement séquentiel et Résonance Magnétique Nucléaire). L'objectif est alors de quantifier les différences pouvant exister dans un sol sous pâturage par comparaison aux sols sous végétation naturelle.

2- les organismes vivants (racines, microflore, macrofaune) interviennent dans les mécanismes de régulation du cycle du phosphore.

Au niveau des processus permettant l'hydrolyse du phosphore organique, l'activité enzymatique induite par les organismes vivants est un paramètre très utilisé depuis quelques années, mais les données pour les sols des Cerrados sont fragmentaires, il nous faut donc les compléter. Après avoir décrit les phénomènes d'échange du phosphate entre la phase solide et la solution du sol, avec l'aide notamment de l'outil isotopique ^{32}P , nous nous attacherons à analyser les effets de l'introduction d'une phosphatase exogène sur les phénomène d'échange et sur l'activité enzymatique.

L'ensemble du travail est réalisé dans le cadre du programme ORSTOM/CNPq/Université de Brasilia "*Biofonctionnement des sols tropicaux de la région des Cerrados*", en collaboration avec le centre de recherche sur les Cerrados de l'EMBRAPA (CPAC).

CHAPITRE I

LES CERRADOS

I.- LE MILIEU NATUREL

1.- Localisation géographique

Les savanes brésiliennes, appelées "Cerrados", sont essentiellement localisées dans le centre ouest du Brésil entre 5° et 20° de latitude Sud et 45° et 60° de longitude Ouest (figure 1). Elles recouvrent environ 2 millions de km² ce qui représente 22 % du territoire national.

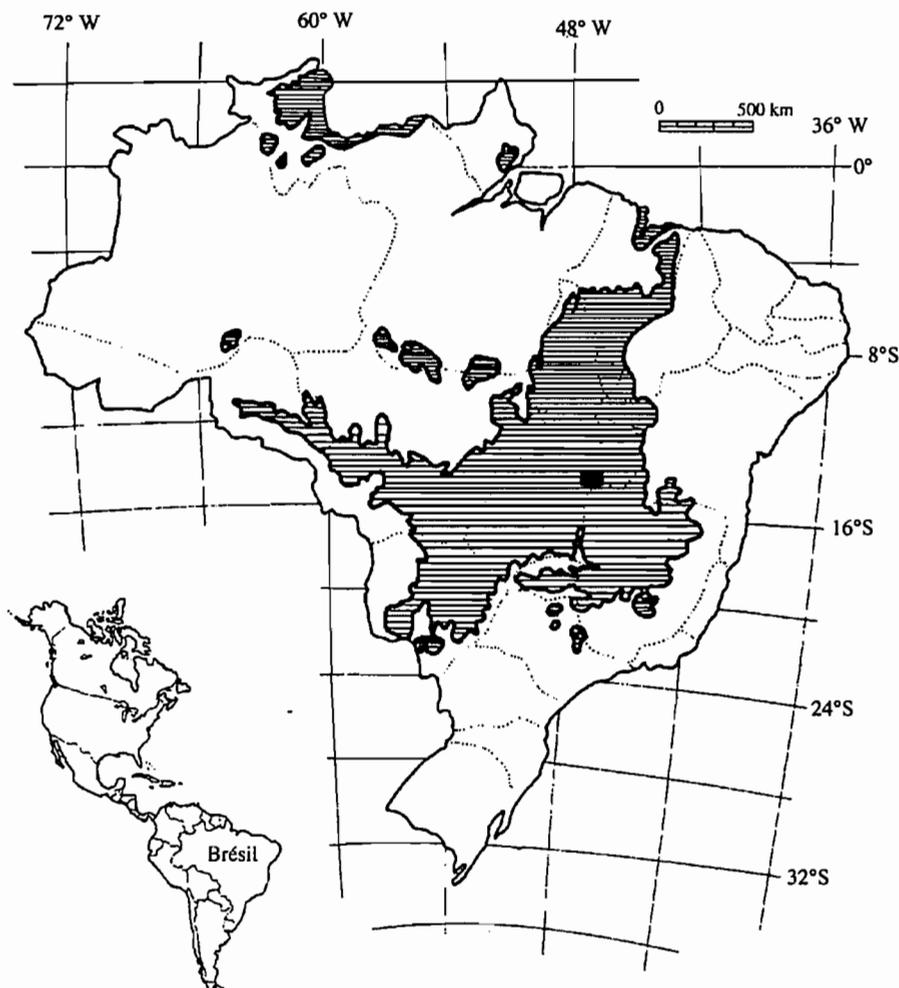


Figure 1.- Localisation du Brésil et de la province phyto-écologique des Cerrados Brésiliens (■ : District Fédéral) d'après IBGE (1993).

2.- Éléments de géologie (d'après Guimarães, 1964 ; Petri & Fulfaro, 1983 ; Almeida & Hasui, 1984 ; Schobbenhaus *et al.*, 1984)

La cratonisation du socle brésilien est réalisée au début du Protérozoïque supérieur (Précambrien) par l'orogénèse brésilienne (700-550 MA). On distingue ainsi des zones cratoniques anciennes séparées par les chaînes brésiliennes, ensembles plissés et métamorphisés (figure 2). Des bassins paléozoïques se développent après la cratonisation : bassins de l'Amazone, du Parnaíba (ou Maranhão) et du Paraná. Les premières sédimentations y débutent au Siluro-Dévonien. Ces bassins paléozoïques sont recouverts au Méso- et/ou Cénozoïque par d'autres sédimentations (bassins méso-cénozoïques).

Les Cerrados occupent la chaîne de Brasilia, une partie des bassins du Parnaíba et du Paraná et la partie ouest du craton de São-Francisco.

Dans la région des Cerrados, les formations du Précambrien moyen, Araxá (principalement composée de micaschistes et de quartzites) et Canastra (dominée par des quartzites et des schistes, notamment des séricito-schistes) sont peu représentées. La couverture du craton est essentiellement de type Bambuí (Précambrien supérieur). Deux unités lithologiques du groupe Bambuí sont présentes, les formations Paranoá et Paraopeba. La formation Paranoá est constituée d'un conglomérat surmonté d'une séquence de quartzites et de métasiltites. La formation Paraopeba regroupe des séquences pélitiques et carbonatées, et accessoirement des siltites, argilites, quartzites, ardoises et arkoses.

Le bassin du Paraná est caractérisé par sa couverture gréso-basaltique mésozoïque. Dans le bassin du Parnaíba des séries gréseuses jurassiques et crétacées (Mésozoïque moyen) ont largement recouvert les formations plus anciennes qui affleurent sur les bordures. Des sédimentations sableuses crétacé et tertiaire (Méso- et Cénozoïque) ont largement débordé les bassins paléozoïques, ces formations peuvent être retrouvées en couverture du socle.

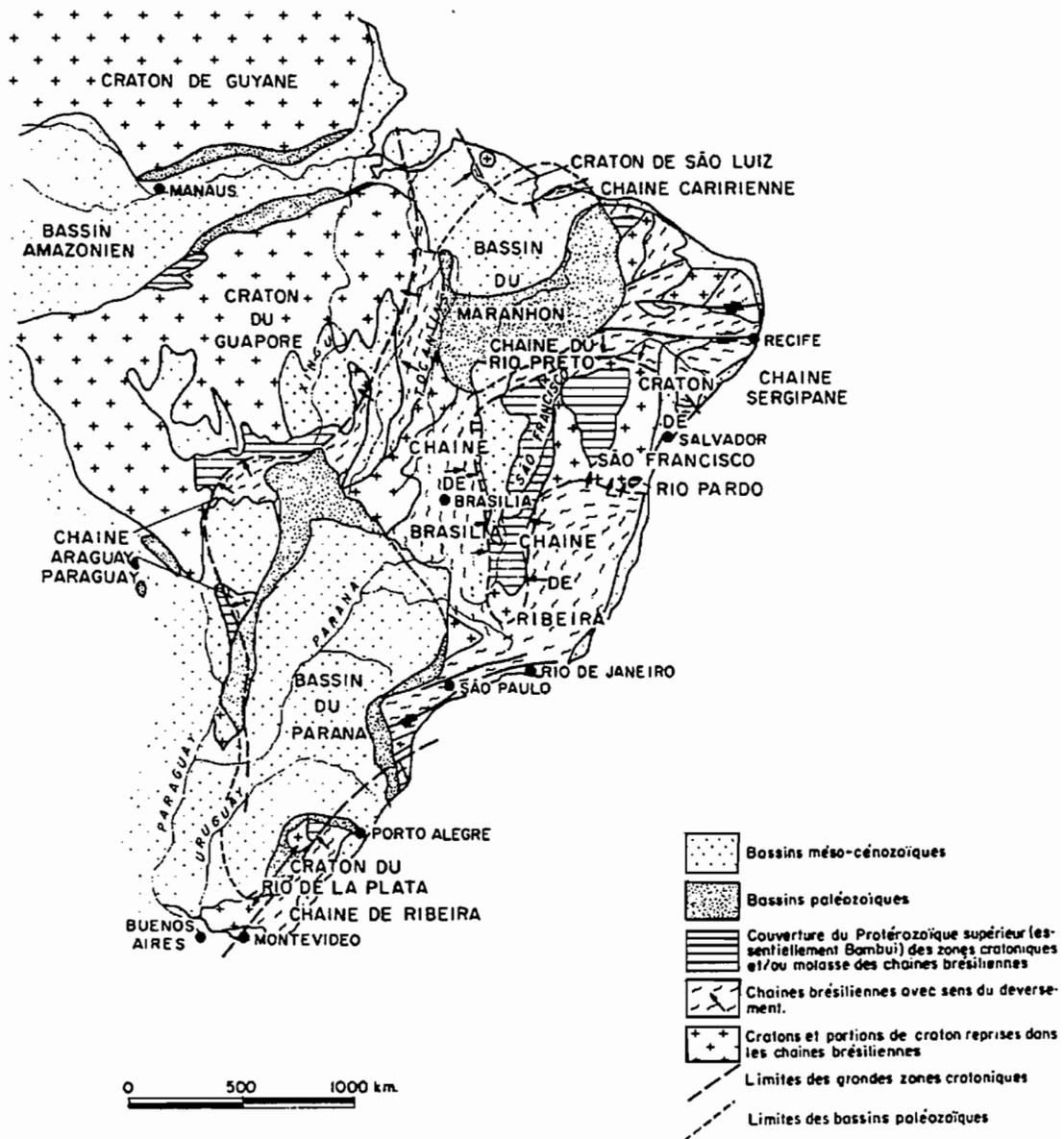


Figure 2.- Carte structurale schématique du Brésil (In Trompette et al., 1981).

3.- Le climat

Il est de type tropical sub-humide avec des précipitations annuelles moyennes de 1500 mm (65 % de la superficie des Cerrados reçoivent entre 1200 et 1800 mm et 86 % entre 1000 et 2000 mm par an). D'un point de vue pluviométrique, les Cerrados ont une position intermédiaire entre la forêt amazonienne et la caatinga (milieu semi-aride du nord-est brésilien). Près de 90 % des précipitations interviennent entre octobre et mars démarquant deux saisons bien distinctes, l'une humide et l'autre sèche (tableau 1).

Le maximum de précipitations est observé de décembre à mars, ces trois mois recevant à eux seuls environ la moitié des précipitations de l'année. Durant la saison humide, l'intervalle entre deux pluies est en général inférieur à 48 heures, les intensités peuvent atteindre 100 mm/24 h en décembre ou janvier (en décembre 1989 à Planaltina, dans le District Fédéral, 135 mm de pluies ont été enregistrés en une seule journée).

Des périodes d'une dizaine de jours sans pluies appelées "veranicos" peuvent intervenir en milieu de saison et causer d'importants dommages aux cultures. Durant ces périodes, le niveau d'évapotranspiration est élevé.

La saison sèche a une durée variant de 3 à 5 mois en liaison avec la proximité d'autres biomes comme la forêt amazonienne ou la caatinga. Au plus fort de cette période, les précipitations mensuelles peuvent atteindre zéro mm (Adámoli *et al.*, 1986). L'humidité relative de l'air est plus basse (20 % en moyenne au plus fort de la saison sèche contre 70 à 80 % en saison humide dans la région du District Fédéral) et l'évaporation plus importante (tableau 1).

Dans la partie sud des Cerrados, l'influence des masses polaires porte la moyenne annuelle des températures aux environs de 21°C.

Dans la partie nord, les altitudes sont plus faibles et les conditions climatiques tropicales voire équatoriales, la température moyenne annuelle est de 27°C.

Tableau 1.- Moyennes des précipitations, températures et évaporations enregistrées dans différentes stations de la province. Sources : * Bureau de Météorologie (1969), données de 1931 à 1960 ; ** : CODEPLAN (1976), données de 1961 à 1969.

Station (Altitude)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	/an	
	----- Saison Sèche -----													
Précipitations moyennes (mm)														
Formosa * (905 m)	252	204	227	93	17	3	6	3	30	127	255	343	1558	
Pirenópolis * (730 m)	245	250	241	135	28	5	2	5	45	164	238	337	1696	
Goiânia * (733 m)	234	210	198	110	30	5	10	3	36	143	237	271	1487	
Brasília * (1100 m)	231	239	195	122	46	4	5	2	43	152	279	260	1577	
Températures (°C)														
Formosa *	Max.	27	28	28	28	27	26	26	28	30	29	27	27	27,6
	Min.	18	18	18	17	15	13	13	14	16	18	18	18	16,2
	Moy.	22	22	22	22	20	19	19	21	23	23	22	22	21,3
Pirenópolis *	Max.	29	29	29	29	29	29	29	31	32	30	29	27	29,2
	Min.	18	19	18	17	15	12	12	14	17	18	18	19	16,6
	Moy.	23	23	23	22	21	19	19	22	23	23	23	22	21,9
Goiânia *	Max.	29	29	29	29	29	28	28	31	32	31	29	29	29,4
	Min.	18	18	18	16	13	10	10	11	15	17	18	18	15,2
	Moy.	23	23	23	22	20	19	19	21	23	24	23	23	21,9
Brasília **	Max.	27	27	28	27	25	25	25	27	28	28	27	26	26,6
	Min.	18	18	17	17	14	12	12	14	16	17	17	17	15,8
	Moy.	21	21	22	21	19	18	18	20	22	22	21	21	20,4
Évaporation moyenne (mm)														
Formosa *	73	64	67	75	98	113	141	188	189	138	75	61	1283	
Pirenópolis *	63	52	58	68	91	107	140	181	170	110	63	48	1150	
Goiânia *	77	68	75	88	105	116	147	195	191	141	86	72	1361	
Brasília **	102	76	89	105	126	144	171	234	256	157	105	98	1662	

4.- La végétation

Le mot “cerrado” en portugais signifie “fermé” ou “dense”. A l’origine, il était employé comme adjectif dans le terme “Campo cerrado” pour décrire un champ où parmi les plantes herbacées on pouvait trouver des arbres et arbustes, l’ensemble formant une étendue ouverte. Ce terme était opposé à “Campo limpo” (littéralement, “champ propre”) qui décrivait une prairie composée uniquement, ou presque, d’espèces herbacées. Ces termes sont repris dans la terminologie actuelle décrite ci-après (§ 4.1.). Aujourd’hui, au sens large le mot “cerrado” désigne une végétation étendue sur le plan régional formant une province floristique typique aux structures variées. C’est aussi au sens strict un type structural de cette formation végétale.

Le terme “cerrado” est employé selon deux concepts, l’un physionomiste, l’autre plus floristique. En termes de physionomie, le cerrado est une savane tropicale, biome où arbres et arbustes coexistent avec une végétation rase essentiellement formée d’espèces herbacées, le tout formant rarement une couverture arborescente continue. En termes floristiques, les cerrados possèdent une flore typique qui les distinguent des autres biomes du Brésil comme la forêt atlantique, la forêt amazonienne ou la caatinga.

Cinq sous-régions peuvent être définies en liaison avec les différents écosystèmes sud-américains qui entourent celui des cerrados : l’une au nord, subissant l’influence de l’Amazonie, une autre au nord-est à la frontière avec la caatinga (milieu semi-aride), une troisième au sud sous influence atlantique, une quatrième au sud-ouest sous influence d’un climat plus continental, et une dernière formant un noyau au centre de la province. **C’est dans ce noyau central que sont localisés nos sites d’étude.**

4.1.- Les différents types de végétation

La végétation naturelle de la région des Cerrados est composée de savanes sub-humides arborées plus ou moins denses et de formations forestières.

Eiten (1972), dans une étude synthétique sur le biome Cerrado, rappelle qu’il n’est pas aisé de préciser les limites entre les différentes structures de cette formation végétale. Les définitions des différents types varient bien souvent avec les auteurs. Pour la plupart des

botanistes brésiliens, il existe quatre types de structures physiologiques dans le biome Cerrado:

- “campo limpo”, (littéralement, “champ propre”), végétation herbacée de 50 à 70 cm de hauteur dominée par des graminées avec de très rares arbres et arbustes ;
- “campo sujo”, (littéralement, “champ sale”), la densité des arbustes est sensiblement plus grande que pour la catégorie précédente, la couverture arborée peut atteindre 6 % (tableau 2) ;
- “cerrado” (*sensu stricto*), savane présentant des strates herbacée, arbustive et arborée ;
- “cerradão”, végétation dominée par des arbres d’environ 15 mètres de hauteur et dont les cimes peuvent être jointives.

Tableau 2.- Composition botanique et couverture arborée (%) des types “campo sujo”, “cerrado” et “cerradão” à Planaltina, DF. Source : Ribeiro *et al.*, 1985.

	campo sujo	cerrado	cerradão
Nombre d’arbres/ha	203	911	2 231
Couverture arborée (%)	6	34	93

Parmi les formations forestières présentes dans la région, on distingue les forêts galeries présentes le long des cours d'eau et les forêts mésophytiques ou subcaducifoliées d'occurrence plus rare, qui occupent les interfluves de certains fleuves.

4.2.- Spécificité et diversité floristique des cerrados

Bon nombre des espèces des cerrados sont xéromorphiques. Les arbres et arbustes ont presque toujours une écorce épaisse, des branches et des troncs tortueux, surtout dans les zones où le feu n'est pas rare. Leurs feuilles sont souvent larges, épaisses, raides et glabres. La plupart des arbres sont capables de limiter leur transpiration aux moments les plus chauds de la journée (Válio *et al.*, 1966b). De nombreuses espèces des cerrados présentent des caractères scléromorphes en liaison avec l'accumulation d'une grande quantité d'aluminium dans leurs tissus notamment dans les feuilles (Haridasan, 1982). Ce phénomène tient son origine d'après

Goodland (1969, 1971a) de la nature des sols et notamment de leur teneur élevée en aluminium échangeable.

La flore des cerrados est considérée comme la plus riche du monde, spécialement pour ses espèces ligneuses. Des 774 espèces d'arbres et arbustes rencontrées dans les cerrados, la distribution de 429 d'entre-elles se limite à ce biome (Ratter & Dargie, 1992). Cette grande richesse spécifique (à titre de comparaison, 43 espèces seulement dans les Llanos du Venezuela) est en partie due à l'apport des forêts atlantique et amazonienne (Alho & de Souza Martins, 1995). Elle trouve également son origine dans la stabilité géologique et climatique de la région. Quant aux plantes vasculaires, le nombre d'espèces a été estimé à 1700 dans la zone de protection de la nature du District Fédéral (Área de Proteção Ambiental, APA). Dans l'ensemble de la province phyto-écologique, l'estimation est comprise entre 4 000 et 10 000 espèces.

Les espèces natives du cerrados sont traditionnellement utilisées en cuisine, médecine, artisanat ou pour la confection de cordage, la production d'huile, de résine, de liège et de latex (Eiten, 1972).

4.3.- Hypothèses sur la persistance des cerrados

Comment expliquer l'existence des cerrados dans des régions où les conditions climatiques permettraient l'existence d'une forêt ? Cette question a retenu l'attention des écologistes pendant longtemps. Finalement, après de vastes débats, les cerrados brésiliens apparaissent comme étant une végétation originale (Alvim, 1996). Leur présence n'est pas due à la destruction des forêts mésophytiques par le feu. Cette formation végétale serait due principalement à la condition chimique des sols (tableau 3) et au climat, le feu apparaissant comme un facteur secondaire (Eiten, 1993 ; Miranda *et al.*, 1996).

Tableau 3.- Comparaison des cerrados avec d'autres savanes en terme de disponibilité de l'eau et des nutriments. Source : IUBS, 1986.

Disponibilité en eau	Élevée	CERRADO (Brésil) LLANOS (Vénézuéla)	MIOMBO (Afrique)	SERENGUETI (Afrique)
	Faible	SAHEL (Afrique)		ASTREBIA (Australie)
		Faible	Disponibilité en nutriments	Élevée

II.- LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

Les "latossolos" de la classification brésilienne représentent près de 50 % de la surface de la région des Cerrados (tableau 4). Ils correspondent aux sols ferrallitiques de la classification française (CPCS, 1967), aux ferralsols du système FAO (FAO/UNESCO, 1974) et aux oxisols de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). L'importance relative des autres types de sols présents dans la région est donnée par le tableau 4. D'un point de vue granulométrique, les sols sableux ne couvrent que 15 % de la superficie de la province (Goedert, 1983).

Dans les sols ferrallitiques, l'altération des minéraux primaires (sauf le quartz) est pratiquement totale ; les argiles, toutes néoformées, sont des kaolinites ; les oxydes libres, bien cristallisés, sont abondants : gibbsite, goethite, hématite colorant le sol en ocre ou en rouge. La classification des latosols, au niveau taxonomique supérieur, tient compte essentiellement de critères liés à la minéralogie : couleur, teneurs en oxydes de fer et d'aluminium (au sens large, c'est-à-dire oxydes et oxyhydroxydes), indice Ki (rapport entre les teneurs moléculaires de SiO_2 et Al_2O_3 , indice de désilification). Ces oxydes de fer (s.l.) sont majoritairement présents dans la fraction inférieure à 2 μm , ou dans le cas de latosols concrétionnaires, dans des nodules ou concrétions ferrugineux. Aux niveaux taxonomiques inférieurs, la teneur en carbone organique de l'horizon A, le degré de saturation du complexe d'échange en bases et en aluminium, la classe texturale et la présence de concrétions latéritiques sont les principaux critères de classification.

La morphologie du profil est à peu près toujours la même, que le substrat soit un grès, une quartzite, un gneiss ou un basalte. Ce sont des sols moyennement à fortement drainés, profonds (de 2 à 10 m), présentant des micro-agrégats stables et caractérisés par une séquence d'horizons A, B et C peu différenciés. L'horizon B (horizon diagnostique) est de type latosolique, ses principales propriétés sont les suivantes (Camargo *et al.*, 1987) :

Tableau 4.- Les principales classes de sols des Cerrados (d'après Adámoli *et al.*, 1986).

Classif. Brésilienne	Classes		Superficie (%)
	FAO/UNESCO	Soil Taxonomy	
Latossolos (L)	Ferralsols	Oxisols	46,0
L. Concrecionários Laterfíticos	{ Acrisols Luvisols	Ultisols	2,8
Podzólicos	{ Acrisols Luvisols	{ Ultisols Alfisols	15,1
Terras Roxas	Nitisols	Alfisols	1,7
Cambissolos	Cambisols	{ Entisols Inceptisols	3,0
Litólicos	Lithosols	Entisols	7,3
Aerías Quartzosas	Arenosols	Entisols	15,2
Plintossolos	{ Luvisols Gleysols	{ Alfisols Inceptisols	6,0
Gley	Gleysols	Inceptisols	2,0

- épaisseur supérieure à 50 cm,
- capacité d'échange cationique (CEC), après élimination de la matière organique, inférieure à 13 cmol/kg,
- rapport limon/argile inférieur à 0,7
- indice Ki (établi d'après les résultats d'une attaque H₂SO₄) inférieur à 2,2,
- moins de 5 % (volumique) de fragments de roches,
- structure grumeleuse à polyédrique, fine ou très fine, très stable.

Dans la région des Cerrados, les deux principaux types sont les latosols rouge foncé (Latosolos Vermelho-Escuro, LE) et les latosols rouge jaune (Latosolos Vermelho-Amarelo, LV). Ces sols sont généralement préférés pour l'agriculture intensive. Les plus évolués se situent en général sur les plateaux ("Chapada"). Leur répartition géographique au sein de la province est donnée par la figure 3. Les sols de type LE se situent surtout au sud du 13^e parallèle S et l'unité LV en grande partie au nord du 20^e S.

La texture, la structure, la porosité et la consistance de ces deux types de sols sont comparables. Ils se distinguent par la couleur, la profondeur et les formes et teneurs en oxydes de fer (8 à 18 % de Fe₂O₃ pour LE et 7 à 11 % pour LV ; Camargo *et al.*, 1987).

L'importance relative des constituants est sous l'étroite dépendance de la lithologie (Volkoff, 1985). Le cas le plus général est l'association de quartz, kaolinite, hématite, goethite et de gibbsite. La substitution isomorphe par l'aluminium dans les structures des oxydes de fer est comprise entre 15 et 36 % de moles d'Al pour la goethite et entre 4 et 17 % pour l'hématite (Kämpf *et al.*, 1988). La teneur en limons est relativement constante (de 10 à 20 %). La teneur en argiles varie de 15 à 90 %, la plupart des sols ferrallitiques étant néanmoins argileux à très argileux. Elle est relativement constante tout au long du profil.

Près de 95 % des sols ferrallitiques sont dystrophiques, acides et ont une capacité d'échange cationique (CEC) faible (tableau 5). Les teneurs en calcium et magnésium sont en dessous des seuils critiques pour la nutrition des plantes. Le niveau de saturation en aluminium, supérieur à 50 %, est considéré comme toxique vis à vis de la plupart des plantes. Pour les espèces végétales non tolérantes, la présence excessive d'aluminium empêche le bon développement des racines et limite le prélèvement de nutriments. D'après Lopes & Cox (1977), 92 % des échantillons de surface des sols des Cerrados contiennent moins de 2 µg de phosphore par ml (extractible par la méthode de Mehlich). Une synthèse des connaissances relatives au phosphore dans les latosols brésiliens sera présentée dans le paragraphe III.

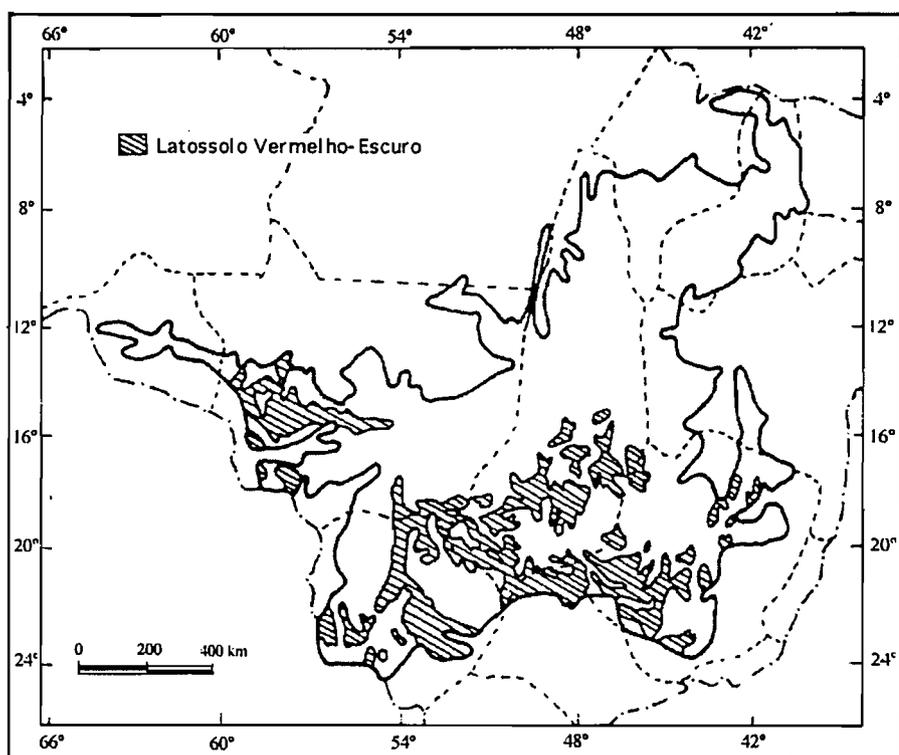
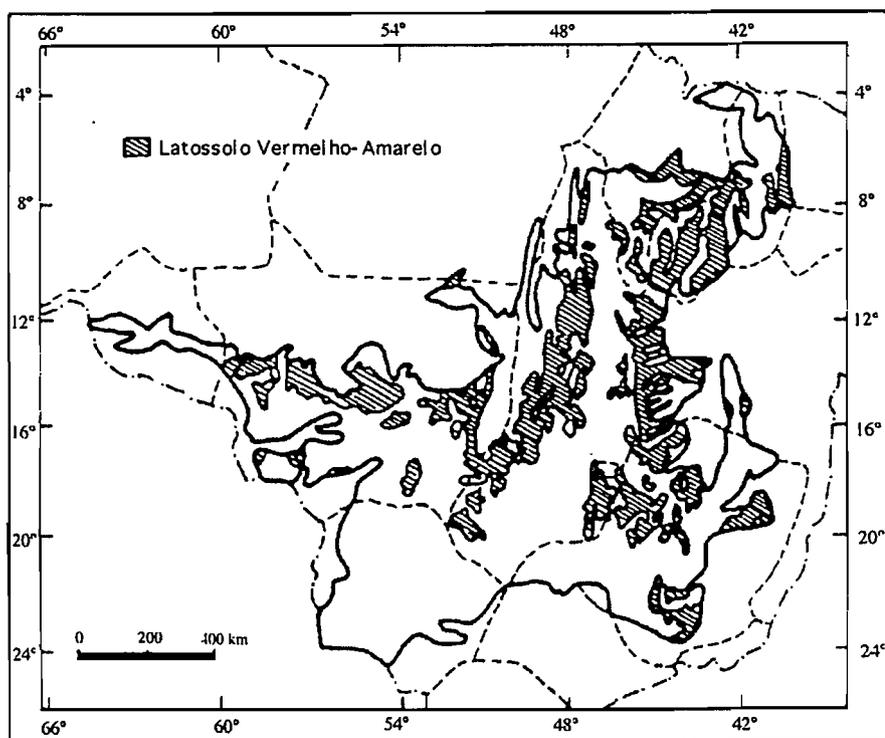
A**B**

Figure 3.- Distribution des unités dominantes de sols au sein de la province des Cerrados.
A : latossolo vermelho-escuro, B : latossolo vermelho-amarelo (d'après EMBRAPA/SNLCS, 1981).

Tableau 5.- Caractéristiques chimiques et physiques des 20 premiers centimètres de cinq latosols des Cerrados (DF) (source : Smyth & Sanchez, 1982).

Sol	pH (H ₂ O)	C org. %	Cations échangeables					CEC	Sat. Al %	Argiles (< 2 µm)		P Mehlich µg/ml
			Al	Ca	Mg	K	Fe ₂ O ₃ %					
			cmol/kg sol									
Latosol rouge foncé (LE)	4,6	1,8	0,74	0,46	0,12	0,05	1,37	54	73	11,9	1,0	
Latosol rouge foncé (LE)	4,6	2,6	1,93	0,63	0,19	0,10	2,85	68	46	7,3	0,8	
Latosol rouge jaune (LV)	4,6	2,2	0,60	0,28	0,08	0,07	1,03	58	65	7,5	0,4	
Latosol rouge jaune (LV)	4,7	1,5	0,67	0,29	0,09	0,13	1,18	57	35	8,6	0,4	
Latosol rouge jaune (LV)	4,6	1,0	0,63	0,31	0,06	0,08	1,08	58	24	2,4	0,5	

Fe₂O₃ % déterminé par extraction Citrate-Bicarbonate-Dithionite



En bref...

- Les sols des Cerrados sont développés sur des **matériaux géologiques anciens et variés**.

- Les sols eutrophes présents dans la région ne couvrent que 6 à 10 % des surfaces (Adámoli *et al.*, 1986). La plupart sont déjà cultivés depuis les années 70.

- Les principales contraintes, communes à la majorité des sols de la région, proviennent d'une **forte acidité**, d'un degré de saturation du complexe d'échange par l'**aluminium** élevé, et d'une **disponibilité en nutriments faible**, notamment en **phosphore**.

- Un drainage efficace favorise dans les latosols la lixiviation de la silice (rapport Ki faible), d'où la néoformation de **gibbsite** et le développement de charges électropositives.

- Les **latosols** représentent 46 % de la superficie des Cerrados et sont largement utilisés comme **supports de cultures ou de pâturages**. Actuellement, 13 Mha sont des surfaces occupées par les cultures annuelles et 45 Mha par des pâturages artificiels (projection des données de 1988 de l' IBGE, *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*, Institut de statistiques et de géographie).



III.- LE PHOSPHORE DANS LES LATOSOLS DE LA RÉGION DES CERRADOS

1.- Dynamique du phosphore dans les sols

L'utilisation de sols à des fins agricoles nécessite la compréhension des phénomènes régissant la dynamique du phosphore, qu'ils soient d'ordre abiotiques (adsorption/désorption) ou biologiques. Une nouvelle synthèse des réactions intervenant dans le cycle du phosphore a été proposée par Frossard *et al.* (1995).

1.1.- Phénomènes d'adsorption-désorption

Ces processus chimiques et physico-chimiques font passer les phosphates d'un état lié à la phase solide du sol vers la solution du sol et inversement.

La compréhension de ces phénomènes, dans un système complexe comme peut l'être le sol, passe par l'étude des mécanismes en systèmes simples. De nombreux auteurs ont étudié l'adsorption du phosphore sur les surfaces en utilisant des minéraux purs. Lorsqu'un orthophosphate en solution dans l'eau est mis en présence d'un oxyde, une réaction rapide et exothermique a lieu entre les groupes réactifs de surface (Me-OH ou $\text{Me-H}_2\text{O}^+$) et $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ (réaction de ligand). Ainsi un hydroxyle ou une molécule d'eau est libéré de la surface et un complexe phosphaté est formé à la surface de l'oxyde (Parfitt *et al.*, 1976, 1977 ; Goldberg & Sposito, 1985 ; Torrent *et al.*, 1990, 1992). Dans les sols à pH acide et à teneur élevée en oxydes de fer et d'aluminium, l'échange entre les ions phosphates et la phase solide du sol est décrit par des réactions d'adsorption-désorption. Dans ces sols, l'adsorption des ions phosphates est liée aux teneurs en formes amorphes du fer et de l'aluminium (Freese *et al.*, 1995). Une nouvelle méthode d'étude des phénomènes de désorption à long terme des ions phosphates est proposée par Freese *et al.* (1995b), elle utilise des membranes de dialyse remplies d'oxydes de fer synthétique (ferrihydrite).

Il est également admis que la concentration des ions phosphates dans la solution contrôle la quantité de phosphore adsorbée sur les surfaces.

La quantité d'oxydes conditionne la capacité d'adsorption du sol, mais il faut également considérer la nature, l'organisation et la surface spécifique de ces oxydes (Frossard *et al.*, 1992). Ainsi la goethite, par l'accessibilité de ses groupements -OH de surface, a un pouvoir d'adsorption vis à vis du phosphore plus élevé que l'hématite. La quantité de phosphates adsorbés sur les surfaces de la goethite peut atteindre 5 $\mu\text{mol P. m}^{-2}$ contre seulement 0,97 $\mu\text{mol P. m}^{-2}$ pour l'hématite (Barrón *et al.*, 1988 ; Ognalaga *et al.*, 1994).

Les monoesters de phosphate, le *myo*-inositol hexaphosphate et les phosphonates sont des composés phosphatés qui s'adsorbent sur les mêmes sites que les ions phosphates (Shang *et al.*, 1990 ; Shang *et al.*, 1992 ; Ognalaga *et al.*, 1994). D'autres composés organiques peuvent également diminuer la capacité d'adsorption du P par effet compétiteur pour les mêmes sites (Hue, 1991). C'est le cas de certains acides aliphatiques (tels que les acides citrique, malique et oxalique) ou, à un moindre degré, les acides aromatiques et phénoliques. Les composés organiques peuvent aussi chélater les métaux, les empêchant ainsi de former des complexes avec les phosphates (Earl *et al.*, 1979). Par contre, certains composés organiques peuvent augmenter l'absorption des ions phosphates. Les groupements chélate, citrate ou formate peuvent extraire les ions métalliques des surfaces minérales créant ainsi d'autres sites potentiels pour les ions phosphates (Traina *et al.*, 1986a).

La destruction de la matière organique par H_2O_2 peut augmenter l'accessibilité des sites d'adsorption (Frossard *et al.*, 1992b). La stabilité des oxydes conditionne également la formation de complexes Ligand-métal. Ainsi, la dissolution des oxydes de fer (Stumm *et al.*, 1983) ou d'aluminium (Lin & Benjamin, 1990) peut modifier l'adsorption des ions phosphates. Les complexes substances humiques-Fe ou -Al formés sont capables d'adsorber des ions orthophosphates (Levesque & Schnitzer, 1969 ; Cegarra *et al.*, 1978 ; Bloom, 1981 ; Gerke & Hermann, 1992). Par exemple, les complexes acides humiques-goethite extraits de sols ferrallitiques peuvent adsorber plus de 100 $\mu\text{mol P. g}^{-1}$ et ce en dépit d'une surface spécifique faible (1 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) (Fontes *et al.*, 1992).

Les minéraux argileux adsorbent beaucoup moins les ions phosphates que ne le font les oxydes. Ils présentent deux sites d'adsorption 1) sur les surfaces chargées négativement et 2) au niveau des bords des couches Al où les groupements Al(OH) présentent la même réactivité que ceux des surfaces des oxydes d'aluminium. L'adsorption du P sur les argiles de type 1:1 est fonction de la surface spécifique (Schwertmann & Herbillon, 1992).

Les phénomènes d'adsorption-désorption sont sensibles aux variations de pH. Le chaulage des sols acides peut augmenter, diminuer ou être sans effet sur l'adsorption du P (Haynes, 1982). L'assèchement du sol augmente l'adsorption du P (Bramley *et al.*, 1992).

1.2.- Phénomènes biologiques

La plante prélève de façon active (pompe ATPasique, co-transport H^+) dans la solution du sol les ions phosphates dont elle a besoin (Anderson, 1980). Les micro-organismes du système sol-plante sont très actifs, notamment dans les vingt nanomètres entourant le rhizoplan. Ces micro-organismes excrètent des ions H^+ et des acides organiques qui permettent par acidification, chélation, ou réduction, l'augmentation de la désorption du P adsorbé sur les particules du sol. Les micro-organismes ont un rôle primordial dans le cycle et la disponibilité du phosphore (Frossard *et al.*, 1993 ; Richardson, 1994).

La production de phosphatases par les plantes ou les micro-organismes permet une mobilisation du phosphore organique, lorsque les apports en phosphore inorganique limitent la croissance des plantes.

2.- Les ions phosphates dans les latosols brésiliens

Le phosphore est considérée comme l'un des principaux obstacles à la productivité des latosols. Ces sols présentent un pouvoir fixateur élevé vis à vis des ions phosphates et/ou une réserve en P faible (Roche *et al.*, 1980). Le contenu en phosphore total est relativement peu élevé, généralement entre 250 et 350 mg P/kg sol .

2.1.- Capacité d'adsorption des ions phosphates

D'une manière générale, la valeur du pouvoir fixateur (P_{Fix}) tient à la nature des constituants minéraux secondaires tels que les oxydes de fer, d'aluminium et les argiles. Le P_{Fix} est nettement corrélé à la teneur en argiles granulométriques d'une part, et à la teneur en fer total d'autre part (Frossard *et al.*, 1992).

Les sols les plus fixateurs sont ceux dont les teneurs en argiles et en fer total sont respectivement supérieures à 20 et 6 % (Brossard & Frossard, 1992), ce qui est le cas dans les latosols brésiliens. D'après Mesquita Filho & Torrent (1993), pour les latosols dont les teneurs en matière organique sont relativement faibles, l'adsorption du P peut être estimée par l'étude des caractéristiques minéralogiques.

A l'aide d'isothermes d'adsorption conduites sur une collection de latosols brésiliens, Sharpley (1988) montre la relation existant entre l'adsorption des ions phosphates et les teneurs en argiles granulométriques, en carbone organique des sols et en phosphore de l'extrait résine.

La liaison entre la teneur en argiles granulométriques et l'adsorption des ions phosphates est en accord avec les travaux antérieurs (Juo & Fox, 1977 ; Mc Calister & Logan, 1978 ; Syers *et al.*, 1971). La relation avec la teneur en carbone a déjà été observée par Harter (1969) et López-Hernández & Burnham (1974).

Curi *et al.* (1986) observent pour 14 oxisols du Brésil une faible corrélation entre l'indice d'adsorption des ions phosphates et la teneur en argiles granulométriques. Pour les oxisols brésiliens, la teneur en particules de taille inférieure à 2 μm est un paramètre moins déterminant, pour l'adsorption des ions phosphates, que la nature même de cette fraction. Ainsi, Curi & Camargo (1988) relie la variabilité de l'indice d'adsorption maximale des phosphates (P_{max}) aux rapports moléculaires $\text{SiO}_2/[\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]$ (Kr) ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki).

La couleur de la fraction argileuse est indicatrice de la teneur en oxydes de fer (bonne corrélation avec le rapport $\text{Go}/(\text{Go} + \text{Ht})$) mais aucune relation directe n'a été mise en évidence entre la couleur de la fraction fine et le degré d'adsorption des phosphates (Fontes & Weed, 1996).

2.2.- Extractibilité et désorption des ions phosphates

Une étude conduite par Lopes en 1975 indique que les latosols ont des teneurs en phosphore (méthode Mellich (1954) : (H_2SO_4 0,025 N + HCl 0,05 N), rapport sol/solution 1/4), dans les horizons superficiels comprises entre 0,1 et 16,5 $\mu\text{g P. ml}^{-1}$; 92 % d'entre-eux contenant cependant moins de 2 $\mu\text{g P. ml}^{-1}$ (Lopes & Cox, 1977 ; Le Mare, 1982). De nombreuses plantes peuvent présenter une carence nutritionnelle, difficile à combler du fait du haut pouvoir fixateur de ces sols vis-à-vis des ions phosphates.

Ker (1995) montre que les teneurs en ions phosphates désorbés par une résine (4 extractions successives) sont positivement corrélées aux rapports Ki ou Kr. En d'autres termes, lorsque le caractère gibbsitique ou oxique du sol augmente, le taux de désorption des ions phosphates de la phase solide est moins élevée. Dans cette étude, les surfaces spécifiques (méthode éthylène glycol) de la goethite et de la gibbsite sont les paramètres contrôlant la dynamique de désorption.

2.3.- Conséquences agronomiques

L'apport d'engrais phosphatés se révèle bien souvent nécessaire pour l'obtention de rendements agricoles satisfaisants. De nombreux auteurs ont étudié la réponse des cultures et pâturages à l'apport d'engrais phosphatés (synthèse dans Lathwell, 1979 ; Miranda *et al.*, 1980 ; Sanchez & Salinas, 1981 ; Goedert *et al.*, 1982). Les quantités à apporter et le mode d'apport sont déterminés par le statut du sol en P assimilable et par sa texture. Pour un latosol argileux, un apport de 80 à 120 kg P/ha est nécessaire pour augmenter le statut en P assimilable (Mehlich, 1954) de 1 µg P/ml (EMBRAPA/CPAC, 1981). Les cultures développées sur ces sols sont sensibles à l'apport d'engrais (Lobato, 1982). La solution la plus efficace pour les cultures annuelles semble être donnée par le traitement suivant : chaulage suivi d'un apport de 80 à 100 kg P/ha avant la première culture puis apport de 25 à 50 kg P/ha par an (EMBRAPA/CPAC, 1981). Les effets résiduels de ces apports rendent cette dépense plus supportable économiquement.



En bref ...

Les latosols brésiliens ont un **pouvoir fixateur** vis à vis des ions phosphates élevé. La nature de la fraction fine, particulièrement les teneurs en oxydes de fer et d'aluminium et leurs surfaces spécifiques, contrôle les phénomènes d'adsorption.

Dans les latosols brésiliens, le **phosphore** apparaît comme un **élément carencé** pour de nombreuses plantes, l'apport d'engrais se révèle souvent indispensable pour accroître la productivité végétale mais paradoxalement peu d'études préliminaires relatives à la chimie du P, et notamment du P organique ont été réalisées. L'accent doit être mis sur la caractérisation des différents compartiments de P et leur degré de **disponibilité**. Il nous faut également comprendre quel est le **rôle de la matière organique** dans l'expression de la réserve de phosphore.



CHAPITRE II

LES SITES ÉTUDIÉS

I.- LE DISTRICT FÉDÉRAL

Le District Fédéral (DF) a été choisi pour sa position centrale au sein de la province phyto-écologique des Cerrados et pour la présence dans cette zone de sites naturels préservés. Il se situe entre les latitudes 15°30' S et 16°03'S et les longitudes 48°12'W et 47°25'W (figure 1).

1.- Géologie et géomorphologie

❖ La géologie du District Fédéral est caractérisée par des formations anciennes du Précambrien et des couvertures détritiques latéritiques du Tertiaire (figure 4A). Les formations Canastra et Araxá formées de schistes et de quartzites du Précambrien moyen sont présentes uniquement dans le sud ouest du District Fédéral. Les formations Paranoá et Paraopeba du groupe Bambuí formées de roches sédimentaires du Précambrien supérieur sont plus largement représentées. La couverture détritique présente dans la zone s'est développée par sédimentation dans les bassins formés au Tertiaire ; des mouvements tectoniques postérieurs sont responsables de la position sommitale actuelle de ces surfaces.

- ❖ Le District Fédéral est caractérisé par trois unités géomorphologiques (figure 4B) :
- des plateaux ou "chapadas",
 - des zones de dissection intermédiaire,
 - des zones de dissection intense.

Les "Chapadas" (57 % de la surface du DF) sont des plateaux à modelé plat ou légèrement ondulé, d'une altitude comprise entre 1000 et 1300 m. Les zones de dissection intermédiaire correspondent à des surfaces à modelé faiblement ondulé (pentes inférieures à 5 % et larges vallons) d'altitude comprise entre 800 et 1100 m. Ces surfaces sont parcourues par des cours d'eau secondaires. Les unités de dissection intense sont parcourues par les fleuves. Les fonds de vallée sont raccordés aux plateaux par des pentes plus ou moins raides (5 à 30 %).

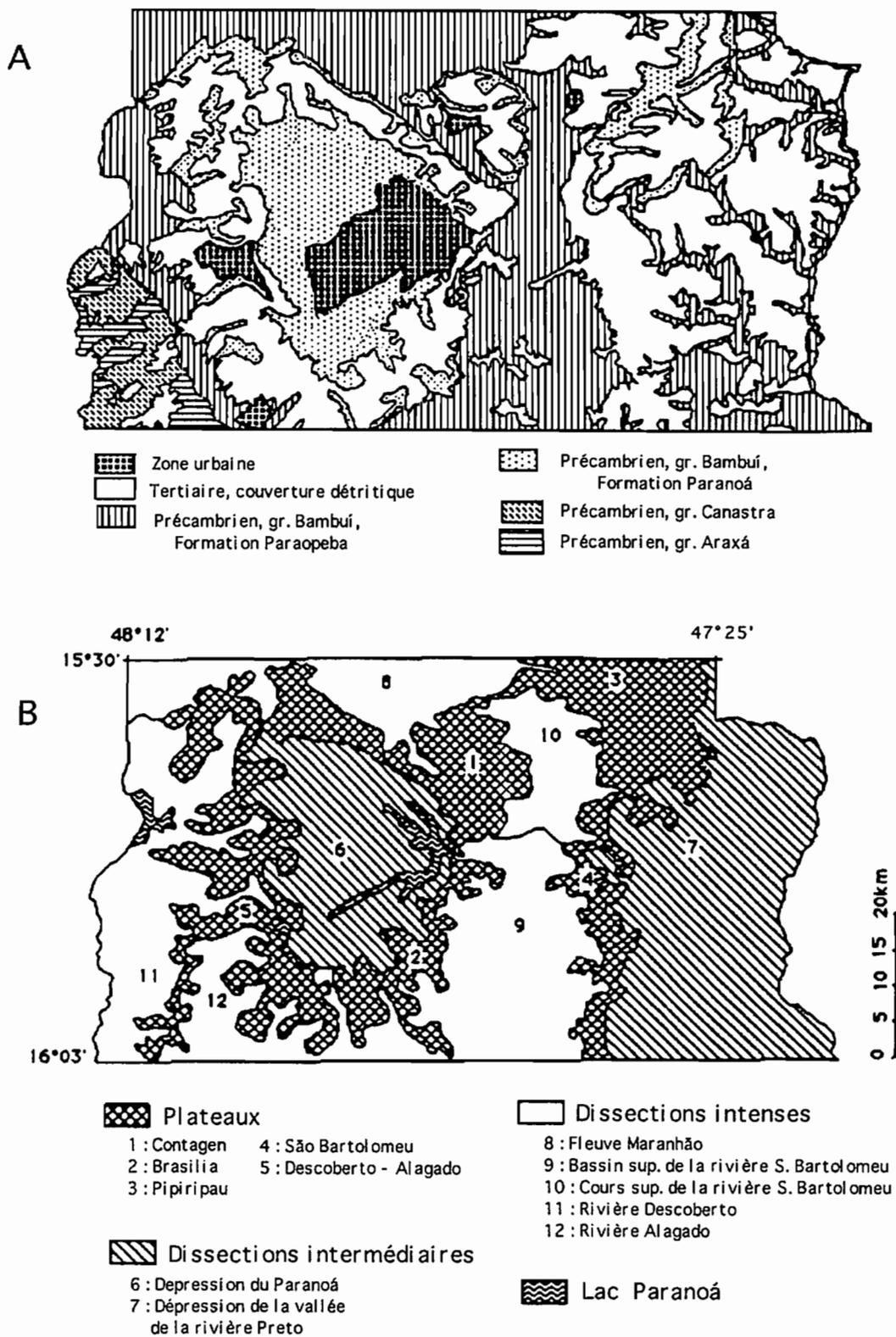


Figure 4.- Esquisse géologique (A) et géomorphologique (B) du District Fédéral.

Source : EMBRAPA-SNLCS, 1978 et Novaes Pinto, 1994.

2.- La couverture pédologique

2.1.- Les principaux types de sols

Plus de la moitié des surfaces du District Fédéral sont occupées par les latosols (tableau 6). D'autres types de sols sont également présents : cambisols, arénosols, sols hydromorphes et sols podzoliques.

Tableau 6.- Distribution des sols dans le District Fédéral (cf cartes au 1/100 000 ; EMBRAPA, 1978).

Classe de sols Système brésilien	Superficie	
	km ²	%
Latosolos		
Vermelho-Escuro (LE)	2 246	38,7
Vermelho-Amarelo (LV)	921	15,8
Podzólico Vermelho-Amarelo		
Eutrófico	120	2,1
Distrófico	48	0,8
Terra Roxa	75	1,3
Cambissolos	1 804	31,0
Aeria Quartzosa	31	0,5
Solos Hidromórficos	241	4,2
Zones urbaines, plans d'eau, ...	328	5,6
TOTAL	5 814	100,0

2.2.- Différenciation latérale de la couverture pédologique

Différents transects ont été étudiés à l'intérieur de la zone. Ainsi, Rodrigues (1977) et Rodrigues & Klant (1978) ont étudié la répartition des sols selon une succession géomorphologique : plateau - escarpement - glacis - plaine alluviale. Dans ce transect, la couverture pédologique est composée des sols suivants :

- sur le plateau : latosol rouge foncé argileux (LEa) et latosol rouge jaune argileux (LVa) passant à un latosol rouge jaune à texture moyenne (LVm) en bordure de plateau,
- au niveau de la transition plateau/escarpement : latérite hydromorphe (LH et parfois sol à gley peu humique (GH),
- sur l'escarpement : cambisol (C) et lithosol (SL),
- au pied de l'escarpement, localement : sol hydromorphe (LH, GH),
- sur le glacis : latosol argileux (LVa, LEa)
- au niveau de la plaine alluviale plus au moins bien drainée : sol hydromorphe (LH, GH).

En bordure de plateau, une texture plus sableuse est attribuée à la présence de quartzites. Ces roches déterminent aussi la présence de latérites hydromorphes (plinthosols) en bords de plateau par ralentissement de l'écoulement d'eau. Au pied de l'escarpement, la présence de sols hydromorphes est souvent due à la résurgence de l'eau infiltrée dans le plateau (sources).

Les variations latérales de la couverture pédologique sur les "chapadas" ont été étudiées en détails par Macedo & Bryant (1987) (figure 5). Selon ces auteurs, le passage LE-LV-LH est contrôlé par les conditions hydriques ; dans le cas de LE, la nappe phréatique se maintient toujours en dessous de 4 m de profondeur (jusqu'à 7,5 m pendant la saison sèche). Elle oscille entre 1,5 et 5,5 m de profondeur sous les LV et, entre la surface et 1,2 m pour les latérites hydromorphes (LH).

Les caractéristiques pédohydriques conditionnent également le type d'oxydes de fer formé. Des bonnes conditions de drainage favorisent la formation d'hématite (α -Fe₂O₃), un drainage insuffisant favorise la formation de goethite (α -FeOOH). Pour les LV, le fer libre est essentiellement sous la forme de goethite, alors que pour les LE c'est un mélange d'hématite et de goethite. Cette variation minéralogique est soulignée par une différence de teinte notamment dans les horizons superficiels : 7,5 YR à 10 YR pour les LV et 2,5YR à 5 YR pour les LE.

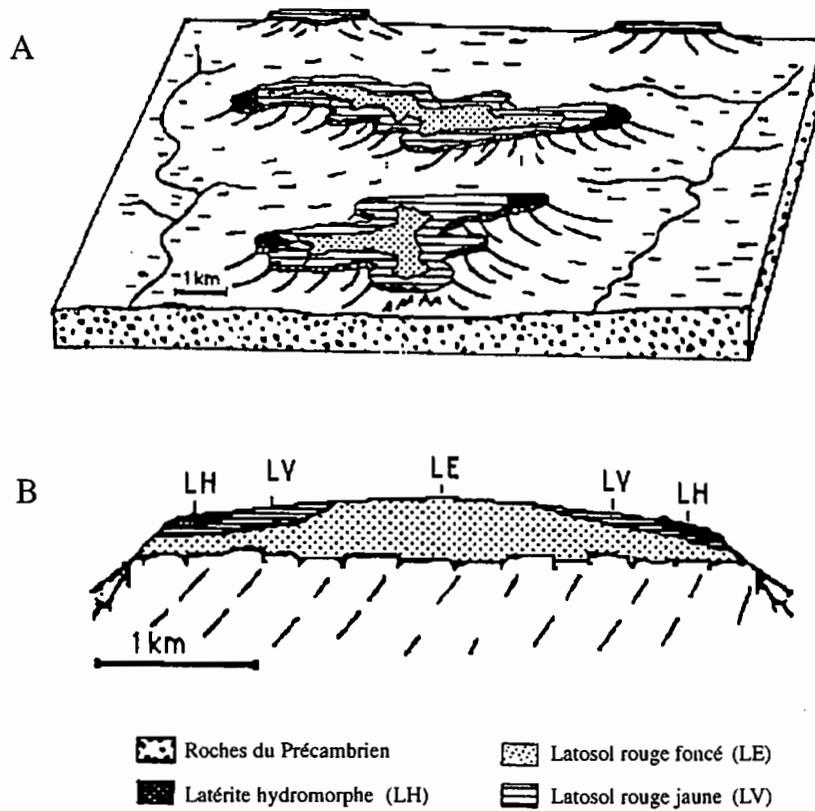


Figure 5.- Distribution des sols de la séquence étudiée par Macedo & Bryant (1987) (A) et séquence pédologique sur la "chapada" (B).

II.- LES SITES D'ÉTUDE

Les sites d'étude, localisés dans la région de Brasilia, ont été choisis de manière que leurs caractéristiques topographiques, pluviométriques et pédologiques soient relativement semblables.

1.- Rappels climatologiques

Les caractéristiques climatiques de la région de Brasilia sont rappelées dans la figure 6. La pluviométrie moyenne annuelle (1980-93) est de 1456 mm (station météo de la réserve écologique de l'IBGE) et la température moyenne annuelle est de 20,4 °C. Tout comme l'ensemble de la province des Cerrados, la région de Brasilia est caractérisée par deux saisons bien distinctes : une saison sèche et une saison humide.

La saison sèche intervient d'avril à septembre, les précipitations moyennes sont de 4 mm/mois. La rigueur de cette saison est déterminée par la présence de la Masse Tropicale Atlantique, de grande stabilité, qui reste stationnaire au dessus de la région centre ouest du Brésil durant ces mois de faible pluviosité. La saison humide peut être entrecoupée de périodes sèches de plusieurs jours appelées "veranicos".

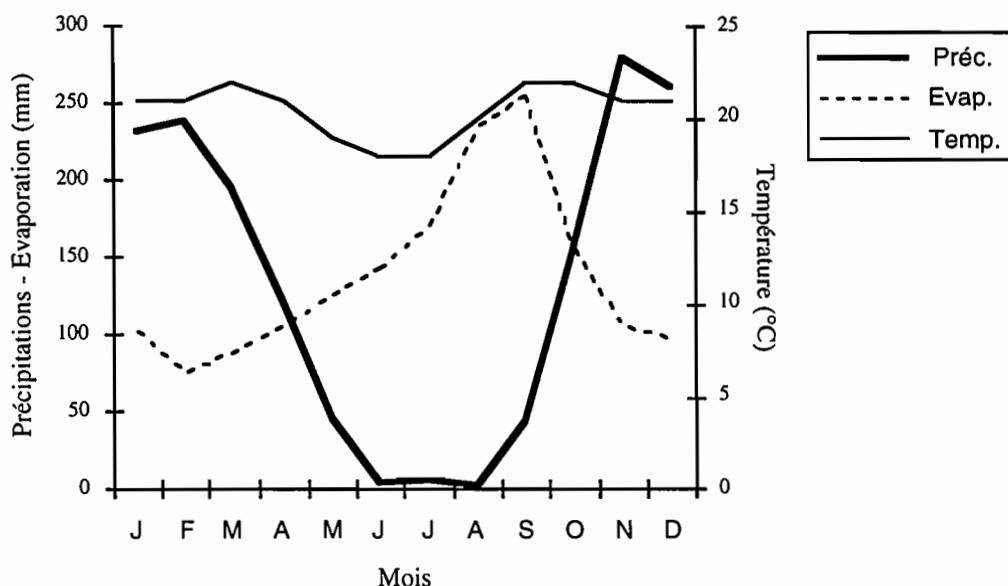


Figure 6.- Précipitations, taux d'évaporation et températures (valeurs mensuelles moyennes) à Brasilia (données de 1961 à 1969).

2.- Localisation et description des stations

2.1.- La réserve écologique de l'IBGE

La végétation de Cerrados couvraient plus de 90 % de la surface du DF avant la construction de Brasilia et l'implantation massive de populations, il y a un peu plus de trente ans. Récemment, quelques aires de protection ont été créées pour limiter l'extension agricole et préserver la diversité écologique de ces savanes naturelles.

L'une d'entre elles, l'aire de protection environnementale "Gama-cabeça do Veado", située à une vingtaine de kilomètres au sud de Brasilia couvre près de 10 000 ha. C'est dans cette zone qu'en 1975 fut créée la réserve écologique RONCADOR. Cette réserve, gérée par l'IBGE, est située sur la "chapada" de Brasilia ($15^{\circ} 57'S/47^{\circ}52' W$, figure 7) à 1 120 m d'altitude et recouvre 1360 ha de végétation naturelle préservée de toute intervention humaine.

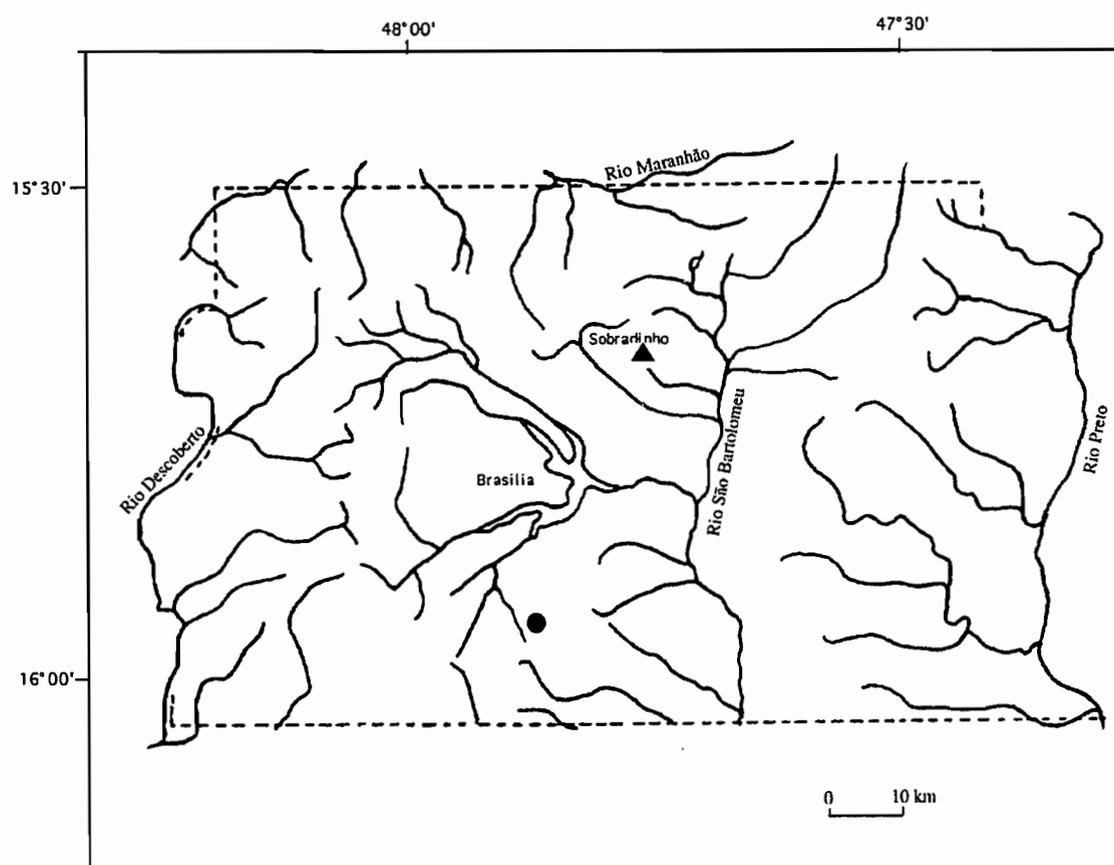


Figure 7.- Réseau hydrographique principal et localisation des sites dans le District Fédéral : réserve écologique de l'IBGE (●) et station expérimentale de l'EMBRAPA (▲).

Quelques infrastructures scientifiques sont implantées à l'entrée de la réserve :

- Laboratoires d'Écologie, d'Étude du Feu, de Zoologie et de Botanique,
- Herbarium regroupant 33 000 espèces,
- Collection zoologique de 200 000 espèces,
- Station agroclimatique,
- Bibliothèque spécialisée.

Cette station présente les différents faciès des savanes de la région. Cinq situations naturelles ont été choisies dans l'enceinte de la réserve (RON 1 à 5) ; elles permettent d'étudier le sol en relation avec différents types de végétation naturelle :

RON 1 : site sous végétation de Cerradão, savane arborée dense à espèces sclérophylles,

RON 2 : site sous végétation de Cerrado (s.s.), savane présentant des strates herbacée, arbustive et arborescente,

RON 3 : site sous végétation de Campo sujo, savane herbacée comprenant quelques arbustes et arbres,

RON 4 : site sous végétation Campo limpo, savane dominée par les graminées,

RON 5 : Site sous forêt galerie, en tête de talweg.

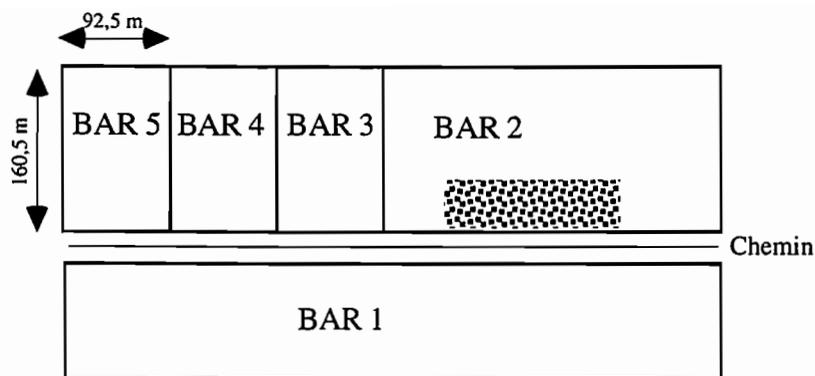
2.2.- La station expérimentale de l'EMBRAPA

L'objectif initial était de trouver un site naturel, un pâturage dégradé et une cinétique d'essais de réhabilitation du pâturage dans une même structure d'accueil, sur un même type de sol.

Différents types de pâturages à *Brachiaria brizantha*, site dégradé ou essais de réhabilitation, notamment par installation de cultures, ont été choisis au sein des parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA, organisme brésilien de recherche agro-pastorale.

La parcelle BAR 1 (figure 8) sert de témoin, elle est occupée par une végétation de Cerrado et sert parfois de pâturage extensif.

Les parcelles BAR 2, BAR 3, BAR 4 et BAR 5 formaient avant 1982 une unique parcelle. Les parcelles BAR 5, BAR 4 et BAR 3 furent respectivement délimitées pour les cycles culturels 1990/1991, 1991/1992 et 1992/1993 dans le but de réhabiliter la parcelle de pâturage en voie de dégradation. L'historique des parcelles est résumé dans le tableau 7.



- BAR 1 Cerrado parfois pâturé : Témoin
- BAR 2 Prairie de *Brachiaria brizantha* datant de 1982
- BAR 3 Prairie de 3 ans après une culture (cycle cultural 92/93)
- BAR 4 Prairie de 4 ans après une culture (cycle cultural 91/92)
- BAR 5 Prairie de 5 ans après une culture (cycle cultural 90/91)

 Bosquet

Figure 8.- Implantation actuelle des différents types de pâturages étudiés à la station expérimentale de L'EMBRAPA.

Tableau 7.- Historique des parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA.

Année	sites	Apports calcaire t/ha	Apports N/P ₂ O ₅ /K ₂ O (+ Micronutriments) kg/ha	Plantation	Remarques
1982	BAR 2 + 3 + 4 + 5	2	0/80/60 (+ 20)	<i>Brachiaria brizantha</i>	Cet ensemble formait alors une seule parcelle
1990/91	BAR 5	3,3	48/360/192 * (+ Zn)	Maïs en raies dans le pâturage et <i>Stylosanthes sp.</i>	La légumineuse <i>Stylosanthes</i> persiste jusqu'en 1994, année où la sécheresse et les parasites la déciment
1991/92	BAR 4	3,3	40/300/160 * (+ Zn)	Maïs en raies dans le pâturage et <i>Calopogonium sp.</i>	La légumineuse a mal germée et ne s'est pas développée
1992/93	BAR 3	3,3	40/300/160	Maïs en raies dans le pâturage	

* L'apport de fertilisants N/P/K sur les parcelles d'essais suit le rapport 4/30/16. La quantité théorique était de 500 kg par hectare. Suite à une erreur des techniciens chargés de l'application de l'engrais la parcelle BAR 5 a reçu 600 kg/ha. Les engrais ont été répartis à raison de 60 % dans la ligne de semis et de 40 % entre les lignes de semis ; l'espace entre lignes est de 0,4 m.

2.3.- Analyse floristique de la végétation naturelle

Les plantes des Cerrados présentent des caractères xéromorphes. La plupart tolèrent également le haut niveau de saturation du complexe d'échange des sols par l'aluminium ; certaines espèces sont même capables d'accumuler de grandes quantités d'aluminium dans leurs feuilles. Ces plantes appartiennent principalement aux familles des Melastomataceæ, Rubiaceæ et Vochysiaceæ ; elles peuvent accumuler jusqu'à 14 000 mg Al/kg de matière sèche (Haridasan, 1982). De nombreux auteurs attribuent la nature scléromorphique des plantes des Cerrados au manque de nutriments et à l'excès d'aluminium. Ce dernier réduirait le potentiel de prélèvement des plantes vis à vis de la plupart des nutriments et notamment du phosphore.

Un relevé floristique non exhaustif des stations sous végétation naturelle (RON et BAR 1) a été réalisé en juillet 1995 (annexe I). Il souligne la grande variété des espèces natives : 37 familles, 70 espèces dont 43 arborées, 17 arbustives et 6 herbacées. Il est évident que cet inventaire est fortement incomplet notamment pour les plantes herbacées monocotylédones. Toutes stations confondues, on compte 16 espèces de légumineuses dont 14 arbres. Le degré de parenté floristique entre les sites peut être approché par une analyse des similitudes entre les relevés (annexe I). Une analyse différentielle de Czekanowki a été effectuée à partir du coefficient de communauté de Jaccard, le site RON 5 (forêt galerie) étant exclu de cette analyse. Ce coefficient permet d'établir le rapport entre le nombre d'espèces communes à deux relevés et le nombre total d'espèces présentes dans ces derniers (figure 9). Trois grands ensembles peuvent être distingués : un premier groupe où plus de 40 % des espèces sont communes entre les relevés, un second entre 20 et 40 % et le dernier où moins de 20 % des espèces sont communes.

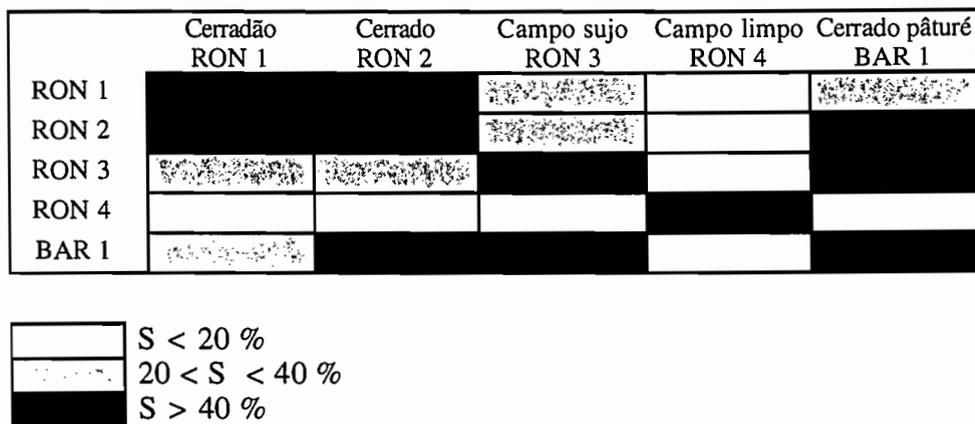


Figure 9.- Analyse différentielle des relevés floristiques par ordre d'affinité.

Les indices d'affinité entre les sites cerradão (RON 1) et cerrado (RON 2), d'une part et les sites cerrado, campo sujo (RON 3) et cerrado en pâturage extensif (BAR 1), d'autre part, sont élevés. Du fait même de sa grande diversité floristique, BAR 1 présente une certaine similitude avec les autres sites, sauf avec le campo limpo (RON 4), ce dernier se démarquant nettement des autres sites.

3.- Les sols

Les sols étudiés (tableau 8) sont des latosols argileux :

- **Dans la réserve de l'IBGE** (Profils RON) : 3 latosols rouges foncés (Latosolos Vermelho Escuro, LE), 1 latosol rouge jaune (Latosolo Vermelho Amarelo, LV) et 1 latosol jaune (Latosolo Amarelo, LA),
- **Dans la station expérimentale de l'EMBRAPA** : 5 Latosols rouges foncés (LE)

Tableau 8.- Correspondance entre le nom du site, la couverture végétale et le type de sol et position géographique des sites.

Site	Formation végétale	Sol	Coordonnées géographiques	
RON 1	Cerradão	LE	15°57,16 S	47°52,60 W
RON 2	Cerrado	LE	15°57,04 S	47°52,43 W
RON 3	Campo sujo	LV	15°57,94 S	47°52,09 W
RON 4	Campo limpo	LE	15°55,72 S	47°53,75 W
RON 5	Forêt galerie	LA	15°57,45 S	47°52,38 W
BAR 1	Cerrado pâturé	LE	15°38,80 S	47°44,87 W
BAR 2	Pâturage de 12 ans (<i>Brachiaria brizantha</i>)	LE	15°38,79 S	47°45,01 W
BAR 3 à 5	Essais	LE	"	"

Des fosses pédologiques ont été creusées jusqu'à une profondeur d'environ 210 cm sur tous les sites excepté pour les parcelles BAR 3, BAR 4 et BAR 5, ces sites expérimentaux de la station expérimentale de l'EMBRAPA ne pouvant être perturbés.

3.1.- Méthodes de prélèvements

Trois types de prélèvements ont été effectués en mai 1995 :

- Dans les fosses pédologiques, jusqu'à 210 cm de profondeur,

(1) prélèvements des horizons pédologiques identifiés. Ces échantillons servent à la caractérisation des sols (analyses granulométriques, mesure du pH, CEC, teneurs en aluminium échangeable, en oxydes de fer et d'aluminium). Les méthodes et les résultats chiffrés de ces analyses sont données en annexe (annexes III et IV).

(2) prélèvements systématiques par incrément de 10 cm ; ils permettent de dresser les profils des teneurs en carbone, azote, phosphore total, organique et inorganique des sols étudiés.

- Dans les parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA,

(3) prélèvements à la tarière jusqu'à 70 cm selon le découpage 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 et 50-70 cm. Dans chaque parcelle, un échantillon moyen de chaque strate est constitué par regroupement de 15 prélèvements distribués au hasard. Ce type de prélèvement a été le seul autorisé pour les parcelles d'essais. Les teneurs en C, N et P de ces échantillons sont mesurées. Pour les sites BAR, ce sont ces échantillons qui seront utilisés pour les expérimentations visant à caractériser les formes de P et la stabilité biochimique du phosphore organique. Ces échantillons seront notés BAR 1 à 5 m, la particule "m" symbolisant le fait que ce sont des échantillons moyens.

3.2.- Principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques

Remarque : les profils montrent tous des traces d'activités biologiques, notamment fourmis, termites et vers de terre même si ces derniers sont réticents à se laisser observer. Les fiches de terrain (annexe II) donnent plus de détails.

3.2.1.- Dans la réserve écologique du Roncador

3.2.1.1.- Latosols rouge foncé (LE)

❖ RON 1 et RON 2

Ces deux sites sont implantés sur le même plateau à environ 200 m l'un de l'autre, le premier supporte une végétation de "Cerradão" et le second un "Cerrado" typique.

Les caractéristiques de texture, porosité, consistance et structure des deux sols sont comparables. Ils sont argileux sur l'ensemble du profil (figure 10, annexe IV).

Les analyses minéralogiques pratiquées sur la fraction de taille inférieure à 200 μm révèlent la présence d'oxydes et d'oxyhydroxydes de fer, la plus grande partie étant sous forme de goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$). Lorsqu'elle est présente, l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ne compose pas plus de 8,5 % de cette fraction. Cette fraction granulométrique est dominée par la gibbsite ($\gamma\text{-Al(OH)}_3$). Les argiles représentent de 17,5 à 20 % de la composition minéralogique de la fraction < 200 μm pour RON 1. Ces quantités sont un peu plus faibles pour RON 2 (11,5 à 13 %). Elles sont essentiellement sous forme de kaolinite (argile 1:1), bien qu'on note parfois la présence d'interstratifiées.

Les trente premiers centimètres sont constitués par deux horizons de morphologie voisine, de couleur brun rougeâtre à rouge légèrement jaunâtre. La structure de ces horizons est fine, de type polyédrique sub-angulaire. Les teneurs en fer total sont élevées : 12 et 14 % respectivement pour RON 1 et RON 2 (annexe IV).

Hormis pour l'horizon superficiel, les profils de teneurs en carbone sont identiques. Dans les dix premiers centimètres, la teneur en carbone est de 4,2 % pour RON 1 (Cerradão) et 3,3 % pour RON 2 (Cerrado). La CEC effective, inférieure à 4 cmol/kg sol, est faible. Le complexe d'échange, très désaturé est dominé par l'aluminium (figure 10). La teneur en aluminium échangeable est plus élevée en RON 1 et explique les différences observées entre les deux profils jusqu'à un mètre de profondeur (11,1 cmol/kg sol contre 6,6 cmol/kg sol pour RON 2). Le pH varie entre 4,7 et 5,1.

Les horizons sous-jacents sont des horizons de transition de couleur rouge. Leur structure est fine, de type polyédrique. Le fer total représente de 12,5 % (RON 1) à 14,7 % (RON 2), essentiellement sous la forme d'oxydes (s.l., cf annexe IV : Fe_2O_3 CBD).

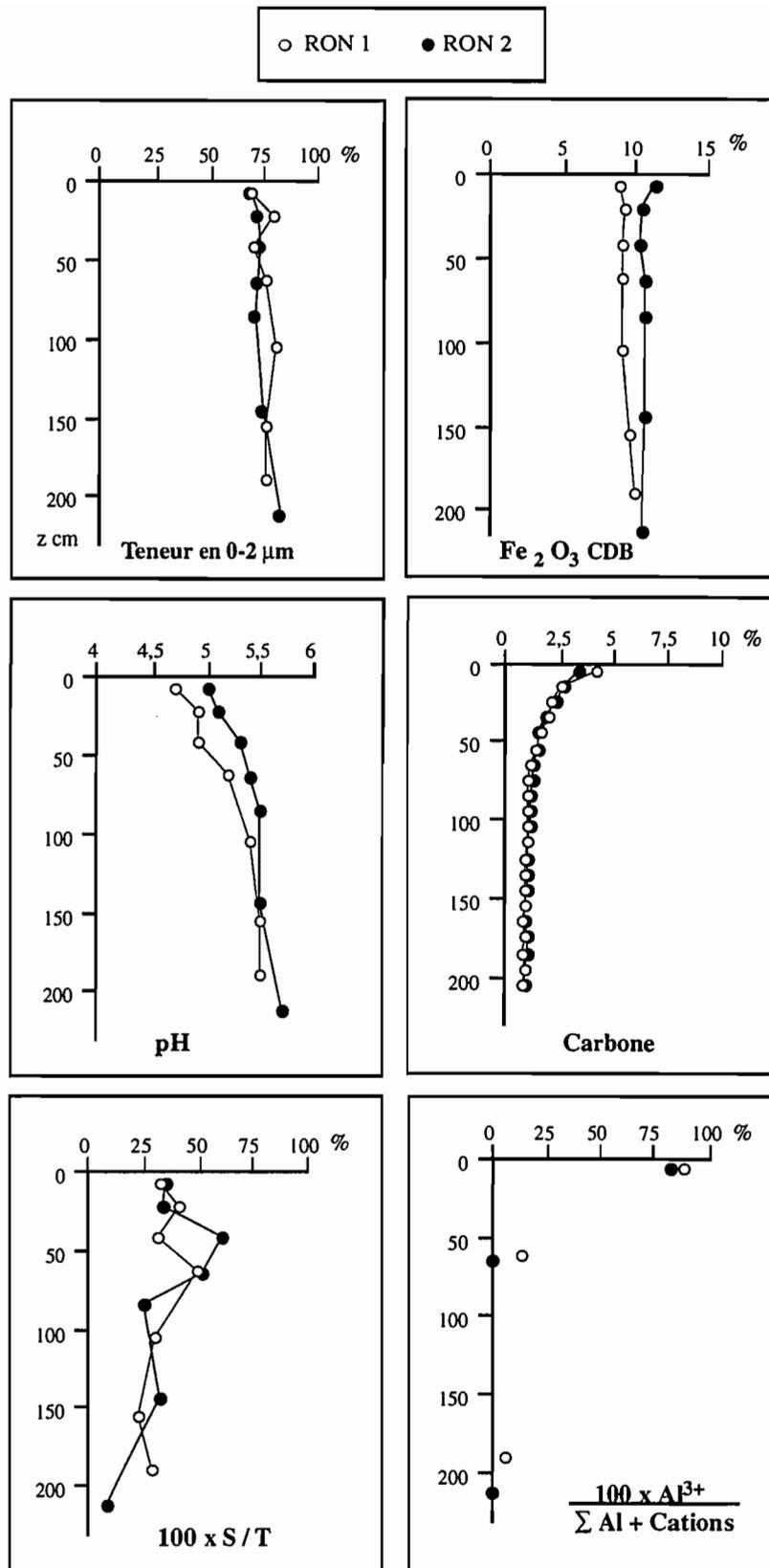


Figure 10.- Principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous Cerradão (RON 1) et Cerrado (RON 2).

Les teneurs en carbone diminuent progressivement pour atteindre 1 % dans la partie inférieure de cet ensemble de transition. Les valeurs de CEC effective se situe aux environs de 3 cmol/kg sol, le taux de saturation du complexe d'échange en bases (S/T) reste faible mais il n'est plus dominé par l'aluminium.

Après 70 cm de profondeur pour RON 1 et 95 cm pour RON 2, les horizons sont tachetés. Les deux sites sont plus différenciés que dans le haut du profil. La structure de cet ensemble est toujours de type polyédrique.

De 70 à 170 cm, RON 1 présente un horizon rouge avec de rares taches rouge foncé et des taches rouge jaunâtre de petite taille dont le nombre augmente avec la profondeur. Dans le bas du profil, le sol de couleur rouge jaunâtre présente des zones rouges à structure grumeleuse fine très nette.

Le profil RON 2 développe après 95 cm de profondeur un horizon rouge comprenant de rares taches rouge plus foncé. Le fond du profil (environ 2 m) est occupé par un ensemble bariolé rouge/rouge jaunâtre à structure polyédrique fine. Les zones rouge jaunâtre sont formées par un matériel plus argileux.

Quel que soit le site, ces horizons profonds ont un complexe d'échange désaturé mais à l'inverse des horizons superficiels, dépourvus d'aluminium échangeable. Le pH est de 5,5. Ces horizons contiennent environ 1 % de carbone.

❖ RON 4

La formation végétale, essentiellement composée d'espèces herbacées est appelée Campo limpo.

La fraction de taille inférieure à 200 µm se compose essentiellement de gibbsite (63 % en surface et 53 % en profondeur), de goethite et d'argile. L'hématite est présente en faible quantité dans le bas du profil.

Le premier horizon, de 10 cm d'épaisseur, a une texture argilo-limoneuse (figure 11, annexe IV) avec 47,4 % de particules de taille inférieure à 2 µm et 37,2 % de limons. La structure est fine, de type polyédrique, elle présente un débit prismatique moyen à grossier en saison sèche. Cet horizon est brun rougeâtre. La teneur en fer total est de 15,6 %, ce fer se trouve essentiellement sous la forme d'hydroxydes (annexe IV).

La teneur en carbone (4,8 %) est supérieure à celle des horizons superficiels des sols sous Cerradão et Cerrado (RON 1 et RON 2). La CEC effective est faible (2,9 cmol/kg sol).

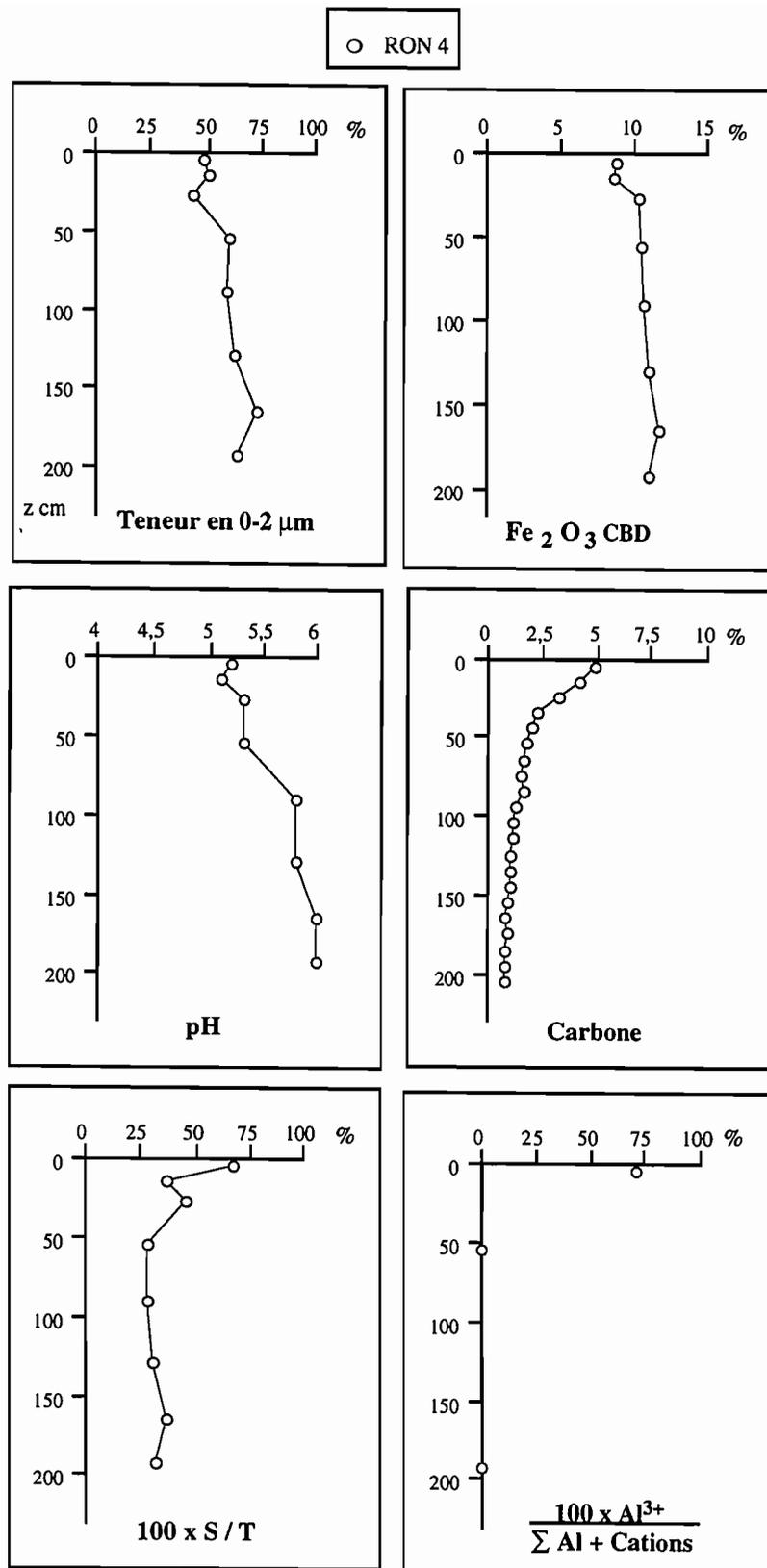


Figure 11.- Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous Campo limpo (RON 4).

Le taux de saturation en bases est de 66 % mais le complexe d'échange est dominé par l'aluminium. Le pH dans l'eau est de 5,2.

Les deux horizons sous-jacents sont rouge jaunâtre, compacts et forment un ensemble de transition qui s'étend de 10 à 35 cm de profondeur. La texture est argilo-limoneuse ; la teneur en argiles granulométriques est comprise entre 51 et 43 % (figure 11) et le rapport Limons/Argiles reste élevé. La structure est constituée de petits polyèdres. L'horizon le plus basal de cet ensemble (BA) présente quelques taches d'assez bon contraste, certaines sont brunes, d'autres rouges. Quelques petits nodules rouges violets ont été trouvés à la base de cet horizon.

Comme pour les sites RON 1 et RON 2, la teneur en carbone diminue progressivement avec la profondeur mais elle reste supérieure à celle observée pour ces sites. Le taux de saturation en bases échangeables est de 37 et 45 % respectivement (contre 66 % dans l'horizon A), la teneur en aluminium échangeable reste élevée. Le pH est légèrement supérieur à 5.

L'ensemble suivant est formé de trois horizons de structure polyédrique fine, de couleur rouge (2,5 YR 4/8). Le premier horizon développe quelques petites taches ovoïdes d'un rouge un peu plus soutenu ; certaines semblent en voie d'induration. Leur nombre et leur taille augmentent avec la profondeur. Ces zones rouge légèrement foncé ont une structure agrégée peu développée et sont plus compactes. A partir de 75 cm de profondeur, elles sont accompagnées de rares taches rouge jaunâtre de petite taille. Les nodules rouges violets trouvés dans l'horizon de transition supérieur sont ici plus nombreux. La teneur en fer total est relativement constante (16,6 %). La proportion de la fraction 0-2 μm s'élève jusqu'aux environs de 60 %, tandis que la teneur en limons diminue (environ 25 %).

La teneur en carbone est de 2 % dans la partie haute de cet ensemble et de 1 % à sa base. Quelques charbons fins ont été trouvés. La CEC se maintient aux environs de 2,6 cmol/kg sol. Le complexe d'échange est désaturé mais, contrairement aux horizons sus-jacents, dépourvu d'aluminium échangeable. Le pH augmente progressivement, il est de 5,8 à la base de l'horizon Bw₃.

L'ensemble suivant est composé par l'horizon Bw₄ (de 155 à 175 cm de profondeur). Il est constitué de deux phases, faiblement contrastées, juxtaposées et d'importance pratiquement égale ; une phase à structure polyédrique sub-angulaire fine à moyenne, de couleur rouge et une phase microagrégée rouge jaunâtre apparemment plus argileuse. La texture de cet horizon est argileuse avec 73 % de particules de taille inférieure à 2 μm , la teneur en fer total reste constante (16,4 %). Les nodules rencontrés sont peu nombreux et de couleur rouge.

La teneur de carbone est encore de 0,9 %. La CEC est de 2,7 cmol/kg sol et le taux de saturation du complexe d'échange par les bases est de 36 %, soit une valeur légèrement supérieure à celle de l'ensemble sus-jacent. La teneur en gibbsite dans la fraction de taille

inférieure à 200 µm est élevée. La teneur en aluminium échangeable de cet ensemble est nulle. Le pH est de 6.

Au delà de 175 cm de profondeur, les deux phases ne se distinguent plus que par leur différence de structure. Elles sont toutes deux rouges (2,5 YR 4/6). La phase à structure polyédrique sub-angulaire est dominante. La teneur en argiles granulométriques est de 63 %. Aucun nodule n'a été observé.

La teneur en carbone reste stable (0,8 %). Le complexe d'échange est désaturé et dépourvu d'aluminium échangeable.

3.2.1.2.- Latosol rouge jaune (LV)

Ce sol, présent sur le site RON 3, supporte une végétation de type Campo sujo.

L'analyse minéralogique de la fraction fine indique une dominance de la gibbsite (56 à 67 %). Les argiles (11 à 13 %) et la goethite (13 à 16 %) sont également présentes à un degré moindre. L'hématite n'apparaît qu'en profondeur et en faible quantité (6 %).

Le premier horizon, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, est de couleur brun rougeâtre (5 YR 4/4). Sa structure est de type polyédrique fine. La teneur en particules de taille inférieure à 2 µm est de 57 %, le rapport Limons/Argiles est de 0,5 (figure 12, annexe IV). La teneur en fer total est de 13,6 % ; il se présente essentiellement sous forme cristallisée (goethite).

La teneur en carbone est de 4,2 %. La CEC effective est faible (2,8 cmol/kg sol). Le taux de saturation du complexe d'échange est de 66 %, les deux tiers étant occupés par l'aluminium échangeable. Le pH est de 5,3.

Les deux horizons sous-jacents forment un ensemble de transition qui s'étend jusqu'à 55 cm de profondeur. L'horizon AB est brun rougeâtre et l'horizon BA rouge jaunâtre. Les teneurs en argiles granulométriques sont de 58 et 66 % respectivement. La structure est fine, de type polyédrique.

Les teneurs en carbone sont de 3,3 et 2,3 %. La CEC effective reste constante mais le taux de saturation du complexe d'échange par les bases diminue. Il n'est que de 20 % à la base de cet ensemble. Le pH est de 5,2.

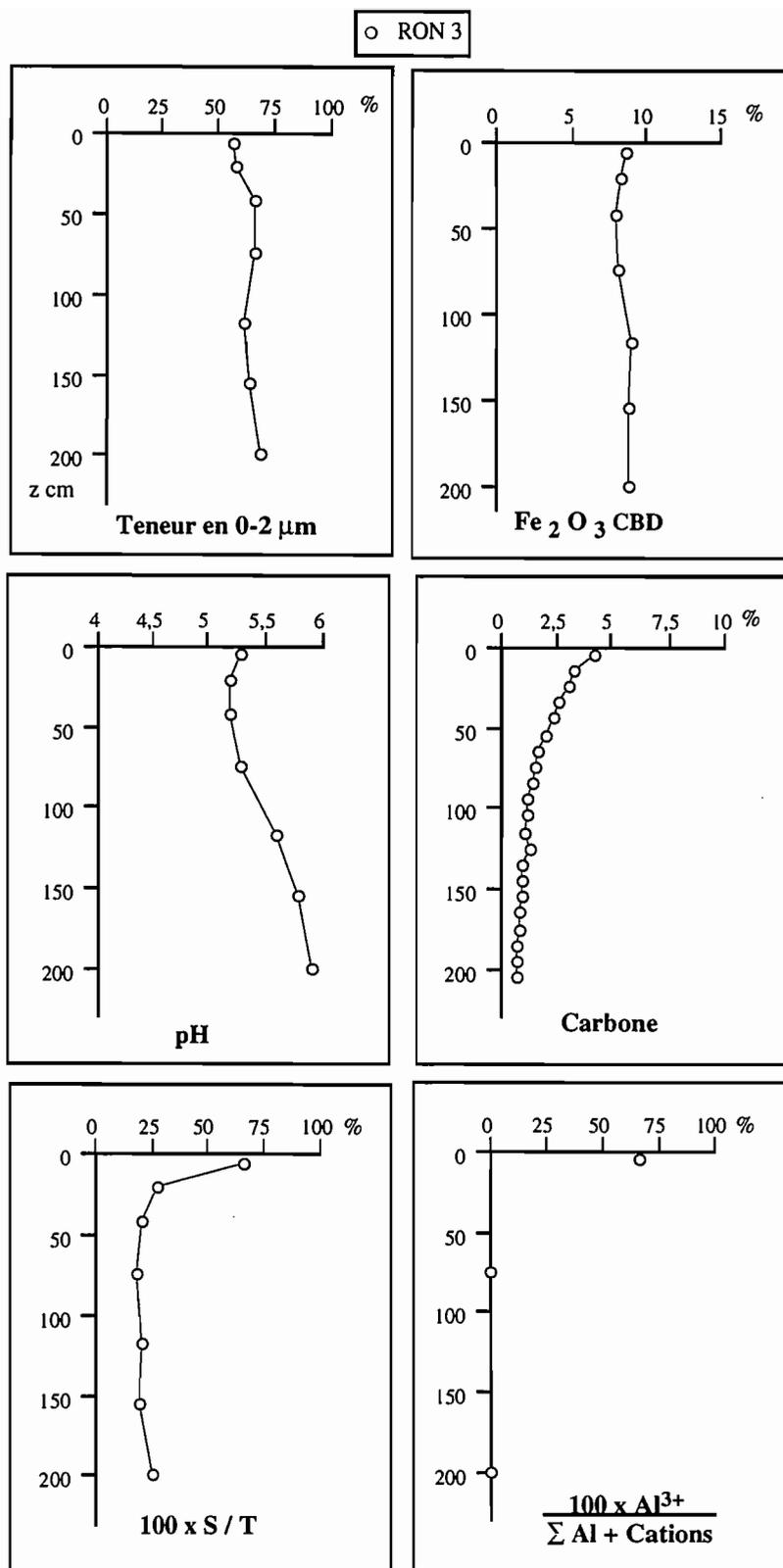


Figure 12.- Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous Campo sujo (RON 3).

L'ensemble suivant est formé par les horizons Bw₁ et Bw₂ de couleur rouge jaunâtre. Ils sont argileux (plus de 60 % de particules < 2 µm) et ont une structure polyédrique fine. La teneur en fer total approche les 14 %, la proportion d'oxyhydroxydes de fer est élevée. La composition minéralogique est dominée par la gibbsite (67 % de la fraction de taille inférieure à 200 µm). Cet ensemble présente quelques petits nodules de couleur rouge.

La teneur en carbone est encore de 1 % à 140 cm de profondeur. La CEC reste constante. Le complexe d'échange, très désaturé, est dépourvu d'aluminium échangeable. Le pH dans l'eau est de 5,6.

De 140 à 170 cm de profondeur, l'horizon Bw₃, de couleur rouge présente quelques petites taches rouge jaunâtre de faible contraste avec la matrice. Il est argileux et sa structure est composée de deux phases : une phase dominante à structure polyédrique fine et une phase polyédrique sub-angulaire fine à moyenne. Les nodules, peu nombreux, sont rouges violets.

La teneur en carbone est légèrement inférieure à 1 %. Le complexe d'échange présente les mêmes caractéristiques que pour l'ensemble précédent. Le pH est de 5,8.

Après 170 cm de profondeur, le sol est un peu plus rouge (2,5 YR 4/8 à 4/6). Il présente également quelques petites taches rouge jaunâtre. La teneur en argiles granulométriques approche les 70 %. La structure se compose d'une seule phase, de type polyédrique fine. La teneur en fer total est de 16 %. Aucun nodule n'a été trouvé dans cet horizon.

La teneur en carbone est de 0,7 %. Le complexe d'échange reste désaturé et dépourvu d'aluminium échangeable. Le pH est de 5,9.

3.2.1.3.- Latosol jaune (LA)

En RON 5, la forêt-galerie développe à la surface du sol une litière de 1 à 2 cm d'épaisseur essentiellement composée de débris foliaires de petite taille. La présence de cendres en surface témoigne du passage d'un feu, 7 mois avant l'observation.

D'un point de vue minéralogique, la gibbsite est largement majoritaire (> 60 %). La goethite représente moins de 10 % de la composition minéralogique de la fraction fine (< 200 µm) et aucune trace d'hématite n'a été relevée.

L'horizon A de couleur brun foncé (10 YR 3/3) a une épaisseur d'environ 15 cm. Cet horizon apparaît comme étant extrêmement travaillé par la faune. Sa structure correspond à des polyèdres fins. La teneur en particules de taille inférieure à 2 µm est de 62,6 %, le rapport

Limons/Argiles est de 0,5. La teneur en fer total est de 3 %, valeur bien inférieure à celles des sols décrits précédemment.

Dans les dix premiers centimètres du profil, la teneur en carbone est de 6,3 %. La présence de charbons explique en partie cette valeur élevée. La valeur de la CEC effective, de l'ordre de 5,5 cmol/kg terre fine, est supérieure à celle mesurée pour les autres types de sol. Le complexe d'échange, très désaturé (figure 13, annexe IV), est dominé à 94 % par l'aluminium échangeable dont la teneur atteint 23,3 cmol/kg sol. Le pH est de 4,8.

Les deux horizons suivants (AB et BA), brun foncé, forment un ensemble de transition. Ils présentent une structure en polyèdres fins et sont plus compacts. La proportion d'argiles granulométriques atteint 70 % dans l'horizon BA.

La teneur en carbone diminue progressivement, elle n'est plus que de 1,6 % à 50 cm de profondeur. La CEC effective est de 3,3 cmol/kg sol. Le complexe d'échange, fortement désaturé, reste largement dominé par l'aluminium. Le pH est de 4,9.

De 50 à 155 cm de profondeur, les horizons Bw₁ et Bw₂, d'un brun très pâle présentent deux types de taches : des taches rouges orange peu abondantes, de taille moyenne à grossière et des taches blanchâtres dont la taille et l'abondance augmentent avec la profondeur. Cet ensemble est argileux, de structure polyédrique fine. La teneur en fer total est constante, la teneur en hydroxydes de fer diminue légèrement.

La teneur en carbone varie de 0,9 à 1,5 %. La CEC effective est constante. Le taux de saturation du complexe d'échange par les bases est inférieur à 15 %. L'aluminium échangeable occupe encore 70 % du complexe d'échange.

Dans l'horizon suivant (Bw₃), les processus de redistribution du fer liés à l'hydromorphie temporaire sont plus marqués. La matrice, d'un brun très pâle, présente quelques taches rouges orange grossières et des tâches très abondantes, blanchâtres, de taille moyenne à grossière. Ces zones blanchâtres sont formées d'un matériau massif, induré et peu poreux. On note également la présence de rares nodules peu indurés, de taille moyenne et de couleur rouge. La teneur en oxydes et hydroxydes de fer est inférieure à 1 %. Cet horizon, très compact, a une structure polyédrique fine et une teneur en argiles granulométriques proche de 75 %.

La teneur en carbone est inférieure à 1 %. Le complexe d'échange est toujours très désaturé. Le pH dans l'eau est de 5,1.

Après 200 cm de profondeur, le sol est de couleur blanche avec quelques taches rouges orange et présente de rares schistes altérés de taille moyenne. Le taux de saturation du complexe d'échange par l'aluminium est encore de 37 %.

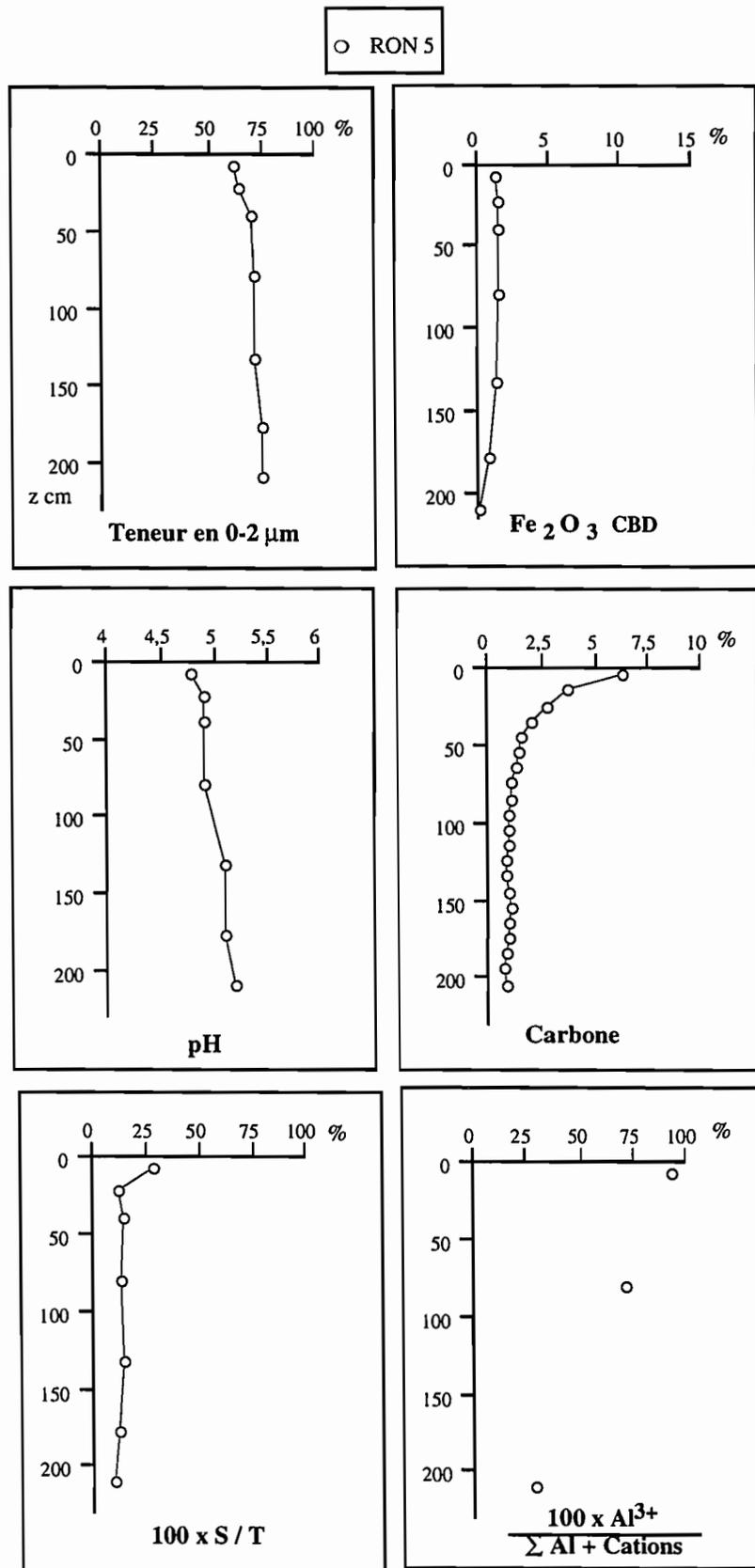


Figure 13.- Principales caractéristiques physico-chimiques du sol sous forêt galerie (RON 5).

3.2.2.- Dans la station expérimentale de l'EMBRAPA

Les parcelles étudiées sont toutes situées sur des latosols rouge foncé argileux (LE). La fraction fine se compose de gibbsite, d'argiles (kaolinite et interstratifiées), de goethite et d'hématite. La gibbsite reste majoritaire mais les teneurs sont un peu plus faibles que dans les sols de la réserve (de 43 à 50 % selon la profondeur). L'hématite est présente sur l'ensemble du profil.

❖ **BAR 1** (figure 14)

Cette parcelle supporte une végétation de "Cerrado", elle est parfois pâturée.

L'horizon superficiel, de 20 cm d'épaisseur, est de couleur brun rougeâtre. Sa structure, bien développée, est de type polyédrique fine à moyenne. La teneur en argiles granulométriques est de 71,6 %, la teneur en fer de 12,4 %.

La teneur en carbone est de 2,5 %. La CEC effective de 3 cmol/kg sol correspond à un complexe d'échange très désaturé, dominé à 80 % par Al^{3+} . Le pH est de 5,0.

L'ensemble sous-jacent, de couleur rouge légèrement jaunâtre, s'étend jusqu'à 85 cm de profondeur. Il est compact et composé de deux horizons (AB et BA). La structure comporte deux phases juxtaposées ; une phase polyédrique très fine et une autre polyédrique sub-angulaire fine, plus compacte. L'horizon sommital de cet ensemble présente de rares taches rouge jaunâtre. La texture est identique à celle de l'horizon précédent. La teneur en fer total est également constante.

La teneur en carbone diminue très lentement pour atteindre une valeur proche de 1,4 % à 85 cm de profondeur. Malgré une légère augmentation de la CEC (3,6 cmol/kg sol), le taux de saturation du complexe d'échange n'est que de 10 %. Le complexe d'échange très désaturé est encore largement occupé par l'aluminium. Le pH est de 5,2.

L'horizon suivant (Bw₁) ne comporte qu'une phase structurale, de type polyédrique très fine à fine ; le débit est polyédrique grossier. Cet horizon est de couleur rouge et ne comporte pas de taches. Les caractéristiques chimiques et texturales sont identiques à celles de l'ensemble sus-jacent.

De 125 cm à 195 cm de profondeur, deux horizons de couleur rouge constituent l'ensemble suivant (Bw₂ et Bw₃). Il est caractérisé par deux phases structurales :

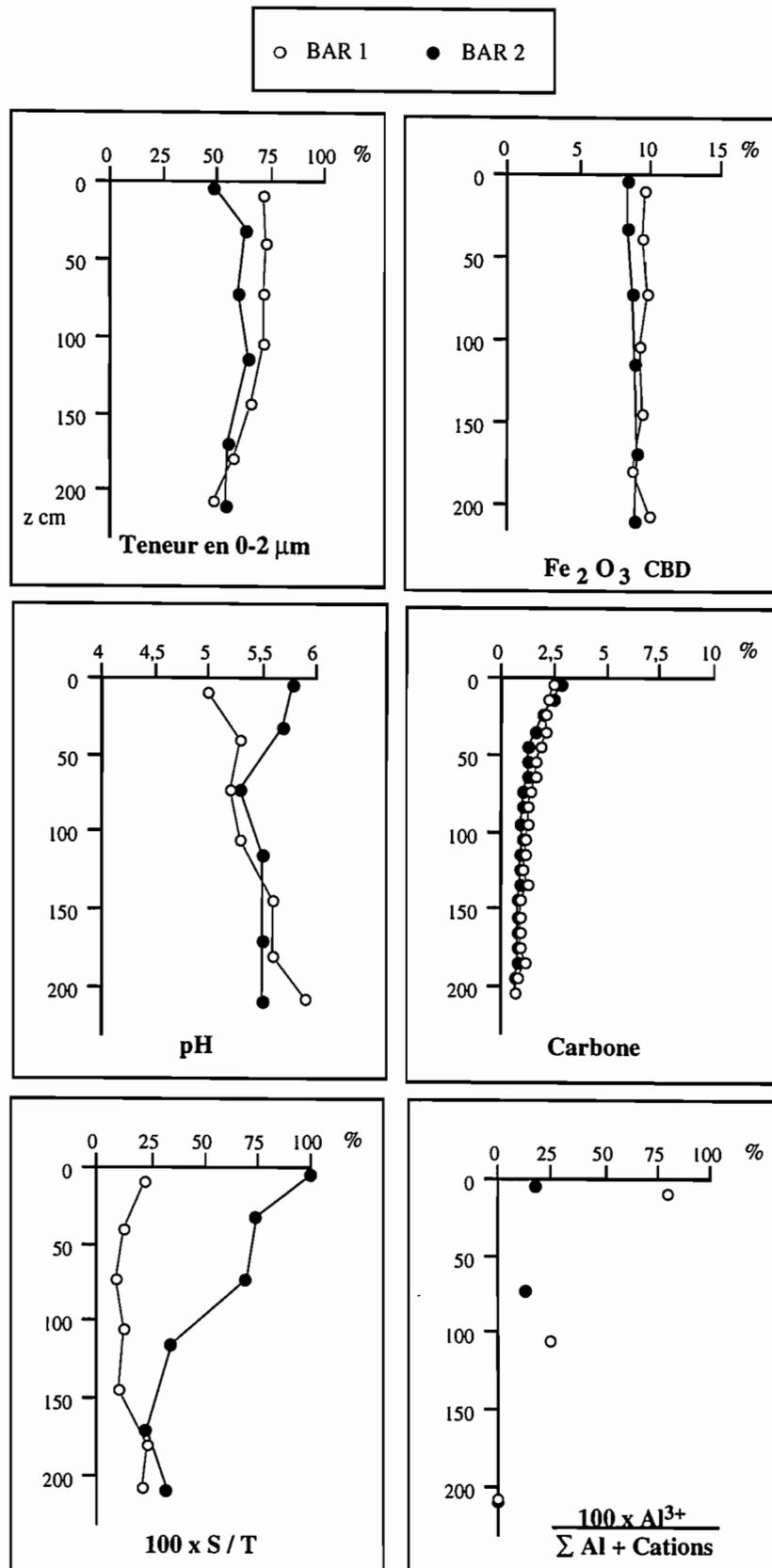


Figure 14.- Principales caractéristiques physico-chimiques des sols sous Cerrado pâturé (BAR 1) et pâturage de 12 ans (BAR 2).

une phase polyédrique fine à très fine dominante et une phase microagrégée fine sub-angulaire. Le premier horizon de cet ensemble présente des taches rouges peu contrastées et peu nombreuses et des taches rouge jaunâtre plus nombreuses formées du matériel à structure microagrégée. Dans l'horizon le plus basal (Bw3, de 165 à 195 cm), les taches rouges sont plus grossières et plus abondantes ; elles se développent indifféremment sur les deux types de matériaux. Les taches jaunâtres formées du matériel à structure microagrégée sont également présentes. La proportion d'argiles granulométriques diminue au profit de la classe des limons.

La teneur en carbone est identique à celle des horizons moins profonds (environ 1 %). La CEC est de 4 cmol/kg sol dans l'horizon sommital de cet ensemble ; elle chute à 2,1 cmol/kg sol dans l'horizon basal. Le complexe d'échange est toujours très désaturé même si la teneur en aluminium échangeable diminue fortement. Le pH (5,6) a légèrement augmenté.

Au delà de 195 cm de profondeur (Bw4), le sol est rouge légèrement jaunâtre. Il est également composé des deux phases structurales précédemment citées et présente deux types de taches, quelques taches de taille moyenne, de couleur brun jaunâtre et des taches rouges moyennes à grossières, plus nombreuses et formées le plus souvent du matériel à structure microagrégée. La teneur en argiles diminue encore au profit de celle des limons et le rapport Limons/Argiles s'établit à 0,8. La teneur en fer total, restée pratiquement constante tout au long du profil, est de 13,1 %.

La teneur en carbone est de 0,8 %. Le taux de saturation du complexe d'échange par les bases reste faible, même si ce dernier est dépourvu d'aluminium échangeable. Le pH atteint 5,9.

❖ BAR 2

Un pâturage de *Brachiaria brizantha* est implantée depuis 1982 sur cette parcelle.

L'horizon superficiel Ap, de 10 cm d'épaisseur, est de couleur brun rougeâtre. Le travail du sol délimite des zones d'ados et de creux. Au niveau des ados, la structure est de type polyédrique moyenne à grossière et présente une sous-structure de même type mais de taille inférieure. Entre les ados, la structure est de type polyédrique fine mais elle est peu développée et se présente sous un aspect massif. La texture est argileuse avec 49 % de particules de taille inférieure à 2 µm, elle présente toutefois 30 % de sables. La teneur en fer total est de 10 %, la teneur en oxydes et oxyhydroxydes de fer est de 8,5 %.

La teneur en carbone est de 2,9 %, la CEC effective de 3,4 cmol/kg sol. Le complexe d'échange est saturé. La teneur en aluminium échangeable n'est que de 0,7 cmol/kg sol. Le pH est de 5,8.

Les deux horizons sous-jacents forment un ensemble de transition. L'horizon AB, de couleur brun très rougeâtre, s'étend jusqu'à une profondeur de 55 cm. L'horizon BA est rouge. La structure est de type polyédrique. La texture est argileuse, la teneur en sables reste cependant relativement élevée (26 %). Le rapport Limons/Argiles est faible.

La teneur en carbone diminue progressivement pour atteindre 1 % à 90 cm de profondeur. Malgré une diminution de la CEC effective, le taux de saturation du complexe d'échange est encore de 75 %. L'aluminium échangeable n'occupe que 15 % du complexe d'échange. Le pH dans l'eau diminue légèrement (5,3).

Après 90 cm de profondeur, trois horizons de couleur rouge forment l'ensemble suivant. Cet ensemble très friable et peu compact est caractérisé par une structure polyédrique fine très développée couramment appelée "poudre de café". Il développe des taches rouges de faible contraste avec la matrice et des taches rouge jaunâtre. La fréquence et la taille des taches augmente avec la profondeur. Dans l'horizon Bw₃, elles sont formées le plus souvent d'un matériau à structure microagrégée fine. La texture est argileuse ; la proportion de sables est toujours d'environ 25 %, la teneur en particules fines ($\phi < 2 \mu\text{m}$) diminue à la base de cet ensemble au profit de la classe des limons. La teneur en fer total reste élevée.

La teneur en carbone est inférieure à 1 %. Malgré une augmentation de la CEC effective, le taux de saturation du complexe d'échange par les bases échangeables a diminué. Le pH est de 5,5.

❖ Les sites d'essais : BAR 3, BAR 4 et BAR 5

Ces sites sont étudiés à partir d'échantillons moyens prélevés à la tarière jusqu'à une profondeur de 70 cm. Aucun profil n'a pu être creusé. La caractérisation des profils des sites BAR 1 et surtout BAR 2 sert de référence.

Le pH et la teneur en carbone ont été mesurés (Annexe IV et figure 15). Le pH se situe entre 5,5 et 6,0. Les teneurs en carbone de ces sites d'essais sont proches de celles des sites BAR 1 (Cerrado pâturé) et BAR 2 (pâturage de 12 ans) (figure 15).

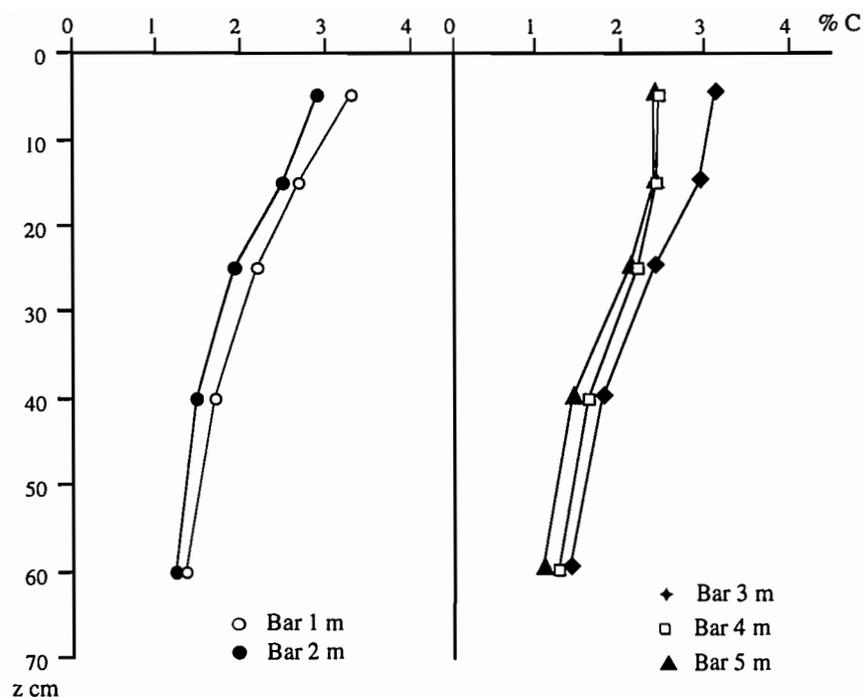


Figure 15.- Teneurs en Carbone des échantillons moyens prélevés dans les parcelles de la station expérimentale de l'EMBRAPA.

3.2.3.- Discussion - Conclusions partielles

❖ Les sols de Cerrados étudiés présentent une certaine unité par leur texture et leur structure.

Ils sont **argileux** sur l'ensemble du profil (teneur en particules 0-2 μm > 50 %). Les sols de la station expérimentale de l'EMBRAPA (BAR) ont cependant une teneur en sables un peu plus élevée que ceux de la station écologique du Roncador (RON). Cette variation trouve son origine dans la proximité d'une "poche" de quartzites.

La **structure** est en général **fine**, de type **polyédrique** ("poudre de café") ou **polyédrique sub-angulaire**. Certains profils présentent, dans les horizons profonds (après 120 cm), deux phases structurales juxtaposées : une phase polyédrique dominante et une phase microagrégée, qui correspond à un état de liaison entre les argiles et les oxydes et sesquioxides de fer et d'aluminium plus étroit.

La fraction fine ($\phi < 200 \mu\text{m}$) se compose essentiellement de **gibbsite**. La **kaolinite**, la **goethite**, le quartz et des feldspaths sont également présents de façon systématique. La présence d'hématite et d'argiles interstratifiées est plus occasionnelle.

La **densité apparente** (d_a) des horizons A est comprise entre 0,6 et 0,9 g/cm³. Les horizons AB et BA, qui présentent une compacité plus élevée, ont des densité apparentes comprises entre 0,8 et 1 g/cm³ (annexe IV). L'horizon B latosolique présentent des valeurs de d_a variant de 0,7 à 1 g/cm³.

❖ Les latosols rouge foncé (LE)

L'horizon A est brun foncé (7,5 YR) à rouge jaunâtre (5 YR) ; les horizons sous-jacents sont rouges (2,5 YR) et le bas du profil est rouge à rouge jaunâtre. Tous ces profils présentent des taches rouges et/ou jaunes, certaines pouvant être indurées. Le bas de certains profils contient quelques nodules. La **teneur en fer** total varie dans les horizons superficiels de 10,2 à 15,6 % et de 12,7 à 16,4 % en profondeur. Les quantités d'**oxydes et surtout d'hydroxydes** de fer sont élevées, de 8,5 à 11,4 % dans l'horizon A et de 9 à 10 % dans le bas du profil.

❖ Le latosol rouge jaune (LV)

Il se différencie nettement des LE par sa **couleur**, rouge jaunâtre (5 YR) jusqu'à 1,5 mètre puis rouge (2,5 YR). On distingue également des taches rouges et/ou jaunes dans le bas du profil. Les **teneurs en fer** total se situent dans la même fourchette de valeur que pour les latosols rouge foncé. Les quantités d'**hydroxydes** de fer sont tout aussi élevées, de 8,66 à 9,02 % selon la profondeur.

❖ Le latosol jaune (LA)

Il est de couleur **brun jaune** (10 YR) sur l'ensemble du profil. En liaison avec sa position dans le paysage, il présente des **caractères hydromorphes** bien développés : taches blanchâtres dès 50 cm de profondeur, présence d'un horizon blanchi en bas de profil. Les teneurs en fer total sont faibles ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3 \%$). Les teneurs en hydroxydes de fer sont de 1,36 % à proximité de la surface et 0,35 % dans l'horizon blanchi. Il n'y a pas d'hématite dans ce profil.

❖ Pour les sites naturels (RON) et pour la parcelle BAR 1, où l'intervention humaine est limitée, le sol a un **complexe d'échange désaturé**. Même si pour certains sites, l'horizon le plus superficiel présente un taux de saturation du complexe d'échange par les bases supérieur à 50 %, il chute aux environs de 30 % dès 20 cm de profondeur. Le complexe d'échange est dominé par l'**aluminium échangeable** mais uniquement dans les 50 premiers centimètres de profondeur (sauf RON 5). Cet aluminium échangeable pourrait être lié à la nature même de la matière organique ou à une complexation Al/MO, ou bien à une ouverture des feuillets de kaolinite. Certaines espèces natives des Cerrados accumulent de l'aluminium dans leur tissus (annexe I), leur persistance sur les sites d'études peut également expliquer les teneurs en

aluminium échangeable mesurées dans les horizons superficiels. Pour RON 5, l'aluminium échangeable est fortement présent sur l'ensemble du profil et les teneurs en oxydes d'aluminium (gibbsite) sont supérieures à 63 % quelle que soit la profondeur.

Pour la parcelle de pâturage de 12 ans (BAR 2), le **complexe d'échange** est **saturé** (99 % dans l'horizon superficiel et plus de 50 % à 100 cm de profondeur) et l'aluminium échangeable représente moins de 20 % du complexe d'échange dans le premier mètre de sol. Les parcelles d'essais (BAR 3 à 5) présentent sans doute les mêmes caractéristiques. Ces sols ont reçu un apport de calcaire broyé (§ I. 2.2., tableau 7) dont l'effet est encore sensible.

❖ Le **pH** des sols se situe entre 4,7 et 6,0 dans l'horizon superficiel, il augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre des valeurs comprises entre 5,2 et 6,0 aux environs de 2 m. Le ΔpH est négatif dans les horizons superficiels puis il s'annule et devient positif dans les horizons Bw. Le sol est alors porteur d'une **charge nette positive**.

3.3.- Description des profils racinaires

Un comptage des racines a été effectué dans les profils pédologiques sur une largeur d'un mètre (tableau 9 et annexe V).

Note : Cette observation complète celle des caractéristiques purement pédologiques effectuées dans les fosses (annexe II). Aucune répétition n'ayant été effectuée, elle ne peut être séparée de son contexte et est étroitement dépendante de la distribution des espèces présentes à la surface.

Des racines sont présentes sur l'ensemble du profil, y compris à 2 m de profondeur où leur densité est encore notable. La plupart des racines ont un diamètre inférieur à 2 mm (tableau 9) et ont une orientation sub-horizontale.

Hormis pour le pâturage de 12 ans (BAR 2), après 1 m de profondeur les profils sont peu différenciés. Le site BAR 2 présente plus de 1000 racines/m² pour la couche de sol située entre 1 et 2 m.

Dans la couche de sol 0-100 cm, la distribution des racines est plus hétérogène. La séquence suivante est donnée à titre indicatif, aucune répétition n'ayant été effectuée :

BAR 2 > RON 2 > BAR 1 ≡ RON 1 ≡ RON 4 ≡ RON 3 > RON 5
 Pâturage de 12 ans > Cerrado > Cerrado pâturé ≡ Cerradão ≡ Campo limpo ≡ Campo sujo > Forêt galerie

La densité racinaire du profil sous pâturage de 12 ans, site BAR 2 (annexe V), est élevée et homogène jusqu'à 175 cm ; 32 % des racines se trouvent dans la couche de sol 0-30 cm. Sous végétation naturelle, la densité diminue après 50 cm de profondeur. Les racines se situent en majorité dans les trente premiers centimètres de sol (de 43 à 68 %). Cette tendance est également mise en évidence par Castro (1995). Cet auteur a étudié, en pratiquant 20 répétitions, la distribution de la biomasse racinaire jusqu'à 2 m de profondeur dans différents types de Cerrado. Dans cette étude, plus de 70 % des racines se situent dans les trente premiers centimètres du sol.

Tableau 9.- Profils racinaires sur un mètre de large et proportions de racines fines.

Profondeur (cm)	Sites						
	RON 1 Cerradão	RON 2 Cerrado	RON 3 Campo sujo	RON 4 Campo limpo	RON 5 Forêt galerie	BAR 1 Cerrado pâturé	BAR 2 Pâturage de 12 ans
	Nombre de racines						
0-50	1091	1344	988	1185	651	1190	1639
50-100	386	481	348	224	178	363	892
0-100	1477	1825	1336	1409	829	1553	2531
100-150	164	202	261	80	104	181	707
150-200	82	89	82	19	85	57	404
100-200	246	291	343	99	189	238	1111
	% de racines fines (< 2 mm)						
0-50	93,6	92,6	92,1	91,6	85,9	97,1	96,9
50-100	96,6	97,3	98,9	96,0	79,8	97,0	99,6
100-150	92,7	95,5	97,2	100,0	80,8	96,7	99,7
150-200	95,1	91,0	97,3	94,7	84,7	96,5	100,0

4.- Stocks de carbone

La détermination de la densité apparente (annexes III et IV) permet de convertir les teneurs en carbone exprimées en g C/100 g sol en contenu de carbone par incrément de 10 cm et par unité de surface (kg C/m²) (tableau 10).

Tableau 10.- Stocks de carbone total (charbons compris, en kg C/m²) des couches de sol 0-100 cm et 0-210 cm .

Sites	kg C total/m ²	
	Prof. : 0-100 cm	0-210 cm
RON 1	14,83	22,97
RON 2	14,25	23,07
RON 3	20,95	29,67
RON 4	19,79	28,15
RON 5	16,52	24,79
BAR 1	17,36	27,71
BAR 2	16,10	25,20

Pour tous les profils, les **teneurs en carbone** diminuent progressivement de la surface à un mètre de profondeur puis elles sont relativement constantes (entre 0,5 et 1 kg C/m²/Hz). Aucun paléohorizon organique n'a été observé dans les profils.

Dans le premier mètre de profondeur, les quantités de carbone varient, selon la couche de sol de 10 cm d'épaisseur concernée, de 0,7 à 3,7 kg C/m² et les différents sites peuvent être classés comme suit :

RON 4 ≅ RON 3 > BAR 1 ≅ RON 5 ≅ BAR 2 > RON 1 ≅ RON 2
 Campo limpo ≅ Campo sujo > Cerrado pâturé ≅ Forêt galerie ≅ Pâturage de 12 ans > Cerradão ≅ Cerrado

Pour tous les sites, les 50 premiers centimètres de sol contiennent environ 50 % du carbone total. Les teneurs en carbone sur l'ensemble du profil (0-210 cm de profondeur) sont comprises entre 23 et 29,7 kg C/m², ces valeurs sont supérieures à celles rencontrées sous forêt dans des sols amazoniens de texture variée (Desjardins, 1991). Pour différents types physiologiques de Cerrado, Castro (1995) donne des stocks de carbone équivalents (21,1 à 27,7 kg C/m²) à ceux rencontrés dans les sites naturels RON. La teneur en argiles granulométriques d'un sol et les stocks de carbone sont positivement corrélés (Feller *et al.*, 1991), la texture des sols étudiés peut influencer les valeurs de carbone. La présence de charbons, observables dans les fosses pédologiques, a déjà été mise en évidence dans les sols des Cerrados brésiliens par Boulet *et al.* (1995).

5.- Phosphore total, organique et inorganique

Les études portant sur le phosphore dans les oxisols des Cerrados concernent surtout les premiers horizons du sol, et bien souvent uniquement les dix ou vingt premiers centimètres. Les méthodes employées caractérisent le phosphore total et le phosphore dit labile, extractible par les méthodes d'Olsen (NaHCO₃ 0,5 N), de Bray (NH₄F 0,03 N + HCl 0,025 N), de Mehlich (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,25 N), ou par des résines Cl⁻ (van Raij, 1986, 1997).

Les racines sont encore très présentes après 20 cm de profondeur. Il était donc impératif de connaître les teneurs en phosphore présents dans ces sols pour des profondeurs plus importantes.

5.1.- Matériels et méthodes

❖ Les teneurs en phosphore total, organique et inorganique (µg P/g sol) sont déterminées sur les échantillons prélevés dans les fosses pédologiques jusqu'à une profondeur de 210 cm, par incrément de 10 cm. Dans ces cas, la mesure de la densité apparente permet d'exprimer les résultats en termes de stocks (kg P/ha).

Pour les parcelles d'essais de la station expérimentale, la détermination de la densité apparente n'a pas été possible, les résultats sont donc exprimés uniquement en teneurs (µg P/g sol). Ces teneurs sont déterminées sur les échantillons moyens prélevés à la tarière jusqu'à 70 cm de profondeur (§ I. 3.1.).

❖ L'extraction du **phosphore total (Pt)** est réalisée par attaque nitrique à chaud précédée d'une calcination de l'échantillon à 550 °C pendant deux heures (Laurent & Brossard, 1991). Cette méthode permet la transformation de toutes les formes du phosphore en pyrophosphate (P_2O_5), puis en phosphate. La teneur en Pt des extraits est mesurée par spectrométrie ICP-AES.

La quantité de **phosphore organique (Po)** est obtenue par le calcul de la différence des quantités de phosphore extraites par l'acide sulfurique 2N avant et après calcination de l'échantillon à 550 °C (Anderson, 1960). Le phosphate de ces extraits est mesuré par colorimétrie (John, 1970).

La teneur en **phosphore inorganique (Pi)** est déterminée par différence entre les valeurs de Pt et de Po.

Chaque détermination est réalisée trois fois. Un test statistique t bilatéral ($p < 5 \%$) permet d'apprécier les différences entre échantillons. Pour les teneurs en phosphore total des échantillons BAR m, une analyse Anova au seuil de 95 % a été réalisée.

5.2.- Résultats

5.2.1.- Teneurs en Phosphore des sols

❖ Les teneurs en phosphore total des sols étudiés varient dans l'horizon A de 262,3 à 496 $\mu\text{g Pt/g sol}$, la valeur moyenne étant de 360 $\mu\text{g Pt/g sol}$ (figure 16). Ces teneurs diminuent légèrement avec la profondeur pour atteindre 212 $\mu\text{g Pt/g sol}$ en moyenne dans l'horizon Bw. Les teneurs du latosol jaune (LA) du site sous forêt galerie (RON 5) et du latosol rouge (LE) fertilisé du pâturage ancien (BAR 2) sont comparables aux valeurs observées dans les latosols sous végétation naturelle de Cerrado, à l'exception de l'horizon BA. Les sites d'essais de la station expérimentale développés sur des latosols rouges (LE) se situent également dans cet intervalle.

Dans l'horizon superficiel des latosols LE et LV sous végétation naturelle de Cerrado, les teneurs en phosphore organique sont comprises entre 86 et 194 $\mu\text{g Po/g sol}$. Ces teneurs diminuent avec la profondeur : en moyenne, 86 $\mu\text{g Po/g sol}$ dans l'horizon AB, 70 $\mu\text{g/g sol}$ dans l'horizon BA et 47 $\mu\text{g/g sol}$ dans l'horizon Bw. Le sol RON 5 sous forêt galerie présente des teneurs dans les horizons les plus superficiels supérieures à celles des sols sous Cerrado (en liaison avec une teneur en C également plus élevée). Les teneurs en phosphore total et organique des sols sous pâturage (BAR 2 à 5) sont comparables aux valeurs les plus faibles des sols sous végétation naturelle (figure 17).

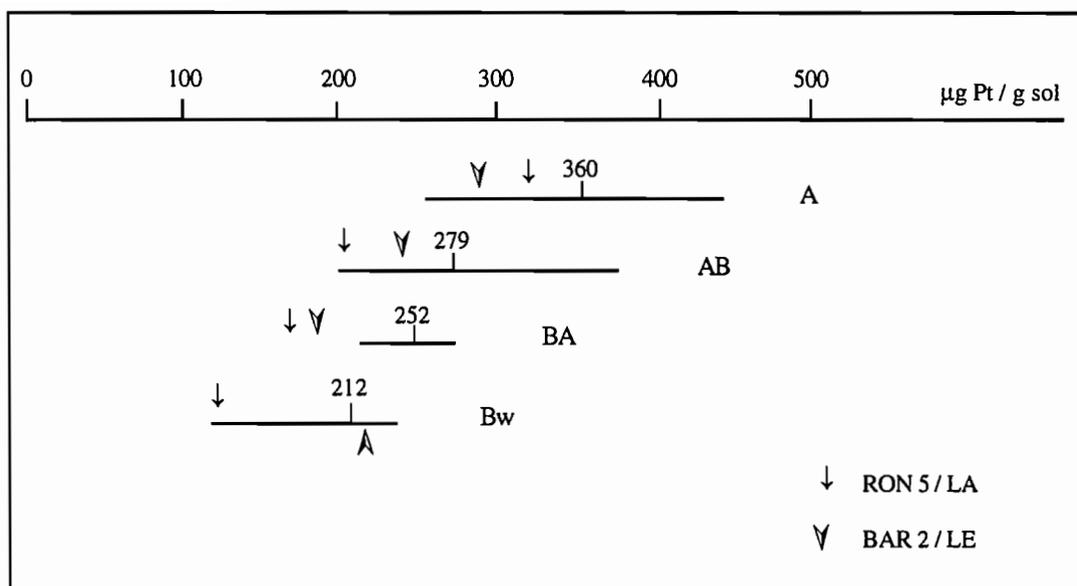


Figure 16.- Répartition des teneurs moyennes, minima et maxima, en phosphore total ($\mu\text{g/g sol}$) des différents horizons pédologiques des latosols LE et LV sous végétation naturelle. Les flèches matérialisent le latosol jaune (RON 5/LA) et le latosol rouge fertilisé (BAR 2/LE).

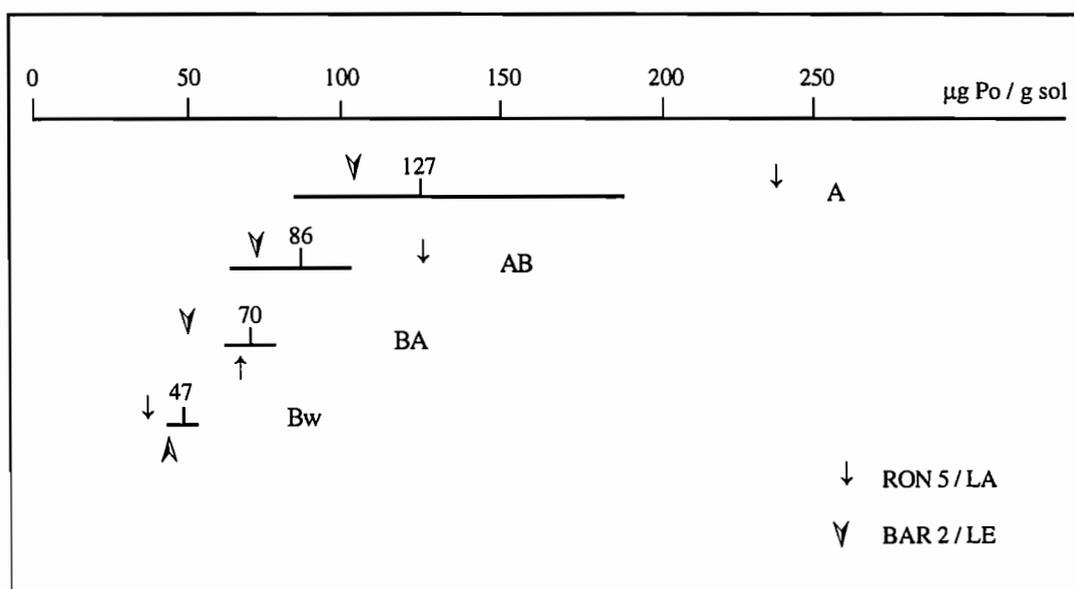


Figure 17.- Répartition des teneurs moyennes, minima et maxima, en phosphore organique ($\mu\text{g/g sol}$) des différents horizons pédologiques des latosols LE et LV sous végétation naturelle. Les flèches matérialisent le latosol jaune (RON 5/LA) et le latosol rouge fertilisé (BAR 2/LE).

❖ Les sites de la station expérimentale (BAR m) (figure 18)

Les teneurs en phosphore total varient de 301,6 et 375,8 $\mu\text{g Pt/g sol}$ dans l'horizon superficiel. Elles diminuent avec la profondeur et sont comprises entre 236 et 274,1 $\mu\text{g Pt/g sol}$ dans l'horizon 50-70 cm. Les différences entre les sites sont peu importantes et, du fait de leur variabilité, rarement significatives. Le site BAR 2 m présente, quelque soit la profondeur, les teneurs les plus faibles. La différence est significative pour les horizons 0-10, 20-30 et 30-50 cm. Le site BAR 4 m présente les valeurs les plus élevées dans les horizons superficiels. Dans les horizons plus profonds, les teneurs les plus élevées sont observées pour le site BAR 5 m.

Dans l'horizon superficiel, les teneurs en phosphore organique représentent de 23,4 à 30,2 % du phosphore total et ne sont pas significativement différentes (90,4 $\mu\text{g Po/g sol}$ en moyenne). Avec la profondeur, les teneurs diminuent légèrement (de 43,7 à 73 $\mu\text{g Po/g sol}$ dans la couche de sol 50-70 cm) et les différences entre sites augmentent. Le site de pâturage ancien (BAR 2 m) présente les valeurs les plus faibles de 10 à 70 cm de profondeur. Dans les couches de sol 10-20 et 20-30 cm, le site BAR 4 m présente également des teneurs en phosphore organique inférieures à celles des sites BAR 1 m, BAR 3 m et BAR 5 m. Dans les horizons plus profonds, la teneur du site BAR 1 m (Cerrado parfois pâturé) reste constante et donc significativement supérieures à celles des autres sites.

Dans la couche de sol 0-10 cm, les teneurs en phosphore inorganique se situent entre 210,6 et 288 $\mu\text{g Pi/g sol}$. Elles suivent les mêmes lois de distribution inter-sites que pour le phosphore total. Les teneurs les plus faibles sont observées, dans les horizons superficiels, pour le site BAR 2 m (pâturage ancien) et, dans les horizons plus profonds, pour BAR 1 m (Cerrado parfois pâturé). Dans les horizons superficiels, le site BAR 4 m (pâturage de 4 ans) présente la teneur la plus élevée ; elle est significativement différente de celles des autres sites .

5.2.2.- Réserves de Phosphore

❖ Sur l'ensemble du profil (de 0 à 210 cm de profondeur) :

Les sites RON 1, 2 et 3 (végétation naturelle la plus dense) ont des teneurs en phosphore total supérieures à 4000 kg Pt/ha ; les sites BAR 2, BAR 1 et RON 4 ont des teneurs comprises entre 3500 et 4000 kg Pt/ha et RON 5 (forêt galerie) a une teneur de 2500 kg Pt/ha (figure 19).

Les teneurs en phosphore organique varient peu d'un site à l'autre, elles sont voisines de 1000 kg Po/ha . Seuls les teneurs des sites RON 2 (Cerrado) et BAR 2 (pâturage ancien) sont significativement différentes. Dans le sol de la forêt galerie (RON 5), le phosphore organique représente près de 40 % du phosphore total.

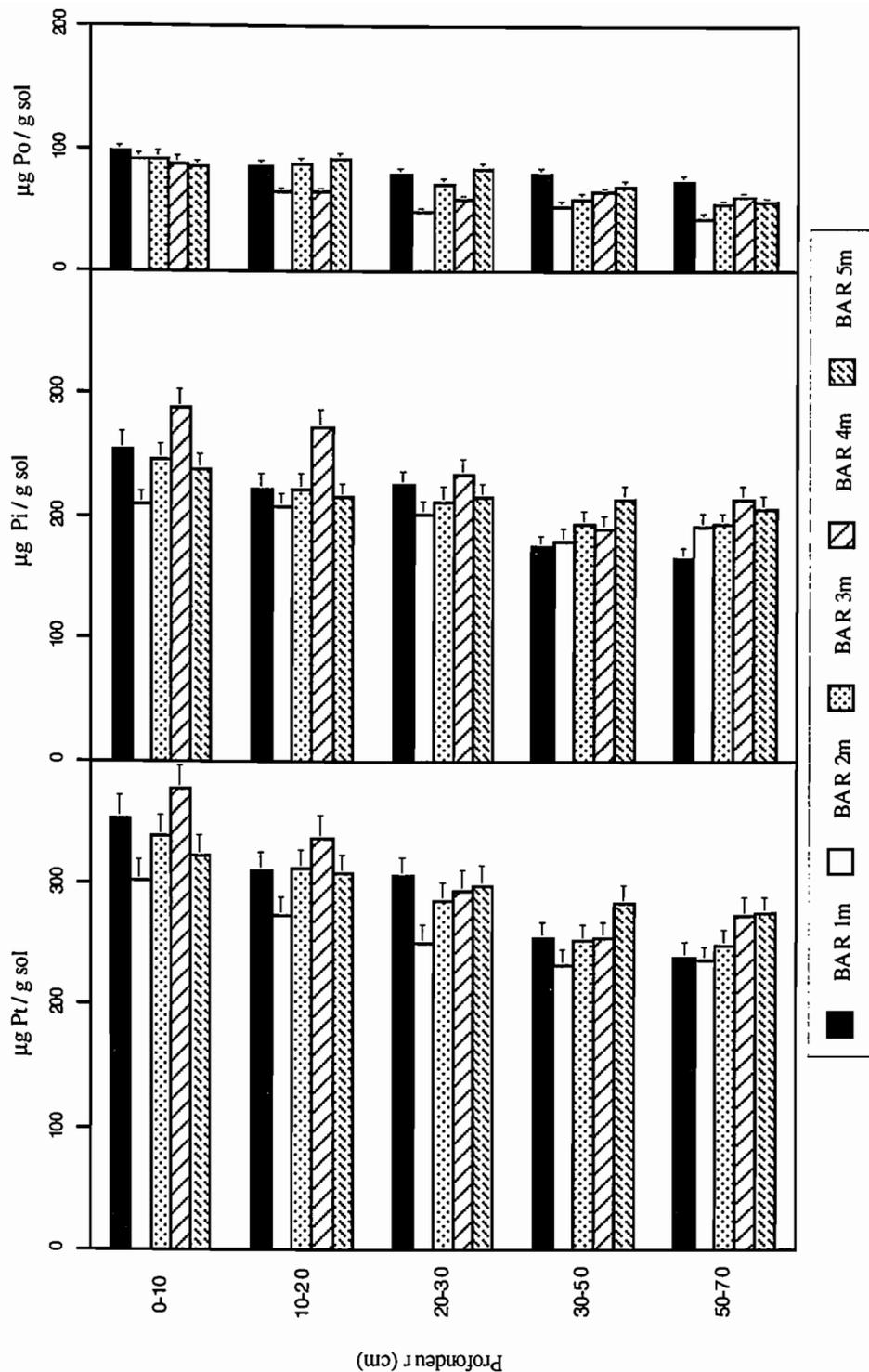


Figure 18.- Teneurs ($\mu\text{g P/g sol}$) en phosphore total, organique et inorganique des échantillons moyens de la station expérimentale.

BAR 1 m : Cerrado pâturé

Pâturages à *Brachiaria brizantha* : **BAR 2 m**, pâturage de 12 ans, et essais (**BAR 3 m**, pâturage de 3 ans ; **BAR 4 m**, pâturage de 4 ans ; **BAR 5 m**, pâturage de 5 ans)

Les teneurs en phosphore inorganique sont supérieures à 3000 kg Pi/ha pour les sites de végétation naturelle RON 1, RON 2 et RON 3 ; elles sont comprises entre 2500 et 3000 kg Pi/ha pour les sites BAR 2, BAR 1 et RON 4. Le site RON 5 (forêt galerie) se démarque avec une teneur proche de 1400 kg Pi/ha.

❖ **De 0 à 100 cm de profondeur :**

Le premier mètre de sol contient entre 1400 et 2500 kg Pt/ha, soit 47 à 62 % du phosphore total présent dans les profils 0-210 cm étudiés. Les sites RON 1 à 4 (végétation naturelle de Cerrados) ont les valeurs les plus élevées et le site RON 5 (forêt galerie), la valeur la plus basse. Plus de la moitié du phosphore total de cette couche de sol se situe entre 0 et 50 cm de profondeur (figure 20).

Plus de 25 % du phosphore total est sous la forme organique, cette proportion est même de 50 % pour la forêt galerie. Les teneurs en phosphore organique sont comprises entre 500 et 720 kg Po/ha, l'essentiel se situant dans les 50 premiers centimètres.

Les teneurs en phosphore inorganique varient entre 1600 et 1800 kg Pi/ha pour les sites RON 1 à 4, correspondant aux différents types physiologiques des Cerrados ; elles sont d'environ 1250 kg Pi/ha pour BAR 1 et 2 (cerrado pâturé & pâturage de 12 ans), et de 580 kg Pi/ha pour RON 5 (forêt galerie).

❖ **Les dix premiers centimètres de sol :**

Les teneurs en phosphore total de la strate 0-10 cm sont comprises entre 195 et 360 kg Pt/ha (figure 21, annexe VI) et suivent la séquence* :

RON 4 > RON 3 ≅ RON 2 ≅ BAR 2 > RON 1 ≅ BAR 1 > RON 5
 Campo limpo > Campo sujo ≅ Cerrado ≅ Pâturage de 12 ans > Cerradão ≅ Cerrado pâturé > Forêt galerie

Dans cet horizon superficiel, les teneurs en phosphore organique se différencient en trois groupes très nets ($p < 0,01$) :

RON 5 ≅ RON 4 > RON 3 ≅ RON 1 ≅ BAR 2 > RON 2 ≅ BAR 1
 Forêt galerie ≅ Campo limpo > Campo sujo ≅ Cerradão ≅ Pâturage de 12 ans > Cerrado ≅ Cerrado pâturé

* Les différences significatives au seuil de 5 % sont matérialisées par le signe ">".

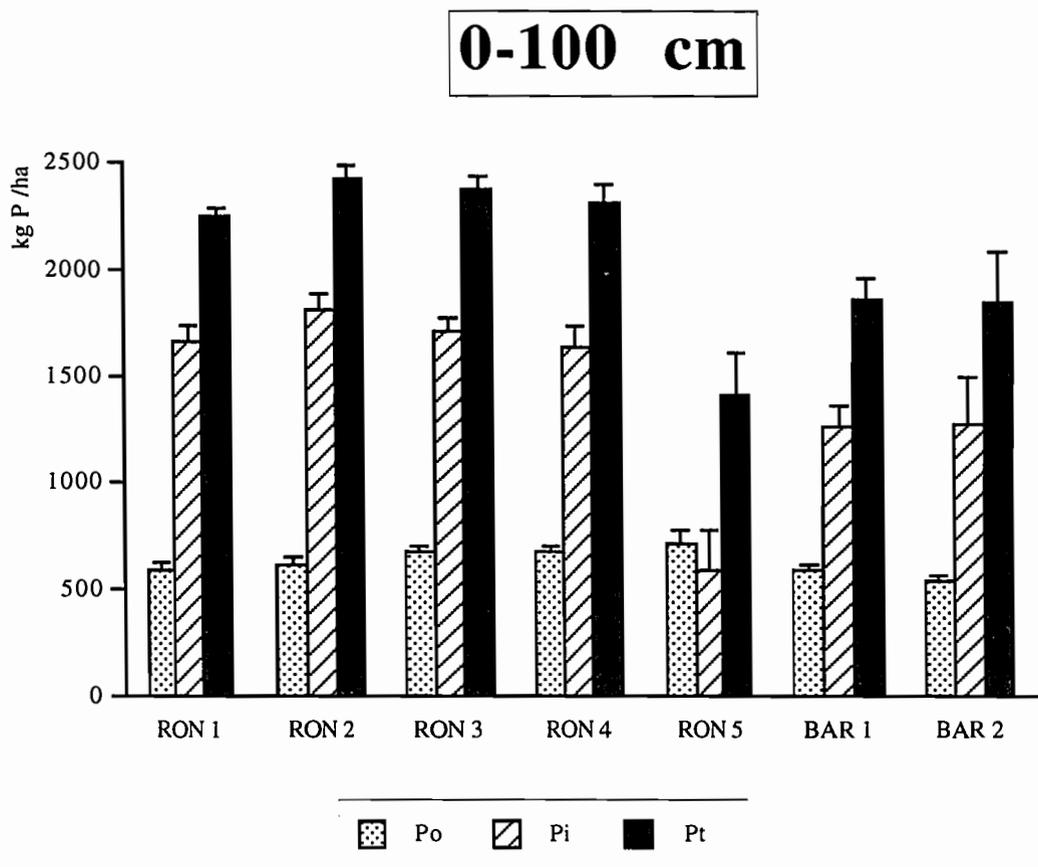
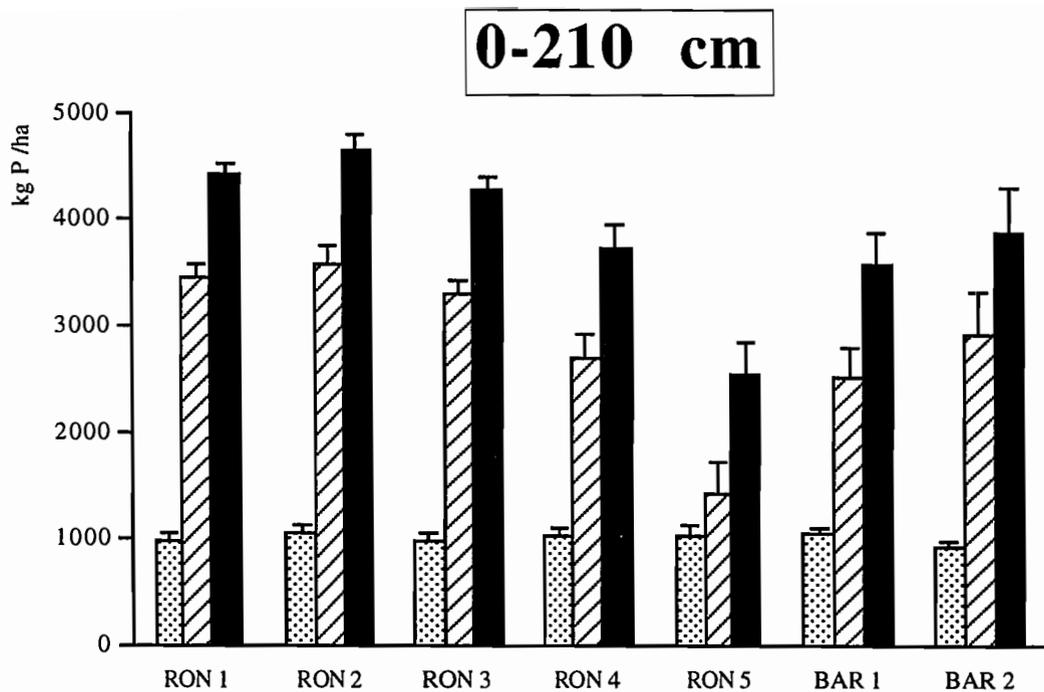


Figure 19.- Stocks de Phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) exprimés en kg P/ha dans les couches de sol (0-210) et (0-100) cm.

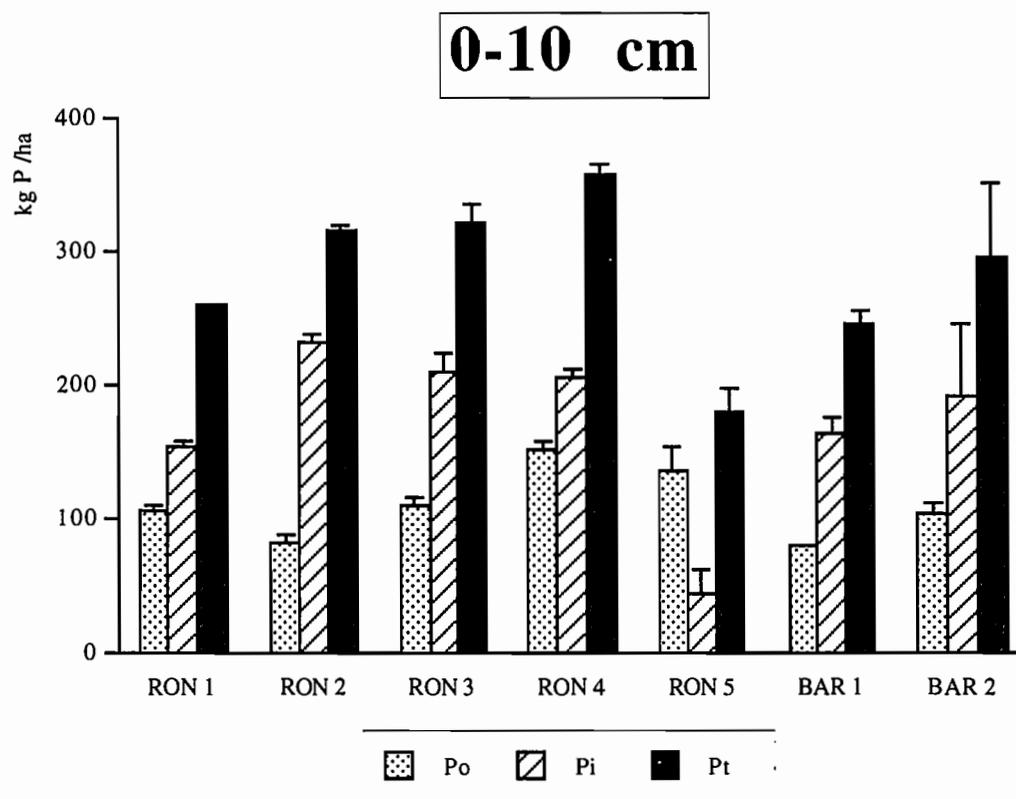
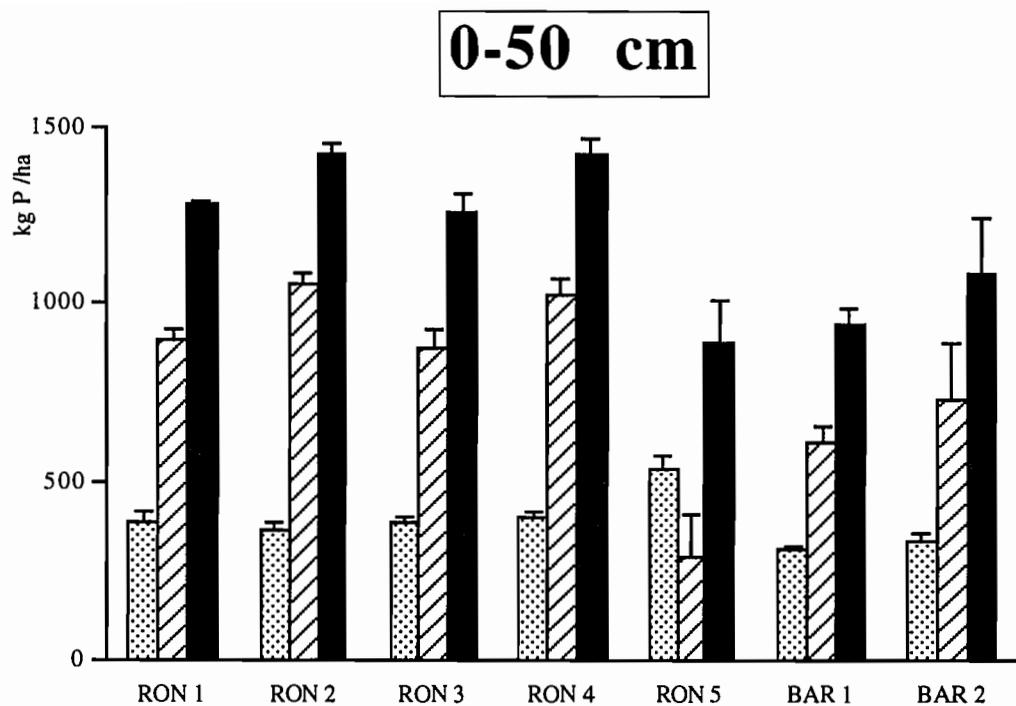


Figure 20.- Stocks de Phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) exprimés en kg P/ha dans les couches de sol (0-50) et (0-10) cm.

Pour RON 5 et RON 4, les teneurs sont respectivement de 147,4 et 155,8 kg Po/ha et correspondent à 75 et 43 % du phosphore total de l'horizon. Les valeurs moyennes sont rencontrées pour l'horizon superficiel des sites RON 3, RON 1 et BAR 2, elles sont très légèrement supérieures à 100 kg Po/ha et correspondent à 35-40 % du Pt. Les teneurs les plus faibles sont rencontrées pour RON 2 et BAR 1 avec environ 80 kg Po/ha, ces valeurs correspondent à 26 et 32 % du phosphore total de l'horizon 0-10 cm.

Les teneurs en phosphore inorganique varient de 225,4 kg Pi/ha pour RON 2 à 48,3 kg Pi/ha pour RON 5. La valeur de l'échantillon BAR 2 (pâturage de 12 ans) présente un écart type important (figure 20).

5.2.3.- Rapports C/Po

Conceptuellement, le rapport C/Po est associé à différents seuils de stabilité des formes du phosphore organique. En accord avec Dalal (1977), la minéralisation du phosphore organique intervient si le rapport C/Po est inférieur ou égal à 200 et, au delà de 300, le phosphore organique est immobilisé. Cependant, Oberson *et al.* (1995) émettent des réserves concernant la validité de ces seuils pour les sols tropicaux.

Quel que soit le site, les rapports Carbone/Phosphore organique sont relativement élevés (C/Po > 200). Pour les sites où la végétation est la plus dense (Forêt-galerie, Cerradão, Cerrado, Cerrado pâturé), ils sont compris entre 250 et 350 dans l'horizon 0-10 cm. Ces valeurs varient peu jusqu'à 50 cm de profondeur (figure 21). Le site RON 5, sous forêt galerie a, au delà d'un mètre de profondeur, des rapports C/Po plus élevés que pour les autres sites, en liaison avec des teneurs en carbone plus élevées.

Pour les sites RON 3 et RON 4 où les espèces herbacées natives sont dominantes, les rapports C/Po dans l'horizon superficiel sont du même ordre de grandeur (de 250 à 320). Cependant, de 10 à 50 cm de profondeur, ils sont plus élevés du fait d'une diminution des teneurs en Po. Au delà d'un mètre, on observe quelques brusques augmentations des rapports C/Po dues, pour RON 4, à une diminution de la teneur en Po de la couche de sol concernée par rapport aux couches sus- et sous-jacentes, et pour RON 3, à une augmentation de la teneur en carbone total sans doute en liaison avec la présence de charbons.

Les sols en BAR 1 et BAR 2 ont un rapport C/Po d'environ 280 dans les 20 premiers centimètres de sol puis les valeurs en BAR 1 (Cerrado pâturé) sont plus élevées jusqu'à 60 cm de profondeur, la tendance s'inversant ensuite de 60 à 110 cm. Après 110 cm de profondeur les valeurs de C/Po en BAR 1 sont de nouveau supérieures à celles de BAR 2 jusqu'à 150 cm de

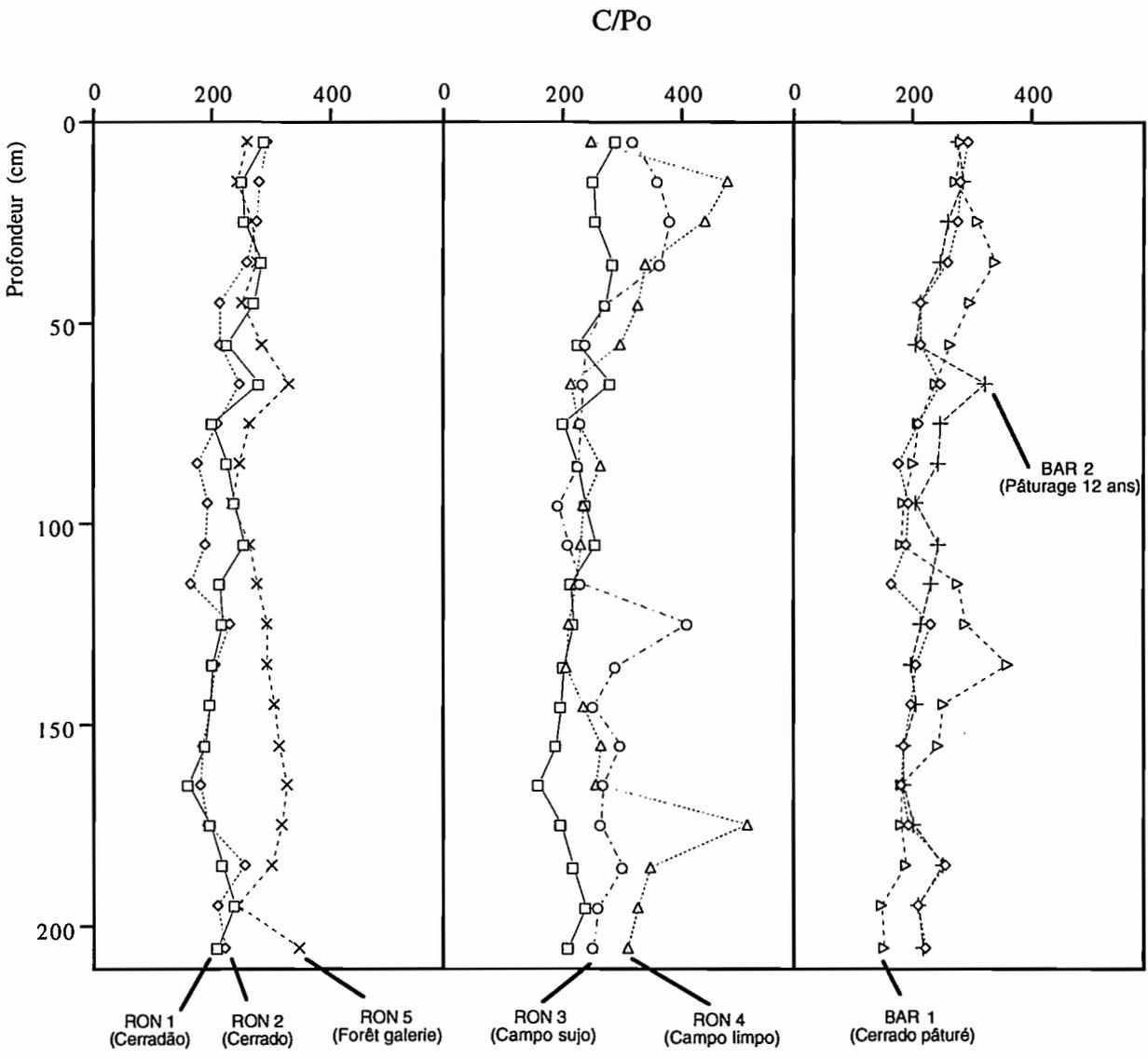


Figure 21.- Rapports C/Po des échantillons prélevés par incrément de 10 cm dans les profils.

profondeur puis la tendance s'inverse de nouveau. Ces deux profils en zigzag présentent toutefois des valeurs du rapport C/Po qui sont toujours comprises entre 360 et 145, avec une valeur moyenne aux environs de 235. Les sites d'essais de la station expérimentale présentent dans l'horizon superficiel des valeurs comprises entre 280 et 320.

5.3.- Discussion - Conclusions

❖ De la surface à deux mètres de profondeur, les stocks en **phosphore total** des sols sont plus importants dans les sites naturels où la végétation est la plus dense*. Les horizons les plus superficiels du sol sous Campo limpo (RON 4) présentent les stocks les plus élevés et ceux sous forêt galerie (RON 5) les plus faibles. Le premier mètre de sol contient 47 à 62 % du phosphore total présent dans l'ensemble du profil.

Les sites de pâturage (BAR) ont des teneurs en phosphore total similaires à celles données pour les sites sous végétation naturelle.

Dans tous les sites, la teneur en phosphore total de l'horizon superficiel (360 µg Pt/g sol en moyenne, figure 16) est supérieure aux valeurs moyennes observées par Jones & Wild (1975) et Nye & Bertheux (1957) : dans un ensemble d'oxisols sous savane au Ghana et en Afrique de l'Ouest, ces auteurs avaient mesuré, dans l'horizon de surface, des teneurs en phosphore total d'environ 140 µg Pt/g sol. Toutefois, d'autres auteurs ont décrit des oxisols brésiliens sous végétation de forêt ou de prairie naturelle pour lesquels les teneurs en phosphore total dépassaient 500 µg Pt/g sol (Frossard *et al.*, 1992 ; Abala & Fassender, 1970) et Frossard (1985) décrit un oxisol brésilien à gibbsite dont l'horizon 0-20 cm présente une teneur en Pt comparable à celles observées dans les sites naturels de la réserve de l'IBGE (RON).

Sur l'ensemble de la profondeur des profils (environ 2 m), le stock de **phosphore organique** est, quelque soit le site, d'environ 1000 kg Po/ha. L'essentiel du Po se situe dans le premier mètre de sol (de 57 à 71 % du Po présent en 0-210 cm). Dans les horizons superficiels, les sols des sites sous forêt galerie et Campo limpo ont les teneurs en Po les plus élevées et les sols de la station expérimentale, les teneurs les plus faibles. Le phosphore organique représente dans la couche de sol 0-100 cm plus de 25 % du phosphore total. Dans l'horizon 0-10 cm, cette proportion s'élève à 26 à 43 % dans les sols sous végétation naturelle de Cerrados et 75 % pour le sol sous forêt galerie. Dans les pâturages, elle ne dépasse pas 30 %.

*Une analyse spatiale de la biomasse aérienne et de sa teneur en P permettrait de confirmer cette hypothèse.

Dans les horizons de surface, la teneur en phosphore organique des sites sous végétation naturelle s'échelonne de 88 à 194 µg Po/g sol ; ces valeurs sont supérieures à celles indiquées pour des oxisols par Harrison (1987) : 84 µg Po/g sol en moyenne (± 10,9 ; n = 30). Sur la base des valeurs des rapports C/Po (Dalal, 1977), ce phosphore organique apparaît comme étant peu minéralisable.

Le phosphore inorganique est donné par la différence entre phosphore total et phosphore organique. Toutes situations et profondeurs confondues, les teneurs en phosphore inorganique sont supérieures à celles en phosphore organique.

Remarque : Les études réalisées sur le phosphore des oxisols prennent en compte bien souvent uniquement les premiers horizons du sol et ne traitent les données qu'en terme de teneurs. Nous disposons donc de peu d'éléments de comparaison.

❖ Lorsque l'on considère la couche de sol 0-50 cm et l'ensemble des sites (figure 22), on obtient la relation suivante entre les teneurs en Phosphore total et en Carbone :

$$Pt = 5,8 \cdot 10^{-3} C + 0,15 \quad \text{avec } n = 30, p < 1 \% \text{ et } R^2 = 0,595$$

Le sol du site RON 5 étant exclu par sa nature (latosol jaune assez différent des autres).

Cette relation semble illustrer le rôle du stockage du phosphore par la matière organique du sol. Cependant, il est important de rappeler que les teneurs en P et en C sont liées aux teneurs en argiles granulométriques et en oxydes. La relation entre les teneurs en phosphore total et carbone du sol peut donc être indirecte.

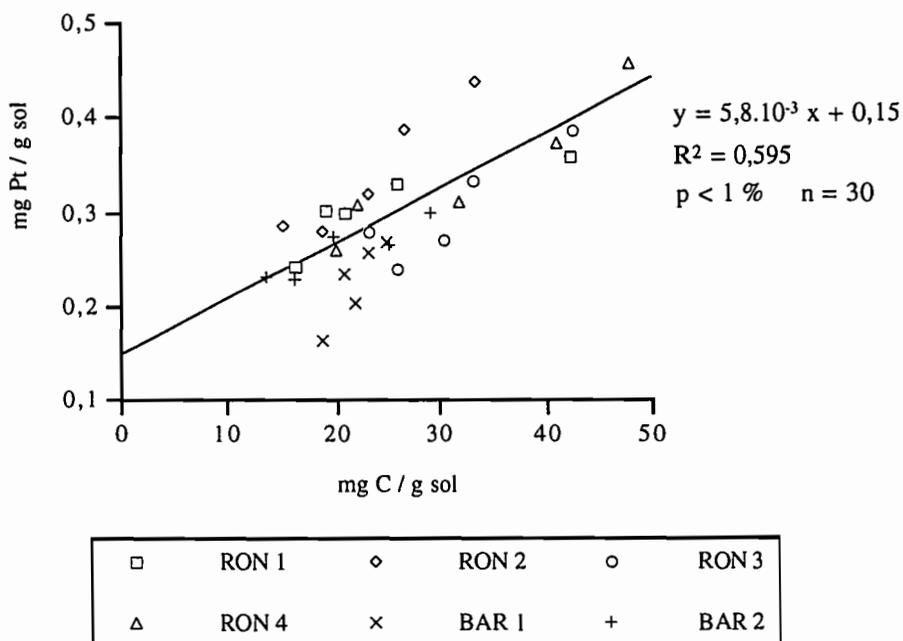
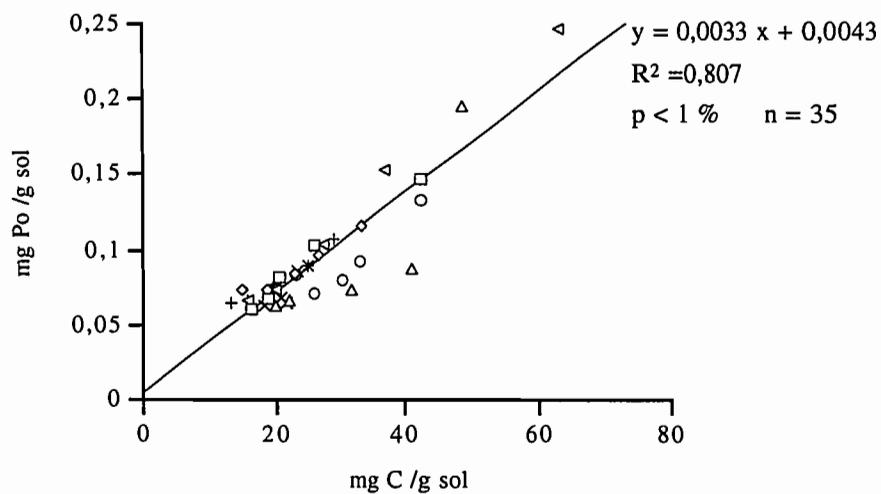


Figure 22.- Relation entre les teneurs en phosphore total et en carbone (mg/g sol) des couches de sol 0-10 cm.

Le contenu en phosphore organique d'un sol est étroitement lié à son contenu en matière organique. De fait, le coefficient de corrélation entre les teneurs en carbone et en phosphore organique de la strate 0-50 cm est de 0,81 (n = 35, p < 1 %). Pour la couche de sol 0-210 cm, il est de 0,84 (n = 147) (figure 23).



□	RON 1	◇	RON 2	○	RON 3	△	RON 4
◁	RON 5	×	BAR 1	+	BAR 2		

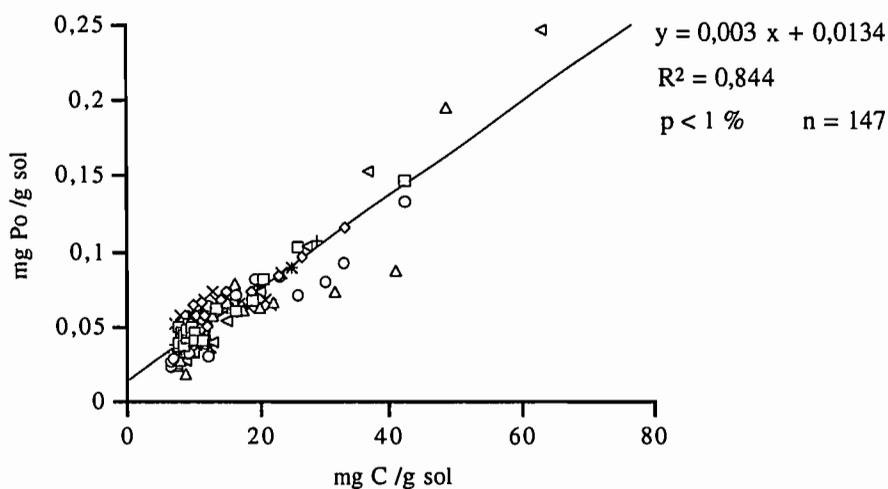


Figure 23.- Relation entre les teneurs en phosphore organique et en carbone (mg/g sol) dans les couches de sol 0-50 cm (en haut) et 0-210 cm (en bas).

❖ Pour les horizons superficiels des oxisols brésiliens étudiés par Guerra *et al.* (1996), des corrélations positives ont été mises en évidence entre les teneurs en phosphore organique d'une part et les teneurs en Fe_2O_3 ou en argiles granulométriques d'autre part. Le phosphore organique peut donc également être stabilisé par adsorption sur les surfaces minérales et notamment sur les surfaces des oxydes de fer (Ognalaga *et al.*, 1994). Dans notre cas, de telles matrices de corrélation ne peuvent être établies, le phosphore organique étant quantifié sur des échantillons systématiques à des profondeurs différentes de celles des échantillons pédologiques utilisés pour déterminer les teneurs en fer total et en particules de taille inférieure à 2 μm .



Les proportions de **phosphore organique**, notamment dans les horizons superficiels où les racines des plantes sont très présentes, sont telles (plus de 25 % du phosphore total) que nous ne pouvons négliger le rôle que peut jouer ce phosphore organique dans le cycle du phosphore.

Il nous faut garder à l'esprit l'impact de la nature même du sol (teneurs en oxydes ou hydroxydes de fer et d'aluminium, en argiles granulométriques) dans les **processus d'adsorption** des composés phosphatés sur les surfaces du sol.

L'**accessibilité** et la **nature des composés phosphatés organiques** contrôlent leur potentialité à entrer dans des processus de minéralisation.



CHAPITRE III

LES FORMES DU PHOSPHORE

Première Partie

Introduction et Données bibliographiques

I.- MÉTHODE D'ÉTUDE DU PHOSPHORE DES SOLS : LE FRACTIONNEMENT CHIMIQUE

La chimie du P est complexe, les composés du phosphore peuvent être classés comme suit (Stevenson, 1985) :

- (1) composés inorganiques et organiques solubles dans la solution du sol ;
- (2) phosphates inorganiques faiblement adsorbés sur les surfaces du sol donc rapidement échangeable avec la solution du sol ; ce compartiment est souvent dénommé pool "labile" par les auteurs anglo-saxons ;
- (3) phosphates insolubles de fer et d'aluminium dans les sols acides (ce qui est le cas des sols étudiés), ou de calcium dans les sols calcaires ou alcalins des régions tempérées, semi-arides ou arides ;
- (4) phosphates fortement adsorbés sur les surfaces des oxydes de fer et d'aluminium ;
- (5) phosphates adsorbés sur les minéraux silicatés ;
- (6) phosphore organique relativement insoluble : composés plus ou moins fortement adsorbés sur les surfaces du sol, ou immobilisés par la biomasse microbienne ou encore stabilisés dans des composés organiques de poids moléculaire variable (humus).

Les premières méthodes d'étude par fractionnement chimique ont d'abord porté sur les formes inorganique du phosphore (Fraps, 1906 ; Fischer & Thomas, 1935 ; Williams, 1937 ; Dean, 1938 ; Ghani, 1943 et Williams, 1950). Dans toutes ces méthodes, les phosphates de fer et d'aluminium sont dans la même fraction. D'autres auteurs (Bray & Kurtz, 1945 ; Turner & Rice, 1954) isolent les phosphates d'aluminium par une extraction au fluorure d'ammonium. La procédure développée par Chang & Jackson (1957) permet d'extraire les formes du P liées au calcium, à l'aluminium et au fer. Elle a largement été utilisée pour étudier les formes natives du

phosphore inorganique des sols et les transformations consécutives à l'application de fertilisant phosphaté. Les études postérieures ont montré que les extractants utilisés dans cette méthode n'étaient pas aussi spécifiques que les auteurs l'avaient supposé. Cette procédure a été modifiée par Williams *et al.* (1967), elle permet alors de prendre en considération les problèmes liés à l'éventuelle réadsorption des phosphates. D'autres changements amenés par Syers *et al.* (1972) rendent la procédure plus applicable aux sols calcaires. Dabin (1974, 1980) constate que dans les sols très acides, le phosphore lié au fer, extrait par la méthode Chang et Jackson, ne présente aucune relation avec la fertilité, il modifie donc la procédure afin de l'appliquer aux sols tropicaux.

Les premières études portant sur le phosphore organique concernent surtout les liaisons entre le cycle du phosphore et ceux du carbone, de l'azote et/ou du soufre, ou la présence du phosphore organique au sein des acides fulviques et humiques (synthèse dans Dalal, 1977). En 1982, Hedley *et al.* développent une véritable procédure d'étude du phosphore inorganique et organique par fractionnement chimique (tableau 11). Cette méthode est basée sur les résultats d'études antérieures des formes du phosphore obtenus par des extractants spécifiques. Amer *et al.* (1955), Sibbesen (1977) puis Bowman & Cole (1978) ont été les premiers à quantifier le phosphore inorganique extrait par une résine échangeuse d'anions et à le mettre en parallèle avec le compartiment de phosphates immédiatement assimilable par les plantes. Hedley et ses coauteurs (1982, tableau 11) reprennent cette extraction comme première fraction. Une solution de NaHCO_3 0,5 M, extractant doux employé par Olsen *et al.* (1954) puis Bowman & Cole (1978), permet d'extraire le phosphore organique et inorganique, qui étant faiblement adsorbé sur les surfaces du sol, reste échangeable (Fardeau *et al.*, 1988) ; ce réactif extrait également une faible proportion du phosphore microbien. Les formes plus liées aux surfaces du sol et notamment aux surfaces des oxydes de fer et d'aluminium sont extraites par la soude (Batsula & Krivonosova, 1973 ; Williams *et al.*, 1980). Ces formes peuvent aussi contribuer à la nutrition des plantes (Gahoonia & Nielsen, 1992). L'application d'ultrasons permet à ce niveau de quantifier le phosphore présent au sein des agrégats. Finalement, les extractions acides quantifient les pools de phosphore inorganique associés aux minéraux ou les composés phosphatés organiques insolubles.

Depuis sa publication, cette méthode a été largement utilisée même si elle subit parfois quelques modifications. Cross & Schlesinger (1995) ont dressé une synthèse des différents types de sols dont les compartiments de phosphore inorganique et organique ont été étudiés selon la méthode de fractionnement d'Hedley. Selon ces auteurs, cette méthode fournirait un bon index de l'importance relative des processus biologiques (*vs* processus géochimiques) dans le cycle du phosphore. La synthèse de Cross & Schlesinger (1995) montre également que la terminologie relative à la disponibilité pour les plantes des formes de phosphore extraites varie selon les auteurs. Cependant, les utilisateurs de la méthode s'accordent à dire que les premières extractions (cf fractions 1,2 & 3 du tableau 11) permettent d'obtenir du P potentiellement

assimilable par les plantes. Il est toutefois préférable d'employer le terme de phosphore "extractible" plutôt que celui de phosphore "assimilable" pour dénommer cette réserve de P extraite par des réactifs chimiques modérés, et à laquelle la plante peut avoir plus ou moins accès.

Tableau 11.- Schéma du fractionnement chimique utilisé par Hedley *et al.* (1982) pour séparer le phosphore inorganique et organique en fractions plus ou moins disponibles pour la nutrition des plantes.

Fraction	Traitement	Terminologie selon Hedley <i>et al.</i> (1982)
1	Extraction par une résine échangeuse anionique	Extrait le phosphore inorganique le plus disponible pour les plantes
2a	Extraction par NaHCO ₃ 0,5 M	Extrait le phosphore inorganique et organique faiblement adsorbé sur les surfaces du sol (P échangeable ou "labile") et une partie du phosphore microbien
2b	Traitement au chloroforme + Extraction par NaHCO ₃ 0,5 M	La différence entre les traitements 2a et 2b représente le phosphore inorganique et organique issu des cellules microbiennes lysées
3	Extraction par NaOH 0,1 M	Extrait le phosphore inorganique et organique fortement adsorbés sur les surfaces des composés amorphes et des oxydes de fer et d'aluminium
4	Ultrasonification + Extraction par NaOH 0,1 M	Permet l'extraction du phosphore inorganique et organique des surfaces internes des agrégats du sol
5	Extraction par HCl 1 M	Extrait le P des minéraux phosphatés de type apatite
6	Oxydation (H ₂ O ₂) et digestion acide (H ₂ SO ₄) du résidu final	Donne le phosphore inextractible par tous les réactifs précédemment utilisés (Formes stables du phosphore organique et composés insoluble du phosphore inorganique)

II.- LES FORMES DU PHOSPHORE ORGANIQUE

La nature chimique d'une large proportion des formes de P organique reste inconnue ; certains composés sont inclus dans des complexes MO-Po stables résistant à l'hydrolyse chimique ou enzymatique (Brannon & Sommers, 1985).

Les phosphates d'inositol représentent en moyenne 50 % du phosphore organique présents dans les sols. Chez les plantes, une seule forme stéréoisomérique existe, c'est l'hexaphosphate de *myo*-inositol communément appelé phytate ; il semble être une forme de stockage du P dans les grains qui sera utilisé lors de la germination. Par contre, dans le sol, il existe plusieurs formes stéréoisomériques : *myo*-, *scyllo*-, *D-chiro*-, *L-chiro*- et *neo*-inositol (Dalal, 1977 ; Cosgrove, 1980). Les hexa- et pentaphosphate d'inositol sont prédominants dans beaucoup de sols par rapport aux autres dérivés d'inositol moins phosphorés qui sont probablement moins stables (Dalal, 1977). Le phytate (*myo*-inositol hexaphosphate), de par sa stabilité chimique peut représenter jusqu'à 60 % des phosphates d'inositol présents dans les sols (Cosgrove, 1980). Les phosphates d'inositol sont présents sous des formes très complexes en association avec les argiles, les acides organiques, les protéines et certains ions métalliques (Stewart & Tiessen, 1987 ; Rojo *et al.*, 1990). Ces formes sont très stables, difficiles à dégrader et peuvent donc s'accumuler dans le sol. Dans les sols acides, des composés comme le phytate de fer ou d'aluminium peuvent se former et en présence d'une forte concentration en fer et en aluminium devenir insolubles (dans une gamme de pH allant de 3 à 8). Le phytate s'adsorbe sur les oxydes de fer et d'aluminium beaucoup plus fortement que l'orthophosphate (Anderson *et al.*, 1974 ; Ognalaga *et al.*, 1994).

Le phosphore organique peut également se présenter sous d'autres formes identifiées comme étant des acides nucléiques, des phospholipides, des phosphonates, des sucres phosphatés. Les acides nucléiques et leurs dérivés représentent moins de 3 % du Po total des sols et proviennent de la décomposition des micro-organismes, des plantes et des animaux. Ils sont rapidement minéralisés, resynthétisés et combinés avec d'autres constituants du sol difficiles à extraire et à analyser, ou incorporés dans la biomasse microbienne (Anderson, 1970 ; Anderson & Malcolm, 1974). Les phospholipides peuvent représenter de 0,5 à 7 % du Po (Anderson & Malcolm, 1974) et sont d'origine microbienne, végétale ou animale ; les phosphoglycérides en forment la plus grande partie. Les phospholipides représentent la fraction la plus importante des phosphates organiques des plantes et entrent notamment dans la composition des membranes. D'autres sucres phosphatés ont été identifiés dans les sols (Adams & Byrnes, 1989) mais une grande partie des composés organiques phosphatés restent encore non identifiés.

Les techniques de chromatographie permettent d'identifier des composés organiques tels que les inositols de phosphate (monoesters de phosphate), les acides nucléiques ou les phospholipides (Dalal, 1977 ; Anderson, 1980) mais ces techniques sont relativement complexes. L'utilisation de la Résonance Magnétique Nucléaire (^{31}P -RMN), technique plus moderne permet d'identifier certaines familles d'espèces chimiques du phosphore : orthophosphate, monoesters de phosphate, diesters phosphatés, polyphosphates, pyrophosphate et phosphonates.

L'analyse est en général pratiquée sur des extraits alcalins (Newman & Tate, 1980 ; Tate & Newman, 1982 ; Emsley & Niazi, 1983 ; Hawkes *et al.*, 1984 ; Condrón *et al.*, 1990 ; Makarov, 1995 ; Guggenberger *et al.*, 1996). Cette technique d'extraction nécessite une centrifugation, et exclut donc la phase solide du sol. Cette phase, non analysée en RMN, peut contenir de 3 à 22 % du phosphore organique total (Condrón *et al.*, 1990). Il est possible d'obtenir un spectre RMN à partir du sol sans pratiquer d'extraction si la concentration en phosphore est suffisamment élevée (Williams *et al.*, 1981) mais la résolution est mauvaise (Zech *et al.*, 1985). De plus, la présence d'ions paramagnétique comme le Fe^{3+} peut supprimer le signal du ^{31}P , comme c'est le cas en RMN du ^{13}C sur phase solide (Vassallo *et al.*, 1987).

L'interprétation des résultats de RMN montre que les diesters phosphatés, comprenant les phospholipides et les acides nucléiques, sont plus rapidement convertis en phosphore inorganique assimilable par les plantes que les monoesters de phosphate (Tate & Newman, 1982 ; Hinedi *et al.*, 1988, Condrón *et al.*, 1990). Les diesters sont moins présents dans les sols sous cultures anciennes et les monoesters constituent la plus grande fraction des composés phosphatés organiques dans les sols de pâturages ayant subi une fertilisation (Hawkes *et al.*, 1984 ; Condrón *et al.*, 1990 ; Condrón *et al.*, 1985).

L'accessibilité et la nature des composés phosphatés organiques contrôlent leur potentialité à entrer dans les processus de minéralisation. La méthode de fractionnement chimique (Méthode Hedley modifiée) nous permettra de juger de l'accessibilité des formes du phosphore. La technique de ^{31}P -RMN nous permettra d'observer sous quelles formes se présente le phosphore des extraits alcalins.

Deuxième Partie

Extraction séquentielle des compartiments du phosphore

(méthode Hedley modifiée)

I.- MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.- Méthodes

❖ La méthode de fractionnement chimique du phosphore employée par Hedley *et al.* (1982) (tableau 11) est simplifiée. L'échantillon de sol subit directement une extraction par une solution de NaHCO_3 0,5 M selon un rapport sol/solution de 1/40. Dans des tubes à centrifugeuse, 1,5 g de sol sec à l'air, tamisé à 2 mm et 60 ml d'une solution de NaHCO_3 0,5 M sont mis en agitation durant 17 heures. Une centrifugation de 30 minutes à 7000 rpm est ensuite pratiquée puis l'extrait est filtré. Le culot est repris par 60 ml d'une solution de NaOH 0,1 M ; ce mélange est également agité, centrifugé et filtré. L'extraction séquentielle pratiquée dans ce travail ne comporte que ces deux étapes.

La fraction A extraite par NaHCO_3 0,5 M contient le phosphore des fractions 1 et 2 de la méthode Hedley (tableau 11) : phosphore inorganique le plus disponible pour les plantes, phosphore inorganique et organique faiblement adsorbés sur les surfaces du sol et une petite partie du phosphore microbien. La fraction B extraite par la soude 0,1 M correspond à la fraction 3 de la méthode Hedley. Elle contient le phosphore inorganique et organique fortement adsorbés sur les surfaces du sol (notamment oxydes de fer et d'aluminium). Notre étude s'attache donc à quantifier les compartiments de phosphore qui restent à différents degrés potentiellement assimilables par les plantes. Une troisième extraction est réalisée par action directe de la soude 0,1 M sur les échantillons de sol. Cette fraction sera appelée B'.

Trois réplicats sont réalisés pour chaque extraction. Un test statistique (test t, $p < 5 \%$) permet de déterminer les différences significatives. Les teneurs sont exprimées en $\mu\text{g P/g sol}$.

❖ Le phosphore inorganique est dosé par colorimétrie (John, 1970) après acidification de l'extrait.

Une méthode utilisée en chimie marine et mise en place par l'Agence américaine de Protection de l'Environnement (E.P.A., 1971) permet la transformation de toutes les formes du phosphore en phosphates, forme soluble compatible avec les méthodes de dosages colorimétriques. De l'acide sulfurique et du persulfate d'ammonium sont ajoutés à l'extrait, le tout est placé une heure en autoclave (120°C) puis la teneur en phosphore total de l'extrait est quantifiée par colorimétrie. La teneur en phosphore organique est donnée par le calcul de la différence entre les teneurs en phosphore total et inorganique.

❖ Les teneurs en fer et en aluminium des extraits sont dosées par spectrométrie ICP.

2.- Échantillons analysés

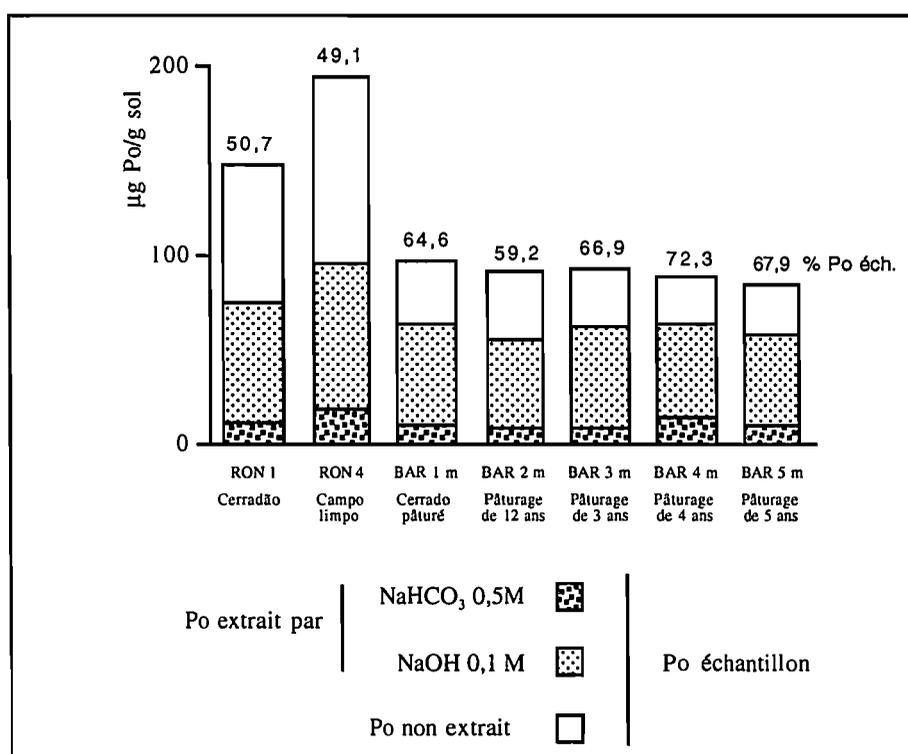
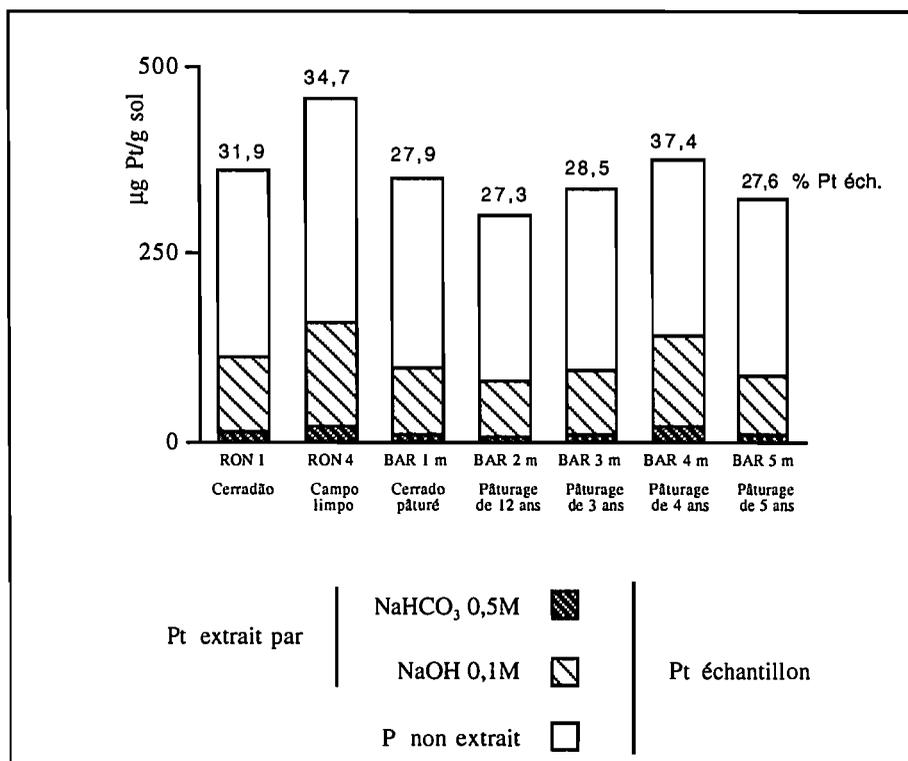
L'étude porte sur les couches de sol 0-10 cm des latosols rouges foncés (LE). Les prélèvements utilisés sont ceux effectués dans les fosses pédologiques pour les sites naturels ou à la tarière (échantillons moyens) pour les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA. Tous les sites naturels ne sont pas étudiés : le site RON 1 supportant une végétation de Cerradão et le site RON 4 supportant une savane à graminées (Campo limpo) sont les situations retenues.

II.- RÉSULTATS

1.- Taux d'extraction du phosphore et limite de la méthode

❖ La comparaison des teneurs en phosphore total, inorganique et organique des fractions A et B avec les teneurs globales de l'échantillon permet d'apprécier les quantités de phosphore pouvant être extraite par la méthode (figure 24).

Le fractionnement chimique des échantillons tel qu'il est pratiqué dans cette étude permet d'extraire selon l'échantillon de 27,3 à 37,4 % du phosphore total présent.



Note : les nombres placés sur les barres des histogrammes donnent les quantités extraites par la méthode, exprimées en % de la teneur totale de l'échantillon

Figure 24.- Quantités de phosphore total (en haut) et de phosphore organique ($\mu\text{g P/g sol}$) (en bas) extraites par le bicarbonate de sodium et la soude. Relation avec les teneurs totales de l'échantillon.

Pour le phosphore organique, les quantités extraites sont significativement plus importantes dans les sites naturels mais pour ces sites, la méthode ne permet d'extraire que 50 % du phosphore organique total.

Pour les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA, l'extraction séquentielle permet d'obtenir un meilleur rendement (de 59 à 72 % du Po total) (figure 24). Le phosphore organique se trouve donc dans ces sites sous des formes plus facilement extractibles.

❖ Les quantités produites par l'extraction séquentielle (fractions A et B, annexe VII) sont similaires ($p < 5\%$) à celles données par une action directe de la soude sur l'échantillon. La seule exception à cette règle est constatée pour les teneurs en phosphore inorganique des sols sous pâturages de 4 et 5 ans (BAR 4 et BAR 5) ; la teneur en P_i des extraits A + B (bicarbonate et soude) est significativement inférieure à celle mesurée dans l'extrait B' (soude).

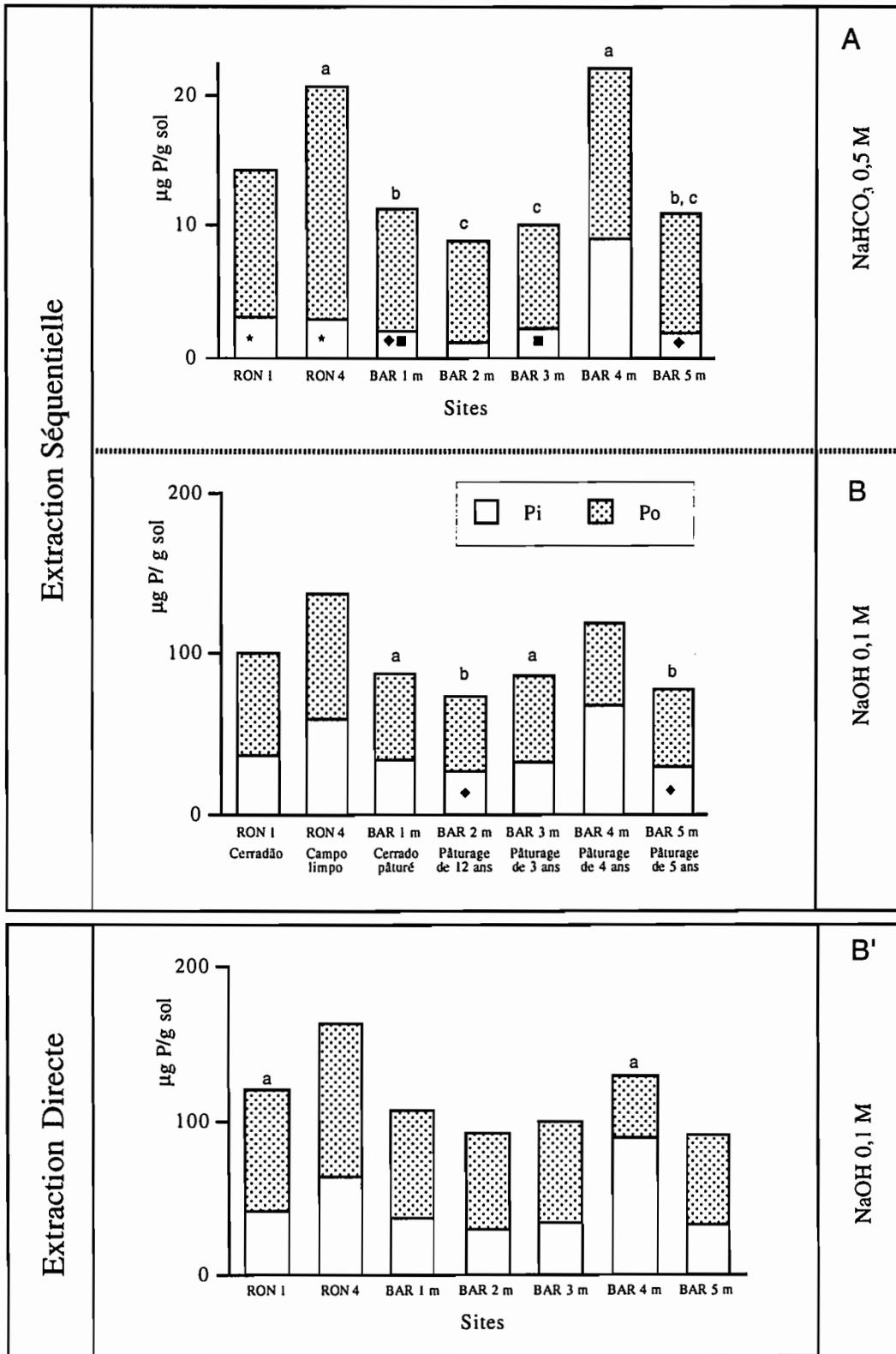
2.- Le phosphore total (Pt) des extraits

❖ Les teneurs en phosphore total des extraits sont comprises entre 8,9 et 22,2 $\mu\text{g Pt/g sol}$ pour les extraits A (extraction par NaHCO_3 0,5 M) (annexe VII, figure 25). Les sites sous pâturages, BAR 2m, BAR 3m et BAR 5m, présentent les valeurs les plus faibles ; le site sous savane à graminées (RON 4) et le pâturage de 4 ans (BAR 4m) ont des teneurs deux fois plus importantes.

❖ Les teneurs en phosphore total des extraits B (extraction par NaOH 0,1 M sur le culot de l'extraction par NaHCO_3 0,5 M) sont de 5,3 à 8,5 fois supérieures à celles observées dans les extraits A. Elles sont comprises entre 73,4 et 137,7 $\mu\text{g Pt/g sol}$ (annexe VII, figure 25). Les sites RON 4 et BAR 4m présentent encore les valeurs les plus élevées et les sites BAR 5m et BAR 2m les valeurs les plus faibles. Le classement inter-sites* est le suivant :

RON 4	>	BAR 4m	>	RON 1	>	BAR 1m	≡	BAR 3m	>	BAR 2m	≡	BAR 5m
Campo limpo	>	Pâturage de 4 ans	>	Cerradão	>	Cerrado pâturé	≡	Pâturage de 3 ans	>	Pâturage de 12 ans	≡	Pâturage de 5 ans

* Les différences significatives au seuil de 5 % sont matérialisées par le signe ">".



Note : 2 lettres (Pt) ou 2 symboles (Pi) identiques correspondent à des teneurs égales ($p < 5\%$)

Figure 25.- Teneurs en phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) ($\mu\text{g P/g sol}$) des extraits bicarbonate et soude.

❖ Les teneurs en Pt des extraits B' (obtenus par action directe de la soude sur les échantillons de sol) sont apparemment légèrement plus importantes que celles des extraits A + B mais les différences observées ne sont pas significatives au seuil de 5 %. La séquence entre sites est la même que pour les extraits B.

3.- Le phosphore inorganique (Pi) des extraits

❖ Dans les extraits A, la teneur en phosphore inorganique du pâturage de 4 ans (BAR 4 m, 9 µg Pi/g sol) est de 3 à 8 fois supérieure à celle des autres sites. La valeur la plus faible est rencontrée pour le pâturage ancien (BAR 2 m). Les pâturages de 5 et 3 ans (BAR 5 m, BAR 3 m) et le Cerrado pâturé (BAR 1 m) ont des teneurs proches de 2 µg Pi/g sol ; les sites naturels (RON) des valeurs voisines de 3 µg Pi/g sol (annexe VII, figure 25).

❖ Les teneurs en Pi des extraits soude (B) sont de 7,5 à 25 fois plus élevées que celles des extraits bicarbonate (A). Elles sont comprises entre 27,3 et 68 µg Pi/g sol. Tous les sites hormis les pâturages de 12 et 5 ans (BAR 2 m, BAR 5 m) ont des teneurs en Pi significativement différentes les unes des autres. Le classement inter-sites est le suivant :

BAR 4m	>	RON 4	>	RON 1	>	BAR 1m	>	BAR 3m	>	BAR 2m	≅	BAR 5m
Pâturage de 4 ans	>	Campo limpo	>	Cerradão	>	Cerrado pâturé	>	Pâturage de 3 ans	>	Pâturage de 12 ans	≅	Pâturage de 5 ans

Hormis pour les sites BAR 4m et RON 4, ce classement est le même que pour les teneurs en phosphore total des extraits.

❖ Pour les extraits B', tous les sites sont significativement différents en terme de phosphore inorganique, la séquence est la même que pour les extraits B. Contrairement à ce qui était observé pour les teneurs en phosphore total, il existe des différences significatives entre les quantités extraites par action de la soude seule (extraits B') et par extraction séquentielle (extraits A + B). Elles sont observées pour les pâturages de 4 et 5 ans (BAR 4 m et BAR 5 m) : les teneurs en Pi sont significativement plus élevées dans l'extrait produit par action directe de la soude sur le sol que dans les extraits produits par extraction séquentielle.

4.- Le phosphore organique* (Po) des extraits

❖ Dans les extraits bicarbonate (A), les teneurs en phosphore organique varient de 7,8 à 17,8 $\mu\text{g Po/g sol}$. Le sol sous savane à graminées (RON 4) présente la valeur la plus élevée et se différencie significativement des autres. Le pâturage de 4 ans (BAR 4 m) et le Cerradão (RON 1) ont des valeurs un peu plus faibles (13,2 et 11,2 $\mu\text{g Po/g sol}$). Les autres sites ont des teneurs en phosphore organique inférieures à 10 $\mu\text{g/g sol}$ (annexe VII). Dans les extraits bicarbonate, le phosphore organique représente entre 78 et 88 % du phosphore total.

❖ Dans les extraits soude (B), les teneurs en Po sont de 3,8 à 6,9 fois plus importantes (figure 25). Elles s'échelonnent de 46,1 à 77,8 $\mu\text{g Po/g sol}$ selon l'échantillon. Les sites naturels ont les teneurs les plus élevées (RON 4 puis RON 1). Les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA ont des teneurs peu différenciées, comprises entre 46,1 et 53,6 $\mu\text{g Po/g sol}$. Le phosphore des extraits soude est à plus de 60 % sous forme organique.

❖ L'extraction séquentielle procure :

- pour les sites naturels (RON), 75 et 95 $\mu\text{g Po/g sol}$, ce qui correspond à 65 et 60,4 % du phosphore total des extraits.

- pour les sites de la station expérimentale, entre 53 et 64 $\mu\text{g Po/g sol}$. Ces teneurs correspondent à 45 % du phosphore total des extraits pour le pâturage de 4 ans et à près de 65 % du Pt extrait pour les autres sites de la station.

❖ Dans les extraits B', les quantités de Po extraites sont équivalentes à celles extraites par le bicarbonate puis la soude (A + B) pour tous les sites hormis pour le site BAR 4 m, pâturage de 4 ans. Dans ce cas, l'extrait B' ne contient que les 2/3 de la quantité présente dans les fractions A + B. Ceci est à mettre en parallèle avec la quantité de phosphore inorganique plus élevée, constatée précédemment dans l'extrait B' ; les quantités de phosphore total étant les mêmes en B' et en (A+B).

* Les teneurs en phosphore organique sont obtenues par calcul de la différence entre les teneurs en phosphore total et en phosphore inorganique.

5.- Le fer et l'aluminium des extraits (annexe VII)

Dans l'extrait bicarbonate, les quantités de fer varient entre 2,8 et 66,4 $\mu\text{g Fe/g sol}$. Elles sont nettement plus importantes dans les extraits soude : de 1524,6 à 3028 $\mu\text{g Fe/g sol}$ dans l'extrait B et de 1968,9 à 8387,2 $\mu\text{g Fe/g sol}$ dans l'extrait B'.

Les teneurs en aluminium sont de 31,4 et 19,4 $\mu\text{g Al/g sol}$ dans l'extrait bicarbonate des horizons superficiels des sols sous végétation naturelle (respectivement, RON 1 et RON 4) ; elles sont nulles pour les sites de la fazenda. Dans l'extrait soude B, elles s'échelonnent de 1989,1 à 11289,6 $\mu\text{g Al/g sol}$. Comme pour les teneurs en fer, l'extrait B' obtenu par action directe de la soude présente des quantités plus élevées ($p < 5 \%$).

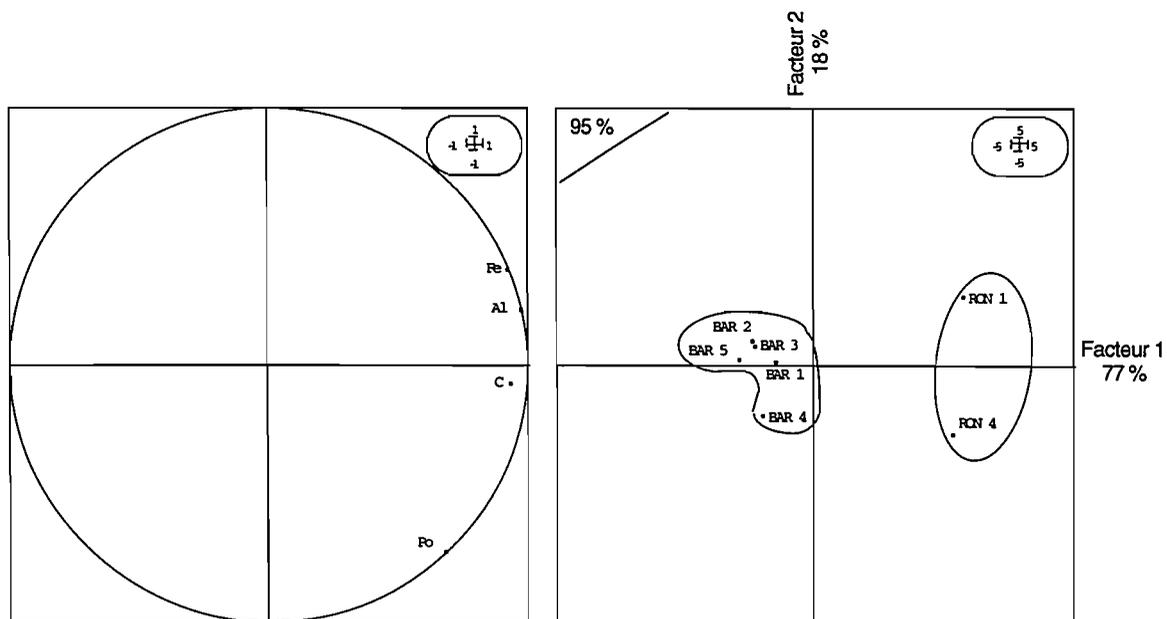
Quelque soit l'extrait, les teneurs des échantillons des sols sous végétation naturelle sont significativement supérieures à celles des sols sous pâturages.

6.- Analyses en Composantes Principales : teneurs en phosphore des extraits et caractéristiques chimiques des strates 0-10 cm

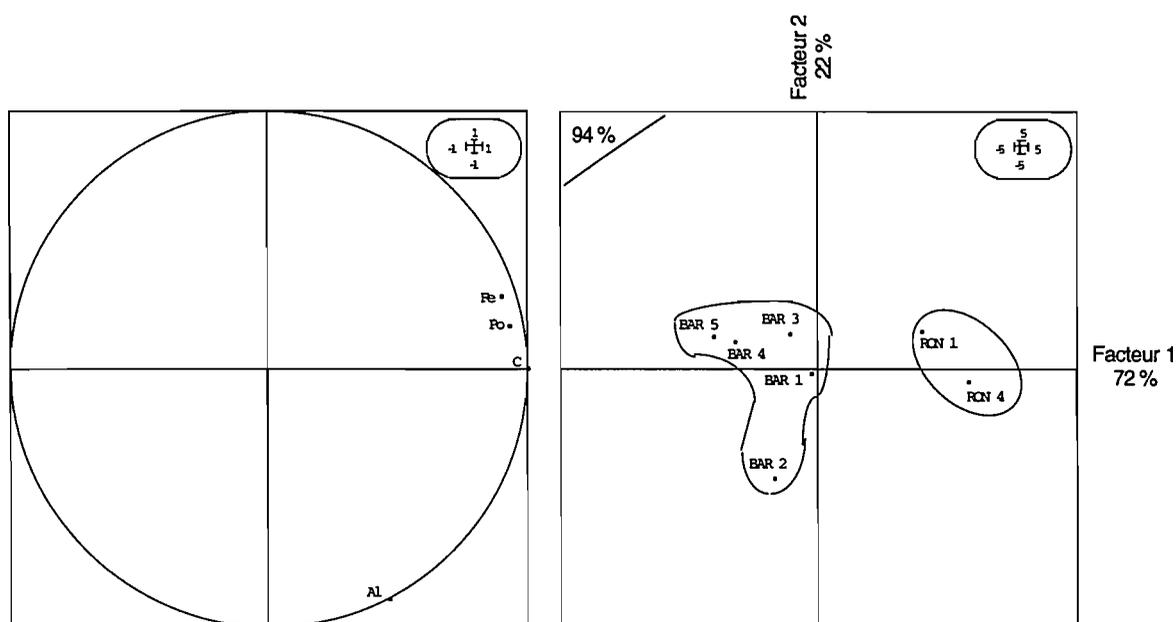
Une Analyse multivariée en Composantes Principales (ACP) permet de comparer n individus entre eux en tenant compte de m variables simultanément. Les individus sont les 7 couches de sol 0-10 cm. L'analyse factorielle a pour variables les teneurs en phosphore (Pt, Pi, Po), en aluminium (Al) et en fer (Fe) des extraits A et B (annexe VII) et la teneur en carbone (C) de l'échantillon (annexe IV). La teneur en phosphore organique étant calculée par différence entre les teneurs en phosphore total et inorganique, ces variables sont donc dépendantes. L'ACP traitera donc dans un premier temps les variables Po, Al, Fe et C puis les variables Pt, Pi, Al, Fe et C. Les figures 26 et 27 donnent les résultats graphiques de cette étude statistique.

6.1.- ACP avec les variables Po, Al, Fe et C (figure 26)

Pour les deux extraits (A : NaHCO_3 0,5M et B : NaOH 0,1 M), le plan défini par les axes factoriels 1 et 2 représente plus de 90 % de la variance totale des données. L'axe 1 représente à lui seul plus de 70 % de la dispersion des points.



NaHCO₃ 0,5 M



NaOH 0,1 M

Figure 26.- Graphes issus de l'Analyse en Composantes Principales effectuée sur les données des extractions séquentielles. Variables : teneurs en Po, Al et Fe ($\mu\text{g/g}$ sol) des extraits A et B et teneur en carbone (mg/g sol) de l'horizon 0-10 cm.

RON 1 : Cerradão - RON 4 : Campo limpo - BAR 1 : Cerrado pâturé - BAR 2 : Pâturage de 12 ans - BAR 3 : Pâturage de 3 ans - BAR 4 : Pâturage de 4 ans - BAR 5 : Pâturage de 5 ans

❖ **Extrait bicarbonate**

Les variables Al, Fe et C sont positivement corrélées ($R^2 > 0,61$, annexe VIII). Elles sont représentées par l'axe 1 et expriment 77 % de la variance totale des données. Les coefficients de corrélation entre Al, Fe, C et Po sont plus faibles. Po est représenté par l'axe 2 et n'exprime que 18 % de la dispersion des échantillons.

L'axe 1 oppose les sites naturels RON 1 et RON 4, dont les teneurs en Al, Fe et C sont plus élevées, aux pâturages (BAR).

L'axe 2 oppose de façon moins nette les sites naturels et le pâturage de 4 ans (BAR 4) aux teneurs en phosphore organique plus élevées que les autres sites.

❖ **Extrait soude**

L'axe 1 regroupe les variables Fe, C et Po et exprime 72 % de la dispersion de l'échantillonnage. Ces variables sont positivement corrélées ($R^2 > 0,58$, annexe VIII). La teneur en aluminium dans l'extrait B est représentée par l'axe 2 et explique 22 % de la variance totale.

L'axe factoriel 1 oppose les sites naturels RON 1 et RON 4 dont les teneurs en Fe, C et Po sont les plus élevées aux pâturages (BAR).

L'axe 2 représentant la teneur en aluminium dans l'extrait permet d'isoler le pâturage ancien (BAR 2).

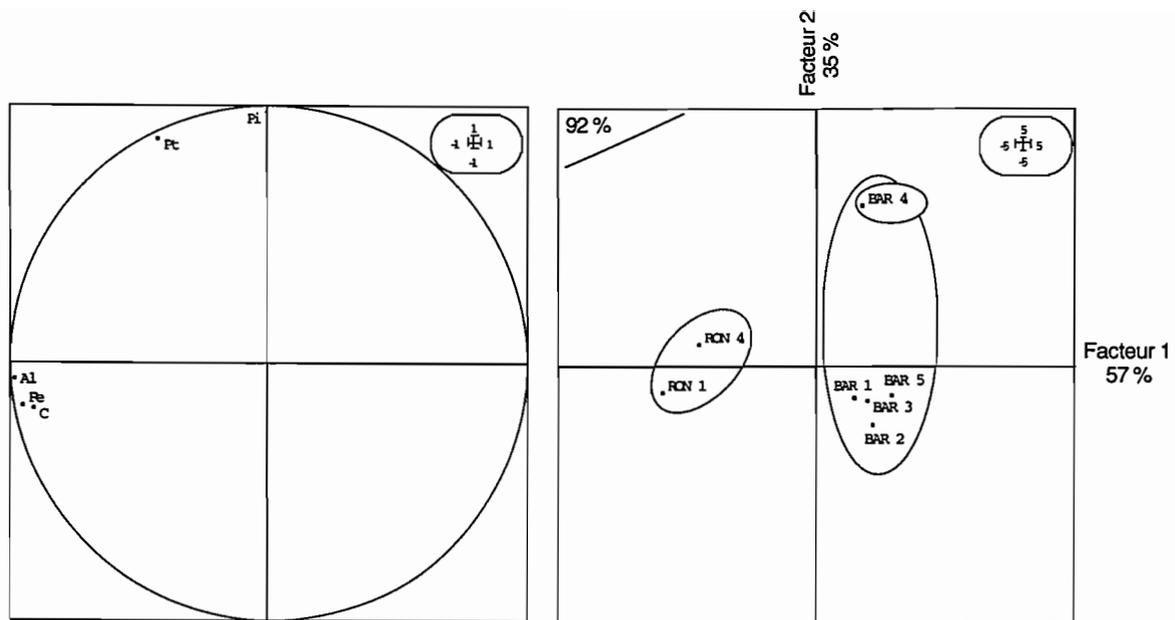
6.2.- ACP avec les variables Pi, Pt, Al, Fe et C (figure 27)

Le plan défini par les axes factoriels 1 et 2 exprime 92 et 84 % de la variance totale. L'axe 1 a un poids plus faible que précédemment mais représente encore un peu plus de 50 % de la dispersion.

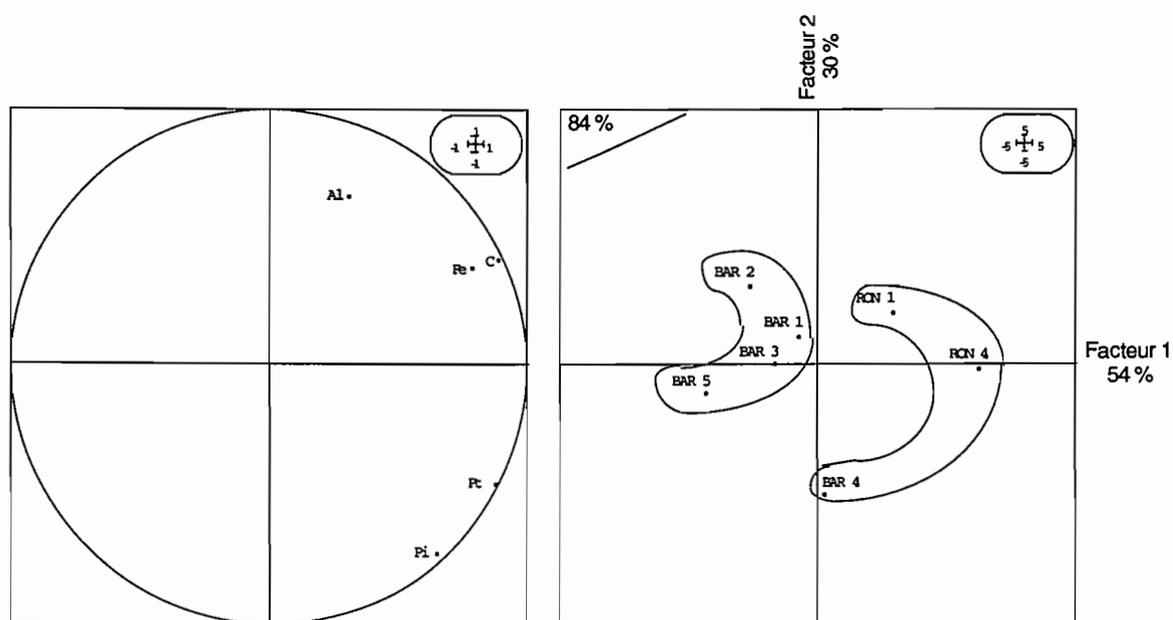
❖ **Extrait bicarbonate**

Les corrélations entre Al, Fe et C sont les mêmes que précédemment. Ces trois variables sont faiblement corrélées aux teneurs en phosphore total. Le coefficient de corrélation est négatif pour ce qui concerne leurs liaisons avec le phosphore inorganique. Les teneurs en phosphore total et en phosphore inorganique sont corrélées ($R^2 = 0,62$, annexe VIII). Les teneurs en aluminium, fer et carbone sont représentées par l'axe 1 et les teneurs en phosphore par l'axe 2.

L'axe 2 permet d'opposer le site BAR 4, pâturage de 4 ans, dont la teneur en Pi est élevée aux autres sites.



NaHCO₃ 0,5 M



NaOH 0,1 M

Figure 27.- Graphes issus de l'Analyse en Composantes Principales effectuée sur les données des extractions séquentielles. Variables : teneurs en Pi, Pt, Al et Fe ($\mu\text{g/g}$ sol) des extraits A et B et teneur en carbone (mg/g sol) de l'horizon 0-10 cm.

RON 1 : Cerradão - RON 4 : Campo limpo - BAR 1 : Cerrado pâturé - BAR 2 : Pâturage de 12 ans - BAR 3 : Pâturage de 3 ans - BAR 4 : Pâturage de 4 ans - BAR 5 : Pâturage de 5 ans

❖ Extrait soude

Malgré un coefficient de corrélation de 0,83, les variables Pi et Pt ne se trouvent pas représentées par le même axe factoriel. L'axe 1 exprime les teneurs en fer, carbone et phosphore total ; Al et Pi sont tout deux en axe 2 mais sont anticorrélées.

L'axe 1 oppose les sites naturels et le pâturage de 4 ans aux teneurs en Fe, C et Pt plus élevées aux autres sites. L'axe 2 isole le site BAR 4 du fait d'une teneur en phosphore inorganique importante.

III.- DISCUSSION

Les sites naturels ou peu perturbés, et notamment le site sous savane herbacée (Campo limpo, RON 4) présentent les teneurs en phosphore les plus élevées.

En RON 4, dans l'horizon superficiel, 86 % du phosphore total de l'extrait bicarbonate est sous la forme organique. Dans l'extrait à la soude, la quantité de phosphore total est 6,6 fois plus importante et le phosphore organique représente 56,5 % du phosphore total.

Pour RON 1, sol sous Cerradão, la quantité de phosphore total de l'extrait A est inférieure à celle présente dans le même extrait pour RON 4 mais les quantités de phosphore inorganique sont identiques. Le phosphore de l'extrait bicarbonaté est à 78 % sous forme organique. La teneur en phosphore total de l'extrait soude est supérieure de 7 fois à celle de l'extrait bicarbonate. Le phosphore organique représente dans cet extrait 63 % du phosphore total.

Le pâturage âgé de 4 ans (BAR 4) avec des teneurs élevées en phosphore inorganique se différencie nettement des autres sites de la station expérimentale à tel point qu'il est beaucoup plus proche du site sous savane herbacée. Cet écart est mis en valeur par l'ACP (figure 27). Les valeurs les plus faibles sont données par le site sous pâturage de 12 ans (BAR 2). Les pâturages de 3 et 5 ans (BAR 3 et BAR 5) ont des valeurs légèrement supérieures, parfois égales, à celles du pâturage de 12 ans d'âge.

Les quantités de P extraites correspondent à 27-35 % du phosphore total et 49-72 % du phosphore organique. Elles sont supérieures, notamment pour le phosphore organique, à celles citées par différents auteurs ayant travaillé sur des sols analogues (Araújo *et al.*, 1995 ; Guerra *et al.*, 1996).

L'analyse statistique montre que :

1) les valeurs des teneurs en fer des extraits sont mathématiquement liées aux quantités de carbone et secondairement à celles de produits amorphes du fer (extrait Tamm, annexe III et IV)

présentes dans les échantillons (matrice de corrélation établie d'après les données des horizons de surfaces des sites RON 1, RON 4, BAR 1 et BAR 2). L'aluminium des extraits est lié aux quantités d'ions Al^{3+} , de carbone, et aux quantités d'Al extraites par la technique CBD* présentes dans les échantillons, et secondairement à celles de produits amorphes de l'aluminium.

2) les teneurs en phosphore de l'extrait bicarbonate ne sont pas liées à celles du fer et de l'aluminium extraits ou du carbone (annexe VIII). D'autres auteurs rapportent une corrélation positive entre les teneurs en phosphore organique et en carbone de l'extrait bicarbonate, avec pourtant des teneurs en carbone et en phosphore organique de l'échantillon non liées (Linguist *et al.*, 1997 ; Tiessen *et al.*, 1992). Cet extractant permettrait d'obtenir avec les échantillons étudiés les formes de phosphore présentes dans la solution du sol ou faiblement adsorbées sur les surfaces du sol ou encore une partie du P d'origine microbienne. Ces formes de phosphore participent à la nutrition des plantes.

3) dans l'extrait soude, les teneurs en phosphore, quelle que soit la forme (Po, Pi ou Pt), sont liées aux teneurs en fer présentes dans l'extrait et aux teneurs en carbone de l'échantillon. L'aluminium pourtant extrait en quantité importante ne semble pas être lié au phosphore organique (coefficient de corrélation faible, annexe VIII). Cependant, dans les horizons 0-10 cm, les teneurs en aluminium extrait par la méthode CBD* sont corrélées à la teneur en carbone ($R^2 = 0,90$). Une forte corrélation est également observée par Salcedo *et al.* (1997) dans une gamme de sols brésiliens typiques entre la teneur en carbone organique et les teneurs en aluminium ou en fer issues des extraits Tamm (produits amorphes).

Les latosols des Cerrados sont caractérisés par un humus de type O (Volkoff & Cerri, 1988), peu coloré, riche en acides fulviques libres et en humines. Dans les dix premiers centimètres des sols sous sites naturels, la matière organique extractible par la méthode Dabin (annexe IX) est essentiellement composée de petites molécules (acides fulviques = 70 % du C extrait). Le premier extrait (H_3PO_4 2M) permet d'obtenir de 25 à 42 % du carbone extrait. La corrélation $Al_{CBD}-C$, mise en valeur dans les extraits soude (méthode Hedley), trouve sans doute son explication dans la proportion de matières humiques alcalino-solubles (environ 25 % du carbone total).

Les résultats permettent de confirmer la possibilité d'approcher par une extraction séquentielle les quantités de P adsorbé sur les surfaces du sol et notamment sur les surfaces des **oxydes de fer**. Cette extraction permet également de mobiliser une partie du **phosphore lié à la matière organique**, comme l'indiquent les teneurs importantes en Po extrait.

* Al_{CBD} : Al substitué dans les oxydes de fer + complexes MO-Al ± gibbsite mal cristallisée, cf annexe III

Quel que soit le site considéré, l'essentiel du **phosphore extractible** par cette méthode se trouve (i) dans les extraits soude donc sous des **formes adsorbées** sur les surfaces des oxydes, notamment de fer et (ii) sous forme **organique**. Toutefois, aucune ultrafiltration n'ayant été pratiquée sur les extraits, une fraction de phosphore d'origine colloïdale peut également avoir été dosée.

Pour l'extraction du phosphore organique, peu de différences sont constatées entre les quantités données par une extraction séquentielle et par une extraction directe à la soude. La pratique d'une **extraction directe par NaOH** paraît appropriée à l'étude des formes de phosphore organique par résonance magnétique nucléaire. En effet, les concentrations en phosphore des extraits NaOH sont suffisamment élevées, et les teneurs en fer suffisamment faibles, pour obtenir un signal RMN de qualité.

Troisième Partie

Caractérisation des formes de Phosphore par ^{31}P -RMN

L'utilisation de la RMN permet d'identifier et de quantifier les familles d'espèces du Phosphore présentes dans des extraits alcalins.

I.- MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.- Matériels

Les sols analysés sont les mêmes que ceux utilisés dans l'approche par fractionnement chimique : sites RON 1 (Cerradão), RON 4 (Campo limpo), BAR 1 à 5 (Parcelles pâturées). Seules les couches de sol superficielles (0-10 cm) sont étudiées.

2.- Rappel du principe de la méthode de RMN (Rouessac & Rouessac, 1997)

La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) est une technique spectrométrique qui met à profit les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques. Un noyau peut-être symbolisé par le terme ^A_zX où z est le nombre de protons et $A-z$ le nombre de neutrons. En RMN, seuls sont observables les noyaux pour lesquels les nombres A , z ou à la fois A et z sont impairs. Le noyau $^{31}_7\text{P}$ fait partie de ce groupe, son abondance naturelle est de 100 %.

La particularité des noyaux observables réside dans le fait qu'ils possèdent un moment cinétique de spin non nul. Le spin du noyau, défini en mécanique quantique, est à rapprocher du moment cinétique de la mécanique classique. Ainsi un atome placé dans un champ magnétique reconnaît comme direction privilégiée de l'espace celle correspondant à ce champ. Toute charge électrique en mouvement a le comportement d'un dipôle magnétique, c'est-à-dire d'un petit aimant. Au moment cinétique de spin est donc associé un moment magnétique, les deux étant liés par la relation :

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{I}$$

où $\vec{\mu}$ représente le moment magnétique et \vec{I} le moment cinétique.

γ est appelé rapport gyromagnétique et possède une valeur caractéristique selon la nature du noyau considéré.

L'application d'un champ magnétique intense sur une population de noyaux crée une aimantation dont l'observation permet d'extraire des informations relatives aux noyaux composant la population. Par transformation mathématique, les informations sont transcrites dans le domaine des fréquences de résonance, ainsi est obtenu un spectre RMN composé de diverses raies (pics). L'utilisation de référentiels dont les fréquences de résonance sont connues permet d'identifier les molécules composant la population.

3.- Préparation des échantillons pour le passage au spectromètre RMN

L'analyse est pratiquée sur des extraits alcalins. En effet, les sols étudiés ont des teneurs élevées en oxydes de fer et faibles en phosphore qui ne permettent pas de pratiquer la ^{31}P -RMN sur phase solide.

Dans des tubes à centrifugeuse de 250 ml, 25 g de sol séché à l'air, tamisé à 2 mm et 100 ml d'une solution de NaOH 0,5 M sont mis en agitation durant 17 heures. La préparation est centrifugée (20 mn, 12 500 rpm) et filtrée. Une aliquote de l'extrait est prélevée pour les mesures de phosphore total et inorganique. Le protocole de préparation des extraits pour ces deux mesures reste inchangé (ICP pour le Pt et colorimétrie après acidification pour le Pi, cf détails dans le chapitre III-Partie II- § I.1.). La teneur en phosphore organique est calculée par différence entre les teneurs en phosphore total et inorganique. Ces teneurs sont exprimées en $\mu\text{g P/g sol}$.

Afin de dépasser le seuil de détection du spectromètre RMN, une aliquote de 60 ml est concentrée par évaporation rotative ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) jusqu'à un volume de 10 ml. Ce sont ces extraits concentrés qui sont utilisés pour l'analyse en résonance magnétique nucléaire. Les dosages RMN sont pratiqués, sans découplage de protons, par un spectromètre de type Varian Unity Inova 500 MHz, sur 1000 scans avec une fréquence de résonance de 202 MHz (dosages menés par Mr H. Quiquampoix, INRA Montpellier). Le spectre est enregistré, à la température de 25°C , avec un angle d'impulsion de 90° , un délai de recyclage de 25 secondes et un temps d'acquisition de 0,6 secondes. Des mesures préliminaires ont permis de mesurer le temps de relaxation spin-réseau T_1 (4,5 secondes), le temps de recyclage de 25 secondes est donc supérieur de 5 fois au temps T_1 ; cette condition est indispensable pour réaliser une analyse quantitative des spectres. Les échantillons sont constitués de 3,15 ml d'extrait auxquels sont ajoutés 0,35 ml de D_2O , indispensables au calibrage de l'appareil. Les mesures sont réalisées dans des tubes RMN de 10 mm de diamètre et le temps de mesure total est de 7,1 heures.

II.- RÉSULTATS

1.- Analyse chimique : phosphore total, organique et inorganique

Les teneurs en phosphore total, inorganique et organique des extraits sont données par le tableau 12.

Tableau 12.- Teneurs en phosphore inorganique (Pi), total (Pt) et organique (Po) ($\mu\text{g/g}$ sol) des extraits alcalins et proportions de phosphore organique (% Pt de l'extrait).

	$\mu\text{gP/g}$ sol		% du Pt extrait	
	Pi	Pt	Po (= Pt -Pi)	
RON 1	52,0	89,6	37,6	42,0
RON 4	78,8	145,6	66,8	45,9
BAR 1 m	44,6	67,7	23,1	34,1
BAR 2 m	35,4	65,6	30,2	46,0
BAR 3 m	40,3	83,7	43,4	51,9
BAR 4 m	101,8	132,3	30,4	23,0
BAR 5 m	38,5	68,3	29,8	43,6

Les teneurs en phosphore organique varient de 23 à 67 $\mu\text{g Po/g sol}$, ce qui représente de 23 à 52 % du phosphore de l'extrait. Pour le pâturage de 4 ans (BAR 4 m), le phosphore extrait est essentiellement sous la forme inorganique.

2.- Les spectres ^{31}P -RMN

Les spectres RMN des extraits sont caractérisés, quel que soit le site, par 4 pics. Le spectre correspondant à l'extrait RON 1 (cerradão) est donné à titre d'exemple dans la figure 28. Les autres extraits développent des spectres de même allure, seule varie l'importance relative de chaque pic. Les pics correspondent à des formes identifiées du phosphore :

orthophosphate (PO_4^{3-} : δ p.p.m. de 6,077 à 6,153)

phosphomonoesters (ROPO_3^{2-} : δ p.p.m. de 4,803 à 5,176)

phosphodiesters ($(\text{RO})(\text{RO}')\text{PO}_2^-$: δ p.p.m. de -0,278 à -0,179)

pyrophosphate ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$: δ p.p.m. de -4,387 à -4,204)

Les spectres ne présentent pas de pics correspondant aux phosphonates (RPO_3^{2-}), aux polyphosphates ($[\text{P}_n\text{O}_{3n+1}]^{(n+2)-}$) ou aux acides teichoïques.

La majorité du phosphore de l'extrait est sous la forme d'orthophosphate (44 à 67,2 %) (figure 29, annexe X). Le pyrophosphate compose de 4,7 à 9 % du phosphore total extrait. Les formes organiques du phosphore, extractibles par NaOH 0,5 M, sont représentées par des monoesters (de 22 à 39,5 %) et des diesters de phosphate (de 4,3 à 11,4 % du P extrait).

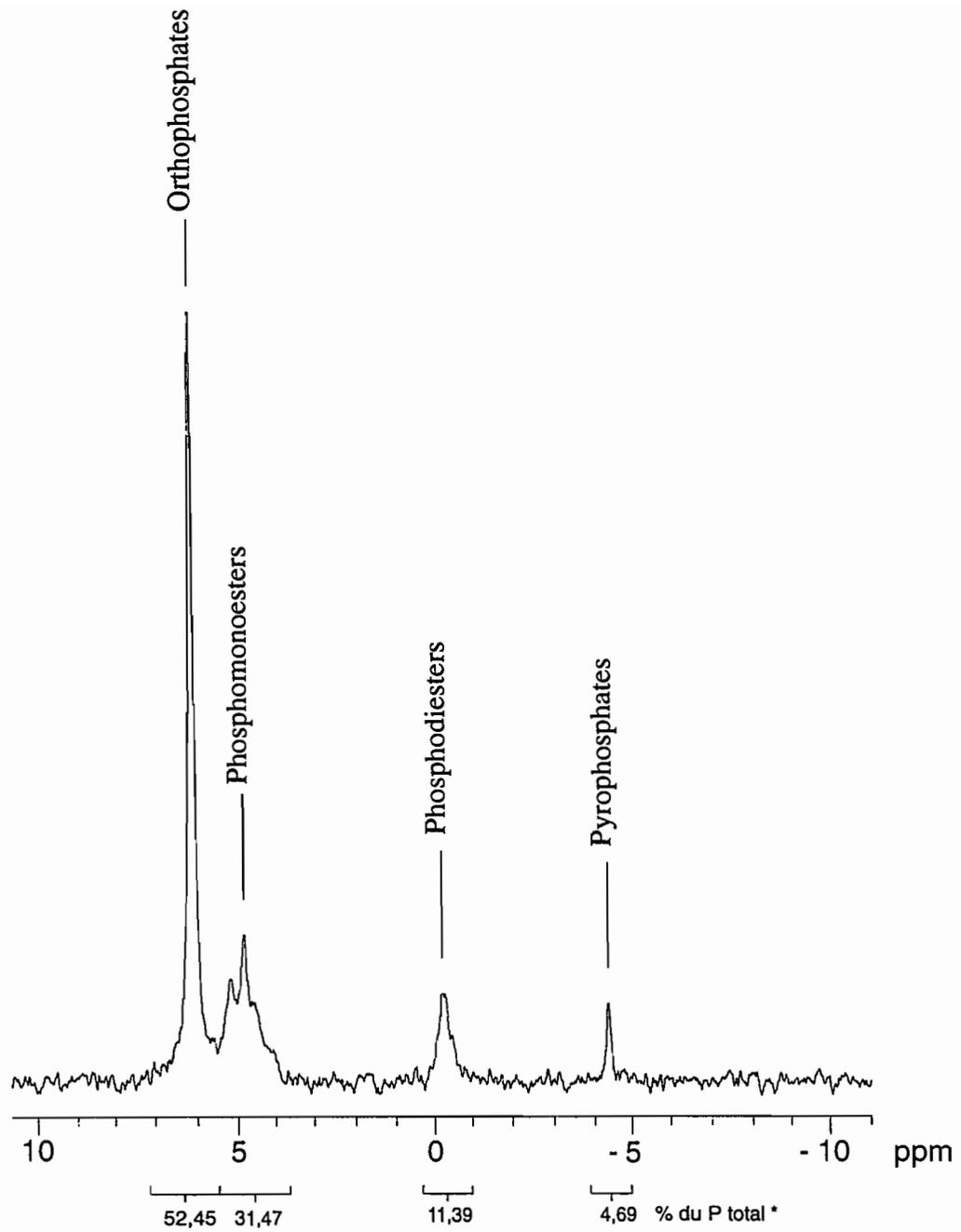
Les distributions des formes du P sont identiques pour les sites sous savane à graminées (RON 4), cerrado pâturé (BAR 1), pâturages de 12, 3 et 5 ans (BAR 2, BAR 3 et BAR 5). Le pâturage de 4 ans (BAR 4) se distingue par une proportion en orthophosphate plus élevée (déjà signalée par les analyses chimiques) mais la répartition des autres formes du P n'est pas affectée. Ainsi, si on exclut l'orthophosphate, les sites RON 4 et BAR 1 à 5 présentent une répartition des formes du P analogue :

phosphomonoesters : de 65,4 à 70,6 % du signal dû à ces trois formes,

phosphodiesters : de 13,2 à 18,2 %,

pyrophosphate : de 13,8 à 19,7 %.

Le site sous Cerradão (RON 1) se distingue des autres sites par une proportion en diesters plus élevée (24 % du P total extrait) et en pyrophosphate plus faible (10 %).



* : Importance relative des différents composés exprimée en pourcentage du phosphore total (déterminé par RMN)

Figure 28.- Spectre ^{31}P -RMN de l'extrait alcalin concentré du site RON 1 (Cerradão)

Les rapports monoesters/diesters sont compris entre 2,8 et 5,3. Ces valeurs témoignent d'une dominance des monoesters dans tous les extraits. La valeur la plus faible est observée pour le site RON 1.

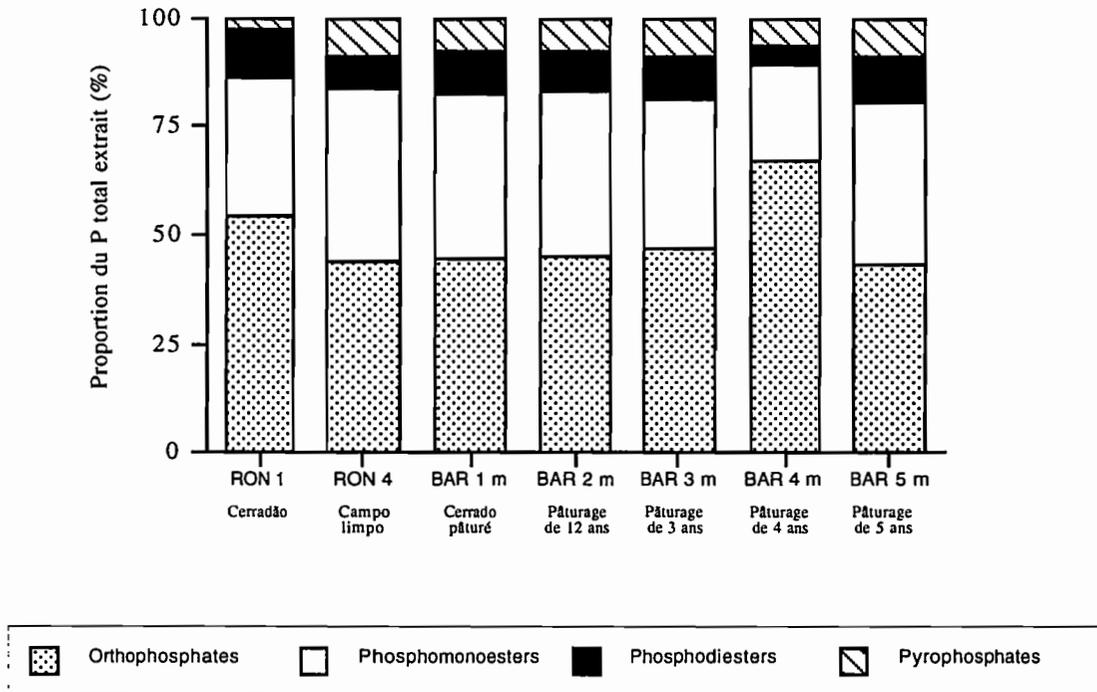


Figure 29.- Composition du phosphore des extraits alcalins concentrés (en % du signal total) donnée par spectroscopie ^{31}P -RMN.

III.- DISCUSSION

❖ L'extraction ne permet d'obtenir, selon le site, que 23 à 47 % du phosphore organique des échantillons (tableau 12 et annexe VI). En utilisant le même extractant, Tate & Newman (1982) et Hawkes *et al.* (1984) ont obtenu respectivement 58 et 41 % du phosphore organique des échantillons. Cade-Menum (1995) rapporte qu'une extraction par NaOH ne permet pas d'obtenir plus de 50 % du phosphore organique. En employant une combinaison d'extractions alcalines et acides ainsi qu'une ultrafiltration, Condron *et al.* (1990) obtiennent de 78 à 97 % du Po des sols.

Les faibles taux d'extraction obtenus tiennent à la nature des sols étudiés et à l'extractant employé. Les monoesters et diesters de P apparaissent comme étant les formes du phosphore organique présentes dans les extraits alcalins, mais cela ne veut pas dire quelles soient les seules formes de P organique de ces sols. Les autres formes de Po qui peuvent être présentes dans ces sols ne sont pas extractibles par NaOH 0,5 M et ne sont donc pas analysées dans le cadre de cette étude. Rappelons également que la quantification en résonance magnétique nucléaire est pratiquée sur des extraits et que la phase solide, éliminée par centrifugation, peut contenir jusqu'à 22 % du phosphore organique du sol.

Une extraction des formes du P par NaOH 0,5 M n'est pas appropriée à l'étude, par ^{31}P -RMN, de l'ensemble des formes du phosphore organique de ce type de sol. Par ailleurs, la présence importante des oxydes de fer dans ces sols ne permet pas la pratique de la technique de RMN sur phase solide. La méthode d'extraction employée avant le dosage sur phase liquide est d'une importance capitale, une extraction combinant réactifs alcalins et acides serait sans doute plus appropriée aux oxisols, mais une extraction trop poussée peut également mettre en solution une quantité importante d'ions paramagnétiques, perturbateurs du signal RMN.

❖ Les quantités de phosphore organique extrait, obtenues par RMN, sont similaires à celles données par les analyses chimiques (tableau 12 et annexe X). Les teneurs en Po données par les analyses chimiques sont légèrement plus faibles que celles données par RMN. Les différences constatées peuvent être expliquées de deux façons :

- concernant l'analyse chimique : l'acidification nécessaire pour clarifier les solutions avant analyse par colorimétrie provoque la dissolution de pyrophosphates et augmente la proportion de phosphore inorganique de l'extrait. La quantité de phosphore organique, donnée par la différence entre les teneurs en phosphore total et en phosphore inorganique, se trouve donc diminuée.

- concernant la RMN : la présence d'ions paramagnétiques Fe^{3+} dans les extraits peut perturber le signal, ainsi les ions orthophosphates associés aux ions Fe^{3+} ne sont pas détectés en RMN (Bedrock *et al.*, 1995). La quantité de Pi dosée par RMN serait donc sous-estimée et ainsi la proportion de Po sur-estimée. Mais le fer peut également se lier aux composés organiques.

Or, en faisant la somme [orthophosphates + pyrophosphates] dosés en RMN, c'est-à-dire en supposant que tout le pyrophosphate des extraits soit dissocié en orthophosphates et dosé en colorimétrie, les teneurs de Pi données par l'analyse chimique ne sont pas atteintes, pour la plupart des extraits. Par exemple, pour BAR 1 :

- la RMN donne une proportion en orthophosphates de 44,6 % et en pyrophosphates de 7,5 % soit un total de 52,1 % (annexe X)

- l'analyse chimique donne une teneur en phosphore inorganique de l'extrait de 44,6 $\mu\text{gPi/g sol}$, ce qui représente 65,9 % du phosphore total de l'extrait (tableau 12).

Ainsi, c'est une combinaison des deux hypothèses qui explique les différences observables entre analyses chimiques et dosage par RMN.

❖ Tous les extraits présentent une large proportion d'orthophosphates. Bowman & Cole (1978) ont montré que la matière organique extractible par NaOH contient de grandes quantités de phosphore minéral. Plusieurs études confirment la présence de liaisons entre phosphore inorganique et acides fulviques et humiques à travers des ponts cationiques tels que P-Fe(Al)-humate/fulvate (Gerke & Hermann, 1992). De plus, la soude permet de mettre en solution le phosphore inorganique lié aux surfaces minérales du sol et notamment aux oxydes de fer et d'aluminium (Batsula & Krivonosova, 1973). La présence d'ions paramagnétiques Fe^{3+} dans les extraits soude conduit à sous-estimer quelque peu la proportion d'orthophosphates. Différents auteurs (Anderson & Russell, 1969 ; Hawkes *et al.*, 1984) ont relevé la présence de pyrophosphates dans les extraits alcalins des sols. Ces pyrophosphates peuvent intervenir dans les sols en l'état, c'est-à-dire sous la forme de phosphore inorganique, ou comme constituants d'esters, les conditions alcalines de l'extraction ayant conduit à une hydrolyse. Par hydrolyse enzymatique, le pyrophosphate peut être rapidement hydrolysé en orthophosphates. D'autres études montrent que le pyrophosphate peut s'accumuler dans les sols (synthèse dans Dai *et al.*, 1996) ; l'accumulation semble être facilitée par des conditions acides et froides. Il paraît donc intéressant de quantifier l'activité pyrophosphatase des sols.

❖ Le type et la quantité des composés organiques du P sont liés aux conditions environnementales et à l'utilisation du sol. L'absence de phosphonates, forme facilement dégradable par les protozoaires, les bactéries et les champignons mycorhiziens témoigne d'une activité microbiologique (& minéralisation) intense (Tate & Newman, 1982). L'absence de polyphosphates, forme d'accumulation du P facilement dégradable par l'activité microbienne, renforce cette hypothèse.

Remarque : une mesure dynamique telle que le taux de renouvellement du P dans la biomasse microbienne permettrait de vérifier cette hypothèse.

Les phosphomonoesters forment plus de 75 % du phosphore organique des extraits. Ils représentent la forme de phosphore organique dominante dans les extraits alcalins des horizons de surface des sols (Newman & Tate, 1980 ; Tate & Newman, 1982 ; Hawkes *et al.*, 1984 ; Zech *et al.*, 1985 ; Condron *et al.*, 1985 ; Gil-Sotres *et al.*, 1990 ; Gressel *et al.*, 1996 ; Dai *et al.*, 1996). Ce groupe se compose essentiellement de phosphates d'inositol, mais également de

sucres phosphatés et de mononucléotides. La haute densité de charge des phosphates d'inositol permet la formation de complexes insolubles avec des ions Fe ou Al. Elle permet également l'adsorption des phosphates d'inositol sur les surfaces du sol et, par conséquent, offre une protection contre la dégradation (Anderson, 1980). L'adsorption, la complexation et la lente dégradation des phosphates d'inositol (Tate & Newman, 1982 ; Stewart & Tiessen, 1987) explique la dominance des monoesters dans les sols.

La fraction des diesters est composée de phospholipides et d'acides nucléiques (Tate & Newman, 1982). De nombreux auteurs ont montré que les diesters de phosphate, plus accessibles aux attaques microbiennes ou enzymatiques, sont plus facilement minéralisables que les monoesters. Hawkes *et al.* (1984) ont constaté une absence totale de diesters dans des sols cultivés depuis 20 ans. De plus, la pratique du chaulage augmente l'accessibilité des diesters et contribue, dans un environnement microbien satisfaisant, à une meilleure minéralisation de ces formes de phosphore organique (Thompson *et al.*, 1954 ; Lucas & Blue, 1972 ; Anderson 1980).

Le rapport monoesters/diesters apprécie le degré de labilité du phosphore organique extrait ; les diesters étant plus facilement minéralisables, ils procurent plus rapidement du P assimilable par les plantes. Les rapports monoesters/diesters des sols étudiés sont faibles. Ils sont proches de ceux donnés par Zech *et al.* (1985) pour des sols mexicains ou Forster & Zech (1993) pour des sols libériens mais sont légèrement plus élevés que ceux donnés par Neufeldt & Zech (1995) pour des oxisols brésiliens. Dans cette dernière étude, les extraits NaOH 0,1M contiennent quatre formes de phosphore identiques à celles présentes dans nos extraits. Ces auteurs n'ont pas constaté de différences entre les sites naturels et les sites de pâturages pour des oxisols argileux alors qu'une augmentation progressive du rapport monoesters/diesters est constatée pour la mise en place de pâturages sur des oxisols argilo-sableux.

Le site RON 1 présente une proportion de diesters de phosphate plus élevée que celle des autres sites. La nature de la végétation (Cerradão) peut expliquer cette différence.

Quatrième Partie

Conclusions

❖ Aspects méthodologiques

Les extractions séquentielles, pratiquées avec NaHCO_3 0,5 M puis NaOH 0,1 M, permettent d'extraire de 50 à 72 % du phosphore organique des échantillons. L'extraction directe par NaOH 0,5 M, utilisée pour l'étude en RMN, procure un rendement plus faible (au maximum 47 % du Po total). Une large proportion des formes du phosphore n'est donc pas étudiée en RMN. Toutefois, ce type d'extraction permet d'observer les formes du P présentes dans la solution du sol, une partie du P microbien et les formes adsorbées sur la phase solide, c'est-à-dire des formes de phosphore qui correspondent à des compartiments de phosphore échangeable à court et moyen terme. D'après Hedley *et al.* (1982), la part de P non extractible se compose du phosphore présent sur les surfaces internes des agrégats, du phosphore des minéraux phosphatés, de formes très stables du phosphore organique et de composés insolubles du phosphore inorganique.

Dans ces sols à teneurs élevées en oxydes d'aluminium et de fer, les phénomènes d'adsorption jouent un rôle important. Pour une étude maximale du P, un autre type d'extraction procurant un taux d'extraction plus élevé serait sans doute plus approprié à l'étude des formes de phosphore, notamment par ^{31}P -RMN. Une extraction combinant attaques alcalines et acides, telle que l'ont pratiqué Condron *et al.* (1990), pourrait être employée, à condition que cette dernière ne conduise pas à la mise en solution de fortes concentrations de Fe^{3+} , ion paramagnétique perturbant le signal RMN.

Les quantités de phosphore inorganique sont trop faibles pour être dosées en spectrométrie ICP, elles sont donc dosées par colorimétrie. Ce dosage nécessite l'acidification des extraits, pratique qui peut conduire à la solubilisation de pyrophosphate et par conséquent à une surestimation des teneurs en orthophosphates. Cette acidification peut également entraîner la dissolution de composés organiques ou de colloïdes. De plus, du fait du mode de filtration utilisé (filtres sans cendres), la présence de colloïdes dans la solution dosée en colorimétrie n'est pas exclue. Elle conduit à une surestimation de la quantité d'ions phosphates présents (Sinaj *et*

al., in press). Les teneurs en phosphore organique étant obtenues par calcul de la différence entre teneur en phosphore total et en phosphore inorganique, elles peuvent être sous-estimées.

❖ Le phosphore des extraits

Il est essentiellement organique. Par extraction séquentielle (NaHCO_3 0,5 M puis NaOH 0,1 M), le phosphore extrait est à 60/65 % sous la forme organique pour tous les sites hormis pour le pâturage de 4 ans (BAR 4, 45 %). Dans les extraits NaOH 0,5 M (RMN), le phosphore organique est moins présent : environ 45 % du P extrait, pour tous les échantillons sauf BAR 4 (26 %).

Le P extrait se compose d'orthophosphates, de pyrophosphates et d'esters de phosphates. Les extraits ne présentent aucune trace de phosphonates ou polyphosphates, ce qui témoigne d'une activité microbiologique intense. Les pyrophosphates ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) peuvent contribuer à un apport d'orthophosphates par hydrolyse enzymatique. La proportion de diesters de phosphates dans le site sous Cerradão (RON 1) est légèrement plus élevée que dans les autres sites. Ceci peut être expliqué par le couvert végétal.

Quel que soit le site, le phosphore organique des extraits à la soude est essentiellement composé de phosphomonoesters (de 73 à 84 % du Po extrait), ce groupe est principalement formé de phosphates d'inositol. Ces derniers peuvent s'adsorber sur les surfaces des oxydes ou se complexer avec les ions Fe ou Al présents. Ces processus les rendent plus résistants à la dégradation, ce sont des formes dites stables du phosphore organique. Pour les extraits à la soude pratiqués lors du fractionnement chimique, des corrélations positives et significatives ont été mise en évidence entre les teneurs en phosphore organique, les teneurs en fer des extraits et les teneurs en carbone des échantillons. Ces corrélations confirment la liaison entre le phosphore organique, le fer présent dans le sol (ions Fe^{3+} , oxydes ou produits amorphes) et la matière organique.

Par hydrolyse enzymatique, les monoesters de phosphates libèrent dans la solution du sol des ions orthophosphates potentiellement assimilables par les plantes. Les phosphomonoesters représentent, dans la fraction extractible par NaOH 0,5 M, la plus grande part du phosphore organique, il paraît donc intéressant de quantifier le potentiel phosphomonoestérasique de ces sols.

CHAPITRE IV

ACTIVITÉ PHOSPHATASE DES SOLS ET ÉTUDE DES INTERACTIONS PHYTASE-PHOSPHATE-SOL

Les plantes et les micro-organismes sont capables de synthétiser des enzymes qui catalysent l'hydrolyse des liaisons phosphoesters et anhydrides, fournissant ainsi des ions phosphates à la solution du sol. Les phosphomonoesters sont très présents dans les sols étudiés. Cette forme de phosphore organique est considérée comme relativement stable dans le sol mais son hydrolyse peut conduire à un apport d'ions phosphates dans la solution du sol. Il paraît donc intéressant de quantifier le potentiel hydrolytique des sols vis à vis de cette forme de phosphore organique. Après un rappel des connaissances relatives aux enzymes des sols, l'activité phosphomonoestérase des horizons superficiels des sols sera donc quantifiée.

Dans la solution des sols tropicaux à teneurs élevées en oxydes, la concentration en phosphate assimilable par les plantes est en général très faible et le potentiel d'adsorption des ions phosphates sur les surfaces du sol élevé. Dans la troisième partie de ce chapitre, les phénomènes d'échanges et d'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol seront étudiés. Les phosphatases peuvent également s'adsorber sur les surfaces du sol et leur activité enzymatique peut être ainsi modifiée, cette hypothèse sera examinée.

Afin de simuler l'effet d'un apport, par des plantes ou des mycorhizes, d'enzymes capables d'hydrolyser le phosphore organique de ces sols, nous introduirons une phosphatase synthétique dans la solution du sol et évaluerons les effets de cet apport sur les teneurs de phosphore échangeable des sols.

Première Partie

Synthèse bibliographique

I.- GÉNÉRALITÉS

❖ Les cycles des nutriments mettent en jeu des processus biochimiques contrôlés par les micro-organismes, les racines et la faune du sol. Ces réactions biochimiques sont catalysées par des enzymes. Dans les sols, l'activité enzymatique est une fonction de propriétés telles que le pH, le contenu en eau, la charge des surfaces, les conditions redox, la présence de microsites...

Les oxidoréductases, transférases et hydrolases sont les enzymes des sols les plus étudiées, de par le rôle qu'elles jouent dans les processus d'oxydation, de minéralisation et de libération de nutriments (Dick, 1994). Avec le nombre croissant d'études portant sur ces enzymes, la mesure des activités enzymatiques tend à devenir un index de la fertilité du sol et de sa contamination par les polluants (Nannipieri, 1994). Speir & Cowling (1991) entrevoient la possibilité d'utiliser la mesure d'activité phosphatase d'un sol comme indice de la productivité des plantes, notamment dans les pâturages où la fertilité est limitée par la disponibilité en phosphore.

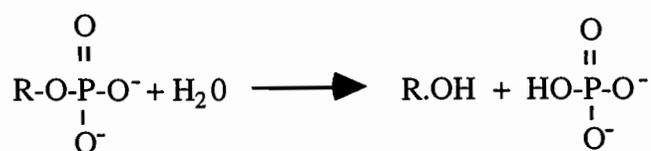
❖ Burns (1982) classe les enzymes selon leur localisation dans le sol. Trois catégories regroupées sous le terme générique d'"enzymes biotiques" sont associées aux cellules viables : (i) enzymes intracellulaires, (ii) enzymes de l'espace périplasmique, (iii) enzymes externes mais liées à la paroi cellulaire. Les autres, "enzymes abiotiques", peuvent être : (i) excrétées dans le milieu extracellulaire pendant la croissance ou la division des cellules, (ii) liées aux débris cellulaires ou aux cellules mortes, (iii) d'origine biotique mais libérées dans la solution du sol après lyse cellulaire. Les enzymes abiotiques, comme tout autre molécule organique, peuvent servir de substrat à d'autres organismes et disparaître ; elles peuvent aussi être dégradées par les protéases du sol. Elles peuvent également s'adsorber sur les surfaces internes ou externes des colloïdes du sol ou être complexées par des substances organiques (Boyd & Mortland, 1990).

❖ La Commission des Enzymes de l'Union Internationale de Biochimie a établi une classification des enzymes (1961) comprenant une nomenclature numérotée (dans Weil, 1987). Les phosphatases appartiennent à la classe des hydrolases (EC 3) et au groupe d'enzymes qui catalyse l'hydrolyse des esters et des anhydrides de H_3PO_4 (EC 3.1). Ces enzymes sont classées en cinq grands groupes : 1) les phosphomonoestérases (EC 3.1.3) qui sont considérées comme étant non spécifiques, 2) les phosphodiesterases (EC 3.1.4) qui comprennent les phospholipases qui agissent sur les phospholipides et leurs dérivés, 3) les triphosphomonoestérases (EC 3.1.5), 4) les enzymes agissant sur les anhydrides contenant un groupement phosphoryl, et 5) les enzymes agissant sur les liaisons P-N comme la phosphoamidase.

Les plus étudiées sont les phosphomonoestérases alcalines (EC 3.1.3.1) et acides (EC 3.1.3.2), on parle aussi de phosphatases alcalines ou acides. Ces enzymes trouvent leur maximum d'activité en milieu respectivement alcalin ou acide (Dick & Tabatabai, 1984). L'existence de ces enzymes a été démontrée par Rogers en 1942, il attribue leur excrétion aux racines des plantes. Les travaux qui ont suivi ont permis de montrer les relations entre les teneurs en phosphore inorganique de la solution du sol, l'activité rhizosphérique des plantes et l'activité phosphatase des sols.

Dès les années 50, de nombreux auteurs (synthèse dans Skujins, 1967) ont étudié les activités phosphatases du sol en liaison avec le pH ; leurs observations et interprétations ont souvent été contradictoires mais la plupart des observations tendaient à souligner que le maximum d'activité enzymatique se trouvait à un pH proche de la neutralité et non au pH du sol. Dans les sols à $pH < 6$, les phosphatases acides sont prédominantes (Eivazi & Tabatabai, 1977 ; Rojo *et al.*, 1990). Dans les sols acides, l'activité des phosphomonoestérases est plus élevée que celle des phosphodiesterases.

Les phosphatases interviennent dans les processus de minéralisation du phosphore organique et de nutrition des plantes (Dalal, 1977 ; Eivazi & Tabatabai, 1977 ; Doumas *et al.*, 1983 ; Kroehler & Linkins, 1988 ; Fox & Comerford, 1992). La réaction catalysée est du type :



Les phytases appartiennent aussi au groupe des phosphomonoestérases ; elles hydrolysent le phytate en orthophosphates et produisent des phosphates d'inositol (des penta- aux mono-) jusqu'au *myo*-inositol libre (Cosgrove, 1980 ; Nayini & Markakis, 1986). La 3-phytase (EC 3.1.3.8) qui est présente chez tous les micro-organismes hydrolyse d'abord l'orthophosphate

situé en position 3 sur le noyau d'inositol. La 6-phytase (EC 3.1.3.26) qui est plutôt typique des végétaux supérieurs hydrolyse d'abord l'orthophosphate placé en position 6.

❖ Les enzymes du sol proviennent en partie des plantes et des animaux, mais il est communément admis qu'elles sont en majorité d'origine microbienne (Synthèses dans Skujins, 1967, Ladd, 1978 et Davet, 1996). D'après Nahas *et al.* (1994a), 21 % des bactéries et 65 % des espèces de champignons sont capables d'excréter des phosphatases. Les données actuellement disponibles indiquent que les végétaux supérieurs sont dépourvus d'activité phosphatasique alcaline, celle-ci n'est apparemment due qu'aux micro-organismes. La macrofaune du sol, telle que les vers de terre, peut influencer la production de phosphatases microbiennes (Satchell, 1984), notamment en favorisant l'activité de la microflore (Lavelle *et al.*, 1992). Les plantes affectent le contenu en enzymes d'un sol de manière directe ou indirecte. Les racines des plantes peuvent excréter des enzymes extracellulaires (synthèse dans Dick, 1994) mais aussi stimuler les populations microbiennes et ainsi affecter leur production d'enzymes. Des études en conditions stériles ont été conduites et laissent apparaître que les racines sont capables de produire des phosphatases pouvant hydrolyser de nombreuses formes de Po et de polyphosphates (Dick & Tabatabai, 1986 ; Tarafdar & Claassen, 1988 ; Juma & Tabatabai, 1988). L'activité phosphatase varie avec l'espèce et la variété de la plante (Helal, 1990) mais aussi le long d'une racine (Adams & Pate, 1992). Kroehler et Linkins (1988) ont montré que le Pi produit par hydrolyse de Po à la surface des racines pouvait couvrir 65 % des besoins annuels en P de *Eriophorum vaginatum*. Les phosphatases d'origine microbienne contribuent beaucoup à la nutrition phosphatée de plantes (Taradafar & Claassen, 1988).

Feller *et al.* (1994) ont étudié les activités phosphatases acides de sols tropicaux à argiles 1:1 et rapportent que les fractions de taille 20-2000 µm et 0-2 µm présentent un potentiel d'activité phosphatase (défini par le rapport Activité phosphatase/Teneur en C) plus élevé que celui de la fraction 2-20 µm. Ces auteurs attribuent ces résultats à "un renouvellement plus élevé des phosphatases par apports racinaires dans les fractions dominées par les débris végétaux (20-2000 µm) d'une part, et par l'activité microbienne et les métabolites qui en résultent dans les fractions organo-argileuses (0-2 µm) d'autre part".

❖ Dès les premières études (Skujins, 1967), il apparaît comme évident que l'activité phosphatase est inversement proportionnelle à la quantité de phosphore inorganique biologiquement disponible dans la solution du sol. Selon Sharpley (1985), le phosphore organique est mobilisé si la quantité de P inorganique disponible est insuffisante pour la croissance des végétaux et si des phosphatases d'origine végétale ou microbienne sont synthétisées. Le facteur limitant pour la nutrition phosphatée des plantes est la disponibilité des sources de phosphore organique et non la quantité d'enzymes produites. Chhonkar & Tarafdar

(1984) ont étudié 27 sols indiens possédant des propriétés physiques, chimiques et biologiques variées. Leur étude montre une corrélation positive entre les activités phosphatases totales des sols et les teneurs en carbone, phosphore organique d'une part et les populations microbiennes (bactéries et champignons) d'autre part. L'orthophosphate peut être un inhibiteur compétitif des activités phosphatases du sol (McGill & Cole, 1981 ; Leakes & Miles, 1996).

❖ De plus, la mise en culture affecte les activités enzymatiques des sols et notamment l'activité phosphatase (Dick, 1994). L'activité phosphatase acide est fortement dépendante de la teneur en matière organique (Feller *et al.*, 1994) et toute modification du mode de gestion des sols conduisant à des variations importantes des teneurs en MO induisent, aussi, des variations importantes de l'activité phosphatase (déterminée par la méthode Tabatabai, 1982).

II.- INFLUENCE DES SURFACES ADSORBANTES DU SOL SUR LES ACTIVITÉS PHOSPHATASES

1.- Les forces d'interactions mises en jeu

L'adsorption des protéines sur les surfaces des colloïdes est sous l'influence de plusieurs interactions entre différents éléments du milieu réactionnel comme les surfaces adsorbantes, le solvant, les protéines, d'autres solutés de faible poids moléculaire ou les ions. Les principales forces d'interactions sont les forces de Van der Waals, les interactions électrostatiques et les interactions hydrophobes.

❖ Les forces de Van der Waals

Elles interviennent entre des molécules neutres et sont d'origine électromagnétique. Les énergies en présence sont entièrement dues aux forces créées par les interactions entre dipôles permanents ou instantanés. On distingue trois types de liaisons correspondant à trois effets différents :

(i) effet d'orientation (forces de Keesom) : attraction entre deux groupements polaires ; le champ électromagnétique d'un dipôle tend à orienter l'autre.

(ii) effet d'induction (forces de Debye) : attraction entre un groupement polaire et un groupement non polaire (en entrant dans le champ électrique de la molécule polaire, la molécule non polaire devient dipôle induit).

(iii) effet de dispersion (forces de London) : attraction entre deux groupements non polaires. Les fluctuations des électrons dans les couches électroniques des molécules peuvent induire un moment dipolaire qui peut, lui-même, induire des dipôles dans les molécules voisines.

Ces forces sont attractives et joueraient un rôle important dans le maintien de la conformation des protéines (Haynes et Norde, 1994).

❖ Les interactions électrostatiques

Dans une solution aqueuse, la répartition des ions est modifiée au voisinage d'une surface électriquement chargée. Les ions de charge opposée (contre-ions) sont attirés vers la surface chargée et les ions de même charge (co-ions) ont tendance à être repoussés. L'ensemble formé par la surface chargée et la zone de répartition des co-ions et contre-ions s'appelle la double couche diffuse. Elle est formée de deux régions distinctes : la couche de Stern où les ions sont fortement liés à la surface et la couche diffuse composée d'ions répartis selon l'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie électrique potentielle (Dickinson, 1996).

❖ Les interactions hydrophobes

Elles sont créées par certains acides aminés (i.e. l'alanine, la valine, l'isoleucine, la leucine, la méthionine, la phénylalanine, le tryptophane et la proline) et jouent un rôle déterminant dans le maintien de la structure interne des protéines. Dans une solution aqueuse, les composés hydrophobes enveloppés de leur couche d'hydratation exercent une interaction mutuelle par des forces plus intenses et de plus longue portée que celles pouvant s'exercer entre eux, soit dans le vide, soit dans un milieu dépourvu d'hydratation (Gerschel, 1995). L'hydratation des molécules hydrophobes résulte d'un réarrangement des molécules d'eau autour des composés hydrophobes et forme une enveloppe qui maximise le nombre des liaisons hydrogène entre molécules. Pour d'autres composés, une partie seulement de la molécule est hydrophobe, les effets hydrophobes sont alors localisés et n'excluent pas la présence d'autres interactions sur le restant de la molécule. Les interactions hydrophobes peuvent s'exercer entre différentes parties d'une grande molécule et provoquer un changement de conformation, comme le repliement d'une protéine ou l'isomérisation des acides nucléiques (Gerschel, 1995).

2.- Les interactions Protéines-surfaces

Ces interactions dépendent de la distance qui sépare la surface adsorbante de la protéine. La théorie D.L.V.O. (Derjaguin & Landau (1949), Verwey & Overbeek (1948)) ; Théorie de la stabilité de l'état colloïdal) rend compte des interactions "à grandes distances". Elles sont exprimées en terme d'énergie libre G , en fonction de la distance d qui sépare la surface adsorbante et la molécule ; le rayon d'action peut couvrir la centaine de nanomètres. L'énergie d'interaction $G_i(d)$ est composée de $G_a(d)$, énergie correspondant à l'attraction liée aux forces de Van der Waals et de $G_e(d)$, énergie résultant des forces de répulsion dues aux doubles couches diffuses (Dickinson, 1996). Pour les protéines, les forces de Van der Waals participent peu à l'énergie d'interaction (Norde, 1986).

Les interactions "à faibles distances" interviennent lorsque les protéines sont à moins de 5 nm des surfaces. Elles échappent aux lois de la théorie D.L.V.O. et comportent des forces d'attraction ou de répulsion dues aux caractères hydrophobes ou hydrophiles des surfaces et des protéines (Norde & Lyklema, 1989).

3.- Adsorption des protéines sur les surfaces

En 1952, Mortland & Gieseking montrent que l'activité phosphatase est inhibée par l'addition d'argiles dans le système d'étude et que cette inhibition est proportionnelle à la capacité d'échange des argiles introduites.

L'adsorption de protéines sur une surface adsorbante dépend à la fois des caractéristiques physico-chimiques de la surface et des protéines mises en jeu (charge électrique, hydrophobicité, ...), du pH et de la force ionique du milieu (Koutsoukos *et al.*, 1982 ; Quiquampoix *et al.*, 1989).

Parmi les colloïdes du sol, les argiles, les oxydes de fer et d'aluminium et certains composés organiques comportent des surfaces ayant la capacité d'adsorber les protéines. De par la structure de leur réseau interne et le comportement des groupes fonctionnels présents sur leurs bordures, les particules d'argiles possèdent des surfaces à charges variables avec le pH (Hasset & Banwart, 1992 ; Sposito, 1984). Aux pH habituellement rencontrés dans les sols, elles possèdent une charge négative sur leur surface et une charge positive sur leurs bordures. Les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium sont des sources importantes de surfaces à charges variables dans le sol. Les charges positives sont formées par protonation et les charges négatives par dissociation des hydroxydes de leurs surfaces (van Raij, 1986).

La stabilité de la structure interne des protéines joue un rôle important lors des phénomènes d'adsorption. Les interactions hydrophobes intramoléculaires stabilisent les structures secondaires comme les hélices α (Norde et al., 1985). Les protéines ayant une structure native peu stable auraient une forte aptitude à être adsorbées du fait de leur tendance aux modifications structurales (Haynes & Norde, 1994).

Les interactions électrostatiques et hydrophobes jouent un rôle prépondérant dans l'adsorption des protéines sur les surfaces. Ces forces sont dépendantes de facteurs comme la force ionique et le pH.

L'épaisseur de la double couche diffuse varie avec la concentration en ions dans la solution donc avec la valeur de la force ionique. L'augmentation de la force ionique du milieu provoque la réduction de l'épaisseur de la double couche diffuse ce qui diminue les forces électrostatiques, l'adsorption est alors facilitée par les forces de Van der Waals et les interactions hydrophobes (Quiquampoix, 1987a ; Ramsden & Prenosil, 1994). Cette adsorption peut entraîner une diminution, voire une perte, de l'activité catalytique de l'enzyme.

La charge nette de la protéine varie selon le pH du milieu (Quiquampoix *et al.*, 1993) :

(i) pour un pH inférieur au point isoélectrique de la protéine (pI) (cas des pH acides), la charge nette de la protéine est positive. Les interactions électrostatiques sont alors attractives, la protéine est adsorbée de façon irréversible sur la surface chargée négativement. Ce phénomène provoque un changement de conformation protéique et inhibe l'activité catalytique.

(ii) aux pH proches du pI, la protéine peut être adsorbée mais sa conformation est peu modifiée et l'activité catalytique reste inchangée.

(iii) aux pH basiques c'est-à-dire supérieurs au pI, la charge nette de la protéine est négative ; les interactions électrostatiques sont répulsives. Les forces de liaisons sont donc faibles, l'adsorption des protéines est plus rare permettant la diffusion dans le réseau poral du sol. Ces protéines "libres" peuvent néanmoins être la proie de micro-organismes ou être dégradées par les protéases du sol. Les protéines adsorbées peuvent avoir une activité atteignant 100 %, la conformation étant peu affectée par l'adsorption.

De plus, le pH aux environs de la surface adsorbante peut être plus acide que celui du milieu réactionnel du fait d'une protonation de cette surface pour compenser un excès de charges négatives. Cet écart peut parfois expliquer une dénaturation protéique survenue alors que le pH en solution ne le laissait pas supposer.

Cependant, l'adsorption des protéines peut aussi augmenter leur stabilité dans le temps. Certains auteurs ont évoqué l'existence de complexes permettant d'éviter une perte d'activité enzymatique. La formation de complexes enzymes-substances organiques peut être favorable au maintien des activités catalytiques (Burns, 1980 ; Quiquampoix, 1987b). L'élimination de la matière organique d'un sol ferrallitique entraîne une augmentation du taux d'adsorption des protéines et une réduction de l'activité catalytique à l'état adsorbé (Quiquampoix *et al.*, 1995).

Deuxième Partie

Activité phosphomonoestérase (phosphatase)

I.- QUANTIFICATION DE L'ACTIVITÉ PHOSPHATASE SELON LA MÉTHODE TABATABAI (1982)

1.- Matériels et méthode

1.1.- Échantillons analysés

Afin de déterminer l'évolution de l'activité phosphatase acide en fonction de la profondeur, les couches de sol étudiées sont les suivantes : 0-10, 10-20, 20-30 et 50-60 cm pour les échantillons prélevés dans les fosses pédologiques creusées dans les sites naturels. Pour les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA, les échantillons sont ceux constitués par le regroupement de prélèvements aléatoires au sein de la parcelle (BAR m). L'étude porte sur les couches de sol 0-10, 10-20, 20-30 et 50-70 cm.

Étant données les valeurs de pH des sols étudiés ($\text{pH} \leq 6$), notre étude porte essentiellement sur l'activité phosphomonoestérase dite "acide". L'activité phosphatase alcaline ne sera quantifiée que pour l'horizon 0-10 cm.

1.2.- Méthode (Tabatabai, 1982)

La mesure de l'activité phosphomonoestérase est basée sur la mesure colorimétrique du *para*-nitrophénol (pN) libéré après incubation du sol dans une solution de *para*-

nitrophénylphosphate disodique (pNP, C₆H₄NO₆PNa₂, Sigma 104, Sigma Chemical Co) tamponnée à pH 6,5 (avec une solution d'HCl 0,1 N) pour l'étude de l'activité phosphatase acide ou à pH 11 (avec une solution de NaOH 0,1 N) pour la mesure de l'activité phosphatase alcaline. Le choix des valeurs de pH des tampons MUB (Modified Universal Buffer, Skujins *et al.*, 1962) est basé sur des études montrant que le maximum d'hydrolyse enzymatique du substrat survient dans des solutions tamponnées au pH ajusté aux environs de 6,5 et 11 (Rogers, 1942 ; Skujins *et al.*, 1962 ; Halstead, 1964 ; Raminez-Martinez & McLaren, 1966 ; Tabatabai & Bremmer, 1969).

L'incubation (1 heure) se fait en présence de toluène qui inhibe toute activité microflorale. Une alcalinisation par CaCl₂-NaOH permet (i) de stopper l'activité phosphatasique, (ii) de développer la couleur jaune utilisée pour quantifier le *p*-nitrophénol (mesure au spectrocromètre, à 410 nm). Tous les dosages d'activité phosphatase (on parle aussi d'activité pNPase du fait du substrat utilisé) sont les résultats d'une soustraction d'un témoin. Ce témoin représente la quantité de *para*-nitrophénol au départ dans le milieu réactionnel. Pour obtenir ce témoin, le substrat est additionné après avoir stoppé toute activité phosphatasique avec CaCl₂-NaOH.

La mesure est pratiquée sur 1 g de sol sec à l'air, tamisée à 2 mm et est répétée trois fois. Un test statistique t ($p < 5 \%$) permet d'apprécier les différences significatives entre échantillons.

2.- Résultats

2.1.- Activité phosphatase alcaline

Elle est mesurée à pH 11 pour les échantillons de sol 0-10 cm (tableau 13).

Tableau 13.- Activité phosphatase alcaline ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des échantillons 0-10 cm.

Activité Phosphatase à pH 11 ($\mu\text{g pN/g sol/h}$)							
Sites				Sites			
		moy.	e.t.			moy.	e.t.
RON 1	Cerradão	19,2	5,2	BAR 1 m	Cerrado pâturé	10,1	2,6
RON 2	Cerrado	25,9	6,4	BAR 2 m	Pâturage de 12 ans	14,8	4,9
RON 3	campo sujo	49,4	13,0	BAR 3 m	Pâturage de 3 ans	27,9	4,8
RON 4	Campo limpo	41,5	9,8	BAR 4 m	Pâturage de 4 ans	15,8	3,3
RON 5	Forêt galerie	36,1	5,2	BAR 5 m	Pâturage de 5 ans	16,5	2,8

Pour les sites naturels, les quantités de *para*-nitrophénol produites pour un gramme de sol en une heure sont faibles (de 19,2 à 49,4 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Les valeurs les plus élevées sont observées pour les couches de sol 0-10 cm des sites sous campo sujo (RON 3), campo limpo (RON 4) et forêt galerie (RON 5). L'horizon superficiel du site sous cerrado (RON 1) présente la valeur la plus faible.

Les activités phosphatases alcalines des couches de sol 0-10 cm des sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA correspondent à des productions de *para*-nitrophénol comprises entre 10,1 et 27,9 $\mu\text{g pN/g sol/h}$. Le pâturage de 3 ans (BAR 3) présente la valeur la plus élevée et le Cerrado pâturé (BAR 1) la plus faible (tableau 13).

Les horizons superficiels des sites de la station expérimentale présentent des valeurs inférieures à celles observées sous végétation naturelle et notamment sous graminées (RON 4). L'horizon 0-10 cm du site sous cerrado pâturé (BAR 1) a une activité phosphatase alcaline nettement inférieure à celles observées dans des sites naturels morphologiquement proches (RON 2 ou RON 3).

2.2.- Activité phosphatase acide (pH 6,5) (annexe XI)

Les écarts-types représentent une déviation de 1 à 14 %, ce qui est tout à fait correct pour le paramètre mesuré.

2.2.1.- Les sites sous végétation naturelle (figure 30)

❖ **Dans l'horizon 0-10 cm**, les quantités de *para*-nitrophénol produit par gramme de sol et par heure sont relativement élevées (de 284,9 à 420,3 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Les activités les plus élevées sont obtenues pour les sites sous Campo sujo, Cerradão et Campo limpo (RON 3, 1 et 4). Pour les sites sous Cerrado (RON 2) et forêt galerie (RON 5), les valeurs sont légèrement mais significativement plus faibles.

❖ **Dans l'horizon 10-20 cm**, les différences entre sites s'amenuisent. Seule l'activité phosphatase acide sous Campo limpo (RON 4 avec 269,2 $\mu\text{g pN/g sol/h}$) est significativement supérieure à celles des autres sites (de 153,1 à 188,9 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). L'activité est moins élevée que dans l'horizon superficiel (figure 30).

❖ Dans l'horizon 20-30 cm, la mesure des activités phosphatase acides donnent la séquence suivante :

RON 4 > RON 3 ≅ RON 5 ≅ RON 2 ≅ RON 1

Campo limpo > Campo sujo ≅ Forêt galerie ≅ Cerrado ≅ Cerradão

Les valeurs d'activité correspondent à une production de *para*-nitrophénol comprise entre 89,1 et 197,5 $\mu\text{g pN/g sol/h}$. Seul le site sous Campo limpo a une activité phosphatase acide significativement supérieure à celle des autres sites

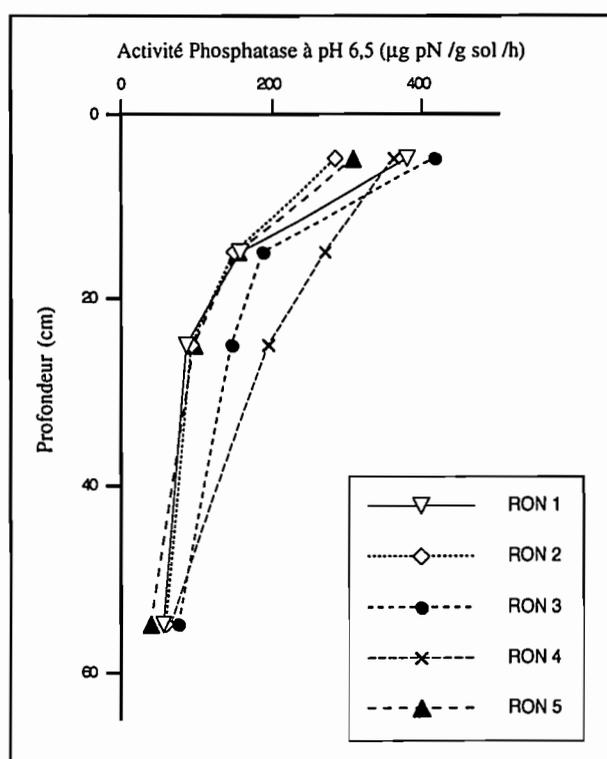


Figure 30.- Activité phosphatase acide ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des sols sous végétation naturelle (RON).

❖ Dans l'horizon 50-60 cm, la fourchette des valeurs d'activité phosphatase est étroite (de 43,2 à 81,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Ces valeurs sont de 4,5 à 7,1 fois inférieures à celles mesurées dans les horizons superficiels. Les écarts-types étant faibles (annexe XI), les sites sous Campo sujo et Campo limpo (RON 3 et 4) présentent encore des valeurs significativement supérieures à celles des autres sites.

2.2.2.- Les sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA (figure 31)

❖ Dans l'horizon 0-10 cm, les activités phosphatase correspondent à une production de *para*-nitrophénol comprises entre 144 et 209,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ (annexe XI), soit seulement la moitié des quantités produites par les horizons superficiels des sols sous végétation naturelle. Les valeurs les plus élevées sont observées pour le site sous cerrado pâturé (BAR 1) et les pâturages de 12 ans et 5 ans (BAR 2 et 5).

❖ Dans l'horizon 10-20 cm, les activités phosphatase diminuent légèrement (171,4 à 105,8 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). L'activité phosphatase sous pâturage de 5 ans (BAR 5) est significativement supérieure à celles des autres pâturages.

❖ Dans l'horizon 20-30 cm, les quantités de *para*-nitrophénol produites sont comprises entre 106,2 et 122,3 $\mu\text{g pN/g sol/h}$, soit des valeurs plus proches de celles observées à la même profondeur dans les sols sous végétation naturelle. Aucune différence ne s'observe entre les sites.

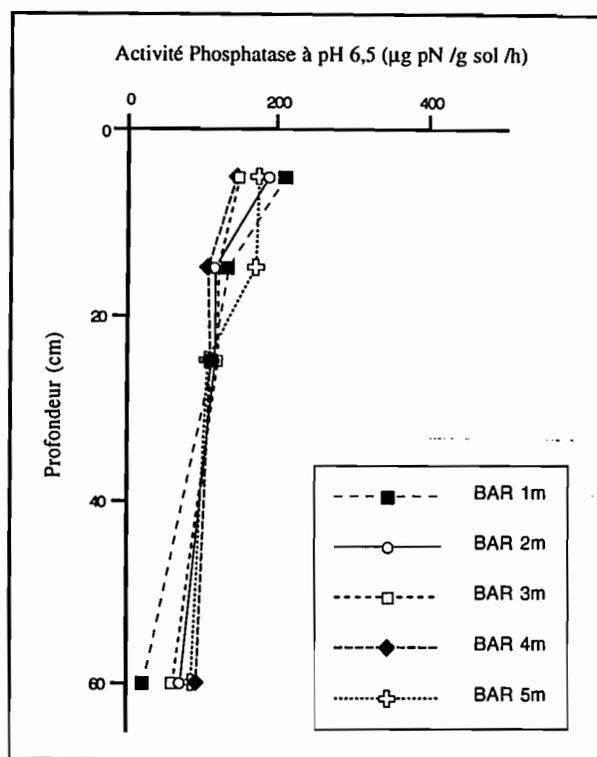


Figure 31.- Activité phosphatase acide ($\mu\text{g pN/g sol/h}$) des sites de la station expérimentale de l'EMBRAPA (BAR m)

❖ Dans l'horizon 50-70 cm, les pâturages de 4 et 5 ans (BAR 4 et 5) présentent les valeurs les plus élevées (94,1 et 86,2 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Pour les pâturages de 12 et 3 ans (BAR 2 et 3), les activités phosphatase sont significativement inférieures (72,4 et 62,5 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Pour ces quatre sites, les activités phosphatase mesurées à cette profondeur sont du même ordre de grandeur que celles observées dans les sites naturels (RON). Le site BAR 1 (Cerrado pâturé) présente une activité très faible (22,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$).

II.- INFLUENCE DU pH SUR L'ACTIVITÉ PHOSPHATASE ACIDE

Dans l'expérimentation précédente, l'activité phosphatase acide est mesurée à l'aide d'un tampon MUB à pH 6,5. Le choix de cette valeur de pH est basé sur des études montrant que le maximum d'hydrolyse enzymatique du substrat et notamment du *para*-nitrophénylphosphate, en milieu acide, survient pour des valeurs de pH comprises entre 6,2 et 7,0 (Tabatabai & Bremner, 1969). Dans une étude plus récente, Dick *et al.* (1983) discutent de l'effet du pH du tampon sur l'activité d'une phosphatase excrétée par les racines du maïs. Cette enzyme présente un maximum d'activité pour un pH de 4,0. Il paraît donc intéressant de connaître pour des sols développés sous des végétations différentes à quel pH se situe le maximum d'activité phosphatase acide.

1.- Matériels et méthode

L'activité phosphomonoestérase (phosphatase) acide sera mesurée pour l'ensemble des sites (RON et BAR m), à différents pH, dans les couches de sol 0-10 et 10-20 cm (sèches à l'air, tamisées à 2 mm).

Le principe de la méthode reste le même : quantification colorimétrique du *p*-nitrophénol libéré après incubation d'une heure du sol dans une solution de *para*-nitrophényl phosphate disodique (Sigma 104). L'incubation est réalisée en présence de toluène. La réaction est stoppée par une alcalinisation ($\text{CaCl}_2\text{-NaOH}$). Le *p*-nitrophénol libéré est mesuré au spectrophotomètre

($\lambda = 410 \text{ nm}$). Pour les couches de sol 0-10 cm, la mesure d'activité phosphatase est réalisée dans des tampons MUB ajustés (addition d'HCl 0,1 N) à des valeurs de pH allant de 4,0 à 6,0, par incrément de 0,5 unités pH. Pour les couches de sol 10-20 cm, la mesure est réalisée pour des pH proches des valeurs pH_{eau} du sol.

Une seule mesure est réalisée, l'écart-type donné par la mesure à pH 6,5 (méthode Tabatabai, 1982 ; § I) est utilisé à titre indicatif pour juger les différences entre échantillons.

2.- Résultats

2.1.- Dans la couche de sol 0-10 cm

❖ Pour les sols sous végétation naturelle, les activités phosphatase correspondent à des productions de *p*-nitrophénol s'échelonnant de 270,4 à 449,6 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ selon le pH (figure 32, annexe XI). Cet intervalle de valeurs est sensiblement le même que pour les activités à pH 6,5.

Les productions de *p*-nitrophénol les plus élevées (449,6 et 444,4 $\mu\text{g pN/g sol/h}$) se situent à pH 5,0 et concernent les sites sous Campo (RON 3 et 4). Ces valeurs correspondent au maximum d'activité de ces sols et se situent à un pH relativement proche de celui du sol. Pour RON 3, l'activité varie peu entre pH 5,5 et 6,5 ; la mesure à pH 6,5 est peu différente de celle relevée au maximum. En revanche pour le sol sous Campo limpo (RON 4), ces deux mesures sont très différentes (444,4 et 366,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Le maximum d'activité est rencontré pour le sol sous cerradão (RON 1) à pH 6,5. Pour le cerrado (RON 2), l'activité maximale se développe à pH 5,5 donc à un pH différent de celui du sol et différent de celui choisi par Tabatabai (1982). La courbe d'activité phosphatase acide du sol sous forêt galerie (RON 5) est monomodale avec une production maximale de *para*-nitrophénol à pH 6,0 ; le pH du sol est de 4,8.

Les activités relevées au pH des sols procurent le classement inter-sites suivant *:

RON 3	≡	RON 4	>	RON 2	≡	RON 5	>	RON 1
Campo sujo	≡	Campo limpo	>	Cerrado	≡	Forêt galerie	>	Cerradão

* Les différences significatives au seuil de 5 % sont matérialisées par le signe ">".

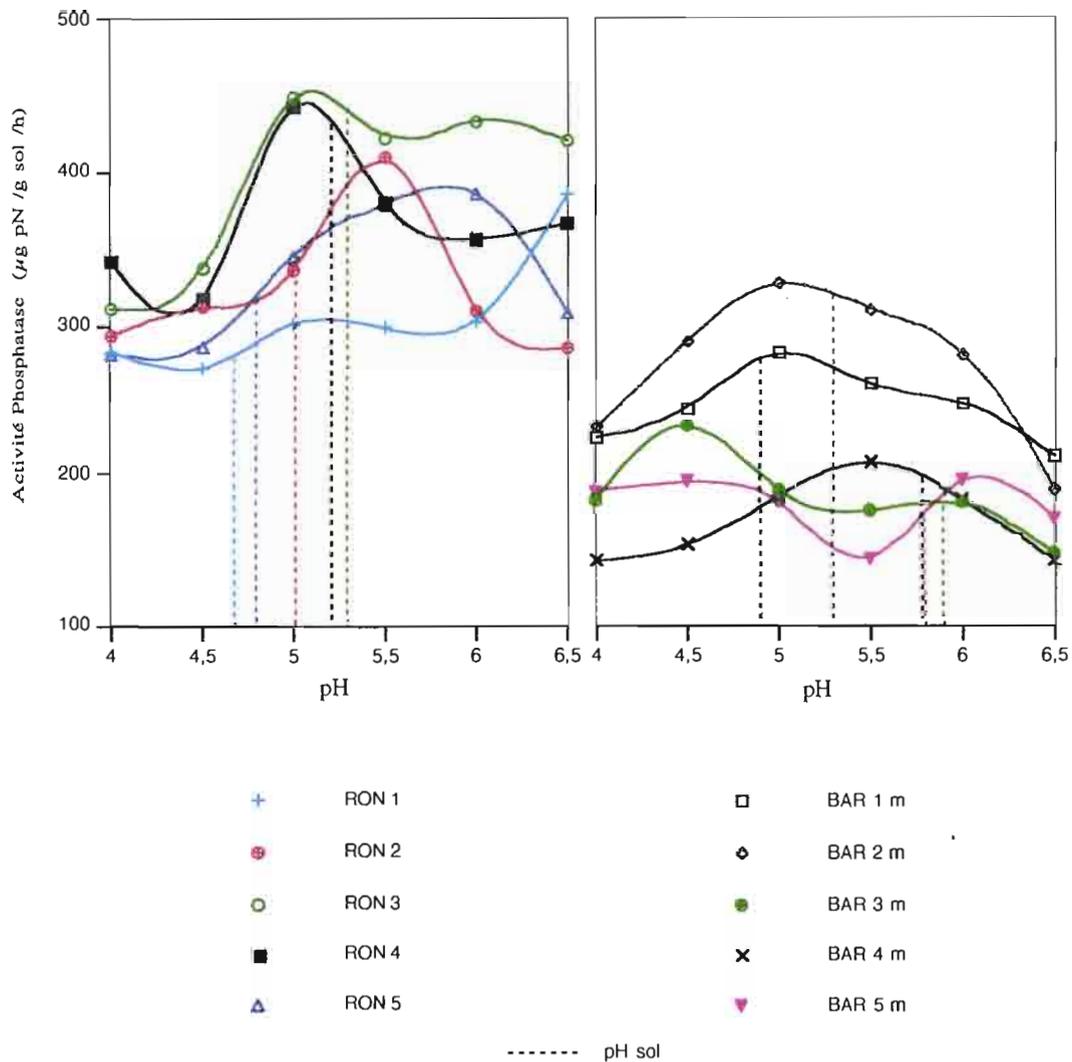


Figure 32.- Variations de l'activité phosphatase des strates 0-10 cm en fonction du pH.

❖ Pour les sols de la station expérimentale, les activités sont globalement plus faibles que pour les sites sous végétation naturelle (de 143 à 326,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ selon le pH).

Les courbes illustrant la production de *p*-nitrophénol des sols sous Cerrado pâturé et pâturage de 12 ans (BAR 1 et 2) sont monomodales, les valeurs sont supérieures à celles des autres sites BAR, quel que soit le pH considéré (figure 32). La production maximale de *p*-nitrophénol est relevée pour pH 5,0, donc pour un pH voisin de celui du sol. Le pâturage de 3 ans (BAR 3) présente un maximum d'activité à pH 4,5 donc à une valeur de pH éloignée de celle du sol (pH 5,9). Pour le pâturage de 4 ans (BAR 4), le maximum d'activité est rencontré à pH 5,5 relativement proche du pH du sol. La courbe d'activité phosphatase acide illustrant le site BAR 5 (pâturage de 5 ans) présente un minimum à pH 5,5 (145,9 $\mu\text{g pN/g sol/h}$) et un maximum à pH 6, le pH du sol se situe entre ces deux valeurs.

Au pH des sols, les sites peuvent être classés comme suit *:

BAR 1m	≡	BAR 2m	>	BAR 4m	≡	BAR 3m	≡	BAR 5m
Cerrado pâturé	≡	Pâturage de 12 ans	>	Pâturage de 4 ans	≡	Pâturage de 3 ans	≡	Pâturage de 5 ans

2.2.- Dans la couche de sol 10-20 cm (tableau 14)

❖ Pour les sites sous végétation naturelle, la couche de sol 10-20 cm présente, pour un pH voisin de celui des sols, des productions de *para*-nitrophénol s'échelonnant de 138,5 à 312,6 µg pN/g sol/h, soit un intervalle de valeurs un peu plus étendu que pour la mesure à pH 6,5. Au pH de l'horizon, la couche de sol 10-20 cm sous Campo limpo (RON 4) a une activité phosphatase plus élevée que celles des autres sites naturels. Les différences entre sites sont plus marquées que pour une mesure à pH 6,5.

Tableau 14.- Activité phosphatase (µg pN/g sol/h), des couches de sol 10-20 cm, à pH proche du pHeau du sol et à pH 6,5.

		Activité Phosphatase (µg pN / g sol / h)					
pH		4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	
Sites							<i>e.s.</i>
RON 1	Cerradão	nd	138,5	nd	nd	161,2	5,5
RON 2	Cerrado	nd	154,1	nd	nd	153,1	21,6
RON 3	campo sujo	nd	211,9	nd	nd	188,9	27,6
RON 4	Campo limpo	nd	312,6	nd	nd	269,2	13,7
RON 5	Forêt galerie	nd	196,3	nd	nd	157,5	13,7
BAR 1 m	Cerrado pâturé	nd	187,4	nd	nd	134,0	9,2
BAR 2 m	Pâturage de 12 ans	nd	nd	162,2	nd	115,8	8,7
BAR 3 m	Pâturage de 3 ans	nd	nd	151,9	nd	122,1	14,3
BAR 4 m	Pâturage de 4 ans	nd	nd	nd	107,4	105,8	13,1
BAR 5 m	Pâturage de 5 ans	nd	nd	230,4	nd	171,4	9,3

❖ Dans la couche de sol 10-20 cm des sites de la station expérimentale, la valeur d'activité la plus élevée au pH de l'horizon est observée pour le pâturage de 5 ans (BAR 5). Il en était de même pour la mesure à pH 6,5. Les différences entre les autres échantillons BAR sont plus marquées que pour une mesure à pH 6,5.

* Les différences significatives au seuil de 5 % sont matérialisées par le signe ">".

III.- DISCUSSION - CONCLUSIONS

1.- Activité phosphatase alcaline

Les valeurs de l'activité phosphatase alcaline de la couche de sol 0-10 cm sont faibles (< 50 $\mu\text{g pN/g sol/h}$). Les activités phosphatases alcalines sont plus faibles dans les horizons superficiels des sites pâturés que dans ceux des sites naturels.

L'activité phosphatase alcaline est prédominante dans les sols alcalins (Eivazi & Tabatabai, 1977 ; Juma & Tabatabai, 1977, 1978), le pH des sols étudiés étant inférieur à 6, de telles valeurs d'activités ne sont pas suprenantes.

Les valeurs d'activité phosphatase alcaline les plus élevées sont observées pour les sites où les valeurs du pH sont les plus basiques et où les teneurs en carbone et en azote sont les plus fortes. La relation inverse est observée pour les sols présentant les valeurs d'activité alcaline les plus faibles. Lors de l'expérience, l'ajout du sol à la solution MUB à pH 11 provoque sans doute un réajustement de pH plus ou moins important selon le pH du sol ajouté. La diminution du pH peut entraîner une diminution de l'activité phosphatase alcaline.

L'activité alcaline est positivement corrélée aux teneurs en carbone ($R^2 = 0,42$) et en azote ($R^2 = 0,41$), de plus il est communément observé que les teneurs en carbone et en azote sont fortement corrélées à la biomasse microbienne. Dans une étude sur un sol "Pódzolico" brésilien, Fernandes *et al.* (1997) mettent en valeur les corrélations positives et très significatives existant entre l'activité phosphatase alcaline et (i) la teneur en matière organique, (ii) l'activité microbienne et (iii) le pH du sol.

Ces résultats confirment les observations de Juma & Tabatabai (1978) qui montrent que les végétaux supérieurs ne semblent pas promouvoir d'activité phosphatase alcaline, à l'inverse des micro-organismes.

2.- Activité phosphatase acide

❖ La mesure de l'activité phosphatase acide de l'horizon superficiel présente une variabilité comprise entre 1 et 14 % selon le site considéré. Ces coefficients de variation sont supérieurs à ceux observés par Tabatabai & Bremmer (1969) mais sont égaux voire inférieurs à

ceux donnés par d'autres auteurs pour des sols tropicaux (Feller *et al.*, 1994 ; Pang & Kolengo, 1986).

❖ Quelque soit le site considéré, l'activité phosphatase à pH 6,5 est nettement supérieure à celle mesurée en milieu alcalin, ce qui confirme le fait que les activités phosphatases acides sont prédominantes dans les sols à pH acide. Tout comme pour les activités alcalines, les valeurs diminuent avec la profondeur mais l'activité phosphatase à 50 cm de profondeur n'est pas négligeable. L'allure des courbes d'activité phosphatase en fonction de la profondeur est la même que pour les courbes des teneurs en carbone mesurées selon la profondeur.

❖ Une analyse en composantes principales (non présentée) utilisant les teneurs en carbone, en azote et en phosphore organique ainsi que l'activité phosphatase acide a été réalisée pour les couches de sol 0-10 cm. Cette analyse montre que l'activité phosphatase acide à pH 6,5 n'explique que 11,4 % de la distribution des points, 87,6 % de la variance totale étant expliquée par les teneurs en carbone, en azote et en phosphore organique. Pour une ACP utilisant l'activité phosphatase mesurée à un pH proche de celui du sol, la variance totale est expliquée à 14,8 % par ce facteur et la plus grande proportion de la variance reste expliquée par les variables C, N et Po (84,2 %).

❖ Le classement inter-sites relatif aux activités phosphatase obtenues avec la méthode Tabatabai (à pH 6,5) ne correspond pas à celui que l'on peut établir avec une mesure réalisée au pH du sol. Ni le pH du sol ni une valeur fixe (6,5) ne correspondent systématiquement au maximum d'activité phosphatase acide. Toutefois, dans les horizons de surface, ce maximum est rencontré à un pH proche de celui du sol pour les sites sous Campos (RON 3 et 4), Cerrado pâturé (BAR 1) et pâturages de 12, 4 et 5 ans (BAR 2, 4 et 5), soit 6 sites sur 10. Les autres sites produisent plus de *p*-nitrophénol à un pH différent de celui du sol. Le maximum est rencontré à pH 6,5 uniquement pour le site sous cerradão (RON 1). Dans les couches de sol 10-20 cm, l'activité au pH du sol est supérieure à celle mesurée à pH 6,5 pour les sites sous Campo (RON 3 et 4), forêt galerie (RON 5), Cerrado pâturé (BAR 1) et pâturages de 12, 3 et 5 ans (BAR 2, 3 et 5). Elle est équivalente pour les sites sous cerrado (RON 2) et sous pâturage de 4 ans (BAR 4) et elle est plus faible pour le site sous Cerradão (RON 1).

Les maxima d'activités phosphatase acide étant le plus souvent obtenus pour un pH proche de celui du sol, le classement inter-sites que nous retiendrons sera celui obtenu à partir d'une mesure à un pH voisin du pH_{eau} des sols (§II.- 2.1.). De plus, cette mesure permet d'apprécier l'activité phosphatase des sols dans des conditions plus proches de la réalité.

❖ Le tableau 15 donne les coefficients de corrélation entre l'activité phosphatase mesurée à pH 6,5 ou au pH voisin de celui du sol et les teneurs en carbone, azote, phosphore organique des échantillons, d'une part et les teneurs en phosphore organique des extraits NaHCO₃ et NaOH pratiqués sur la couche de sol 0-10 cm, d'autre part. Sur l'ensemble de la profondeur étudiée (0-70 cm), les coefficients de corrélation, hautement significatifs, sont relativement élevés. L'activité phosphatase acide mesurée à pH 6,5 est liée à la quantité de phosphore organique et aux teneurs en carbone et azote donc secondairement à la nature de la matière organique et à l'activité microbienne. Si on considère uniquement l'horizon 0-10 cm, les coefficients de corrélation entre l'activité phosphatase et les teneurs en carbone, azote et phosphore organique de l'échantillon sont moins élevés.

L'extrait soude contient le phosphore lié aux surfaces du sol (matière organique et oxydes de fer et d'aluminium) ; la valeur du coefficient de corrélation entre la teneur en phosphore organique de l'extrait soude et l'activité phosphatase souligne l'importance des phénomènes d'adsorption des enzymes sur les surfaces minérales et de leurs conséquences (diminution ou inhibition de l'activité).

Aucune corrélation ne s'établit entre les mesures d'activité phosphatase acide et les rapports C/Po (tableau 15). Ce résultat confirme les réserves émises par Oberson *et al.* (1995) concernant l'utilisation des valeurs seuils (200 et 300) des rapports C/Po comme délimitation entre les processus de minéralisation et d'immobilisation du phosphore organique des sols tropicaux.

Tableau 15.- Coefficients de corrélation (R^2) entre activité phosphatase et rapport C/Po, teneurs en carbone, azote et phosphore organique (de l'échantillon et des extraits NaHCO₃ et NaOH).

Coefficients de corrélation (R^2)	Activité phosphatase à pH			
	6,5		≈ pH sol	
	0-70 cm	0-10 cm	0-10 cm	
C/Po	0,08 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,04 ^{ns}	
C (éch.)	0,74 ^{***}	0,48 ^{**}	0,34 [*]	
N (éch.)	0,69 ^{***}	0,46 ^{**}	0,34 [*]	
Po (éch.)	0,56 ^{***}	0,42 ^{**}	0,28 ^{ns}	
Po (NaHCO ₃ + NaOH)	nd	0,67 ^{**}	0,49 [*]	
Po (NaHCO ₃)	nd	0,35 ^{ns}	0,34 [*]	
Po (NaOH)	nd	0,71 ^{**}	0,50 [*]	
nd : non déterminé	*** p < 1 %	** 5 > p > 1 %	* p > 5 %	ns p > 10 %

La quantité et la qualité de la matière organique interfèrent donc avec l'activité phosphatase. L'interférence peut se manifester de différentes façons (Vuorinen & Saharinen, 1996) : (i) d'une manière indirecte, par une action sur la mesure de l'activité, adsorption du produit mesuré (*para*-nitrophénol) ou/et du substrat (*para*-nitrophénylphosphate) sur les molécules organiques, (ii) d'une manière directe par adsorption de l'enzyme ou du complexe Substrat-Enzyme. Pour d'autres auteurs, la matière organique peut avoir un effet de protection de l'enzyme.

La relation activité phosphatase acide/matière organique a déjà été signalée (Feller *et al.*, 1994 ; Harrison, 1987 ; Fernandes *et al.*, 1997). Elle a été mise en évidence à l'échelle des profils de sols (Juma & Tabatabai, 1978 ; Pang & Kolengo, 1986) et à l'échelle parcellaire (Bonmati *et al.*, 1991). Les horizons de surface (0-10 cm) présentent des activités phosphatases acides supérieures à celles données par Feller *et al.* (1994) dans des sols tropicaux (tableau 16). Ces auteurs observent une corrélation positive hautement significative entre les valeurs d'activités phosphatase acides et les teneurs en carbone des échantillons. Dans notre étude, cette corrélation existe également avec cependant un coefficient moins élevé et moins significatif ; l'équation de la droite de régression est proche de celle obtenue par Feller *et al.* (1994). Tabatabai & Bremmer (1969) ont étudié des sols de provenances plus diverses mais leur étude présente également une corrélation activité phosphatase acide/teneur en carbone élevée et hautement significative.

Ainsi, tout facteur susceptible de modifier la teneur en matière organique du sol modifiera l'activité phosphatase.

Tableau 16.- Teneurs en carbone, en argiles granulométriques, caractéristiques minéralogiques et valeurs d'activité phosphatase acide (Pase) de différents sols.

	Argiles (%)	Carbone (%)	Minéralogie	Pase µg pN/g sol/h	Relation Pase/Carbone
RON - BAR	> 45	24-63	Kaolinite Oxydes	144-420 Moy. 263	Pase = 5,99 C + 40,45 R ² = 0,49 p = 0,024
Sols tropicaux (Feller <i>et al.</i> , 1994)	> 45	13-42	Kaolinite Oxydes	68-236 Moy. 126	Pase = 4,15 C + 24,9 R ² = 0,81 p = 0,0001
	< 25	5-20	Kaolinite Oxydes	28-118 Moy. 75	
Provenances diverses (Tabatabai <i>et al.</i> , 1969)	< 45	14-29	Non précisée	229-820 Moy. 526	Pase = 34,21 C - 218,8 R ² = 0,89 p = 0,0005

Feller *et al.* (1994) ont proposé un coefficient d'activité phosphatase relié à la teneur en carbone. Ces auteurs ont mesuré l'activité phosphatase (Pase) dans un tampon à pH 6,5. Dans notre étude, ce coefficient peut être calculé en utilisant les mesures d'activités phosphatase effectuées pour des pH proches de ceux des sols (tableau 17). Tous les sites, hormis RON 1, présentent dans leur horizon superficiel, pour un pH proche de celui du sol, une activité phosphatase supérieure à celle mesurée à pH 6,5. Les coefficients calculés à partir des activités phosphatases mesurées à un pH proche de celui du sol sont donc, dans la majorité des cas, plus élevés que ceux calculés à partir d'une mesure de Pase effectuée à pH 6,5. Le coefficient $[Pase_{pH\ sol} / C]$ semble plus approprié car il reflète mieux les conditions réelles du sol.

Tableau 17.- Coefficients d'activité phosphatase, reliés à la teneur en carbone (selon Feller *et al.*, 1994) ou à la teneur en phosphore organique des extraits $NaHCO_3$.

	Pase pH 6,5 *	Pase pH sol **	Pase pH sol
	C	C	Po $NaHCO_3$
RON 1	9,1	6,8	25,5
RON 2	8,5	10,0	nd
RON 3	9,9	10,3	nd
RON 4	7,6	8,6	23,2
RON 5	4,9	5,0	nd
BAR 1	6,3	8,4	30,6
BAR 2	6,6	11,0	40,8
BAR 3	4,8	5,8	23,3
BAR 4	5,9	7,9	14,8
BAR 5	7,2	7,1	18,9

* : activité phosphatase ($\mu g\ pN/g\ sol/h$) mesurée à pH 6,5

** : activité phosphatase ($\mu g\ pN/g\ sol/h$) mesurée au pH du sol

Comme nous l'avons constaté au chapitre III, une extraction par une solution $NaHCO_3$ 0,5 M (Olsen *et al.*, 1954 ; Bowman & Cole, 1978 ; Hedley *et al.*, 1982) permet d'obtenir le phosphore organique et inorganique, faiblement adsorbé sur les surfaces du sol, et donc restant échangeable. Le calcul du rapport de l'activité phosphatase, mesurée au pH du sol, à la teneur en phosphore organique de cet extrait permettrait d'apprécier le potentiel d'activité hydrolytique du phosphore organique facilement extractible de ces sols. Ainsi, le site BAR 2, pâturage de 12

ans, présente le potentiel d'hydrolyse du phosphore organique le plus élevé (rapport $[P_{\text{ase pHsol}} / P_{\text{O NaHCO}_3}] = 40$). Le site BAR 1 (cerrado parfois pâturé) et les sites naturels (RON 1, Cerradão et RON 4, Campo limpo) présentent des coefficients compris entre 23 et 30. Les sites de pâturages plus récents (BAR 3 à 5) présentent les coefficients les plus faibles.

❖ Les espèces végétales sécrètent des phosphatases dont les caractéristiques, et notamment le pH maximal d'activité, peuvent varier d'une espèce à une autre. Par exemple, le maïs sécrète une phosphatase présentant une activité maximale à pH 4,0 (Dick *et al.*, 1983). Les enzymes excrétées peuvent être rapidement dégradées par les protéases du sol. Chaque sol développe une population enzymatique qui lui est propre, dépendant de la végétation qu'il soutient. Les activités les plus élevées sont mesurées pour les sols sous végétation naturelle où les espèces herbacées sont présentes (RON 3 et RON 4). La sécrétion de phosphatases acides par les racines des plantes ou par un symbiote associé à ces espèces semblent être importante. Les sols des sites d'essais de la station expérimentale présentent des activités nettement plus faibles que sous végétation naturelle.

Plusieurs hypothèses sont possibles, mais prises de façon indépendante, elles ne peuvent expliquer les différences entre les parcelles, les effets étant certainement conjugués.

Une première hypothèse liée à la nature des espèces végétales présentes sur les sites peut être formulée : l'espèce *Brachiaria brizantha* induirait une activité phosphatase acide plus réduite que les espèces herbacées naturelles et/ou ne développerait pas d'associations symbiotiques bénéficiant à l'activité phosphatase. Les sites BAR 1 (Cerrado pâturé) et RON 2 et 3 (Cerrado et Campo sujo) ont de nombreuses espèces végétales communes (indice de similitude > 40 %), mais les espèces présentes en RON 2 et 3 et absentes en BAR 1 seraient responsables d'une activité phosphatase plus intense. Les différences de comportement entre les espèces végétales et notamment entre plantes fourragères et légumineuses pour l'acquisition et l'utilisation du P des sols acides est souligné par Rao *et al.* (1997).

Par ailleurs, il est admis qu'une augmentation du pH (chaulage) (Halstead, 1964) ou un apport de phosphates (engrais ; synthèse dans Harrison, 1987) peuvent diminuer l'activité phosphatase acide. Mais ces deux dernières suppositions ne permettent pas d'expliquer les valeurs d'activité phosphatase du site BAR 1 (Cerrado pâturé) qui n'a reçu ni engrais, ni apport calcaire.

De plus, la modification de la teneur en matière organique induite par la mise en place de pâturage intensif ou extensif influe sur le potentiel d'activité phosphatase du sol. Cette dernière hypothèse est confortée par la forte corrélation entre activité phosphatase acide et teneur en carbone du sol.

Un facteur propre au sol et non identifié dans le cadre de notre étude pourrait également intervenir.

3.- Conclusions

La mesure de l'activité phosphatase telle qu'elle est pratiquée par la plupart des auteurs s'intéressant aux potentiels phosphatase des sols c'est-à-dire mesurée à pH 6,5, ne reflète pas l'activité réelle au pH du sol. Afin de ne pas préjuger de l'activité phosphatase du sol, et notamment dans le cas des sols tropicaux, il paraît judicieux de mesurer l'activité sur une gamme de pH relativement étendue. Cette gamme devant comprendre des pH suffisamment acides pour tester l'activité dans de potentiels microsites du sol et notamment à proximité des racines, excrétrices de protons et le pH usuel de mesure de l'activité phosphatase (méthode Tabatabai). Toutefois, dans le cadre d'une étude plus restreinte, une mesure de l'activité phosphatase (Pase) au pH du sol paraît plus conforme à la réalité qu'une mesure à pH 6,5.

L'activité phosphatase alcaline est nettement inférieure à l'activité phosphatase acide. Cette dernière, mesurée à pH 6,5, est fortement corrélée aux teneurs en carbone des sols. Ainsi toute intervention d'ordre agronomique modifiant la teneur et la nature de la matière organique conduit à une modification de l'activité phosphatase. La comparaison des sites montre que le potentiel d'activité phosphatase est plus élevé sous végétation native. Dans ces sols, la culture monospécifique d'une plante fourragère serait un facteur de la baisse de l'activité phosphatase.

Troisième Partie

Étude des interactions Phytase-Phosphate-Sol

Un quart du phosphore des couches de sol 0-10 cm des sols étudiés est sous forme organique (Chapitre II. § II.- 5.3.). Les enzymes d'origine végétale ou microbienne participent à son hydrolyse. Ce processus conduit à libérer des ions phosphates dans la solution du sol qui seront adsorbés sur les surfaces du sol ou réabsorbés par les racines ou la microflore.

Bowman et Cole (1978) ont tenté d'évaluer le taux de minéralisation de différentes formes de Po par une extraction au bicarbonate pratiquée après différents temps d'incubation. D'autres auteurs ont suggéré qu'une extraction séquentielle utilisant différents agents permet de mieux cerner les taux de minéralisation et d'adsorption du P (Condrón *et al.*, 1993 ; Zhang *et al.*, 1994). Les méthodes d'extraction chimique renseignent sur la réactivité d'un ou plusieurs agents vis à vis des formes organiques et minérales présentes mais conduisent souvent à une sous- ou surestimation des processus engagés (Fardeau *et al.*, 1988).

L'utilisation de techniques plus modernes comme le marquage isotopique semble apporter des informations plus complètes. Différents auteurs ont introduit dans la solution du sol du ^{32}P et ont mesuré après différents temps d'incubation les quantités de P et ^{32}P extraites par des résines ou des agents chimiques (Walbridge & Vitousek, 1987 ; López-Hernández & Niño, 1993). Les résultats obtenus par les techniques d'échange isotopique peuvent être analysés avec un modèle multicompartimental considérant différents pools de phosphore (Fardeau, 1993) ; le temps est une variable essentielle dans ce modèle. En combinant techniques d'échange isotopique et modélisation, Frossard *et al.* (1996) ont étudié les quantités de P minéralisées et réadsorbées sur des sols incubés en présence de deux phosphates organiques.

Les méthodes d'étude de la stabilité biochimique du phosphore organique à l'aide de tests d'activité enzymatique sont indicateurs de la capacité d'un sol à minéraliser, ils ne permettent pas de prévoir à quelle vitesse et à quel taux le Po peut être hydrolysé dans le sol. Ainsi, il convient d'aborder le problème non pas en testant la capacité du phosphore organique à être hydrolysé, mais en voyant comment ce phosphore organique est hydrolysé lorsqu'il est soumis à l'action d'une enzyme introduite dans le milieu et ceci en employant les techniques de marquage isotopique. Des expériences d'incubation d'échantillons de sol dont le compartiment

d'ions PO_4^{3-} échangeable a été marqué par un isotope du phosphore permettant de suivre la radioactivité en solution tout en quantifiant le phosphore assimilable des sols (extraits eau et résine). Une augmentation du P en solution consécutive à une hydrolyse de Po conduit à diminuer le rapport $^{32}\text{PO}_4/^{31}\text{PO}_4$ ou R.A.S., radioactivité spécifique de la solution du sol. Dans un premier temps, les échanges d'ions phosphates entre la solution et la phase solide du sol sont quantifiés. Les phénomènes d'adsorption sont étudiés ensuite par le suivi des échanges après introduction d'une quantité connue de phosphates non marqués dans la solution du sol. Ces deux expériences servent de base à l'étude des modifications des phénomènes d'échanges entraînés par l'introduction dans la solution du sol d'une phytase pouvant conduire à l'hydrolyse de phosphore organique. L'adsorption potentielle de cette molécule sur les surfaces du sol et la compétition possible entre phytase et phosphates pour les sites actifs des surfaces sont également abordées.

I.- ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE DES IONS PHOSPHATES ENTRE LES SURFACES ET LA SOLUTION DU SOL

1.- Principe de la méthode de dilution isotopique

Les techniques d'échange isotopique sont utilisées pour quantifier le phosphore disponible pour les plantes. Le phosphore isotopiquement échangeable est du phosphore potentiellement assimilable par les plantes (Larsen, 1952) ; cette relation a de nombreuses fois été vérifiée et continue de l'être. Certaines espèces végétales peuvent cependant prélever du P dans des compartiments très peu échangeables.

La méthode de dilution isotopique (Fardeau, 1981) est basée sur un échange homoionique entre des ions $^{32}\text{PO}_4$ introduits dans la solution du sol ("Traceur") et des ions PO_4 adsorbés sur la phase solide du sol. La quantité d'ions introduite étant très inférieure à celle présente en solution, les équilibres entre les différents compartiments du sol ne sont pas modifiés. Une quantité R connue de radioactivité sous forme d'ions $^{32}\text{PO}_4$, sans entraîneur (c'est-à-dire sans ajout d'une quantité de $^{31}\text{PO}_4$ pouvant modifier les échanges) est injectée dans un système sol-solution, de rapport 1/10, en état stationnaire. La radioactivité spécifique (R.A.S.) des ions phosphates de la solution du sol est mesurée. La R.A.S. à un instant t est le rapport de la

quantité r/R de radioactivité présente dans la solution sous forme d'ions $^{32}\text{PO}_4$ à la concentration en ions $^{31}\text{PO}_4$ présents dans la même solution (C_p en $\mu\text{g P/ml}$). Dans un système en état stationnaire, la quantité C_p est constante alors que le rapport r/R varie avec le temps.

2.- Matériels et méthodes

Les échantillons, séchés à l'air, sont issus des couches de sol 0-10 cm des sites RON 1 (Cerradão/LE), RON 4 (Campo limpo/LE) et BAR 1 à 5 (échantillons moyens ; Cerrado pâturé et pâturages/LE). Des prises d'essai de 1,5 g de sol sont réhumectés avec 50 μl d'une solution aqueuse contenant des ions $^{32}\text{PO}_4$ (quantité R introduite = 185 kBq) et 550 μl d'eau. Deux lots de trois répétitions sont préparés et mis en incubation pendant 24 h à 20°C. Après incubation, les lots reçoivent 15 ml d'eau ; une bande de résine (AEM) de 2x5 cm est ajoutée dans les flacons de l'un des deux lots.

Les Membranes Échangeuses d'Anions (AEM) utilisées sont des résines synthétiques (B.D.H. Chemicals Ltd, Poole, England) qui se présentent sous la forme d'un tissu aux propriétés mécaniques, chimiques et électriques appropriées à l'étude des sols. Les bandes AEM sont converties de résine Cl^- en résine HCO_3^- en les plaçant dans une solution de NaHCO_3 0,5M (pH 8,5). Les ions phosphates faiblement adsorbés sur la phase solide du sol quittent celle-ci pour être échangés avec les anions qui saturent la résine. Les ions PO_4 adsorbés sur la résine seront désorbés dans une solution de HCl 0,5M. Les extraits eau et résine permettent de quantifier le phosphore échangeable du sol.

Les lots sont placés en agitation rotative pendant 17 heures (40 rpm, 20°C), l'équilibre sol-solution en terme d'échanges est ainsi atteint. Puis les échantillons du lot sans AEM sont centrifugés 30 minutes à 15 000 rpm* et la bande de résine du second lot est lavée à l'eau et mise en agitation rotative dans 15 ml d' HCl 0,5M (1 h, 40 rpm, 20°C). Trois aliquotes des solutions (eau et HCl) sont prélevées, la radioactivité en solution est mesurée par comptage en scintillation liquide. Le phosphore en solution est révélé par colorimétrie (John, 1971) et dosé par spectrophotométrie à 710 nm.

La mesure de la radioactivité et du P en solution permet de calculer la R.A.S., radioactivité spécifique (à l'équilibre sol-solution), présentée comme le rapport de la quantité d'ions $^{32}\text{PO}_4$ présents dans la solution du sol à la concentration de phosphates dans cette même solution.

* Différents essais de vitesse et temps de centrifugation ont préalablement été réalisés ; aucune filtration.

3.- Résultats

Les concentrations de phosphore dans la solution du sol (Cp) sont comprises entre 0,022 et 0,039 µg P/ml soit des teneurs en phosphore extractible par l'eau s'échelonnant entre 0,22 et 0,39 µg P/g sol (tableau 18). La radioactivité spécifique de la solution du sol présente des valeurs comprises entre 0,27 et 0,87.

Les quantités de phosphore extraites par les résines anioniques, plus élevées, sont comprises entre 0,40 et 4,10 µg P/g sol. Les valeurs de la radioactivité spécifique sont également plus élevées (de 0,42 à 1,22).

Tableau 18.- Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines (exprimées en µg P/g sol) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre.

	PO ₄ ³⁻ (µg P/g sol)				R.A.S.			
	Eau		Résine		Eau		Résine	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.
RON 1	0,39	0,02	1,46	0,13	0,27	0,01	0,92	0,04
RON 4	0,26	0,05	0,40	0,06	0,65	0,02	0,59	0,10
BAR 1 m	0,22	0,03	0,62	0,02	0,87	0,01	1,22	0,04
BAR 2 m	0,39	0,08	0,47	0,06	0,51	0,01	1,18	0,13
BAR 3 m	0,33	0,09	0,62	0,02	0,61	0,02	1,01	0,06
BAR 4 m	0,32	0,07	4,10	0,24	0,45	0,01	0,42	0,03
BAR 5 m	0,25	0,01	0,47	0,04	0,79	0,00	1,11	0,10

4.- Discussion

Les concentrations de phosphate dans la solution du sol (Cp de 0,022 à 0,039 µg P/ml) sont légèrement supérieures à 0,02 µg P/ml, valeur considérée comme critique pour la production végétale (Memon & Fox, 1983). Ces valeurs restent toutefois inférieures à celles que l'on peut observer dans les horizons superficiels des sols des régions tempérées (Frossard *et al.* 1994 ; Morel *et al.*, 1994). La concentration de phosphate en solution peut être très faible dans les sols tropicaux. Salcedo *et al.* (1991) mesurent par exemple une concentration Cp de 0,007 µg P/ml pour l'horizon superficiel d'un oxisol brésilien. Dans une étude sur le phosphore

assimilable de sols typiques de l'Afrique de l'ouest, Fardeau & Frossard (1991) rapportent des concentrations de PO_4^{3-} dans la solution du sol variant de 0,001 à 0,17 $\mu\text{g P/ml}$.

Les résines anioniques permettent de simuler l'extraction active des plantes. Les teneurs en phosphates obtenues par cette méthode sont étroitement corrélées avec les quantités prélevées par les plantes (Roche *et al.*, 1980). Elles sont supérieures à celles obtenues par une extraction à l'eau. L'horizon 0-10 cm du pâturage de 4 ans (BAR 4) présente une quantité plus élevée, en liaison avec la teneur en phosphore inorganique de cette couche de sol (Chapitre II-§ II.-5.) et/ou une désorption plus aisée des ions phosphates de la phase solide. Comprises entre 0,4 et 4 $\mu\text{g P/g}$ sol, les teneurs en phosphate extractibles par les résines anioniques sont inférieures à celles observées par Sharpley *et al.* (1984) dans les horizons de surface de sols d'Amérique du Nord et de Puerto Rico (13 $\mu\text{g P/g}$ sol en moyenne) ou par Tran *et al.* (1992) dans des sols canadiens (39 $\mu\text{g P/g}$ sol en moyenne). Tiessen *et al.* (1992) donnent des valeurs analogues pour des sols argileux du nord-est brésilien (0,3 à 1,2 $\mu\text{g P/g}$ sol) et Salcedo *et al.* (1991) des valeurs plus élevées pour des sols ferrallitiques à texture sablo-limoneuse.

Les radioactivités spécifiques ($^{32}\text{P}/\text{PO}_4^{3-}$), sont plus élevées pour les sols sous Cerrado pâturé (BAR 1) et pâturage de 5 ans (BAR 5), ceci peut s'expliquer par une concentration dans la solution (C_p) plus faible. En d'autres termes, ces échantillons présentent moins de phosphates en solution mais ces derniers sont plus échangeables. Le site RON 1 (Cerradão) présente la R.A.S. de la solution du sol la plus faible, pourtant la concentration de phosphate en solution est la même que pour le pâturage de 12 ans (BAR 2) où la R.A.S. est deux fois plus élevée. Ceci s'explique par un pourcentage de $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ moins important dans la solution du sol en RON 1 qu'en BAR 2 donc par des échanges d'ions phosphates entre la phase solide et la solution plus abondants en RON 1.

Les valeurs des radioactivités spécifiques des solutions HCl issues des résines sont en général plus élevées que celles des solutions du sol. La résine échange les ions phosphates, marqués ou non, présents dans la solution du sol et ceux faiblement adsorbés sur la phase solide. Les phénomènes d'échange sont accrus par la présence de résine dans la solution du sol. Pour les sites sous savane herbacée (RON 4) et sous pâturage de 4 ans (BAR 4), les R.A.S. des solutions n'augmentent pas des extraits eau aux extraits résine. Dans le cas de RON 4, le pourcentage d'ions marqués augmente très peu en présence de résine, les échanges semblent plus difficiles, l'adsorption des ions phosphates sur les surfaces plus forte. Dans le cas de BAR 4, ce statut-quo est dû à une augmentation proportionnelle des quantités [^{32}P] et [PO_4^{3-}] qui composent le rapport permettant de calculer la R.A.S.

II.- EFFET DE L'APPORT D'UN ENTRAINEUR SUR LES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE

Un apport de phosphore soluble dans l'eau provoque un rééquilibrage du système sol/solution. Cet essai permet de simuler un apport de phosphates et de quantifier la part de réadsorption des ions phosphates ajoutés sur les surfaces minérales ou/et organo-minérales du sol. Dans la pratique, cet apport pourrait être dû à une hydrolyse de phosphore organique ou à un apport d'engrais.

1.- Matériels et méthodes

Les échantillons utilisés sont les mêmes que précédemment : couches de sol 0-10 cm des sites RON 1(Cerradão), RON 4 (Campo limpo) et BAR 1 à 5 (Cerrado pâturé et pâturages). Les échantillons de 1,5 g de sol sont réhumectés avec 50 µl d'une solution aqueuse contenant les ions $^{32}\text{PO}_4^{3-}$, 400 µl d'une solution KH_2PO_4 de concentration 95 µg P/ml (soit 25 µg P apporté/g sol) et 150 µl d'eau. Le suivi des lots et la mesure des paramètres sont pratiqués comme précédemment (§I.-2.).

2.- Résultats

Les teneurs en phosphore extractible par l'eau s'échelonnent entre 0,42 et 0,60 µg P/g sol (tableau 19). Les radioactivités spécifiques de la solution du sol sont comprises entre 0,13 et 0,22 soit des valeurs inférieures à celles observées sans entraîneur.

Les quantités de phosphore extraites par les résines anioniques, plus élevées que dans l'eau, sont comprises entre 4,32 et 12,57 µg P/g sol. Les valeurs de la radioactivité spécifique sont également plus élevées (de 0,23 à 0,33).

Tableau 19.- Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, après apport de $25 \mu\text{g P/g sol}$.

	PO_4^{3-} ($\mu\text{g P/g sol}$)				R.A.S.			
	Eau		Résine		Eau		Résine	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.
RON 1	0,55	0,02	8,93	1,07	0,13	0,01	0,27	0,05
RON 4	0,46	0,12	4,32	0,21	0,13	0,00	0,28	0,02
BAR 1 m	0,42	0,00	7,50	0,36	0,19	0,01	0,30	0,01
BAR 2 m	0,60	0,09	9,05	0,17	0,13	0,01	0,33	0,01
BAR 3 m	0,59	0,07	7,99	0,44	0,13	0,01	0,31	0,01
BAR 4 m	0,58	0,07	12,57	0,25	0,16	0,03	0,23	0,01
BAR 5 m	0,43	0,02	9,00	0,48	0,22	0,01	0,30	0,01

3.- Discussion

L'introduction de phosphates dans le système sol/solution conduit à une modification des équilibres : augmentation de la concentration des ions phosphates dans la solution (eau ou extrait résine), diminution de la proportion des phosphates marqués présents dans la solution et, par conséquent, diminution de la radioactivité spécifique. De plus, les pourcentages de recouvrement du P introduit sont faibles, moins de 1 % dans l'eau et de 15 à 39 % en présence de résines (tableau 20). Le pâturage de 4 ans (RON 4) présente le pourcentage de recouvrement le plus faible, pour ce site la teneur en gibbsite est supérieure à celle des horizons superficiels des autres sites.

Tout ceci s'explique par une adsorption importante du P introduit. Le phosphore ajouté est soluble dans l'eau ; plus de 60 % de ce phosphore s'adsorbe de telle façon qu'il entre dans des compartiments de P peu mobiles sans transiter par les compartiments les plus échangeables, il n'est alors pas extractible par la résine. Ce phénomène mis en valeur par une représentation multi-compartimentale du phosphore assimilable des sols (Fardeau, 1993) souligne l'importance d'une synchronisation des apports fertilisants avec la demande des plantes.

Ces sols présentent donc des surfaces qui permettent l'adsorption des phosphates (matière organique, argiles, oxydes d'aluminium et de fer) et leur confèrent un pouvoir fixateur élevé.

Tableau 20.- Pourcentages de recouvrement du P introduit dans le système sol/solution.

Sites	% P retrouvé dans la solution	
	Eau	Résine
RON 1	0,6	29,9
RON 4	0,8	15,7
BAR 1 m	0,8	27,5
BAR 2 m	0,8	34,3
BAR 3 m	1,0	29,5
BAR 4 m	1,0	38,9
BAR 5 m	0,7	34,1

III.- EFFET DE L'APPORT D'UNE PHYTASE EXOGÈNE SUR LES PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGE

L'apport d'une solution contenant une macromolécule à la solution du sol peut avoir plusieurs conséquences :

- interférences avec les surfaces du sol et phénomènes d'adsorption ; la macromolécule introduite étant une enzyme, l'adsorption peut en modifier l'activité ;
- modification de l'adsorption des ions phosphates ;
- modification du pH de la solution du sol et apports potentiels d'ions phosphates par hydrolyse enzymatique donc modification des équilibres d'échanges sol/solution.

1.- Choix de l'enzyme

Les enzymes intracellulaires ou liées aux parois cellulaires des végétaux peuvent être extraites et leurs activités mesurées dans une solution tamponnée. Lorsqu'elles sont introduites dans une solution de sol, ces enzymes présentent des activités pratiquement nulles (Matumoto-Pintro, 1996). D'autres enzymes sont directement excrétées dans la solution du sol par des champignons ectomycorhiziens, c'est le cas des phytases d'*Aspergillus ficuum* et de *Hebeloma cylindrosporum*. De telles enzymes ont une activité plus ou moins importante en présence de sol. Dans le cas de la phytase d'*Aspergillus ficuum*, l'activité dans une solution de sol est équivalente à celle mesurée dans une solution tamponnée pour un pH variant de 5,0 à 6,5 (Matumoto-Pintro, 1996). L'activité mesurée en utilisant le *p*-nitrophénol comme substrat (activité phosphatase ou pNPase) est maximale pour des pH compris entre 5,0 et 5,5.

La phytase d'*Aspergillus ficuum* présente également la particularité d'être vendue dans le commerce sous la forme de poudre lyophilisée (réf. P9792, Sigma Chemical Co), ce qui évite les opérations longues et précises de cultures du champignon, d'extraction et de purification de l'enzyme. Cette poudre composée de phytase (*myo*-inositol-hexaphosphate 3-phosphohydrolase ; EC 3.1.3.8) peut également contenir des glucosidases et des phosphatases. Pour des pH en solution inférieurs au point isoélectrique de l'enzyme (pI = 5,0-5,4), la molécule est chargée positivement.

2.- Adsorption compétitive d'ions phosphates et de phytase sur la phase solide du sol

L'étude des phénomènes d'adsorption de l'enzyme sur les surfaces du sol devrait permettre de quantifier dans quelles proportions cette enzyme s'adsorbe. La compréhension des phénomènes de compétition entre les ions phosphates et la phytase pour l'adsorption sur la phase solide du sol nécessite une étude préliminaire de l'adsorption des ions phosphates, d'une part, et de la phytase, d'autre part, sur les surfaces du sol. Ces études sont menées sur la couche de sol 0-10 cm du site RON 1 (Cerradão/LE).

2.1.- Matériel et Méthodes

❖ **Échantillon utilisé** : le sol est issu de la couche 0-10 cm du site sous Cerradão (RON 1), sec à l'air, tamisé à 2 mm puis broyé à 100 µm (caractéristiques physiques et chimiques en annexe IV).

❖ **La Méthodologie employée** est basée sur la méthode des restes et la construction d'isothermes d'adsorption. Une masse (m) de sol est mise en contact avec un volume (V) d'adsorbat de concentration (Co) connue. Ce mélange est agité à température constante (30°C) pendant 17 heures puis centrifugé (30 min., 20 000 rpm). Le pH de la suspension est mesuré avant et après agitation. La concentration résiduelle, à l'équilibre, de l'adsorbat (Ce) est dosée dans le surnageant. La quantité adsorbée par unité de poids (Qa) est calculée :

$$Qa = (Co - Ce) \cdot V / m \quad \text{en } \mu\text{g/g sol}$$

avec m = 500 mg et V = 50 ml

❖ **Adsorptions simples d'ions phosphates et de phytase** : dans tous les cas, le volume V de la solution d'adsorbat de concentration Co est fixé à 50 ml et la masse m de prise d'essai à 500 mg de sol. Deux réplicatas ont été réalisés pour chaque valeur de Co. Le pH de la solution d'adsorbat est amené au pH du sol (4,7) avant mise en contact avec l'échantillon de sol.

Le phosphate est apporté sous la forme KH_2PO_4 . Les concentrations initiales Co sont les suivantes :

phosphate	0,05	0,1	0,5	1	2	5	10	25	-	µg/ml
phytase	-	-	0,5	1	2	5	10	25	100	

soit de 5 à 10 000 µg d'adsorbat ajouté par gramme de sol

❖ **Adsorption compétitive** : elle est étudiée par mise en contact avec le sol (500 mg) d'un mélange de phosphate et de phytase en solution (50 ml). Le choix des concentrations Co en adsorbats est issu de l'observation des isothermes simples :

phosphate	1	5	10	25	-	µg/ml
phytase	-	5	-	25	100	

❖ **Surface spécifique (m²/g) du sol étudié** : elle est déterminée par la méthode B.E.T. (Brunaer, Emmett, Teller) utilisant la volumétrie d'adsorption de l'azote gaz point par point. Cette mesure permet d'exprimer les résultats en µmoles d'adsorbat par unité de surface (m²).

❖ **Dosage des adsorbats** : le phosphate en solution est dosé par colorimétrie (John, 1970). Le dosage des molécules de phytase en solution est réalisé par spectrophotométrie à 196 nm. L'adsorption UV est proportionnelle à la quantité de phytase en solution et la densité optique est la même quelle que soit la quantité de phosphate ajoutée dans la solution.

❖ **Mesure du potentiel électrocinétique** : le potentiel zéta (P_z ou ζ) est mesuré par électrophorèse laser (Zee Meter 501 Penkem, L.E.M. Vandœuvre-lès-Nancy) dans le surnageant des mélanges sol-solution d'adsorbat, à l'équilibre après adsorption. Une centrifugation modérée des préparations permet d'obtenir un surnageant contenant uniquement les particules de taille colloïdale non neutralisées par les contre-ions et dont la charge renseigne sur l'évolution des phénomènes d'adsorption.

Remarque : la température du surnageant intervient sur la mobilité des particules. Les valeurs du potentiel zéta données par les appareils de mesures sont calculées pour une température de 20°C. Les valeurs présentées sont des valeurs corrigées prenant en compte la température du surnageant au moment de la mesure.

2.2.- Paramètres descriptifs du sol

La surface spécifique de la couche de sol étudiée, déterminée par la méthode B.E.T., est de 47,3 m²/g sol. Le potentiel zéta, mesuré dans un système sans ajout de phosphate ou de phytase, est de -31,53 mV et le pH de la solution du sol est de 4,7. La valeur négative du potentiel zéta est une conséquence de l'adsorption d'un excès de particules chargées négativement sur les surfaces par rapport à la charge totale du sol.

2.3.- Adsorption dans les systèmes à un adsorbat (annexe XII)

2.3.1- Résultats

❖ Adsorption des ions phosphates

Les concentrations d'équilibre (C_e) varient de 0,018 à 16,23 $\mu\text{g P/ml}$. La courbe de phosphate adsorbé en fonction du log de la concentration à l'équilibre (figure 33) présente un léger palier puis une phase ascendante. Le pH augmente progressivement avec la concentration finale de l'adsorbat dans la solution. Le potentiel zéta est relativement constant (environ -30 mV) pour les concentrations les plus faibles puis diminue pour atteindre -44,24 mV pour la concentration d'ions phosphates la plus élevée.

❖ Adsorption de la phytase

Les concentrations à l'équilibre (C_e) s'échelonnent entre 0,275 et 3,06 $\mu\text{g phytase/ml}$. La courbe de phytase adsorbée en fonction du log de C_e (figure 34) présente la même allure que précédemment. La courbe d'évolution du pH se caractérise par une phase ascendante de faible amplitude. Le potentiel zéta présente des valeurs plus faibles que dans le système sans adsorbat, cet écart diminue lorsque les concentrations en phytase augmentent.

2.3.2- Discussion

Dans le cas d'un système simplifié (minéraux purs), il est plus aisé de comprendre les phénomènes qui régissent l'adsorption. Dans le cas d'un système complexe comme le sol, l'adsorption dépend de la charge des particules (matière organique, sesquioxydes et argiles 1:1) et des forces électrostatiques se développant entre les molécules et les surfaces. Pour essayer de comprendre les mécanismes d'interactions composés organiques-minéraux-phosphate, de nombreux auteurs ont étudié les phénomènes d'adsorption des ions phosphates ou de macromolécules sur des minéraux purs et notamment sur la goethite (Ognalaga, 1992 ; Houmane, 1983 ; Frossard, 1995 ; Parfitt *et al.*, 1975 ; McLaughlin *et al.*, 1981 ; Ainsworth *et al.*, 1985). Dans ce cas, les isothermes d'adsorption des molécules sur la goethite présentent selon les valeurs du potentiel zéta deux domaines (Ognalaga *et al.*, 1994 ; Brossard *et al.*, soumis) : un premier où le potentiel électrocinétique positif s'annule progressivement et où les ions phosphates ou autres molécules (comme le salicylate, le glucose-1-phosphate ou le *myo*-inositol hexaphosphate) s'adsorbent faiblement. Ce domaine correspond à des phénomènes de complexation de surface et/ou d'échanges de ligands. Le second domaine est marqué par une augmentation progressive des charges négatives des particules, une diminution du potentiel zéta, en relation avec l'adsorption des molécules sur la goethite. De fortes concentrations introduites dans la suspension du sol peuvent entraîner la formation de multicouches sur les surfaces.

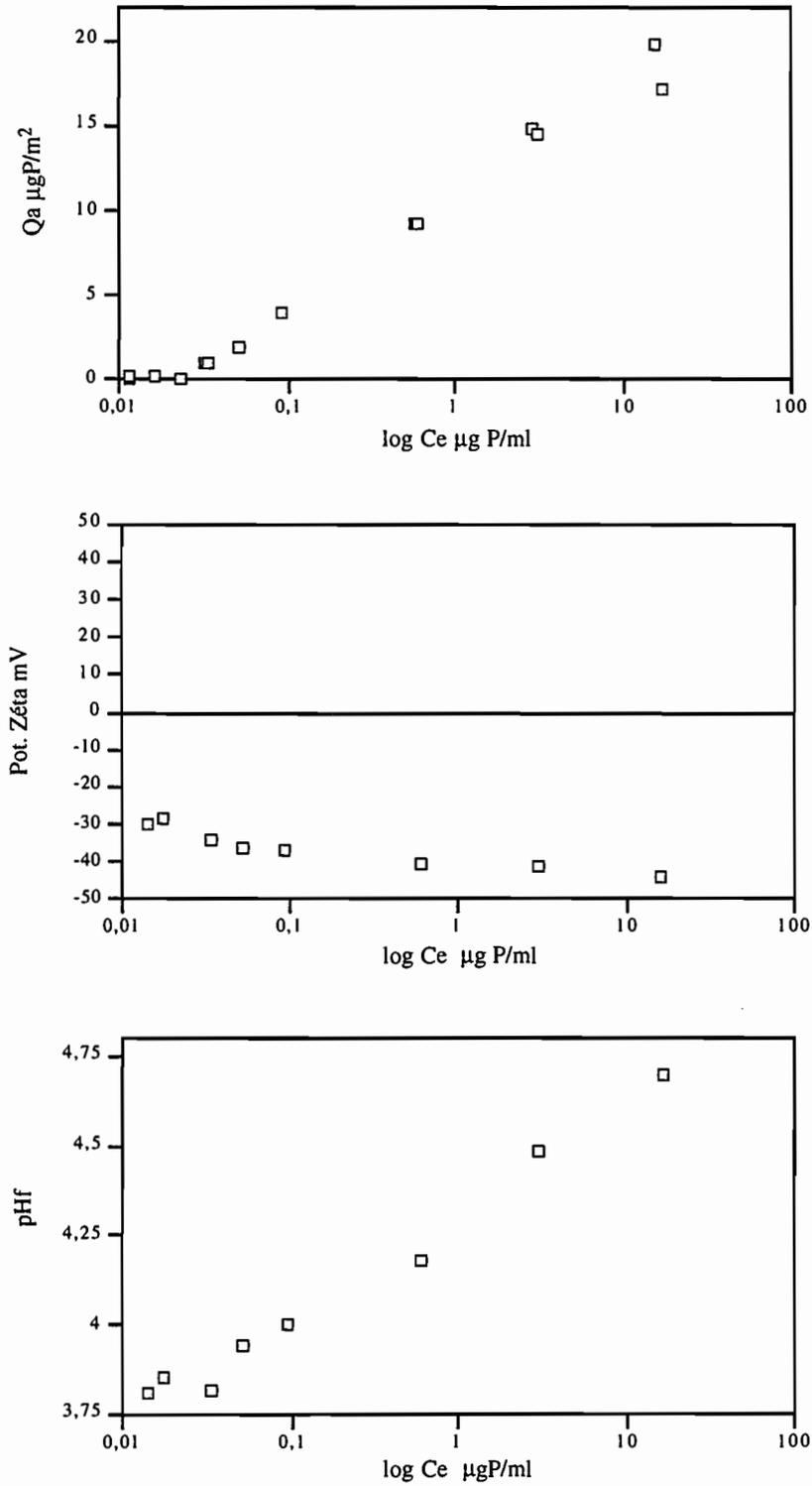


Figure 33.- Adsorption des ions phosphate sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm) : quantité adsorbée ($\mu\text{g}/\text{m}^2$), évolution du potentiel zéta (mV) et du pH au cours de l'adsorption.

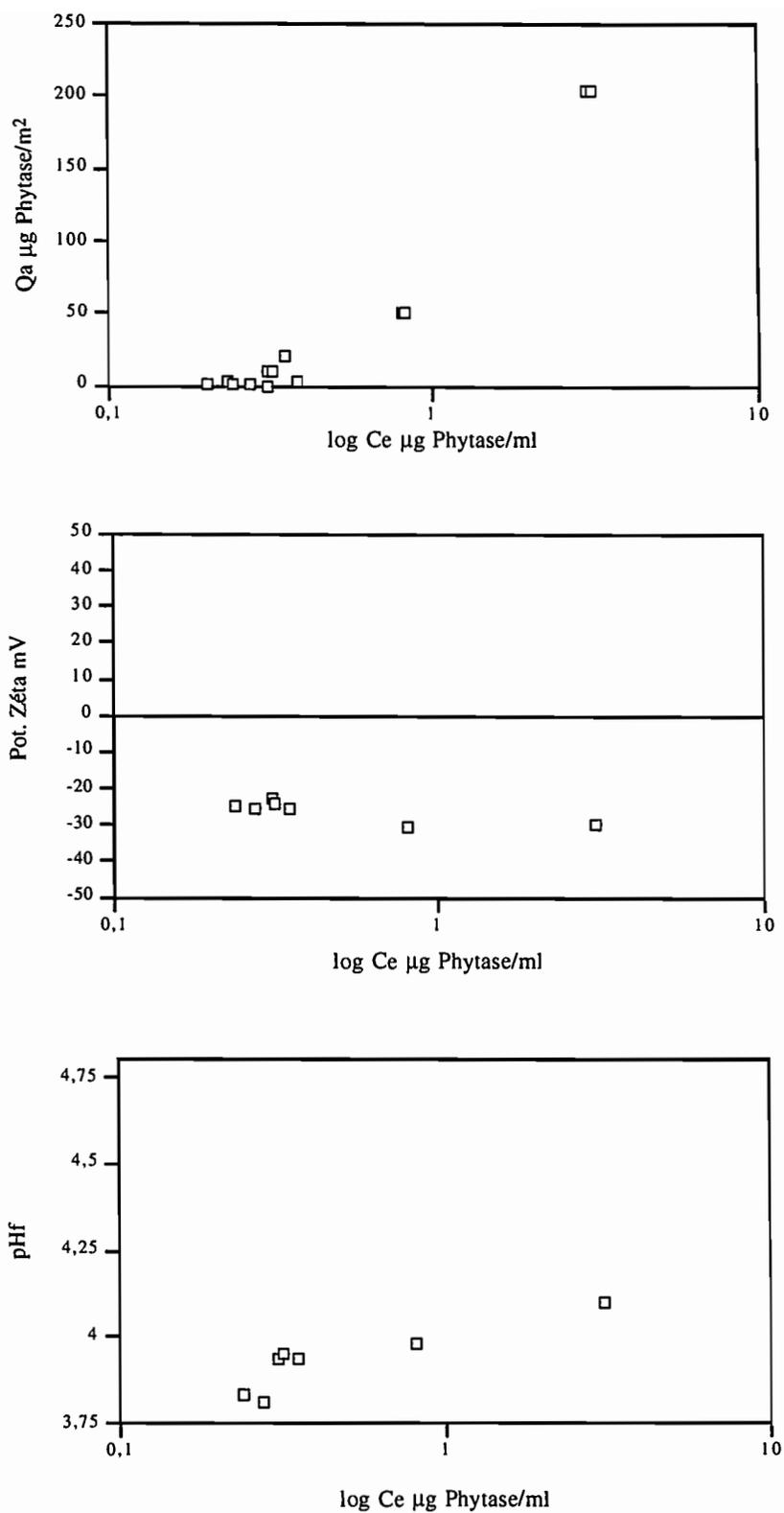


Figure 34.- Adsorption de la phytase sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm) : quantité adsorbée ($\mu\text{g/m}^2$), évolution du potentiel zéta (mV) et du pH au cours de l'adsorption.

Dans notre cas, les isothermes d'adsorption ne présentent pas le premier domaine, le potentiel zéta (Pz ou ζ) de la suspension de sol sans addition d'adsorbat est négatif dès le début de l'étude. Les surfaces du sol présentent un excès de particules chargées négativement.

Les ions phosphates et les molécules de phytase s'adsorbent sur les surfaces du sol même pour les concentrations C_0 les plus faibles (annexe XII, figure 33 et 34). A partir d'une quantité adsorbée (Q_a) d'environ 50 $\mu\text{g/g}$ sol, le potentiel zéta évolue peu, les fortes concentrations en adsorbats dans le système conduisent à la formation de multicouches.

Dans le cas de l'adsorption des ions phosphates, le potentiel zéta est de plus en plus négatif avec l'addition de quantités croissantes de phosphates dans le système, ce qui témoigne bien d'une adsorption de ces anions sur les surfaces. Les ions phosphates de la solution s'échangent avec les ions OH^- des surfaces ; l'apport d'ions OH^- à la solution du sol provoque une augmentation du pH. Pour une concentration C_0 faible (0,05 $\mu\text{g P/ml}$), la quantité adsorbée représente 63,8 % de la quantité introduite (annexe XII). L'adsorption augmente progressivement ; pour une concentration initiale introduite de 2 $\mu\text{g P/ml}$ soit 200 $\mu\text{g P/g}$ sol, la quantité en solution ne représente alors plus que 4,7 % de la quantité introduite. Ces résultats confirment ceux exposés au paragraphe II, ce sol présente un **pouvoir d'adsorption élevé vis à vis des ions phosphates**.

Dans le cas de l'adsorption de la phytase, le potentiel zéta passe de -31,53 mV dans la suspension du sol sans adsorbat ajouté à des valeurs voisines de -25 mV pour des concentrations en phytase faibles. Le potentiel électrocinétique diminue progressivement avec des quantités de phytase ajoutées de plus en plus élevées, sa valeur approche celle observée dans la suspension de sol pour la concentration en phytase la plus forte. Les variations de Pz (ζ) sont associées à une **adsorption de la phytase sur les surfaces du sol** (figure 34), parallèlement le pH augmente jusqu'à 4,1. La phytase en s'adsorbant neutraliserait des charges négatives présentes sur les surfaces. Quiquampoix *et al.* (1995) montrent l'importance des interactions électrostatiques et hydrophobes dans les processus d'adsorption des protéines, et notamment de la phytase d'*Aspergillus ficuum*, sur les surfaces minérales d'un sol. Ainsi, pour des pH en solution inférieurs au point isoélectrique (pI) de la protéine, les interactions électrostatiques entre les surfaces et la charge positive de la molécule conduisent à une adsorption de cette dernière avec perte de sa conformation. La phytase d'*Aspergillus ficuum* a un point isoélectrique situé entre 5,0 et 5,4. Aux pH de notre étude, elle est donc chargée positivement et les valeurs de pH de la suspension du sol conduisent à une adsorption de l'enzyme. Cette adsorption conduit à un changement de la conformation de la protéine et à une perte de son activité enzymatique (Quiquampoix *et al.*, 1993, 1995).

2.4.- Adsorption compétitive (annexe XII)

2.4.1.- Résultats

❖ Effet de l'apport de phytase sur l'adsorption des ions phosphates

Les quantités de P adsorbé varient de 2 à 14,3 $\mu\text{g P/m}^2$ (figure 35). Le potentiel zéta présente des valeurs toujours inférieures à celle observée dans une suspension sans ajout d'adsorbat. La courbe d'évolution du pH en fonction du log de la concentration en P à l'équilibre est croissante. Quelle que soit la quantité de phytase apportée au système, les effets de cet apport sur l'adsorption des ions phosphates sur les surfaces du sol sont les mêmes. L'addition de phytase modifie les processus d'adsorption du phosphate uniquement pour les concentrations en P à l'équilibre les plus faibles et les plus élevées. On constate une augmentation des quantités de P adsorbé pour les concentrations les plus faibles et une diminution pour les concentrations les plus élevées. Parallèlement, dans ces mêmes zones de concentrations, la valeur du potentiel zéta est respectivement inférieure et supérieure à celle observée dans un système simple sans phytase (figure 35).

❖ Effet de l'apport d'ions phosphates sur l'adsorption de la phytase

Les quantités de phytase adsorbée varient de 2,3 à 124,6 $\mu\text{g/m}^2$ (figure 36). Le potentiel zéta présente des valeurs inférieures à celles observées dans une suspension sans ajout d'adsorbat ou avec addition de phytase seule. Plus on ajoute de phosphate dans le système plus le pH augmente. La présence de phosphate dans le système modifie l'adsorption des molécules de phytase sur les surfaces du sol. Pour une concentration initiale en phytase de 5 $\mu\text{g/ml}$, l'adsorption de la phytase est fortement diminuée par la présence de P : 2,3 $\mu\text{g Phytase/m}^2$ en présence de 1 $\mu\text{g P/ml}$ contre 9,9 $\mu\text{g Phytase/m}^2$ dans le cadre d'un système simple sans P ajouté. Toutefois, pour cette concentration initiale en phytase, l'addition massive de P tend à augmenter les quantités de phytase s'adsorbant : 9,1 $\mu\text{g Phytase/m}^2$ en présence de 25 $\mu\text{g P/ml}$. Pour des concentrations initiale en phytase plus élevées, l'adsorption de la phytase est diminuée en proportions sensiblement égales (40 % en moyenne) quelle que soit la quantité de P ajoutée au système.

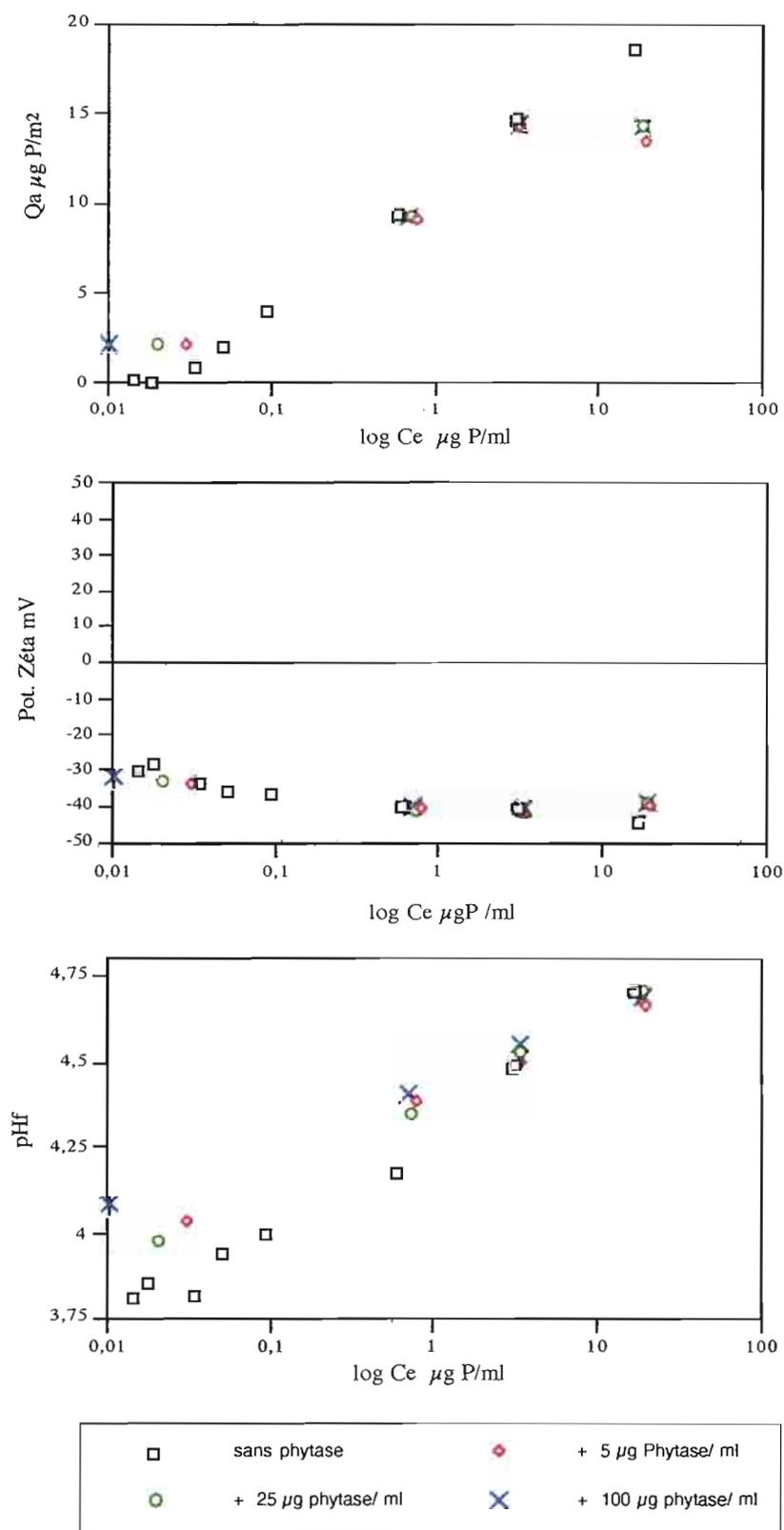


Figure 35.- Effet de l'apport de phytase sur l'adsorption des ions phosphate sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm)

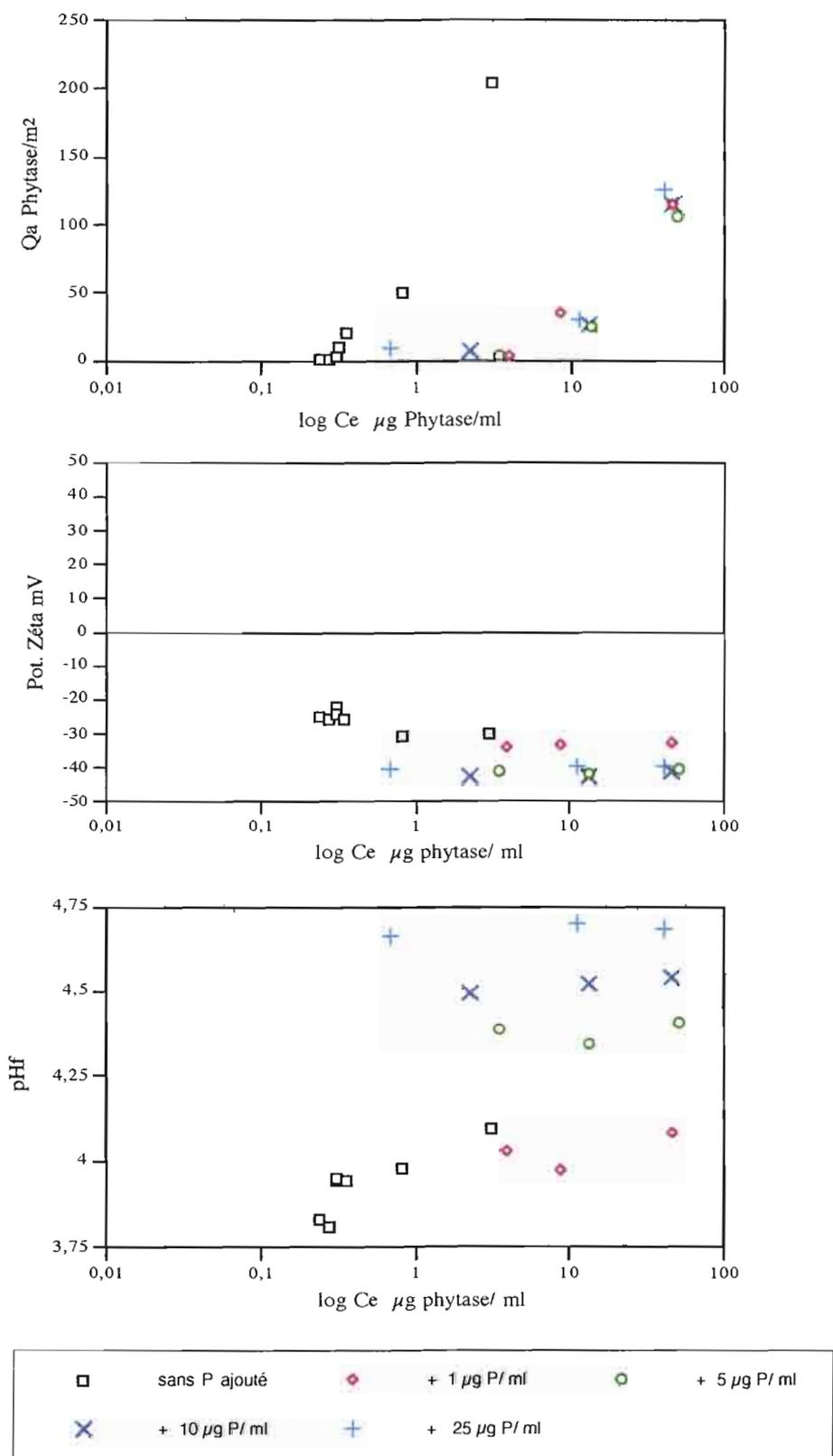


Figure 36.- Effet de l'apport de phosphate sur l'adsorption de la phytase sur la phase solide du sol (RON 1, 0-10 cm).

2.4.2.- Discussion

Les valeurs du potentiel zéta et du pH apparaissent comme étant gouvernées par l'adsorption des ions phosphates. En présence de phosphates, le potentiel zéta est négatif et présente une valeur inférieure à celle observée dans la suspension de sol sans adsorbant et ceci quelle que soit la concentration de phytase ajoutée au système. La présence de phytase modifie peu l'adsorption des ions phosphates sur les surfaces de ce sol. Toutefois, aux faibles concentrations en phytase ajoutée, l'adsorption du phosphate est augmentée, aux fortes concentrations, elle est quelque peu diminuée mais reste conséquente.

La présence de phosphates dans le système diminue nettement l'adsorption de la phytase sur la phase solide du sol. Un résultat similaire avait été constaté par Brossard *et al.* (*soumis*) pour l'adsorption de salicylate sur les surfaces d'une goethite de synthèse.

Dans un système simple sans ajout de P, la phytase introduite s'adsorbe en moyenne à plus de 80 %, dans un système où les deux adsorbats sont présents, la phytase s'adsorbe à 52 % en moyenne, avec un minimum d'adsorption lorsque les concentrations initiales en adsorbats sont faibles (22 %) et un maximum d'adsorption (86 %) pour une concentration initiale en phytase faible et une concentration initiale en phosphates élevée.

Les mécanismes qui régissent l'adsorption ne peuvent être identifiés dans un système aussi complexe mais il paraît comme évident que le **pH et les interactions électrostatiques** jouent un rôle prépondérant dans ces processus.

3.- Effet de l'apport de la phytase sur les paramètres descriptifs des phénomènes d'échange

Nous avons vu précédemment que :

- l'apport d'une solution contenant la phytase d'*Aspergillus ficuum* à la solution du sol RON 1 modifie quelque peu l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol.
- les interactions entre les surfaces du sol et la protéine sont telles que celle-ci s'adsorbe en grande quantité sur la phase solide du sol. Les molécules adsorbées perdent leur potentiel d'hydrolyse enzymatique.

Cependant la proportion d'enzymes restant actives peut conduire à un apport d'ions phosphates par hydrolyse enzymatique et donc à une modification des équilibres d'échanges sol/solution.

3.1.- Test préalable : recherche d'interactions hydrophobes en présence d'une interface Gaz/Liquide

Dans nos expériences, le sol sera en agitation dans une phase liquide (rapport sol/solution de 1/10) pendant 17 heures afin d'atteindre l'équilibre dynamique sol/solution. L'agitation augmente le contact entre les éléments présents dans le milieu réactionnel (Dick & Tabatabai, 1987). Lors de l'agitation, si l'enzyme présente un caractère hydrophobe, les interactions qu'elle développe avec la surface gazeuse au cours de l'agitation sont très fortes et peuvent entraîner un changement de conformation protéique conduisant à une réduction de son activité, voire même à une inhibition complète (Dick & Tabatabai, 1987 ; Matumoto-Pintro, 1996). L'activité phosphatase libre dans la solution a été mesurée en faisant varier l'importance de cette interface afin de tester si dans les conditions de nos expériences de tels phénomènes peuvent se produire.

La phytase est mise en solution dans un tampon citrate trisodique ($C_6H_5O_7Na_3$) à pH 4,5 ($5 \mu g.ml^{-1}$). Des prises d'essai de 2, 15, 20, et 22 ml de cette solution correspondent à une occupation du volume du flacon d'environ 10, 70, 90, et 100 %. L'agitation est maintenue pendant 17 heures à 50 rpm. Le substrat utilisé est le *para*-nitrophénylphosphate disodique (pNP, Sigma 104) en solution dans un tampon tris-maléate à une concentration de 5 mM. Il est hydrolysé en *para*-nitrophénol et en orthophosphate. La réaction enzymatique débute avec l'ajout du substrat après les 17 heures d'agitation et s'effectue à 25 °C pendant 15 minutes. Elle est stoppée par ajout de NaOH 1M. La mesure de l'activité enzymatique (pNPase ou Phosphatase) est faite par lecture colorimétrique (Spectrophotomètre UV-Visible Cary-Varian) à 410 nm. Tous les dosages d'activité phosphatase sont les résultats d'une soustraction d'un témoin. Ce témoin représente la quantité de *para*-nitrophénol au départ dans le milieu réactionnel. Pour obtenir ce témoin, le substrat est additionné après avoir stopper toute réaction avec la soude.

Pour les pots contenant 15, 20 et 22 ml de solution, le dosage donne le même résultat ; pour le pot ne contenant que 2 ml de solution soit une occupation du volume de 10 %, une inhibition de 90 % de l'activité enzymatique est observée.

Dans nos expériences, la prise d'essai est de 1,5 g de sol et le rapport sol/solution de 1/10. Aucune interaction hydrophobe due à la mise en agitation ne dénature la protéine et bloque son activité catalytique lorsque le flacon contient 15 ml de solution.

3.2.- Matériels et méthodes

Le principe de l'étude et les échantillons utilisés sont les mêmes que pour l'étude des phénomènes d'échange sans et avec entraîneur (§ I et II).

L'expérimentation est effectuée sans entraîneur, c'est-à-dire sans apport, au système, de phosphate soluble dans l'eau.

Les échantillons de 1,5 g de sol sont réhumectés avec 50 µl d'une solution aqueuse contenant les ions $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ (quantité R introduite = 185 kBq), 500 µl d'une solution de phytase d'une concentration de 30 mg/ml (soit 10 mg/g sol) et 50 µl d'eau. Le pH de la solution de phytase est de 3,86. Deux lots (triplicatats) sont préparés et mis en incubation pendant 24 h à 20°C. Après incubation, les lots reçoivent 15 ml d'eau et sont mis en agitation 17 heures ; une bande de résine (AEM) de 2x5 cm est ajoutée, avant agitation, dans les flacons de l'un des deux lots. Les concentrations de phosphate dans les extraits eau et résine et la R.A.S., radioactivité spécifique des solutions, sont mesurées.

Remarque : le calcul de la concentration de la solution de phytase est basé sur le pouvoir d'hydrolyse de l'enzyme et sur le postulat que tout le phosphore organique présent dans les sols étudiés est sous la forme de phytate. Ainsi une telle quantité d'enzyme apportée à la solution du sol permettrait mathématiquement d'hydrolyser tout le phosphore organique.

Pour les sites sous Cerradão (RON 1) et pâturage de 12 ans (BAR 2), une seconde série de deux lots d'échantillons a été préparée afin de tester l'effet du pH. Avant l'addition au sol, le pH de la solution de phytase est ramené de 3,86 au pH du sol par ajout NaOH 1M.

3.3.- Résultats

3.3.1.-Effet de l'apport de la phytase sur les paramètres descriptifs des phénomènes d'échange

Les concentrations de phosphore dans la solution du sol (C_p) sont comprises entre 0,008 et 0,04 $\mu\text{g P/ml}$ soit des teneurs en phosphore extractible par l'eau s'échelonnant entre 0,08 et 0,40 $\mu\text{g P/g sol}$ (tableau 21). La radioactivité spécifique de la solution du sol présente des valeurs comprises entre 0,19 et 2,08.

Tableau 21.- Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, après addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système.

	PO_4^{3-} ($\mu\text{g P/g sol}$)				R.A.S.			
	Eau		Résine		Eau		Résine	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.	e.t.
RON 1	0,40	0,02	2,51	0,21	0,19	0,03	0,71	0,02
RON 4	0,08	0,2	0,39	0,05	1,02	0,08	0,52	0,12
BAR 1 m	0,14	0,03	1,46	0,08	0,52	0,02	0,69	0,03
BAR 2 m	0,08	0,02	0,13	0,02	2,08	0,11	0,62	0,12
BAR 3 m	0,10	0,04	0,13	0,06	1,12	0,17	0,70	0,07
BAR 4 m	0,11	0,03	0,64	0,11	1,21	0,03	0,34	0,04
BAR 5 m	0,11	0,02	0,16	0,00	1,26	0,19	0,77	0,10
Au pH du sol								
RON 1	0,09	0,01	3,26	0,30	0,25	0,08	0,65	0,02
BAR 2 m	0,09	0,01	0,15	0,04	3,30	0,05	0,53	0,05

3.3.2.-Effet du pH de la solution du sol

Le pH des solutions ayant servi à réhumecter le sol a été ajusté au pH du sol étudié. Pour les sites RON 1 et BAR 2, les concentrations de phosphates sont de 0,009 $\mu\text{g P/ml}$ soit 0,09 $\mu\text{g P/g sol}$ dans la solution du sol et, respectivement, de 3,26 et 0,15 $\mu\text{g P/g sol}$ dans les extraits résines (tableau 21).

La R.A.S. des solutions est, pour le sol sous Cerradão (RON 1), de 0,25 dans l'extrait eau et de 3,30 dans l'extrait résine. Pour le pâturage de 12 ans (BAR 2), elle est de 0,65 dans l'extrait eau et de 0,53 dans l'extrait résine.

3.4.- Discussion

❖ L'ensemble des résultats est comparé à ceux obtenus pour les sols non perturbés (sans apport de phytase, §I). Rappelons que ces sols présentent tous un fort pouvoir d'adsorption vis à vis des ions phosphate (§II et III.2.).

Remarque : la présence de phytase ne perturbe pas le dosage colorimétrique de la concentration en PO_4^{3-} .

Dans les expériences précédentes, nous avons pu constater que l'introduction simultanée d'ions phosphates et de phytase dans le système gêne l'adsorption des ions PO_4^{3-} uniquement pour les concentrations en P élevées ($Co > 10 \mu\text{g P/ml}$), et ceci quelle que soit la quantité de phytase introduite (figure 35). L'adsorption des phosphates est favorisée par la présence de phytase lorsque les concentrations en P sont faibles. Par ailleurs, le phosphate se révèle être un excellent compétiteur de la phytase puisque l'addition de phosphate dans le système limite l'adsorption de la macromolécule sur les surfaces du sol (figure 36).

❖ Le pH n'a pas été mesuré à la fin des expériences. Mais un réajustement du pH de la solution de phytase avant de l'ajouter au sol permet de comparer véritablement les traitements avec et sans phytase pour les sites RON 1 (Cerradão) et BAR 2 (Pâturage de 12 ans) (figure 37). Hormis pour le paramètre C_p , concentration en PO_4^{3-} dans la solution du sol, en RON 1, l'évolution des paramètres en présence de phytase est la même que le pH soit contrôlé ou non.

Au pH du sol, pour le sol sous Cerradão (RON 1), la radioactivité spécifique de la solution du sol est peu modifiée, les échanges d'ions PO_4^{3-} entre les surfaces et la solution sont donc maintenus. Mais la concentration d'ions phosphates en solution (C_p) diminue, l'adsorption des ions PO_4^{3-} est donc accrue par la présence de phytase dans le système. Ces résultats confirment ceux des isothermes d'adsorption compétitive. Les résines permettent d'extraire d'autres compartiments d'ions PO_4^{3-} moins mobiles. En présence de phytase dans le système, la concentration d'ions PO_4^{3-} de l'extrait résine augmente et la R.A.S. diminue. Ces tendances peuvent être expliquées par l'apparition dans le système d'ions non marqués ^{31}P , ce qui suppose une hydrolyse de phosphore organique.

Sans réajustement du pH de la solution de phytase avant son addition au système, la solution du sol présente la même concentration d'ions phosphates et la RAS diminue : en d'autres termes, les échanges sont ralentis par la présence de phytase mais la concentration en phosphates C_p n'est pas affectée. Dans les extraits résines, la concentration en PO_4^{3-} augmente en présence de phytase et la radioactivité spécifique de l'extrait diminue. Dans l'hypothèse d'une distribution homogène du ^{32}P dans le système, l'apport d'ions non marqués provoque un rééquilibrage et une baisse de la R.A.S.

Deux effets de l'apport de l'enzyme sur ce sol (RON 1) sont ici mis en valeur :

1) un ralentissement des échanges des ions phosphates entre les surfaces et la solution du sol ; nous avons vu précédemment que la phytase favorise l'adsorption des ions phosphates lorsque les concentrations en P dans le milieu sont faibles.

2) un apport de ^{31}P par hydrolyse de phosphore organique, cet effet étant sensible surtout dans les extraits résines. Les ions phosphates apportés par l'hydrolyse de Po se trouvent dans des compartiments de P dosables par les résines et non dans la solution du sol.

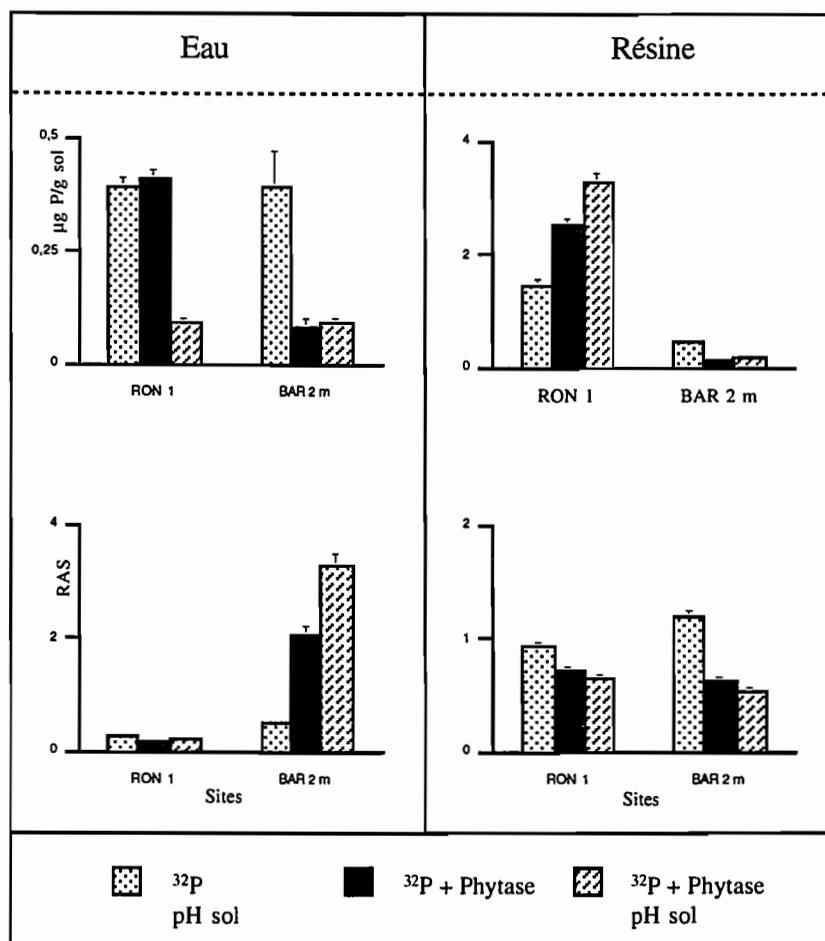


Figure 37.- Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines ($\mu\text{g P/g sol}$) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions à l'équilibre, avec et sans contrôle du pH et, sans et avec addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système.

❖ Pour le pâturage de 12 ans (BAR 2), après réajustement du pH de la solution de phytase, la concentration d'ions phosphates de la solution du sol (C_p) diminue et la radioactivité spécifique augmente. Dans les extraits résines, la concentration en ions phosphates est moins élevée en présence de phytase. La phytase favorise l'adsorption d'ions PO_4^{3-} et gêne l'échange des ions marqués. L'expérience réalisée sans réajustement du pH procure les mêmes résultats.

❖ Pour les autres sites, l'expérience avec ajustement du pH de la solution de phytase n'a pas été effectuée. La solution de phytase ajoutée présente un pH de 3,86 ; le système avec phytase présente donc un pH en solution plus acide (figure 38) que le pH_{eau} du sol.

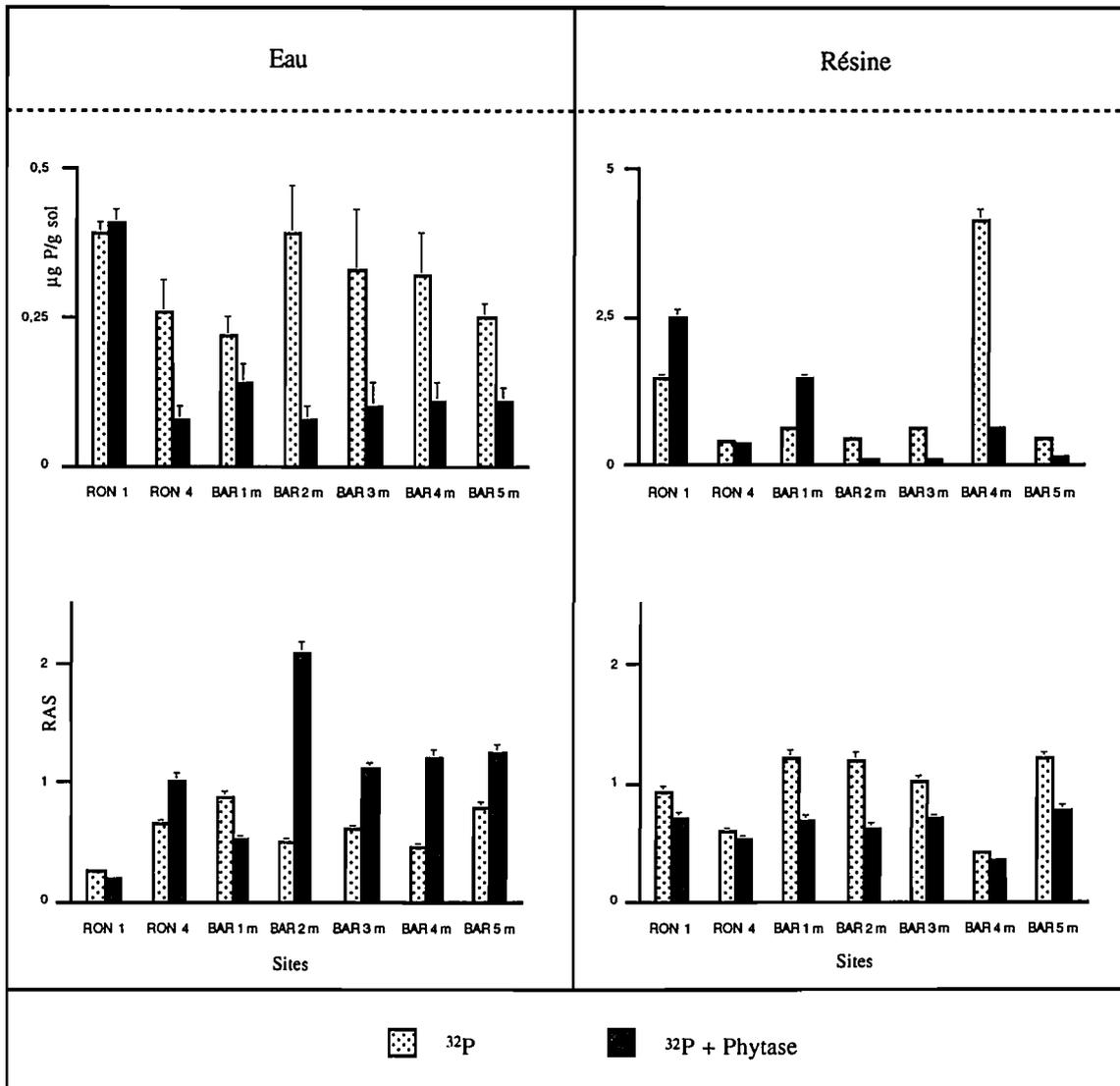


Figure 38.- Teneurs en phosphore extractible par l'eau ou les résines (µg P/g sol) et valeurs de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des solutions, à l'équilibre, sans et avec addition de phytase (10 mg/g sol) dans le système.

Les pâturages de 3 à 5 ans (BAR 3 à 5) ont un comportement analogue à celui du pâturage de 12 ans (BAR 2). On constate une diminution des concentrations en phosphates, une augmentation de la RAS dans le cas d'un extrait eau et une diminution dans l'extrait résine (figure 38). Pour la savane herbacée (RON 4), on note le même comportement des paramètres pour l'extrait eau. Dans l'extrait résine, la concentration en ions PO_4^{3-} et la radioactivité spécifique restent constantes. Pour ces sols, la présence de la phytase favorise l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide et gêne la redistribution des ions marqués.

Pour le sol sous Cerrado pâturé (BAR 1), l'évolution des paramètres est analogue à celle observée sous Cerradão (RON 1). La phytase favorise l'adsorption des ions phosphates et un apport de PO_4^{3-} est constaté dans l'extrait résine. Cet apport peut provenir d'une hydrolyse de phosphore organique ou d'une dissociation de complexes fer-phosphates, le pH de la solution en présence de phytase étant plus acide. La concentration en fer soluble n'a pas été mesurée lors de l'expérimentation.

IV.- CONCLUSIONS

Les faibles concentrations en phosphore (Cp) dans la solution du sol et les valeurs de radioactivité spécifique témoignent, dans ces sols (strates 0-10 cm), d'un pouvoir d'adsorption vis à vis des ions phosphates élevé. Ces résultats sont confirmés par l'expérience avec entraîneur (addition d'ions phosphates dans la solution du sol) et par les isothermes d'adsorption.

Quel que soit le sol étudié, nous avons pu remarquer que :

- lorsque la concentration en ions phosphates dans la solution du sol est faible, la présence de phytase favorise l'adsorption des ions PO_4^{3-} sur les surfaces du sol.
- cette macromolécule modifie la redistribution du phosphore marqué et ralentit les phénomènes d'échange.

Dans le cas des sites RON 1 (Cerradão) et BAR 1 (Cerrado pâturé), en présence de phytase, un apport de phosphore non marqué est dosable dans les extraits résines. Cet apport de phosphate peut être obtenu par dissolution de complexes fer/ PO_4 ou par hydrolyse de phosphore organique. Dans le cas de RON 1, l'addition de phytase au système est réalisée au pH du sol, donc sans acidification du milieu qui pourrait provoquer une dissolution de

complexes fer/ PO_4 , la première hypothèse se trouve donc infirmée. L'apport d'ions phosphate trouve bien sa cause dans une hydrolyse de phosphore organique par l'enzyme.

Même si ce sol présente un pouvoir d'adsorption élevé vis à vis de l'enzyme, l'adsorption est insuffisamment dénaturante ou les quantités restant en solution sont suffisamment élevées pour permettre une hydrolyse enzymatique.

Il est important de noter que cet apport de phosphates n'est décelable qu'au moyen de résine anionique. Le phosphore apporté par hydrolyse enzymatique se trouve donc dans des compartiments peu mobiles, mais il reste potentiellement assimilable par les plantes puisque les résines anioniques sont censées simuler l'extraction active des racines.

Le choix de l'enzyme à introduire dans la solution du sol s'avère difficile du fait du pH très acide de ces sols et des valeurs de point isoélectrique des enzymes. L'adsorption de l'enzyme peut provoquer une perte totale ou partielle de son potentiel hydrolytique.

De plus, il faudrait compléter cette étude par la quantification de l'adsorption d'ions phosphates sur la macromolécule soit directement lorsqu'elle est chargée positivement soit indirectement lorsqu'elle est chargée négativement. Dans ce dernier cas, elle peut entraîner en solution des ions chargés positivement (notamment Fe et Al dans ces sols) et ainsi créer de potentiels sites d'adsorption pour les ions phosphates.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette étude, en explorant l'état des réserves et formes du phosphore de sols ferrallitiques des Cerrados, permet d'apprécier la stabilité du phosphore organique. Certaines méthodes de mesures doivent être revues.

LES RÉSULTATS

L'examen détaillé des sites par la mise en place de fosses pédologiques d'une profondeur de deux mètres contribue à une meilleure connaissance des caractéristiques pédologiques des sols ferrallitiques sous végétation de Cerrados. Les sols étudiés présentent une certaine unité de texture et de structure. Ils sont argileux sur l'ensemble du profil, leur structure est de type polyédrique fine. L'apparition dans les horizons profonds d'une seconde phase structurale de type microagrégée témoigne d'un renforcement des liaisons entre les argiles et les oxydes de fer et d'aluminium. La fraction fine (< 200 μm) se compose essentiellement de gibbsite, de kaolinite et de goethite, occasionnellement d'hématite. Le pH est acide ; le complexe d'échange fortement désaturé est largement occupé par l'aluminium échangeable, notamment dans les cinquante premiers centimètres de sol.

Les prélèvements et analyses effectués ont permis de quantifier les réserves en phosphore, non pas seulement pour les vingt premiers centimètres de sol, comme c'est le cas dans la plupart des études réalisées sur le thème, mais à des profondeurs supérieures à un mètre, là où poussent encore les racines. Le premier mètre de sol contient plus de la moitié du phosphore total et du phosphore organique de la couche de sol 0-210 cm. Dans l'horizon superficiel, les teneurs en phosphore total sont proches de celles observées dans des sols de même type. Les sites naturels ou peu perturbés, et notamment le site sous savane herbacée (Campo limpo) présentent les teneurs en phosphore les plus élevées.

Le rôle du stockage du phosphore par la matière organique du sol est illustré, dans les cinquante premiers centimètres de sol, par la relation existant entre les teneurs en phosphore total et en carbone.

Du fait de l'abondance relative du phosphore organique, qui représente plus de 25 % du phosphore total dans le premier mètre de sol, il paraît intéressant d'étudier le degré d'extractibilité, les formes, ainsi que le potentiel hydrolytique dans les couches superficielles des sols.

L'extraction du phosphore des horizons superficiels a été conduite par fractionnement chimique. Les extractions séquentielles, pratiquées avec NaHCO_3 0,5 M puis NaOH 0,1 M, permettent d'extraire le phosphore organique et inorganique, adsorbé sur les surfaces du sol ainsi qu'une faible proportion du phosphore microbien. La quantification de ces deux fractions est intéressante car elle permet d'approcher des compartiments chimiques du phosphore potentiellement échangeable et assimilable à court terme. Cette méthode permet d'extraire de 50 à 72 % du phosphore organique des échantillons. La fraction extraite se compose essentiellement de phosphore organique. Des corrélations positives et significatives ont été mise en évidence entre les teneurs en phosphore organique et en fer des extraits soude et les teneurs en carbone des échantillons. Ces corrélations confirment la liaison entre le phosphore organique, le fer présent dans le sol (ions Fe^{3+} , oxydes ou produits amorphes) et la matière organique.

Le phosphore extractible par la soude a été caractérisé par ^{31}P -RMN. Il se compose d'esters de phosphates (phosphore organique), d'orthophosphates, de pyrophosphates. Les extraits ne présentent aucune trace de phosphonates ou polyphosphates, ce qui témoigne d'une activité microbiologique intense.

Le rapport monoesters/diesters apprécie le degré de labilité du phosphore organique extrait ; les diesters étant plus facilement minéralisables, ils procurent plus rapidement des ions phosphates. La composition des extraits est similaire dans les sols sous savanes et dans les pâturages ; le phosphore organique est essentiellement composé de phosphomonoesters (de 73 à 85 % du Po dosé en RMN). L'introduction du *Brachiaria brizantha* ne modifie donc pas la composition du P extractible par NaOH 0,5 M.

La mesure de l'activité monophosphoestérase (phosphatase, Pase) (mesurée à travers la production de *para*-nitrophénol par gramme de sol et par heure) permet de quantifier le potentiel hydrolytique des phosphomonoesters des sols. Mesurée à un pH de 11, dans les horizons de surface, l'activité phosphatase est faible. L'activité phosphatase acide, mesurée de façon conventionnelle à un pH de 6,5, est plus élevée. A 50 cm de profondeur, l'activité phosphatase acide est encore conséquente. Étudiée sur une gamme de pH plus large (de 4 à 6,5), cette activité présente un maximum pour un pH différent de 6,5, ce pH peut correspondre à celui du sol. Mais quel que soit le pH d'étude, les horizons superficiels des sols sous pâturages présentent des activités phosphatase acides plus faibles que pour les sols sous végétation naturelle. Dans tous les cas, l'activité phosphatase acide de ces sols est supérieure à celle habituellement observée dans les sols tropicaux.

Les résultats obtenus permettent de confirmer la relation activité phosphatase acide/matière organique déjà observée par de nombreux auteurs. Ainsi, tout facteur susceptible de modifier la teneur en matière organique du sol modifiera l'activité phosphatase. Un nouveau coefficient d'activité Pase est proposé. En effet, le calcul du

rapport de l'activité phosphatase, mesurée au pH du sol, à la teneur en phosphore organique de l'extrait NaHCO_3 ($[\text{Pase}_{\text{pH sol}} / \text{Po}_{\text{NaHCO}_3}]$) permettrait d'apprécier le potentiel d'activité hydrolytique du phosphore organique facilement extractible ($\text{Po}_{\text{NaHCO}_3}$) de ces sols. Dans le cadre de notre étude, ce rapport paraît plus approprié que celui utilisé par Feller *et al.* (1994) ($[\text{Pase}/\text{C}]$). Ainsi, le pâturage le plus ancien présente le potentiel hydrolytique le plus élevé, les pâturages récents les plus faibles ; les potentiels hydrolytiques du Po facilement extractible des sites naturels sont intermédiaires.

Le phosphore organique des sols peut participer par son hydrolyse à un apport de phosphates à la solution du sol. Nous avons pu le montrer par introduction d'une enzyme exogène dans la solution du sol. Ces expériences ont également permis de souligner le pouvoir d'adsorption élevé de ces sols vis à vis des ions phosphates. L'introduction de l'enzyme provoque une baisse de la radioactivité spécifique (R.A.S.) des extraits. Cette diminution témoigne d'une gêne de la distribution du ^{32}P dans le système et d'une limitation des phénomènes d'échanges entre les surfaces et la solution du sol. De plus, dans ces sols où les teneurs en P dans la solution du sol sont faibles, la phytase favorise l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol.

Deux hypothèses permettent d'expliquer l'hydrolyse de phosphore organique, soit les quantités importantes de phytase introduite ont permis de conserver en solution une quantité d'enzyme suffisante pour participer à une hydrolyse, soit les molécules adsorbées n'ont perdu qu'une partie de leur potentiel hydrolytique. En effet, la phytase d'*Aspergillus ficuum* a un point isoélectrique (pI) situé entre 5,0 et 5,4. Pour des pH en solution inférieurs au point isoélectrique de la protéine, les interactions électrostatiques entre les surfaces et la charge positive de la molécule conduisent à une adsorption de cette dernière avec changement de sa conformation et perte totale de son activité enzymatique. Aux pH proches du pI, l'enzyme s'adsorbe également mais les interactions sont moins fortes et la perte d'activité hydrolytique n'est que partielle. Aux pH de notre étude, il nous est impossible de trancher entre perte totale ou partielle de l'activité enzymatique de la molécule. Cependant, les isothermes d'adsorption de l'enzyme permettent d'affirmer que la formation de multicouches sur les surfaces du sol est possible.

L'apport d'ions phosphates par hydrolyse de phosphore organique n'a été observé que pour les sites sous végétation de Cerradão et de Cerrado pâturé, sites pour lesquels le potentiel hydrolytique du Po facilement extractible est relativement élevé. Cependant, le caractère préliminaire de notre étude ne permet pas de tirer une conclusion de cette analogie. Il est toutefois important de noter que les apports d'ions phosphates après hydrolyse de Po s'effectuent au profit de compartiments du phosphore accessibles par les résines anioniques donc potentiellement assimilables par les plantes.

Enfin, la caractérisation des formes du P et les approches expérimentales permettent de tirer quelques conclusions plus générales. Dans les sols de Cerrados argileux à gibbsite, la capacité d'échange des ions phosphates entre les phases solide et liquide du sol est élevée et les transformations du phosphore organique sont intenses. L'introduction de pâturages modifie la stabilité du phosphore organique dans la mesure où l'on constate un potentiel hydrolytique du sol plus faible. Les chaulages répétés et la fertilisation peuvent considérablement modifier les conditions de minéralisation du phosphore organique. Toutefois, l'analyse des stocks de phosphore des sols ne permet pas d'observer une mise en réserve particulière du phosphore organique sous pâturages. Au niveau de l'écosystème, nous constatons que la présence croissante de graminées, matérialisée dans la séquence Cerradão-Cerrado-Campo sujo-Campo limpo, s'accompagne dans l'horizon superficiel d'une augmentation sensible du stock de phosphore total. Cette augmentation est due à une proportion plus élevée de phosphore organique. Dans l'écosystème Cerrado, la nature de la matière organique et les processus biologiques interviennent, de façon non négligeable, dans la régulation des stocks de phosphore des sols. Les résultats des analyses témoignent également d'une bonne adaptation du pâturage *Brachiaria brizantha* aux conditions environnementales de ce milieu.

CRITIQUES ET PERSPECTIVES

Nous avons réalisé une étude préliminaire des formes du phosphore des Cerrados. Cette étude doit être élargie aux autres types physiologiques du Cerrado. Elle devra prendre en compte la variabilité spatiale des espèces végétales et s'appuyer sur un échantillonnage intraparcellaire plus complet.

Les analyses ^{31}P -RMN telles que nous les avons pratiquées (extrait soude) ne permettent pas d'observer la totalité des formes du phosphore de ces sols mais elles présentent l'avantage d'une observation des formes extractibles par NaOH. Ces formes sont contenues dans les compartiments du phosphore les plus accessibles aux phénomènes d'échange et d'hydrolyse. Pour une étude poussée des formes du P, la technique d'extraction devra être revue. Condrón *et al.* (1990) proposent une extraction plus poussée par combinaison d'extractions alcalines et acides et d'ultrafiltrations, permettant d'obtenir un rendement plus élevé de l'extraction du P. Cette méthode reste à

tester sur des sols tropicaux à teneur élevée en oxydes de fer, il n'est pas sûr qu'une telle extraction ne mette pas en solution des ions Fe^{3+} qui perturberaient le signal RMN. L'ultrafiltration pratiquée par ces auteurs permet d'augmenter la précision des mesures.

Concernant les mesures d'activité phosphatase acide, ni le pH du sol ni une valeur fixe (6,5) ne correspondent systématiquement au maximum d'activité phosphatase acide. Toutefois, les maxima d'activités phosphatase acide étant le plus souvent obtenus pour un pH proche de celui du sol, le classement inter-sites que nous avons retenu est celui obtenu à partir d'une mesure à un pH voisin du pH_{eau} des sols. Cette mesure est de surcroît plus proche de la réalité. A l'avenir, afin de ne pas préjuger de l'activité phosphatase du sol, et notamment dans le cas des sols tropicaux, il paraît judicieux de mesurer l'activité sur une gamme de pH relativement étendue ou pour une étude plus restreinte au pH_{eau} du sol. Par ailleurs, la détermination de l'activité P_{ase} au pH du sol associée à la mesure d'un compartiment facilement extractible de phosphore organique permet une meilleure approche du potentiel d'hydrolyse du sol (calcul du coefficient $[P_{ase} \text{ pH sol} / P_{O} \text{ NaHCO}_3]$). Etendre la détermination de ce coefficient à d'autres sites est nécessaire.

L'analyse par RMN a permis de révéler, pour l'ensemble des sols, la présence de pyrophosphates et de diesters phosphatés dans la fraction extractible par NaOH. Afin de compléter les mesures du potentiel hydrolytique de ces sols et de juger un apport potentiel de phosphates par hydrolyse de ces formes, il paraît intéressant de mesurer les activités pyrophosphatase et diestérase.

Sur la base des rapports C/Po, tels qu'il sont définis par Dalal (1977), le phosphore organique apparaît peu minéralisable. Mais aucune corrélation ne s'établit entre les mesures d'activité phosphatase acide et les rapports C/Po. Ce résultat confirme les réserves émises par Oberson *et al.* (1995) concernant l'utilisation des valeurs seuils (Dalal, 1977) des rapports C/Po comme délimitation entre les processus de minéralisation et d'immobilisation du phosphore organique des sols tropicaux. Guggenberger *et al.* (1996) montrent qu'en liaison avec une labilité du phosphore organique accrue, les extraits résines présentent des rapports C/Po plus faibles que ceux calculés à partir d'extraits alcalins ou du sol. Ces auteurs montrent également que la concentration en phosphore organique dans les extraits résines est liée à la quantité de diesters de phosphore dans le sol. L'analyse par ^{31}P -RMN et l'extraction du phosphore organique par les résines (Rubaek & Sibbesen, 1993) sont des pistes à exploiter pour une meilleure connaissance de la composition des formes du phosphore organique pouvant participer à un apport de P assimilable par les plantes.

Les isothermes d'adsorption et l'introduction de phosphore marqué au ^{32}P dans la solution du sol nous ont montré le pouvoir d'adsorption de ces sols vis à vis des ions phosphates et d'une macromolécule. Le contrôle du pH s'avère indispensable à la discussion des résultats. Le choix de la macromolécule est à effectuer en fonction du pH du sol et du point isoélectrique de l'enzyme ; le rapport entre ces paramètres dirige les phénomènes d'adsorption de la macromolécule sur les surfaces du sol.

Il serait intéressant de quantifier l'activité enzymatique due aux molécules adsorbées et l'activité résiduelle en solution, afin de déterminer si les molécules adsorbées ont perdu totalement ou partiellement leur potentiel hydrolytique. De plus, l'enzyme vendue par la firme Sigma peut contenir des phosphomonoestérases et des glucosidases, la quantification de l'activité phosphomonoestérase (Pase) de cette enzyme serait utile.

BIBLIOGRAPHIE

- Adámoli J., Macedo J., Azevedo L.G. de & Madeira Netto J., 1986.** Caracterização da região dos Cerrados. In Goedert W.J. (Ed), Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. EMBRAPA-CPAC, Nobel, São Paulo, p.33-74.
- Adams M.A. & Byrnes L.T., 1989.** ³¹P NMR analysis of phosphorus compounds in extracts of surface soils from selected Karri (*Eucalyptus diversicolor* F.Muell) forests. Soil Biol. Biochem. 21, p.523-528.
- Adams M.A. & Pate J.S., 1992.** Availability of organic and inorganic forms of phosphorus to lupins (*Lupinus* spp.). Plant Soil 145, p.107-113.
- Ainsworth C.C., Sumner M.E. & Hurt V.J., 1985.** Effect of aluminium substitution in goethite on phosphorus adsorption. I. Adsorption and isotopic exchange. Soil Sci. Soc. Am. J. 49, p.1142-1149.
- Alho C.J.R. & de Souza Martins E. (Eds), 1995.** De grão em grão, o Cerrado perde espaço. Cerrado-Impactos do proceso de ocupação. WWF, Fundo Mundial para a Natureza, Brasília-DF, 67 p.
- Almeida F.F.M. & Hasui Y. (Coordinateurs), 1984.** O pré-Cambriano do Brasil. Blücher E.E., São Paulo, 378 p.
- Alvim P. de T., 1996.** Repesando a teoria da formação dos campos Cerrados. In Anais Simposio sobre o Cerrado, 8. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, p. 56-58.
- Amer F., Bouldin D.R., Black C.A. & Duke F.R., 1955.** Characterization of soil phosphorus by an ion exchange resin adsorption and ³²P equilibration. Plant Soil 6, p.391-408.
- Anderson G. & Malcolm R.E., 1974.** The nature of alkali-soluble soil organic phosphates. J. Soil Sci. 25, n°3, p.282-297.
- Anderson G. & Russell J.D., 1969.** Identification of inorganic polyphosphates in alkaline extracts of soil. J. Sci. Food Agric. 20, p.78-81.
- Anderson G., 1960.** Factors affecting the estimation of phosphate-esters in soils. J. Sci. Food Agric. 11, p.497-503.
- Anderson G., 1970.** The isolation of nucleoside diphosphates from alkaline extracts of soil. J. Soil Sci. 21, p.96-104.
- Anderson G., 1980.** Assessing organic phosphorus in soils. In Khasaweh F.E., Sample E.C. & Kamprath E.J. (Eds), The role of phosphorus in Agriculture. ASA, Madison, Wisconsin, p.411-431.
- Anderson G., Williams E.G. & Moir J.O., 1974.** A comparison of sorption of inorganic phosphate and inositol-hexaphosphate by six acid soils. J. Soil Sci. 25, p.51-62.
- Anne P., 1945.** Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. Ann. Agron. 15, p.161-172.
- Araújo A.G. de, Ayarza M.A., Friesen D.K. & Vilela L., 1995.** Sequential organic and inorganic phosphorus fractions in a "Cerrado" soil under different management systems. ? p.319-322.
- Barrón V., Herruzo M. & Torrent J., 1988.** Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. Soil Sci. Am. J. 52, p.647-651.
- Bedrock C.N., Chesshire M.V., Chudek J.A., Fraser A.R., Goodman B.A. & Shand C.A., 1995.** Effect of pH on precipitation of humic acid from peat and mineral soils on the distribution of phosphorus forms in humic and fulvic fractions. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 26, p.1411-1425.
- Bigham J.M., Golden D.C., Buol S.W., Weed S.B. & Bowen L.H., 1978.** Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols. II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. Soil Sci. Soc. Amer. J. 42, p.825-830.
- Bloom P.R., 1981.** Phosphorus adsorption by an aluminium-peat complex. Soil Sci. Am. J. 45, p.267-272.
- Bonmati M., Ceccanti B. & Nannipieri P., 1991.** Spatial variability of phosphatase, urease, protease, organic carbon and total nitrogen in soil. Soil Biol. Biochem. 23, p.391-396.

- Boulet R., Pessenda L.C.R., Telles E.C.C. & Melfi A.J., 1995.** Evaluation of the rate of surface biological accumulation of soil matter using radiocarbon dating on charcoal and soil humin fraction. A case study of oxisols from the basin of the "Lagoa campestre", central Brazil. C.R.A.S. Paris t. 320, ser.IIa, p.287-294.
- Bowman R.A. & Cole C.V., 1978.** Transformations of organic phosphorus substrates in soils evaluated by NaHCO₃ extraction. *Soil Sci.* 125, p.45-54.
- Boyd S.A. & Mortland M.M., 1990.** Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes. *In* Bollag J.M. & Stotzky G. (Eds), *Soil Biochemistry* vol. 6, Marcel Dekker, NY, p.1-28.
- Bramley R.V.G., Barrow N.J. & Shaw T.C., 1992.** The reaction between phosphate and dry soil. I. Effect of lime, temperature and dryness. *J. Soil Sci.* 43, p.749-758.
- Brannon C.A. & Sommers L.E., 1985.** Stability and mineralization of organic phosphorus incorporated into model humic polymers. *Soil Biol. Biochem.* 17, p.221-227.
- Bray R.H. & Kurtz L.T., 1945.** Determination of total, organic and available phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59, p.39-45.
- Brossard M. & Frossard E., 1992.** Bioavailability of phosphorus in low activity clay soils. *In* Proceedings of the Symposium on Soil Resilience and Sustainable Land Use, Budapest, 28 septembre-2 octobre 1992.
- Brossard M., Lopes Assad M.L., Chapuis L. & Barcellos A.O., 1997.** Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de cerrados. *In* Leite L.L. & Saito C.H. (org.), *Contribuição ao conhecimento ecológico do cerrado*, UnB, Brasília, p.272-275.
- Brossard M., Thomas F., Kouakoua E. & Schouller E.** Salicylate and polyacrylate competition with phosphate on goethite surfaces. *in press*.
- Burns R.G., 1980.** Microbial adhesion to soil surfaces: Consequences for growth and enzyme activities. *In* Berkeley R.C.W. (Ed), *Microbial adhesion to surfaces*. Ellis Horwood, Chichester, UK, p.249-262.
- Burns R.G., 1982.** Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biol. Biochem.* 14, p.423-427.
- C.P.C.S., 1967.** Classification des sols. Grignon, 96 p.
- Cade-Menun B.J., 1995.** Phosphorus forms of podzolic soils of northern Vancouver Island and their use by western red cedar. Ph. D. diss. Univ. of British Columbia, Vancouver.
- Camargo M.N., Klant E. & Kauffman J.H., 1987.** Sistema brasileiro de classificação de solos. *B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo* 12, p.11-33.
- Castro E.A. de, 1995.** Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian Cerrado. Thesis of Oregon State Univ., USA, 118 p.
- Cegarra J., Metche M. & Jacquin F., 1978.** Contribution à l'étude des complexes organo-cationiques phosphorés présents dans les sols. C.R.A.S. Paris t. 287, Sér. D, p.451-454.
- Chang S.C. & Jackson M.L., 1957.** Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84, p.133-144.
- Chhonkar P.K. & Tarafdar J.C., 1984.** Accumulation of phosphatases in soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 32, p.266-272.
- Condon L.M., Frossard E., Tiesen H., Newman R.H. & Stewart J.W.B., 1990.** Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under different environmental conditions. *J. Soil Sci.* 41, p.41-50.
- Condon L.M., Goth K.M. & Newman R.H., 1985.** Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. *J. Soil Sci.* 36, p.199-207.

- Condrón L.M., Tiessen, H., Trasar-Cepeda C., Moir J. & Stewart J.W.B.**, 1993. Effects of liming on organic matter decomposition and phosphorus extractibility in an humic ranker soil from northwest Spain. *Biol. Fertil. Soils* 15, p.279-284.
- Cosgrove D.J.**, 1980. Inositol hexakisphosphates. *In* Cosgrove D.J. (Ed), Inositol phosphates. Their chemistry, biochemistry and physiology. Elsevier, Amsterdam, p.26-43.
- Cross A.F. & Schlesinger W.H.**, 1995. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma* 64, p.197-214.
- Curi N. & Carmago O.A. de**, 1988. Phosphorus adsorption characteristics of Brazilian oxisols. *In* Camargo M.N., Kimble J.M. & Beinroth (Eds.), Proceedings of the VIII International soil classification workshop: Classification, characterization and utilization of oxisols. EMBRAPA-SMSS-AID-UPR, Rio de Janeiro, p.56-63.
- Curi N., Camargo O.A. de, Guedes G.A.A. & Silveira J.V.**, 1986. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul. *In* Anais da III Reunião de Classificação, Correlação de Solos e Interpretação da Aptidão Agrícola. EMBRAPA / SNLCS, Rio de Janeiro.
- Dabin B.**, 1974. Évolution des phosphates en sols acides des régions tropicales. *Bull. AFES* 2, p.87-104.
- Dabin B.**, 1980. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.* 18, n°3-4, p.197-215.
- Dai K.H., David M.B., Vance G.F. & Krzyszowska A.J.**, 1996. Characterization of phosphorus in a spruce-fir spodosol by Phosphorus-31 Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, n°6, p.1943-1950.
- Dalal R.C.**, 1977. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy* 29, p.83-117.
- Davet P.**, 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. INRA, Paris, 383 p.
- Dean L.A.**, 1938. An attempted fractionation of soil phosphorus. *J. Agri. Sci.* 28, p.234-246.
- Derjaguin B.V. & Laudau L.D.**, 1949. *Acta Physicochim.* 14, p.633.
- Desjardin T.**, 1991. Variations de la distribution de la matière organique (carbone total et ¹³C) dans les sols ferrallitiques du Brésil. Modifications consécutives à la déforestation et à la mise en culture en Amazonie orientale. Thèse de Doctorat, Nancy, 144 p.
- Dick R.P. & Tabatabai M.A.**, 1984. Kinetic parameters of phosphatases in soils and organic waste materials. *Soil Sci.* 137, p.7-15.
- Dick R.P. & Tabatabai M.A.**, 1986. Hydrolysis of polyphosphates by corn roots. *Plant Soil* 94, p.247-256.
- Dick R.P.**, 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. *In* Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F. & Stewart B.A. (Eds.), Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication n°35, Madison, Wisconsin, p.107-124.
- Dick W. A., Juma N.G. & Tabatabai M.A.**, 1983. Effects of soils on acid phosphatase and inorganic pyrophosphatase of corn roots. *Soil Sci.* 136, p.19-25.
- Dick W.A. & Tabatabai M.A.**, 1987. Kinetics and activities of phosphatase-clay complexes. *Soil Sci.* 143, n°1, p.5-15.
- Dickinson E.**, 1996. Les colloïdes alimentaires. Masson, Paris.
- Doumas P., Coupé M. & Auzac J. d'**, 1983. Effet de la carence en phosphate sur les activités des phosphatases racinaires du pin d'Alep. *Physiol. Vég.* 21, n°4, p.651-663.
- E.P.A.**, 1971. Methods of chemical analysis of water and wastes. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

- Earl K.D., Syers J.K. & McLaughlin J.R.**, 1979. Origine of the effect of citrate, tartrate and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, p.674-678.
- Eiten G.**, 1972. The Cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.* 38, n° 2, p.201-341.
- Eiten G.**, 1993. Vegetação. In M. N. Pinto (Coord.), *Cerrado: Caracterização, ocupação e perspectivas*. UnB, Brasília, DF, p.17-74.
- Eivazi F. & Tabatabai M.A.**, 1977. Phosphatases in soils. *Soil Biol. Biochem.* 9, p.167-172.
- EMBRAPA**, 1978. Relatório técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Planaltina, DF, Brasil.
- EMBRAPA-SNLCS**, 1978. Levantamento de reconhecimento de solos de Distrito Federal. EMBRAPA, Rio de Janeiro, Brasil, 445 p.
- EMBRAPA/CPAC**, 1981. Relatório técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1979-1980. Planaltina, DF, Brasil.
- EMBRAPA/SNLCS**, 1981. Mapa de solos do Brasil 1: 5 000 000. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Emsley J. & Niazi S.**, 1983. The analysis of soil phosphorus by ICP and ³¹P NMR spectroscopy. *Phosphorus and Sulfur* 16, p.303-312.
- FAO/UNESCO**, 1974. Soil map of the World. 1:5 000 000. Paris, FAO/UNESCO, 59 p. et carte.
- Fardeau J.C. & Frossard E.**, 1991. Processus de transformations du phosphore dans les sols de l'Afrique de l'ouest semi-aride: Application au phosphore assimilable. In Tiessen H. & Frossard E. (Eds). *Phosphorus Cycles in Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Regional workshop 4: Africa*. SCOPE & UNEP, p.108-128.
- Fardeau J.C.**, 1981. Cinétiques de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèse, Paris VI.
- Fardeau J.C.**, 1993. Le phosphore assimilable des sols : Sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *agronomie* 13, p.317-331.
- Fardeau J.C., Morel C. & Boniface R.**, 1988. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols ? *agronomie* 8, p.577-584.
- Feller C., Burtin G., Gérard B. & Balesdent J.**, 1991. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêts et limites. *Science du Sol* 29, n°2, p.77-93.
- Feller C., Frossard E. & Brossard M.**, 1994. Activité phosphatasique de quelques sols tropicaux à argile 1:1. Répartition dans les fractions granulométriques. *Can. J. Soil Sci.* 74, p.121-129.
- Fernandes F.M., Anjos J.L. dos, Fernandes R.P.M.Sobral L.F. & Araújo A.S.**, 1997. Efeito da saturação por bases sobre a atividade de fosfatases em um solo de tabuleiros costeiros cultivado com citros. I. Correlações entre a atividade enzimática e diferentes características do solo alteradas pela calagem. In XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do solo, Rio de Janeiro, Brasil.
- Fischer R. & Thomas R.P.**, 1935. The determination of the forms of inorganic phosphorus in soils. *J. Amer. Soc. Agron.* 27, p.863-873.
- Fontes M.P.F. & Weed S.B.**, 1996. Phosphate adsorption by clays from brazilian oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma* 72, p.37-51.
- Fontes M.R., Weed S.B. & Bowen L.H.**, 1992. Association of microcrystalline goethite and humic acid in some oxisols from Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, p.982-990.
- Forster J.C. & Zech W.**, 1993. Phosphorus status in a soil catena under liberian evergreen rain forest: Results of ³¹P NMR spectroscopy and phosphorus adsorption experiments. *Z. Pflanzenernähr Bodenk.* 156, p. 61-66.

- Fox T.R. & Comerford N.B.**, 1992. Rhizosphere phosphatase activity and phosphatase hydrolysable organic phosphorus in two forest spodosols. *Soil Biol. Biochem.* 24, n°6, p.579-583.
- Freese D., Lookman R., Merckx R. & van Riemsdijk W.H.**, 1995b. New method for assessment of long-term phosphate desorption from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, p.1295-1300.
- Freese D., van Riemsdijk W.H. & van der Zee S.E.A.T.M.**, 1995. Modelling phosphate-sorption kinetics in acid soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46, p.239-245.
- Fraps G.S.**, 1906. Availability of phosphoric acid of the soil. *J. Amer. Soc. Agron.* 28, p.823-834.
- Frossard E.**, 1985. Etude expérimentale de l'influence de composés organiques sur l'évolution des ions phosphates en sols ferrallitiques. Thèse de doctorat, Nancy, 109 p.
- Frossard E., Brossard M., Feller C. & Rouiller J.**, 1992. Pouvoir fixateur vis-à-vis des ions phosphate de sols tropicaux à argile 1:1. *Can. J. Soil Sci.* 72, p.135-143.
- Frossard E., Brossard M., Hedley M.J. & Metherell A.**, 1995. Reactions controlling the cycling of P in soils. In Tiessen, H. (Ed), *Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles and Management (Scope 54)*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, p.107-137.
- Frossard E., Fardeau J.C., Brossard M. & Morel J.L.**, 1994. Soil isotopically exchangeable phosphorus : A comparison between E and L values. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, p.86-851.
- Frossard E., Fardeau J.C., Ognalaga M. & Morel J.L.**, 1992. Influences of agricultural practices, soil properties and parent material on the phosphate buffering capacity of cultivated soils developed under a temperate climate. *Eur. J. Agron.* 1, p.45-50.
- Frossard E., Feller C., Tiessen H., Stewart J.W.B., Fardeau J.C. & Morel J.L.**, 1993. Can isotopic method allow for the determination of the phosphate fixing capacity of soils ? *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 24, p.367-377.
- Frossard E., López-Hernández D. & Brossard M.**, 1996. Can isotopic exchange kinetics give valuable information on the rate of mineralization of organic phosphorus in soils ? *Soil Biol. Biochem.* 28, n°7, p.857-864.
- Gahoonia T.S. & Nielsen N.E.**, 1992. The effects of the root-induced pH changes on the depletion of inorganic and organic phosphorus in the rhizosphere. *Plant Soil* 143, p.185-191.
- Gerke J. & Hermann R.**, 1992. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe-complexes and to amorphous Fe-oxide. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155, p.233-236.
- Gerschel A.**, 1995. Liaisons intermoléculaires. Les forces en jeu dans la matière condensée. CNRS, Paris.
- Ghani M.O.**, 1943. Fractionation of soil phosphorus. I. *India. J. Agri. Sci.* 13, p.29-45.
- Gil-Sotres F., Zech W. & Alt H.G.**, 1990. Characterization of phosphorus fractions in surface horizons of soils from Galicia (N.W. Spain) by ³¹P NMR spectroscopy. *Soil Biol. Biochem.* 22, p.75-79.
- Goedert W.J.**, 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. *Journal of Soil Sci.* 34, p.405-428.
- Goedert W.J., Lobato E. & Resende M.**, 1982. Management of tropical soils and world food prospects. In *Proceedings of the 12th International Congress of Soil Science*, New Delhi, India.
- Goiás**, 1977. Secretaria da Agricultura. Levantamento de reconhecimento dos solos da microregião do "Mato Grosso Goiano". Goiânia, Brésil.
- Goldberg S. & Sposito G.**, 1985. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxylated mineral surfaces: a review. *Comm. in Soil Sci. and Plant Anal.*, 16, p.801-821.
- Goodland R.**, 1969. An ecological study of the cerrado vegetation of south central Brazil. Ph.D. Thesis, Botan. Dept., McGill University. Montreal, Canada, 224 p.

- Goodland R.**, 1971. Oligotrofismo e alumínio no cerrado. *In* III Simpósio sobre o cerrado. Blücher E.E. & Univ. São Paulo, São Paulo, p.44-60.
- Gressel N., McColl J.G., Preston C.M., Newmann R.H. & Powers R.F.**, 1996. Linkages between phosphorus transformations and carbon decomposition in a forest soil. *Biogeochemistry* 33, p. 97-123.
- Guerra J.G.M., Almeida D.L. de, Araújo G.S. de & Fernandes M.S.**, 1996. Organic phosphorus content in soil samples. *Pesq. Agropec. Bras.* 31, n^o4, p.291-299.
- Guggenberger G., Christensen B.T., Rubæk G. & Zech W.**, 1996. Land-use and fertilization effects on P forms in two European soils: resins extraction and ³¹P-NMR analysis. *Eur. J. Soil Sci.* 47, p.605-614.
- Guggenberger G., Haumaier L., Thomas R.J. & Zech W.**, 1996. Assessing the organic phosphorus status of an oxisol under tropical pastures following native savanna using ³¹P NMR spectroscopy. *Biol. Fertil. Soils* 23, p.332-339.
- Guimarães D.**, 1964. Geologia do Brasil. Minist. Minas Energia, D.N.P.M., Rio de Janeiro, Mem n^o1, 674 p.
- Halstead R.L.**, 1964. Phosphatase activity of soil as influenced by lime and other treatments. *Can. J. Soil Sci.* 44, p.137-144.
- Haridasan M.**, 1982. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant & Soil* 65, p.265-273.
- Harrison A.F.**, 1987. Soil organic phosphorus. A review of world literature. CAB International, Oxon, 257 p.
- Harter R.**, 1969. Phosphorus adsorption sites on soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, p.902-907.
- Hasset J.J. & Banwart W.L.**, 1992. Soils and their environment. Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey.
- Hawkes G.E., Powlson D.S, Randall E.W. & Tate K.R.**, 1984. A ³¹P nuclear magnetic resonance study of the phosphorus species in soils from long continued field experiments. *J. Soil Sci.* 35, p.35-45.
- Haynes C.A. & Norde W.**, 1994. Globular proteins at solid/liquid interfaces. *Colloids & Surfaces B: Biointerfaces* 2, p.517-566.
- Haynes R.J.**, 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant & Soil* 68, p.289-308.
- Hedley M.J., Stewart J.W.B. & Chauhan B.S.**, 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, p.970-976.
- Helal H.M.**, 1990. Varietal differences in root phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates. *Plant Soil* 123, p.161-163.
- Hinedi Z.R., Chang A.C. & Lee R.W.K.**, 1988. Mineralization of phosphorus in sludge-amended soils monitored by phosphorus-31-Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5, p.1593-1596.
- Houmane B.**, 1983. Etude analytique et expérimentale des relations phosphore-oxyhydroxydes ferriques dans quelques sols calcimagnésiens de Tunisie. Thèse de doctorat, Nancy, 83 p.
- Hue N.V.**, 1991. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. *Soil Sci.* 152, p.463-471.
- I.B.G.E.**, 1993. Mapa de vegetação do Brasil, 1/5 000 000. IBGE, Rio de Janeiro.
- I.U.B.S., International Union of Biological Science**, 1986. Responses of Savannas to stress and disturbance. *Biology International, Special Issue n^o10*, Paris, 82 p.

- John M.K.**, 1970. Colorimetric determination of phosphorus in soil and plant materials with ascorbic acid. *Soil Science* 109, n°4, p.214-220.
- Jones M.J. & Wild A.**, 1975. Soils of the west african savanna. tech. Comm. 55, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, p.100-112.
- Juma N.G. & Tabatabai M.A.**, 1977. Effects of trace elements on phosphatase activity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, p.343-346.
- Juma N.G. & Tabatabai M.A.**, 1978. Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Sci.* 126, p.101-108.
- Juma N.G. & Tabatabai M.A.**, 1988. Phosphatase activities in corn and soybean roots: Conditions for assay and effects of metals, *Plant Soil* 107, p.39-47.
- Juo A.S.R. & Fox R.L.**, 1977. Phosphorus characteristics of some benchmark soils of west Africa. *Soil Sci.* 127, p.370-376.
- Kämpf N., Resende M. & Curi N.**, 1988. Iron oxides in brazilian oxisols. In Camargo M.N., Kimble J.M. & Beinroth (Eds.), *Proceedings of VIII International soil classification Workshop. EMBRAPA-SMSS-AID-UPR*, Rio de Janeiro, p.71-77.
- Ker J.C.**, 1995. Mineralogia, sorção e dessorção de fósforo. Magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil. Tese (doutorado), Universidade federal de Viçosa, 181 p.
- Koutsoukos P.G., Mumme-Young C.A., Norde W. & Lyklema J.**, 1982. Effect of the nature of the substrate on the adsorption of human plasma albumin. *Colloids & Surfaces* 93, p.93-104.
- Kroehler C.J. & Linkins A.E.**, 1988. The adsorption of inorganic phosphate from ³²P-labeled inositol hexaphosphate by *Eriophorum vaginatum*. *Oecologia* 85, p.424-428.
- Kroehler C.J. & Linkins A.E.**, 1988. The root surface phosphatases of *Eriophorum vaginatum* : Effects of temperature, pH, substrate concentration and inorganic phosphorus. *Plant Soil* 105, p.3-10.
- Ladd J.N.**, 1978. Origin and range of enzymes in soil. In Burns R.G. (Ed), *Soil enzymes*. Academic Press, London, p.51-96.
- Larsen S.**, 1952. The use of ³²P in studies on the uptake of phosphorus by plants. *Plant soil* 4, p.1-10.
- Lathwell D.J.**, 1979. Crop response to liming to ultisols and oxisols. *Cornell International Agriculture Bulletin* 35, Cornell Univ., Ithaca.
- Laurent J.Y. & Brossard M.**, 1991. Étude comparée de la détermination du phosphore total de sols tropicaux. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* 26, n°3, p.281-285.
- Lavelle P., Blanchart E., Martin A., Spain A.V. & Martin S.**, 1992. Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In Lal R. & Sanchez P.A. (Eds), *Myths and science of soils of the tropics*. SSSA Special publication n°29, Madison, Wisconsin, p.157-185.
- Le Mare P.H.**, 1982. Sorption of isotopically exchangeable and non-exchangeable phosphate by some soils of Colombia and Brazil, and comparisons with soils of southern Nigeria. *J. Soil Sci.* 33, p.691-707.
- Leakes J.R. & Miles W.**, 1996. Phosphodiesterases as mycorrhizal P sources. I. Phosphodiesterase production and the utilisation of DNA as a phosphorus source by the ericoid mycorrhizal fungus *Hymenoscyphus ericae*. *New Phytologist* 132, p.435-443.
- Levesque M. & Schnitzer M.**, 1969. Characterization of model and soil organic matter metal-phosphate complexes. *Can. J. Soil Sci.* 49, p.365-375.
- Lin C.F. & Benjamin M.M.**, 1990. Dissolution kinetics of minerals in the presence of sorbing and complexing ligands. *Environ. Sci. Technol.* 24, p.126-134.
- Linquist B.A., Singleton P.W. & Cassman K.G.**, 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol. *Soil Sci.* 162, n°4, p.254-264.

- Lobato E.**, 1982. Adubação fosfatada em solos sob vegetação de cerrado. *In* Oliveira J.A., Lourenço S. & Goedert W.J. (Eds), Adubação fosfatada no Brasil. EMBRAPA-DID, Planaltina, DF, p.201-240.
- Lopes A.S. & Cox F.R.**, 1977. A Survey of the fertility status of soils surface under "cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, p.742-747.
- López-Hernández D. & Burnham C.P.**, 1974. The covariance of phosphate sorption with other soil properties in some british and tropical soils. *J. Soil Sci.* 25, p.196-206.
- López-Hernández D. & Niño M.**, 1993. Phosphorus mineralization during laboratory incubation in soils derived from different textured parent materials. *Geoderma* 56, p.527-537.
- Lucas L.N. & Blue W.G.**, 1972. Effects of lime and phosphorus on selected alluvial entisols from eastern Costa Rica. I. Phosphorus retention and soil phosphorus fractions. *Trop. Agric.* 49, p. 287-295.
- Macedo J. & Bryant R.B.**, 1987. Morphology, mineralogy and genesis of a hydrosequence of oxisols in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, p.690-698.
- Madeira Netto J.S., Macedo J. & Azevedo L.G.**, 1982. Brazilian problem soils: distribution, characteristics and utilization. TARC/MAFF, Tsukuba, Japan.
- Makarov M.I.**, 1995. Phosphorus in humic acids in mountain-forest and mountain-meadow soils of the north-west Caucasus. *Moscow univ. Soil Sci. Bull.* 50, n°1, p.34-42.
- Matumoto-Pintro P.T.**, 1996. Rôle des phosphatases dans l'utilisation du phosphore organique par les champignons ectomycorhiziens et leurs associations avec le pin Laricio de Corse. Influence des surfaces adsorbantes sur l'activité des phosphatases. Thèse de Doctorat, Montpellier, 197 p.
- McCallister D.L. & Logan T.J.**, 1978. Phosphate adsorption-desorption characteristics of soils and bottom sediments in the Maumee River basin of Ohio. *J. Environ. Qual.* 7, p.87-92.
- McGill W.B. & Cole C.V.**, 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma* 26, p.267-286.
- McLaughlin J.R., Ryden J.R. & Syers J.K.**, 1981. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminium-containing components. *J. Soil Sci.* 32, p.365-377.
- Mehlich A.**, 1954. Determination of P, Ca, Mg, K and NH₄. North Carolina Soil Test Division Mimeo, Raleigh, NC.
- Memon K.S. & Fox R.L.**, 1983. Utility of phosphate sorption curves estimating the phosphorus requirements of cereal crop wheat (*Triticum aestivum*). *In* Proceedings of the 3rd International Congress on Phosphorus Compounds, Impfos, Casablanca, p.217-230.
- Mesquita Filho M.V. de & Torrent J.**, 1993. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region. *Geoderma* 58, p.107-123.
- Miranda H.S., Saaito, C.H. & Souza Dias B.F. de**, 1996. Impactos de queimadas em áreas de cerrado e restinga. UnB-ECL, Brasília, DF, 187 p.
- Miranda L., Mielnickzuk, J. & Lobato E.**, 1980. Calagem a adubação corretiva. *In* V Simpósio sobre o Cerrado, Brasília, DF, Brésil, p.521-528.
- Morel C., Tiessen H., Moir J.O. & Stewart J.W.B.**, 1994. Phosphorus transformations and availability under cropping and fertilization assessed by isotopic exchange. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, p.1439-1445.
- Mortland M.M. & Gieseking J.E.**, 1952. The influence of clay minerals on the enzymatic hydrolysis of organic phosphorus compounds. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 16, p.10-13.
- Nahas E., Centurion J.F. & Assis L.C.**, 1994. Microorganismos solubilizadores e produtores de fosfatasas de vários solos. *R. Bras. Ci. Solo* 18, p.43-48.

- Nannipieri P., Badalucco L. & Landi L.**, 1994. Holistic approaches to the study of populations, nutrient pools and fluxes: Limits and future needs. *In* Ritz K., Dighton J. & Giller K.E. (Eds.), *Beyond the Biomass: Compositional and functional analysis of soil microbial communities*. John Wiley & Sons, Chichester, p. 231-238.
- Nayini N.R. & Markakis P.**, 1986. Phytases. *In* Graf E. (Ed), *Phytic acid: Chemistry and applications*. Pilatus Press, Mineapolis, p.101-108.
- Neufeldt H. & Zech W.**, 1995. Characterisation of land-use of Cerrado oxisols with ³¹P NMR.
- Newman R.H. & Tate K.R.**, 1980. Soil characterised by ³¹P nuclear magnetic resonance. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 11, p.835-842.
- Norde W. & Lyklema J.**, 1989. Protein adsorption and bacterial adhesion to solid surfaces: A colloidal-chemical approach. *Colloids & surfaces* 38, p.1-13.
- Norde W.**, 1986. Adsorption of proteins from solution at the solid-liquid interface. *Advances in Colloid and Interface Science* 25, p.267-340.
- Norde W., McRitchie F., Nowicka G. & Lyklema J.**, 1985. Protein adsorption at the solid-liquid interfaces: Reversibility and conformation aspects. *J. Colloid Interface Sci.* 112, n°2, p.447-456.
- Novaes Pinto M.**, 1994 (Coord.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Univ. Brasília, 681 p.
- Nye P.H. & Bertheux M.H.**, 1957. The distribution of phosphorus in forest and savannah soils of the Gold Coast and its agricultural significance. *J. Agric. Sci. Camb.* 49, p. 141-159.
- Oberson A., Friesen D.K., Tiessen H., Moir J.O. & Borrero G.**, 1995. Phosphorus transformations in improved pastures. *In* *Tropical Lowlands Program annual report. Working Document n°148, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali*, p.182-187.
- Ognalaga M.**, 1992. Etude expérimentale de la biodégradation de complexe goethite-molécules organophosphatées par *Bacillus macerans*. Thèse de doctorat, Nancy, 124 p.
- Ognalaga M., Frossard E. & Thomas F.**, 1994. Glucose-1-Phosphate and myo-inositol hexaphosphate adsorptions mechanisms on goethite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, p.332-337.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. & Dean L.A.**, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA circular* 939.
- Pang P.C.K. & Kolengo H.**, 1986. Phosphomonoesterase activities in forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 18, n°1, p.35-50.
- Parfitt R.L., Atkinson R.J. & Smart R.S.C.**, 1975. The mechanism of phosphate adsorption by iron oxides. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39, p.837-841.
- Parfitt R.L., Fraser A.R., Russell J.D. & Farmer V.C.**, 1977. Adsorption on hydrous oxides. II. Oxalate, benzoate and phosphate on gibbsite. *J. Soil Sci.* 28, p.40-47.
- Parfitt R.L., Russell J.D. & Farmer V.C.**, 1976. Confirmation of the structures of goethite (αFeOOH) and phosphated goethite by infrared spectroscopy. *J. Chem. Soc.* 72, p.1082-1087.
- Petri S. & Fulfaro V.J.**, 1983. *Geologia do Brasil (Fanerozoico)*. Queiroz T.A. (Ed). Univ. São Paulo, Brasil, 631 p.
- Quiquampoix H.**, 1987a. A stepwise approach to the understanding of extracellular enzyme activity in soil. I. Effect of electrostatic interactions on the conformation of a β -D-glucosidase adsorbed on different mineral surfaces. *Biochimie* 69, p.753-763.
- Quiquampoix H.**, 1987b. A stepwise approach to the understanding of extracellular enzyme activity in soil. II. Competitive effects on the adsorption of a β -D-glucosidase in mixed mineral or organo-mineral systems. *Biochimie* 69, p.765-771.

- Quiquampoix H., Abadie J., Baron M.H., Leprince F., Matumoto-Pintro P.T., Ratcliffe R.G. & Staunton S.**, 1995. Mechanisms and consequences of protein adsorption on soil mineral surfaces. *In* Horbett T.A. & Brash J.L. (Eds), *Proteins at Interfaces II*, ACS Symposium Series n°602, Chap. 23. American Chemical Society, Washington, DC, p.321-333.
- Quiquampoix H., Chassin P. & Ratcliffe R.G.**, 1989. Enzyme activity and cation exchange as tools for the study of the conformation of proteins adsorbed on mineral surfaces. *Progr. Colloid. Polym. Sci.* 79, p.59-63.
- Quiquampoix H., Staunton S., Baron M.H. & Ratcliffe R.G.**, 1993. Interpretation of the pH dependence of protein adsorption on clay mineral surfaces and its relevance to the understanding of extracellular enzyme activity in soils. *Colloids & Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 75, p.85-93.
- Ramirez-Martinez J.R. & McLaren A.D.**, 1966. Some factors influencing the determination of phosphatase activity in native soils and soils sterilized by irradiation. *Enzymologia* 31, p.23-38.
- Ramsden J.J. & Prenosil J.E.**, 1994. Effect of ionic strength on protein adsorption kinetics. *J. Phys. Chem.* 98, p.5376-5381.
- Rao I.M., Borrero V., Ricaurte J., Garcia R. & Ayarza M.A.**, 1997. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. III. Differences in Phosphorus acquisition and utilization as influenced by varying phosphorus supply and soil type. *J. Plant Nutr.* 20, n°1, p.155-180.
- Ratter J.A. & Dargie T.C.D.**, 1992. An analysis of the floristic composition of 26 Cerrado areas in Brazil. *Edinburgh Journal of Botany* 49, p.235-250.
- Ribeiro J.F., Silva J.C.S. & Batmanian G.J.**, 1985. Fitosociologia de tipos fitofisionômicos da região do Cerrado em Planaltina, DF. *R. Bras. Bot.* 8, p.131-142.
- Richardson A.E.**, 1994. Soil microorganisms and phosphorus availability. *In* Pankhurst C.E., Doube B.M., Gupta V.V.S.R. & Grace P.R. (Eds), *Soil biota, Management in sustainable farming systems*. CSIRO, Melbourne, Australia, p.50-52.
- 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-Gerdar, Pub. sc.* n°2, 48 p.
- Rodrigues T.E. & Klant E.**, 1978. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos do Distrito Federal. *R. Bras. Ci. Solo* 2, p.132-139.
- Rodrigues T.E.**, 1977. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos dos cerrados, no Distrito Federal. Tese de MSc, Univ. Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 101 p.
- Rogers H.T.**, 1942. The availability of certain forms of organic phosphorus compounds by soil catalysts. *Iowa State Coll. J. Sci.* 17, p.108-110.
- Rojo M.J., Carcedo S.G. & Mateos M.P.**, 1990. Distribution and characterization of phosphatase and organic phosphorus in soil fractions. *Soil Biol. Biochem.* 22, n°2, p.169-174.
- Rouessac F. & Rouessac A.**, 1997. Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire. *In* *Analyse chimique. Méthodes et techniques instrumentales modernes* (3^e édition). Masson, Paris, p.113-146.
- Rubaek G.H. & Sibbesen E.**, 1993. Resin extraction of labile, soil organic phosphorus. *J. Soil Sci.* 44, p.467-478.
- Salcedo I.H., Bertino F. & Sampaio E.V.S.B.**, 1991. Reactivity of phosphorus in northeastern Brazilian soils assessed by isotopic dilution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, p.140-145.
- Salcedo I.H., Machado L.C. & Araújo S.B. de**, 1997. Disponibilidade de P em solos de Pernambuco e sua relação com a capacidade de fixação e a cinética de troca isotópica de ³²P. *In* XVII Congresso Brasileiro do Ciência do solo, Rio de Janeiro, Brasil.

- Sanchez P.A. & Salinas J.G.**, 1981. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. *In* Brady N.C. (Ed), *Advances in Agronomy*. Academic Press, Inc., N.Y., p. 279-406.
- Satchell J.E., Martin K. & Krishamoorthy R.V.**, 1984. Stimulation of microbial phosphatase production by earthworm activity. *Soil Biol. Biochem.* 16, p.195.
- Schobbenhaus C., Campos D. de A., Derze G.R. & Asmus H.E.**, 1984. Geologia do Brasil. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da area oceanica adjacente incluindo depositos minerais. D.N.P.M., Rio de Janeiro, 501 p.
- Schwertmann U. & Herbillon A.J.**, 1992. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. *In* *Myths and Science of Soils of the Tropics*, SSSA Special Publication n°29, Madison, Wisconsin, p.47-59.
- Shang C.**, 1990. Kinetics of adsorption of organic and inorganic phosphates by short-range ordered precipitate of aluminium. *Can. J. Soil Sci.* 70, p.461-470.
- Shang C., Stewart J.W.B. & Huang P.M.**, 1992. pH effects of kinetics of adsorption of organic and inorganic phosphates by short-range ordered aluminium and iron precipitates. *Geoderma* 53, p.1-14.
- Sharpley A.**, 1988. P sorption - Desorption of the Brazilian soils. *In* Camargo M.N., Kimble J.M. & Beinroth (Eds.), *Proceedings of the VIII International soil classification workshop: Classification, characterization and utilization of oxisols*. EMBRAPA-SMSS-AID-UPR, Rio de Janeiro, p. 199-207.
- Sharpley A.N., Jones C.A., Grey C. & Cole C.V.**, 1984. A simplified soil and plant phosphorus model II: Prediction of labile, organic and sorbed phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, p.805-809.
- Sharpley A.N.**, 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, p.905-911.
- Sibbesen E.**, 1977. A simple ion-exchange procedure for extracting plant available elements from soil. *Plant Soil* 46, p.665-669.
- Sinaj S., Mächler F., Frossard E., Faisse C., Oberson A. & Morel C.** Interferences of colloidal particles in the determination of orthophosphate concentrations in soil water extracts. *Soumis à Comm. Soil Sci. Plant Anal.*
- Skujins J.**, 1967. Enzymes in soil. *In* *Soil Biochemistry*, vol.1, McLaren A.D. & Peterson G.H. (Eds), Marcel Dekker Inc., NY, p.371-414.
- Skujins J.J., Braal L. & McLaren A.D.**, 1962. Characterization of phosphatase in a terrestrial soil sterilized with an electron beam. *Enzymologia* 25, p.125-133.
- Smyth T.J. & Sanchez P.A.**, 1982. Phosphate rock dissolution and availability in Cerrado soils as affected by phosphorus sorption capacity. *Soil Sci. Soc. A. J.* 46, p.339-345.
- Soil Survey Staff**, 1975. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys*. U.S. Dept. Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC.. 330 p.
- Speir T.W. & Cowling J.C.**, 1991. Phosphatase activities of pasture plants and soil: Relationship with plant productivity and soil P fertility indices. *Biol. Fertil. Soils* 12, p.189-194.
- Sposito G.**, 1984. *The surface chemistry of soils*. Oxford Univ. Press Inc., NY, 277 p.
- Stevenson F.J.**, 1985. The phosphorus cycle. *In* *Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Wiley & Sons, NY, p.231-284.
- Stewart J.W.B. & Tiessen H.**, 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry* 4, p. 41-60.
- Stumm W., Furrer G. & Kunz B.**, 1983. The role of surface coordination in precipitation and dissolution of minerals phases. *Croat. Chem. Acta* 58, p.585-602.
- Syers J.K., Evans T.D., Williams J.D.H. & Murdock J.T.**, 1971. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio grande Do Sul. Brasil. *Soil Sci.* 112, p. 275-276.

- Syers J.K., Smillies G.W. & Williams D.H.**, 1972. Calcium fluoride formation during extraction of calcareous soils with fluoride. I. Implications to inorganic fractionation schemes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, p.20-25.
- Tabatabai M.A. & Bremner J.M.**, 1969. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biol. Biochem.* 1, p.301-307.
- Tabatabai M.A.**, 1982. Soil enzymes. *In* Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological Properties. Agronomy monograph n°9, ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, p.903-947.
- Tarafdar J.C. & Claassen N.**, 1988. Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. *Biol. Fert. Soils* 5, p.308-312.
- Tate K.R. & Newman R.H.**, 1982. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock grassland. *Soil Biol. Biochem.* 14, p.191-196.
- Thompson L.M., Black C.A. & Zoellner J.A.**, 1954. Occurrence and mineralization of organic phosphorus in soils with particular reference to associations with nitrogen, carbon and pH. *Soil Sci.* 77, p.185-196.
- Tiessen H., Salcedo I.H. & Sampaio E.V.S.B.**, 1992. Nutrients and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38, p.19-151.
- Torrent J., Barron V. & Schwertmann U.**, 1990. Phosphate adsorption and desorption by goethites differing in crystal morphology. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, p.1007-1012.
- Torrent J., Schwertmann U. & Barron V.**, 1992. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. *Clays and Clay minerals* 40, p.14-21.
- Traina S.J., Sposito G., Hesterberg D. & Kafkafi U.**, 1986a. Effect of pH and organic acids on orthophosphate solubility in an acidic montmorillonitic soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, p.45-52.
- Tran T. sen, Simard R.R. & Fardeau J.C.**, 1992. A comparison of four resin extractions and ³²P isotopic exchange for the assessment of plant-available P. *Can. J. Soil Sci.* 72, p.281-294.
- Trompette R., Delvigne J. & Parisot J.C.**, 1981. La documentation de base sur la géologie du Brésil. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* XII, n°2, p.165-169.
- Turner R.C. & Rice H.M.**, 1954. Role of fluoride ion in release of phosphate adsorbed by Al and Fe hydroxides. *Soil Sci.* 74, p.141-148.
- Válio I.F.M., Moraes V., Marques M., Matos M.E.R. & Paulo J.E. de**, 1966b. Sobre o balanço d'água de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. e *Hymenaea stilbocarpa* Hayne, em condições de cerrado, na estação seca. *Idib.*, p.261-276.
- van Raij B**, 1986. Propriedades eletroquímicas de solos. *In* Simpósio Avançado de Química e Fertilidade do solo. Piracicaba, Brasil, p.9-41.
- van Raij B**, 1997. Adubação fosfatada. *In* XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 20-26 Julho, Rio de Janeiro, Brasil.
- Verwey E.J.W. & Overbeek J.T.G.**, 1948. Theory of the stability of lyophobic colloids, Elsevier, Amsterdam.
- Volkoff B.**, 1985. Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 21, p.225-236.
- Volkoff B. & Cerri C.C.**, 1985. L'humus des sols du Brésil. Nature et relations avec l'environnement. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 24, n°2, p.83-95.
- Vuorinen A.H. & Saharinen M.H.**, 1996. Effects of soil organic matter extracted from soil on acid phosphomonoesterase. *Soil Biol. Biochem.* 28, n°10-11, p.1477-1481.

- Walbridge M.R. & Vitousek P.M.**, 1987. Phosphorus mineralization potentials in acid organic soils: Processes affecting $^{32}\text{PO}_4^{3-}$ isotope dilution measurements. *Soil Biol. Biochem.* 19, p.709-717.
- Weil J.H.**, 1987. Les enzymes et la catalyse enzymatique. *In Biochimie générale*, Masson, Paris, p.61-104.
- Williams C.H.**, 1950. Studies on soil phosphorus. *J. Agri. Sci.* 40, p.233-242.
- Williams J.D.H., Mayers T. & Nriagu J.O.**, 1980. Extractability of phosphorus from phosphate minerals common in soils and sediment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, p.462-465.
- Williams J.D.H., Syers J.K. & Walker T.W.**, 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31, p.736-739.
- Williams R.**, 1937. The solubility of soil phosphorus and other phosphorus compounds in sodium hydroxide solution. *J. Agri. Sci.* 27, p.260-270.
- Williams R.J.P., Giles R.G.F. & Posner A.M.**, 1981. Solid state phosphorus NMR spectroscopy of minerals and soils. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 20, p.1051-1052.
- Zech W., Alt H.G., Zucker A. & Kogel I.**, 1985. ^{31}P -NMR-spectroscopic investigations of NaOH extracts from soils with different land use in Yucatan (Mexico). *Z. Pflanz. Boden.* 148, p.626-632.
- Zhang Y.S., Werner W., Scherer H.W. & Sun X.**, 1994. Effects of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biol. Fertil. Soils* 17, p.64-68.

ANNEXES

ANNEXE I

RELEVÉ FLORISTIQUE

(Diacis de Alvarenga, technicien IBGE, Station El Roncador, DF)

Espèces végétales (ANGIOSPERMES) présentes sur les différents sites (liste non exhaustive établie en juillet 1995)

SITES : RON 1 : Cerradão - RON 2: Cerrado - RON 3 : Campo sujo - Ron 4 : Campo limpo - RON 5 : Forêt galerie - Bar 1 : Cerrado pâturé

CLASSE	SUBCLASSE	ORDRE	FAMILLE GENRE ET ESPECE	NOM VERNACULAIRE	RON					BAR 1			
					1	2	3	4	5				
Magnoliopsida	Magnoliidæ	Magnoliales	Annonaceæ Annona coriacea	Araticum (A)	x						x		
			Myristicaceæ Virola sebifera	Virola (A)						x			
	Hamamelidale	Urticales	Cecropiaceæ Cecropia adenopus	Embaúba (A)						x			
	Caryophyllidæ	Caryophyllales	Nyctaginaceæ Guapira noxia	Pau-de-lepra (A)		x					x		
	Dilleniidæ	Dilleniales	Dilleniaceæ Davilla elliptica	Sambaibinha (a)			x	x				x	
			Ochnaceæ Ouratea floribunda	(a)	x	x						x	
		Theales	Caryocaraceæ Caryocar brasiliense	Pequiizeiro (A)	x	x							x
			Guttiferæ Kielmeyera sp.	Pau santo (a)		x	x	x					x
			Bombacaceæ Eriotheca pubescens	Paneira-do-cerrado (A)		x	x				x		x
		Ebenales	Sapotaceæ Pouteria ramiflora	Cumiola (A)		x							x
			Styracaceæ Styrax ferrugineus	Laranjinha-do-campo (A)	x	x	x				x		x
	Rosidæ	Rosales	Connaraceæ Rourea induta	(a)	x	x	x					x	
			Chrysobalanaceæ Couepia grandiflora	(A)		x							x

CLASSE	SUBCLASSE	ORDRE	FAMILLE GENRE ET ESPECE	NOM VERNACULAIRE	RON					BAR 1	
					1	2	3	4	5		
Magnoliopsida	Rosidæ	Fabales	Leguminosæ								
			<i>Acosmium dasycarpum</i>	Chapadinha (A)		x					x
			<i>Bauhinia</i> sp.	(A/a ?)		x	x			x	x
			<i>Bowdichia virgilioides</i>	Sucupira preta (A)	x	x					
			<i>Calliandra dysantha</i>	(a)			x				x
			<i>Copaifera langsdorfii</i>	Pau d'óleo (A)	x					x	x
			<i>Dalbergia miscolobium</i>	Jacarandá-do-cerrado (A)	x	x	x				x
			<i>Dalbergia</i> sp.	Jacarandá (A)			x	x	x		x
			<i>Dimorphandra mollis</i>	Faveira (A)		x	x				x
			<i>Enterolobium gummiferum</i>	Tamboril-do-cerrado (A)			x				x
			<i>Hymenaea courbaril</i>	Jatobá (A)						x	
			<i>Hymenaea stignocarpa</i>	Jatobá-do-cerrado (A)	x	x					x
			<i>Mimosa</i> sp.	(a)					x		
			<i>Pterodon pubescens</i>	Sucupira (A)	x	x					
			<i>Sclerolobium paniculatum</i> var. <i>rubiginosum</i>	Carveiro-da-mata (A)						x	x
			var. <i>subvelutinum</i>	Carveiro (A)	x						x
		<i>Stryphnodendron adstringens</i>	Barbatimão (A)	x	x	x	x			x	
				Protéales	Proteaceæ						
					<i>Roupala montana</i>	Carne-de-vaca (A)	x	x		x	
				Myrtales	Lythraceæ						
					<i>Lafoensia pacari</i>	Pacari (A)		x			
					Myrtaceæ						
					<i>Eugenia klotzchiana</i>	Pera-do-cerrado (a)			x		
					<i>Myrcia tomentosa</i>	Goiabinha-do-campo (A)				x	x
					<i>Myrcia variabilis</i>	(a)					x
					Melastomataceæ						
					* <i>Miconia</i> sp.	(a)		x			
					<i>Tibouchina stenocarpa</i>	Quaresmeira (A)			x	x	

CLASSE	SUBCLASSE	ORDRE	FAMILLE GENRE ET ESPECE	NOM VERNACULAIRE	RON					BAR 1	
					1	2	3	4	5		
Magnoliopsida	Rosidæ	Celastrales	Celastraceæ Plenckia populnea	Marmelinho (A)		x				x	
			Hippocrateaceæ Salacia crassifolia	Bacupari (A)							
			Icacinaceæ Emmoton nitens	Sobro (A)	x				x		
		Euphorbiales	Euphorbiaceæ Maprounea brasiliensis	(a)					x	x	
		Linales	Erythroxylaceæ Erythroxylum tortuosum	Mercúrio-do-campo (a)			x	x		x	
		Ploygalales	Malpighiaceæ Banisteriopsis sp.	(a)				x		x	
			Byrsonima crassa	Murici (A)		x	x			x	
			Vochysiaceæ Qualea dichotoma	Jacaré (A)			x				
			* Qualea multiflora	Pau terrinha (A)		x				x	
			* Qualea parviflora	Pau terrinha (A)	x	x					
			* Vochysia elliptica	(A)	x		x			x	
			Vochysia tucanorum	Pau-de-tucano (A)	x	x	x		x	x	
			Sapindales	Sapindaceæ Matayba guianensis	Camboatá (A)	x				x	
			Anacardiaceæ Tapirira guianensis	Pombeiro (A)					x		
		Apiales	Araliaceæ Didymopanax macrocarpum	Mandiocão (A)	x	x	x	x		x	
		Asteridæ	Gentianales	Apocynaceæ Aspidosperma sp.	Canela-de-vehlo (A)		x				
			Lamiales	Labiatae Salvia tomentella	Poejo-de-campo (h)			x			
			Scrophulariales	Biognoniaceæ Tabebuia caraiba	Caraiba (A)			x			x
				Tabebuia serratifolia	Ipê amarelo (A)			x			x

CLASSE	SUBCLASSE	ORDRE	FAMILLE GENRE ET ESPECE	NOM VERNACULAIRE	RON					BAR	
					1	2	3	4	5	1	
Magnoliopsida	Asteridæ	Rubiales	Rubiaceæ								
			Alibertia macrophylla	Marmelada-de-cachorro (A)					x		
			* Palicourea rigida	Chapéu-de-couro (A)	x	x					
			Sabicea brasiliensis	Sangue-de-cristo (a)			x	x		x	
			Tocoyena formosa	Jenipapo branco a)			x			x	
			Astérales	Compositæ							
		nd		(a)			x				
		Achyrocline sp.		Macela (h)			x	x			
		Aspilia sp.		(h)			x			x	
		Eremanthus sp.		(a)	x	x		x		x	
Arecidæ	Arecidæ	Arécales	Palmæ								
			Butia leiospatha	Vassoura (a)		x	x			x	
		Syagrus flexuosa	Licuri (a)	x	x	x					
			Cypérales	Gramineæ							
	Echinolaena inflexa	Capim flexinha (h)		x	x	x	x		x		
	Melinis minutiflora	Capim gordura/meloso(h)				x					
	Tristachya leiostachya	Capim flexa (h)				x	x				
		Liliidæ	Liliales	Velloziaceæ							
Vellozia sp.	(a)				x				x		
			Smilacaceæ								
			Smilax sp.	Japecanga (a)			x			x	

A = Arbres / a = Arbustes / h =Herbacées

* : Espèces connues pour être accumulatrices d'Al (Haridasan, 1982)

RON 4 = site le moins complet, beaucoup d'herbacés et de sub-arbustes non identifiés

ANNEXE II

FICHES DE DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE

DES PROFILS DE SOLS (avril & mai 1995)

La nomenclature des horizons est établie selon EMBRAPA (1988, 1997)

PROFIL RON 1

Localisation : Station Écologique IBGE

Végétation : Cerradão

Éléments de Géomorphologie : Plateau à surface irrégulière, pente de 1 %

Sol : Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

A (0-15) : Frais, brun rouge (5 YR 4/4). Peu compact, friable. Structure massive avec une sous-structure polyédrique sub-anguleuse fine. Pores tubulaires très fins à fins abondants, sans orientation dominante, volume des vides entre agrégats assez important. Racines fines, horizontales, très abondantes, racines moyennes, horizontales, peu abondantes, racines grossières rares, orientées verticalement ou horizontalement, le tout formant un chevelu peu dense. Présence de racines carbonisées. Turricules de petites taille (< 0,5 cm) nombreux malgré l'absence de vers de terre. A 12 cm, présence de galeries ovales de 4 à 5 mm de large, tapissées en noir, fréquentées par de petits termites ocres (soldats à tête noire). Limite peu nette, horizontale.

AB (15-30) : Frais, rouge jaunâtre (5 YR 4/6). Plus compact. Mêmes caractéristiques de structure et de porosité que précédemment. Racines fines, horizontales, abondantes, racines moyennes, horizontales, peu abondantes. Limite peu nette, horizontale.

BA₁ (30-55) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8). Compact et friable. Structure polyédrique sub-anguleuse fine à moyenne, peu développée. Pores tubulaires très fins à fins abondants, pores moyens peu abondants résultant d'une activité biologique (Fourmis), volume des vides entre agrégats assez important. Racines fines abondantes, moyennes peu abondantes, orientation sub-horizontale et distribution homogène. Présence de racines carbonisées. Turricules de toutes tailles (Ø jusqu'à 1,5 cm, mais une majorité de plus petits), galerie de ver oblique comblée par un matériel plus sombre (de l'horizon superficiel), mais absence d'individus. Limite graduelle horizontale.

BA₂ (55-70) : frais, rouge (2,5 YR 4/6-4/8). Peu compact, friable. Structure polyédrique fine à très fine, rarement moyenne. Pores tubulaires fins moyennement abondants. Racines fines moyennement abondantes, quelques racines moyennes, orientation sub-horizontale et distribution homogène. Présence de racines carbonisées. Turricules peu abondants assez grossiers (1 cm de diamètre). Présence de petites fourmis noires (et d'individus ailés) ayant formé, à 60 cm de profondeur, une meule de champignons dans une loge de 7 cm x 3 cm. Limite graduelle, légèrement ondulée.

Bw₁ (70-140) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8) avec de rares petites taches légèrement jaunâtres (contraste faible). Très peu compact, très friable. Structure polyédrique très fine. Pores fins assez abondants. Racines fines peu abondantes, quelques racines moyennes. Quelques turricules (moyens). Aux environs de 75 cm, présence de petites fourmis ocres, ayant formé des galeries non tapissées de 1 mm de diamètre et présence également d'une loge allongée horizontale (15 cm long x 2 cm haut) comblée par des éléments arrondis millimétriques jaunâtres. Limite horizontale diffuse en relation avec le degré de compaction.

Bw₂ (140-170) : Légèrement humide, rouge (2,5 YR 4/8) avec des petites taches jaunâtres, diffuses, peu contrastées, devenant plus nombreuses et plus grossières dans la partie inférieure de l'horizon et de très rares petites taches rougeâtres. Compact, friable. Structure polyédrique fine, débit polyédrique léger. Pores fins peu abondants. Racines fines très peu abondantes, racines moyennes rares. Encore quelques turricules grossiers. A 150 cm présence de petites fourmis ocres ayant formé des galeries non tapissées (2 mm de diamètre). Limite graduelle horizontale.

Bw₃ (170-210, z) : Humide (léger gradient positif avec la profondeur), rouge jaunâtre (5 YR 5/8) avec des taches grossières rougeâtres, diffuses et peu contrastées à structure grumeleuse nette. Compact (cependant un peu moins que l'horizon précédent), friable. Structure polyédrique fine. Pores fins peu abondants. Racines fines rares. Nombreux charbons fins (5 mm) entre 170 et 180 cm de profondeur. A 200 cm, présence d'une poche sub-ovoïde de 4 cm remplie d'éléments millimétriques arrondis bruns.

Remarque : Argile lourde sans différenciation texturale

Observations complémentaires : Premières conclusions de l'étude de la macrofaune (méthode TSBF modifiée, 5 blocs 25x25x50 cm) réalisée le 17.04.95

Activité biologique intense avec notamment : Traces diverses notamment loges, galeries, nids, meules de champignons, turricules ; petits termites gris ; petites fourmis rousses longiformes (champignonistes) ; grosses fourmis noires.

PROFIL RON 2

Localisation : Station Écologique IBGE

Végétation : Cerrado

Éléments de Géomorphologie : Plateau à surface irrégulière, pente de 1 à 2 %

Situation particulière : Termitières épigées en nombre important autour de la fosse pédologique

Sol : Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

A (0-15) : Frais, rouge à rouge foncé (2,5 YR 4/6 à 3/6). Peu compact, friable. Structure polyédrique sub-anguleuse fine. Pores tubulaires fins et moyens abondants. Volume des vides entre agrégats important. Racines fines très abondantes, racines moyennes peu abondantes, quelques racines grossières dans les trente premiers centimètres ; orientation sub-horizontale, distribution homogène. Présence de racines carbonisées. Quelques charbons très fins. Turrículos de toutes tailles vraisemblablement assez anciens, galerie de vers de terre comblée par un matériel plus sombre, mais absence d'individu. Limite peu nette horizontale.

AB (15-30) : Frais, rouge (2,5 YR 4/6). Compact, friable. Caractéristiques de structure et de porosité identiques à celles de l'horizon précédent. Limite peu nette horizontale.

BA₁ (30-50) : Frais, rouge jaunâtre (5 YR 4/6). Compact, très friable. Structure polyédrique fine à moyenne. Pores tubulaires fins très abondants. Vides entre agrégats. Racines fines abondantes, moyennes peu abondantes, très rares racines grossières ; orientation sub-horizontale préférentielle, quelques racines verticales, distribution homogène. Turrículos sombres (même couleur que l'horizon précédent) centrimétriques très peu abondants. Limite graduelle, légèrement ondulée.

Note : La tortuosité des racines laisse penser que cet horizon est relativement résistant à la pénétration.

BA₂ (50-75) : Frais, rouge (2,5 YR 4/6-4/8). Compact, très friable. Structure polyédrique fine, débit plus ou moins polyédrique. Pores tubulaires fins très abondants. Volume des vides entre agrégats important. Racines fines sub-horizontales abondantes, racines moyennes peu abondantes. Quelques racines carbonisées. Présence de quartz (sables) propres. De rares petits noyaux de schistes altérés. Quelques turrículos de taille moyenne. Limite diffuse ondulée.

Bw₁ (75-95) : Horizon de transition où l'on observe quelques remontées de schistes (origine faunique ?). Humide, rouge (5,2 YR 4/6).

Bw₂ (95-195) : Humide à très humide (dans la partie inférieure de l'horizon), rouge (2,5 YR 4/6) avec de rares taches plus sombres. Compact (un peu plus que l'horizon précédent), compaction un peu plus poussée autour de racines en décomposition, très friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires fins abondants. Vides entre agrégats. Racines fines moyennement abondantes, quelques racines moyennes. Présence de racines carbonisées et de racines en décomposition. Présence de sables propres. Encore quelques rares turrículos de taille moyenne (surtout dans la partie supérieure de l'horizon). Limite très diffuse, plane.

Bw₃ (195-230, z) : Très humide, rouge (2,5 YR 4/6-4/8) avec de nombreuses taches rouge jaunâtre, grossières, diffuses, peu contrastées (ensemble bariolé). Relativement compact et très friable. Structure dominante polyédrique fine, seconde phase plus argileuse constituée de petits polyèdres rouge jaunâtre repris en masse. Pores tubulaires fins peu abondants à rares. Racines fines rares.

Observations complémentaires : Premières conclusions de l'étude de la macrofaune (méthode TSBF modifiée, 5 blocs 25x25x50 cm) réalisée le 26.04.95

Activité biologique intense avec notamment : Traces diverses notamment loges, galeries, meules de champignons, turrículos et petites déjections noires (2 à 4 mm) ; termites gris petits et moyens (les moyens sont champignonistes) ; grosses et petites fourmis noires.

PROFIL RON 3

Localisation : Station Écologique IBGE

Végétation : Campo sujo

Éléments de Géomorphologie : Plateau à surface irrégulière, pente de 8 à 10 %

Hydrologie : Après de fortes pluies, présence d'un filet d'eau à 3 m du profil (source résurgente à 300 m)

Sol : Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)

A (0-12) : Frais, brun rougeâtre (5 YR 4/4). Peu compact, très friable, peu cohérent. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires fins abondants, volume des vides entre agrégats assez important. Racines fines très abondantes, racines moyennes peu abondantes, à orientation sub-horizontale, formant un chevelu assez dense notamment dans les 15 premiers centimètres ; quelques racines grossières. Turrículos nombreux, petits et moyens (jusqu'à 1 cm de diamètre), aucun individu observé ; présence de petites fourmis noires. Limite graduelle horizontale.

AB (12-30) : Frais, brun rougeâtre à rouge jaunâtre (5 YR 4/4-4/6). Les caractéristiques de compaction, structure et porosité restent inchangées.

BA (30-55) : Frais, rouge jaunâtre (5 YR 4/6-4/8). Compact, très friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires fins abondants, volume des vides entre agrégats assez important. Racines horizontales fines abondantes et moyennes peu abondantes. Quelques grains de quartz de 2 à 3 mm de diamètre. Turrículos petits et moyens encore nombreux. Limite graduelle légèrement ondulée.

Bw₁ (55-95) : Légèrement humide, rouge jaunâtre (5 YR 5/8) avec deux types de taches ; d'une part, taches brunes peu nombreuses, moyennes, ovoïdes, aux limites peu nettes et d'autre part taches rougeâtres, rares, petites aux limites assez nettes. Compact (un peu moins cependant que l'horizon précédent), très friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires fins abondants, volume des vides entre agrégats assez important. Racines horizontales fines peu abondantes, quelques racines moyennes. Grains de quartz de 2 à 3 mm de diamètre assez nombreux. Rares nodules rouges (0,5 mm). Turrículos moyens peu nombreux ; présence de petites fourmis noires longiformes, champignonnistes, ayant formé des galeries (1 à 2 mm de diamètre) et une petite meule de 4 cm de diamètre. A 60 cm, présence d'une cavité (10 x 3 x 10 cm) vide, sans doute d'origine biologique, à laquelle semble arriver par le haut un conduit d'un centimètre de diamètre. Limite diffuse légèrement ondulée.

Bw₂ (95-140) : Humide, rouge légèrement jaunâtre (5 YR 5/8-2,5 YR 4/8) avec des taches rouges moyennes à grossières, ovoïdes aux limites très peu nettes, peu nombreuses, certaines sont en voie d'induration, quelques taches brunes et de rares petites taches jaunâtres. Peu compact, très friable. Structure polyédrique fine, très léger débit polyédrique. Pores tubulaires fins peu abondants, volume des vides entre agrégats peu important. Racines horizontales fines très peu abondantes, racines moyennes très rares. Nodules rouges peu abondants (0,5 à 1 cm). Petits grains de quartz assez nombreux. Quelques petites galeries mais aucun individu. Présence d'un gros turrículo (φ 1 cm) vertical repris par la macrofaune (sans doute fourmis et/ou termites) et par de fines racines. Limite diffuse ondulée.

Bw₃ (140-170) : Humide, rouge (2,5 YR 4/8) avec de rares petites taches jaunâtres. Peu compact, très friable. Apparemment deux phases, un ensemble nettement dominant à structure polyédrique fine et une seconde phase plus argileuse à structure polyédrique sub-anguleuse fine à moyenne, reprise en masse. Pores tubulaires fins peu abondants. Racines fines très peu nombreuses. Nodules rouges violets moyens rares. Limite horizontale diffuse.

Bw₄ (170-230, z) : Très humide, rouge (2,5 YR 4/8-4/6) avec de rares petites taches jaunâtres. Peu compact, très friable. Structure polyédrique fine, très léger débit polyédrique. Pores tubulaires fins peu abondants. Racines fines rares. Entre 185 et 210 cm de profondeur, réseau de galeries tapissées et présence de petits termites gris (3 à 4 mm de long).

Observations complémentaires : Premières conclusions de l'étude de la macrofaune (méthode TSBF modifiée, 5 blocs 25x25x50 cm) réalisée le 02.05.95

Activité biologique intense avec notamment : Traces diverses notamment loges et galeries ; termites gris petits et moyens ; petites fourmis noires ; petites fourmis ocres longiformes ; petites fourmis noires à abdomen zébré.

PROFIL RON 4

Localisation : Station Écologique IBGE

Végétation : Campo limpo (début d'évolution vers un Campo sujo)

Éléments de Géomorphologie : Plateau à surface irrégulière, pente de 10 à 15 %, fosse pédologique située dans le dernier quart de la pente

Sol : Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

A (0-10) : Frais, Brun foncé (7,5 YR 5/8). Peu compact, friable. Structure polyédrique fine devenant prismatique moyenne à grossière à l'état sec. Cohésion forte. Pores fins tubulaires abondants, volume des vides entre agrégats important. Racines horizontales fines très abondantes et moyennes peu abondantes formant un chevelu assez dense, de rares racines grossières verticales (pivots). Nombreux turricules bien différenciés de taille moyenne (0,5 à 1 cm de diamètre) malgré l'absence d'individu. Certains de ces turricules sont suffisamment agés pour être repris par des racines fines. Présence de petites fourmis noires et de quelques larves de coléoptères. Limite assez nette légèrement ondulée.

AB (10-20) Frais, rouge jaunâtre (5 YR 4/6). Compact, friable. Structure polyédrique fine à moyenne. Limite peu nette graduelle.

BA (20-35) : Frais, rouge jaunâtre (5 YR 4/6 à 5 YR 5/8) avec deux types de taches ; D'une part, taches brunes, petites à moyennes, peu nombreuses, ovoïdes aux limites peu nettes et, d'autre part, rares taches rouges, petites, ovoïdes, aux limites peu nettes ; ces deux types de taches sont d'un assez bon contraste. Très compact, friable. Structure polyédrique fine à moyenne. Pores fins tubulaires peu abondants, légère porosité de taille moyenne d'origine biologique, volume des vides entre agrégats faible. Racines horizontales fines abondantes et moyennes peu abondantes. Quelques rares nodules rouges violets de taille moyenne. Nombreuses galeries millimétriques tapissées ou non, présence de petites fourmis noires et d'une loge grossière contenant une meule de champignons ; Turricules de toutes tailles. Limite nette (cf compaction et cohésion) ondulée.

Bw₁ (35-75) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8) avec de petites taches rouge foncé, ovoïdes, peu nombreuses aux limites peu nettes, certaines en voie d'induration. Compact, friable. Structure polyédrique fine, léger débit polyédrique. Pores fins tubulaires très abondants, légèrement lisses, volume des vides entre agrégats peu important. Racines horizontales fines peu abondantes, quelques racines moyennes. Rares charbons de taille moyenne. Nodules rouges violets de taille moyenne, peu indurés, peu nombreux. Quelques galeries millimétriques tapissées, aucun individu. Limite diffuse légèrement ondulée.

Bw₂ (75-105) : Légèrement humide, rouge (2,5 YR 4/8) avec des taches rouge foncé. Compact, friable. Structure polyédrique fine. Limite diffuse ondulée.

Bw₃ (105- 155) : Humide, rouge (2,5 YR 4/8) avec deux types de taches ; d'une part, rares taches jaunâtres, petites et, d'autre part, taches rouge foncé, de structure différente, moyennes, ovoïdes, aux limites nettes ; présence également d'une tache brune, plus grossière (7x4 cm, orientation du grand axe horizontale). Compact, friable. Structure dominante polyédrique fine, léger débit polyédrique. Présence d'une seconde phase peu nette et peu développée formée par des zones agrégées plus compactes et légèrement plus rouges. Pores fins tubulaires abondants, volume des vides entre agrégats peu important. Racines horizontales fines très peu abondantes. Quelques racines moyennes décomposées. Charbons de taille moyenne peu nombreux. Quelques quartz (sables). Nodules rouges violets de taille moyenne abondants (surtout dans la partie inférieure de l'horizon). Rares galeries millimétriques tapissées, aucun individu. Limite très diffuse ondulée.

Bw₄ (155-175) : Humide, rouge (2,5 YR 4/8). Compact, friable. Présence de deux phases bien distinctes, en proportions quasiment équivalentes. Une phase polyédrique sub-anguleuse fine à moyenne, rouge et une phase microagrégée rouge jaunâtre apparemment plus argileuse. Ces deux phases sont juxtaposées, de contraste faible. Pores fins tubulaires abondants, volume des vides entre agrégats peu important. Racines fines rares. Nodules rouges de taille moyenne peu abondants, contraste très faible avec la matrice. Aucune trace d'activité biologique. Limite horizontale diffuse.

Bw₅ (175- 210, z) : Très humide, rouge (2,5 YR 4/6). Deux phases distinctes. Un premier ensemble dominant, très compact, à structure polyédrique sub-anguleuse fine à moyenne. Une seconde phase formée par des zones microagrégées, plus argileuses (?), compactes, reprises dans la masse de la première phase. Pores fins tubulaires peu abondants, volume des vides entre agrégats peu important à absent (dans les zones indurées). Racines fines très rares. Présence de petits grains de quartz.

Observations complémentaires : Premières conclusions de l'étude de la macrofaune (méthode TSBF modifiée, 5 blocs 25x25x50 cm) réalisée le 11.04.95

Activité biologique peu intense avec notamment : Traces diverses telles que loges, meule de champignons, crottes noires aplaties (= 5 mm), galeries, nombreux turricules de taille moyenne ; vers de terre (individus en quiescence) ; petites fourmis noires longiformes ; petits termites gris

PROFIL RON 5

Localisation : Station Écologique IBGE

Végétation : Forêt galerie

Éléments de Géomorphologie : Tête du ruisseau Corrego, pente de 1 % vers l'axe de drainage

Sol : Latossolo Amarelo (LA)

Présence d'une litière de 1 à 2 cm d'épaisseur, composée essentiellement de petits débris de feuilles. Racines fines vivantes, extrêmement nombreuses, formant un chevelu racinaire très dense. Présence de cendres en surface (cf feu en octobre 94). Traces d'activité faunique importantes, matérialisées notamment par des remontées de matériau jaunâtre plus profond (sans doute de l'horizon 55-130).

A (0-16) : Frais. Brun foncé (10 YR 3/3). Peu compact, très friable. Structure polyédrique fine bien développée. Pores tubulaires fins abondants ; volume des vides entre agrégats très important. Racines fines moyennement abondantes, racines moyennes peu abondantes, quelques racines grossières, orientation sub-horizontale. Quelques racines en décomposition. Charbons relativement abondants. Horizon apparaissant comme très brassé par l'activité biologique. Présence de petites fourmis noires. Limite peu nette, horizontale.

AB (16-30) : Frais. Brun foncé (10 YR 4/3). Très compact, friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires abondants ; volume des vides entre les agrégats important. Racines fines et moyennes peu abondantes, quelques racines grossières, orientation horizontale. Nombreux turricules moyens à grossiers, de deux types, de même couleur que le matériel environnant, bien individualisés. Limite assez nette, légèrement ondulée.

BA (30-50) : Frais. Brun (10 YR 5/3), légèrement plus jaunâtre dans la partie inférieure de l'horizon (10 YR 5/4). Très compact, friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires abondants ; volume des vides entre les agrégats important. Racines fines et moyennes peu abondantes, quelques racines grossières, orientation horizontale ; présence de racines grossières sub-verticales tubérisées. Encore quelques turricules bien individualisés, les plus petits s'agglomérant, formant un ensemble d'environ un centimètre de diamètre. Présence de petites termites. Limite ondulée assez nette.

Bw₁ (50-110) : Légèrement humide à humide (gradient selon la profondeur). Brun très pâle à jaune (10YR 7/4-7/6). Présence de deux types de taches, à structure polyédrique fine très nette, d'une part, taches blanchâtres petites à moyennes, peu abondantes à abondantes (la taille et la fréquence augmentent avec la profondeur), bien contrastées, aux limites assez nettes, d'autre part, taches rouges orange, moyennes à grossières, très peu abondantes, très bien contrastées, aux limites nettes. Compact, friable. Structure polyédrique très fine à fine. Pores tubulaires fins abondants ; volume des vides entre agrégats assez important. Racines moyennes et fines très peu abondantes, très rares racines grossières, sans orientation préférentielle, certaines sont tubérisées. Très rares charbons de taille moyenne. Quelques turricules bruns, de très rares blanchâtres, assez grossiers ($\varnothing \approx 1$ cm) ; galeries fines non tapissées remplies par un matériel blanc grumeleux ; présence de larves de coléoptères. Limite horizontale diffuse.

Bw₂ (110-155) : Humide. Brun très pâle (10 YR 7/4). Présence de deux types de taches, à structure polyédrique fine très nette, d'une part, taches blanchâtres moyennes, abondantes, bien contrastées, aux limites assez nettes, certaines sont légèrement indurées, d'autre part, rares taches orange-rouge, moyennes, très bien contrastées, aux limites nettes. Présence également d'une tache verticale, de couleur brun foncé, de dimensions 2 x 30 cm, formée par une racine grossière verticale décomposée. Compact, très friable. Structure polyédrique fine. Pores tubulaires fins abondants ; volume des vides entre agrégats peu important. Rares racines, de toute taille. Racines en décomposition et déjà décomposées. Quelques charbons de taille moyenne. A 140 cm, présence d'un élément grossier ($\varnothing 3$ cm) ovoïde compact et massif. Encore quelques turricules bruns, grossiers. Entre 140 et 145 cm de profondeur, galerie oblique d'un centimètre de diamètre remplie par un matériel blanchâtre (couleur de l'horizon sous-jacent). Limite diffuse, ondulée.

Bw₃ (155-200) : Humide à très humide (gradient selon la profondeur). Brun très pâle (10 YR 7/4 à 7/3). Taches grossières très rares, rouges orange. Quelques taches brunes de racines décomposées. Présence de taches moyennes à grossières, très abondantes, blanchâtres, très peu contrastées, aux limites peu nettes, formées par un matériel différent, massif, dur et peu poreux. Très compact, très friable. Structure polyédrique fine, très léger débit polyédrique moyen. Pores fins tubulaires peu abondants. Très rares racines, certaines en décomposition ou déjà décomposées. Très rares nodules rouges, grossiers (2 cm environ), peu indurés. A 158 cm et à 160 cm de profondeur, présence d'un élément grossier ($\varnothing 3$ cm) ovoïde compact et massif, un turricule de 1 cm de diamètre est accolé au second. Limite graduelle.

Bwg (200-220, z) : blanc, pseudo-gley, quelques schistes altérés de taille moyenne.

Observations complémentaires : Premières conclusions de l'étude de la macrofaune (méthode TSBF modifiée, 5 blocs 25x25x50 cm) réalisée le 05.04.95

Activité biologique intense avec notamment : Traces diverses et abondantes telles que loges, meule de champignons, crottes noires aplaties (≈ 5 mm), nombreux turricules de taille moyenne ; vers de terre (individus en quiescence et cocons) ; nombreuses larves de coléoptères ; petites fourmis rousses ; petites fourmis noires longiformes ; petits termites gris ; quelques diplopodes et chilopodes.

PROFIL BAR 1

Localisation : Station EMBRAPA / CPAC

Végétation : Cerrado pâturé

Éléments de Géomorphologie : Haut de plateau, pente de 7 à 8 %

Sol : Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

A (0-20) : Sec, brun rougeâtre (5 YR 4/4) dans la partie haute, un peu plus rouge dans la partie basse (2,5 YR 4/6). Compact, friable. Cohésion forte. Structure polyédrique bien développée fine à moyenne. Porosité fine abondante (pores tubulaires et vides entre les agrégats) sans orientation dominante. Racines fines horizontales, très abondantes, racines moyennes horizontales, peu abondantes, racines grossières rares, le tout formant un chevelu très peu dense. Quelques larves de coléoptères, de rares diplopodes. Entre 15 et 21 cm de profondeur, présence d'une loge de 15 cm de long aux parois finement lissées comprenant dans sa partie haute des débris végétaux assez grossiers, la partie inférieure apparemment délaissée est traversée par des racines fines. Présence de petits termites jaunes à rostre noir ayant formé des galeries tapissées d'environ 5 mm de diamètre. Termites de taille moyenne jaunes, ayant formé des galeries de 10 à 15 mm de diamètre tapissées d'un matériel très noir et entre 18 et 20 cm de profondeur, un nid regroupant des juvéniles filiformes blancs (individus d'environ 10 mm de long, étant donné le développement de leur abdomen). Limite nette horizontale.

AB (20-60) : Sec, rouge (2,5 YR 4/8) avec quelques rares petites taches rouge jaunâtre. Très compact, friable. Structure polyédrique très fine juxtaposée à une structure polyédrique anguleuse, plus compacte. Pores tubulaires fins abondants, porosité moyenne induite par l'activité faunique, volume des vides entre les agrégats important. Racines fines horizontales encore très abondantes, racines moyennes horizontales très peu abondantes, racines grossières occasionnelles. Quelques racines moyennes possèdent un revêtement externe jaune orange. Quelques quartz propres (sables) et de rares charbons fins. A 41 cm et 50 cm de profondeur, présence d'un élément ovoïde grossier (\varnothing 3 cm), massif et compact enkysté dans la masse. Déjections millimétriques brunes et lissées abondantes, d'autres plus rouges et plus allongées (2 mm) formant en partie la phase grumeleuse. Déjections noires allongées (6 à 7 mm de long). Présence d'une loge de 3 cm de diamètre contenant des éléments millimétriques juxtaposés (sans doute d'origine faunique), le tout formant une poche très peu compacte. Les deux types de termites cités précédemment sont également présents dans cet horizon. Limite diffuse, légèrement ondulée.

BA (60-85) : Sec, rouge (2,5 YR 4/8). Compact, friable. Structure polyédrique très fine dominante (quelques éléments fins, origine biologique suspectée) juxtaposée à une phase polyédrique anguleuse fine et plus compacte. Pores tubulaires très fins à fins abondants, volume des vides entre les agrégats important. Racines fines moyennement abondantes, quelques racines moyennes, racines grossières très rares. Certaines racines moyennes possèdent un revêtement externe jaune-orange ; d'autres, totalement décomposées, ne laissent apparaître que ce revêtement, le cylindre central ayant été remplacé par le sol environnant. Quelques quartz propres (sables). Présence de termites de taille moyenne, jaunes à tête marron, ayant formé des galeries tapissées (6 mm de diamètre) contenant des débris végétaux de quelques millimètres. Quelques larves de coléoptères. Limite diffuse plane.

Bw₁ (85-125) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8). Peu compact, très friable. Structure polyédrique très fine à fine, léger débit polyédrique grossier. Porosité tubulaire fine abondante, volume des vides entre agrégats peu abondant. Racines fines peu abondantes, racines moyennes rares, racines grossières verticales occasionnelles, certaines étant tubérisées. Quelques sables propres. Déjections millimétriques légèrement plus brunes relativement abondantes. Rares turricules grossiers ($\varnothing \approx 1$ cm) bien individualisés. Quelques galeries (4 à 5 mm de diamètre). De rares larves de coléoptères. Limite diffuse légèrement ondulée.

Bw₂ (125-165) : Légèrement humide, rouge (2,5 YR 4/8-4/6) avec deux types de taches, fines à moyennes ; d'une part, des taches rouges peu contrastées et très peu abondantes, et d'autre part, des taches plus nombreuses jaunâtres, formées par un matériel à structure microagrégée sub-anguleuse fine. Peu compact, très friable. Structure polyédrique fine dominante, juxtaposée à une seconde phase microagrégée sub-anguleuse fine, plus compacte. Porosité tubulaire fine encore abondante, volume des vides entre agrégats peu abondant. Racines fines peu abondantes, racines moyennes rares. Quelques grains de quartz propres (sables). Rares turricules grossiers ($\varnothing \approx 1$ cm) bien individualisés. Limite horizontale peu nette.

Bw₃ (165-195) : Humide, rouge (2,5 YR 4/6) ; présence de taches rouges de taille moyenne peu contrastées, relativement abondantes, développées indifféremment sur les deux types de phases. Présence également de taches plus ou moins jaunes à structure microagrégée sub-anguleuse fine. Compact, friable. Juxtaposition de deux structures, l'une polyédrique très fine (phase dominante), l'autre microagrégée sub-anguleuse fine. Pores tubulaires fins peu abondants, présence de vides entre agrégats, notamment dans la phase grumeleuse. Racines fines rares, racines moyennes occasionnelles. Limite ondulée peu nette.

Bw₄ (195-220, z) : Humide, rouge à rouge jaunâtre (2,5 YR 4/8 - 5 YR 5/8) avec de très rares taches brunes de taille moyenne, de nombreuses taches moyennes à grossières, rouges assez bien contrastées, formées le plus souvent dans un matériel à structure microagrégée sub-anguleuse fine. Présence également de quelques taches jaunâtres très peu contrastées. Compact, friable. Structure polyédrique très fine largement dominante juxtaposée à une structure microagrégée sub-anguleuse fine plus compacte. Pores tubulaires fins peu abondants, présence de vides entre agrégats. Racines fines un peu plus abondantes que précédemment.

PROFIL BAR 2

Localisation : Station EMBRAPA / CPAC

Végétation : Pâturage (*Brachiaria brizantha*)

Éléments de Géomorphologie : Haut de plateau, pente de 7 à 8 %

Sol : Latossolo Vermelho-Escuro (LE)

Ap (0-10) : Sec, brun rougeâtre (5 YR 4/5). Compact, friable. Cohésion des mottes forte. Effet labour net donnant lieu à une distinction Ados/Creux. Dans les ados : structure polyédrique moyenne à grossière, sous-structure polyédrique fine ; dans les creux : structure polyédrique fine (tendance à un aspect massif). Porosité fine abondante (pores tubulaires et vides entre les agrégats) sans orientation dominante. Racines fines et très fines horizontales, très abondantes, racines moyennes horizontales, peu abondantes, le tout formant un chevelu dense. Quelques larves de coléoptères, certaines dans des loges arrondies de quelques centimètres carrés, aux parois internes lissées. Petits termites gris ayant formé des galeries tapissées. Petites fourmis noires longiformes brillantes ayant formé un réseau de galeries millimétriques. Présence de restes d'un nid de termitière épigée, de turricules et déjections de petite taille. De la surface jusqu'à environ 20 cm de profondeur, présence d'un conduit de 2 cm de diamètre, d'abord sub-vertical (jusqu'à 15 cm de prof.) puis sub-horizontale ; à l'intérieur, quelques déjections ovales (5 x 3 mm). Limite nette ondulée.

AB (10-55) : Sec, brun rougeâtre à rouge (5 YR 3/5 à 2,5 YR 4/6) ; petite veinule plus orangée à 35 cm de profondeur. Compact, friable. Cohésion un peu moins forte que précédemment. Structure polyédrique de toute taille. Pores tubulaires fins abondants, porosité moyenne induite par l'activité biologique, volume des vides entre les agrégats important. Racines très fines très abondantes, racines fines abondantes, quelques racines moyennes, orientation préférentielle horizontale, quelques racines verticales possédant de nombreux poils absorbants. Racines carbonées rares. Quelques racines moyennes à cylindre central rouge possèdent un revêtement externe jaune orange. De rares charbons fins. Petits termites gris et galeries associées. A 20 cm de profondeur, cavité de 2x3 cm remplie de grains millimétriques rouges juxtaposés, sans doute d'origine biologique. Enfouissement, à 35 cm de profondeur, de boules (2 cm de \varnothing) de débris végétaux fragmentés. Turricules de taille moyenne bien individualisés. Limite diffuse, ondulée.

BA (55-90) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8). Un peu moins compact, friable. Cohésion d'ensemble faible. Structure polyédrique fine à moyenne. Porosité tubulaire fine très développée, volume des vides entre les agrégats important. Racines fines et très fines abondantes. Déjections noires aplaties et turricules bien individualisés. Limite diffuse plane.

Bw₁ (90-140) : Frais, rouge (2,5 YR 4/8), de rares petites taches un peu plus rouges, d'autres un peu plus jaunes, contraste très faible. Peu compact, très friable. Cohésion faible. Structure polyédrique fine très développée ("poudre de café"). Porosité tubulaire fine abondante, volume des vides entre agrégats peu abondant. Racines très fines et fines abondantes, orientation préférentielle horizontale, racines verticales relativement nombreuses. De rares charbons fins, quelques-uns plus grossiers (1 cm). Rares turricules grossiers ($\varnothing \approx 1$ cm) bien individualisés. A 120 cm de profondeur, présence d'une loge 3x7x5 cm aux parois internes lissées, en partie remplie par de petits agrégats et retraversée par de fines racines aux poils absorbants abondants. Limite diffuse légèrement ondulée.

Bw₂ (140-200) : Légèrement humide, rouge (2,5 YR 4/8) avec deux types de taches, fines à moyennes ; d'une part, de rares taches rouges peu contrastées, et d'autre part, des petites taches plus nombreuses jaunâtres également peu contrastées. Peu compact, très friable. Horizon non cohérent. Structure polyédrique fine, débit polyédrique grossier. Porosité tubulaire fine peu abondante, volume des vides entre agrégats pratiquement nul. Racines fines et très fines encore abondantes. Rares turricules grossiers ($\varnothing \approx 1$ cm) bien individualisés. Limite horizontale peu nette.

Bw₃ (200-220, z) : Humide, rouge à rouge jaunâtre (2,5 YR 4/8 - 5 YR 5/8) avec de nombreuses taches moyennes à grossières, rouges ou jaunes assez bien contrastées, formées le plus souvent dans un matériel à structure microagrégée sub-anguleuse fin. Peu compact, friable. Pas de cohésion. Structure polyédrique fine, débit grossier anguleux. Porosité générale faible (pores tubulaires), vides entre agrégats pratiquement inexistant. Racines fines peu abondantes.

ANNEXE III

MÉTHODES DE CARACTÉRISATION

GÉNÉRALE DES SOLS

I.- Caractérisations Physiques

❖ Analyse texturale

Un échantillon de 30 g de terre fine (< 2 mm), séchée à l'air, est ajouté à une solution d'eau oxygénée à 30 volumes ; le contact est maintenu , sans agitation, à froid pendant 24 heures. Une attaque progressive est conduite à chaud pendant une semaine avec ajout régulier d'eau oxygénée concentrée (110 volumes). Ce traitement permet la destruction de la matière organique. On procède ensuite à une agitation durant 4 heures, puis à la séparation des sables grossiers par tamisage à 50 µm, sous jet d'eau distillée. La fraction sableuse est séchée à l'étuve à 110°C et tamisée à 200 et 50 µm. Dans le cas où un reliquat de particules de taille < 50 µm apparaît, il est ajouté aux particules précédemment obtenues par tamisage humide. Le granulomètre automatique Sédigraph 5000 ET analyse les particules de taille inférieure à 50 µm et permet d'obtenir les proportions relatives de limons et d'argiles. Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire des Formations Superficielles au Centre ORSTOM de Bondy.

❖ Densité apparente

Six prélèvements en cylindre (H 10 cm x Ø 8,25 cm) sont effectués sur le terrain, de 10 cm en 10 cm, de la surface à 210 cm de profondeur ; le sol ainsi recueilli est pesé puis séché à l'étuve à 105 °C.

II.- Caractérisations chimiques

❖ pH dans l'eau et dans KCl N

Rapport 1 / 2,5 soit 10 g de sol tamisé à 2 mm et 25 ml de solution (H₂O ou KCl N). La mise en suspension est faite pendant une heure dans un flacon approprié bouché, en utilisant un agitateur de type culbuteur. Le flacon est ensuite laissé au repos pendant 30 minutes. On effectue la mesure en maintenant la suspension en agitation avec un pH-mètre Crison micropH 2001.

❖ Complexe d'échange

- Les cations échangeables sont désorbés par une solution de chlorure de barium à 0,1 M (I.S.O. 1991). Le culot est équilibré avec du BaCl₂ 0,0025 M. Les ions Ba²⁺ fixés sur les sites d'échanges sont alors déplacés par une solution de MgSO₄ à 0,02 M et précipitent sous la forme de BaSO₄. La mesure de la concentration résiduelle en Mg de cette solution permet de calculer la CEC. En raison de la faible force ionique de la solution de BaCl₂, l'échange se réalise au pH du sol. Cette méthode permet la détermination des cations échangeables Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺. Les dosages sont effectués au spectromètre d'absorption atomique.

- **Aluminium échangeable** : Pour l'extraction, 10 g d'échantillon sont mis en agitation dans 20 ml de solution KCl N, durant une heure, dans des tubes à centrifugeuse. Ce mélange est ensuite centrifugé 10 minutes à 4000 rpm. Le surnageant est filtré (Filtration lente) et récupéré dans une fiole jaugée de 100 ml. L'opération est répétée deux fois. Un rinçage du filtre avec du KCl N permet de compléter la fiole. Une aliquote est prélevée pour le dosage à l'ICP, les ions Al^{3+} sont dosés dans l'extrait sous forme de $AlCl_3$.

❖ **Analyses chimiques totales**

- CARBONE ET AZOTE

Le carbone et l'azote ont été dosés par voie sèche à l'aide du microanalyseur ANA 1500 Carlo Erba après combustion des échantillons finement broyés à 1040 °C et séparation chromatographique des gaz de combustion obtenus (CO_2 , N_2 , H_2O). Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire Matière Organique des Sols Tropicaux au Centre ORSTOM de Fort-de-France (Martinique).

- **ÉLÉMENTS MAJEURS** : Les déterminations des teneurs en Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, K, Mn, Na et P ont été réalisées selon les procédures appliquées au Laboratoire de Spectrochimie du CGS (Centre de Géochimie de la Surface, CNRS, Strasbourg). Le matériel ($\phi < 200 \mu m$) est mis en solution dans un solvant nitro-glycériné, après fusion au tétraborate de lithium. Les procédures analytiques sont décrites dans Samuel *et al.* (1985) et dans Samuel & Rouault (1983, 1990). Les éléments sont dosés par spectrométrie d'émission à étincelle haute tension ou par ICP.

❖ **Dissolutions sélectives pour Fe, Al et Si**

- EXTRACTION À L'OXALATE pH 3 (TAMM)

Extraction Al et Fe dans les complexes organiques et oxyhydroxydes non cristallisés. Extraction Al et Si dans les allophanes et imogolite.

Dans des pots à centrifugeuse, 1 g d'échantillon est mélangé à 40 ml de réactif oxalate 0,2 M pH 3 (acide oxalique - oxalate d'ammonium). Après agitation à l'obscurité pendant 4 heures, ce mélange est centrifugé durant 5 minutes à 5000 rpm puis filtré (filtration lente) dans des fioles de 100 ml. Les dosages sont réalisés à l'ICP après dilution au 1/5.

- EXTRACTION AU CITRATE-BICARBONATE-DITHIONITE (MEHRA-JACKSON)

Extraction spécifique des formes oxydes et oxyhydroxydes de fer. Extraction Fe et Al dans les complexes organiques et Al substitué dans les oxydes de fer. La gibbsite (oxyhydroxyde cristallisé d'Al) est peu attaquée, l'extraction est fonction de la stabilité du minéral.

Des tubes de centrifugation contenant 0,5 g d'échantillon, 25 ml de réactif (tricitrate de sodium - bicarbonate de sodium) et 0,5 g de dithionite sont placés au bain marie à 80 °C pendant une demi-heure. Ce mélange est centrifugé durant 10 minutes à 5000 rpm puis filtré (filtration lente). Ce traitement est répété deux fois. Le dosage est effectué à l'ICP après dilution au 1/10.

❖ **Diffraction de Rayons X**

Les DRX ont été effectuées sur la fraction inférieure à 2 μm pour l'identification des principaux minéraux (Gibbsite, goethite, hématite, kaolinite).

ANNEXE IV

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

DES SOLS

RON 1 (Cerradão / LE)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	Granulométrie (%)					A.	Limons	pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	Argiles		H ₂ O	KCl N		
A	0-15	5YR4/4	2,7	2,2	2,9	23,3	68,9	0,4	4,7	4,0	- 0,73	
AB	15-30	5YR4/6	1,2	1,0	1,5	17,1	79,2	0,2	4,9	4,2	- 0,62	
BA ₁	30-55	2,5YR4/8	4,4	1,6	5,6	17,8	70,4	0,3	4,9	4,5	- 0,39	
BA ₂	55-70	2,5YR4/8	3,0	2,2	3,8	15,2	75,8	0,3	5,2	5,1	- 0,17	
Bw ₁	70-140	2,5YR4/8-5/8	1,9	1,3	2,4	13,5	80,8	0,2	5,4	5,6	+ 0,16	
Bw ₂	140-170	2,5YR5/8	2,1	1,5	6,7	13,5	76,1	0,3	5,5	5,9	+ 0,43	
Bw ₃	170-210+	2,5YR5/8	1,6	1,2	5,3	16,0	75,8	0,3	5,5	6,0	+ 0,43	

Hz	Prof. (cm)	Cations échangeables				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM	
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺							
											(KCl N)	
											cmol / kg sol	
A	0-15	1,04	0,18	0,11	0,06	4,33	11,1	8,98	0,25	3,12	0,62	
AB	15-30	1,42	0,03	0,00	0,00	3,60	nd	9,25	0,24	3,08	0,59	
BA ₁	30-55	0,96	0,20	0,00	0,00	3,64	nd	9,16	0,17	2,96	0,55	
BA ₂	55-70	0,94	0,16	0,00	0,01	2,26	0,2	9,20	0,11	2,92	0,50	
Bw ₁	70-140	1,06	0,00	0,00	0,00	3,55	nd	9,11	0,09	2,99	0,49	
Bw ₂	140-170	0,76	0,00	0,00	0,07	3,55	nd	9,69	0,07	3,24	0,48	
Bw ₃	170-210+	1,02	0,00	0,00	0,00	3,51	0,1	10,10	0,07	3,39	0,46	

Hz	Prof. (cm)	Eléments totaux (%) (Fusion alcaline)					SiO ₂	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-15	24,4	37,4	12,1	2,2	0,2	0,7	20,0	5,5	20,0	-	54,5
BA ₂	55-70	24,4	39,7	12,5	2,3	0,2	0,6	19,5	4,5	17,5	8,5	50,0
Bw ₃	170-210+	20,9	41,8	13,1	2,3	0,2	0,5	17,5	4,0	17,5	-	61,0

RON 2 (Cerrado / LE)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	----- Granulométrie (%) -----					A.	Limons Argiles	pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	H ₂ O			KCl N		
A	0-15	5YR4/4-6	3,2	2,1	2,8	24,6	67,2	0,4	5,0	4,2	- 0,80	
AB	15-30	2,5YR4/6	2,7	2,2	2,9	20,9	71,4	0,3	5,1	4,5	- 0,59	
BA ₁	30-55	2,5YR4/6-4/8	3,3	2,1	4,7	17,0	72,8	0,3	5,3	5,2	- 0,09	
BA ₂	55-75	2,5YR4/8	4,9	3,2	3,7	17,5	70,8	0,3	5,4	5,5	+ 0,17	
Bw ₁	75-95	2,5YR4/8	3,5	2,3	8,5	16,0	69,7	0,4	5,5	5,7	+ 0,22	
Bw ₂	95-195	2,5YR4/8	2,6	2,1	6,7	15,3	73,4	0,3	5,5	5,9	+ 0,37	
Bw ₃	195-230+	2,5YR4/8	3,7	2,4	0,9	11,7	81,2	0,2	5,7	6,3	+ 0,61	

Hz	Prof. (cm)	----- Cations échangeables -----				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM			
		Ca ^{**}	Mg ^{**}	K ⁺	Na ⁺									
											----- (KCl N) -----			
											----- cmol / kg sol -----			
A	0-15	1,10	0,16	0,10	0,00	3,90	6,6	11,40	0,26	3,44	0,66			
AB	15-30	0,90	0,07	0,00	0,03	2,96	nd	10,58	0,22	3,17	0,60			
BA ₁	30-55	1,02	0,86	0,00	0,00	3,11	nd	10,35	0,16	3,01	0,54			
BA ₂	55-75	1,56	0,00	0,00	0,03	3,08	0,0	10,76	0,14	3,26	0,55			
Bw ₁	75-95	0,88	0,00	0,00	0,00	3,40	nd	10,66	0,12	3,18	0,51			
Bw ₂	95-195	1,12	0,03	0,00	0,00	3,52	nd	10,84	0,10	3,27	0,50			
Bw ₃	195-230+	0,18	0,00	0,00	0,00	2,16	0,0	10,62	0,09	3,55	0,50			

Hz	Prof. (cm)	----- Eléments totaux (%) (Fusion alcaline) -----					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Kl)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-15	21,0	38,3	14,1	2,0	0,2	0,5	13,0	6,0	17,5	7,5	56,0
BA ₂	55-75	21,7	40,0	14,7	2,1	0,2	0,5	15,0	7,5	15,5	-	62,0
Bw ₃	195-230+	21,4	39,7	15,9	2,3	0,2	0,5	11,5	7,0	17,0	6,0	58,5

RON 3 (Campo sujo / LV)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	----- Granulométrie (%) -----					Limons		pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	A.	Argiles	H ₂ O	KCl N		
A	0-12	5YR4/4	7,1	5,5	3,5	27,1	56,8	0,5	5,3	4,4	- 0,9	
AB	12-30	5YR4/4	8,9	4,5	2,6	26,0	58,0	0,5	5,2	4,7	- 0,5	
BA ₁	30-55	5YR4/6-5/8	6,2	3,2	3,6	20,8	66,2	0,4	5,2	5,0	- 0,3	
BW ₁	55-95	5YR5/8	6,0	3,7	5,4	18,1	66,8	0,4	5,3	5,4	+ 0,1	
BW ₂	95-140	5YR5/8	4,9	3,0	7,8	22,1	62,2	0,5	5,6	6,1	+ 0,5	
BW ₃	140-170	2,5YR4/8	4,5	2,8	7,4	21,3	64,0	0,5	5,8	6,5	+ 0,7	
BW ₄	170-230+	2,5YR4/8	4,7	2,9	2,8	20,3	69,2	0,3	5,9	6,6	+ 0,7	

Hz	Prof. (cm)	----- Cations échangeables -----				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺						
											(KCl N)
											cmol / kg sol
A	0-12	1,06	0,36	0,35	0,07	2,77	3,7	8,66	0,26	4,29	1,03
AB	12-30	0,55	0,00	0,13	0,05	2,61	nd	8,45	0,19	3,45	0,73
BA ₁	30-55	0,47	0,00	0,07	0,00	2,63	nd	7,96	0,16	3,17	0,73
BW ₁	55-95	0,45	0,00	0,05	0,00	2,70	0,0	8,25	0,12	3,07	0,67
BW ₂	95-140	0,53	0,00	0,03	0,00	2,77	nd	9,12	0,10	3,06	0,56
BW ₃	140-170	0,49	0,00	0,03	0,00	2,59	nd	8,92	0,11	2,63	0,50
BW ₄	170-230+	0,57	0,03	0,01	0,00	2,43	0,0	9,02	0,13	2,37	0,49

Hz	Prof. (cm)	----- Eléments totaux (%) (Fusion alcaline) -----					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Ki)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-12	21,9	36,9	13,6	2,2	0,3	0,6	13,0	10,0	14,0	-	63,0
BW ₁	55-95	22,4	38,7	13,9	2,2	0,2	0,6	11,0	8,5	13,5	-	67,0
BW ₄	170-230+	20,2	40,0	16,0	2,4	0,2	0,5	11,0	10,0	16,5	6,0	56,5

RON 4 (Campo limpo / LE)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	----- Granulométrie (%) -----					Argiles	pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	A.		H ₂ O	KCl N	
A	0-10	5YR4/4	9,0	6,3	4,2	33,0	47,4	0,8	5,2	4,4	- 0,8
AB	10-20	5YR4/6	3,9	4,2	3,7	37,7	50,5	0,8	5,1	4,6	- 0,5
BA ₁	20-35	5YR5/8	3,6	3,5	4,2	45,0	43,6	1,1	5,3	5,1	- 0,1
Bw ₁	35-75	2,5YR4/8	2,8	2,8	7,5	27,4	59,5	0,6	5,3	5,9	+ 0,6
Bw ₂	75-105	2,5YR4/8	4,1	3,2	8,8	25,0	58,9	0,6	5,8	6,4	+ 0,6
Bw ₃	105-155	2,5YR4/8	1,9	2,7	10,0	23,4	62,0	0,5	5,8	6,6	+ 0,8
Bw ₄	155-175	2,5YR4/8	2,0	2,4	4,3	18,2	73,1	0,3	6,0	6,5	+ 0,4
Bw ₅	175-210+	2,5YR4/6	1,9	3,1	6,7	24,7	63,7	0,5	6,0	6,5	+ 0,4

Hz	Prof. (cm)	----- Cations échangeables -----				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺						
----- cmol / kg sol -----											
A	0-10	1,18	0,39	0,34	0,01	2,90	4,7	8,78	0,35	3,84	0,95
AB	10-20	0,58	0,03	0,10	0,00	1,91	nd	8,56	0,39	3,76	0,84
BA ₁	20-35	0,92	0,03	0,07	0,08	2,43	nd	10,47	0,29	4,10	0,72
Bw ₁	35-75	0,68	0,03	0,03	0,00	2,58	0,0	10,62	0,18	3,71	0,60
Bw ₂	75-105	0,74	0,03	0,00	0,00	2,66	nd	10,82	0,15	3,65	0,56
Bw ₃	105-155	0,80	0,03	0,00	0,02	2,75	nd	11,20	0,13	3,57	0,53
Bw ₄	155-175	0,96	0,03	0,00	0,00	2,71	nd	11,81	0,16	2,94	0,51
Bw ₅	175-210+	0,86	0,07	0,00	0,00	2,88	0,0	11,05	0,16	2,22	0,38

Hz	Prof. (cm)	----- Eléments totaux (%) (Fusion alcaline) -----					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Kl)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-10	21,5	34,4	15,6	2,0	0,3	0,6	11,0	10,0	16,0	-	63,0
Bw ₁	35-75	21,7	38,3	16,6	2,2	0,3	0,6	11,0	13,0	13,0	-	63,0
Bw ₅	175-210+	26,3	36,2	16,4	2,0	0,2	0,7	11,0	13,5	16,5	5,5	53,5

RON 5 (Forêt galerie / LA)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	----- Granulométrie (%) -----					Limons		pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	A.	Argiles	H ₂ O	KCl N		
A	0-16	10YR4/1-4/2	4,0	3,9	1,8	27,6	62,6	0,5	4,8	3,9	- 0,9	
AB	16-30	10YR5/2	3,0	3,6	2,8	26,2	64,4	0,5	4,9	4,1	- 0,8	
BA ₁	30-50	10YR6/2-6/3	2,6	3,0	4,2	19,3	70,8	0,3	4,9	4,2	- 0,7	
Bw ₁	50-110	10YR7/3-7/4	2,0	2,8	4,8	19,1	71,5	0,3	4,9	4,6	- 0,4	
Bw ₂	110-155	10YR7/4	2,0	3,1	4,3	19,5	71,2	0,3	5,1	4,7	- 0,4	
Bw ₃	155-200	10YR7/4-8/3	1,6	2,8	2,4	18,6	74,5	0,3	5,1	4,8	- 0,4	
Bw ₆	200-220+	10YR8/2	1,4	2,6	2,9	18,2	74,9	0,3	5,2	5,0	- 0,2	

Hz	Prof. (cm)	----- Cations échangeables -----				CEC	Al ⁺⁺⁺ (KCl N)	CBD Fe ₂ O ₃ %	TAMM Fe ₂ O ₃ %	CBD Al ₂ O ₃ %	TAMM Al ₂ O ₃ %
		Ca ^{**}	Mg ^{**}	K ⁺	Na ⁺						
----- cmol / kg sol -----											
A	0-16	0,96	0,26	0,23	0,10	5,45	23,3	1,36	0,13	1,01	0,81
AB	16-30	0,33	0,05	0,03	0,00	3,26	nd	1,68	0,16	1,00	0,94
BA ₁	30-50	0,43	0,05	0,00	0,00	3,33	nd	1,70	0,11	0,86	0,78
Bw ₁	50-110	0,43	0,01	0,00	0,00	3,37	1,1	1,58	0,05	0,71	0,66
Bw ₂	110-155	0,43	0,05	0,00	0,00	3,30	nd	1,40	0,03	0,67	0,67
Bw ₃	155-200	0,41	0,01	0,00	0,00	3,32	nd	0,94	0,02	0,53	0,66
Bw ₆	200-220+	0,43	0,01	0,00	0,00	4,55	0,2	0,35	0,01	0,27	0,53

Hz	Prof. (cm)	----- Eléments totaux (%) (Fusion alcaline) -----					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Kl)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-16	27,8	40,1	3,0	2,1	0,2	0,7	18,0	8,5	10,0	-	63,5
Bw ₁	50-110	28,7	44,2	3,1	2,4	0,2	0,6	15,0	7,5	9,0	-	68,5
Bw ₆	200-220+	29,0	44,4	1,7	2,4	0,2	0,7	18,5	6,0	8,0	-	67,5

BAR 1 (Cerrado pâturé / LE)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	Granulométrie (%)					A.	Limons Argiles	pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	H ₂ O			KCl N		
A	0-20	5YR4/6	5,7	7,5	2,6	12,6	71,6	0,2	5,0	4,4	- 0,6	
AB	20-60	5YR5/8	5,2	7,1	1,8	13,6	72,4	0,2	5,3	4,6	- 0,6	
BA ₁	60-85	5YR5/8-2,5YR4/8	4,9	7,9	3,5	12,2	71,5	0,2	5,2	5,0	- 0,2	
Bw ₁	85-125	2,5YR4/8	5,8	7,9	3,0	11,6	71,6	0,2	5,3	5,4	+ 0,1	
Bw ₂	125-165	2,5YR4/8	5,2	7,7	2,3	13,1	65,7	0,3	5,6	5,9	+ 0,3	
Bw ₃	165-195	2,5YR4/8	6,0	10,5	5,8	19,6	58,0	0,4	5,6	6,2	+ 0,6	
Bw ₄	195-220+	5YR5/8-2,5YR4/8	5,5	9,2	17,1	19,6	48,6	0,8	5,9	6,4	+ 0,6	

Hz	Prof. (cm)	Cations échangeables				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺						
----- cmol / kg sol -----											
								Fe ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %
(KCl N)											
A	0-20	0,41	0,08	0,00	0,17	2,99	2,6	9,74	0,13	2,45	0,51
AB	20-60	0,34	0,00	0,00	0,13	3,64	nd	9,41	0,16	2,53	0,58
BA ₁	60-85	0,32	0,00	0,00	0,00	3,59	nd	9,76	0,13	2,65	0,58
Bw ₁	85-125	0,46	0,00	0,00	0,03	3,89	0,2	9,29	0,11	2,50	0,54
Bw ₂	125-165	0,40	0,00	0,00	0,00	4,01	nd	9,37	0,09	2,77	0,51
Bw ₃	165-195	0,48	0,00	0,00	0,02	2,12	nd	8,80	0,08	2,61	0,51
Bw ₄	195-220+	0,50	0,00	0,00	0,00	2,36	0,0	9,98	0,07	3,13	0,52

Hz	Prof. (cm)	Eléments totaux (%) (Fusion alcaline)					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Kl)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A	0-20	29,8	36,0	12,4	2,1	0,2	0,8	22,0	9,5	16,0	9,5	43,0
Bw ₁	85-125	30,2	36,7	12,7	2,2	0,2	0,8	19,0	6,5	16,0	9,5	49,0
Bw ₄	195-220+	28,8	35,2	13,1	2,3	0,2	0,8	14,5	10,0	18,0	7,5	50,0

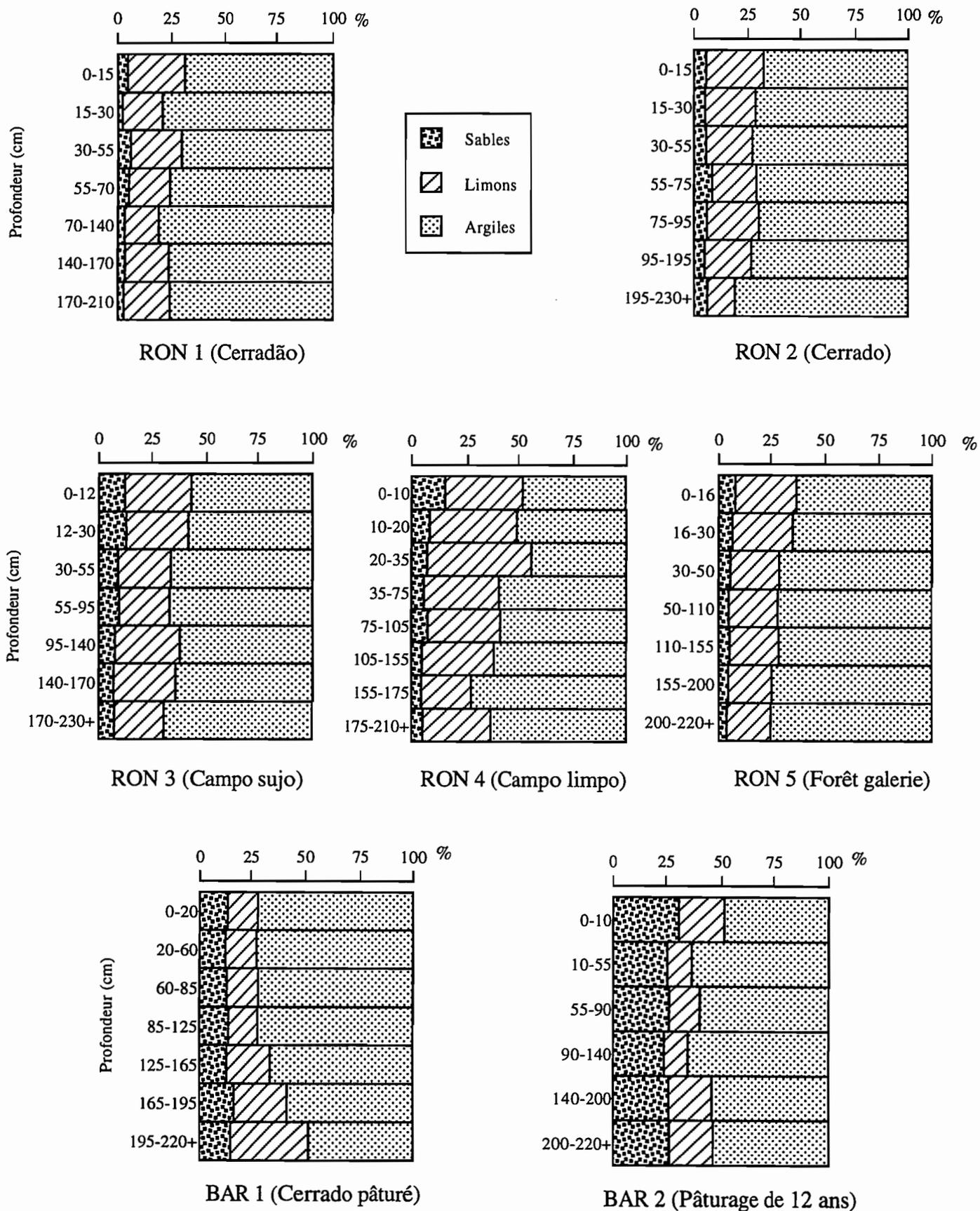
BAR 2 (Pâturage de 12 ans / LE)

Hz	Prof. (cm)	Couleur Munsell (Sol sec)	----- Granulométrie (%) -----					A.	Limons		pH (1:2,5)		Δ pH
			S.G.	S.F.	L.G.	L. F.	Argiles		H ₂ O	KCl N			
A _p	0-10	5YR4/4	16,6	14,1	4,8	15,6	48,8	0,4	5,8	4,7	- 1,1		
AB	10-55	5YR3/4-2,5YR4/4	15,8	10,0	1,5	9,3	63,5	0,2	5,7	4,9	- 0,8		
BA ₁	55-90	2,5YR4/7-4/8	12,3	14,2	3,7	9,9	59,9	0,2	5,3	5,1	- 0,1		
Bw ₁	90-140	2,5YR4/8	11,3	13,0	3,0	7,6	65,1	0,2	5,5	5,7	+ 0,2		
Bw ₂	140-200	2,5YR4/8	12,5	13,9	6,0	13,1	55,6	0,3	5,5	6,1	+ 0,5		
Bw ₃	200-220+	2,5YR4/8	11,4	15,1	3,7	15,8	54,0	0,4	5,5	6,4	+ 0,8		

Hz	Prof. (cm)	----- Cations échangeables -----				CEC	Al ⁺⁺⁺	CBD	TAMM	CBD	TAMM
		Ca ^{**}	Mg ^{**}	K ⁺	Na ⁺						
											(KCl N)
											cmol / kg sol -----
A _p	0-10	2,32	0,99	0,03	0,02	3,37	0,7	8,55	0,20	2,55	0,54
AB	10-55	0,92	0,36	0,00	0,03	1,78	nd	8,52	0,16	2,35	0,52
BA ₁	55-90	1,06	0,05	0,00	0,00	1,62	0,2	8,70	0,10	2,31	0,49
Bw ₁	90-140	0,60	0,03	0,00	0,02	1,94	nd	8,98	0,09	2,39	0,48
Bw ₂	140-200	0,50	0,03	0,00	0,03	2,66	nd	9,14	0,07	2,41	0,43
Bw ₃	200-220+	0,62	0,00	0,00	0,03	2,07	0,0	8,97	0,07	2,67	0,45

Hz	Prof. (cm)	----- Eléments totaux (%) (Fusion alcaline) -----					SiO ₂ Al ₂ O ₃ (Kl)	Composition minéralogique de la fraction < 200 μm (%)				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅		Argiles	Q. + Feldsp.	Goethite	Hématite	Gibbsite
A _p	0-10	42,6	26,8	10,2	1,6	0,2	1,6	16,5	15,0	15,0	10,0	43,5
BA ₁	55-90	40,5	30,1	11,4	1,9	0,2	1,3	18,5	23,5	12,5	7,5	38,0
Bw ₃	200-220+	36,5	31,8	12,7	2,0	0,2	1,1	13,0	25,5	15,5	-	46,0

Squelette granulométrique des sols étudiés



pH des sites de la Station expérimentale Embrapa (Échantillons moyens - Essais/ LE)

Prof. (cm)	pH				
	BAR 1 m	BAR 2 m	BAR 3 m	BAR 4 m	BAR 5 m
0-10	4,87	5,32	5,94	5,77	5,76
10-20	4,88	5,62	5,68	5,77	5,73
20-30	5,00	5,35	5,51	5,79	5,78
30-50	5,09	5,03	5,57	5,60	5,80
50-70	5,14	5,37	5,42	5,61	5,51

Densité apparente

Prof. (cm)	Densité apparente (g/cm ³)													
	RON 1		RON 2		RON 3		RON 4		RON 5		BAR 1		BAR 2	
	moy.	e.c.	moy.	e.c.	moy.	e.c.	moy.	e.c.	moy.	e.c.	moy.	e.c.	moy.	e.c.
0-10	0,7	0,03	0,7	0,03	0,8	0,03	0,8	0,03	0,6	0,04	0,9	0,05	1,0	0,04
10-20	0,9	0,01	0,8	0,03	0,9	0,02	0,8	0,04	0,7	0,06	1,0	0,04	1,0	0,06
20-30	0,9	0,01	0,8	0,04	0,9	0,02	0,9	0,05	0,8	0,03	1,0	0,08	1,1	0,01
30-40	0,9	0,03	0,9	0,01	0,9	0,02	0,8	0,02	0,9	0,04	1,0	0,03	1,0	0,03
40-50	0,8	0,03	0,9	0,03	0,9	0,01	0,8	0,02	0,8	0,03	1,0	0,05	1,0	0,02
50-60	0,9	0,02	0,8	0,04	0,9	0,02	0,8	0,03	0,8	0,02	0,9	0,03	1,0	0,04
60-70	0,8	0,02	0,8	0,09	0,9	0,03	0,8	0,02	0,8	0,01	0,9	0,05	0,9	0,04
70-80	0,8	0,03	nd	nd	0,9	0,03	0,8	0,03	0,8	0,02	0,9	0,03	0,9	0,02
80-90	0,8	0,02	0,7	0,36	0,9	0,03	0,8	0,03	0,8	0,03	0,9	0,03	0,9	0,01
90-100	0,8	0,03	0,8	0,03	0,9	0,04	0,8	0,02	0,8	0,01	0,9	0,03	1,0	0,10
100-110	0,8	0,02	0,9	0,02	0,9	0,02	0,8	0,02	0,8	0,02	0,9	0,05	0,9	0,02
110-120	0,8	0,02	0,7	0,36	0,8	0,02	0,8	0,04	0,8	0,03	0,9	0,02	0,9	0,05
120-130	0,8	0,03	0,7	0,36	0,8	0,03	0,8	0,03	0,8	0,02	0,9	0,05	0,9	0,01
130-140	0,8	0,01	0,8	0,04	0,9	0,03	0,8	0,05	0,8	0,03	0,9	0,04	0,9	0,03
140-150	0,8	0,01	0,8	0,02	0,9	0,03	0,8	0,02	0,8	0,03	0,9	0,03	0,9	0,02
150-160	0,8	0,04	0,8	0,02	0,8	0,02	0,8	0,04	0,8	0,02	0,9	0,04	0,9	0,01
160-170	0,8	0,02	0,8	0,02	0,9	0,03	0,8	0,04	0,8	0,04	0,9	0,02	0,9	0,04
170-180	0,8	0,03	0,8	0,04	0,9	0,03	0,9	0,04	0,7	0,03	0,9	0,02	0,9	0,04
180-190	0,8	0,01	0,8	0,02	0,9	0,05	0,9	0,06	0,8	0,05	0,9	0,04	0,9	0,04
190-200	0,8	0,02	0,8	0,04	0,9	0,03	1,0	0,08	0,7	0,04	0,9	0,02	0,9	0,01
200-210	0,8	0,03	0,9	0,03	0,9	0,03	1,0	0,05	0,8	0,04	0,9	0,02	0,9	0,02

Teneurs en carbone, azote et rapports C/N

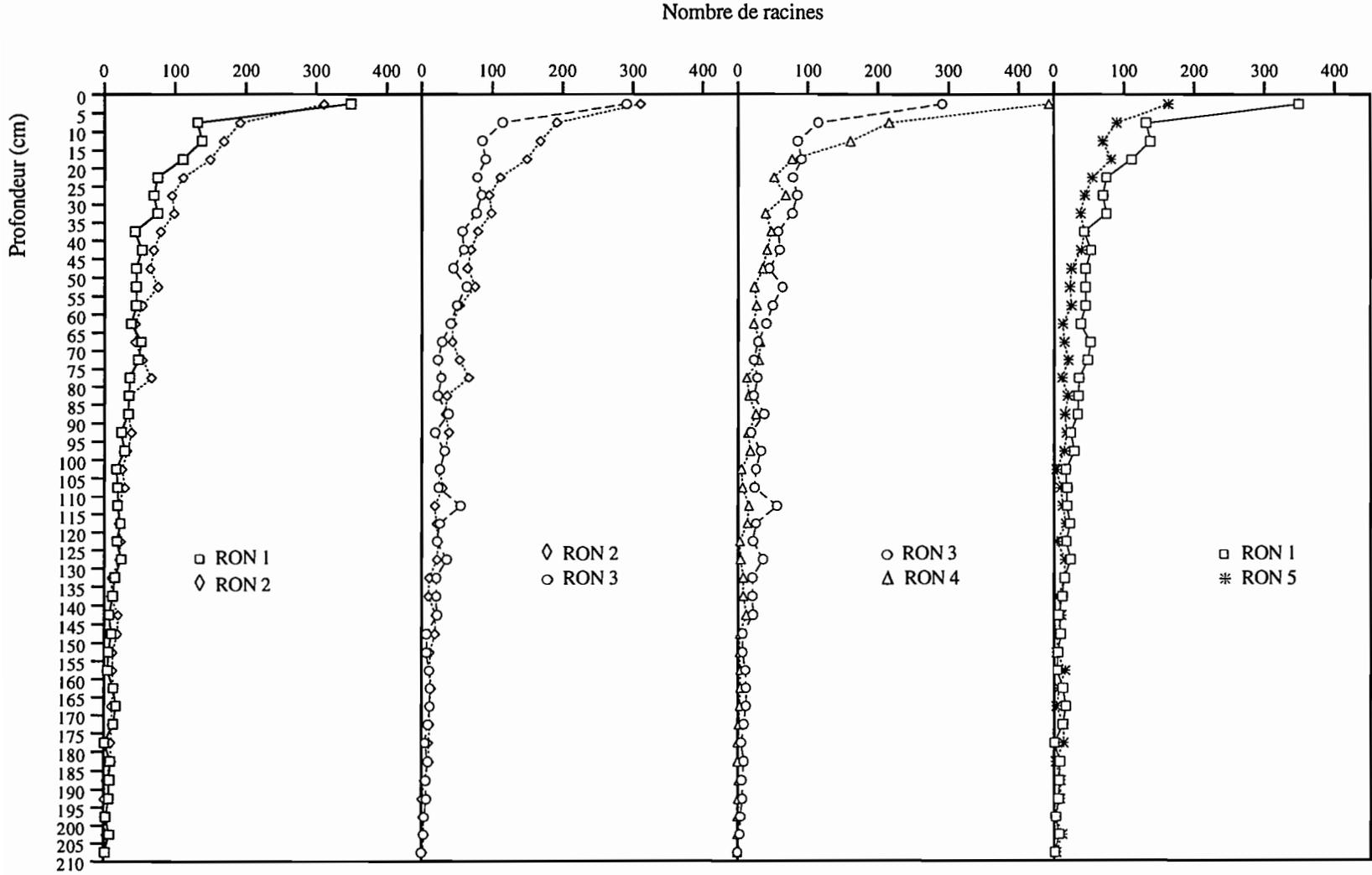
Prof. (cm)	RON 1			RON 2			RON 3			RON 4			RON 5			BAR 1			BAR 2		
	C ‰	N ‰	C/N																		
0-10	42,3	2,2	19,1	33,5	1,8	18,4	42,4	2,3	18,3	48,2	2,6	18,8	63,2	3,6	17,3	24,8	1,4	18,0	29,1	1,6	17,8
10-20	25,8	1,4	19,1	26,5	1,3	20,3	33,1	1,6	20,6	41,0	2,1	19,9	36,9	2,2	16,8	23,2	1,2	20,2	25,1	1,4	18,6
20-30	20,7	1,1	19,2	23,1	1,2	20,2	30,3	1,5	20,0	32,0	1,7	19,2	27,5	1,6	17,5	20,9	1,1	19,7	19,8	1,1	18,8
30-40	19,0	0,9	21,1	18,8	0,8	23,2	25,9	1,3	19,8	22,1	1,1	20,3	20,2	1,1	18,0	21,7	1,0	22,8	16,2	0,9	18,9
40-50	16,4	0,7	22,6	15,3	0,7	23,3	23,0	1,1	20,7	20,1	0,9	21,4	16,3	0,9	18,9	18,7	0,8	22,9	13,8	0,7	19,5
50-60	13,9	0,6	22,8	14,5	0,6	25,1	19,5	0,9	20,7	17,6	0,9	20,8	15,3	0,9	17,7	16,8	0,7	23,3	12,8	0,7	18,5
60-70	11,7	0,5	22,8	12,5	0,5	25,8	16,5	0,8	20,5	16,7	0,8	21,5	13,2	0,7	18,7	16,7	0,7	24,6	12,9	0,6	20,5
70-80	10,1	0,4	23,5	11,9	0,5	24,5	15,0	0,7	21,3	15,4	0,7	21,4	11,3	0,6	18,0	14,3	0,6	23,0	11,4	0,6	19,7
80-90	10,6	0,5	23,3	11,7	0,5	25,5	14,2	0,7	21,1	16,3	0,7	24,5	10,6	0,6	18,8	13,6	0,6	22,3	11,1	0,5	21,1
90-100	10,3	0,4	26,6	11,0	0,4	26,9	12,3	0,6	21,4	13,5	0,6	23,3	9,7	0,5	18,7	13,2	0,6	23,1	10,0	0,5	19,5
100-110	10,6	0,4	26,6	10,6	0,4	27,7	11,7	0,5	22,7	12,3	0,6	22,2	10,1	0,5	20,3	12,2	0,5	22,5	11,3	0,5	22,1
110-120	9,9	0,4	25,5	10,6	0,3	30,9	11,1	0,5	22,8	11,8	0,5	23,2	9,8	0,5	18,2	11,9	0,5	23,3	9,9	0,5	20,5
120-130	9,2	0,4	25,8	10,5	0,4	25,6	12,5	0,5	27,3	11,3	0,5	24,0	9,4	0,6	16,9	11,0	0,5	20,7	9,4	0,4	21,2
130-140	9,3	0,4	24,5	9,9	0,4	25,1	9,3	0,4	25,9	11,5	0,5	25,7	9,5	0,5	20,8	13,0	0,5	27,5	9,3	0,5	19,4
140-150	9,3	0,4	24,6	9,5	0,3	27,5	9,0	0,2	48,6	10,4	0,4	24,6	10,2	0,5	22,2	9,8	0,4	23,4	9,0	0,5	19,8
150-160	8,6	0,3	27,9	9,2	0,3	31,6	9,8	0,3	34,2	9,3	0,4	26,2	11,5	0,5	22,6	10,2	0,4	24,2	9,1	0,4	23,5
160-170	8,0	0,3	25,8	9,4	0,4	26,0	8,7	0,4	23,0	8,7	0,3	28,2	10,5	0,5	20,3	10,2	0,4	24,7	8,8	0,4	24,4
170-180	8,7	0,3	26,9	9,6	0,3	32,0	8,8	0,3	26,5	9,3	0,2	45,5	10,0	0,5	20,7	10,3	0,4	23,7	8,5	0,4	20,5
180-190	8,2	0,3	25,3	10,4	0,3	34,7	7,0	0,3	28,3	8,0	0,2	34,4	8,6	0,4	19,5	11,6	0,5	24,7	8,9	0,4	23,4
190-200	8,8	0,4	25,5	9,3	0,3	29,7	7,3	0,3	26,5	8,2	0,2	34,0	8,2	0,4	22,5	8,3	0,4	21,5	7,8	0,4	19,0
200-210	8,2	0,3	26,5	9,4	0,3	29,1	7,0	0,2	34,8	8,6	0,3	29,8	9,4	0,4	22,0	7,8	0,4	22,2	7,2	0,5	14,4

Prof. (cm)	BAR 1 m			BAR 2 m			BAR 3 m			BAR 4 m			BAR 5 m		
	C ‰	N ‰	C/N												
0-10	33,3	1,8	18,5	28,9	1,5	19,5	31,2	1,6	20,1	24,5	1,2	20,5	24,0	1,2	20,1
10-20	26,7	1,3	19,9	25,0	1,5	16,6	29,3	1,4	20,5	24,2	1,1	21,8	23,8	1,2	20,3
20-30	22,0	1,0	21,0	19,5	0,9	20,8	23,8	1,1	20,8	22,0	1,0	22,0	21,2	1,0	21,5
30-50	17,2	0,8	22,2	15,1	0,7	22,3	17,9	0,8	22,9	16,2	0,7	23,2	14,4	0,6	22,6
50-70	13,9	0,6	23,3	12,6	0,5	24,9	14,1	0,6	24,0	12,7	0,5	26,1	10,8	0,4	24,5

ANNEXE V

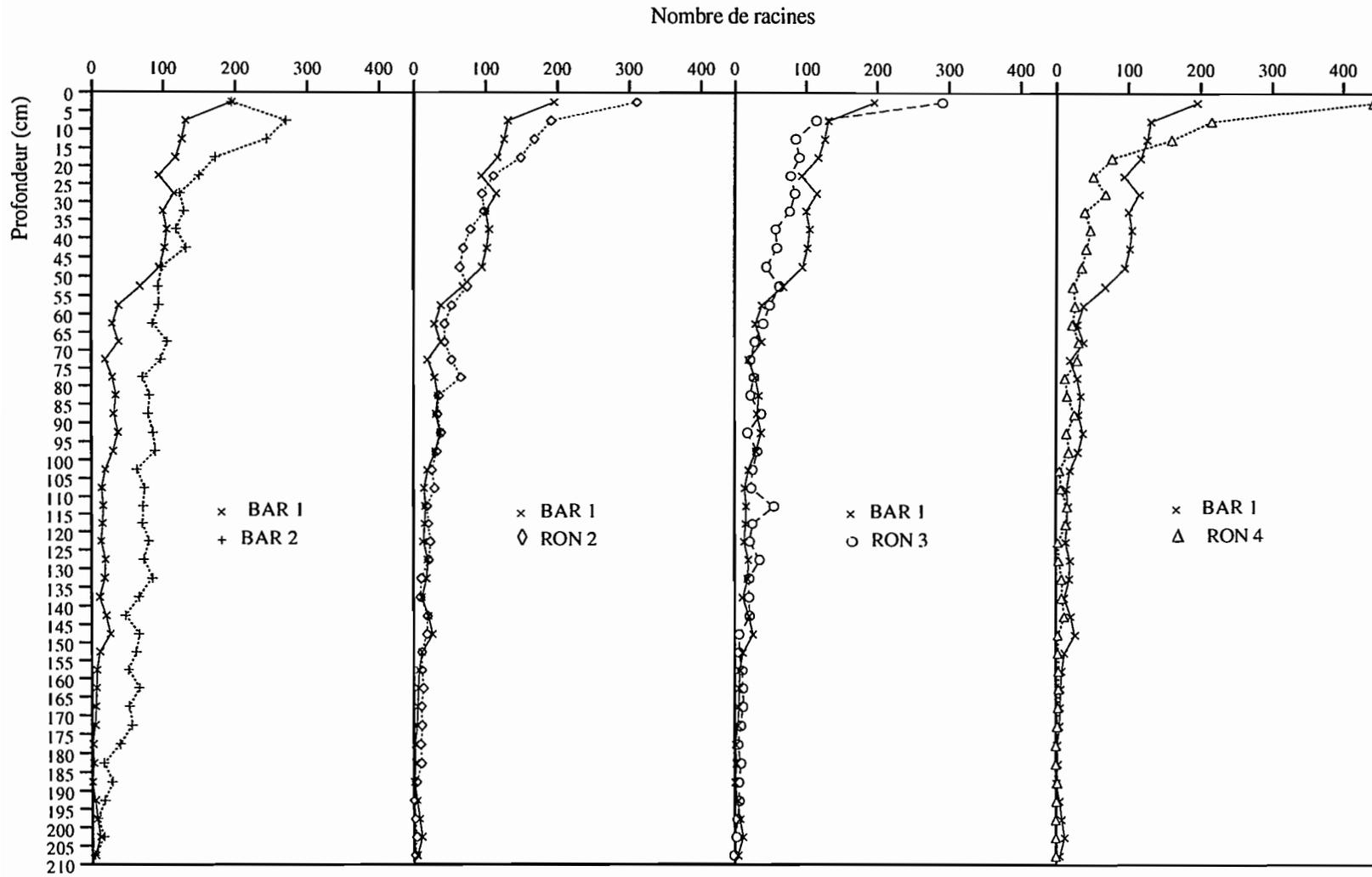
PROFILS RACINAIRES

Répartition des racines (sur 1 m de large) en fonction de la profondeur



RON 1 : Cerradão / LE RON2 : Cerrado / LE RON 3 : Campo sujo / LV RON 4 : Campo limpo / LE RON 5 : Forêt galerie / LA

Répartition des racines (sur 1 m de large) en fonction de la profondeur



BAR 1 : Cerrado pâturé / LE BAR 2 : Pâturage de 12 ans / LE RON 2 : Cerrado / LE RON 3 : Campo sujo / LV RON 4 : Campo limpo / LE

ANNEXE VI

TENEURS ($\mu\text{g P /g sol}$) et RÉSERVES (kg P /ha)

EN PHOSPHORE TOTAL,

ORGANIQUE ET INORGANIQUE

Teneurs en Phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) ($\mu\text{g} / \text{g} \text{ sol}$)

Hz (cm)	RON 1			RON 2		
	Po	PI $\mu\text{g} / \text{g} \text{ sol}$	Pt	Po	PI $\mu\text{g} / \text{g} \text{ sol}$	Pt
0-10	147,02 ± 5,9	212,36 ± 5,9	359,38 ± 2,2	114,78 ± 6,7	322,06 ± 6,7	436,84 ± 4,7
10-20	103,54 ± 8,3	225,51 ± 8,3	329,05 ± 2,2	95,55 ± 2,9	289,61 ± 4,7	385,16 ± 4,7
20-30	80,77 ± 7,7	218,51 ± 7,7	299,28 ± 2,2	83,38 ± 6,4	234,22 ± 6,4	317,60 ± 4,7
30-40	67,43 ± 8,7	233,20 ± 8,7	300,63 ± 1,7	72,58 ± 3,4	205,87 ± 9,3	278,45 ± 9,3
40-50	60,42 ± 7,2	180,77 ± 7,2	241,19 ± 1,7	72,11 ± 2,3	212,42 ± 9,3	284,53 ± 9,3
50-60	61,39 ± 2,4	186,95 ± 2,4	248,34 ± 1,7	67,71 ± 4,6	182,09 ± 9,3	249,80 ± 9,3
60-70	41,40 ± 1,1	199,46 ± 1,7	240,86 ± 1,7	50,33 ± 4,3	218,14 ± 9,3	268,47 ± 9,3
70-80	49,99 ± 4,7	169,31 ± 4,7	219,30 ± 1,7	57,51 ± 3,8	175,78 ± 9,3	233,29 ± 9,3
80-90	47,08 ± 1,4	183,97 ± 17,7	231,05 ± 17,7	65,73 ± 4,2	165,10 ± 13,9	230,83 ± 13,9
90-100	43,39 ± 1,9	195,98 ± 17,7	239,37 ± 17,7	57,32 ± 1,2	169,94 ± 13,9	227,26 ± 13,9
100-110	41,47 ± 1,9	207,54 ± 17,7	249,01 ± 17,7	56,23 ± 0,9	172,97 ± 13,9	229,20 ± 13,9
110-120	46,78 ± 1,8	199,52 ± 17,7	246,30 ± 17,7	64,59 ± 5,4	163,93 ± 13,9	228,52 ± 13,9
120-130	42,19 ± 1,8	208,25 ± 17,7	250,44 ± 17,7	45,74 ± 4,7	203,79 ± 13,9	249,53 ± 13,9
130-140	46,18 ± 4,2	192,76 ± 4,2	238,94 ± 3,6	48,59 ± 4,0	169,21 ± 6,6	217,80 ± 6,6
140-150	47,48 ± 3,6	184,43 ± 3,6	231,91 ± 3,6	48,36 ± 0,8	182,19 ± 6,6	230,55 ± 6,6
150-160	46,10 ± 1,1	202,55 ± 3,6	248,65 ± 3,6	49,61 ± 0,6	190,49 ± 6,6	240,10 ± 6,6
160-170	50,43 ± 5,3	172,89 ± 5,3	223,32 ± 3,6	51,80 ± 1,5	199,01 ± 6,6	250,81 ± 6,6
170-180	44,48 ± 3,1	188,76 ± 3,6	233,24 ± 3,6	49,14 ± 3,3	194,77 ± 6,6	243,91 ± 6,6
180-190	38,07 ± 2,0	195,68 ± 3,9	233,75 ± 3,9	40,63 ± 2,6	228,79 ± 8,4	269,42 ± 8,4
190-200	36,85 ± 3,5	211,93 ± 3,9	248,78 ± 3,9	44,81 ± 0,7	224,76 ± 8,4	269,57 ± 8,4
200-210	39,17 ± 3,9	194,61 ± 3,9	233,78 ± 3,9	42,55 ± 3,1	230,12 ± 8,4	272,67 ± 8,4

Hz (cm)	RON 3			RON 4		
	Po	PI $\mu\text{g} / \text{g} \text{ sol}$	Pt	Po	PI $\mu\text{g} / \text{g} \text{ sol}$	Pt
0-10	133,47 ± 6,0	251,86 ± 17,7	385,33 ± 17,7	194,74 ± 8,0	261,35 ± 9,1	456,09 ± 9,1
10-20	91,81 ± 4,4	242,32 ± 17,7	334,13 ± 17,7	86,04 ± 1,9	287,14 ± 9,1	373,18 ± 9,1
20-30	80,12 ± 4,7	190,90 ± 17,7	271,02 ± 17,7	72,82 ± 4,4	236,18 ± 9,1	309,00 ± 9,1
30-40	71,22 ± 3,0	167,61 ± 3,0	238,83 ± 2,5	65,54 ± 3,6	242,69 ± 13,8	308,23 ± 13,8
40-50	84,14 ± 5,2	195,68 ± 5,2	279,82 ± 2,5	61,57 ± 3,2	196,96 ± 13,8	258,53 ± 13,8
50-60	81,88 ± 4,1	201,02 ± 4,1	282,90 ± 2,5	59,76 ± 2,5	224,50 ± 13,8	284,26 ± 13,8
60-70	70,81 ± 4,5	224,43 ± 4,5	295,24 ± 2,5	77,94 ± 1,5	117,84 ± 13,8	195,78 ± 13,8
70-80	65,10 ± 1,0	192,68 ± 2,5	257,78 ± 2,5	68,03 ± 5,6	118,17 ± 13,8	186,20 ± 13,8
80-90	63,20 ± 4,6	202,75 ± 4,6	265,95 ± 3,2	61,46 ± 1,4	182,37 ± 7,7	243,83 ± 7,7
90-100	63,48 ± 2,6	185,02 ± 3,2	248,50 ± 3,2	57,45 ± 3,1	105,34 ± 7,7	162,79 ± 7,7
100-110	55,80 ± 4,8	160,85 ± 4,8	216,65 ± 3,2	53,66 ± 1,3	178,69 ± 7,7	232,35 ± 7,7
110-120	48,66 ± 1,6	198,73 ± 3,2	247,39 ± 3,2	53,23 ± 6,1	103,96 ± 7,7	157,19 ± 7,7
120-130	30,62 ± 1,8	189,51 ± 3,2	220,13 ± 3,2	54,28 ± 9,9	96,47 ± 9,9	150,75 ± 7,7
130-140	32,37 ± 2,9	140,46 ± 6,6	172,83 ± 6,6	56,52 ± 8,3	91,00 ± 17,3	147,52 ± 17,3
140-150	35,50 ± 5,2	168,86 ± 6,6	204,36 ± 6,6	44,76 ± 3,5	130,09 ± 17,3	174,85 ± 17,3
150-160	32,68 ± 1,7	178,19 ± 6,6	210,87 ± 6,6	35,36 ± 4,6	128,84 ± 17,3	164,20 ± 17,3
160-170	32,28 ± 3,1	188,83 ± 6,6	221,11 ± 6,6	34,35 ± 1,7	97,23 ± 17,3	131,58 ± 17,3
170-180	33,50 ± 4,8	181,29 ± 6,6	214,79 ± 6,6	18,33 ± 2,1	130,00 ± 17,3	148,33 ± 17,3
180-190	23,37 ± 2,1	177,66 ± 10,6	201,03 ± 10,6	23,17 ± 2,3	107,83 ± 18,9	131,00 ± 18,9
190-200	28,36 ± 3,6	182,89 ± 10,6	211,25 ± 10,6	25,10 ± 2,7	116,84 ± 18,9	141,94 ± 18,9
200-210	27,68 ± 0,2	159,67 ± 10,6	187,35 ± 10,6	27,68 ± 3,3	115,04 ± 18,9	142,72 ± 18,9

RON 5

Hz (cm)	Po		Pb µg / g sol		Pb	
0-10	245,59	± 33,7	80,45	± 33,7	326,03	± 32,2
10-20	152,33	± 4,5	62,16	± 32,2	214,49	± 32,2
20-30	102,55	± 2,5	89,85	± 32,2	192,40	± 32,2
30-40	73,05	± 5,8	112,26	± 24,5	185,31	± 24,5
40-50	65,00	± 6,2	78,82	± 24,5	143,81	± 24,5
50-60	53,78	± 3,2	121,03	± 24,5	174,81	± 24,5
60-70	39,80	± 7,3	81,34	± 24,5	121,13	± 24,5
70-80	43,22	± 1,0	64,79	± 24,5	108,00	± 24,5
80-90	42,92	± 6,4	57,18	± 6,4	100,11	± 5,7
90-100	41,42	± 7,5	94,46	± 7,5	135,88	± 5,7
100-110	38,58	± 3,8	80,20	± 6,4	118,78	± 5,7
110-120	35,59	± 8,8	95,29	± 8,8	130,88	± 5,7
120-130	32,42	± 4,7	111,24	± 5,7	143,67	± 5,7
130-140	32,27	± 2,1	105,24	± 13,2	137,51	± 13,2
140-150	33,64	± 4,9	82,70	± 13,2	116,34	± 13,2
150-160	36,92	± 4,2	102,45	± 13,2	139,37	± 13,2
160-170	32,11	± 3,4	82,76	± 13,2	114,87	± 13,2
170-180	31,69	± 3,4	100,00	± 13,2	131,69	± 13,2
180-190	28,60	± 3,5	89,60	± 12,1	118,20	± 12,1
190-200	33,47	± 2,5	86,66	± 12,1	120,13	± 12,1
200-210	27,06	± 1,8	81,84	± 12,1	108,90	± 12,1

BAR 1

BAR 2

Hz (cm)	Po		Pb µg / g sol		Pb	Po		Pb µg / g sol		Pb		
0-10	88,55	± 1,6	180,45	± 11,1	269,00	± 11,1	105,70	± 8,0	192,70	± 55,0	298,40	± 55,0
10-20	85,18	± 6,2	170,36	± 11,1	255,54	± 11,1	88,06	± 4,7	177,60	± 55,0	265,66	± 55,0
20-30	67,62	± 2,9	165,96	± 11,1	233,58	± 11,1	76,64	± 2,8	196,73	± 55,0	273,37	± 55,0
30-40	64,54	± 2,4	138,91	± 9,0	203,45	± 9,0	65,97	± 6,1	163,22	± 11,5	229,19	± 11,5
40-50	62,87	± 1,7	101,44	± 9,0	164,31	± 9,0	64,19	± 1,4	166,00	± 11,5	230,19	± 11,5
50-60	63,85	± 2,5	176,78	± 9,0	240,63	± 9,0	61,99	± 3,7	178,33	± 17,9	240,32	± 17,9
60-70	69,88	± 2,5	118,88	± 9,0	188,76	± 9,0	40,32	± 2,1	138,19	± 7,3	178,51	± 7,3
70-80	68,75	± 2,4	179,95	± 9,0	248,70	± 9,0	46,18	± 1,4	143,18	± 7,3	189,35	± 7,3
80-90	68,14	± 1,3	150,58	± 20,6	218,72	± 20,6	45,92	± 2,8	119,72	± 26,9	165,64	± 26,9
90-100	72,13	± 3,3	149,55	± 20,6	221,68	± 20,6	48,80	± 2,0	113,34	± 26,9	162,13	± 26,9
100-110	67,47	± 3,4	155,08	± 20,6	223,22	± 20,6	46,59	± 4,5	153,66	± 26,9	200,25	± 26,9
110-120	43,33	± 6,9	111,52	± 20,6	154,85	± 20,6	43,37	± 1,2	185,91	± 26,9	229,29	± 26,9
120-130	38,08	± 2,3	126,57	± 20,6	164,65	± 20,6	44,66	± 2,2	196,87	± 26,9	241,53	± 26,9
130-140	36,39	± 2,7	128,66	± 26,1	165,05	± 26,1	47,88	± 1,8	185,17	± 22,7	233,05	± 22,7
140-150	39,37	± 1,6	135,48	± 26,1	174,85	± 26,1	44,33	± 4,0	186,49	± 22,7	230,82	± 22,7
150-160	41,73	± 3,3	129,71	± 26,1	171,44	± 26,1	49,20	± 2,4	161,25	± 22,7	210,45	± 22,7
160-170	57,04	± 2,84	113,87	± 26,1	170,91	± 26,1	48,12	± 2,7	173,91	± 22,7	222,03	± 22,7
170-180	56,68	± 3,23	129,48	± 26,1	186,16	± 26,1	42,39	± 1,2	184,00	± 22,7	226,40	± 22,7
180-190	61,36	± 6,54	169,46	± 12,2	230,82	± 12,2	35,62	± 3,9	188,66	± 11,1	224,28	± 11,1
190-200	56,63	± 2,84	133,42	± 12,2	190,05	± 12,2	37,50	± 2,9	189,14	± 11,1	226,64	± 11,1
200-210	51,86	± 1,55	197,55	± 12,2	249,41	± 12,2	32,83	± 2,8	184,91	± 11,1	217,74	± 11,1

BAR 1 m						BAR 2 m					
Hz (cm)	Po		PI µg / g sol		Pt	Po		PI µg / g sol		Pt	
0-10	96,72	± 5,0	255,02	± 30,4	351,74 ± 30,4	91,06	± 2,4	210,55	± 7,3	301,62 ± 7,3	
10-20	85,72	± 1,2	222,84	± 14,3	306,56 ± 14,3	64,63	± 3,0	208,08	± 3,0	272,71 ± 2,9	
20-30	79,11	± 4,3	225,59	± 25,0	304,70 ± 25,0	49,01	± 3,2	202,46	± 3,2	251,48 ± 0,4	
30-50	79,39	± 5,8	175,56	± 8,5	254,95 ± 8,5	53,59	± 2,0	179,92	± 7,9	233,52 ± 7,9	
50-70	72,98	± 4,1	165,42	± 16,0	238,40 ± 16,0	43,66	± 2,6	192,30	± 2,6	235,96 ± 0,4	

BAR 3 m						BAR 4 m					
Hz (cm)	Po		PI µg / g sol		Pt	Po		PI µg / g sol		Pt	
0-10	91,92	± 5,2	245,51	± 37,3	337,43 ± 37,3	87,81	± 9,4	287,96	± 9,4	375,78 ± 2,4	
10-20	87,48	± 3,5	222,94	± 28,4	310,42 ± 28,4	64,02	± 5,2	272,33	± 25,2	336,36 ± 25,2	
20-30	71,82	± 2,2	212,79	± 13,0	284,61 ± 13,0	58,80	± 6,0	235,03	± 20,5	293,83 ± 20,5	
30-50	59,36	± 0,8	193,74	± 2,1	253,10 ± 2,1	64,61	± 4,6	189,97	± 4,6	254,58 ± 1,2	
50-70	54,81	± 2,8	193,12	± 14,9	247,93 ± 14,9	60,04	± 3,8	213,04	± 15,0	273,08 ± 15,0	

BAR 5 m					
Hz (cm)	Po		PI µg / g sol		Pt
0-10	84,53	± 14,2	237,71	± 14,2	322,23 ± 1,5
10-20	90,85	± 2,7	216,17	± 5,1	307,02 ± 5,1
20-30	82,24	± 2,2	215,59	± 8,2	297,83 ± 8,2
30-50	68,61	± 2,9	213,93	± 2,9	282,54 ± 2,2
50-70	68,09	± 3,3	206,06	± 3,3	274,14 ± 2,2

Stocks de Phosphore total (Pt), organique (Po) et inorganique (Pi) (kg P /ha)

	z (cm)	RON 1	RON 2	RON 3	RON 4	RON 5	BAR 1	BAR 2
	Pt kg /ha	0-10	251,6	305,8	308,3	359,2	195,6	246,1
	0-50	1277,0	1421,5	1260,0	1423,5	886,7	940,0	1082,7
	50-100	974,0	999,4	1115,7	886,4	528,7	924,1	773,3
	0-100	2249,5	2418,7	2374,9	2307,2	1413,6	1864,1	1854,4
	100-210	2215,1	2268,8	1937,7	1446,2	1159,0	1747,7	2067,6
	0-210	4420,1	4641,5	4271,9	3720,5	2548,2	3576,2	3881,7

	z (cm)	RON 1	RON 2	RON 3	RON 4	RON 5	BAR 1	BAR 2
	Po kg /ha	0-10	102,9	80,3	106,8	155,8	147,4	79,7
	0-50	383,4	366,0	384,7	401,3	533,1	307,9	334,4
	50-100	201,0	246,7	284,6	268,2	182,7	283,2	200,9
	0-100	583,4	612,1	668,8	668,9	714,0	590,9	534,7
	100-210	402,4	455,1	319,8	358,1	304,3	461,7	396,7
	0-210	976,9	1057,4	980,5	1018,3	1010,3	1042,9	922,8

	z (cm)	RON 1	RON 2	RON 3	RON 4	RON 5	BAR 1	BAR 2
	Pi kg /ha	0-10	144,8	225,4	201,5	205,8	48,3	162,4
	0-50	893,6	1055,5	875,3	1022,2	353,6	632,1	748,3
	50-100	773,0	752,7	831,1	618,2	346,0	640,9	572,3
	0-100	1666,1	1806,6	1706,2	1638,3	699,6	1273,1	1319,7
	100-210	1812,7	1813,7	1618,0	1088,2	854,7	1285,3	1670,9
	0-210	3443,2	3584,0	3291,3	2702,2	1537,9	2532,8	2958,8

ANNEXE VII

FRACTIONNEMENT CHIMIQUE

(Méthode Hedley, 1982 modifiée)

Teneurs ($\mu\text{g P/g}$ terre fine) en phosphore total (Pt), inorganique (Pi) et organique (Po) des extraits NaHCO_3 0,5M (A) et NaOH 0,1M (B et B') (échantillons 0-10 cm)

Notes : - Les teneurs en Pt et Pi présentées sont des valeurs moyennes établies à partir de trois répétitions.
- La teneur en Po est calculée par différence entre celles de Pt et Pi.

	P i		P t		P o
	moy.	e.t.	moy.	e.t.	moy.
$\mu\text{g P /g}$ terre fine					
Fraction A (Extraction séquentielle - NaHCO_3 0,5 M)					
RON 1	3,1	0,4	14,2	0,9	11,2
RON 4	2,9	0,1	20,7	2,0	17,8
BAR 1 m	2,0	0,4	11,3	0,5	9,2
BAR 2 m	1,1	0,3	8,9	0,9	7,8
BAR 3 m	2,2	0,1	10,1	0,5	7,8
BAR 4 m	9,0	1,0	22,2	0,1	13,2
BAR 5 m	1,9	0,1	11,0	1,4	9,0
Fraction B (Extraction séquentielle - NaOH 0,1 M)					
RON 1	37,0	1,8	100,4	3,3	63,4
RON 4	59,9	1,1	137,7	4,4	77,8
BAR 1 m	33,9	0,4	87,2	3,9	53,3
BAR 2 m	27,3	2,5	73,4	5,2	46,1
BAR 3 m	32,4	0,3	86,0	1,4	53,6
BAR 4 m	68,0	1,7	118,3	3,6	50,3
BAR 5 m	29,7	0,7	78,1	0,9	48,4
Fraction B' (Extraction directe - NaOH 0,1 M)					
RON 1	41,3	1,7	120,5	4,3	79,2
RON 4	64,7	1,5	164,1	6,7	99,4
BAR 1 m	37,5	0,8	106,7	3,8	69,2
BAR 2 m	30,3	1,3	91,9	0,5	61,6
BAR 3 m	34,4	1,6	99,8	3,4	65,4
BAR 4 m	89,3	6,5	129,6	6,7	40,3
BAR 5 m	33,4	0,2	91,0	1,4	57,6

Teneurs ($\mu\text{g P/g}$ terre fine) en Fer (Fe) et Aluminium (Al) des extraits NaHCO_3 0,5M (A) et NaOH 0,1M (B et B') (échantillons 0-10 cm)

	Fe		Al	
	moy.	e.t.	moy.	e.t.
$\mu\text{g /g}$ terre fine				
Fraction A (Extraction séquentielle - NaHCO_3 0,5 M)				
RON 1	66,4	22,3	31,4	8,6
RON 4	33,6	4,2	19,4	3,5
BAR 1 m	8,7	1,5	0,0	tr
BAR 2 m	9,6	0,9	0,0	tr
BAR 3 m	5,7	0,6	0,0	tr
BAR 4 m	2,8	0,9	0,0	tr
BAR 5 m	4,6	1,7	0,0	tr
Fraction B (Extraction séquentielle - NaOH 0,1 M)				
RON 1	3028,0	80,0	10176,2	201,0
RON 4	2472,1	60,3	11289,6	263,8
BAR 1 m	2036,8	96,2	10341,1	617,7
BAR 2 m	1524,6	134,6	12187,8	5429,5
BAR 3 m	1954,1	164,8	9370,4	245,0
BAR 4 m	1582,1	144,2	9237,1	317,8
BAR 5 m	1365,5	9,5	8989,1	160,2
Fraction B (Extraction directe - NaOH 0,1 M)				
RON 1	8387,2	376,8	14512,9	315,1
RON 4	7539,1	496,8	14744,5	51,7
BAR 1 m	4849,5	650,6	12944,4	640,7
BAR 2 m	2922,6	415,1	11842,8	794,1
BAR 3 m	2790,7	139,0	11675,1	21,4
BAR 4 m	2159,9	26,7	11107,7	220,1
BAR 5 m	1968,9	76,6	10675,2	153,9

ANNEXE VIII

MATRICES DE CORRÉLATION DES A.C.P.

effectuées sur les données du fractionnement chimique

(Méthode Hedley, 1982 modifiée)

Matrice de corrélation (**R**) des ACP effectuées sur les données du fractionnement chimique

Variables Po, Al, Fe, C

NaHCO₃ 0,5 M

	Po	Al	Fe	C
Po	1			
Al	0,52	1		
Fe	0,38	0,98	1	
C	0,36	0,83	0,78	1

NaOH 0,1 M

	Po	Al	Fe	C
Po	1			
Al	0,26	1		
Fe	0,76	0,18	1	
C	0,94	0,45	0,88	1

Variables Pi, Pt, Al, Fe, C

NaHCO₃ 0,5 M

	Pi	Pt	Al	Fe	C
Pi	1				
Pt	0,79	1			
Al	- 0,04	0,33	1		
Fe	- 0,10	0,20	0,98	1	
C	- 0,23	0,31	0,83	0,78	1

NaOH 0,1 M

	Pi	Pt	Al	Fe	C
Pi	1				
Pt	0,91	1			
Al	- 0,11	0,05	1		
Fe	0,13	0,45	0,18	1	
C	0,22	0,60	0,45	0,88	1

ANNEXE IX

FRACTIONNEMENT CHIMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

(RON 1, RON 4, 0-10 cm)

D'après Leprun (données non publiées)

Fractionnement de la matière organique des couches de sol 0-10 cm

Méthode (Dabin, 1971)

Sur un échantillon de sol, tamisée à 2 mm, débarrassé de ses fragments végétaux (MOL), les acides fulviques libres (AFL) sont extraits par épuisement avec H_3PO_4 2M. Les acides humiques et fulviques alcalino-solubles sont extraits d'abord par une solution de pyrophosphate de soude 0,1M (AH Pyro & AF Pyro) puis par une solution de soude 0,1N (AH Na & AF Na). Le résidu organique insoluble est l'humine. Le carbone des extraits est dosé selon la méthode Anne (1945).

Résultats

	RON 1 (Cerradão)		RON 4 (Campo limpo)	
	mg C/g sol	% C extrait	mg C/g sol	% C extrait
MOL	1,13	7,18	0,85	4,08
AFL	2,84	18,07	7,95	38,02
AF Pyro	5,76	36,70	5,66	27,06
AF Na	2,29	14,59	1,43	6,85
AF		69,37		71,93
AH Pyro	2,12	13,54	3,66	17,50
AH Na	1,56	9,92	1,36	6,49
AH		23,46		23,99
Humine	21,84		22,98	
C total	40,40		46,90	
C extrait	15,69		20,91	

ANNEXE X

**EXTRACTIBILITÉ DU P PAR NaOH 0,5 M
ET
SPECTROSCOPIE ^{31}P -RMN**

Phosphore total, organique et inorganique extrait par NaOH 0,5 M exprimés en % du
Phosphore total, organique et inorganique de l'échantillon

	P extrait		
	% Pt éch.	% Pi éch.	% Po éch.
RON 1	24,9	24,5	25,5
RON 4	31,9	30,1	34,3
BAR 1 m	19,2	17,5	23,9
BAR 2 m	21,7	16,8	33,2
BAR 3 m	24,8	16,4	47,2
BAR 4 m	35,2	35,4	34,6
BAR 5 m	21,2	16,2	35,3

Distribution des composés du P (en pourcentage du signal total) de l'extrait obtenu par
NaOH 0,5 M et analysé en ^{31}P -RMN

	Composition de l'extrait alcalin (% du Pt de l'extrait)				P organique monoesters + diesters
	Orthophosphates	Pyrophosphate	Phosphomonoesters	Phosphodieters	
RON 1	54,45	4,69	31,47	11,39	42,9
RON 4	44,09	9,03	39,47	7,41	46,9
BAR 1 m	44,59	7,53	38,13	9,69	47,9
BAR 2 m	44,93	7,61	38,22	9,24	47,5
BAR 3 m	46,74	8,74	34,82	9,69	44,5
BAR 4 m	67,23	6,46	21,98	4,32	26,3
BAR 5 m	43,54	9,01	37,38	10,08	46,5

ANNEXE XI

ACTIVITÉ PHOSPHATASE

ACTIVITÉ PHOSPHATASE - Méthode Tabatabai (1982)

--> Pase = f (prof)

Prof. (cm)	RON 1		RON 2		RON 3		RON 4		RON 5	
	moy.	e.t.								
Activité Phosphatase à pH 11 ($\mu\text{g pN} / \text{g sol} / \text{h}$)										
0-10	19,2	5,2	25,9	6,4	49,4	13,0	41,5	9,8	36,1	5,2
Activité Phosphatase à pH 6,5 ($\mu\text{g pN} / \text{g sol} / \text{h}$)										
0-10	385,4	40,4	284,9	29,5	420,3	23,0	366,7	11,2	308,7	3,5
10-20	161,2	5,5	153,1	21,6	188,9	27,6	269,2	13,7	157,5	13,7
20-30	89,1	5,6	99,0	4,1	149,7	16,0	197,5	12,6	102,5	14,6
50-60	58,3	6,0	63,0	6,6	81,7	7,0	69,9	6,3	43,2	3,7

Prof. (cm)	BAR 1 m		BAR 2 m		BAR 3 m		BAR 4 m		BAR 5 m	
	moy.	e.t.								
Activité Phosphatase à pH 11 ($\mu\text{g pN} / \text{g sol} / \text{h}$)										
0-10	10,1	2,6	14,8	4,9	27,9	4,8	15,8	3,3	16,5	2,8
Activité Phosphatase à pH 6,5 ($\mu\text{g pN} / \text{g sol} / \text{h}$)										
0-10	209,7	29,2	189,4	8,9	148,6	12,0	144,0	3,8	172,3	1,9
10-20	134,0	9,2	115,8	8,7	122,1	14,3	105,8	13,1	171,4	9,3
20-30	114,6	3,3	116,3	8,7	122,3	9,0	111,1	19,7	106,2	5,6
50-70	22,7	1,1	72,4	1,5	62,5	8,9	94,1	1,3	86,2	7,0

ACTIVITÉ PHOSPHATASE (0-10 cm)

--> Pase = f (pH)

Activité Phosphatase ($\mu\text{g pN} / \text{g sol} / \text{h}$)							
pH	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	e.t.
Sites							
RON 1	282,2	270,4	301,5	298,5	303,7	385,4	40,4
RON 2	291,9	311,1	335,6	410,4	310,4	284,9	29,5
RON 3	310,4	336,3	449,6	423,0	434,1	420,3	23,0
RON 4	342,2	317,8	444,4	380,7	355,6	366,7	11,2
RON 5	280,7	285,9	345,9	379,3	385,9	308,7	3,5
BAR 1 m	222,2	243,0	281,5	259,3	245,9	209,7	29,2
BAR 2 m	230,4	288,9	326,7	309,6	280,0	189,4	8,9
BAR 3 m	183,0	229,6	188,9	176,3	181,5	148,6	12,0
BAR 4 m	143,0	153,3	185,2	206,7	183,7	144,0	3,8
BAR 5 m	188,1	194,1	181,5	145,9	195,6	172,3	1,9

ANNEXE XII

ADSORPTION DES IONS PHOSPHATES

ET DE LA PHYTASE

SUR LA PHASE SOLIDE DU SOL

RON 1, 0-10 cm

**Adsorption des ions phosphates sur la phase solide
de la couche de sol 0-10 cm du site RON 1**

Co	Apport	Ce		Qa		PZ corrigé	pH final
		µg P/ml	µg P/gsol	µg P/g sol	µg P/m ²		
0,05	5	0,018	1,81	3,19	0,07	- 28,35	3,85
0,1	10	0,014	1,43	8,55	0,18	- 30,17	3,81
0,5	50	0,034	3,39	46,50	0,98	- 34,07	3,82
1	100	0,051	5,06	94,80	2,00	- 36,08	3,94
2	200	0,093	9,25	190,59	4,03	- 36,85	4,00
5	500	0,591	59,05	439,69	9,30	- 40,53	4,17
10	1 000	3,050	304,56	693,74	14,67	- 40,97	4,48
25	2 500	16,227	1622,70	876,55	18,53	- 44,24	4,7

**Adsorption de la phytase sur la phase solide
de la couche de sol 0-10 cm du site RON 1**

Co	Apport	Ce		Qa		PZ corrigé	pH final
		µg Phytase/ml	µg Phytase/gsol	µg Phytase/g sol	µg Phytase/m ²		
0,5	50	0,275	27,43	22,52	0,48	-25,46	3,81
1	100	0,235	23,47	76,10	1,61	-24,84	3,83
2	200	0,306	30,63	169,15	3,58	-22,45	3,94
5	500	0,314	31,38	468,42	9,90	-24,23	3,95
10	1000	0,350	35,02	964,58	20,39	-25,78	3,94
25	2500	0,811	81,06	2418,19	51,12	-30,39	3,98
100	10000	3,056	305,55	9686,45	204,79	-29,60	4,10

Adsorption compétitive Phosphate/Phytase sur la phase solide de la couche de sol 0-10 cm du site RON 1

Essais	Phosphate				Phytase				Pz corrigé mv	pH final
	Co	Ce	Qa		Co	Ce	Qa			
	µg P/ml	µg P/ml	µg P/g sol	µg P/m²	µg Phytase/ml	µg Phytase/ml	µg Phytase/g sol	µg Phytase/m²		
P1+Phy5	1	0,033	96,49	2,04	5	3,892	110,57	2,34	-34,46	4,03
P1+Phy25	1	0,025	97,49	2,06	25	8,496	1649,75	34,88	-33,65	3,97
P1+Phy100	1	0,012	98,73	2,09	100	45,554	5442,44	115,06	-32,64	4,08
P5+Phy5	5	0,757	423,22	8,95	5	3,476	152,04	3,21	-40,94	4,38
P5+Phy25	5	0,714	428,21	9,05	25	13,389	1159,92	24,52	-41,67	4,34
P5+Phy100	5	0,693	429,54	9,08	100	49,888	4997,19	105,65	-40,34	4,40
P10+Phy5	10	3,257	673,33	14,24	5	2,236	276,04	5,84	-42,57	4,49
P10+Phy25	10	3,260	672,27	14,21	25	12,978	1199,12	25,35	-42,37	4,52
P10+Phy100	10	3,232	676,56	14,30	100	45,600	5437,87	114,97	-40,85	4,54
P25+Phy5	25	18,683	631,22	13,35	5	0,681	431,57	9,12	-40,40	4,66
P25+Phy25	25	18,285	669,44	14,15	25	11,148	1381,02	29,20	-39,88	4,70
P25+Phy100	25	18,288	670,12	14,17	100	40,965	5894,02	124,61	-39,69	4,68

RÉSUMÉ

Depuis 30 ans, la région des Cerrados, savanes sub-tropicales du Brésil central, a connu un large développement agricole. Elle contribue aujourd'hui activement à la production nationale de grains et de bovins. L'agriculture intensive repose essentiellement sur des sols ferrallitiques acides, profonds, très altérés, argileux ou sableux, à capacité d'échange cationique faible. La carence en phosphore est l'un des principaux obstacles à la productivité de ces milieux.

Le statut du phosphore de latosols sous végétation naturelle et sous pâturages (*Brachiaria brizantha*) a été caractérisé en détail par un ensemble d'analyses et d'expériences complémentaires. Des expérimentations utilisant isothermes d'adsorption ou outil isotopique ^{32}P ont permis de montrer le pouvoir d'adsorption élevé de ces sols vis à vis des ions phosphates. Le premier mètre de sol contient 47 à 62 % du phosphore total (Pt) et 57 à 71 % du phosphore organique (Po) de la couche de sol 0-210 cm. Dans les horizons superficiels, les teneurs en phosphore total s'échelonnent de 269 à 456 $\mu\text{g Pt/g sol}$, ce qui correspond à une réserve comprise entre 195 et 360 kg Pt/ha. Entre 23 et 75 % du phosphore total de ces horizons est sous forme organique.

L'extractibilité du phosphore des horizons superficiels a été caractérisée par un fractionnement chimique. Cette méthode permet de quantifier des compartiments de phosphore potentiellement échangeables et assimilables à court terme par les plantes. Elle extrait de 50 à 72 % du Po des échantillons de la strate 0-10 cm. Les variables "phosphore organique extractible", "fer extractible par les mêmes agents" et "matière organique" apparaissent liées. Le phosphore, extractible par la soude et caractérisé en ^{31}P -RMN, se compose essentiellement de phosphore organique (esters de phosphates). Quel que soit le site, la composition des extraits est similaire, le phosphore organique est essentiellement sous forme stable (phosphomonoesters : 73 à 84 % du Po extrait). L'absence de polyphosphates et de phosphonates témoigne d'une activité biologique intense. L'introduction de *Brachiaria brizantha* ne modifie pas la composition du P extractible par NaOH 0,5M.

L'activité monophosphoestérase (ou *phosphatase, Pase*) acide des strates 0-10 cm des sols est élevée : de 284 à 420 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ sous végétation naturelle et de 144 à 209,7 $\mu\text{g pN/g sol/h}$ sous pâturages. A 50 cm de profondeur, elle est encore conséquente. Les résultats obtenus montrent l'intérêt d'une mesure d'activité phosphatase sur une gamme de pH large (de 4 à 6,5), comprenant notamment le pH du sol. Le calcul d'un coefficient [$\text{Pase pH}_{\text{sol}} / \text{Po NaHCO}_3$] permet d'apprécier le potentiel d'activité hydrolytique du phosphore organique facilement extractible. Ainsi, le pâturage de 12 ans et les sites naturels présentent les potentiels d'hydrolyse du phosphore organique les plus élevés.

L'introduction d'une phytase exogène dans la solution du sol favorise l'adsorption des ions phosphates sur la phase solide du sol et gêne la distribution du ^{32}P dans le système sol-solution, mais elle peut également conduire à un apport de PO_4^{3-} par hydrolyse de phosphore organique ; cet apport se fait au profit de compartiments du P potentiellement assimilables par les plantes, mis en évidence par les résines anioniques.

Pour ces milieux, les recherches futures doivent porter sur les conditions environnementales qui favoriseraient une hydrolyse du phosphore organique.

MOTS-CLÉS

Phosphore, Sols ferrallitiques, Brésil, Cerrados, Pâturages, ^{31}P -RMN, Activité phosphatase, ^{32}P , Phytase