FO.FI.FA.
M.R.A.D.

ACTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR L'UTILISATION DES ENGRAIS PHOSPHATÉS DANS LES PRINCIPAUX SOLS DE TANETY DES HAUTS PLATEAUX ET DU MOYEN-OUEST À MADAGASCAR

par

Robertine-Violette RAHARINOSY

Agro-pédologue, maître-assistant de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

*

édité avec l'appui de
l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

ORSTOM

ANTANANARIVO

1996

PRÉFACE

La littérature pédo-agronomique malgache va s'enrichir d'un nouveau document dû à Mme Violette Raharinosy.

Tous ses collaborateurs et amis, ceux surtout qui avaient orienté et accompagné ses travaux, au FO. FI. FA. de Madagascar, au Commissariat à l'Energie Atomique de Cadarache (C.E.A.) et dans les laboratoires de l'ORSTOM à Bondy, avaient été navrés de leur interruption dramatique, après l'accident survenu lors d'une tournée pédologique le 4 décembre 1986, et ont suivi avec sympathie la longue et cruelle convalescence de l'auteur, durant 14 mois dans les hopitaux réunionais, malgaches et parisiens. Ils saluent la courageuse réadaptation dont cette publication est l'aboutissement.

La valorisation des sols tropicaux acides qui couvrent une grande partie du monde, notamment dans les pays du Sud, reste un problème majeur que de nombreuses personnes ou institutions s'attachent depuis longtemps à résoudre. Le comportement du phosphore, celui que ces sols contiennent naturellement et celui qu'on peut leur apporter sous forme d'engrais, en est une clef. Ce comportement dépend pour beaucoup des liaisons de cet élément avec les matières humiques endogènes (celles des sols) ou exogènes (celles des amendements organiques), ainsi que de leur évolution. Tel est le sujet auquel Violette Raharinosy a consacré de longues recherches expérimentales, au champ et au laboratoire, et dont le présent document tire les conclusions.

Sa contribution au progrès des connaissances, concernant la productivité et la conservation des sols tropicaux acides, vaut d'être connue et exploitée. Nous souhaitons donc que son ouvrage bénéficie de la meilleure audience, à la mesure des mérites de l'auteur.

Georges AUBERT

de l'Académie d'Agriculture de France
et de l'Académie nationale des Arts, des Lettres
et des Sciences de Madagascar

Bernard DABIN

*

le 31 décembre 1995

*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

Première partie

DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES ET PRÉSENTATION DES SOLS ÉTUDIÉS

1 - BIBLIOGRAPHIE

2 - DESCRIPTION DES SOLS DES SITES D'EXPÉRIMENTATION

2.1. - Sols ferrallitiques fortement désaturés
Ampangabe (APG) - Antaboaka (ATB) - Antsirabe Fo Fi Fa (ANT-F)

2.2. - Sols ferrallitiques moyennement désaturés
Antsirabe-Ivohitra (ANT-IV)- Kianjasoa (KJS)

2.3. - Sols bruns tropicaux
Analavory (ANL) - Antsirabe Cirra (ANT-C)

Deuxième partie

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

1 - MÉTHODES CHIMIQUES:

1.1 - Phosphore total
1.2 - Phosphore assimilable
1.3 - Formes du phosphore
1.4 - Phosphore organique
1.5 - Matières humiques du sol

2 - MÉTHODES PHYSIQUES:

2.1 - La valeur L
2.2 - La valeur E
2.3 - Détermination du facteur quantité et du facteur intensité

Troisième partie

MATIÈRES ORGANIQUES ET PHOSPHORE DES SOLS

1 - MATIÈRE ORGANIQUE ENDOGÈNE: SOL
2 - MATIÈRE ORGANIQUE EXOGÈNE: FUMIER
3 - FORMES MINÉRALES ET ORGANIQUES DU PHOSPHORE
4 - DÉTERMINATION DU PHOSPHORE DU SOL ET DES FRACTIONS HUMIQUES
5 - DYNAMIQUE DU PHOSPHORE
6 - LIAISON DU PHOSPHORE AVEC LA MATIÈRE ORGANIQUE ET LES MÉTAUX, Al ET Fe
7 - ÉTUDE DES COMPLEXES HUMIQUES DE Al ET Fe

Quatrième partie

DÉTERMINATION DU COÉFFICIENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AU COURS DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

ÉTUDES PRÉALABLES

I ESSAIS EN VASES DE VÉGÉTATION SUR UN SOL FERRALLITIQUE FORTEMENT DÉSATURÉ (APG)

1.1 - Méthodologie
1.2 - Résultats
1.3 - Interprétation et conclusion

2 - RECHERCHE D'UNE FUMURE DE REDRESSEMENT ET D'ENTRETIEN DES SOLS MALGACHES EN FONCTION DU NIVEAU DE FUMURE ORGANIQUE

3 - ÉTUDE À L'AIDE DU $^{32}PO_4$ DE L'UTILISATION DES PHOSPHATES PAR LE RIZ PLUVIAL

CONCLUSION GÉNÉRALE

BIBLIOGRAPHIE

*

AVANT-PROPOS

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je prie tous ceux qui m'ont aidée à le réaliser d'agréer l'expression de ma gratitude.

Mes plus vifs remerciements vont d'abord à M. Georges AUBERT, Directeur de Recherche honoraire de l'INRA, ancien Chef de la Section de Pédologie de l'ORSTOM, et à M. Bernard DABIN, Inspecteur Général honoraire de l'ORSTOM, ancien Directeur des laboratoires centraux de Bondy, ainsi qu'à M. le Professeur Pierre ROGNON de l'Université de Paris VI, qui ont orienté mes travaux et en ont suivi la réalisation, me prodigant leurs conseils et leurs critiques constructives avec une grande générosité.

Je remercie très vivement mes collaborateurs du laboratoire de pédologie ORSTOM de Bondy, du laboratoire du C.E.A. de Cadarache et du laboratoire des radio-isotopes de TANANARIVE, Mme RAMAMONJY Andriana notamment.

La mise en forme finale et l'édition de ce document ont été réalisées grâce à l'aide du programme DESPAM (CNRE-ORSTOM), de la Représentation ORSTOM à Tananarive et de la DIST-ORSTOM. Je leur en suis très reconnaissante, notamment à Mme RAZANAJOANARIJERY Noly et à M. Michel SOURDAT qui ont assuré la révision pré-éditoriale du manuscrit et auxquels j'exprime mon amicale gratitude.

Ayant exercé diverses fonctions auprès du Ministère de la Recherche et auprès du FO.FI.FA, à l'époque où je réalisais cette étude, je n'oublie pas ces institutions et présente, à M. le Ministre et à M. le Directeur Général, l'expression de ma respectueuse considération.

le 1er décembre 1995
R.V.R.

*

INTRODUCTION

On trouve à Madagascar au moins deux types de *sols acides* (séminaire MRSTD - IBSRAM, Janvier 1990). La plupart des espèces végétales cultivées ou des variétés à haut rendement supportent mal les conditions qui leur sont propres et, depuis longtemps, on étudie le comportement du phosphore dans les principaux sols que l'on trouve sur les Hauts Plateaux et le Moyen Ouest.

Les conditions des sols acides influent en particulier sur la faible assimilabilité du phosphore qu'ils peuvent contenir. Les sols étudiés dans notre travail sont trois *sols ferrallitiques fortement désaturés*, deux *sols ferrallitiques moyennement désaturés* et deux *sols bruns tropicaux*.

L'extension de ces sols se trouve indiquée sur les cartes de situation des points d'essai, établies d'après les cartes pédologiques de la région[1]. Ils couvrent en particulier les régions de Tananarive où sont réalisés des essais. Sur ces sols, on cultive surtout du riz pluvial et du maïs.

L'objectif est de rechercher l'influence de la matière organique (fumier) sur les engrais phosphatés dans les trois types de sols étudiés. Ils sont riches en oxydes de fer et d'aluminium et, en raison de leur acidité, l'acide phosphorique se trouve partiellement bloqué, rendu peu utilisable pour les cultures.

L'élaboration de cette étude, ainsi que la publication de deux articles (prévus, l'un par les Cahiers ORSTOM de Pédologie, l'autre par le CEA de Cadarache), ont été interrompues accidentellement le 4 décembre 1986. A la reprise de rédaction du présent travail, certains éléments n'ont pu être retrouvés, notamment certaines références bibliographiques, et nous nous en excusons.

*

[1] BOURGEAT (F.), 1968 - **Carte pédologique de Tananarive à 1/100 000**. *ORSTOM,Tananarive, notice multigr. 56 p.*
RIQUIER (J.), 1968 - **Carte pédologique de Madagascar à 1/1 000 000**. *ORSTOM, Paris, 3 feuilles.*

CARTE DE SITUATION DES POINTS D'ESSAI

ECHELLE : 1/100000

LEGENDE

CLASSE . I . . DES SOLS A MINERAUX BRUTS
LITHOSOLS

- Association avec sols rajeunis et peravolues "beige rouge"
- Association avec sols rajeunis "ocre beige" et peravolues jaunes

CLASSE . VI . . DES SOLS A MULL
SOUS-CLASSE SOLS A MULL DES PAYS TROPICAUX

- Sol brun tropical sur Ankaratrite

CLASSE . IX . . DES SOLS FERRALLITIQUES
1re SOUS-CLASSE DES SOLS FORTEMENT DESATURES
GROUPE DES SOLS TYPIQUES

- Sols "rouge à brun rouge" sur roches basiques
- Sols "jaune sur rouge" sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols rouges sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols "jaune sur rouge" sur roches riches en quartz
- Sols "beige rouge" sur roches riches en quartz

GROUPE DES SOLS APPAUVRIS

- Sols "ocre beige à jaune sur rouge" sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols "ocre beige à jaune sur rouge" sur roches en quartz
- Sols "jaune sur rouge" sur roches riches en quartz

GROUPE DES SOLS RAJEUNIS

- Sols "jaune sur rouge" sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols rouges sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols "beige rouge" sur roches ± acides profondément décomposées
- Sols "beige rouge" sur roches ± riches en quartz
- Sols "ocre beige" sur roches riches en quartz

2me SOUS-CLASSE DES SOLS MOYENNEMENT DESATURES (association avec sols rajeunis et lithosols)
GROUPE DES SOLS PERIVOLUES

- Sols "beige rouge" sur roches profondément décomposées

CLASSE . XI . . SOLS HYDROMORPHES
1re SOUS-CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES

- Sols tourbeux oligotrophes

2e SOUS-CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES MOYENNEMENT ORGANIQUES

- Sols humiques à gley

3e SOUS-CLASSE DES SOLS HYDROMORPHES MOYENS

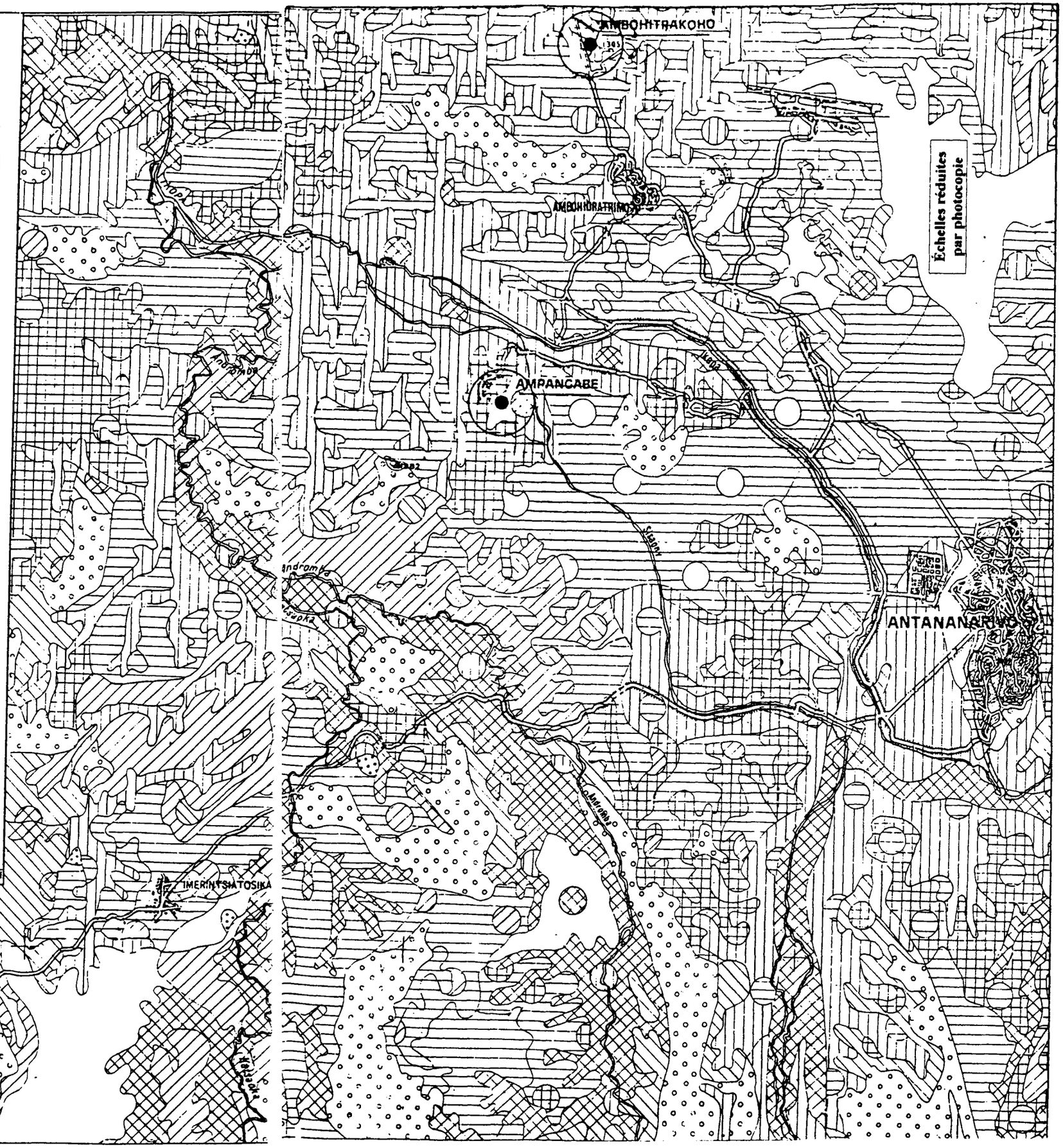
- Sols à gley à pseudogley indifférenciés
- Sols à pseudogley

Signes Particuliers

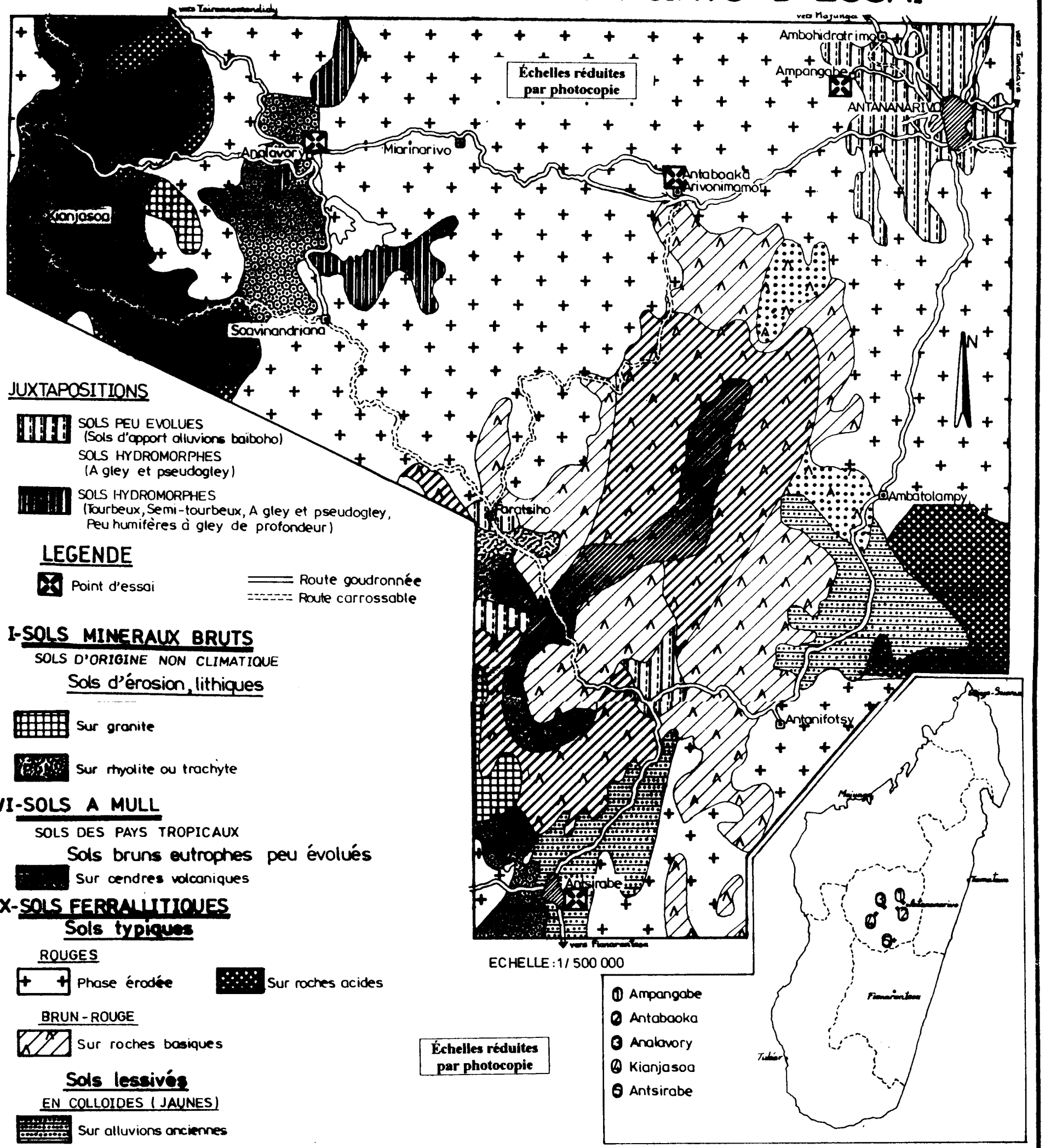
- Cuirasse (Sol typique sans gravier indurés)
- Complexe
- Rivière
- Route
- Point d'essai
- Point culminent et courbe

Échelles réduites par photocopie

Échelles réduites par photocopie



CARTE DE SITUATION DES POINTS D'ESSAI



JUXTAPOSITIONS

SOLS PEU EVOLUES (Sols d'apport alluvions baiboho)

SOLS HYDROMORPHES (A gley et pseudogley)

SOLS HYDROMORPHES (Tourbeux, Semi-tourbeux, A gley et pseudogley, Peu humifères à gley de profondeur)

LEGENDE

Point d'essai

Route goudronnée

Route carrossable

I-SOLS MINERAUX BRUTS

SOLS D'ORIGINE NON CLIMATIQUE

Sols d'érosion, lithiques

Sur granite

Sur rhyolite ou trachyte

VI-SOLS A MULL

SOLS DES PAYS TROPICAUX

Sols bruns eutrophes peu évolués

Sur cendres volcaniques

IX-SOLS FERRALLITIQUES

Sols typiques

ROUGES

Phase érodée

Sur roches acides

BRUN-ROUGE

Sur roches basiques

Sols lessivés

EN COLLOIDES (JAUNES)

Sur alluvions anciennes

Sols humifères

BRUNS ET JAUNES

Sur matériau volcanique ancien

NOIRS

Sur roches volcaniques

Sols indurés concrétionnés ou cuirassés

ROUGES OU JAUNES

Sur roches basiques

Sources

– Cartes routières de Madagascar, feuille 7 et 8, echelle 1/500 000. Dessinées par l'I.G.N. en 1964. Réimpression après mis à jour en 1979 par la F.T.M.

– Carte pédologique de Madagascar, feuille centrale; dessinée par la Service Cartographique O.R.S.T.O.M en 1968 (Carte pédologique au $\frac{1}{100000}$ de Bourgeat)

PREMIÈRE PARTIE

DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES
PRÉSENTATION DES SOLS ÉTUDIÉS

1. BIBLIOGRAPHIE

Pour étudier le phosphore du sol, on distingue deux sortes de méthodes: d'une part les méthodes chimiques et d'autre part la méthode physique.

Les méthodes chimiques utilisées pour l'extraction de l'ion phosphate dans le sol remontent déjà au siècle dernier (*Cf.* LIEBIG, BROADBACK, 1872 et méthode de ROTHAMSTAED). Par la suite, DYER (1894) adopta comme extracteur une solution à 1% d'acide citrique suggérée par STUTZER (1884). Depuis, de nombreux auteurs ont travaillé sur le phosphore inorganique (minéral): FRAPS (1906), FISHER et THOMAS (1935), WILLIAMS (1937), CHANG et JACKSON (1957)

La méthode physique par l'étude de dilution isotopique, apparrue en 1947 aux États-Unis et au Canada, a été développée par NELSON (1947), FRIED (1950), LARSEN (1950), BARBIER (1952-1955), également par RUSSEL et GUGNARY et SUTTON (1955), MARINI (1968), FARDEAU et JAPPE (1978), FARDEAU (1981).

D'autres travaux plus récents ont été effectués par OLSEN, WATANABE, SAUNDERS, DEMOLON, BASTISSE, DABIN, BOUYER, FORESTIER, PICHOT, ROCHE, BINH, etc...

En ce qui concerne Madagascar, on peut citer les noms suivants: DAMOUR, ROCHE, CELTON, VELLY à partir de 1965, NGO CHANG BANG (1969), OLIVIER (1970), MOUTONNET, PICHOT, BIHN, MARINI, etc ...

En 1965, ROCHE a fait l'étude du statut phosphorique des sols de Madagascar par les méthodes chimiques. NGO CHANG BANG (1969) en a fait l'étude par la méthode physique. En 1970, OLIVIER a continué cette étude.

2. DESCRIPTION DES SOLS D'EXPÉRIMENTATION

2.1. SOLS FERRALLITIQUES FORTEMENT DÉSATURÉS

Ampangabe - (APG)

Une description de ce sol a été faite en 1973 par ARRIVETS. Une nouvelle fosse a été étudiée le 12.11.1981, environ à 10 Km Nord Ouest de Tananarive. Selon la classification CPCS, il s'agit d'un *sol ferrallitique fortement désaturé*.(seule la surface est analysée).

Emplacement: x = 803,8
y = 502,2
z = 1.400 m

Substratum: Carte géologique d'Ambohimanga: Roche mère: gneiss du socle antécambrien.

Couverture: en friche; savane à *Aristida multicaulis.*

Profil:

Le sol parait rajeuni, à relief légèrement aplani sur gneiss.

A11: 0 - 3 cm: horizon brun beige (3YR - 4/4), argileux, massif.

A12: 3 -17 cm: horizon brun (5YR - 4/5), un peu structuré à 12 cm, tendance grumeleuse, très friable, finement sablo-argileux ou limoneux, racines très abondantes formant chevelu.

B11: 17-50 cm: très massif à éclat, faible porosité, enracinement faible, horizon dur, peut-être dû au labour.

B12: 50-70 cm: passage progressif.

A plus de 70 cm: rouge, texture argilo-limoneux, structure à tendance polyédrique émoussée, riche en pseudoparticules, concrétions ferrallitiques à peine indurées, enracinement abondant et plus fin. Contient des pseudoparticules, des éléments arrondis d'oxyde de fer, entourant des éléments de quartz, pseudo-sable, éléments émoussés.

Propriétés chimiques (entre 0 et 17 cm de profondeur)

Matière organique = 2,5 %
C/N = 15
Degré de saturation très faible: < 20%
pH: de 5 à 5,5
Le Ca varie entre 0,1 et 0,4 me/100g de sol.
La teneur de P_2O_5 totale est moyenne, de 1,1 à 2‰ (440 ppm à 880 ppm de P).
Le phosphore assimilable (selon OLSEN modifié DABIN) est de 0,03 à 0,05‰ (13,2 ppm à 22 ppm de P).
SiO_2 / Al_2O_3: de 0,6 à 0,9.

Prélèvements: APG 0-3 cm; 3-7 cm; 17-50 cm; au- delà de 1 m.

Antaboaka - (ATB)

Près d'Arivonimamo, axe Tana-Kianjasoa. Même fosse que celle de 1975. *Sol ferrallitique fortement à moyennement désaturé rajeuni.*

Topographie: 1.400 m d'altitude

Substratum: migmatite

Végétation: champ labouré

pH au champ = 5,1

Profil

A11: 0-22 cm: brun rouge (2,5 YR 3/6) texture argilo-sableuse, structure assez massive, friable sur place, tendance grumeleuse fine, peu poreux ou continu, traces d'activité biologique, enracinement abondant (avec racines très fines), limite abrupte (travail du sol).

A12: 22-52 cm: brun rouge (2,5 YR 4/8), texture argilo-sableuse, structure continue à tendance polyédrique, plus poreux, quelques grains visibles, passage progressif.

B: 52-115 cm: rouge (10 R 3/3) texture argilo-sableuse, structure polyédrique moyenne, cohésion assez forte, taux d'humidité progressif, porosité abondante souvent tubulaire large, forte activité biologique, par place des faces un peu luisantes, quelques concrétions (porosité inter-agrégats).

C: 115 cm à plus de 2m: brun rouge (10 R 3/3), texture argilo-sableuse, structure moins nette, humidité plus élevée, grains de quartz plus abondants, gros quartz altérés sur une ligne

vers 1,70m, agrégats globalement indurés avec des faces luisantes, plus nombreuses, porosité assez bonne, gros pores biologiques.

Propriétés chimiques

MO = 4,1%
C/N = 13,6 (0-22 cm)
P_2O_5 total = 2,8 ‰
P assimilable = 0,1 ‰.

Antsirabe-FO.FI.FA. - (ANT-F)

Sol ferrallitique fortement désaturé.

Topographie: Zone de colline à pente moyenne vers le Nord. La fosse a été ouverte à mi-pente, à 15 m au bord de la route du Nord.

x = 457,4
y = 693,2

Roche mère: basalte.

Végétation: Parcelle d'essai en jachère; quelques cultures familiales aux alentours (maïs, riz).

Profil

A11: 0-10 cm: frais, brun rouge foncé (5 YR 3/4), limono-argileux, structure grumeleuse, poreux, faible cohésion, présence de grains de quartz moyens et de petits morceaux de basalte, c'est l'horizon d'enracinement.

A12: 10-25 cm: frais, brun rouge foncé (5 YR 3/4), structure massive à tendance polyédrique fine, argilo-limoneux, assez poreux, assez compact en place, sans radicelle, on remarque la fréquence de fins grains de quartz. Cet horizon de 0 à 25 cm constitue l'horizon de culture dont la surface a été différenciée par l'action des cultures.

B: 25-57 cm: humide, brun rouge foncé (2 YR 3/4à 3/6) structure polyédrique fine, argileux, compact par place, poreux, présence de grains fins de quartz, des radicelles.

C: 57-93 cm: humide, rouge à brun rouge (2,5 YR 4/6 à 4/4), structure polyédrique moyenne à fine, argileux à argilo-limoneux, poreux, rares radicelles.

Propriétés chimiques

C = 2,5% C/N = 13 MO = 4,5%
Ca total = 3,2 ‰
P_2O_5 total = 1,94 ‰
P_2O_5 assimilable = 0,04 ‰
Pouvoir fixateur: 98% du P_2O_5 apporté.

N.B. L'éventuelle contamination de surface provient du déblai de la route.

Prélèvements

ANT-F: 0-25 cm 25-57 cm 57-93 cm 93-120 cm

2.2. SOLS FERRALLITIQUES MOYENNEMENT DÉSATURÉS

Groupe typique, sous-groupe humifère (avec environ 6,8 % de MO dans les 20 premiers cm), faciès faiblement concrétionné, série de sol profond, type grossièrement sableux; la présence de quartz indique un sol à faciès d'évolution limitée.

Substratum: migmatite riche en quartz

Antsirabe Ivohitra - (ANT-IV)

Sol superficiel. Parcelle d'essai à 400m à l'ouest d'Ivohitra, près d'un tombeau à 15m au sud du bord d'une piste.

Topographie: Zone de plateau à pente très faible vers l'Est, la fosse a été ouverte dans une surface plane.

x = 457,4
y = 692,3

Végétation: Parcelle d'essai en jachère, des cultures familiales aux environs (maïs, riz, soja, haricot). En surface, tapis végétal herbacé peu dense à clairsemé.

Profil

A: 0-21 cm: (ANT-IV-1) humide, brun rouge foncé (2,5 YR 3/4), limono-argileux, structure grumeleuse, poreux, faible à moyenne cohésion, nombreuses radicelles.

B: 21-55 cm:(ANT-IV-2) même horizon mais la couleur devient plus claire, brun rouge (5 YR 4/4), structure massive, secondairement polyédrique fine, poreux, moyenne cohésion, enracinement moins important. Passage progressif sur 7 cm.

C: Au-delà de 55 cm: (ANT-IV-3) humide, rouge foncé (2,5 YR 3/6), structure massive, secondairement polyédrique, moyenne, agrégats bien formés, argilo-limoneux, porosité tubulaire et ordinaire, moyenne cohésion, rares radicelles mortes.

Propriétés chimiques

C = 2,8%	N = 2 ‰	C/N = 14
P_2O_5 total	= 2,8 ‰	
P_2O_5 assimilable	= 0,40 ‰	
Pouvoir fixateur P_2O_5	= 58%.	

Prélèvements voir profil.

Kianjasoa - (KJS)

Sol ferrallitique moyennement désaturé. A 12 km d'Analavory vers la Sakay, fosse faite depuis une semaine sur défriche en 1981.

Roche-mère: migmatite riche en quartz; série de sols profonds

Végétation: herbes, 2 à 3 ans seulement en culture (on peut dire phase érodée).

Profil

A11: 0-22 cm: horizon brun foncé (5 YR 3/3), grossièrement sablo-argileux, (S.A.) riche en M.O., structure grumeleuse à polyédrique émoussé, assez développée, porosité moyenne, traces d'activité biologique, enracinement abondant.

A12: 22-30 cm: passage encore assez humifère

B1: 30-40 cm: rouge brun (2,5 YR 4/6) argileux grossièrement sableux, structure continue à tendance polyédrique fine, assez poreux, assez friable, nombreux grains de quartz de la taille de 1 mm, enracinement abondant fin. Passage progressif.

B2: 40-85 cm: rouge brun (2,5 YR 4/6) argilo-sableux, structure polyédrique nette, noyaux de sol partiellement indurés, enracinement assez abondant, de petites concrétions ferrugineuses, passage assez progressif.

C: 85-120 cm: rouge brun (2,5 YR 4/8) grossièrement argilo-sableux, structure polyédrique, porosité faible, moyenne, fine, quartz grossiers à disposition irrégulière, enracinement faible.

Groupe typique, sous-groupe humifère, enrichi en quartz (faciès faiblement concrétionnés), série de sol profond, type grossièrement sableux, la présence de quartz indique un sol à faciès d'évolution limitée.

Prélèvements

KJS: 0-40 cm 0-85 cm 85-120 cm.

Propriétés chimiques

pH = 5,2 à 5,5
C = 2,6 % C/N = 13 N = 2 ‰ M.O. = 6,8 %
Teneur en P_2O_5 total = 1690 ppm, ou 1,69 ‰ de phosphore total

2.3. SOLS BRUNS EUTROPHES TROPICAUX

Analavory - (ANL)

Vers Sakay. La fosse est faite depuis une semaine sur pente moyenne, cultivée en maïs (1980-1981).

Roche-mère: cendres volcaniques.

Classification: *Sol brun eutrophe*, sous-groupe modal, peut-être dû à des colluvions d'horizon supérieur sur des sols bruns de colline. Sol intérmédiaire entre le sol colluvial et sol brun.

Bonnes qualités agronomiques; horizon supérieur massif à l'air, peut se dégrader facilement et rapidement. Ceci est peut-être dû au travail du sol.

Profil

A11 0-20 cm: gris brun (10 YR 4/4), texture limono-argileuse, humifère, structure massive à éclats, peu poreux, racines abondantes, horizon de labour.

A12 20-32 cm: gris brun (10 YR 3/3) argilo-humifère, structure massive à tendance polyédrique, porosité moyenne, assez faible.

32-40 cm: passage moyennement progressif.

B1 40-80 cm: gris brun (10 YR 4/4) limoneux, argileux, structure polyédrique, porosité assez bonne, à partir de 50 cm structure prismatique limitée assez progressive, système racinaire faible.

B2 80-90 cm: passage assez net.

C 90-115 cm: brun rouge (5 YR 4/4) horizon tassé, sablo-argileux continu, non structuré, quelques racines assez grosses.

Propriétés chimiques (0 - 20 cm)

C %	= 9,7 %
P_2O_5 total	= 3,5 à 6,3 ‰, non calciné à calciné
P_2O_5 Olsen	= 1 ‰
Capacité de rétention	= 76%
Densité	= 1,39
SiO_2 / Al_2O_3	= 2,5
pH au champ	= 6,6

Prélèvements: 7-20 cm 20-32 cm 40-80 cm 80-90 cm 90-115 cm.

Antsirabe - CIRRA - (ANT-C)

Sol brun eutrophe tropical, probablement au-dessus d'un sol ferrallitique sur roche basaltique.

SiO_2 / Al_2O_3 = 2,5 en A; 0,3 en B

Végétation: Riz - maïs, céréales, pas de pommes de terre.

Roche-mère:Le volcanisme (très récent, holocène, moins de 10.000 ans) se manifeste dans la région de Betafo (6.500 ha), dans le Nord du bassin lacustre d'Antsirabe (8.400 ha), et constitue enfin tout le complexe d'Ihosy (34.000 ha). Les édifices, coulées et cendres de ces épisodes ont été parfaitement conservés et leur altération est très peu avancée. C'est un volcanisme explosif exclusivement acide (projections trachytiques d'âge très récent).

Topographie: Plateau, station d'élevage sur la route de Betafo.

Profil

A: 0-30 cm: brun, assez structuré, polyédrique, plus ou moins émoussé, limoneux, horizon A plus émoussé

B: 30-70 cm: rouge, un début de ferrallitisation, structure horizon B plus polyédrique et plus grumeleuse en profondeur.

C: A plus de 80 cm: roches volcaniques plus ou moins altérés, poreuse, sol brun eutrophe tropical sur sol ferrallitique érodé.

Prélèvements: ANT-C 19: 0-30 20: 30-70 21: > 80

Propriétés chimiques (en A)

P_2O_5 total	= 2,97 à 5,7‰, calciné
P_2O_5 assimilable	= 0,375‰
SiO_2 / Al_2O_3	= 2,3

*

DEUXIÈME PARTIE

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

1 - MÉTHODES CHIMIQUES

1.1. Phosphore total

La teneur en phosphore total peut être déterminée par l'acide nitrique concentré bouillant, ou par l'acide perchlorique, ou par l'attaque nitroperchlorique, ou après fusion alcaline à haute température qui dissout la silice en silicate, l'aluminium en aluminate, le manganèse en manganate, le phosphore en phosphate. Le fer se dépolymérise:

$$(Fe_2O_3)n \text{---} n(Fe_2O_3)$$

L'extracteur utilisé ici est l'acide nitrique avec ou sans calcination à 450°, en présence de nitrate de magnésium.

1.2. Phosphore assimilable

Le phosphore assimilable est dosé en utilisant différents extractifs: solutions d'acides forts, d'acides faibles, de bases faibles, des résines et des sels.

- *Méthode OLSEN-modifiée par DABIN (1967)* - dite aussi:
- *Méthode ORSTOM (BONDY) - modification des méthodes OLSEN et JACKSON*

a) Principe

Le phosphore est extrait par un réactif mixte, constitué d'un mélange de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium tamponné à pH 8,5: ($CO_3NaH + FNH_4 + NaOH$)

b) Réactifs

Bicarbonate de sodium 0,5N	M = 84,02
Fluorure d'ammonium 0,5N	M = 37,04

- sécher une nuit à l'étuve le bicarbonate de sodium; peser 42,01 g/l, les introduire dans un bécher jaugé d'un litre et dissoudre dans 950 ml d'eau.
- sécher et peser 18,52 g/l de FNH_4
- les mélanger et ajuster le pH à 8,5 à l'aide de NaOH 2N.
- ajuster le volume à 1 litre.

Ne pas conserver plus d'un mois.

c) Extraction

- opérer sur 1 g de sol broyé à 0,5 mm environ dans un mortier de porcelaine.
- introduire la prise dans un tube de centrifugeuse en nylon de 100 ml, ajouter 50 ml de réactif.
- agiter une heure.
- centrifuger 5 mn à 4500 t/mn.

d) Purification

- ajouter une pincée de charbon pour analyse (lavé plusieurs fois à l'acide à la soude et à l'eau).

- filtrer sur un petit filtre plat dans une fiole.

e) Dosage

Le dosage des solutions se fait par la méthode Duval à l'auto-analyseur TECHNICON par réduction à l'acide ascorbique à chaud (80°C):

Dans 1 litre d'eau: 5 g d'acide borique 0,8 M
25 g de mobybdate d'ammonium
280 ml de H_2SO_4 pur
10 g/l d'acide ascorbique)

f) Résultats

Il y a une action conjuguée des anions CO_3H^+, F^- et OH^- sur les différentes formes échangeables de PO_4^{---} liées aux cations Ca^{++}, Al^{+++}, Fe^{++}.

Les formes solubilisées attaquées par les différents extractifs peuvent être variables suivant le sol et ses différentes caractéristiques (pH, richesse en calcium, en hydroxyde).

Le rapport P_2O_5 assimilable / P_2O_5 total, qui est de 1/20 dans les sols ferrallitiques, est de 1/6 dans le sol brun.

Un rapport P assimilable / P total de 1/10 représente une limite moyenne entre sols très fixateurs et sols peu fixateurs. Bien que la valeur P_2O_5 OLSEN, de l'ordre de 0,05 ‰ pour les sols ferrallitiques, soit assez correcte au point de vue réserves, le rapport 1/20 indique un très fort pouvoir de fixation du phosphore par le sol. Quant au sol brun, une teneur de 1 ‰ de phosphore assimilable et un rapport P assimilable / P total de 1/6 indiquent une richesse exceptionnelle en phosphore, en outre bien utilisable par les plantes.

1.3. Les formes du phosphore

La sélectivité des différents extractifs à l'égard des phosphates permet d'étudier les différentes formes de liaison du phosphore avec les cations. La méthode de CHANG et JACKSON (1957) est la plus utilisée pour réaliser le fractionnement de phosphore minéral du sol.

- *Méthode de CHANG et JACKSON*

Ordre des réactifs: 1- NH_4Cl 2- NH_4F 3- NaOH 4 - H_2SO_4

1er extrait: Le phosphore soluble est extrait préalablement par NH_4Cl N; ce fractionnement consiste à traiter 1 g de sol par 50 ml de réactifs soumis à des agitations, centrifugations, décantations et lavages (extrait préalable: Phosphore soluble).

2ème extrait: Les complexants organiques ou minéraux, tels que l'acide citrique, l'oxalate d'ammonium ou le fluorure d'ammonium, déplacent les ions PO_4^{---} fixés sur différents cations, selon leur pouvoir spécifique de complexation. Le phosphore lié à l'aluminium est extrait par le fluorure d'ammonium à pH 8,5 (2ème extrait P-Al). A ce pH , le fluophosphate de fer est instable.

3ème extrait: Les solutions alcalines déplacent les ions PO_4^{---} des liaisons avec les hydroxydes de fer: échange avec OH^-. Le phosphore lié au fer et fraîchement précipité est extrait par la soude diluée 0,1N (3ème extrait P-Fe).

4ème extrait: Les solutions d'acides faibles sont susceptibles de déplacer les ions PO_4^{---} de leurs liaisons avec le calcium, mais n'empêchent pas la fixation par les hydroxydes. Le phosphore lié au calcium est extrait par l'acide sulfurique dilué 0,5N (4ème extrait P-Ca).

Cette méthode, appliquée à des phosphates bien cristallisés et peu solubles, donne des résultats quantitatifs. HANOTIAUX (1966), ERABI (1966) donnent une opinion différente. CONESA (1969) applique la méthode à des phosphates purs (amorphes ou cristallisés); à un mélange de phosphates purs et de minéraux existant dans le sol et à différents sols. D'après lui, cette méthode reflète une tendance dans l'évolution du phosphore et ne donne pas nécessairement les résultats quantitatifs de certaines des

différentes combinaisons du phosphore du sol. Selon DABIN (1974), parmi les critiques faites, la principale est que la séparation en phosphate de calcium, phosphate de fer et phosphate d'aluminium ne correspond pas à des espèces minéralogiques ou chimiques définies mais seulement à des formes et liaisons souvent transitoires et mal connues et dont la distinction quantitative est loin d'être parfaite. Ces formes peuvent évoluer dans les équilibres à long terme vers la forme la plus stable. Cependant, la répartition des ions PO_4 est en relation avec la nature du sol. Les sols calcaires ou calciques donnent une majorité de P-Ca (phosphate de calcium); les sols acides et riches en Fer donnent principalement P-Fe (phosphate de fer). Cette méthode nous permet de mettre en évidence la fixation du phosphore à court terme (absorption) et l'évolution de P à long terme (rétrogradation). Elle sera aussi utilisée pour comparer différents traitements appliqués à un sol, et différents sols entre eux.

1.4. Le phosphore organique

- Méthode ORSTOM (BONDY)

On effectue deux extraits différents par l'acide sulfurique dilué (0,5 N) et le fluorure d'ammonium, d'une part sur un échantillon traité par l'eau oxygénée exempte de phosphore, d'autre part sur un échantillon non traité. La différence entre les deux quantités de phosphore extraites, donne le phosphore organique.

- Méthode SAUNDERS et WILLIAMS (1956)

C'est la plus utilisée. La matière organique du sol est détruite par calcination au four à 550° et le phosphore organique est évalué par différence entre le phosphore total avant et après calcination. Le phosphore minéral est extrait par H_2SO_4 (0,5 N) sans calcination.

- Méthode de P. R.. HESSE - John MURRAY (1971)

On effectue deux extraits différents: d'une part l'acide chlorhydrique concentré au bain-marie bouillant sur échantillon calciné, d'autre part sur un échantillon non traité. La différence des deux donne le phosphore organique.

Le phosphore d'inclusion est obtenu par la différence:

$$P_{total} - (P_{soluble} + P_{Al} + P_{Fe} + P_{Ca} + P_{organique}).$$

1.5. Les matières humiques du sol

Pour étudier la relation entre le phosphore et la matière organique humifiée, on extrait les composés humiques colloïdaux par dissolution dans la soude décinormale (NaOH 0,1N) après décalcification du sol par l'acide chlorhydrique (HCl 0,1N). On évite l'utilisation du pyrophosphate de soude qui introduit du phosphore.

Les matières humiques totales extraites sont séparées en deux fractions:

- une fraction insoluble qui précipite en milieu acide à pH 1,5. Ce sont des grosses molécules très peu mobiles dans le sol qu'on appelle acides humiques.

une fraction soluble en milieu acide. Ce sont des molécules de plus faibles poids moléculaire qui peuvent être mobiles dans le sol, plus facilement dégradables et que l'on appelle acides fulviques.

2. MÉTHODES PHYSIQUES

Selon LARSEN, la méthode de dilution isotopique est la seule qui permet d'étudier les sols sans perturbation. Elle nous renseigne sur la quantité d'éléments labiles; de plus FARDEAU et JAPPE, et aussi LARSEN, ont montré que c'est dans « le pool labile » que les plantes prélèvent leur phosphore, ce qui permet d'identifier « le pool assimilable et le pool isotopiquement diluable». Ce phénomène rend compte des possibilités de transfert existant entre le sol et la solution. Plusieurs techniques permettent de le déterminer.

La méthode de dilution isotopique comprend diverses techniques et plusieurs déterminations: la valeur LARSEN, la valeur E, le pool très labile et la cinétique de dilution isotopique.

2.1. La valeur L

Elle consiste à introduire dans le sol un élément radioactif, $^{32}PO_4^{---}$, et à déterminer dans une récolte la radioactivité spécifique r/p (rapport de la radioactivité obtenue dans la plante, à la quantité totale du phosphore dans la plante).

LARSEN (1967) a supposé que la plante ne prélève son phosphore que dans le pool d'ions où s'est diluée la radioactivité introduite R. Soit L la quantité de phosphore stable dans le sol et dans laquelle s'est dilué R, on peut écrire:

$$R / L = r / p$$

$$L \text{ est la valeur Larsen} = (R / r) \times p$$

Si l'on apporte l'isotope avec entraîneur, on suppose que L + e se diluent dans R et on a:

$$R / (L + e) = r / p$$

Un traitement agronomique provoque une modification du pool L (qui augmente), soit par apport d'engrais, soit par dissolution de formes non isotopiquement diluables, et par la suite r/p diminue. Cela nous permettra de comparer le sol non traité avec le sol traité, par l'accroissement de la valeur L.

2.2. La valeur E

Elle est surtout utilisée pour apprécier "the avaibility of soil phosphorus" (J.C. FARDEAU, disponibilité ou assimilabilité).

Valeur E du point de vue statique (FARDEAU et JAPPE, 1978)

Cette méthode consiste à déterminer par $^{32}PO_4$ la quantité d'ions phosphates échangeables d'un système sol-solution à un instant t donné et un rapport 1/10. On introduit dans l'échantillon de sol une radioactivité totale R sous forme d'ions $^{32}PO_4^{---}$. Après un certain temps d'agitation, on mesure la radioactivité r présente en solution à l'instant t.

Soit p la quantité de phosphore en solution sous forme de $^{31}PO_4^{---}$, la quantité E du phosphore isotopiquement dilué à l'instant t est définie à partir de l'inégalité supposée des radioactivités spécifiques des ions phosphatés de la solution et de l'ensemble isotopiquement dilué:

$$R / E = r / p$$

$$E = [1 / (r / R)] \times p$$

En raison du mouvement perpétuel des ions entre la solution et le sol, r/R décroît au cours du temps et la valeur E croît.

La fonction: $r/R = f(t)$ constitue la cinétique de dilution isotopique.

Valeur E du point de vue dynamique

Cinétique de dilution isotopique.

La dilution isotopique en 13 jours (BLANCHET, 1971) permet de retrouver dans le sol environ 50% des plus fortes fumures apportées mais s'avère insuffisante pour prévoir à elle seule les conditions d'alimentation du végétal et de l'utilisation que pourra faire la plante des engrais. Une nouvelle méthode de détermination du phosphore du sol assimilable par les plantes, de FARDEAU et JAPPE (1978), permet de les déterminer en 100 minutes, c'est-à-dire plus vite que les prévisions de BLANCHET.

Elle consiste à suivre pendant 100 mn la dilution isotopique, après injection d'une quantité connue de radioactivité R (1 ml), dans un mélange de 10 g de sol et 49 ml d'eau distillée (le tout agité 17 h).

Après injection, on effectue les mesures de radioactivité entre 1 mn et 100 mn. On obtient au bout de 5 à 10 s, par filtration sous pression sur un dispositif millipore (0,2), une solution limpide et claire. Les temps le plus fréquemment retenus sont 1, 10, 40 et 100 mn. Après 100 mn, le mélange est centrifugé à 100 000 g et on prélève le surnageant pour doser le phosphore P.

On a montré que, dans les systèmes sol-solution en état stationnaire, la fonction est: $r/R = f(t)$,

la forme générale étant:

$$E(t) = [1 / (rl / R)] \times t^n \times p$$

D'après la loi empirique, (rl / R) désigne le rapport de la radioactivité rl présenté par la solution du sol après 1 mn d'échange, à celle R introduite.

En coordonnées logarithmiques, n est la pente de la droite:

$$\text{Log } E = \text{Log } [1 / (rl / R)] \times p + {}^n\text{Log } t$$

n est l'indice caractéristique de l'état du phosphore mobile du sol, il est toujours compris entre 0,5 et 0,1. Il est déterminé en faisant plusieurs mesures de r/R.

Quand n = 0,5: on suppose qu'on a un phénomène de diffusion complètement libre dans le sol et dans la solution du sol, on a affaire à des systèmes amorphes.

Quand n = 0,1: on a affaire à des systèmes cristallisés.

L'analyse par dilution isotopique de la fertilité et de la fertilisation phosphorique de quelques sols du Québec montre que lorsque: $0,4 < rl/R < 1$, le sol est facilement fertilisable (FARDEAU et JAPPE, 1978).

Il est impossible d'enrichir le sol si $rl/R < 0,1$

1	↑ sols riches
0,4	| sols moyen
0,1	| sols pauvres
	⟶

Le pool très mobile

Le pool est un compartiment dans laquelle la concentration en $^{32}PO_4^{---}$ doit être non significativement différente en tout point. FARDEAU et MARINI (1968) ont mis en évidence l'existence d'un groupe d'ions phosphates présents sur les particules de sol et de même mobilité que ceux de la solution. Ils ont appliqué un protocole simple de dilution isotopique en retour dans un système en état stationnaire.

2.3. Détermination du facteur quantité et du facteur intensité

Le facteur quantité comprend: les réserves totales du sol, les formes de réserves dans le sol et le phosphore assimilable par les plantes.

Le facteur intensité est considéré comme la concentration de la solution du sol. Il est en équilibre avec le facteur quantité.

*

TROISIÈME PARTIE

MATIÈRES ORGANIQUES ET PHOSPHORE DES SOLS

1 - MATIÈRE ORGANIQUE ENDOGÈNE: LE SOL

Analyse des sols des essais: **Tableau 1**

Le C total est dosé par la méthode au bichromate ou au coulomètre (combustion), et l'azote total par la méthode Kjeldahl.

Les acides humiques et fulviques sont extraits, soit directement par le pyrophosphate de soude (0,1 N) soit par la soude (0,1N) après traitement du sol par HCl (0,1N).

Les acides fulviques sont séparés des acides humiques par précipitation acide à pH proche de 1 - 1,5.

Résultats

L'analyse du sol d'Ampangabe montre que la matière organique contient 3,3 fois plus d'acides fulviques que d'acides humiques, soit plus de 70 % d'acides fulviques.

Dans les sols des essais, les différents traitements influent peu sur les quantités globales d'acides humiques mais il y a, par contre, de grosses différences selon les sols.

Le sol d'Ampangabe (APG) contient le moins de matières organiques (13 à 15 ‰ de C), le rapport C/N étant de 14,1. La matière humique extraite (acide humique + acide fulvique) représente environ 30 % de la matière organique totale.

Le sol de Kianjasoa (KJS) contient presque deux fois plus de matières organiques (26 ‰ de C) que APG. Le taux d'humification (matières humiques) avoisine les 40 % du C total

Le sol d'Analavory (ANL), sol brun, est le plus riche en matières organiques (46 ‰ de C). Le taux d'humification est d'environ 50%.

Le C/N décroît légèrement du sol APG vers le sol ANL (14,5 à 13,5).

Teneurs moyennes en matières organiques de l'horizon supérieur du sol témoin d'Ampangabe (de 0 à 20 cm)

C ‰ total	N ‰ total	C/N	C ‰ humique	C ‰ fulvique	C ‰ hum. + fulv.	Taux d'extract. (3,48 / 14,2)
14,2	0,87	16,3	0,78	2,70	3,48	25,7

2 - MATIÈRE ORGANIQUE EXOGÈNE: LE FUMIER

Le fumier vient de la ferme de Kianjasoa, sous forme de poudre sèche. C'est du fumier de bovin.

Analyse du fumier
(toutes valeurs en % - MS = matière séche)

eau	MS	C	N	P	K	Ca	Mg	Si	Fe
76,9	23,1	40,6	2,8	0,83	0,10	0,15	0,80	10,5	0,05

3 - FORMES MINÉRALES ET ORGANIQUES DU PHOSPHORE

Analyse du phosphore minéral et du phosphore organique du sol des essais d'Ampangabe
P exprimé en ppm

	T0	**T1** 5 t de fumier	**T2** NPK	**T3** NPK + 5 t de fumier	**T4** 20 t de fumier	**T5** 40 t de fumier	**T6** 100 t de fumier
P total	451	462	465	470	495	581	625
Accroissement de P total par rapport au témoin	0	11	14	19	44	130	174
P organique	50	63	50	50	81	-	94
Accroissement de P organique par rapport au témoin	0	13	0	0	31	-	40

L'apport du fumier accroît le taux de P total, surtout quand la dose de fumier est supérieure à 20 t.

On a presque le même effet avec T2 (engrais NPK) ou T1 (5 tonnes de fumier). Le résultat de T3 (NPK + 5 tonnes de fumier) est plus probant. Cependant, ce sont les fortes doses de fumier (20 - 40 - 100 tonnes) qui accroissent fortement le phosphore total et le phosphore organique.

4 - DÉTERMINATION DU PHOSPHORE DU SOL ET DES FRACTIONS HUMIQUES

Tableau 2

Le tableau 2 représente l'analyse du phosphore total et du phosphore assimilable dans les sols, et la liaison entre le phosphore et les différentes fractions humiques: matières humiques totales, acides fulviques, humine.

Les sols analysés sont identiques à ceux du tableau 1.

Méthodologie analytique du tableau 2

Les colonnes 1, 2 et 3 représentent le phosphore total du sol après attaque à l'acide nitrique concentré bouillant pendant 5 heures.

La colonne 1 représente l'attaque classique.

La colonne 2 représente l'extrait traité au charbon activé.

La colonne 3 est le phosphore total nitrique du sol calciné au préalable à 450°, en présence du nitrate de magnésium $(NO_3)_2Mg$. Cette méthode permet de doser le phosphore organique qui n'avait pas été totalement minéralisé par l'attaque classique.

La colonne 4 représente le phosphore assimilable obtenu par la méthode OLSEN modifiée (CO_3NaH + FNH_4) qui donne de bons résultats dans les sols tropicaux riches en sesquioxydes (B. DABIN).

La colonne 5 représente le phosphore des acides fulviques libres extrait par HCl 0,1N.

Les colonnes 6 à 11 représentent le dosage du phosphore sur des extraits humiques obtenus par la même méthode que ceux du tableau 1, c'est-à-dire après prétraitement par HCl-0,1 N.

Colonne 6: L'extrait humique total (NaOH 0,1N) est calciné à 450°, en présence de nitrate de magnésium; le phosphore est dosé après acidification de l'extrait calciné. La calcination libère du phosphore organique inclus dans les matières humiques totales, mais en outre, l'extrait à la soude contient du phosphore minéral adsorbé lié au Fer et à l'Aluminium.

Colonne 7: Les acides fulviques sont séparés des matières humiques totales, par précipitation acide.

Le phosphore est dosé sur l'extrait brut (encore coloré par de l'humus) après calcination à 450° en présence de nitrate de magnésium. On a aussi le phosphore organique inclus dans les acides fulviques, le phosphore minéral qui reste associé aux acides fulviques au cours de l'extraction et le phosphore minéral qui avait été extrait par la soude, et qui demeure soluble en milieu acide.

Colonne 8: L'extrait acide fulvique coloré est traité au charbon activé qui fixe les matières organiques. L'extrait incolore est analysé pour l'acide phosphorique sans calcination. Le résultat donne le phosphore minéral, qui est en grande partie lié au Fe et à l'Al et associé à l'extrait fulvique.

Colonne 9: C'est l'analyse du phosphore après calcination du charbon activé qui a fixé les acides fulviques. C'est du phosphore organique lié aux acides fulviques.

Les colonnes 10 et 11 représentent le phosphore total extrait sur l'humine (attaque nitrique) sans calcination (colonne 10) et après calcination (colonne 11).

Résultats des colonnes 1, 2, 3: Phosphore total

Le P total après calcination diffère du P total classique. Une partie du phosphore organique n'a pas été attaquée par NO_3H bouillant.

La différence est faible pour le sol APG, en moyenne 0,3 ‰ P_2O_5. Elle est plus forte pour le sol KJS, en moyenne 0,5 ‰ P_2O_5.

Cette différence devient considérable pour le sol ANL, environ 3 ‰ P_2O_5, ce qui double approximativement la teneur du P total (de 3 à 6 ‰)

Cette teneur en phosphore total vrai augmente avec le taux de matière organique du sol, carbone et azote total.

Pour APG *(sol ferrallitique fortement désaturé)*, sa teneur en phosphore total est sensiblement égale à sa teneur en azote total: 1 ‰ du sol.

Pour KJS *(sol ferrallitique moyennement désaturé)*, P_2O_5 total et N total sont voisins de 1,7 ‰.

Pour ANL *(sol brun)*, le taux de phosphore total après calcination est presque le double du taux d'azote total (P_2O_5 = 6 ‰ - N = 3,3 ‰). L'enrichissement du phosphore est plus que proportionnel au taux de matière organique. Généralement les sols formés sur roches basiques, sont riches en phosphore.

Colonne 4: P_2O_5 assimilable OLSEN modifié, moyen à faible dans APG et KJS, est élevé dans ANL.

Colonne 5: L'extrait HCl 0,1N n'est qu'un simple prétraitement de déminéralisation pour faciliter l'extraction ultérieure de l'humus par NaOH 0,1N. Le taux de phosphore extrait est inférieur à celui du phosphore assimilable.

Colonne 6: L'extrait à la soude 0,1N qui donne les matières humiques totales (acides humiques et acides fulviques) contient d'importantes quantités de P minéral et organique.

Si l'on compare la colonne 6 avec la colonne 3 (P_2O_5 total après calcination), le phosphore extrait à la soude lié à l'humus représente environ:

1/4 du P total dans APG:	(P_2O_5 MHT / P_2O_5 Total)	= 0,25 / 1,2
1/3 du P total dans KJS:	(P_2O_5 MHT / P_2O_5 Total)	= 0,55 / 1,7
1/2 du P total dans ANL:	(P_2O_5 MHT / P_2O_5 Total)	= 3 / 6,2

Ces rapports sont voisins des taux d'humification déterminés antérieurement (tableau 1).

Colonne 7: L'analyse du phosphore dans les acides fulviques après élimination des acides humiques indique des valeurs proches de celles des matières humiques totales (comparaison des colonnes 6 et 7).

Cela provient du fait qu'une grande partie de l'humus est sous forme d'acides fulviques et que la majorité du phosphore extrait avec l'humus est associée aux acides fulviques.

Les différences de teneurs en matières organiques influent considérablement sur les autres propriétés des sols, en particulier la teneur en phosphore.

Colonne 8: l'analyse du phosphore de l'extrait acide fulvique non calciné mais traité au charbon activé (qui fixent les matières organiques) donne des valeurs qui sont inférieures d'environ 1/3 dans APG, 1/5 dans KJS et de 1/10 dans ANL, c'est le phosphore sous forme minérale (comparaison colonne 7 et 8). Le complément est le P organique inclus dans les acides fulviques et se retrouve dans la colonne 9. Le phosphore organique représente 1/3 du P minéral dans APG, 1/4 dans KJS et 1/10 dans ANL.

Conclusion partielle du tableau 2: phosphore et fractions humiques

Le phosphore lié à l'humus (alcalino ou acidosoluble) se trouve en quasi totalité lié aux acides fulviques et en majorité sous forme minérale; 1/4 à 1/10 seulement étant sous forme organique dans les acides fulviques.

La forme minérale peut être un complexe plus ou moins lié aux acides fulviques. Il y a en effet, une relation entre la quantité de phosphore extrait et la proportion de la matière organique totale du sol.

En ce qui concerne le phosphore insoluble, les colonnes 10 et 11 représentent le phosphore lié à l'humine (qui fait partie du phosphore total, constitué du phosphore organique insoluble et du phosphore d'inclusion). Ce phosphore n'intervient qu'à long terme dans l'alimentation des plantes mais constitue une réserve importante dont une partie peut se minéraliser (humine jeune).

Cette liaison majoritaire du phosphore adsorbé au complexe avec les acides fulviques permet d'envisager une méthode d'extraction simple avec un acide un peu plus concentré, par exemple l'acide chlorhydrique N, qui est susceptible d'extraire directement les acides fulviques libres ainsi que le phosphore minéral et organique qui est lié à ces acides fulviques.

Le traitement direct du sol par HCl 1N permettra donc d'extraire une fraction mobile de complexe phosphore humus, ceci grâce à l'importance des acides fulviques dans les matières organiques humifiées.

5 - DYNAMIQUE DU PHOSPHORE

Les sols contiennent des quantités variables de phosphore total. On le trouve sous forme minérale et sous forme organique. Le phosphore organique représente 15 à 50 % du phosphore total. Le phosphore minéral en représente généralement la plus grande partie.

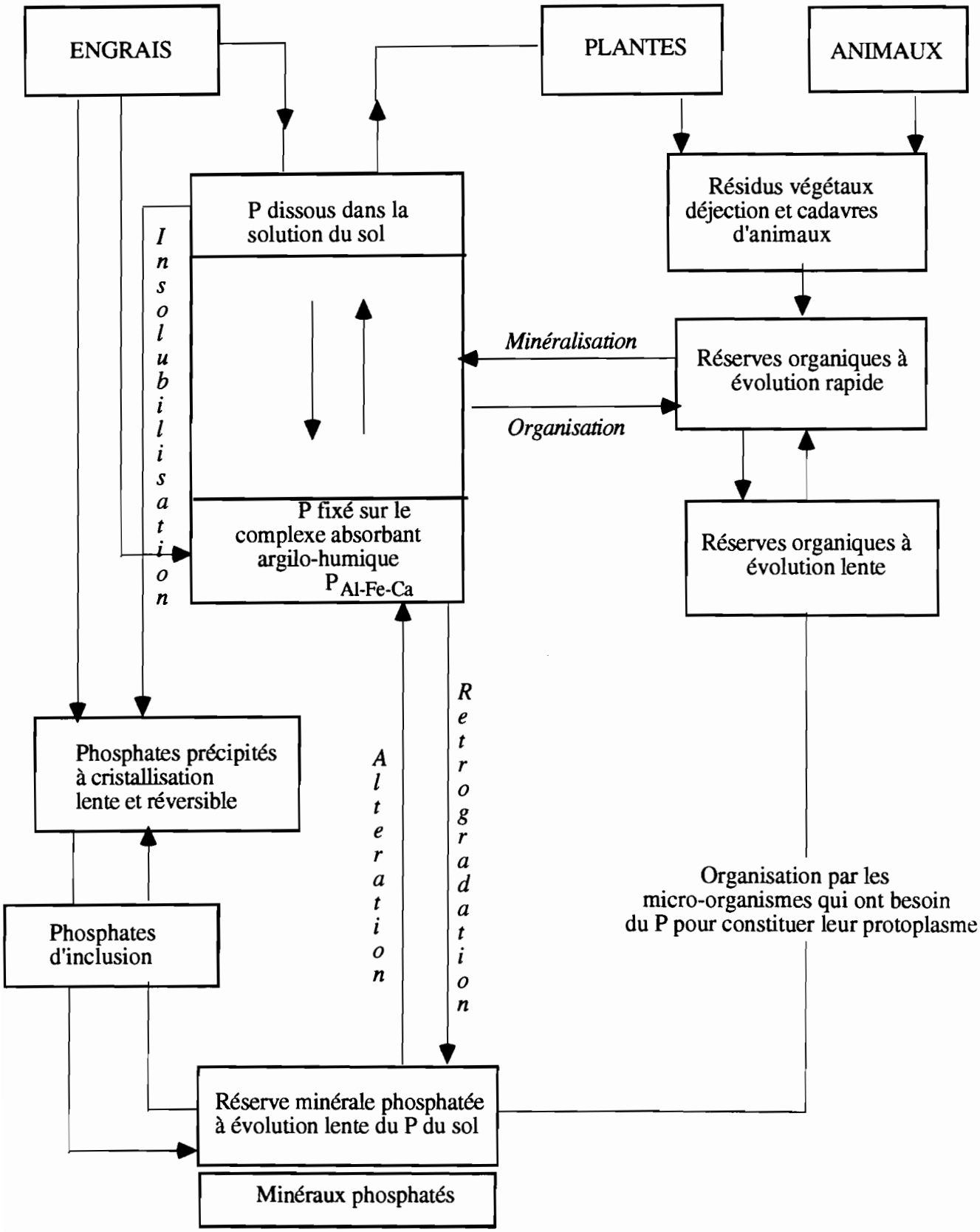
L'élément phosphore participe à des phénomènes cycliques, soumis à différents mécanismes physico-chimiques et biologiques (d'après DOUGLAS, Mc. LAREN, 1964; DEMOLON, GACHON, 1969), schématisés par la **figure 1**.

Lorsqu'on apporte des engrais minéraux, une partie est dissoute dans la solution du sol, une autre fixée sur le complexe absorbant et peut-être précipitée sous forme de phosphate de Ca, de Fe et d'Al. La plante ne peut utiliser que le phosphore sous forme minérale. Elle puise ces ions dans le pool des ions isotopiquement échangeables (BARBIER, 1964). Le phosphore lié au Ca, au Fe et à l'Al participe dans une certaine mesure à ce pool (GACHON, 1972), particulièrement pour les phosphates franchement précipités.

Figure 1

CYCLE DU PHOSPHORE

D'après DOUGLAS, Mc LAREN (1967), DEMOLON, GACHON (1969)



Quand la consommation par la plante abaisse la concentration de la solution du sol, une partie des ions liés au complexe absorbant passe dans la solution pour rétablir un équilibre rompu.

Cette alimentation de la plante en phosphore est étroitement liée à l'acidité du sol. En effet, les ions phosphates sont sous trois formes:

HPO_4^- $H_2PO_4^{--}$ soluble PO_4^{---} insoluble.

Les ions phosphates peuvent migrer vers les surfaces internes des feuillets des molécules d'argiles. On les trouve aussi associés à l'humus sous forme de composés mal définis dits humophosphates, capables de se dissocier. La fixation des ions phosphates met en oeuvre des agents mixtes tels que complexe, (argile, humus), sesquioxydes, carbonates, humates calciques, capables de donner d'autres formes de liaison très stables qui les conduisent à des états de rétrogradation (phosphates dits d'inclusion, phosphates organiques). Les phosphates solubles ou adsorbés peuvent être utilisés par les micro-organismes et passer à l'état organique.

Il peut y avoir dissolution de P après altération des minéraux du sol et passage à l'état adsorbé ou organique. La minéralisation des matières organiques peut redonner du P minéral adsorbé ou soluble.

En général, le C% augmente avec le temps. Il y a une légère augmentation de P. Le P ne peut être soluble qu'à l'état de phosphate ferreux (échange entre PO_4^{---} et le fixateur Fe) ou masqué par la matière organique. Il y a échanges successifs:

P métasoluble $\Leftrightarrow$ P organique soluble $\Leftrightarrow$ P organique insoluble

Polymérisation combinée: Acides fulviques - Fe - P

Un rapport: P assimilable / P total $\geq 0,1$ indique un phosphore peu fixé.

Un rapport P assimilable / P total < à 0,1 indique que le P est bloqué sous forme de complexe.

6 - LIAISON DU PHOSPHORE AVEC LA MATIÈRE ORGANIQUE ET LES MÉTAUX, Al ET Fe

Tableaux 3 (1-2-3) et graphiques (1-2-3-4-5)

Cette étude a été réalisée au moyen de prélèvements de terres de cultures correspondant aux sols précédents, effectués après 3 et 6 semaines (**tableaux 3-1**), 9 et 15 semaines (**tableaux-3-2**).

Méthodologie des essais en vase de végétation (méthode LARSEN)

Plante test: riz pluvial

Traitements appliqués: (dose NPK; 60, 60, 60)

T_0	= témoin
T_1	= NPK
T2 et T_4	= NPK + 5 t de fumier
T_3	= 20 t de fumier

On effectue des analyses de sol à différentes dates: 3 semaines; 6 semaines; 9 semaines; et 15 semaines.

Compte tenu de la prédominance du phosphore minéral et des acides fulviques associés, le phosphore, les acides fulviques, le Fer et l'Aluminium sont extraits par HCl N (agitation à froid).

Le phosphore est dosé sur l'extrait chlorhydrique après traitement au charbon activé. L'extrait purifié est amené à sec et repris par H_2SO_4 en vue de dosage. C'est le phosphore minéral soluble P_{ms}.

Le carbone des acides fulviques, C ‰, est dosé sur l'extrait brut qui est minéralisé par calcination, avant un nouveau dosage de phosphore. On a aussi la somme du phosphore minéral et du phosphore organique liés aux acides fulviques:

$$P_{AF} = P_{ms} + P_{os} = \text{P minéral soluble} + \text{P organique soluble.}$$

En retranchant P_{ms} on obtient: P_{os} = P organique soluble.

L'aluminium et le fer sont également dosés sur cet extrait.

Résultats: L'examen de tous les tableaux et annexes, montre une certaine variabilité.

Pour corriger cela, nous avons calculé les moyennes des résultats de toutes les colonnes correspondant aux divers traitements qui influent assez peu sur les résultats.

Les valeurs moyennes ont été calculées pour six sols (**tableau 3-3**):

- 2 sols *ferrallitiques fortement désaturés* (APG - ANT-F)
- 2 sols *ferrallitiques moyennement désaturés* (KJS - ANT-IV) et
- 2 sols *bruns* (ANL - ANT-C)

Interprétation des résultats

Les différentes valeurs analysées à quatre dates de prélèvement (3-6-9-15 semaines car les résultats après 22 semaines sont trop incomplets) sont les suivantes:

- phosphore minéral soluble extrait avec les acides fulviques libres
- carbone des acides fulviques libres
- phosphore organique soluble
- Aluminium et Fer extraits avec les acides fulviques libres.

Nous raisonnons sur les moyennes des résultats: **tableau 3-3 et graphiques**.

Phosphore minéral soluble

C'est la valeur qui nous intéresse le plus car sans doute la plus utile pour l'alimentation phosphatée des plantes.

Pour juger l'ordre de grandeur de la quantité de phosphore extraite par HCl N à froid, en même temps qu'une fraction libre des acides fulviques, nous comparons avec les teneurs en phosphore assimilable OLSEN modifiée données dans le tableau 2. Tous les chiffres sont calculé en ppm de P_2O_5. Pour cela nous considérons les valeurs maximum du P minéral soluble (à 6 semaines ou 9 semaines) et nous multiplions par

$$71/31 = (P_2O_5) / P \# 2,2$$

Comparaison de P_2O_5 (extrait HCl N) et de P_2O_5 assimilable (OLSEN modifié)

	P_2O_5 minéral soluble	P_2O_5 assimilable
APG	70	50
ANL	1034	1000
KJS	70	55
ANT-F	101	70
ANT-IV	180	181
ANT-C	369	400

Les différentes valeurs sont parallèles et tout à fait comparables entre elles. Cette correspondance de l'extrait phosphorique par HCl N et du phosphore assimilable OLSEN modifié montre la validité de cet extrait.

Évolution du phosphore en fonction du temps: **(graphiques 1-2-3-4-5)**

Si nous considérons l'ensemble des six sols et les moyennes des traitements, nous constatons que le phosphore minéral augmente généralement entre 3 semaines et 6 semaines dans un rapport parfois du simple au double.

Il se maintient à un niveau élevé, ou parfois augmente encore à 9 semaines, puis il décroît généralement à 15 semaines pour se rapprocher du niveau de départ. La diminution est nette dans les sols

ferrallitiques. Elle est atténuée dans les sols bruns en raison du niveau élevé de phosphore, mais forte en valeur relative.

En ce qui concerne le phosphore organique des acides fulviques libres, il semble présenter une évolution inverse, et diminuer en fonction du temps: à 6 semaines, 9 semaines et 15 semaines; ceci est valable pour les sols ferrallitiques mais pas pour les sols bruns où le phosphore organique demeure élevé à 15 semaines.

Dans le cas du phosphore organique, les variations sont plus aléatoires que dans le cas de phosphore minéral où la méthodologie est plus directe et plus simple.

Néanmoins, l'examen global de l'ensemble des graphiques, qui montre une évolution inverse du phosphore minéral et du phosphore organique avec le temps (à partir de la mise en culture), semblerait indiquer une minéralisation biologique de certaines matières organiques avec libération du phosphore minéral; inversement dans les sols les plus riches en matière organique, il y a réorganisation du phosphore après 9 semaines.

Dans les sols ferrallitiques, la minéralisation s'opère surtout à partir des réserves organiques fraîchement formées (humine jeune); les acides humiques sont généralement stables, et les acides fulviques, surtout les plus mobiles ont tendance à augmenter en valeur relative, mais une partie se minéralise également (B. DABIN)

Humine jeune $\Rightarrow$ acides fulviques $\Rightarrow$ minéralisation
Acides humiques $\Rightarrow \Uparrow$

Si nous considérons le carbone extrait par HCl N, il représente plus ou moins 1/3 de la matière humique totale (tableau 1), et 1/6 environ de l'humine, ce qui est élevé.

Si l'on étudie l'évolution du carbone des acides fulviques libres en fonction du temps, on observe, soit une certaine stabilité, soit un léger maximum à 6 semaines, ce qui serait conforme à la minéralisation des acides fulviques libres.

L'aluminium extrait avec les acides fulviques libres par HCl N montre un certain parallèlisme avec les taux de carbone dans la majorité des sols. Il y a un léger maximum à 6 semaines comme dans le cas du carbone.

Par la suite, les fluctuations sont difficilement explicables. Si l'on compare les sols entre eux, les teneurs moyennes en Al_2O_3 augmentent dans le même ordre que les teneurs en carbone des acides fulviques avec un rapport Al_2O_3/C de 2 à 3. Les teneurs de Fe_2O_3 des acides fulviques sont 2 à 3 fois plus faibles que les teneurs en Al_2O_3

Conclusions sur les **tableaux 3**

Il y aurait lieu de développer encore davantage l'étude des résultats des tableaux 3, compte tenu d'autres résultats analytiques existants.

Si l'on s'en tient aux valeurs présentées dans les tableaux, on peut fournir quelques explications à l'évolution du phosphore en fonction du temps dans les cultures en pots en calculant les moyennes des différents traitements afin de lisser certaines fluctuations aléatoires. Les résultats sont portés sur un graphique. Les écarts entre ces traitements pour chaque type de sol ne sont pas très importants. Par contre, les différences entre les sols sont beaucoup plus importantes. En moyenne, les différences entre les dates de prélèvement montrent une certaine cohérence, en particulier si elles sont représentées graphiquement.

Les **graphiques 1 et 2** représentent le phosphore minéral soluble en fonction du temps, à 3 semaines, 6 semaines, 9 semaines, 15 semaines et le phosphore organique soluble, c'est-à-dire inclus dans les acides fulviques libres aux mêmes dates.

Nous avons vu que le phosphore minéral augmentait à 6 semaines et 9 semaines d'une façon non négligeable et revenait à 15 semaines à un niveau proche de l'origine. Le phosphore organique soluble

suit une évolution inverse. Il diminue fortement dans les sols ferrallitiques et les sols bruns à 9 semaines, mais reprend des valeurs élevées à 15 semaines dans les sols bruns. Il est possible que le phosphore minéral à 6 semaines et 9 semaines vienne partiellement de la décomposition du phosphore organique des acides fulviques libres, mais la régénération du phosphore organique à 15 semaines viendrait plutôt de la décomposition de réserves organiques situées dans l'humine, en particulier la fraction la plus récente, et aussi de la décomposition du fumier lorsque celui-ci est utilisé; ceci serait conforté par le fait que les teneurs de carbone des acides fulviques libres montrent un léger maximum à 6 semaines et une remontée à 15 semaines, surtout dans les sols bruns riches en réserves organiques.

Dans les régions tropicales humides, les acides fulviques libres, qui ont la molécule la plus petite, sont au bout de la chaîne des transformations humiques. Une partie se minéralise, une autre partie se régénère à partir des molécules organiques plus importantes, en particulier provenant de l'humine récente, les acides humiques quant à eux sont beaucoup plus stables. Le phosphore assimilable dans les sols semble donc présenter un accroissement au début de culture, (la plus grande partie du phosphore d'une plante est absorbé au cours des premières semaines de la croissance), c'est donc un effet bénéfique. Les réserves assimilables ont ensuite tendance à diminuer, mais un mécanisme de régulation semble les maintenir à un niveau suffisant, surtout dans les sols qui possèdent de fortes réserves de matière organique et de phosphore incluses dans cette matière organique. Dans les sols ferrallitiques par contre, plus pauvres en réserves organiques (APG - KJS -ANT-F), les réserves en phosphore organique des acides fulviques s'épuisent davantage à 15 semaines et ont plus de mal à se régénérer (**graphiques 3-4-5**).

Parmi les métaux associés aux acides fulviques et au phosphore, l'Aluminium semble dominer très largement sur le Fer, bien que ce dernier soit assez abondant, le rapport: métal / acide fulvique est très important, il le serait davantage en rapport moléculaire, c'est donc que le pouvoir de fixation de ces complexes (métaux - acide fulvique) pour le phosphore est très élevé. Néanmoins les complexes phosphore-aluminium fournissent généralement davantage de phosphore assimilable (méthode OLSEN modifiée) que les complexes phosphore-fer beaucoup plus stables. Les courbes Al_2O_3 suivent assez globalement les courbes du carbone des acides fulviques libres.

Ces différents sols se classent entre eux dans le même ordre que les taux moyens de carbone des acides fulviques libres.

7 - ÉTUDE DES COMPLEXES HUMIQUES DE FER ET D'ALUMINIUM

Tableaux 4 (1-2)

Méthodologie (identique à celle du tableau 2)

Après l'analyse du phosphore dans les extraits acides humiques et fulviques, le fer et l'aluminium ont été dosés dans des extraits identiques:

* dans un prétraitement à HCl 0,1N, avec dosage direct du Fe et d'Al après minéralisation (A).

* dans une extraction avec NaOH 0,1N, avec dosage de Al et Fe après minéralisation (D), puis séparation des acides fulviques et dosage de Fe et Al, soit après minéralisation (E), soit après purification de l'extrait au charbon activé (G).

Cette méthode permet de séparer les fractions organiques de Fe et d'Al associées aux acides fulviques (H).

Interprétation des résultats

Comme dans le cas du phosphore du tableau 2, la colonne E (Al_2O_3 lié aux AF après acidification est très voisine de la colonne D (Al_2O_3 lié aux MHT). Le traitement au charbon activé fixe très peu l'Al (G est peu différent de E). C'est-à-dire que cet Al associé aux acides fulviques est essentiellement sous forme minérale. La forme organique reste très faible. Les quantités d'Al extraites augmentent dans le même sens que la teneur en matière organique.

ANL > KJS> APG.

Résultats en Al_2O_3 du sol (Tableau 4-1)

L'aluminium se trouve essentiellement sous forme minérale, associé aux acides fulviques dans les extraits à l'acide chlorhydrique et à la soude, et sans doute aussi au phosphore extrait par les même réactifs.

A	Al_2O_3 extrait par HCl 0,1N
B	Al_2O_3 de l'extrait traité au charbon: Al_2O_3 minéral
C = A - B	Al_2O_3 organique (AFL)
D	Al_2O_3 dans l'extrait total par NaOH 0,1N (matière humique totale)
E	Al_2O_3 dans l'extrait acide fulvique (organique + minéral)
F = D - E	Al_2O_3 dans les acides humiques (organique)
G	extrait acide fulvique traité au charbon = Al_2O_3 sous forme minérale
H = E - G	Al_2O_3 sous forme organique dans les acides fulviques.

Résultats en Fer du sol (Tableau 4-2)

En ce qui concerne le fer, l'acide chlorhydrique n'extrait que de faibles teneurs, d'ailleurs essentiellement sous forme minérale. La soude extrait également des quantités de Fer beaucoup plus faibles que les quantités d'aluminium; le Fer après acidification de l'extrait humique est en quantité plus faible (dans les acides fulviques) que celle qui est reste liée aux acides humiques.

Le Fer sous forme organique est équivalent ou supérieur au Fer sous forme minérale.

La liaison entre l'Al et la matière humique est comparable à la liaison du phosphore avec la matière humique.

Le Fer semble se comporter d'une façon différente et est dans l'ensemble, moins mobile et davantage lié aux matières humiques peu solubles (**graphiques 3-4-5**).

Analyse par la méthode Larsen (phosphore isotopique) sur les essais en pots

Interprétation des résultats des **Tableaux 5 (1-2-3-4-5-6)**

T1 = NPK
T3 =20 T de fumier
T2 = T4 = NPK + 5 T de fumier

En utilisant la méthode de Larsen au ^{32}P, une série de mesure est effectuée sur la plante et le sol en particulier.

P représente le phosphore de la plante, provenant du sol et des engrais. Une partie P_E représente le phosphore provenant de l'engrais, l'autre partie P_S est le phosphore provenant du sol.

$$P = P_E + P_S$$

Soit E la quantité d'engrais apporté, P_E/E représente le coefficient d'utilisation de l'engrais.

Enfin, le rapport r1/R (radioactivité après 1 minute / radioactivité introduite) a été déterminé sur le sol pour évaluer son pouvoir fixateur. Seuls, les tableaux pour les sols APG, ANL, ANT-F, ANT-C, présentent des résultats suffisamment complets (tableaux 5/1-2-3-6).

Si l'on considère le prélèvement du phosphore par les plantes soit P', il n'y a pas de différences très importantes entre les traitements: l'engrais seul NPK donne des valeurs équivalentes ou supérieures aux traitements contenant du fumier. Les différences importants concernent les types de sol différents.

ANL: sol brun, riche en humus est nettement supérieur (trois à quatre fois) aux sols ferrallitiques (APG, KJS, ANT-F). Le sol ANT-C est intermédiaire.

En ce qui concerne la répartition du phosphore, provenant de l'engrais ou provenant du sol, c'est le phosphore provenant du sol qui est dominant dans tous les échantillons. Cela explique les faibles différences entre les traitements.

Tableau de comparaison des moyennes

Sol	P' Plante	Ps sol	Pc engrais	r1/R (fixation)
APG	0,31	0,23	0,14	0,0036
ANL	1,53	1,27	0,25	0,0081
KJS	0,41	-	-	0,0023
ANT-F	0,39	0,28	0,06	0,0008
ANT-C	0,67	0,45	0,16	0,0022

L'absorption du phosphore par la plante se présente dans l'ordre suivant:

ANL > ANT-C > KJS > ANT-F > APG
Sols bruns Sols ferrallitiques

En ce qui concerne le pouvoir fixateur du sol pour le phosphore, qui est inversement proportionnel à la valeur de r1/R, il est le moins élevé dans le sol ANL. Néanmoins toutes les valeurs de r1/R sont inférieures à la limite 0,1 considérée comme impropre à la fumure minérale (FARDEAU).

Tous les sols sont très fixateurs, mais le sol ANL l'est un peu moins que les autres.

Le phosphore prélevé dans l'engrais augmente dans le même sens que la valeur de r1/R; il est maximum dans le sol ANL.

Le coefficient d'utilisation de l'engrais est parfois inférieur à 1%: dans les sols ANT-C, ANT-IV, KJS, ANT-F.

Il est une fois supérieur à 3%: dans le sol ANL.

Il n'est pas toujours maximum dans les sols ayant reçu des engrais phosphatés et du fumier, par exemple les sols APG, ANL, ANT-F.

*

QUATRIÈME PARTIE

DÉTERMINATION DU COEFFICIENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AU COURS DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

ÉTUDES PRÉALABLES

Nous avions publié ou rédigé précédemment trois articles se rapportant à ce sujet. Les pages suivantes vont en rappeler les résultats essentiels.

1. ESSAIS EN VASES DE VÉGÉTATION SUR UN SOL FERRALLITIQUE FORTEMENT DÉSATURÉ (APG)

[Article 1: RAHARINOSY, 1983]

Sur un échantillon agronomique (0-17 cm) de *sol ferrallitique fortement désaturé* (Ampangabe) on a étudié l'effet de l'enfouissement de différentes doses de fumier, seul ou associé à NPK, en fonction du temps, à 18 jours, 2 mois, 3 mois, et l'exportation du phosphore par une culture de ray-grass après 5 mois ½ d'enfouissement d'engrais.

Différentes méthodes chimiques et isotopiques de détermination du phosphore ont été utilisées: formes du phosphore(CHANG et JACKSON), P assimilable (OLSEN-modifié DABIN), valeur L et cinétique de dilution isotopique.

1.1. Méthodologie

Essais			
1 - témoin		+ dolomie	(500 kg)
2 - sol	+ NPK (60-60-60)	+ dolomie	"
3 - sol	+ NPK (60-300-60)	+ dolomie	"
4 - sol	+ 5 t de fumier	+ dolomie	"
5 - sol	+ 10 t de fumier	+ dolomie	"
6 - sol	+ 20 t de fumier	+ dolomie	"
7 - sol	+ 40 t de fumier	+ dolomie	"
8 - sol	+ 100 t de fumier	+ dolomie	"
9 - sol	+ NPK + 10 t de fumier	+ dolomie	"

Les produits sont apportés sous forme de poudre et mélangés intimement aux sols secs.

1.2. Résultats

Une forte dose de fumier provoque un accroissement des formes extraites par les réactifs CHANG et JACKSON, surtout la forme soluble, en particulier après 8 semaines, et diminue la forme extraite par NaOH 0,1N (P-Fe). (**Tableau 7**).

L'excès de matière organique par rapport au fer semble favoriser la fixation du phosphore par des complexes matière organique-fer qui évoluent avec le temps. À court terme il y a augmentation des complexes organiques de P peu solubles liés au Fer. Après 2 mois, il y a décomposition des

complexes et passage du P à l'état soluble, puis entre 3 et 5 mois, à nouveau fixation progressive du P sur des complexes peu solubles (extrait NaOH).

L'association de NPK à une dose faible de fumier (5 t/ha) accroît le poids de récolte de 30 % par rapport au fumier seul, mais peu par rapport à NPK seul. (**Tableau 6**).

La dose de 100 t de fumier double le rendement par rapport à l'engrais seul et le triple par rapport au témoin.

Tableau 6

Poids de récolte (en mg de matière sèche) et exportation de P (en mg/vase)

C1: 1ère coupe C2: 2ème coupe T: total

	Poids de récolte			Exportation de P			P des engrais
	C1	C2	T	C1	C2	T	
T0 - Témoin	1200	1010	2210	1,75	0,50	2,25	
TI - 5t de fumier	1505	880	2385	1,52	0,46	1,98	2,3
TII - NPK	1680	1590	3270	2,16	0,68	2,84	7,0
TIII - 5t de F +NPK	1850	1450	3300	2,24	0,80	3,04	9,4
TIV - 20t de F	1520	955	2475	1,70	0,49	2,19	9,3
TV - 40t de F	1810	1435	3245	2,59	1,06	3,65	16,6
TVI - 100t de F	2770	3540	6310	3,28	3,68	6,96	46,4

(Le phosphore des engrais: en mg/800g de sol)

Si l'on examine le tableau, les poids de récolte de la 1ère coupe croissent selon l'ordre suivant:

TO< TI< TIV< TII< TIII< TV< TVI

Ces résultats sont en concordance avec les valeurs de P OLSEN-modifié (analysé à 5,5 mois).

Les poids de récolte de la deuxième coupe sont plus faibles que ceux de la 1ère coupe, sauf pour le traitement 100 t de fumier (C1 = 2770 - C2 = 3540).

L'apport de 5 t de fumier donne un rendement plus faible (rendement totaux à la deuxième coupe que celui du témoin; mais la récolte totale est un peu plus forte). L'apport de 100 t de fumier triple les poids de récolte totale. Le fumier appliqué seul jusqu'à 20 t n'influe pas beaucoup sur le poids de récolte totale. Le traitement NPK augmente de 100 mg de MS/vase (c'est-à-dire environ 50 %) par rapport au témoin.

Les exportations en P varient dans le même sens que le poids de récolte, sauf pour le traitement 20 t de fumier.

Comparaison avec les résultats du Tableau 3-3

Compte tenu d'une meilleure alimentation phosphatée des plantes par les sols humifères (ANL, ANT-C), par rapport aux sols ferrallitiques plus pauvres, il est intéressant d'étudier si un enrichissement artificiel en matières organiques des sols ferrallitiques les plus pauvres (APG), par apport de fortes doses de fumier, peut fournir une amélioration comparable à celle que l'on observe sur les sols naturellement humifères (ANL, ANT-C). Des enrichissements allant jusqu'à 100 t de fumier/ha, ont été suivis dans des essais en pots, et l'analyse des formes de phosphore, d'après

CHANG et JACKSON, a été pratiquée à différentes dates de prélèvement (1 jour - 2 mois - 3 mois etc ...). Les résultats ont été portés sur des graphiques en fonction du temps.

Les résultats obtenus montrent que le fumier, après 2 mois d'enfouissement, provoque un accroissement des formes extraites par NH_4F (P-Al), par H_2SO_4: (P-Ca), et par le réactif OLSEN: (P assimilable); ainsi qu'une diminution des formes extraites par NaOH 0,1N. Cette diminution est symétrique de l'augmentation de phosphore soluble et autres formes P-Al et P-Ca assimilables.

1.3. Interprétation et conclusion

Comparaison des graphiques du **Tableau 7**[1] avec les graphiques 1 et 2 correspondant au **tableau 3-3** du présent article.

Si l'on compare les résultats des analyses CHANG et JACKSON, du **tableau 7**, avec les teneurs en phosphore minéral soluble des sols ferrallitiques (APG, KJS, etc ...), présentées dans les **tableaux 3** et reportées en fonction du temps sur les **graphiques 1 et 2** (courbes de valeurs moyennes à 3, 6, 9 et 15 semaines), nous voyons une bonne correspondance entre la forme des courbes représentatives du P OLSEN, du P-Al (extrait NH_4F à pH 7) et celle du phosphore minéral soluble extrait par HCl N. Il y a dans tous les cas un accroissement de P soluble et P assimilable entre 15 jours, 6 semaines, 8 semaines et diminution ultérieure. Les écarts sont d'autant plus nets que les sols ont été davantage enrichis en matière organiques (40 t et 100 t de fumier).

Les valeurs sont du même ordre que dans les sols ferrallitiques fortement désaturés, mais très inférieures aux valeurs des sols bruns. Cette correspondance des courbes du phosphore assimilable en fonction du temps dans deux essais différents et par des méthodes d'analyse différentes est une preuve de la validité de ces résultats.

Le phosphore soluble extrait par NH_4Cl N présente, lui aussi, un maximum très net à 8 semaines, pour décroître ensuite rapidement. L'accroissement de ce phosphore est le plus important (l'écart maximum de P soluble se situe pour la dose 100 t de fumier).

Cette durée de plusieurs semaines pour l'obtention d'un maximum de P soluble indique que le phosphore au départ n'était pas soluble, mais que cette solubilité s'est développée par un processus régulier dans le temps, qui s'apparente bien à une minéralisation biologique de matières organiques riches en phosphore.

Ce qui est très net également c'est la forme tout à fait symétrique de l'extrait P-Fe (phosphore lié au Fer). Cet extrait est obtenu par NaOH 0,1N, qui extrait les matières humiques, et le phosphore associé est dosé après précipitation acide des acides humiques (complexes P-Fe - acides humiques). Il est intéressant de constater le parallélisme entre ces courbes et celles du phosphore organique soluble (**tableaux 3**) avec un minimum à 8 semaines suivi d'une remontée. Les complexes organo-minéraux se dissocient et donnent du phosphore soluble.

L'évolution au cours des premières semaines de culture prélèverait une partie du phosphore associé aux matières humiques et au Fer pour le faire passer sous des formes plus solubles; puis le phosphore rétrograderait à nouveau sous des formes moins solubles. Les écarts sont d'autant plus accentués que les sols ont été davantage enrichis en matières organiques, où sont naturellement plus riches en humus. C'est donc cet équilibre réversible qui a lieu périodiquement entre le phosphore lié à la matière organique et au Fer d'une part, et d'autre part le phosphore soluble et assimilable qui règle l'alimentation des plantes. Le tableau concernant les récoltes et les exportations du phosphore, dans une expérience en vases de végétation, conforte l'effet bénéfique sur les récoltes de l'accroissement du phosphore soluble et assimilable dans les sols par leur enrichissement en matière organique.

[1] Antérieurement publiés: RAHARINOSY, 1983 - Fig. 1 et 2.

2 - RECHERCHE D'UNE FUMURE DE REDRESSEMENT ET D'ENTRETIEN DES SOLS MALGACHES EN FONCTION DU NIVEAU DE FUMURE ORGANIQUE

[Article 2: RAHARINOSY, 1986-1]

Tableaux 8 et 9

L'article cité traitait de l'action du fumier, de la dolomie et de l'engrais phosphaté sur la fertilité phosphatée du sol. Il s'agissait d'un essai factoriel sur le sol en place à Ampangabe, pour rechercher la fumure de redressement d'un sol ferrallitique.

Les **tableaux 8 et 9** présentent les résultats de cet essai factoriel. Il y a deux doses de fumier, 5 t et 20 t, deux doses d'engrais, 60 et 300 unités de phosphore, et deux doses de dolomies 500 et 2000 Kg. Ces fertilisants sont diversement associés. Le **tableau 8** ne présente que l'analyse isotopique; le **tableau 9** montre les traitements complémentaires 26 à 28, qui comportent en particulier la forte dose de fumier de 20 t/ha associée ou non au phosphore et à la dolomie.

Les résultats d'analyse présentent les variations de pH, les modifications de rapport r1/R qui est un bon indice du pouvoir de fixation du phosphore par le sol, et différentes caractéristiques chimiques du sol: le phosphore soluble à l'eau, le phosphore assimilable OLSEN-modifié et différentes valeurs des extraits CHANG et JACKSON (P soluble, P-Al, P-Fe, P-Ca).

C'est en premier lieu la valeur du rapport r1/R qu'il est intéressant de considérer. Ce rapport est en général très faible et inférieur à 0,1 dans les sols sans fertilisants. Il faut cependant noter que la valeur r1/R peut atteindre ou dépasser 0,1 dans les sols qui ont reçu une dose de 20 t/ha de fumier. Il faut également que dans ce cas, le pH atteingne ou dépasse la valeur de 6. L'association fumier-dolomie paraît plus efficace que la dolomie seule. L'engrais phosphaté surtout à la dose de 300 unités améliore également le pouvoir fixateur: employé seul (**tableau 9**), l'augmentation de r1/R et du phosphore soluble est nette, mais demeure inférieure à 0,1 en ce qui concerne r1/R.

Cependant l'association avec 20 t de fumier et aussi l'apport de dolomie fournissent les valeurs les plus élevées de r1/R ainsi que du phosphore soluble (**tableaux 8 et 9**).

En conclusion: l'apport d'engrais phosphaté, l'apport de fumier et le relèvement du pH par la dolomie ont un effet sur la diminution du pouvoir fixateur du sol, qui se manifeste par un accroissement du rapport r1/R et du phosphore soluble. C'est l'apport du fumier à raison de 20 t/ha associé à l'engrais phosphaté qui fournit les meilleurs résultats (le fumier a un effet sur le relèvement du pH).

3 - ÉTUDE À L'AIDE DU $^{32}PO_4$ DU PRÉLÈVEMENT DE PHOSPHATE PAR LE RIZ PLUVIAL - DÉTERMINATION DU COEFFICIENT D'UTILISATION DE L'ENGRAIS AU COURS DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS

[Article 3: RAHARINOSY, 1986-2]

Méthodologie

Pour mesurer le coefficient d'utilisation du phosphore d'un engrais, aux champs, on a marqué celui-ci au $^{32}PO_4$. Cette étude nous a permis de faire le bilan d'un essai de fertilisation de longue durée (de 1973 à 1982).

Cet essai a été mis en place sur défriche en 1973-1974, cultivé en maïs avec exportations complètes des récoltes. Il s'agit d'un dispositif: bloc de Fisher avec split-plot.

Les doses initiales sont 0, 90 et 180 de P_2O_5/ha. Les doses d'entretien sont 0, 45 et 90 Kg de P_2O_5/ha.

Il s'agissait d'essais couplés, en vases de végétation et au champ, portant sur le passage de ^{32}P dans les parties aériennes et les racines des plantes à la montaison, à l'épiaison et à la récolte; le prélèvement de phosphore du sol et l'effet résiduel de l'engrais phosphaté (Phosphate monoacide d'ammonium), pendant la campagne 1981-82 (plantes tests: riz 2366 - 2320).

Variété 2366	(4)	45 U de P_2O_5	(42)	variété précoce
	(5)	90 U de P_2O_5	(43)	
Variété 2320	(0)	témoin (OO)		variété tardive
	(1)	effet résiduel	(21)	
	(2)	45 U de P_2O_5	(22)	
	(3)	90 U de P_2O_5	(23)	

Tableau 10

Résultats des essais en pots - Valeurs de Larsen

Traitements	**00(0)** témoin	**21(1)** effet résiduel	**22(2)** var. tardive	**23(3)** var. tardive	**42(4)** var. précoce	**43(5)** var. précoce
Engrais+sol en kg P/ha	43,8	90	37,9	67,0	28,0	55,7
Doses initiales	0	90	90	90	180	180
Doses d'entretien	0	0	45	90	45	90
L calculé en kg P/ha	43,8	40,9	18	27	8,4	16,4

(Témoin et effet résiduel: variété 2320 tardive)

Historique de l'essai

Pendant 5 années consécutives la plante-test a été le maïs (de 1973 à 1978) puis de 1978 à 1979 l'arachide, de 1979 à 1980 une moitié des parcelles a été cultivée en arachides et l'autre en soja, et de 1980 à 1981 toutes le furent en soja seul. Pour l'année 1981-1982 on a choisi le riz pluvial après soja.

Marquage au $^{32}PO_4$ de l'engrais: méthode directe: pour les traitements 21, 23, 42, 43

On a utilisé le phosphate d'ammonium: un granulé industriel contenant 50,7% de P_2O_5 (22,3% de P) et 11% de N. On a trié des granulés de même taille. Le marquage a été fait selon la technique J.C. FARDEAU (exposée par lui-même et R. BONIFACE, G. GUIRAND, STROCME). A 100 ml d'une solution aqueuse acidifiée (HCl à 1%) de 100 g d'engrais, on ajoute 10 mCi de $^{32}PO_4$. Le mélange est agité puis versé dans 1 litre d'acétone pure maintenu sous agitation à l'aide d'un barreau magnétique.

Après une heure d'agitation, le précipité de phosphate insoluble dans l'acétone est filtré sous vide et séché à l'air. Le produit sec final est soumis à l'analyse chimique et isotopique. Sa teneur en phosphore est de 16,7 % en P, soit 38% de P_2O_5.

Marquage du sable qui sert au marquage du sol pour les traitements 00 et 21 (témoin - sans apport d'entretien en phosphate) - (L. GACHON et ETRIBOI)

A 55 g de sable fin (0,2 à 0,5 mm) quartzeux, lavé à l'acide et à la soude dans un capsule, on ajoute 40 mCi de $^{32}PO_4$, on mélange bien l'ensemble, on évapore à l'étuve à 60°C pendant 2 jours, et on homogénéise le sable sec.

Essai au champ 1981-1982

L'essai a été conduit sur un ancien essai de fertilisation en phosphore à Ampangabe, sur sol ferrallitique fortement désaturé, de pH 5,0 faiblement pourvu en matière organique (C ‰ = 2,7) moyennement pourvu en phosphore assimilable (OLSEN-modifié, par DABIN = 36 µg/g de sol).

- 1 traitement témoin 00 comportant 4 répétitions
- 5 traitements (1,2,3,4,5) comportant 6 répétitions (en blocs) sont mis en comparaison sur des parcelles élémentaires de 32 m^2 (3,2 x 10 m); chacune des parcelles porte un des traitements.

A l'intérieur de ces parcelles, on a des sous-parcelles de 2 m x 1 m sur lesquelles on a épandu des engrais marqués au $^{32}PO_4$ radioactifs. Comme plante-test, on utilise les variétés de riz à cycle précoce 2366 (120 jours) sur les traitements 4 et 5, et à cycle long 2320 (150 jours) sur les traitements 0, 1, 2, 3.

- 0 - témoin sans phosphore, mais épandage du sable marqué: 50 g avec 32 mCi le 23/11/81, c'est-à-dire 1,64 mCi le 01/12/81 - Traitement 0-00
- 1 - épandage du sable marqué 50 g avec 3,2 mCi, sur les parcelles à effet résiduel. Traitement 1-21
- 2 - épandage de l'engrais marqué avec 1 mCi le 23/11/81, à la dose de 45 U de P_2O_5 (23,68 g d'engrais) et comme plante-test: 2320. Traitement 2-22
- 3 - épandage de l'engrais marqué avec 2 mCi, à la dose de 90 U de P_2O_5 (47,35 g d'engrais) et comme plante-test: 2320. Traitement 3-23
- 4 - épandage de l'engrais marqué: 45 U de P_2O_5 , plante-test: 2366. Traitement 4-42
- 5 -épandage de l'engrais marqué: 90 U de P_2O_5 , plante-test: 2366. Traitement 5-43

L'engrais phosphaté et le sable marqué ont été localisés à 10 cm sous les lignes de semis avant le semis et recouverts d'une mince couche de sol. De l'engrais phosphaté non marqué à la même dose a été épandu sur le restant de la parcelle élémentaire (semis le 1er décembre 1981).

Toutes les parcelles sauf le témoin ont reçu 45 U de N (avec 1/3 au semis et 2/3 au 40è jour), 45 U de K20 et 250 Kg/ha de dolomie.

Les prélèvements ont été faits aux dates suivantes:

- Le 18/01/82 (montaison), le 05/03/82 (épiaison) et le 01/04/82 (récolte) pour la variété tardive 2320, dans les traitements 0,1,2, et 3.

- Le 18/01/82 (montaison), le 23/03/82 (épiaison) et le 10/05/82 (récolte) pour la variété précoce 2366, dans les traitements 4 et 5. Ces prélèvements ont été effectués sur 2 lignes consécutives de même longueur dans chaque parcelle. La matière sèche a été pesée et ensuite on a procédé aux analyses chimiques et isotopiques. Les racines n'ont été étudiées qu'à la montaison.

Résultats

Les conditions météorologiques ont été favorables pour la plante à cycle long (150 jours) et moins pour la plante à cycle court, car l'époque de la récolte a été pluvieuse.

Rendements et analyses minérales

Les rendements ont été faibles avec un coefficient de variation élevé (**tableau 11**).Les productions de grain de riz ne montrent pas de différences nettes entre les doses d'engrais (45 et 90 kg de P_2O_5).

Celles-ci par contre ont une action hautement significative par rapport au témoin (0) et à la parcelle à effet résiduel (1) (d'une dose initiale 90 kg P_2O_5.)

En ce qui concerne les parties aériennes (feuilles) et les pailles (à la récolte), on a une différence hautement significative entre les traitements 3 et 5, les traitements 3 et 4, et significative entre 2 et 4.

Les teneurs en phosphore des grains sont normales pour les traitements 3, 4 et 5, plus faibles pour 2 et faibles pour 0 et 1.

Celles des pailles sont moyennes pour 3 et 5 (traitements ayant reçu 90 U de P_2O_5) et faibles pour 2 et 4 et très faibles pour 0. Entre la montaison et l'épiaison la quantité totale de phosphore augmente beaucoup, et reste stable entre l'épiaison et la récolte.

Coefficients d'utilisation de l'engrais au cours des différents traitements

Les coefficients d'utilisation de l'engrais (radioactivité de la plante/radioactivité totale introduite - **Tableau 13**) sont plus élevés, pour les parties aériennes, pour la variété précoce 2366 que pour la

variété tardive (2320). Cependant les traitements 4 et 5 (variété précoce) ont eu une fumure de fond double (180 kg P_2O_5) de celle des traitements 2 et 3 (variété tardive) (90 kg de P_2O_5).

Les différences sont significatives. Par ailleurs, on remarque que pour les traitements ayant reçu une double dose (90 U P_2O_5): 3 et 5, le coefficient est plus faible que pour ceux ayant reçu une simple dose (45 kg): 2 et 4.

Enfin, le traitement (4) avec la variété précoce et la dose de 45 U de P_2O_5 fournit le coefficient d'utilisation global et aux différentes stades, significativement le plus élevé; le traitement 2 avec la variété tardive et la dose de 45 U de P_2O_5 , donne les valeurs moyennes.

Utilisation du phosphore du sol par la plante

On peut calculer le rapport de la radioactivité de la plante à la radioactivité totale introduite. Ce rapport est le même pour le témoin 0 et le traitement à effet résiduel 1, aux stades de la montaison et de l'épiaison. Dans les graines, pour le traitement 1, l'utilisation du phosphore du sol est plus élevée que celle du témoin.

Étude du maintient du niveau de fertilisation atteint

Après la récolte, on a prélevé un échantillon moyen de chaque parcelle. On a procédé à des analyses de cinétiques de dilution isotopique. La modification des cinétiques (FARDEAU), r1/Ro augmente, n diminue et r1 augmente (protocole en annexe).

Tableau 12

Modification des cinétique en fonction de la dose de P_2O_5 et des variétés

Traitements / Caractéristiques	0	1	2	3	4	5
r1/Ro	0,018	0,024	0,035	0,050	0,067	0,060
P(en mg) / g sol	0,07	0,17	0,26	0,32	0,38	0,54
n	0,352	0,394	0,299	0,285	0,234	0,246

Les valeurs r1/Ro varient entre 0,018 et 0,067, celles de n entre 0,394 et 0,234 et celles de P entre 0,07 et 0,54 µg/g de sol. Ce résultat laisse apparaître que dans les traitements 4 et 5, avec la variété précoce, il y a diminution du pouvoir fixateur quelle que soit la dose de P_2O_5. Cette diminution est supérieure à celle de 2 et 3.

La variété et la fumure de redressement influent sur le pouvoir fixateur et aussi la fertilité r1/Ro, p, n.

On peut donc dire que le phosphore de l'engrais peut être utilisé à 20% dans les cas des apports d'une fumure de redressement de 180 U de P_2O_5 ,et d'une fumure d'entretien de 45 U de P_2O_5 , avec une variété précoce de riz.

Sans apport de fumier, la meilleure formule consiste en 180 U de P_2O_5 en fumure de redressement et 45 U de P_2O_5 en fumure d'entretien

En conclusion

Dans l'ensemble, les coefficient d'utilisation de l'engrais sont faibles, de l'ordre du 10 - 11% pour les pailles et grains. On peut observer que le phosphore de l'engrais peut être utilisé à 20% dans le cas des apports de fumure de redressement et d'entretien de 180 U et de 45 U de P_2O_5 respectivement avec une variété précoce de riz, ceci malgré des pouvoirs de fixation phosphore très élevés (**tableau 13**).

Nous notons cependant que le traitement 4 qui présente 20% de coefficient d'utilisation, présente le r1/Ro le plus élevé, 0,067%, mais cette augmentation relative n'est pas suffisante; il faut un apport de matière organique pour obtenir, pour cet indice, une valeur supérieure à 0,1.

*

TABLEAU 1

Détermination du carbone des matières organiques des différents types de sols.

	Total du Sol			Acides fulviques libres AFL (HCl-N/10)			Matières humiques totales MHT (NaOH-0,1N)	Humine			Σ_C MHT + Humine	Rapport Σ_C / C total %
	C ‰	N ‰	C/N	C ‰	N ‰	C/N	C ‰	C ‰	N ‰	C/N		
APG												
1	13,02	0,87	14,9	0,420	0,088	4,8	4,43	7,80	0,49	15,9	12,65	97
2	16,44	1,14	14,4	0,309	0,050	6,2	4,97	10,34	0,56	18,4	15,62	95
3	15,31	1,06	14,5	0,446	0,086	5,2	4,71	9,28	0,57	16,2	14,44	94
4	15,29	1,07	14,3	0,366	0,081	4,5	4,77	9,52	0,56	16,0	14,65	96
KJS												
5	26,04	1,87	13,9	0,458	0,112	4,1	10,31	14,00	0,80	17,5	24,76	94
6	25,03	1,73	14,5	0,344	0,090	3,8	9,74	13,51	0,78	17,2	23,59	94
7	25,84	1,75	14,8	0,444	0,046	9,7	10,17	14,28	0,84	17,0	24,87	96
ANL												
8	45,95	3,33	13,8	0,424	0,055	7,7	21,68	22,30	1,46	15,3	44,40	97
9	46,04	3,41	13,5	0,476	0,089	5,3	21,62	22,70	1,38	16,5	44,79	97
10	47,80	3,57	13,4	0,536	0,089	6,0	22,87	23,93	1,55	15,4	47,34	99
11	46,70	3,46	13,0	0,517	0,086	6,0	21,68	24,46	1,46	16,7	46,66	100
	⇐ - - - - -CHN- - - - ⇒ Contrôle Coulomètre			⇐- - CHN - ⇒			⇐ - - - - - Dosage - - - -⇒	⇐- - - - - CHN - - - - -⇒ Contrôle Coulomètre				

ANNEXE du TABLEAU 1

Autres sols	Total du Sol			Acides fulviques Libres AFL (HClN/10)			Matières humiques totales MHT (NaOH 0,1N)	Humine			Σ_C MHT + Humine	Rapport Σ_C / C total %
	C ‰	N ‰	C/N	C ‰	N ‰	C/N	C ‰	C ‰	N ‰	C/N		
ATB												
12	23,74	1,91	12,4	0,408	0,08	5,2	8,578	12,70	0,784	16,2	21,69	91
13	24,23	1,89	12,8	0,425	0,11	4,0	8,624	13,87	0,831	16,7	22,92	95
14	24,67	1,90	13,0	0,407	0,08	4,9	9,552	13,28	0,840	15,8	23,22	94
15	25,83	1,971	12,6	0,388	0,06	6,0	9,028	14,38	0,882	16,3	23,796	96
ANT-F												
16	25,32	1,90	13,4	0,390	0,07	5,7	9,488	14,08	0,891	15,8	23,96	95
17	26,92	2,01	13,4	0,412	0,08	5,2	9,219	15,57	0,932	16,7	25,20	94
18	27,01	2,01	15,3	0,425	0,09	4,5	10,075	14,88	0,804	18,5	25,38	94
ANT-C												
19	41,85	2,73	15,3	0,433	0,06	7,3	17,867	22,34	1,152	19,4	40,6	97
20	42,44	2,95	14,4	0,458	0,07	6,8	19,152	22,30	1,186	18,8	41,91	99
21	42,55	2,74	15,5	0,480	0,07	7,0	18,912	21,22	1,160	18,3	40,61	95
ANT-IV												
22	27,92	1,97	14,2	0,399	0,07	6,0	11,714	14,40	0,847	17,0	26,51	95
23	30,04	2,18	13,8	0,428	0,11	4,0	12,570	15,43	0,908	17,0	28,43	95
24	29,35	2,22	13,2	0,368	0,07	5,3	12,830	14,48	0,867	16,7	27,68	94
25	31,46	2,35	13,4	0,318	0,05	6,0	13,210	14,96	0,935	16,0	28,49	91
26	35,20	2,51	14,0	0,347	0,07	5,3	13,186	20,10	1,248	16,1	33,63	96
	⇐-----CHN---------⇒ Contrôle Coulomètre			⇐---------CHN---------⇒			⇐---------Dosage-------⇒	⇐------CHN---------⇒ Contrôle Coulomètre				

Dosage de C, N, C/N, fractions humiques

TABLEAU 2

Détermination du phosphore sur sols et fractions humiques

Dosages: Tous résultats exprimés en P_2O_5 ‰ du sol sec à l'air

AFL: Acides fulviques libres

AF: Acides fulviques après précipitation acide

MHT: Matière humique totale

CA: Charbon activé qui a fixé les acides fulviques

	SOLS				AFL Extrait HCl 0,1N	FRACTIONS HUMIQUES					
	attaque NO_3H classique			OLSEN DABIN P_2O_5 assim.		Extrait NaOH-0,1N				Culot humine	
	extrait non traité	extrait traité au CA	sol calciné			MHT	AF			attaque NO_3H classique	
						extrait tot calciné	brut coloré calciné	traité CA (clair) non calciné	CA+AF calciné	extrait traité CA	sur produit calciné
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
APG											
1	0,95	1,07	1,37	0,070	0,009	0,270	0,360	0,250	0,060	0,64	0,98
2	0,85	0,96	1,26	0,040	0,030	0,240	0,240	0,140	0,030	0,63	0,84
3	0,84	0,94	1,03	0,030	0,011	0,240	0,240	0,150	0,040	0,60	0,83
4	0,90	0,99	1,26	0,060	0,027	0,270	0,270	0,200	0,050	0,61	0,83
KJS											
5	1,14	1,28	1,72	0,060	0,018	0,550	0,410	0,340	0,090	0,67	0,99
6	1,13	1,28	1,72	0,055	0,007	0,590	0,500	0?410	0,100	0,68	1,00
7	0,98	1,13	1,72	0;050	0,007	0,680	0,500	0,410	0,100	0,64	0,99
ANL											
8	3,43	3,43	6,29	1,175	0;048	3,090	2,570	2,520	0,340	0,68	2,56
9	4,00	3,66	6,29	1,025	0,036	2,920	2,570	2,290	0,210	0,72	2,83
10	3,66	3,66	6,50	0,900	0,059	3,030	2,630	2,290	0,250	0,66	2,58
11	3,78	3,66	6,64	0,900	0,036	3,030	2,570	2,400	0,260	0,72	2,60

ANNEXE DU TABLEAU 2

Détermination du phosphore sur sols et fractions humiques

	SOLS				AFL Extrait HCl 0,1N	FRACTIONS HUMIQUES					
	attaque NO_3H classique			OLSEN DABIN P_2O_5 assim.		Extrait NaOH-0,1N				Culot humine	
	extrait non traité	extrait traité au CA	sol calciné			MHT	AF			attaque NO_3H classique	
						extrait tot calciné	brut coloré calciné	traité CA (clair) non calciné	CA+AF calciné	extrait traité CA	sur produit calciné
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ATB											
12	2.29	2.06	2.86	0.110	0.002	0.550	0.410	0.130	0.080	1.29	2.63
13	2.17	2.17	2.97	0.085	TR	0.500	0.360	0.130	0.100	1.32	2.69
14	2.29	2.17	2.97	0.130	0.009	0.550	0.410	0.180	0.050	1.33	2.70
15	2.29	2.06	2.86	0.080	0.007	0.550	0.410	0.180	0.080	1.27	2.57
ANT-F											
16	2.06	1.94	3.20	0.065	0.002	0.680	0.500	0.320	0.080	1.32	2.98
17	1.83	1.83	3.32	0.060	0.033	0.680	0.550	0.270	0.100	1.33	2.82
18	1.83	1.94	3.32	0.075	TR	0.680	0.550	0.230	0.150	1.29	2.90
ANT C											
19	2.86	2.97	5.72	0.375	0.088	1.830	1.460	1.080	0.310	1.40	3.57
20	2.97	2.97	5.38	0.400	0.011	1.830	1.320	1.230	0.140	1.35	3.53
21	2.86	2.97	5.26	0.450	0.018	2.420	1.870	1.830	0.200	1.42	3.48
ANT IV											
22	2.86	2.86	4.92	0.260	0.033	1.140	0.870	0.680	0.130	1.81	3.66
23	2.98	2.97	4.69	0.140	0.013	0.370	1.960	0.820	0.130	1.51	3.13
24	2.86	2.86	4.69	0.175	0.009	1.280	0.960	0.960	0.160	1.66	3.65
25	2.86	2.75	5.04	0.150	TR	1.830	1.370	1.360	0.190	1.77	3.39

TABLEAU 3-1

Phosphore, matière organique, minéraux Fe et Al et leurs liaisons

P, Fe, Al extraits avec les acides fulviques dans HCl N en fonction du temps

	P_{ms}	C ‰ AF	P_{AF}	Al ‰ Total	Fe ‰ Total	$P_{AF} - P_{ms} = P_{os}$	P_{ms}	C ‰ AF	P_{AF}	Al ‰ Total	Fe ‰ Total	$P_{AF} - P_{ms} = P_{os}$
APG												
T0	18,0	1,18	50,6	3,225	-	35	18	1,74	24	4,35	0,600	
T1	15,0	-	53,8	2,910	1,148	38,8	-	-	-	-	-	
T2	15,0	-	50,0	3,383	0,950	35	30	1,98	60	3,75	0,690	
T3	17,7	2,25	53,8	3,188	1,178	36,1	48	1,92	48	3,75	0,720	
T4	-	2,34	-	3,754	1,140	-	-	-	-	-	-	
moyenne	16,25	1,92	52,05	3,28	1,1	36,80	32	1,88	44	3,95	0,67	12
ANL												
T0	411	1,34	510	29,625	21,675	99	445	7,92	570	25,82	6,600	
T1	392	-	398	30,375	13,650	06	-	-	-	-	-	
T2	381	-	510	32,063	14,250	129	480	7,93	-	-	-	
T3	419	4,43	499	25,815	12,525	80	480	7,98	492	27,02	6,600	
T4	393	2,66	-	-	08,625	-	-	-	522	26,42	6,300	
moyenne	399	2,81	479	29,4	14,1	80	468	7,96	528	26,40	6,5	60
KJS												
T0	18,0	1,68	-	3,825	0,855	37,5	24	-	72	-	-	
T1	15,0	-	52,5	3,563	0,918	37,5	-	2,34	-	5,85	0,900	
T2	15,2	-	58,5	3,675	0,995	43,3	24	2,04	75	4,65	2,780	
T3	20,2	1,93	63,8	3,675	1,020	43,6	48	1,62	66	3,90	0,750	
T4	28,5	1,80	57,5	-	-	-	-	-	-	-	-	
moyenne	19,38	1,8	58	3,6	0,94	38,62	32	2	71	4,8	0,82	39
	⇐ - - - - - - - - - - - - - - - 3 semaines - - - - - - - - - - - - - - - - - - ⇒						⇐ - - - - - - - - - - - - - - - 6 semaines - - - - - - - - - - - - - - - ⇒					

P en µg/g

ANNEXE DU TABLEAU 3-1

Phosphore, matière organique, minéraux Fe et Al et leurs liaisons

P, Fe, Al extraits avec les acides fulviques dans HCl N en fonction du temps

	P_{ms}	C ‰ AF	P_{AF}	Al ‰ Total	Fe ‰ Total	$P_{AF} - P_{ms} = P_{os}$	P_{ms}	C ‰ AF	P_{AF}	Al ‰ Total	Fe ‰ Total	$P_{AF} - P_{ms} = P_{os}$
ANT-F												
T0	-	-	26,3	11,438	3,113	6,8	45	5,04	45	12,75	2,620	
T1	-	1,45	30,0	11,288	3,023	-	-	-	-	-	-	
T2	28,5	-	36,0	10,838	2,790	7,5	52	4,56	106	12,75	2,620	
T3	33,0	4,55	43,5	11,286	3,210	10,5	42	5,16	54	10,21	2,500	
T4	28,6	5,59	37,5	-	-	9	-	-	-	-	-	
moyenne	30,03	3,86	34,6	11,2	3,03	8,46	46,3	4,92	68,5	11,9	2,55	3,22
ANT-IV												
T0	28,5	1,45	100	7,500	2,825	61,5	56	5,52	113	16,12	3,37	
T1	30,0	-	100	5,813	2,520	70	-	-	-	-	-	
T2	33,0	-	100	7,813	2,644	67	75	5,52	120	13,81	3,15	
T3	31,5	3,60	100	5,813	2,010	68,5	90	5,46	144	14,40	3,30	
T4	27,0	3,99	137	9,375	2,205	110	-	-	-	-	-	
moyenne	30	3,01	107,4	7,94	2,43	75,4	73,6	5,46	125	14,7	3,27	51,4
ANT-C												
T0	69,0	3,34	147	12,563	2,205	68	115	8,76	138	25,15	4,46	
T1	64	-	136	12,938	2,730	91,5	108	8,46	132	-	-	
T2	108	-	149	-	-	-	-	-	-	25,82	4,50	
T3	73,5	5,88	113,5	13,500	2,813	75,5	93	7,92	126	25,22	4,50	
T4	28,5	4,88	-	-	2,085	-	-	-	-	-	-	
moyenne	68,6	4,7	136,25	12,9	2,45	78	105	8,3	130	25,4	4,48	25
	⇐ - - - - - - - - - - - - - - - 3 semaines - - - - - - - - - - - - - - - - - - ⇒						⇐ - - - - - - - - - - - - - - - - - - 6 semaines - - - - - - - - - - - - - - - ⇒					

P en µg/g

TABLEAU 3-2

Phosphore, AL et Fe contenus dans les acides fulviques libres (AF) extraits par HCl-N

Dans des essais en vases à différentes dates

	P_{ms}	C	P_{AF}	Al ‰	Fe ‰	P_{os} P_{AF}-P_{ms}	P_{ms}	C ‰	P_{AF}	Al ‰	Fe ‰	P_{os} P_{AF}-P_{ms}
APG												
T0	23,0	1,68	37,5		0,623	14,5	7	1,80	-	4,12	0,750	nég.
T1	25,0	-	28,5		0,82	3,0	10,8	-	8	0,075	1,69	
T2	24,0	1,75	28,5		0,693	4,5	19,2	1,91	8	2,438	0,765	
T3	-	1,87	37,5		0,713	4,5	19,2	1,61	10	1,688	0,698	
T4	30,0	4,7	43,0		0,90	13	13,2	2,20	21,5	0,053	-	
moy.	25,5	2,50	35		0,75	10	13,88	1,88	11,9	1,68	0,97	nég.
ANL												
T0	366	-	417	5,955	6,030	783	294	5,61	477	23,438	5,415	
T1	378	5,46	435	20,063	5,048	813	318	6,06	-	18,375	3,94	
T2	402	4,14	326	3,165	5,150	728	288	6,60	510	27,00	5,963	
T3	450	7,31	380	2,795	6,495	84à	290	6,93	483	27,188	5,730	
T4	432	5,07	540	19,500	4,545	972	294	5,92	-	20,813	4,02	
moy.	405	5,49	421	20	5,45	16	296	6,22	490	23,3	5,02	194
KJS												
T0	36	1,95	-	5,445	0,825	2,1	21	2,16	31,5	3,00	0,975	
T1	28,8	2,15	33,0	-	0,735	4,2	21,6	3,44	-	0,113	0,68	
T2	-	2,27	37,5	7,650	0,840	7,6	-	1,44	30,0	2,063	0,500	
T3	38,4	3,27	41,3	7,950	0,750	2,9	22,5	1,94	30,0	2,250	0,765	
T4	31,2	2,47	38,0	-	0,484	6,8	21,6	2,88	26	0,056	0,450	
moy.	33,6	2,42	37,45	6,97	0,72	4,9	21,6	2,37	29,4	2,4	0,67	7,8
	⇐ - - - - - - - - - - - - - - - - - -9 semaines - - - - - - - - - - - - - - - ⇒						⇐ - - - - - - - - - - - - - - 15 semaines - - - - - - - - - - - - - - - ⇒					

ANNEXE DU TABLEAU 3-2

Phosphore, AL et Fe contenus dans les acides fulviques libres (AF) extraits par HCl-N

Dans des essais en vases à différentes dates

	P_{ms}	C	P_{AF}	Al ‰	Fe ‰	P_{os} P_{AF}-P_{ms}	P_{ms}	C ‰	P_{AF}	Al ‰	Fe ‰	P_{os} P_{AF}-P_{ms}
ANT-F												
T0	36	4,73	-	9,150	1,980	-	19,2	3,37	10	6,375	1,703	
T1	-	4,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
T2	46	4,27	52,5	12,00	2,400	6,5	18	3,61	8	6,938	2,213	
T3	40	4,40	52,5	13,600	2,325	12,5	19,2	3,76	8	5,625	2,003	
T4	60	-	52,8	13,125	4,00	-	29,0	4,28	-	-	1,92	
moy.	45,5	4,48	52,7	11,43	2,76	7,2	21,35	3,75	9	6,2	1,96	nég.
ANT-IV												
T0	75,0	5,06	-	12,000	3,270	-	45	5,11	61,5	15,563	3,375	-
T1	-	-	67,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T2	83	5,52	58,5	6,450	3,800	-	48	3,94	61,0	13,69	3,180	14,4
T3	83	5,36	58,5	4,800	3,495	-	48	4,86	61,5	15,19	3,188	24
T4	90	5,80	-	4,313	1,37	-	14	4,15	50,0	-	1,65	-
moy.	82,75	5,4	61,5	6,8	2,9	nég.	38,75	4,4	58,5	14,7	2,85	20
ANT-C												
T0	165	8,79	105	5,400	4,620	-	79,2	6,12	176	24,37	4,350	-
T1	172,5	4,87	126	-	3,145	-	58	6,69	-	-	-	-
T2	171	-	105	5,250	5,025	-	114	8,17	177	17,188	4,118	-
T3	165	7,56	105	5,670	4,200	-	114	7,38	-	28,125	4,260	-
T4	171	4,61	144	-	3,330	-	78	6,62	-	25,31	-	-
moy.	168,8	6,4	117	5,6	4,04	nég.	88,64	6,99	176	23,74	4,2	88
	⇐ - - - - - - - - - - - - - - 9 semaines- - - - - - - - - - - - - - - ⇒						⇐ - - - - - - - - - - - - - 15 semaines- - - - - - - - - - - - - - ⇒					

TABLEAU 3-3

Evolution du phosphore et de la matière organique dans le sol en fonction du temps

Liaison phosphore - Acides fulviques libres, Al et Fe (moyenne des traitements)

		3 semaines	6 semaines	9 semaines	15 semaines
APG Ampangabe	Pms	16,25	32,00	25,5	13,88
	Pos	36,80	12	10	Nég.
ANL Analavory	Pms	399	468	405	296
	Pos	80	60	16	194
KJS Kianjasoa	Pms	19,38	32	33,6	21,6
	Pos	38,62	39	3,9	7,8
ANT-F Antsirabe	Pms	30,03	46,3	45,5	21,35
	Pos	8,46	3,2	7,2	Nég.
ANT-IV Antsirabe	Pms	30	73,6	82,75	38,75
	Pos	75,4	51,4	Nég.	20
ANT-C Antsirabe	Pms	58,87	105	168	88,6
	Pos	78	25	Nég.	88

Extraits HCl-N: (en ppm de P/µg/g)
Pms = phosphore minéral soluble Pos = phosphore organique soluble

Carbone des Acides Fulviques C ‰

	3 sem.	6 sem.	9 sem.	15 sem.	
APG	1,92	1,88	1,76	1,88	Sol ferrallitique
ANL	2,81	7,96	5,49	6,22	Sol brun
KJS	1,80	2	2,42	2,37	Sol ferrallitique
ANT-F	3,86	4,92	4,48	3,75	Sol ferrallitique
ANT-IV	3,013	5,46	5,4	4,4	Sol ferrallitique
ANT-C	4,7	8,3	6,4	6,9	Sol brun

Al_2O_3 ‰

	3 sem.	6 sem.	9 sem.	15 sem.	
APG	3,28	3,95		2,74	Sol ferrallitique
ANL	29,4	26,4	20	23,3	Sol brun
KJS	3,6	4,8	6,9	2,4	Sol ferrallitique
ANT-F	11,2	11,9	11,4	6,2	Sol ferrallitique
ANT-IV	7,24	14,7	6,8	14,7	Sol ferrallitique
ANT-C	12,9	25,4		23,7	Sol brun

Fe_2O_3 ‰

	3 sem.	6 sem.	9 sem.	15 sem.	
APG	1,1	0,67	0,75	0,73	Sol ferrallitique
ANL	14,1	6,5	5,45	5,012	Sol brun
KJS	0,94	0,82	0,72	0,67	Sol ferrallitique
ANT-F	3,03	2,56	2,76	1,95	Sol ferrallitique
ANT-IV	2,43	3,27	2,9	3,2	Sol ferrallitique
ANT-C	2,45	4,48	4,04	4,2	Sol brun

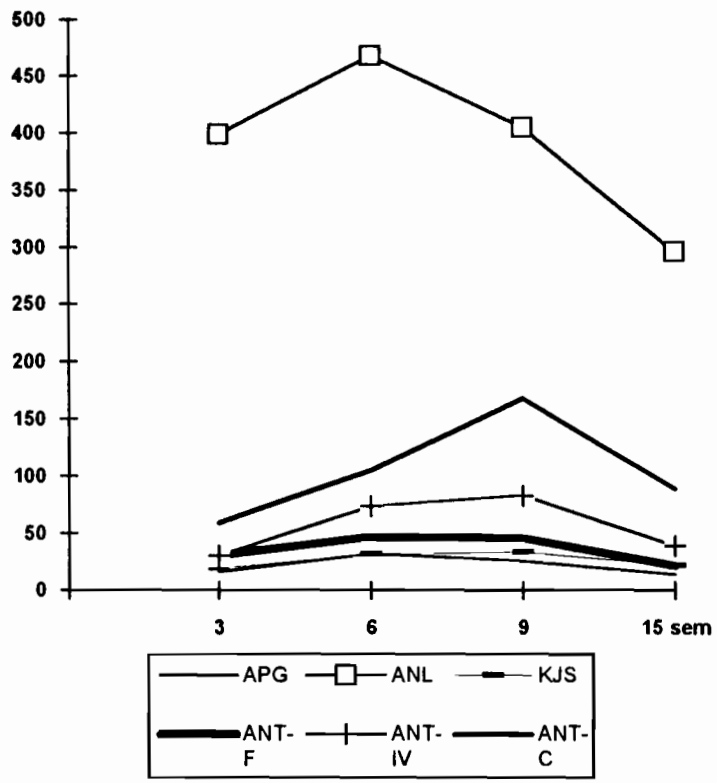
Pour chaque date de prélèvement, les chiffres représentent la moyenne des différents traitements **T0,T1,T2,T3,T4**

EVOLUTION DU PHOSPHORE DU SOL EN FONCTION DU TEMPS

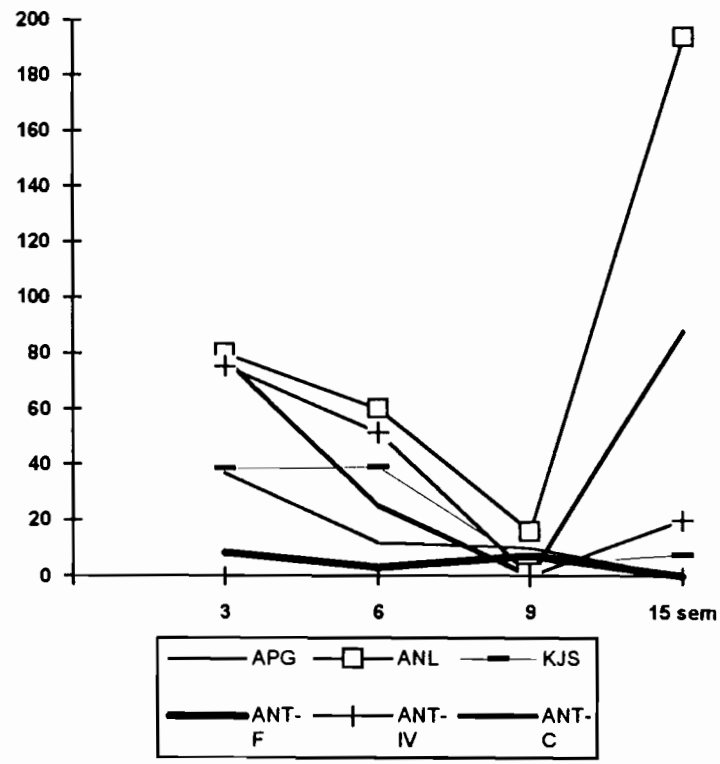
Essais en pots - (15 semaines) - Moyennes des divers traitements

(d'après les tableaux 3)

Phosphore minéral soluble (P_{ms}) - en ppm



Phosphore organique soluble (P_{os}) - en ppm

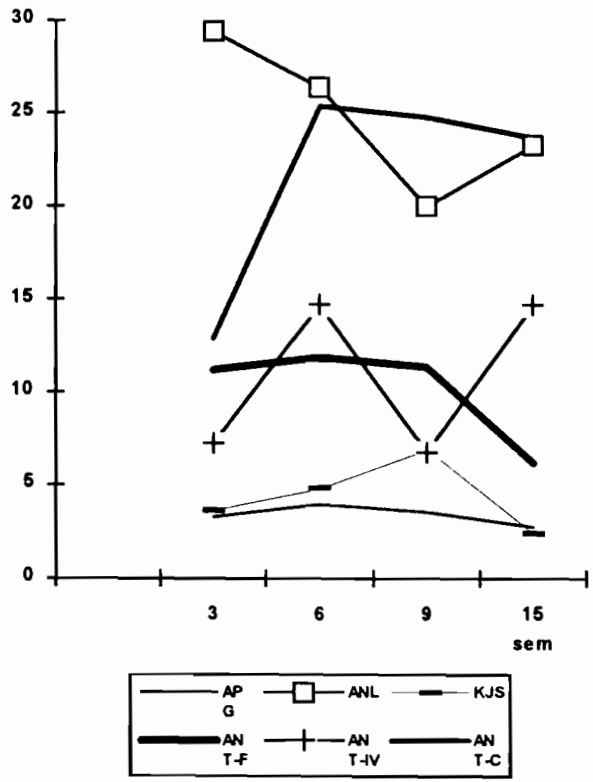


EVOLUTION DU SOL EN FONCTION DU TEMPS

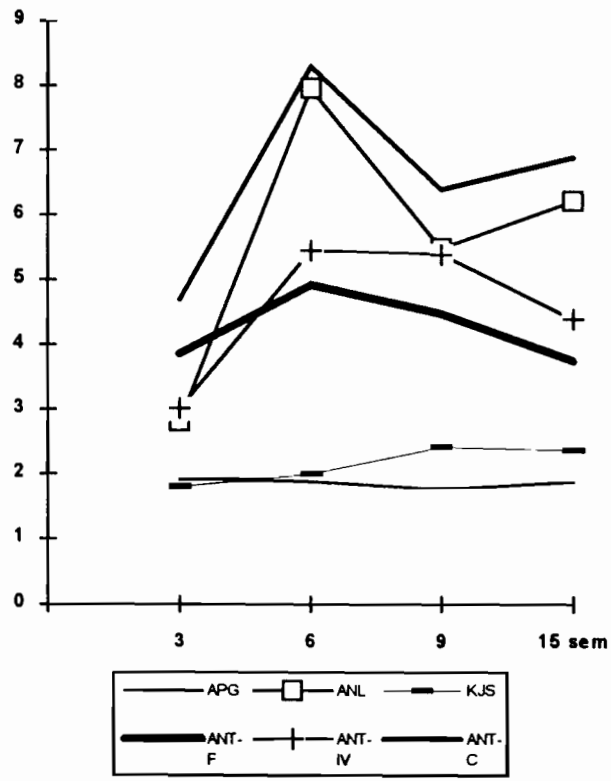
Essais en pots - 15 semaines - Moyennes des extraits HCl-N

(d'après les tableaux 3

Al_2O_3 ‰



Acides fulviques (C ‰)



Fe_2O_3 ‰

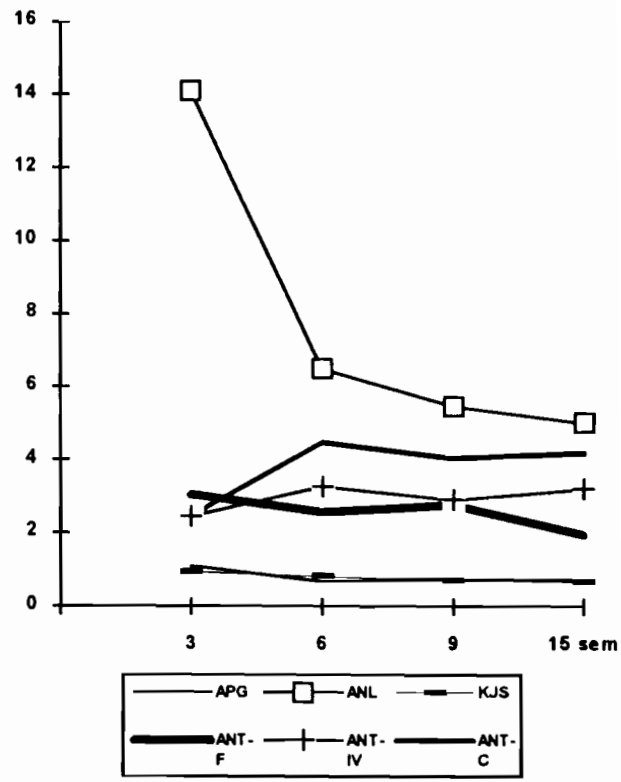


TABLEAU 4-1

Al_2O_3 extrait avec les acides humiques et fulviques

Dosages: Tous résultats exprimés en Al_2O_3 ‰ du sol sec à l'air

	Extrait HCl-0,1N			Extrait NaOH-0,1N				
	BRUT (total)	traité charbon actif (CA)	Al_2O_3 lié aux AFL organiques	Al_2O_3 total MHT	Al_2O_3 après acidification			
				Al_2O_3 AH + AF	Al_2O_3 brut - AF	Al_2O_3 lié aux AH	Al_2O_3 minéral traité CA	Al_2O_3 organique lié aux AF
N° COLONNE	A	B	C = (A - B)	D	E	F = (D - E)	G	H = (E - G)
APG								
1	0,14	0,16	Nég	0,86	0,80	0,06	0,78	0,02
2	0,08	0,10	-	0,72	0,58	0,14	0,56	0,02
3	0,10	0,08	0,02	0,63	0,52	0,11	0,55	Nég
4	0,10	0,08	0,02	0,67	0,52	0,15	0,55	-
KJS								
5	0,34	0,34	0	0,88	0,62	0,26	0,62	0
6	0,26	0,24	0,02	0,88	0,60	0,28	0,64	Nég
7	0,28	0,26	0,02	0,78	0,62	0,16	0,62	0
ANL								
8	0,72	0,70	0,02	1,50	1,22	0,28	1,12	0,10
9	0,78	0,74	0,04	1,57	1,37	0,20	1,30	0,07
10	0,98	0,96	0,02	1,62	1,37	0,25	1,20	0,17
11	0,96	0,94	0,02	1,40	1,20	0,20	1,12	0,08

D Al_2O_3 lié aux matières humiques totales
E Al_2O_3 brut, organique + minéral, lié aux AF
G Al_2O_3 minéral
H Al_2O_3 organique

ANNEXE du TABLEAU 4-1

Al_2O_3 extrait avec les acides humiques et fulviques

Tous résultats exprimés en Al_2O_3 % du sol sec à l'air

	Extrait HCl 0,1N			Extrait NaOH 0,1N				
	brut total	traité charbon actif	Al_2O_3 lié aux AFL organique	Al_2O_3 total lié aux MHT org. + min.	Al_2O_3 après acidification			
					Al_2O_3 brut AF	Al_2O_3 org. lié aux AF	Al_2O_3 min. traité CA	Al_2O_3 org. lié AF (E - G)
	A	B	C = (A-B)	D	E	F=(D-E)	G	H
ATB								
12	0.156	0.156	0	1.20	1.10	0.10	1.10	0
13	0.14	0.15	-	1.04	1.06	Nég	1.10	Nég
14	0.22	0.20	0.02	1.14	1.00	0.14	1.00	0
15	0.22	0.20	0.02	1.10	0.92	0.18	1.00	Nég
ANT-F								
16	0.62	0.54	0.08	0.98	0.94	0.04	0.92	0.02
17	0.32	0.30	0.02	1.10	1.02	0.08	1.02	0
18	0.54	0.50	0.04	1.00	0.09	0.10	0.96	Nég
ANT-C								
19	0.85	0.80	0.05	1.84	1.65	0.19	1.70	Nég
20	0.80	0.76	0.04	1.46	1.12	0.34	1.16	Nég
21	0.84	0.80	0.04	1.50	1.38	0.12	1.30	0.08
ANT-IV								
22	0.48	0.46	0.02	1.06	0.88	0.18	1.06	Nég
23	0.64	0.54	0.10	1.59	1.68	Nég	1.80	-
24	0.58	0.58	0	1.12	1.00	0.12	1.06	-
25	0.58	0.58	0	1.10	1.00	0.10	1.06	-

E Al_2O_3 minéral + organique (AFS)
F Al_2O_3 organique (MHT)
G Al_2O_3 traité charbon (minéral)
H Al_2O_3 organique (AFS)

TABLEAU 4-2

Fe_2O_3 extrait avec les acides humiques et fulviques

Dosages: Tous résultats exprimés en Fe_2O_3 ‰ du sol sec à l'air

EXTRAIT	HCl-0,1N			NaOH-0,1N				
	BRUT	traité CA	Fe_2O_3 lié aux AFL	TOTAL (MHT)	Après acidification Extrait AF			
				Fe_2O_3 lié aux MHT	BRUT Fe_2O_3 min+org	Fe_2O_3 lié aux AHS	traité CA minéral	lié aux AF organique
N° COLONNE	A	B	A - B = C	D	E	D - E = F	G	E - G = H
APG								
1	0,012	0,011	0,001	0,030	0,005	0,025	0,002	0,003
2	0,009	0,009	0	0,090	0,009	0,081	0,004	0,005
3	0,009	0,008	0,001	0,070	0,006	0,064	0,001	0,005
4	0,009	0,008	0,001	0,090	0,005	0,085	0,001	0,004
KJS								
5	0,006	0,006	0	0,180	0,019	0,161	0,005	0,014
6	0,004	0,005	Nég	0,220	0,024	0,196	0,005	0,019
7	0,004	0,005	Nég	0,200	0,028	0,172	0,006	0,022
ANL								
8	0,007	0,008	Nég	0,100	0,040	0,060	0,018	0,022
9	0,007	0,007	0	0,100	0,040	0,060	0,018	0,022
10	0,009	0,009	0	0,150	0,070	0,080	0,023	0,047
11	0,010	0,010	0	0,080	0,030	0,050	0,018	0,012

Même méthode que pour Al_2O_3

ANNEXE du TABLEAU 4-2

Fe_2O_3 extrait avec les fractions humiques en ‰ du sol sec

Dosages: Tous résultats exprimés en Fe_2O_3 ‰ du sol sec à l'air

	Extrait HCl 0,1N			Extrait NaOH 0,1N				
	brut total	traité charbon actif	Fe_2O_3 lié aux AFL organique	Fe_2O_3 lié aux mat. humiques totales	Après acidification: extrait AF Fe_2O_3 lié aux acides fulviques			
	A	B	C (A - B)	D	E	F (D - E)	G	H (F - G)
ATB								
12	0.010	0.009	0.001	0.070	0.010	0.060	0.005	0.005
13	0.012	0.009	0.003	0.030	0.014	0.016	0.003	0.011
14	0.011	0.010	0.001	0.050	°.022	0.028	0.002	0.020
15	0.010	0.010	0	0.040	0.012	0.028	0.003	0.009
ANT-F								
16	0.022	0.021	0.001	0.010	0.005	0.005	0.003	0.002
17	0.012	0.010	0.002	0.007	0.005	0.002	0.003	0.002
18	0.022	0.018	0.004	0.025	0.014	0.011	0.003	0.011
ANT-C								
19	0.013	0.013	0	0.053	0.013	0.040	0.005	0.008
20	0.008	0.008	0	0.140	0.029	0.111	0.008	0.021
21	0.008	0.008	0	0.120	0.028	0.092	0.008	0.020
ANT-IV								
22	0.013	0.013	0	0.016	0.002	0.014	0.003	Nég
23	0.018	0.020	Nég	0.012	0.004	0.008	0.004	0
24	0.010	0.010	0	0.020	0.004	0.016	0.002	0.002
25	0.011	0.010	0.001	0.013	0.004	0.009	0.006	Nég

E Fe_2O_3 minéral + organique (AFS)
F Fe_2O_3 organique (MHT)
G Fe_2O_3 traité charbon (minéral)
H Fe_2O_3 organique (AFS)

TABLEAU 5 (1)

Essais en vases de végétation des sols d'Ampangabe

Rt = radioactivité des plantes du sol témoin = 5668
R' = radioactivité des plantes ayant reçu l'engrais
r1 / R = pouvoir fixateur du sol
r1 = radioactivité après 1 mn
R = radioactivité introduite

APG Ampangabe	P' P engrais + P du sol	R'/Rt	E quantité d'engrais	P_S	P_E	P_E/E	To 15530	r1/R 0,0018	% 0,18
T_1 I T_1 II	0,54 0,56 m = 0,55	18240/5668 = 3,22	9,52	0,35	0,20	2,1%	52453	0,0047	0,47
T_3 I $T_1$3II	0,25 0,28 m = 0,27	10544/5668 = 1,86	3,58	0,20	0,07	1,9%	30031	0,0026	0,26
T_4I T_4 II	0,42 0,42 m = 0,42	11141/5668 = 1,97	10,42	0,22	0,2	1,9%	31173	0,0035	0,35
T_3I T_3 II T_3 III	0,35 0,18 0,09 m = 0,26	5007/5668 = 0,88	3,58	0,10	0,11	3,1%	14416	0,0013	0,13
T4 I	0,18 0,36	13622/5668 = 2,40	10,42	0,26	0,10	1%	28430	0,0045	0,45
moyenne	0,31							0,0033	0,33

I, II, III (répétition 3)
T1 = NPK
T3 = 20 t de fumier
T2 = T4 =NPK + 5 T de fumier
P en ppm

P' = quantité de P des plantes sur sol engraissé
Pt = P des plantes sur sol témoin
E = quantité d'engrais
Ps = P provenant du sol
PE = P de l'engrais dans la plante

TABLEAU 5 (2)

Essais en vases de végétation des sols d'Antsirabe-CIRRA

Rt = radioactivité des plantes du sol témoin = 5668

ANT-C	P'	P du sol P_S= R'/Rt x Pt	P de l'engrais P_E = P' - Ps	R'/Rt	Engrais E 20t	Coefficient d'utilisation P_E/E %	r1/R
T1 I T1 II	0,64 0,80	0,53	0,11	8469/7595= 1,12	9,52	0,11	0,0020 0,0023
T'3 I T'3 II	0,72 0,84	0,48	0,24	7715/7595= 1,02	12,31	0,24	0,0023
T'4 I T'4 II	0,61 0,76	0,51	0,10	8176/7595= 1,08	9,52 + 3,08 = 12,60	0,9	0,0025
T3 I T3 II T3 III	0,51 0,69	0,54	-0,3	8638/7595= 1,14	12,31	0	0,0020
T4 I T4 II	0,51 0,63	0,30	0,21	4871/7595= 0,64	11,60	1,8	0,0019
Moyenne	0,67	0,45	0,61				0,0022

Pt = 0,47

I, II, III, = 3 répétitions T1= NPK T3 = 20 t de fumier T2 = T4 = NPK + 5 t de fumier

P' = P des plantes du sol engraissé

Pt = P des plantes du sol témoin

r1 / R = Radioac. du sol / Radioac. introduite

E = quantité d'engrais

Ps = P provenant du sol

PE = P d'engrais dans la plante

R' = radioactivité du sol

R = radioactivité introduite

TABLEAU 5 (3)

Essais en vases de végétation des sols d'Analavory

ANL	P'	R'/Rt	E 20t	(1) P_S	(2) P_E	(3) P_E/E %	r1/R
T1 I T1 II	1,93) 2,18) 2,05	36957/27053 = 1,37	9,520	1,82	0,23	2,4	0,0095
T3 I T3 II	1,64	28252/27053 = 1,04	0,416	1,38	0,26	62,5	0,0110
T4 I T4 II	1,74	30763/27053 = 1,14	9,620	1,52	0,22	2,3	0,0088
T3 I T3 II T3 III	1,22	18588/27053 = 0,69	1,248	0,92	0,30	24	0,0058
T4 I T4 II	1,00	19591/27053 = 0,72	9,830	0,72	0,28	2,8	0,0056

Pt = 1,38

(1): Ps = R/Rt x Pt = P provenant du sol

(2): P_E = p' - ps = P d'engrais dans la plante

(3): (P_E/E%) x (r/R) = P de l'engrais dans la plante/quantité d'engrais

P': = quantité de P des plantes

E: = = quantité d'engrais

R': = = radioactivité de la plante engraissé

Rt: = radioactivité de la plante témoin

I, II, III (3 répétitions)

T1: NPK T3: 20 t de fumier T4: NPK + 5 t de fumier

TABLEAU 5 (4)

Essais en vases de végétation des sols de Kianjasoa

Rt = radioactivité des plantes du sol témoin

KJS	P'	R'/Rt	Pt	E(P)	R'	r1/R ≠ 0
T1 I T1 II	Ps = 0,64) PE = 0,48)0,56	4928	4,026	11,52	22120	0,0026
T3 I T3 II	Ps = 0,21) PE = 0,24)0,23	5372	4,3	0,631	15358	0,0014
T4 I T4 II	Ps = 0,66) PE = 0,66)0,66	15238	12,4	11,68	44426	0,0039
T3 I T3 II T3 III	0,25) 0,12) 0,19 0,46)	3317	2,7	1,893	8811	0,0032
T4 I T4 II	Ps = 0,46) PE = 0,35)0,41	6492	5,3	12	19213	0,0020
moyenne	0,41					0,0023

I, II, III, = 3 répétitions T1= NPK T3 = 20 t de fumier T2 = T4 = NPK + 5 t de fumier

P' = P des plantes du sol engraissé
Pt = P des plantes du sol témoin
E = quantité d'engrais
Ps = P provenant du sol
PE = P d'engrais dans la plante
R' = radioactivité du sol
R = radioactivité introduite

r1 / R = Radioac. du sol / Radioac. introduite

TABLEAU 5 (5)

Essais en vases de végétation des sols d'Ansirabe-IV

Rt = radioactivité des plantes du sol témoin = 5668

ANT-IV	P'	R'/Rt	R'/Rt avec MH	E 20t	PE/E %	r1/R
TI TII	0,05		0,0014	11,52		
T'3 I T'3 II	0,34	2880/124 = 23	0,0007	12,3	< 0	0,012
T'4 I T'4 II	0,49	3062/124 = 25	0,0009	14,60	0,02	0,011
T3 I T3 II T3 III	0,09	167/124 = 1,347	0,0005	12,3		0,023
T4 I T4 II	0,18	187/124 = 1,5	0,00285	14,60	0,10	0,030

I, II, III, = 3 répétitions T1= NPK T3 = 20 t de fumier T2 = T4 = NPK + 5 t de fumier

P' = P des plantes du sol engraissé
Pt = P des plantes du sol témoin
E = quantité d'engrais
Ps = P provenant du sol
PE = P d'engrais dans la plante
R' = radioactivité du sol
R = radioactivité introduite

r1 / R = Radioac. du sol / Radioac. introduite
Pt = 0,47

TABLEAU 5 (6)

Essais en vases de végétation des sols d'Antsirabe-FO.FI.FA

ANT-F	P'	P_S	P_E $P_E = P' - P_S$	R' / Rt	Engrais E 20t	Coefficient d'utilisation P_E/E %	r1/R
		Pt + MH	0,36	rt = 1524			
T1 I) T1 II)	0,10	0,04	0,06	1112/ rt = 0,73	9,52	0	0,0001
T'3 I) T'3 II)	0,44	0,39	0,06	9859 / rt = 6,47	10,56	0,6	0,0011
+ MH	0,28	0,43	0,05			0,5	
T'4 I) T'4 II)	0,49	0,40	0,09	10096 / rt = 6,62	12,16	0,7	0,0005
+ MH	0,53	0,40	0,13			1,1	
T3 I) T3 II) T3 III)	0,51	0,22	0,03	5683 / rt = 3,73	10,56	1,1	0,008
+ MH	0,69	0,25	0,2			0,8	
T4 I) T4 II)	0,51	0,36	0,07	9239 / rt = 6,06	12,16	0,5	0,0008
+ MH	0,63	0,39	0,12			1,0	
Moyenne	0,67	0,28 0,43	0,61				0,0022

E	engrais	P_S	P du sol
		P_E	P de l'engrais
R'	radioac. de la plante engraissée	PE / E	oefficient d'utilisation de l'engrais
Rt	radioac. de la plante témoin	r1 / R	pouvoir fixateur du sol

ANNEXE DES TABLEAUX 5

Dosage de P total en vases de végétation
P en ppm

(Antsirabe)

sol échantillon	ANT IV	ANT F	ANT C	ATB
TO I	2220	1672	2683	1799
TO II		1546	2894	1462
T1 I	2304	1504	2936	1630
T1 II	2515	1588	2936	1883
T3' I		1971	1757	1799
T3' II	2640	1841		1504
T4' I	2852	1546	3020	914
T4' II	2725	1546	3020	1588
T3 I	1251	3441	2809	493
T3 II	3020	2009	2852	913
T3 III	1420	2178	3020	1841
T4 I	1800	2978	2725	1841
T4 II	1462	3020	3188	1546

TABLEAU 7

Analyse de sol selon CHANG et JACKSON

P soluble P-Al P-Fe F-Ca en µg/g de sol
Σ des fractions en µg/g de sol
P OLSEN en µg/g de sol

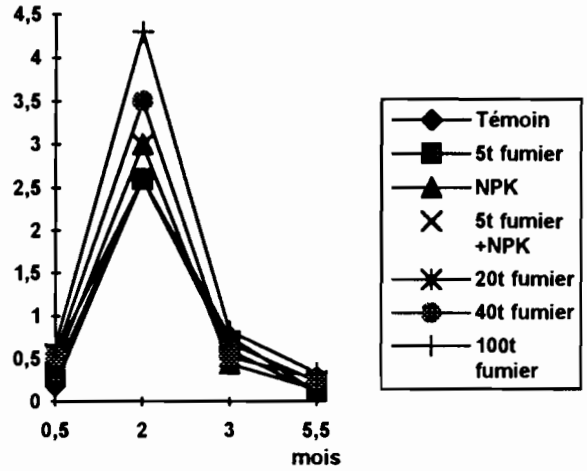
	1er prélèvement (15 j)						2ème prélèvement (2 mois)					
	P s	**P-Al**	**P-Fe**	**P-Ca**	**ΣP**	**P Ols.**	**P-s**	**P-Al**	**P-Fe**	**P-Ca**	**ΣP**	**P Ols.**
Témoin	0,19	12	29	4	45	12	2,6	12	20	10	45	15
5t de fumier	0,33	14	41	5	60	12	2,6	12	22	10	47	14
NPK	0,42	12	34	4	50	15	3,0	18	21	10	52	13
5t de fumier + NPK	0,35	22	42	8	72	18	3,0	21	27	10	61	26
20t de fumier	0,55	15	48	6	70	16	2,6	17	23	10	53	24
40t de fumier	0,54	19	44	8	72	21	3,5	25	25	12	66	31
100t de fumier	0,66	26	52	9	88	35	4,3	36	20	15	75	41

	3ème prélèvement (3 mois)						4ème prélèvement (5 mois ½)					
	P-s	**P-Al**	**P-Fe**	**P-Ca**	**ΣP**	**P Ols.**	**P-s**	**P-Al**	**P-Fe**	**P-Ca**	**ΣP**	**P Ols.**
Témoin	0,76	8	42	4	55	15	0,11	6	44	2	52	15
5t de fumier	0,60	8	44	4	57	15	0,11	7	47	4	58	17
NPK	0,44	11	42	4	57	20	0,14	9	51	2	62	22
5t de fumier + NPK	0,52	14	47	11	73	15	0,15	7	65	3	75	23
20t de fumier	0,68	8	47	4	60	17	0,24	6	53	4	63	22
40t de fumier	0,52	14	52	4	71	29	0,27	5	59	2	66	26
100t de fumier	0,82	32	56	5	94	41	0,33	8	70	2	80	35

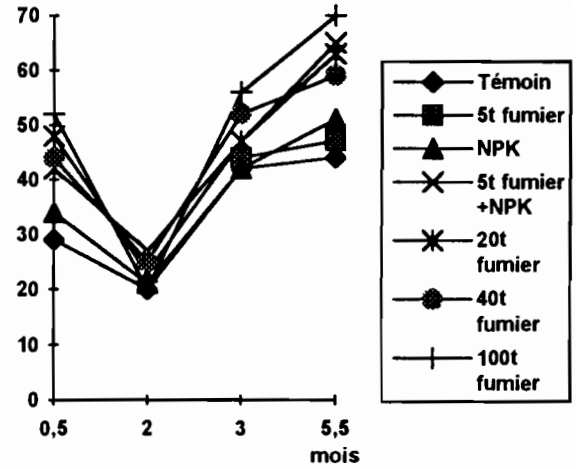
Graphiques du tableau 7

Évolution du phosphore (en µg/g de sol x 10) dans le temps

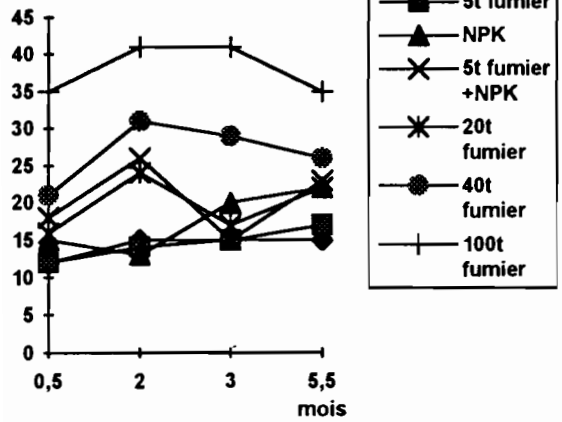
P soluble



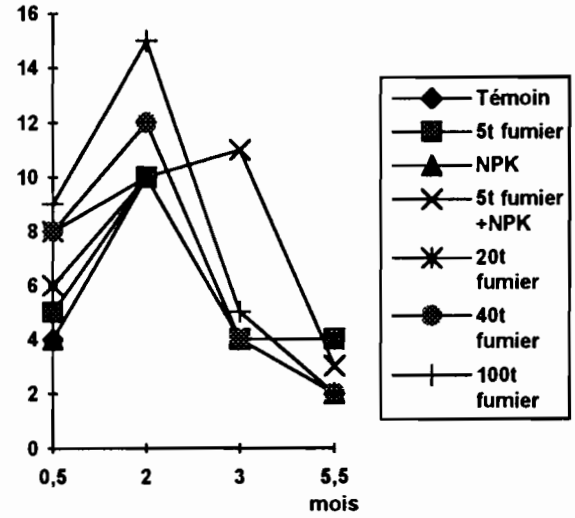
P-Fe



P Olsen



P-Ca



P-Al

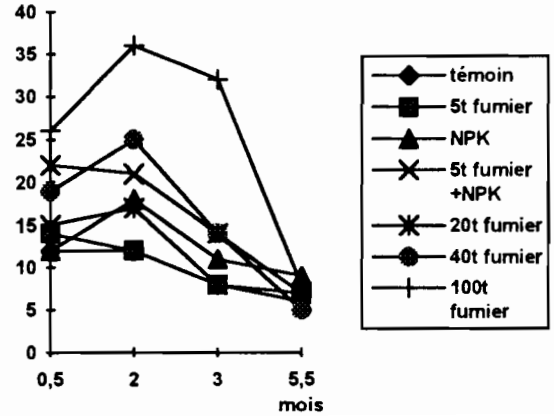


TABLEAU 8

Témoins - essais aux champs engraissés
Ampangabe

Essais: Doses de fumiers avec ou sans complément d'engrais minéraux phosphatés

	F	P	r1/R0 pouvoir fixateur	n coefficient de diffusion PO_4^{---}	M1+M2 valeur des ions PO_4^{---}
APG					
1	0	0	0,068	0.49	19.8 + 68.2
2	0	1	0,049	-	23.9 + 70.4
3	0	1	0,088	0.46	63.6 + 97.4
4	0	0	0,066	0.32	18.0 + 66.2
5	0	1	0.130	0.34	33.9 + 66.4
6	0	1	0.098	0.30	33.9 + 66.9
7	0	0	0.052	0.30	14.1 + 66.3
8	0	1	0.110	0.30	26.0 + 62.5
9	0	1	0.073	-	33.9 + 44.4
10	1	0	0.022	0.39	13.8 + 54.1
11	1	1	0.058	0.168	23.4 + 62.1
12	1	1	0.087	0.26	23.4 + 62.0
13	1	0	0.040	0.16	35.1 + 76.6
14	1	1	0.080	0.32	19.0 + 57.6
15	1	1	0.072	0.36	32.1 + 64.7
16	1	0	0.045	0.43	19.8 + 59.0
17	1	1	0.0115	0.08	32.3 + 60.3
18	1	1	0.036	0.08	44.0 + 56.3
19	2	0	0.062	0.10	42.9 + 44
20	2	1	0.052	0.024	28.2 + 40.2
21	2	1	0.093	0.009	44.0 + 64.2
22	2	0	0.047	0.040	18.0 +50.2
23	2	1	0.110	0.30	37.9 + 56.3
24	2	1	0.082	0.26	39.9 + 52.4
25	2	0	0.130	-	26.0 + 52.4

r/R: cinétique de dilution isotopique
r1: radio-activité présente dans la solution du sol après 1 mn
R0: radio-activité introduite
n: indice caractéristique de l'état du P mobile du sol
M1 + M2: valeurs des ions PO_4--- (P isotopiquement échangeable à l'équilibre)

TABLEAU 9

Caractéristiques cinétiques et formes du phosphore de chaque traitement

Traitements identiques au tableau 8 - Essais sur Ampangabe

	F P D	pH	r_1/R	P(eau)	P. O. OLSEN	Ps	P-Al	P-Fe	P-Ca	CH et J
1	0 0 D1	6.1	0.068	-	45	0.40	19.8	68.2	11.9	-
2	0 1 D1	5.3	0.049	0.15	51	0.34	23.8	70.4	14.1	-
3	0 1 D1	6.1	0.088	0.14	63	0.28	30.0	77.4	15.8	131.1
4	0 0 D1	5.9	0.066	-	49	0.25	18.0	46.2	7.9	-
5	0 1 D1	5.9	0.130	0.15	64	0.4	33.9	66.4	18.0	130.1
6	0 1 D1	6.0	0.098	0.27	58	0.27	38.1	66.9	15.8	143.8
7	0 0 D2	5.4	0.052	0.09	47	0.09	19.1	56.3	9.7	90.0
8	0 1 D2	6.2	0.110	0.31	64	0.31	26.0	62.5	14.1	119.0
9	0 1 D2	5.8	0.073	0.41	55	0.41	33.9	74.4	18.0	131.4
10	1 0 D1	4.9	0.022	0.05	40	0.09	15.8	54.1	9.7	83.1
11	1 1 D1	5.8	0.058	0.19	53	0.19	23.4	62.0	11.9	96.1
12	1 1 D1	6.0	0.087	0.48	68	0.34	36.1	76.6	22	-
13	1 0 D1	5.6	0.040	0.19	48	0.17	19.8	57.6	9.7	97.4
14	1 1 D1	5.4	0.080	0.25	57	0.60	23.8	60.3	11.9	118.7
15	1 1 D1	6.1	0.072	0.35	46	0.30	32.1	64.7	15.8	131.4
16	1 0 D2	6.0	0.045	0.08	45	0.47	19.8	59.0	11?9	102.4
17	1 1 D2	6.3	0.115	0.54	45	0.35	38.3	60.35	15.8	124.6
18	1 1 D2	5.8	0.036	0.37	48	0.37	44	56.3	18.0	134.2
19	2 0	5.7	0.062	0.28	52	0.17	28.2	44.0	9.7	97.8
20	2 1	5.2	0.052	0.16	55	0.16	28.2	46.2	9.7	124.2
21	2 1	6.1	0.093	0.31	55	0.31	44.0	64.2	22.0	144.1
22	2 0	5.4	0.047	0.19	43	0.04	18.0	50.2	9.7	129.7
23	2 1	6.2	0.110	0.08	38	0.13	33.9	56.3	15.8	116.5
24	2 1	5.9	0.082	0.6	46	0.16	29.9	52.4	23.8	120.4
25	2 0 D2	6.5	0.130	0.24	46	0.24	26.0	52.4	14.1	106.0
26	2 1 D2	6.6	0.094	0.32	-	0.32	32.1	56.3	22.0	123.4
27	2 1 D2	6.9	0.110	0.32	-	0.40	46.2	62.0	30	157.3
28	0 0 D2	5.0	0.030	0.05	37	-	18.0	50.2	11.9	-

Dolomie = 500 kg 1 à 6 - 10 à 15 - 19 à 24 D2 = 3000 kg 7 à 9 - 16 à 18 - 25 à 28

TABLEAU 11

Récoltes en ‰ de MS aux différents stades de végétation du riz, en g MS/m linéaire
(les donnés, en qx/ha, sont obtenues en multipliant par 55,6)

traitements	00	21	22	23	42	43		Pds	
Stades	0	1	2	3	4	5	CV%	5%	1%
Montaison	5,7 0,35	9,9	37,7 (3)	34,6 (3)	41,6 (3)	51,4	15	12,8	18
Parties aériennes	(3)	(3)	0,9	2,2	s = 6,3	s = 6,6			
racines + collectes	2,2 (4)	4,5 (6)	19,9 (3)	15,9 (3)	27,4 (4)	32,2 (4)			
	0,53	1,18	0,52	1,58	3,58	2,30			
Epiaison	19,6 (3)	47,1 (4)	70,3 (5)	99,5 (4)	133,4 (3)	152,6 (3)			
Parties aériennes	s = 70	s = 5,1	s = 7,5	s = 8	s = 1,33	s = 18,8	15	27,5	39
Récolte				4					
graines	21,5 (4)	20,4 (3)	35,5 (6)	41,2 (6)	38,7 (6)	40,7 (4)			
	s = 4,5	s = 2,43	s = 3,74	s = 1,30	s = 5,65	s = 3,52			
pailles	34,5 (4)	33,4	90,3 (4)	108,8 (3)	67,1 (5)	75,9 (6)			
	s = 5,0	s =	s =	s = 5,27	s = 7,34	s = 21,6			
total récoltes	56,0	67,5	125,6	150,0	105,8	116,6			

TABLEAU 13

Coefficient d'utilisation du phosphore par le riz pluvial aux différents stades

Traitements			Variétés tardives 2320		Variétés précoces 2366	
Stades	**0** témoin	**1** - effet résiduel	**2**	**3**	**4**	**5**
Montaison						
Parties aériennes	0,7	0,4	3,5	2,6	5,3	3,9
Racines	0,2	0,4	1,6	0,7	0,9	0,7
Epiaison						
Parties aériennes	3,3	3,6	5,2	5,2	11,0	6,0
Récolte						
Graines	2,0	3,4	5,1	2,6	9,9	6,1
Pailles	1,6	2,2	6,0	5,0	10,2	5,4
Total	3,6	5,6	11,1	7,6	20,1	11,5
Engrais récents						
Traitement résiduel			45	90	45	90
Fumure de fond			90	90	180	180

Coefficient d'utilisation: r1 / Ro (Radioc. de la plante / Radioc. introduite)

P en mg/g de sol

0 Témoin (4 répétitions en 4 blocs)
1 Effet résiduel (6 répétitions en 6 blocas) - Il est important.
2 - 3 - 4 - 5 Traitements

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les sols des Hauts Plateaux de Madagascar

Ils appartiennent, entre autres, à deux grandes classes principales: sols ferrallitiques, dont certains sont formés sur les roches métamorphiques acides antécambriennes, et sols bruns eutrophes provenant de matériaux volcaniques plus récents, ou de roches basaltiques qui donnent aussi parfois naissance à des sols ferrallitiques.

Des études analytiques et des essais agronomiques ont été réalisés dans différents sites proches de Tananarive et d'Antsirabe, représentatifs de ces types de sols.

Compte tenu des conditions climatiques et topographiques, on constate ceci.

Les sols ferrallitiques ont une profondeur moyenne. Ils présentent une valeur du rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 de l'ordre de 0,6 à 0,9. Leur teneur en matière organique est moyenne (2 à 3%). Ils peuvent se compacter par dégradation superficielle mais l'enracinement y est généralement bon. Ils sont pauvres en cations basiques avec un taux de saturation de l'ordre de 20% et un pH de l'ordre de 5. Le phosphore total associé à la matière organique et aux sesquioxydes est de l'ordre de 1 ‰ de P_2O_5. Le pouvoir fixateur du phosphore est particulièrement élevé: assimilable/total < 1/20.

Les sols bruns sont souvent moins profonds, mais présentent des propriétés chimiques et agronomiques beaucoup plus favorables. Ils sont riches en argiles bisiallitiques (SiO_2/Al_2O_3 > 2,5). Leur structure est assez bonne et l'enracinement y est abondant. Leur pH est proche de la neutralité (6,5 à 7). Le phosphore total, fortement associé à la matière organique peut dépasser 6 ‰ de P_2O_5 avec une teneur de phosphore assimilable de 1000 ppm. Leur pouvoir fixateur demeure assez élevé mais plus faible que celui des sols ferrallitiques.

Entre les sols ferrallitiques les plus pauvres, fortement désaturés et les sols bruns, il existe des sols intermédiaires, sols ferrallitiques moyennement désaturés mieux pourvus en matières organiques (5%) plus riches en phosphore total (1,7 ‰ de P_2O_5) et dont le pH est moins acide (5,5 à 6).

Les descriptions détaillées de six profils sont données: 2 pour chaque type avec les résultats analytiques correspondants; d'autres le sont aussi mais moins complètement.

Des prélèvements agronomiques ont été effectués, dans les témoins et les parcelles de champs d'essais cultivés en maïs, arachide, soja, riz pluvial, sur ces différents sols, avec ou sans apport de fumier de ferme, dolomie, engrais minéraux (N, P, K).

Status du phosphore, des matières organiques, de Al et Fe des sols

Il est important de connaître l'assimilabilité du phosphore dans ces différentes types de sols et la possibilité de son amélioration par des apports de matières organiques, d'engrais et d'amendement calco-magnésien.

Le statut particulier du phosphore dans les sols a été étudié par différentes méthodes chimiques et par les méthodes isotopiques utilisant l'isotope ^{32}P (avec détermination de la valeur E de FARDEAU - de la valeur L de LARSEN). Une étude spéciale a été effectuée sur la liaison entre le phosphore et

la matière organique du sol. Pour cela, en plus de la détermination classique des valeurs de C et N, une extraction des matières humiques a été effectuée par des réactifs ne contenant pas de phosphore, à savoir la soude diluée (0,1 N) après prétraitement acide . Le taux d'humification croit dans les sols avec leur teneur en matière organique totale: 30% dans les sols ferrallitiques très désaturés, 40% dans les sols ferrallitiques moyennement désaturés, et 50% dans les sols bruns. Dans certains des premiers, les acides fulviques, forme assez mobile et rapidement biodégradable, représentent plus de 70% des matières humifiées. Dans la plupart des sols ferrallitiques, la fraction directement extraite par HCl N est de 40%. Elle est de 30% dans les sols bruns. Ces acides fulviques ont un rôle important dans les proprietés des sols concernant différents éléments, en particulier le phosphore.

Une technique originale, par calcination et purification au charbon activé, a permis de déterminer le phosphore associé aux différents extraits humiques et fulviques. La proportion par rapport au phosphore total est la même que le taux d'humification de la matière organique dans ces sols, soit 25% dans les sols ferrallitiques et 50% dans les sols bruns. Le phosphore extrait avec les matières humiques se retrouve essentiellement dans la fraction fulvique; il est libéré en solution acide sans calcination et donc principalement sous forme de complexe organo-minéral dissociable, et non inclus dans la matière organique.

Une autre fraction très importante du phosphore est sous forme organique insoluble, en particulier dans l'humine. Elle représente 25 à 30% dans les sols ferrallitiques et 40% dans les sols bruns, soit, respectivement 0,3 ‰, et 2 ‰ de P_2O_5.

Dans les mêmes extraits humiques et fulviques, l'aluminium et le fer ont été dosés en même temps que le phosphore. Les résultats montrent que l'aluminium domine largement sur le fer, d'environ 10 fois. Par ailleurs, les valeurs obtenues augmentent des sols ferrallitiques aux sols bruns, mais beaucoup moins que la matière organique; la teneur en aluminium sous cette forme varie entre ces sols, du simple au double, alors que le taux de carbone augmente de 10. L'analyse indique aussi que la majeure partie de l'aluminium se retrouve dans l'extrait fulvique traité au charbon activé et donc associée sous forme minérale plutôt qu'incluse dans la matière organique.

En ce qui concerne le fer, ce dernier semble davantage lié aux acides humiques et inclus dans la matière organique, la fraction minérale associée existe, mais en faible proportion.

La dynamique du phosphore

Après avoir défini les principales formes de liaison du phosphore, de la matière organique et des métaux, une étude a été réalisée en vases de végétation sur la dynamique de ces formes en fonction du temps dans ces trois types de sols (sols ferrallitiques fortement ou moyennement désaturés, sols bruns). Les échantillons ont été diversement enrichis en engrais minéraux et fumier à doses moyennes (5 t et 20 t/ha), seuls ou associés. La plante-test est le riz pluvial et des prélèvements ont été effectués à 3 semaines, 6 semaines, 9 semaines, 15 semaines. L'analyse du sol a été effectuée par une extraction à HCl N à froid, qui solubilise les acides fulviques les plus mobiles ainsi que tous les éléments qui leur sont associés, phosphore, aluminium, fer. Les dosages sont effectués avec ou sans calcination et traitement au charbon activé, comme précédemment, ce qui permet de séparer les formes minérales des formes organiques.

En ce qui concerne les résultats, il a été difficile de mettre en évidence une action très nette des apports de fertilisants sur chaque type de sol; par contre, si l'on compare les types de sols entre eux, en faisant la moyenne des différents traitements, et que l'on étudie l'évolution en fonction du temps, on observe des résultats tout à fait cohérents et qui ne se différencient, entre les types de sols, que par leur intensité qui est fonction de leur richesse en matière organique.

En particulier, le phosphore minéral soluble, dont la valeur est tout à fait comparable à celle du phosphore assimilable, montre dans tous le sols une augmentation régulière jusqu'à 6 et 9 semaines, puis un arrêt, et un retour à 15 semaines à une valeur proche de l'origine. Des variations relatives du phosphore peuvent aller du simple au double, les plus fortes en valeur absolue étant dans les sols

bruns. Le phosphore organique soluble suit une évolution inverse avec un minimum à 9 semaines et une remontée à 15 semaines surtout dans les sols humifères.

Les teneurs en aluminium, dont les valeurs moyennes varient dans le même sens que celles du phosphore soluble, ne montrent pas de variations très caractéristiques dans le temps, sinon certains maxima à 6 ou 9 semaines.

Cette évolution inverse dans le temps du phosphore minéral et du phosphore organique fait penser à des phénomènes biologiques de minéralisation et réorganisation qui seraient cycliques et permettraient d'assurer l'alimentation des plantes malgré le très fort pouvoir de fixation de ces sols, surtout ferrallitiques, pour le phosphore.

Analyse isotopique

Sur des sols et des traitements identiques aux essais précédents en pots, des analyses de type LARSEN avec addition de ^{32}P ont été effectuées. Les prélèvements de phosphore par la plante-test ne varient pas d'une façon significative avec les traitements, par contre il y a de nettes différences entre les types de sols. Le sol brun ANL est nettement supérieur aux sols ferrallitiques. Les mesures isotopiques effectuées montrent que dans l'absorption du phosphore par la plante, la part provenant du sol est nettement supérieure à celle provenant de l'engrais, dans un rapport qui peut être de 4 pour 1. La mesure du pouvoir fixateur du phosphore par le sol par la méthode FARDEAU (détermination du rapport r1/R de la radioactivité après 1 minute sur celle introduite) donne des valeurs extrêmement basses, inférieures à 0,1, indiquant un pouvoir fixateur particulièrement fort et rapide pour tous ces sols; cependant le sol brun a le rapport r1/R le moins bas.

Ces valeurs montrent la difficulté d'absorption de l'engrais phosphaté par les plantes à court terme. Le sol brun est un peu moins faible que les autres sols étudiés, les coefficients d'utilisation des engrais minéraux au cours de cette expérience se situent entre 1 et 3%, ce qui conduit à penser à leur faible efficacité dans ces sols.

Dans la quatrième partie de ce travail, il est fait un rappel d'essais plus anciens sur les mêmes sols, en particulier les sols ferrallitiques fortement désaturés. Ils ont reçu des doses croissantes de fumier, associé ou non à des engrais minéraux. Les doses les plus fortes de fumier ont atteint 40 t et même 100 t/ha. De même que dans les essais en pots sur la dynamique du phosphore, des prélèvements ont été effectués à des dates différentes allant de 15 jours à 5 mois. L'analyse du sol comporte la détermination des différentes formes du phosphore, par la méthode de CHANG et JACKSON, et leur évolution aux diverses dates de prélèvement. Les poids des récoltes des plantes-tests ont aussi été déterminés au cours de plusieurs coupes, ainsi que les exportations du phosphore par les plantes.

Les engrais minéraux, employés seuls, ne donnent que de faibles accroissements de rendements, de même que le fumier à petite dose. Par contre, de fortes doses de fumier peuvent tripler les récoltes. Les exportations de phosphore des plantes varient dans le même sens que les récoltes. L'analyse de l'évolution des formes du phosphore dans le temps est particulièrement intéressante car elle confirme l'essai précédent sur la dynamique du phosphore soluble.

Le phosphore assimilable, ainsi que celui lié à l'aluminium ou au calcium, montrent des évolutions dans le temps tout a fait comparables à celle du phosphore minéral soluble, avec de faibles doses au départ et un fort accroissement au cours des sept ou huit premières semaines de culture, suivi d'une décroissance régulière. Les écarts sont d'autant plus forts que les sols ont été davantage enrichis en matière organique (40 ou 100 t de fumier/ha), ce qui rappelle les différences observées précédemment entre les sols bruns humifères et les sols ferrallitiques plus pauvres en matière organique.

D'autres courbes, encore plus nettes, concernent le phosphore soluble (extrait NH_4Cl) qui montre un maximum à 8 semaines. Par contre, on observe une évolution symétrique, avec minimum à 8 semaines, pour le phosphore extrait à la soude 0,1 N, interprété comme le P-Fe de CHANG et JACKSON et qui, en réalité, est du phosphore extrait en même temps que les matières humiques

totales, et lié au Fer dans les complexes organo-minéraux dissociables en milieu acide (humus, fer, phosphore).

La convergence des essais sur la dynamique du phosphore, réalisés séparément et par les méthodes différentes, montre leur validité. Il y a, au départ, une fixation physico-chimique rapide du phosphore par le sol puis une libération progressive de formes solubles, avec diminution de formes organiques ou organo-minérales, ce qui s'apparente bien à une minéralisation biologique. Ces effets de libération sont d'autant plus accentués que les sols sont plus humifères ou plus enrichis en matière organique par le fumier.

Ce résultat a une importance théorique et pratique essentielle, car il montre que, malgré le blocage quasi total du phosphore, à court terme, indiqué par les analyses isotopiques, cet élément peut être assimilé progressivement par les plantes au cours des premières semaines de cultures grâce à une libération de formes organiques ou organo-minérales.

Pour confirmer ces résultats dans la pratique, des essais factoriels ont été réalisés aux champs, en particulier sur les sols ferrallitiques fortement désaturés d'Ampangabe (APG),

Les essais comportaient l'apport d'engrais minéraux avec des doses croissantes de phosphore (150 et 300 Kg) de dolomie (500 et 2000 Kg), et de fumier à raison de 5 t et 20 t/ha. Différentes analyses ont été réalisées sur ce sol: pH, pouvoir de fixation r1/R, phosphore assimilable etc...

Bien que le rapport r1/R soit très faible dans la plupart des cas, il dépasse parfois la valeur de 0,1 lorsque les sols ont reçu une dose de fumier de 20 t/ha. Dans ce cas le pH peut approcher ou dépasser la valeur de 6.

L'association fumier-dolomie parait plus efficace que la dolomie seule. Enfin l'engrais phosphaté, surtout à la dose de 300 Kg/ha, améliore également ce pouvoir fixateur. C'est son association avec 20 t de fumier et aussi l'apport de dolomie qui fournissent les valeurs les plus élevées de r1/R ainsi que du phosphore soluble à l'eau.

Tous ces essais ayant montré l'efficacité pratique des engrais, les apports d'engrais marqués au ^{32}P sur les cultures de variétés précoces ou tardives de riz ont confirmé que, même sans apport de fumier, une fumure de redressement de 180 unités P_2O_5 et une fumure d'entretien du 45 unités permettent d'obtenir un coefficient d'utilisation de l'engrais phosphaté de 20% par la variété précoce de riz.

Le présent travail montre que, malgré un pouvoir fixateur très fort de ces sols pour le phosphore, une fertilisation par les engrais est possible et utile, que cette fertilisation est nettement amélioriée par la matière organique. Les mécanismes sont les mêmes dans les différentes types de sols étudiés (sols ferrallitiques et sols bruns), mais présentent une très forte intensité dans les sols bruns humifères; l'apport de matière organique en supplément dans les sols ferrallitiques donne des résultats comparables.

*

BIBLIOGRAPHIE

Agri. et Environnement 1982 (149 - 60) - **Transfert et fixation de P en sols homogènes, acides. Modèles physico-mathématiques.**

Agron. Abstr. Am. Soc. Agrom. Nov 1984 (22 p) - **Méthode rapide de dosage de P organique dans les sols.**

Agron. Abstr. Am. Soc. Agron. Nov-Déc 1987 (202 p) - **Influence de la microbiologie sur P détérminée par l'analyse du sol et de P de la solution du sol.**

Am. Soc. Agron. nov-déc 1987 (210 p.) - **Détermination de P assimilable par le test de P. Méthodologie modifiée.**

AMER (F.) et (L.) 1955 - **Characterisation of soil phosphorus by anion exchange resin absorption and ^{32}P equilibration.** *Plant and Soil. (391 - 408).*

APPELT (H.), COLEMAN (NT.), PRATF (PF.) 1975 - **Interactions between organic coumpounds, minerals and ions in volcanic-ash derived soils : effects of organic coumpound on absorption of phosphate.** *Soil. Sci. Amer. Proc. 39 (628 - 630).*

BARBIER (G.) et LESAINT (N.), 1954 - **Définition au moyen d'isotopes de P_2O_5 assimilable du sol et des engrais.** *CR. Acad. Sc. Fr. 238 - 14 (1530 - 1534).*

BHAT (KKS.), TRUONG (B.), BOUYER, 1969 - **Détermination de la valeur L d'un sol ferrallitique.**

BIROT (P.), 1963 - **Contribution à l'étude des «Plateaux» du centre de Madagascar.**

BLANCHET, 1971 - **Vieillissement d'engrais phosphatés dans le sol.**

BOISSEZON (P. de) - **Solubilisation des phosphates par les acides organiques d'origine microbienne et fongique.** (R.B. Duff. D.M. Webley and R.O. Scott, 1962 - V.P. Agnihotri, 1970 - R. Azcon, J.M. Barea and D.S. Hayman, 1975 - A. Moghuni and M.E. Tate, 1978).

BOISSEZON (P. de), 1973 - **Les matières organiques des sols ferrallitiques.** *Tome IV. ORSTOM n°21.*

BORIE (F.), ZUNINOM, 1983 - **Organic matter phosphorus association as a sink in P fixation process in allophanic soil of drile.** *Soil. Biol. Biotherm. 15, 5 (599 - 603).*

BOURGEAT (F.), AUBERT (G.), 1972 - **Les sols ferrallitiques à Madagascar.** *Madagascar, Rev. Géog. n°20, pp 1-23.*

BOWMANRA, COLE (CV.), 1978 - **Transformations of organics phosphorus substracts in soil evalued by NRHCO-extraction.** *Soil. Scien. 125 (49 - 59).*

BRAY, 1945 - **Protocole phosphore assimilable. (Action HCl).**

BROADBACK, 1872 - **Extraction du phosphore dans le sol.**

BRUCKERTS, 1979 - **Analyse des complexes organo-minéraux des sols.** *Pédologie, T.2, constituants et propriétés du sol.*

CEGARA (J.), METCHEM et JACQUIN (F.), 1978 - **Contribution de l'étude des complexes organo-cationiques phosphorés présents dans le sol**. *CR. Acad. Sc. Paris t. 287 (451 - 454).*

CHAMINADE, 1965. - **Bilan des trois années d'expérimentation en petits vases de végétation. Mise au point technique**. *Résultats, Agron. Trop. 2... (1101 - 1162).*

CHANG (SG.) et JACKSON (ML.), 1957 - **Fractionation of soil-phosphorus**. *Soil Sci. 34 (133 - 144).*

CHANI, 1943 - **Phosphore organique**.

CHAVHAN (BS.), STEWART (JWB.), PAUL (EA.), 1981 - **Effet of labile inorganics phosphate statuscurb organic carbon additions on the microbial uptake of phosphorus and soils**. *Can. J. Soil Sci. 61 (373 - 385).*

CHRISTENA (LA.), 1953 - **Participation des acides humiques et d'autres substances organiques** à la **nutrition des plantes cultivées**. *Pedology, 10 (46 - 59).*

COPE (F.), 1989 - **Rice response to fertilizers in Madagascar**. *F.A.O. consultancy reports G. CPF/MAG/060/OR, Rome F.A.O.*

DABIN (B.), 1966 - **Application des dosages automatiques à l'analyse des sols. 1ère partie**. *Cah. ORSTOM, Série Pédol. Vol. 111 n° 4 (335 - 366).*

DABIN (B.), 1967 - **Sur une méthode d'analyse du phosphore (OLSEN modifié) dans les sols tropicaux.** *CR du colloque sur la fertilité des sols tropicaux Tananarive Tome 1 (99 - 115).*

DABIN (B.), 1974 - **Evolution des engrais phosphates dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée**. *Phosphore et Agriculture n° 50 (1 - 14).*

DABIN (B.), 1981 - **Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés**. *Cah. ORSTOM, Série Pédol. Vol XVIII 3-4 (83 - 113).*

DALAL (RC.), 1977 - **Soil organic phosphorus**. *Adv. Agron. 29 (83 - 113).*

DELANNOY (M.), 1987 - **Sols de rizières. A.F.L.F./F.A.O., rapport de mission,** *Rome F.A.O.*

DORMAAR (JF.), 1960 - **Extraction of organic phosphorus in chernozenic soils**. *Plants and soil XXVIII 2 (268 - 279).*

DYER, DOUGLAS, GRABI, 1894- **Extraction du phosphate à l'acide citrique.**

EDWIGTON (DN.), 1965 - **A proposed mechanism for the yptake of radioactive tracers by an in vitro hydroxyapatite system**. *Radiation Research 25 (257 - 268).*

F.A.O. 1987 - **Agriculture tomard 2000.** *F.A.O. Conférence document Rome F.A.O.*

FARDEAU (JC.) et JAPPE, 1978 - **Analyse par dilution isotopique de la fertilité et fertilisation phosphorique des quelques sols du Quebec.** *Canadian Journal of Soil Sci. 58 (251 - 258).*

FARDEAU (JC.), 1981 - **Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols.** *Thèse de Doctorat d'Etat INPL-ENSAIA 218 p.*

FIFAMANOR, 1988 - **Rapport des activités 1988** *(24 - 30) Madagascar.*

GACHON (L.), 1972 - **Fractionnement du phosphore labile en relation avec le type de sol**. *Ann. Agro. 23 (429 - 444).*

GALLAIST, BRUCKEH (A.), JACQUIN (F.), 1975 - **Etude de la distribution des sucres aminés dans la matière organique des sols.** *Bull. ENSAIA XVII 1 (49 - 59).*

GUCKERT (A.), NASS BAUMER (E.), JACQUIN (F.), 1970 - **Etude comparée de l'action du glucose ^{14}C et de la paille ^{14}C sur la structure d'un sol limoneux acide**. *Bull., Ecole Sup. Agron. Nancy XII IM (26 - 49).*

GUCKERT (A.), ROGER (P.), JACQUIN (F.), 1968 - **Contribution à l'utilisation des techniques radioscopiques pour l'étude de la matière organique du sol.** *Bull. ENSAN XII (69 - 106).*

HEBERT et JORET, 1955 - **Phosphore assimilable; extraction à froid par une solution d'exalate d'amonium neutre.**

JACQUIN (F.), SASPORTES (P.), 1968 - **Dynamique du phosphore organique trans**. *(9th Finter. Congres Soil Sci. II 3 (1 - 319).*

JACQUIN (F.), 1980 - **Evolution de la matière organique dans le sol.** *Texte annoté et commenté du montage audio-visuel (20 p).*

KATYAL (JC.), 1978 - **Conduite de la fertilisation phosphatée sur rizière**. *Phosphore et Agriculture n° 73.*

KUTIEL and SHANV (A.) - **Effet of stimultaed forest dire on the avaibility of N and P in mediteranean soils.**

LARSEN (S.), 1967 - **Soil phosphorus**. *Adv. In Agron. (131 - 210).*

LESPINAT (P.A.), METTER (J.M.), THOMANN, CHONET, 1970 - **Fertilisation du maïs mur uniformément marqué au 14 C pour l'étude de la matière organique des 3 sols (Andosol, sol brun, sol ferrallitique)**. *Bull. Sc. du Sol (p 53 - 56).*

LEVESQUE (M.), SCHNITZER, 1971 - **Organo-metalic interaction in soil preparartion and propreties of metal phosphate**. *Soil Sci. 103 (183 - 190).*

MALLOUHI (M.), 1982 - **Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur l'évolution de la matière organique**. *Thèse de Doctorat d'Etat INPI, 127 p.*

MARINI (P.), 1968 - **Dosage du P par la méthode au sulfate d'hydrazine et par l'acide ascorbique à froid.** *(Laboratoire des radio-isotopes).*

OLSEN (S.R.), COLE (C.V.), WATANABE (F.S.) et DEAN (L.A.), 1954 - **Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate**. *United State Department of Agriculture Circular 939 Washington DS.*

OLSEN (S.R.), WATANABE (F.S.), BROWMAN (R.P.), 1977 - **Comportement du phosphore dans le sol et intéraction avec les autres éléments nutritifs**. *Phosphore et Agriculture 70 (35 - 51).*

PICHOT (J.), TRUONG (B.) et BURDIN, 1973 - **Evolution du phosphore dans un sol ferrallitique soumis à diférents traitements agronomiques**. *Agro-trop, 28 N° 2.*

RAHARINOSY (R.V.), 1979 - **Etude de la dynamique du phosphore dans quelques sols ferrallitiques des hauts plateaux de Madagascar. Application à des essais de fertilisation.** *Thèse de Doctorat de 3ème cycle 130 p.*

RAHARINOSY (R.V.), 1983 - **Etude de l'influence des différentes doses de fumier sur la libération du phosphore d'un sol ferrallitique à Madagascar**. *Cah. ORSTOM, Série Pédol. Vol. XX N° 2 (129 - 146).*

RAHARINOSY (R.V.), 1986 - **Etude d'une fumure de redressement et d'entretien dans les sols malgaches.** *Multigr. Diff. restreinte.*

RAHARINOSY (R.V.), 1986 - **Etude par le ^{32}P du prélèvement de phosphate par le riz pluvial.** *Multigr. Diff. restreinte.*

REIZIGA, 1983 - **Contribution à l'aide des interactions matière organique phosphore dans différents types de sol.** *Thèse ENSAIA (123 p).*

ROCHE (P.), GRIEREL, ALBAH, FALLAVIER (P.), 1980 - **Le phosphore dans les sols intertropicaux, appréciation des niveaux de carence et des besoins en phosphore.** *Institut Mondial du Phosphate. Publi-Scient. 2 (32 p).*

ROCHE (P.), 1988 - **Sols de rizière des hauts plateaux de Madagascar.** *CIRAD et AELF Rome et F.A.O. Soc. Agron. Nov 1984 (221). Cycle de P en sol agricole fertilisé et non fertilisé. Agron. Abstr. Am.*

SAUNDERS (W.M.H.), WILLIAMS (EG.), 1956 - **Observations on determination of total organic phosphorus in soil.** *Soil Sci. 2 (254 - 267).*

SCHNITZER (M.), 1981 - **Recent advances in humic acid research.** *Prod. Int. Peat. Symp. Bemidji, Minnnesota U.S.A. (P 17 - 44).*

SCHNITZER (M.) and KHAN, 1978 - **Soil organic sulfur fractions in scottish soils.** *J. Sci. ED. Agric. 27 (338 - 366).*

SOIL and FERT. 1984 - **Lessivage de P dans les sulbtrats de culture marqués au 32 P.** *(107 - 49).*

SOIL and FERT. 1984 - **Dynamique de P de la rhizosphère assisté de P par les plantes.** *Bodencultur 1984, 35.*

SOIL and FERT. 1987 - **Quelques méthodes d'extraction utilisées pour déterminer les besoins en engrais P.** *Annales Agric. 1986-DS (265 - 71).*

SOIL SCIENCE, 1983 - **Relation entre P organique et P du sol.** *J. Indian Soc. 31, 604-5.*

SOIL SCIENCE, 1984 - **Méthode chimique d'absorption P par les sols. Cas des oxydes minéraux.**

SOIL SCIENCE, 1986 - **Détermination du phosphore labile par dilution isotopique et méthode AER (résine échangeuse d'anions).** *141, pp. 60-70.*

TRUONG (B.), 1930 - **Determination of readily available phosphorus in soils.** *J. Ann. Soc. Agron. 22 (871 - 882).*

TRUONG (B.), PICHOT (J.), BURINDS, 1973 - **Effets résiduels du phosphore dans deux sols ferrallitiques par diverses méthodes d'analyse (chimiques et isotopiques).** *L'agronom. trop. 28 (147 - 155).*

WATUER (D.) and COLTMAN (R.) - **Response of lettuce to spread post-transfert P and pretransplant inoculation with a my. Fungus.**

*