

TABLE DES MATIERES

Résumé	1
Introduction	2
I. Méthodologie	3
1. Cadrage conceptuel	3
1.1. La région de Vakinankaratra	3
1.2. Les sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra	3
1.3. Les phosphores organiques du sol	3
1.4. Le semis direct sur les Hautes Terres	5
2. Parcelles expérimentales	7
2.1. Présentation générale du dispositif	7
2.2. Caractéristiques physico-chimiques des parcelles	7
2.3. Caractéristiques des échantillons	7
3. Information méthodologique générale	8
3.1. Détermination de la fraction du phosphore du sol lié à la matière organique	8
3.2. Identification du modèle	8
II. Résultats	12
1. Cinétiques d'extraction du phosphore par l'acide sulfurique dans les échantillons de terre avant et après calcination	12
2. Equations du modèle	13
3. Validation du modèle	18
III. Discussion	19
1. le modèle	19
1.1. les paramètres utilisés	19
1.2. la structure du modèle	21
2. les validités et l'utilisation du modèle	21
2.1. reproductibilité du modèle	21
2.2. applications du modèle	22
3. l'importance économique du modèle	22
Conclusion	23

ANNEXES

ANNEXE 1 : Les effets des couvertures végétales sur les propriétés des sols	26
ANNEXE 2 : Etude de l'évolution des ions phosphates libérés de la fraction organique du phosphore de deux différents types de sol ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar	31
ANNEXE 3 : Protocole de dosage du phosphore organique	32
ANNEXE 4 : Résultats d'analyse au laboratoire	33
ANNEXE 5 : Codage des variables pour tous les échantillons	35
ANNEXE 6 : tableau montrant les procédures de l'Incrémentielle	36
ANNEXE 7 : Fractionnement du Phosphore lié aux matières organiques d'un sol ferrallitique sur socle cristallin de Madagascar (Andriamahady, 1980)	39

acronyme

CEC : Capacité d'Echange Cationique

DO : Densité Optique

F : Fertilisation

P : Phosphore

Porg : Phosphore organique

SC : Système de Culture

TS : Type de Sol

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons	7
Tableau 2 : Grille de prélèvement des échantillons	8
Tableau 3 : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 0mn	14
Tableau 4 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 5mn	15
Tableau 5 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 10mn	15
Tableau 6 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 100mn	16
Tableau 7 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 1000mn	17
Tableau 8 : Comparaison entre les données expérimentales sur le Porg et celles simulées pour tous les échantillons (5mn et 10mn)	18
Tableau 9 : Comparaison entre les données expérimentales sur le Porg et celles simulées pour tous les échantillons (100mn et 1000mn)	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les effets des couvertures	6
Figure 2 : Composantes du modèle	9
Figure 3 : Cinétiques d'extraction du phosphore par l'acide sulfurique dans les échantillons de terre avant et après calcination	13

RÉSUMÉ

Un des problèmes majeurs de la production agricole de la région de Vakinankaratra, est la non disponibilité du phosphore pour la plante. Naturellement les sols ferrallitiques de la région, dénomés Oxisol ou Ultisol dans la classification pédologique américaine et Ferrasol dans la classification FAO, contiennent une quantité de phosphore non négligeable, mais ils le retiennent à cause de leur pouvoir fixateur élevé, leur acidité et leur capacité d'échange cationique faible. La résolution de ce problème exige plusieurs paramètres qui sont très difficiles à cerner. C'est pour cette raison qu'un modèle de la dynamique de ce phosphore organique a été identifié, tout en tenant compte des éventuelles conditions et variables qui peuvent l'expliquer. La régression multilinéaire incrémentielle est la méthode utilisée qui a été jugée adéquate au modèle linéaire. Les résultats de la simulation de ce modèle confirment que la libération de phosphore organique évolue dans le temps et peut atteindre un optimum à un certain temps. Ces résultats montrent également que pour les cultures sous système de culture sur semis direct, le modèle n'est valable qu'à partir de sa deuxième ou troisième année, c'est-à-dire à partir du moment où les couvertures végétales ont des effets sur l'amélioration de la structure et de la stabilité du sol.

Mots clés : Modélisation, phosphore organique, sol ferrallitique, semis direct, Vakinankaratra.

Pagination : 23 pages

ABSTRACT

Non availability of phosphorus for the plants is one of the most important problems in agriculture production in the Region of Vakinankaratra. Naturally ferralitic crop soils of the Region, oxisol or ultisol in U.S. pedologic classification and ferrasol in FAO's, contain a significant quantity of phosphorus ; but they retain it due to its high fixation power, its acidity and its low cationic exchange capacity. The answer to this problem requires many parameters that are difficult to control. That's why a model of this organic phosphorus dynamics was identified, taking into account the eventual conditions and variables that might explain it. Multilinear incremental regression was considered to be the satisfactory method for our linear model. This model'simulation results confirm us the progression period of organic phosphor that can reach an optimum at a particular time. These results also show that for fields under direct sowing system, this model isn't valid by its second or third year, that means until the moment when plant cover has direct effects on soil's structure and stability improvement.

Keywords : modelisation, organic phosphor, ferralitic soil, direct sowing, Vakinankaratra.

Introduction

La carence en phosphore est une des principales contraintes des sols acides à fort pouvoir fixateur comme les sols ferrallitiques. Ces terres représentent en outre le principal potentiel d'accroissement des superficies cultivées et de la production agricole dans de nombreux pays tropicaux ; c'est le cas de la région de Vakinankaratra. Les projections les plus sérieuses mettent en évidence une diminution des réserves en phosphates de bonne qualité et une augmentation de prix des engrais phosphatés. A échéance d'une centaine d'années, les réserves de phosphates naturels facilement valorisables pourraient être épuisées. L'amélioration de la nutrition phosphatée est une condition nécessaire à l'accroissement de la production agricole. Cette contrainte tient moins aux quantités de phosphore présentes dans les sols qu'à sa disponibilité pour les cultures et à l'efficacité de la fertilisation phosphatée en raison d'un fort pouvoir fixateur du sol lié à l'acidité.

La recherche sur ce problème a été jusqu'ici fragmentaire. Pour être de quelque utilité, la recherche doit fournir rapidement l'information qui est nécessaire pour pouvoir orienter de façon satisfaisante l'utilisation de ces énormes quantités de phosphores non exploitées. Dans ce sens, la problématique qui se pose est de trouver un outil adéquat afin de mieux gérer le phosphore dans les sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra.

La modélisation constitue un outil de recherche qui peut être appliqué dans ce domaine dans le but d'utiliser plus efficacement l'information provenant de la recherche. L'établissement de modèles offre la possibilité d'analyser un grand nombre d'alternatives dans des conditions différentes.

Dans cette étude, d'une part, la première hypothèse est que, pour les sols ferrallitiques, la quantité de phosphore extraite par la solution d'acide sulfurique diluée variait avec la durée d'extraction en se basant à la méthode proposée par Saunders et Williams (Rabeharisoa, 2004), et d'autre part, la deuxième hypothèse est que l'adoption d'un modèle qui favorise l'utilisation du système de culture sous semis direct avec une rotation de culture céréale/légumineuse avec ou sans fertilisation pourrait atténuer le problème de manque de phosphore d'un sol acide.

L'objectif de cette étude est de créer un modèle de la dynamique du phosphore organique d'un sol ferrallitique afin d'optimiser ses utilisations.

Dans cette étude, les objectifs spécifiques sont d'analyser la disponibilité du phosphore dans différents types de sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra et d'étudier la manière dont les pratiques culturales modifient la dynamique du phosphore dans des sols acides.

Dans ce travail, la méthodologie consiste à déterminer le cadrage conceptuel de l'étude et le moyen d'identification du modèle. Ensuite, les équations du modèle et sa validation seront présentées dans les résultats. Enfin, la dernière partie sera consacrée aux discussions sur la structure du modèle et sa reproductibilité.

I. Méthodologie

1. Cadrage conceptuel

1.1. La région de Vakinankaratra

La région de Vakinankaratra, qui se situe entre Antananarivo et Fianarantsoa, est la région la plus densément peuplée de Madagascar. Les densités de population sont comprises entre 40 et 200 habitants par km², contre 27 habitants par km² en moyenne pour le pays (Raunet, 1997). Dans cette zone, les altitudes vont de 800 à 1800m. Du fait de la poussée démographique et de la saturation des plaines et des bas-fonds traditionnellement consacrés à la riziculture irriguée, on assiste depuis une trentaine d'années dans ces régions au développement des cultures pluviales (Rollin, 1994). La région des Hautes Terres de Madagascar représente actuellement le principal potentiel d'accroissement des superficies cultivées et donc de la production agricole puisque les bas-fonds des vallées sont aujourd'hui complètement utilisés pour et par la riziculture.

1.2. Les sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra

1.2.1. La place des sols ferrallitiques dans la région de Vakinankaratra

Dans la région des Hautes Terres, les sols ferrallitiques dominent. Les sols des collines ou « Tanety » sont développés soit sur socle cristallin, soit sur substrats fluvio-lacustres (Raunet, 1997 ; Rollin, 1994), soit sur basalte (Rabeharisoa, 1985). Ils représentent 65% de la surface agricole utile de Madagascar.

1.2.2. Les caractéristiques des sols ferrallitiques

Les sols ferrallitiques sont généralement épais. Ces sols sont l'aboutissement de l'altération ferrallitique (Raunet, 2004 communication personnelle) : dans la partie supérieure, le matériau est composé de quartz résiduel, de kaolinite qui est une argile de néoformation, de sesquioxydes de fer et d'aluminium. L'altération de la roche-mère se fait par une hydrolyse totale des minéraux : libération des cations, de la silice, du fer et de l'aluminium. Une partie de la silice et de l'aluminium peuvent se combiner pour former une argile kaolinique. La silice restante et la totalité des cations sont évacuées par les eaux de drainage et les nappes phréatiques. L'aluminium en excès peut s'individualiser sous la forme de gibbsite cristallisée. Le fer s'individualise en oxydes qui fixent sur les argiles pour colorer le profil en rouge, jaune ou ocre.

Les sols ferrallitiques sont des sols acides voire très acides, pauvres en matière organique, avec une faible capacité d'échange, de faible teneur en cations et généralement carencés en phosphore bien que présentant une teneur en P total parfois voisine de celle observée dans les sols tempérés. Cette forte acidité est due surtout à la présence d'une forte teneur en aluminium échangeable ; ce qui limite fortement la disponibilité en phosphore phytodisponible malgré une teneur potentielle élevée de P dans ces sols, le pouvoir fixateur de ces sols vis-à-vis du P étant élevé.

1.3. Les phosphores organiques du sol

1.3.1. Nature physico-chimique

Le phosphore est présent dans le sol sous forme minérale ou organique avec pour chaque composante plusieurs familles de composés. Pour le phosphore

organique ou Porg, les sols contiennent trois grands types de composés phosphatés associés aux matières organiques (Rabeharisoa, 2004). Il s'agit :

- de composés chimiques organiques parfaitement identifiés. Ces composés organiques contenant du phosphore sont très nombreux et appartiennent à plusieurs familles. Les principales sont les inositol phosphates, avec en particulier le phytate ou inositol hexaphosphate forme de réserve dans les grains, les acides nucléiques, les phospholipides. D'autres composés phosphatés sont des produits de réactions des multiples processus biologiques indispensables à la vie, tels la respiration, les transferts d'énergie ou la reproduction conforme via l'ADN et l'ARN.
- de forme organique sensu stricto et de forme minérale ou ionique présentes dans les structures cellulaires de tous les organismes animaux et végétaux achevant leur existence dans les sols
- d'ions phosphates ayant contracté des liaisons de nature physico-chimiques, par adsorption ou précipitation, avec des molécules organiques formées durant la dégradation biologique des composés organiques synthétisés par les structures vivantes.

La répartition du phosphore entre ces différentes composantes est inconnue faute de disposer de méthodes de spéciation adéquates. C'est l'ensemble de ces trois grands groupes de constituants que les chimistes du sol nomment phosphore organique (Rabeharisoa, 2004).

Dans le sol ferrallitique, le P organique est lié principalement aux acides humiques. Si les traitements agronomiques n'avaient pas d'effet sur la réserve phosphorique du sol, la fertilisation complète avec phosphore a permis d'enrichir le sol en P minéral, tandis que la fertilisation sans P a amélioré la teneur en P organique.

La diversité des composés contenant du phosphore, et du type de liaison reliant le phosphore aux composés organiques, illustrent qu'il ne peut pas exister de méthodes d'extraction chimique du « phosphore organique » du sol dans son entièreté. Par la suite, cet ensemble hétérogène de composés est désigné par phosphore organique du sol ou Porg,

La teneur en Porg varie très largement suivant la nature des sols, leur usage en grande culture ou en prairie ou en forêt... et les systèmes de culture (Tiessen et al., 1994) ; ainsi, la teneur des sols en Porg varie entre 20 et 80 % (Harrison, 1982).

1.3.2. Dynamique du phosphore organique dans le sol vers la plante

Dans la mesure où l'entrée du phosphore par les racines des plantes a lieu, et n'a lieu que sous forme d'ions phosphates (Barber, 1995 cité par Rabeharisoa, 2004), la nature physico-chimique et les types de liaisons des différentes formes de phosphore avec leurs supports permettent d'affirmer que :

- La contribution des formes organiques chimiquement identifiées nécessite une hydrolyse enzymatique du type phosphatase ou phytase conduisant à la libération des ions phosphates.
- La contribution du phosphore contenu dans des structures biologiques végétales ou animales ne pourra avoir lieu qu'après une hydrolyse

enzymatique des parois cellulaires éventuellement suivi d'une hydrolyse enzymatique par une phosphatase ou une phytase.

- La contribution des ions phosphates physico-chimiquement liés à des composés organiques est dépendante des potentiels chimiques des ions phosphates du sol, potentiels largement contrôlés par les constituants minéraux des sols, et dans ce cas particulier des oxyhydroxydes de Fe et d'Al. En raison des équilibres physico-chimiques ayant lieu au sein des sols, la disponibilité de ces ions ne peut être modifiée que par une modification des liaisons physico-chimiques entre les ions et les constituants organiques et minéraux.

La minéralisation de Porg entraîne, par des processus biologiques mis en oeuvre par la biomasse microbienne du sol et par hydrolyse enzymatique extracellulaire, la libération d'ions phosphates.

Deux types d'approches ont été mis en oeuvre pour quantifier le flux de minéralisation de Porg :

- Certaines évaluent le flux net de P minéralisé à l'échelle pluriannuelle soit directement en suivant la variation de teneur de Porg, soit indirectement à partir de la dégradation du carbone organique et des rapports C/P de la matière organique du sol (Fardeau et al., 1988).
- D'autres méthodes évaluent le flux brut de P minéralisé en mesurant la variation de la quantité d'ions phosphates transférés du sol vers la solution entre un sol stérilisé, sans activité microbiologique, et non-stérilisé, avec activité microbiologique. Cette variation a été mesurée avec des résines échangeuses d'ions pour une courte durée de 1 jour (Zou et al., 1992) ou sur une période de quelques semaines en utilisant la technique de traçage et de dilution isotopique (Lopez-Hernandez et al., 1998 ; Oehl et al., 2001). Le flux brut de minéralisation varie largement entre 0.2 et 4.2 mg P kg⁻¹ sol j⁻¹. A l'échelle de la période de prélèvement, les quantités d'ions phosphates libérés dans la solution de sol par minéralisation de Porg peuvent donc être importantes¹.

La libération d'ions phosphates dans la solution de sol apparaît donc comme un processus de réapprovisionnement potentiellement important sur la période de prélèvement par les racines. Dans le contexte des sols ferrallitiques, la détermination du flux brut de minéralisation qui nécessite l'emploi du traçage isotopique des ions phosphates reste délicate.

1.4. Le semis direct sur les Hautes Terres

1.4.1. La technique du semis direct

Le système de culture consiste à cultiver sans travailler le sol, un champ préalablement couvert d'une couverture végétale permanente, morte ou vivante.

Plusieurs appellations sont utilisées pour désigner l'absence de labour. On parle du « zéro labour », de « la technique de non-labour » ou plus simplement du « semis direct ». D'autres dénominations mettent plus l'accent sur la couverture : « semis direct sur couverture permanente des sols » ou « semis direct sur couverture

¹ A titre de comparaison, la quantité de phosphore prélevé annuellement par une culture qui produit de l'ordre de 7t ha⁻¹ est de l'ordre de 30 kg P ha⁻¹ soit l'équivalent de 8 mg P kg⁻¹ sol en considérant 3500 tonnes de terre à l'hectare.

végétale ». Toutes ces appellations peuvent être regroupées sous le terme générique de « gestion agrobiologique des sols » qui met plus l'accent sur les effets à long terme des techniques que sur les techniques elles-mêmes.

La couverture peut être de 2 types :

- morte : cela peut être des résidus de récolte comme la canne de maïs ou de sorgho, les fanes d'arachide, les chaumes de diverses graminées, ou des matériaux transportés jusqu'à la parcelle comme de la paille de riz, des copeaux de bois, etc...;
- vivante : on parle alors de couverture vive : il s'agit d'une plante installée sur la parcelle afin de constituer un tapis protecteur permanent vivant : « pelouse » de chiendent ou tapis de légumineuse comme *trèfle*, *vigna*, *pueraria*, *cassia*..., ou autres graminées comme *brachiaria*, *kikuyu*.... Ces couvertures vives devront être contrôlées pour ne pas faire de concurrence à la culture principale.

Le semis se fait à travers la couverture végétale ou mulch à l'aide d'une canne planteuse, d'une roue semeuse ou simplement de l'*angady*² à Madagascar.

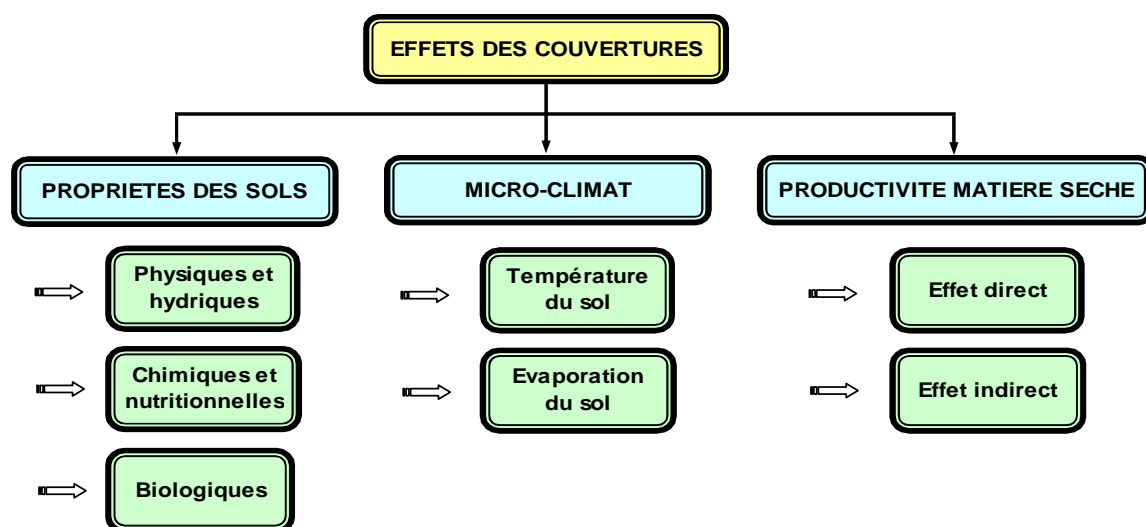
1.4.2. Les effets du semis direct sur le sol et l'environnement

Généralement, les plantes productrices de biomasse ont les fonctions suivantes :

- protéger le sol contre l'érosion aussi bien en saison des pluies qu'en saison sèche ;
- amortir les amplitudes de températures et d'humidité en créant un microclimat sous le couvert végétal ;
- maintenir une forte porosité et une structure stable du profil cultural ;
- maintenir le stock de matière organique dans le sol

La figure 1 montre schématiquement les effets des couvertures sur le sol, sur le climat et sur la productivité des matières sèches (détail en annexe1).

Figure 1 : Les effets des couvertures



Source : Séguy L., 1996

² Sorte de bêche droite utilisée par les paysans malgaches pour tous les travaux des champs : labour, semis, sarclage...

2. Parcelles expérimentales

Pour pouvoir vérifier les hypothèses, des expérimentations sur terrain et des analyses au laboratoire ont été faites.

2.1. Présentation générale du dispositif

Deux sols ferrallitiques représentatifs du milieu malgache ont été choisis pour cette étude. Il s'agit d'une part d'un sol sur dépôts fluviolacustres situé à Bemasoandro et d'autre part d'un sol sur socle cristallin situé à Ibity.

Ces deux sols ferrallitiques diffèrent par la roche mère ; le sol sur dépôts fluviolacustres est de type ferrallitique lessivé sur alluvions anciennes.

Les sols sur socle cristallin sont les plus « pauvres » sur roche acide. Soumis à des feux de brousse répétés, à une érosion intense par des fortes pluviométries, et à de faibles apports organiques en terrains labourés ; ils présentent rapidement un horizon compacté à faible profondeur qui limite l'enracinement des plantes et leur alimentation en eau et éléments minéraux.

2.2. Caractéristiques physico-chimiques des parcelles

Bemasoandro : échantillons 01, 02, 03, 04 : Sol ferrallitique sur dépôts fluviolacustres, plus argileux que celui d'Ibity avec 63 % d'argile dans l'horizon 0-20 cm. Il se trouve dans la zone d'Andranomanelatra.

Ibity : échantillons 05, 06, 07, 08 : Sol ferrallitique sur socle cristallin contenant 26% d'argile dans l'horizon 0-20 cm. La diminution de la teneur de la MO sur 5 ans a été de 24% dans l'horizon 0-10 cm et de 40% dans le niveau 10-20 cm ; ce qui correspond à des pertes moyennes annuelles de carbone respectivement de -1.0 et -1.4 Mgha⁻¹. Les teneurs des cations échangeables et de la matière organique sont très faibles. Ce sol a été cultivé 10 ans avec labour et a reçu des apports annuels de 5t de fumier à l'hectare.

2.3. Caractéristiques des échantillons

Le tableau 1 montre les caractéristiques de nos échantillons suivant leur localisation.

Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons

Echantillon n°	Localisation	Type du sol	Système de culture	Fertilisation
01	Bemasoandro	ferrallitique sur dépôts fluviolacustres	Semis direct	F0
02	Bemasoandro	ferrallitique sur dépôts fluviolacustres	Semis direct	F1
03	Bemasoandro	ferrallitique sur dépôts fluviolacustres	Labour	F0
04	Bemasoandro	ferrallitique sur dépôts fluviolacustres	Labour	F1
05	Ibity	ferrallitique sur socle cristallin	Labour	F0
06	Ibity	ferrallitique sur socle cristallin	Labour	F1
07	Ibity	ferrallitique sur socle cristallin	Semis direct	F0
08	Ibity	ferrallitique sur socle cristallin	Semis direct	F1

Dans la variable « fertilisation », F0 indique le niveau de fertilisation zero ; tandis que F1 présente l'existence de fertilisation dans les parcelles.

La culture pratiquée pour tous les échantillons est une association de Maïs/pomme de terre (graminée/légumineuse)

3. Information méthodologique générale

3.1. Détermination de la fraction du phosphore du sol lié à la matière organique

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la teneur en Porg (Ehlert et al., 2004). Elles sont toutes indirectes et consistent à déterminer la variation de P avant et après minéralisation du Porg. La méthode que nous allons adopter est celle qui a été utilisée par Rabeharisoa (2004), basée sur la méthode proposée par Saunders et Williams (1955). Le phosphore lié à la matière organique des sols est transformé en phosphate minéral par calcination de la matière organique à 550°C. Le P minéral d'un échantillon de sol calciné et d'un échantillon non calciné est ensuite extrait par un acide minéral fort, celui-ci étant supposé dissoudre l'ensemble des phosphates minéraux. La quantité de Porg du sol est calculée en faisant la différence entre la quantité de P extrait par un acide fort avant et après calcination après 0mn, 5mn, 10mn, 100mn et 1000mn d'agitation.

Le choix de l'intervalle de temps est basé sur les contraintes de temps et le nombre d'échantillons.

Le tableau 2 illustre l'ordre de prélèvement des échantillons, pendant l'extraction de phosphore par un acide minéral fort au laboratoire, qui est fonction de temps : 0mn, 5mn, 10mn, 100mn et 1000mn. Ce tableau a été utilisé aussi bien pour les échantillons calcinés que pour les non calcinés.

Tableau 2 : Grille de prélèvement des échantillons

Temps en min	0 ajout de 50 ml de H ₂ SO ₄ 0.1N	5 prélèvement et filtration	10	100	1000 le lendemain
Echantillon 1	16h 00 (1)	16h05 (2)	16h10 (4)	17H 40 (13)	8h40 (17)
Echantillon 2	16h 07 (3)	16h 12 (5)	16h 17 (6)	17h 47 (14)	8h 47 (18)
Echantillon 3	16h 25 (7)	16h 30 (8)	16h 35 (9)	18h 05 (15)	9h 05 (19)
Echantillon 4	16h 45 (10)	16h 50 (11)	16h 55 (12)	18h 25 (16)	9h 35 (20)

(..) : *Ordre de prélèvement*

3.2. Identification du modèle

3.2.1. Les entrées

Le modèle construit est basé sur l'hypothèse que trois variables pourraient expliquer en grande partie la dynamique du phosphore organique dans les sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra : (1) le type du sol, (2) le système de culture adopté, (3) la fertilisation.

3.2.2. Structure du modèle

Les études bibliographiques ont permis d'identifier les variables qui peuvent intervenir dans le modèle. Le fonctionnement de ces variables peut être présenté dans la figure suivante :

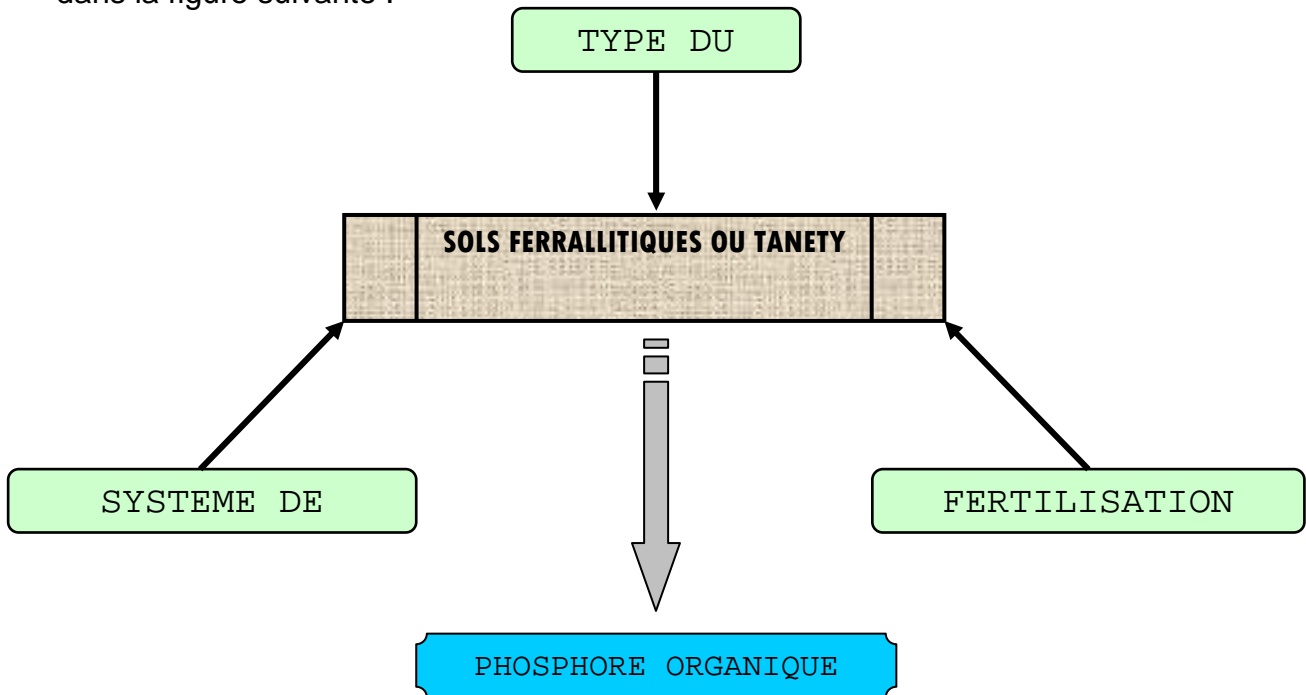


Figure 2 : Composantes du modèle

3.2.3. Méthode de détermination de l'équation du modèle

D'après l'analyse et la synthèse des informations obtenues issues des différentes études bibliographiques (Fardeau, 1998 et Findeling, 2001), l'équation identifiée pour modéliser cette problématique est la suivante :

$$y_t = C^{te} + \sum_{i=1}^n a_i * b_i$$

où

- **y** : la variable indépendante qui est le phosphore organique ou Porg
- **t** : temps de prélèvement, après agitation lors de l'extraction du phosphore avec un acide minéral fort, qui sont de 0mn, 5mn, 10mn, 100mn et 1000mn
- **C^{te}** : Constante de l'équation
- **a** : les coefficients des variables explicatives
- **b** : Les variables explicatives qui sont le système de culture ou **SC**, le type de sol ou **TS** et la fertilisation ou **F**
- **i** : nombre de variables explicatives

Compte tenu des variables identifiées, l'équation générale du modèle peut être présentée comme suit :

$$[Porg]_t = c + a_1 * TS + a_2 * SC + a_3 * F$$

Pour pouvoir déterminer les constantes \mathbf{c} et les coefficients des variables indépendantes ou explicatives $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ du modèle, la méthode multivariée qui est la régression multilinéaire a été adoptée avec le logiciel statistique appelé STATISTICA. Dans l'esprit d'un tri de variables, préalable à une analyse plus approfondie des données, c'est la version pas-à-pas ou incrémentielle de cette méthode qui sera utilisée.

La régression multilinéaire incrémentielle, comme toute régression, exige de sélectionner une variable dépendante \mathbf{y} , sur laquelle sera estimée l'influence de plusieurs variables indépendantes ou régresseurs. La régression multilinéaire incrémentielle s'appliquera donc aux problèmes où, manifestement, une variable est plus intéressante que les autres.

Mais, *a priori*, dans le doute de la pertinence des régresseurs pour le problème étudié, ils sont introduits un à un et la procédure s'arrêtera dès que le modèle linéaire expliquera "suffisamment" la variation de \mathbf{y} .

Pour estimer si le modèle est "suffisant", il faut des critères d'évaluation de la qualité de la régression, ou plus précisément de la pertinence d'introduire un régresseur supplémentaire dans le problème.

Le critère utilisé est le rapport \mathbf{f} de la variance expliquée par le modèle à la variance inexpliquée.

Le principe est simple : un seuil d'inclusion des variables est fixé, par exemple $\mathbf{f}=2$, et un seuil d'exclusion, par exemple $\mathbf{f}=1$.

Les méthodes incrémentielles peuvent alors être ascendantes ou descendantes. La méthode ascendante inclut les variables une à une à partir de rien, tandis que la méthode descendante exclut les variables une à une à partir du modèle complet comprenant tous les régresseurs. Le résultat final devrait être sensiblement le même.

Pour la méthode dans sa version ascendante, la procédure démarre en ne considérant aucun régresseur dans le modèle : celui-ci ne contient que le terme indépendant. Tous les régresseurs potentiels sont mis en attente, avec les valeurs des rapports \mathbf{f} comme s'ils appartenaient séparément au modèle. Ainsi, la procédure considère séparément les modèles $y=a+bx_1, y=a+bx_2, y=a+bx_3, \dots$ et calcule chaque fois les rapports \mathbf{f} correspondants. Les régresseurs potentiels peuvent ainsi être classés sur base de leur valeur de \mathbf{f} .

Le programme peut alors introduire dans le modèle le candidat le plus représentatif, si sa valeur de \mathbf{f} est supérieure au seuil d'inclusion fixé.

De nouveaux rapports \mathbf{f} sont calculés pour les variables potentielles qui restent, en tenant compte de la partie de la variabilité expliquée par le nouveau modèle et des degrés de liberté modifiés. De plus, une valeur de \mathbf{f} du nouveau modèle est également calculée.

Pour rappel, en effet,

$\mathbf{f}=\text{Variance expliquée par le modèle}/\text{Variance inexpliquée},$

ou encore,

$\mathbf{f}=\text{Moyenne des carrés des écarts par rapport au modèle}/\text{Moyenne des carrés des écarts résiduels},$

C'est-à-dire :

$f = \frac{\text{Somme des carrés des écarts par rapport au modèle}}{m} / \frac{\text{Somme des carrés des écarts résiduels}}{(n-m-1)}$

où m est le nombre de régresseurs dans le modèle et n est le nombre d'observations

Comme la somme des carrés des écarts résiduels, ainsi que le nombre de régresseurs dans le modèle ont changé, les valeurs de f doivent être réactualisées.

Au pas suivant, le deuxième candidat est introduit, puis le troisième et ainsi de suite.

La procédure s'arrête lorsque tous les rapports f des régresseurs potentiels restants sont inférieurs au seuil d'inclusion fixé au départ.

En cours de procédure, certaines variables déjà introduites peuvent être supprimées du modèle, si leur contribution a réduit le rapport f du nouveau modèle sous le seuil d'exclusion fixé. Le f d'exclusion doit toujours être inférieur au f d'inclusion.

La régression multilinéaire incrémentielle permet donc de calibrer un modèle linéaire optimal, en n'introduisant que les régresseurs qui contribuent de façon significative à expliquer la variabilité de y .

Il s'agit donc d'une analyse exploratoire, permettant notamment d'éliminer de l'étude un certain nombre de variables non pertinentes.

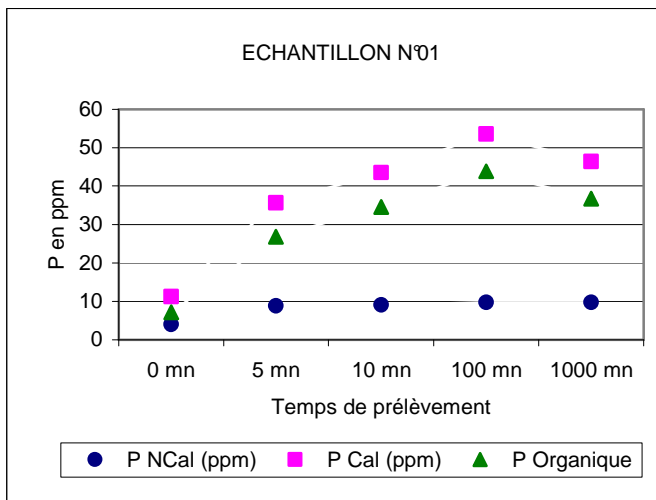
II. Résultats

1. Cinétiques d'extraction du phosphore par l'acide sulfurique dans les échantillons de terre avant et après calcination

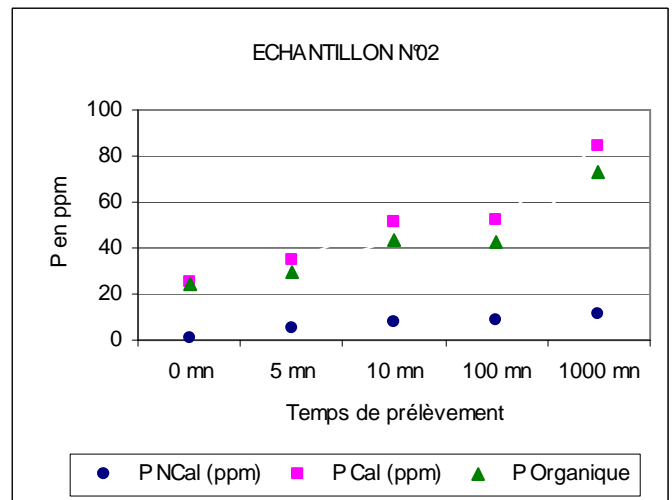
Il faut bien noter ici que le phosphore organique est obtenu par la différence entre le phosphore calciné ou minéral et celui non calciné.

Le choix de type de graphique en nuage de points est justifié par l'échelle de temps discontinue : 0mn, 5mn, 10mn, 100mn et 1000mn.

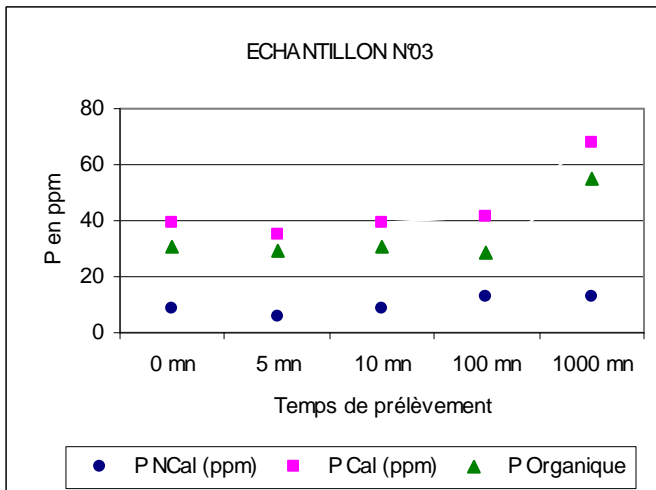
L'évolution de la quantité du phosphore organique, les phosphores calcinés et non calcinés pour les huit échantillons, peut être présentée dans les figures suivantes :



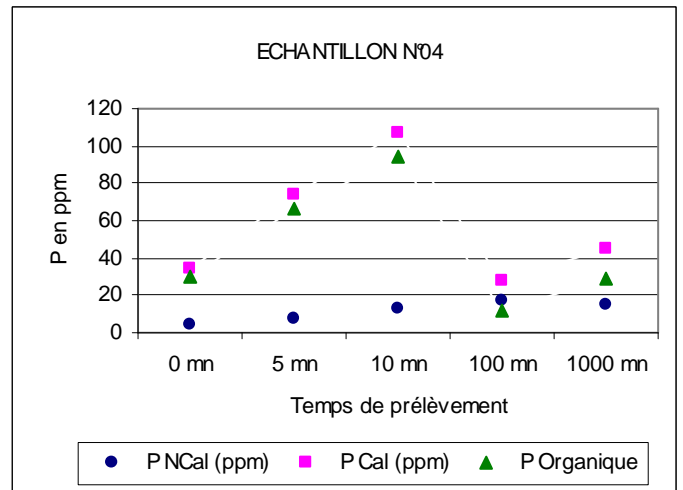
Fluviolacustre, semis direct, F0



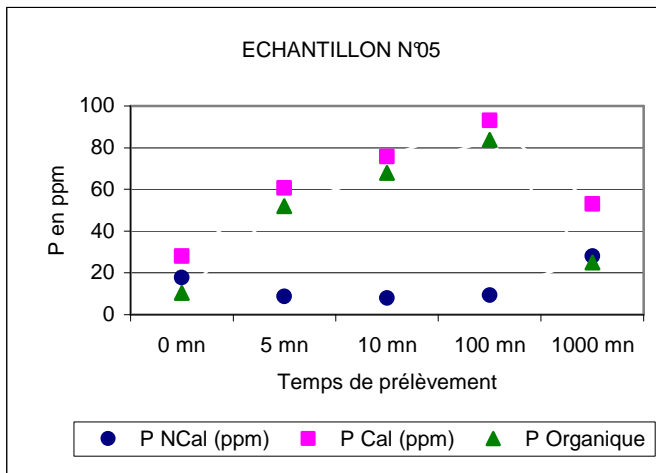
Fluviolacustre, semis direct, F1



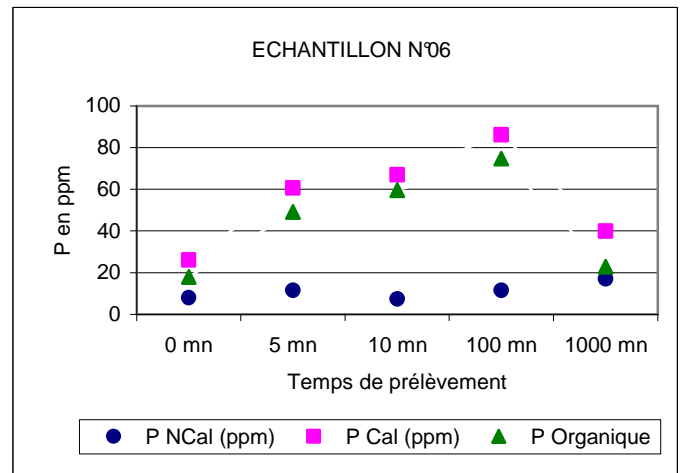
Fluviolacustre, labour, F0



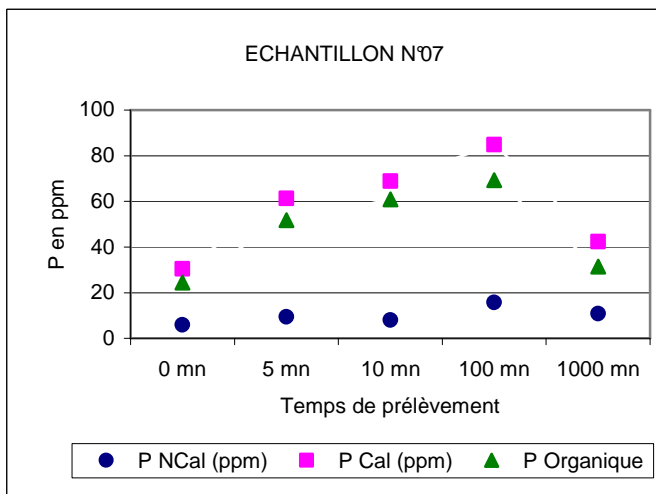
Fluviolacustre, labour, F1



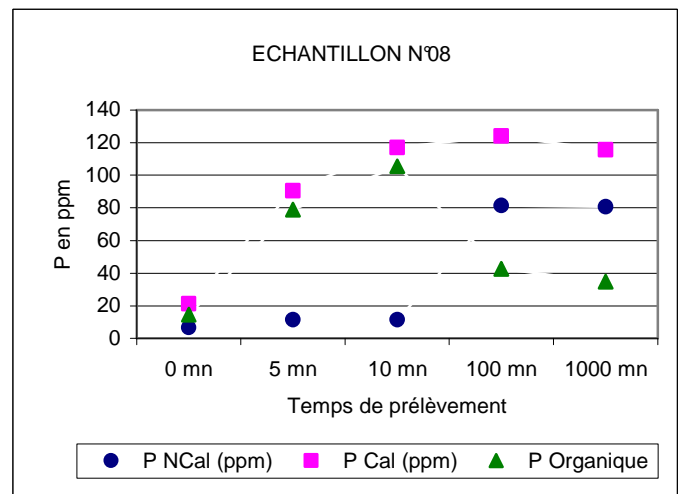
Socle cristallin, labour, F0



Socle cristallin, labour, F1



Socle cristallin, semis direct, F0



Socle cristallin, semis direct, F1

Figure 3 : Cinétiques d'extraction du phosphore par l'acide sulfurique dans les échantillons de terre avant et après calcination

L'objectif général de cette étude cinétique est de vérifier, en se basant à la méthode proposée par Saunders et Williams, que pour les sols ferrallitiques la quantité de phosphore extrait par la solution d'acide sulfurique diluée varie avec la durée d'extraction et la normalité de la solution acide, qui dans ce cas, est égale à 0,2N.

2. Equations du modèle

L'application de la méthode de régression multilinéaire incrémentielle permet de déterminer les équations du modèle en identifiant tous les coefficients de toutes les variables pour chaque temps de prélèvement.

Ainsi, voici les 5 équations identifiées en se basant à l'équation générale prédefinie dans la méthodologie :

$$[Porg]_t = c + a_1 \cdot TS + a_2 \cdot SC + a_3 \cdot F$$

Comme les prélèvements ont été faits dans une échelle de temps 0mn, 5mn, 10mn, 100mn, 1000mn, l'équation pour chaque temps de prélèvement doit être déterminée :

- **Equation n°1 pour le prélèvement à 0mn**

La première équation à déterminer sera l'équation qui va montrer la minéralisation du phosphore organique au temps $t=0mn$, c'est-à-dire tout de suite après l'ajout de l'acide minéral fort dans l'échantillon et sans agitation.

$$[Porg]_{0mn} = c + a_1 * TS + a_2 * SC + a_3 * F$$

Le tableau 3 illustre la procédure d'introduction des variables une à une en fonction de l'évolution du seuil d'inclusion.

Tableau 3 : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 0mn

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation					
Variable Dépendante : Porg					
Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0					
$r^2=0.000$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
Aucune				TS	$0 < 1$
				SC	$0 < 1$
				F	$0 < 1$

Dès la phase d'initialisation, le f-Inclusion pour tous les régresseurs est égal à 0 qui est inférieur au seuil fixé de f d'inclusion = 1 ; donc la procédure s'arrête. Par conséquent, on ne peut pas déterminer les coefficients des régresseurs.

Donc à 0mn, il n'y a pas d'équation qui peut traduire la libération de Porg.

$$[Porg]_{0mn} = 0$$

Le coefficient de corrélation est de $r^2 = 0,000$

- **Equation n°2 pour le prélèvement à 5mn**

La deuxième équation à déterminer sera l'équation qui va montrer la minéralisation du phosphore organique au temps $t=5mn$, c'est-à-dire 5mn après l'ajout de l'acide minéral fort dans l'échantillon et avec une agitation permanente.

$$[Porg]_{5mn} = c + a_1 * TS + a_2 * SC + a_3 * F$$

Le tableau 4 illustre la procédure d'introduction des variables une à une en fonction de l'évolution du seuil d'inclusion.

Tableau 4 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 5mn

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Résultat final					
Variable Dépendante : Porg					
Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0					
$r^2=0.5307$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	53,9462			SC	$0 < 1$
TS		-20,0025	2,8751		
F		15,9825	2.8279		

Une condition d'inclusion $f=1$ ne ferait pas entrer la variable SC, qui a un $f=0$, dans le modèle. Donc le modèle s'écrit comme suit :

$$[\text{Porg}]_{5mn} = 53,9462 - 20,0025 \cdot \text{TS} + 15,98 \cdot \text{F}$$

Il faut noter ici que les paramètres de la régression, qui sont r^2 , valeurs de f et coefficients du modèle, sont actualisés à chaque pas, compte tenu des nouveaux régresseurs introduits (voir annexe 6).

Cette procédure a permis de mettre en évidence les variables liées linéairement à la minéralisation du phosphore organique.

Le coefficient de corrélation est de $r^2 = 0,5307$

- **Equation n°3 pour le prélèvement à 10mn**

La troisième équation à déterminer sera l'équation qui va montrer la minéralisation du phosphore organique au temps $t=10mn$, c'est-à-dire 10mn après l'ajout de l'acide minéral fort dans l'échantillon et avec une agitation permanente.

$$[\text{Porg}]_{10mn} = c + a_1 \cdot \text{TS} + a_2 \cdot \text{SC} + a_3 \cdot \text{F}$$

Le tableau 5 illustre la procédure d'introduction des variables une à une en fonction de l'évolution du seuil d'inclusion.

Tableau 5 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 10mn

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Résultat final					
Variable Dépendante : Porg					
Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0					
$r^2=0.498$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	55,255			SC	$0 < 1$
F		27,210	2,501		
TS		-22,675	2,4854		

Une condition d'inclusion $f=1$ ne ferait pas entrer la variable SC, qui a un $f=0$, dans le modèle. Donc, le modèle s'écrit comme suit :

$$[\text{Porg}]_{100\text{mn}} = 55,255 - 22,675 \cdot \text{TS} + 27,210 \cdot \text{F}$$

L'évolution des paramètres de la regression, qui sont r^2 , valeurs de f et coefficients du modèle, est donnée en annexe 6.

Le coefficient de corrélation est de $r^2 = 0,498$

- **Equation n°4 pour le prélèvement à 100mn**

La quatrième équation à déterminer sera l'équation qui va montrer la minéralisation du phosphore organique au temps $t=100\text{mn}$, c'est-à-dire 100mn après l'ajout de l'acide minéral fort dans l'échantillon et avec une agitation permanente.

$$[\text{Porg}]_{100\text{mn}} = c + a_1 \cdot \text{TS} + a_2 \cdot \text{SC} + a_3 \cdot \text{F}$$

Le tableau 6 illustre la procédure d'introduction des variables une à une en fonction de l'évolution du seuil d'inclusion.

Tableau 6 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 100mn

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Résultat final					
Variable Dépendante : Porg					
Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0					
$r^2=0.697$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	123,566			SC	$0 < 1$
TS		-35,877	9,472		
F		-13,422	5,775		

Une condition d'inclusion $f=1$ ne ferait pas entrer la variable SC, qui a un $f=0$, dans le modèle. Donc le modèle s'écrit comme suit :

$$[\text{Porg}]_{100\text{mn}} = 123,566 - 35,877 \cdot \text{TS} - 13,422 \cdot \text{F}$$

L'évolution des paramètres de la regression, qui sont r^2 , valeurs de f et coefficients du modèle, est donnée en annexe 6.

Le coefficient de corrélation est de $r^2 = 0,697$

- **Equation n°5 pour le prélèvement à 1000mn**

La dernière équation à déterminer sera l'équation qui va montrer la minéralisation du phosphore organique au temps $t=1000\text{mn}$, c'est-à-dire 1000mn après l'ajout de l'acide minéral fort dans l'échantillon et avec une agitation permanente.



$$[\text{Porg}]_{1000\text{mn}} = c + a_1 \cdot \text{TS} + a_2 \cdot \text{SC} + a_3 \cdot \text{F}$$

Le tableau 7 illustre la procédure d'introduction des variables une à une en fonction de l'évolution du seuil d'inclusion.

Tableau 7 : Résultat final de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante sur le prélèvement à 1000mn

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Résultat final					
Variable Dépendante : Porg					
Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0					
r ² =0.507					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	-7,872			F	0<1
TS		19,920	3,826		
SC		10,985	2,579		

Une condition d'inclusion où f=1 ne ferait pas entrer la variable F, qui a un f=0, dans le modèle. Donc le modèle s'écrit comme suit :

$$[\text{Porg}]_{1000\text{mn}} = -7,872 + 19,920 \cdot \text{TS} + 10,985 \cdot \text{SC}$$

L'évolution des paramètres de la regression, qui sont r², valeurs de f et coefficients du modèle, est donnée en annexe 6.

Le coefficient de corrélation est de r² = 0,507

3. Validation du modèle

La validation d'un modèle de simulation implique que l'on fasse des comparaisons entre les données recueillies sur le terrain et celles résultant de la simulation.

Des méthodes tabulaires et graphiques simples sont communément utilisées pour la validation ; mais l'on utilise aussi des tests statistiques formels toutes les fois où l'on dispose de suffisamment de données. Dans le cas présent, des techniques statistiques formelles n'ont pas été utilisées dans la mesure où il n'existait pas suffisamment de données chronologiques sur les systèmes réels.

Tableau 8 : Comparaison entre les données expérimentales sur le Porg et celles simulées pour tous les échantillons (5mn et 10mn)

	5mn			10mn		
	Réel	Simulé	Variation	Réel	Simulé	Variation
Ech° n°01	26,81	29,92	12%	34,51	37,12	8%
Ech° n°02	29,29	45,90	57%	43,59	64,33	48%
Ech° n°03	29,3	29,92	2%	30,73	37,12	21%
Ech° n°04	66,26	45,90	-31%	94,05	64,33	-32%
Ech° n°05	51,88	49,92	-4%	67,78	59,79	-12%
Ech° n°06	49,13	65,90	34%	59,51	87,00	46%
Ech° n°07	51,71	49,92	-3%	60,79	59,79	-2%
Ech° n°08	78,95	65,90	-17%	105,5	87,00	-18%

Tableau 9 : Comparaison entre les données expérimentales sur le Porg et celles simulées pour tous les échantillons (100mn et 1000mn)

	100mn			1000mn		
	Réel	Simulé	Variation	Réel	Simulé	Variation
Ech° n°01	43,85	38,41	-12%	36,66	53,93	47%
Ech° n°02	42,87	24,99	-42%	72,88	53,93	-26%
Ech° n°03	28,59	38,41	34%	55,03	42,95	-22%
Ech° n°04	11,4	24,99	119%	29,21	42,95	47%
Ech° n°05	83,7	74,28	-11%	24,9	23,03	-8%
Ech° n°06	74,73	60,86	-19%	22,83	23,03	1%
Ech° n°07	69,17	74,28	7%	31,44	34,01	8%
Ech° n°08	42,62	60,86	43%	34,93	34,01	-3%

Les variations des résultats de comparaison des données expérimentales avec celles obtenues par la simulation du modèle se situent entre -42% et +119%. Ces variations peuvent être dues aux erreurs de manipulation au laboratoire.

Toutefois, la tendance est identique pour tous les échantillons qui affirme la première hypothèse sur la variation du phosphore extrait dans le temps.

III. Discussion

1. Le modèle

1.1. Les paramètres utilisés

1.1.1. Les cinétiques d'extraction

L'hypothèse émise est que la libération du phosphore des constituants du sol dans des sols ferrallitiques varie en fonction du temps. C'est pour cette raison que cette étude cinétique sur la libération de phosphore a été faite, en faisant des prélèvements tous les 0mn, 5mn, 10mn, 100mn et 1000mn pour tous les échantillons.

Ces cinétiques ont été comparées, puis modélisées, pour les 8 échantillons de terre. Elles sont présentées dans la Figure 3 et montrent que dans les deux sites Bemasoandro et Ibity, les quantités de P extrait par l'acide sulfurique à 0,1 N dans les échantillons de terre calcinée augmentent plus vite que celles de terre non calcinée. En effet, pour un échantillon donné la cinétique d'évolution de la teneur en P extrait par l'acide sulfurique 0,1 N dans l'échantillon calciné diffère significativement de celle observée dans l'échantillon non calciné.

Cependant, on peut constater que les quantités de phosphore extraites continuent de croître légèrement avec le temps d'extraction que l'échantillon ait été ou non calciné, passent un optimum à 100mn de prélèvement pour changer d'allure à partir de ce moment. Dans la majorité des cas sauf pour les échantillons n°02 et n°03, la quantité de P minéral extrait décroît à partir de 100mn de prélèvement.

Ce phénomène permet de dire que la libération de phosphore peut atteindre son maximum à un certain temps pour passer à une allure constante ou décroissante jusqu'à l'épuisement de stock dans la réserve du sol. Cette diminution pourrait se traduire par un transfert vers la phase solide du sol, probablement par adsorption sur les sites d'oxydes et hydroxydes métalliques colloïdaux à importante charge de surface, libérés par destruction des constituants organiques.

Comme l'étude s'arrêtait à 1000mn, donc quels que soient le type de sol, le système de culture adopté et l'apport ou non des engrais phosphatés, les résultats obtenus jusqu'à ce stade permettent de confirmer l'hypothèse sur la variation de la libération du phosphore organique dans le temps.

1.1.2. Les variables explicatives du modèle

La discussion sur l'importance et la signification de chaque variable dans l'explication de la libération du phosphore organique sera faite une à une pour chaque temps de prélèvement :

▪ prélèvement à 0mn

D'après la méthode utilisée pour déterminer le modèle sur la libération de phosphore organique, il n'existe aucune équation qui peut expliquer la dépendance de la variable P_{org} aux autres variables explicatives. Cela signifie qu'à ce stade, quel que soit le système utilisé ou le type de sol choisi, on ne devrait pas encore avoir de phosphore organique libéré.

- **prélèvements à 5mn et à 10mn**

La fertilisation a un effet positif sur la minéralisation du phosphore organique pour le prélèvement à un temps moins élevé ($0 < T \leq 10mn$). Cela contredit l'hypothèse qui dit que « la fertilisation complète avec phosphore a permis d'enrichir le sol en P minéral, tandis que la fertilisation sans P, a amélioré la teneur en P organique ».

Par contre, le type de sol n'a pas d'effet sur la minéralisation de phosphore organique, autrement dit pour le prélèvement à 5mn ou à 10mn, que ce soit le sol sur dépôts fluviolacustres ou le sol sur socle cristallin, le sol ferrallitique ne libère pas de phosphore organique. Cela confirme les caractéristiques des sols ferrallitiques qui ont un pouvoir fixateur en phosphore élevé.

Concernant la variable « système de culture », elle n'a pas encore d'influence sur la libération de phosphore organique à ce stade.

- **prélèvement à 100mn**

A cette étape, la constatation est la même pour le type de sol et le système de culture. Tandis que à propos de la fertilisation, elle n'a plus d'effet sur la minéralisation de phosphate organique. Cela confirme notre hypothèse.

Donc dans la réalité, l'apport des engrais phosphatés n'a qu'un effet stimulateur au début pour que le sol puisse libérer ses phosphores dans son complexe.

- **prélèvement à 1000mn**

A un stade plus loin, l'effet de la fertilisation continue à disparaître dans la minéralisation du phosphore organique et que celui du système de culture et du type de sol commencent à prendre leur place.

Le fait que le système de culture, entre autre le semis direct, a un effet tardif sur la minéralisation du phosphore organique peut être expliqué par le laps de temps exigé par ce système après sa première installation pour qu'il puisse améliorer l'état structural de ce sol et sa stabilité par le système racinaire et l'apport des matières organiques. En effet, pour le sol sur lequel on pratique le système de culture semis direct, le rendement optimum ne peut être atteint qu'après deux ou trois ans de sa première exploitation. Donc ici c'est évident que le type de sol a un effet positif sur la minéralisation de phosphore organique car à ce stade le sol ferrallitique a été amélioré par les effets des couvertures végétales (voir 2.1.4.2).

Le signe négatif de la valeur d'origine explique que quelles que soient les variables qui peuvent influencer la libération de phosphore organique, la quantité minéralisée va diminuer à partir de ce moment.

Donc notre deuxième hypothèse qui dit que « l'adoption d'un modèle favorisant l'utilisation du système de culture semis direct avec une rotation de culture céréale/légumineuse avec ou sans fertilisation pourrait atténuer le problème de manque de phosphore d'un sol acide » ne peut être confirmée qu'à partir de ce stade, c'est-à-dire à 1000mn de prélèvement ou 2 à 3 ans après la première installation dans le cas réel.

1.2. La structure du modèle

Avant d'arriver au choix de la structure du modèle, plusieurs questions ont été posées :

- quelle démarche méthodologique adopter pour modéliser le système, compte tenu de sa complexité ?
- quel type de simulation effectuer, vu la très grande taille du système ?
- quelle crédibilité accorder aux résultats ?

Le modèle linéaire choisi est un modèle simple qui a permis de comprendre la dépendance d'une variable, comme la minéralisation du phosphore organique dans un sol avec une spécificité particulière, sur plusieurs variables qui ont été jugées difficiles à expliquer.

Il est vrai que ce modèle a ses limites mais il a quand même servi à expliquer rapidement l'importance et la signification de chaque variable utilisée dans la complexité du fonctionnement interne du système. En effet, cette structure simple du modèle a été très utile pour pouvoir vérifier les hypothèses qui sont issues de nos propres connaissances et de plusieurs études bibliographiques.

Toutefois, il faut dire qu'il existe plusieurs formes ou structures de modèle qu'on pourrait utiliser pour modéliser un tel phénomène.

2. Les validités et l'utilisation du modèle

2.1. Reproductibilité du modèle

Les données dont il est souhaitable de disposer pour procéder à la validation formelle de ce modèle de système complexe sont rarement disponibles et ce modèle particulier n'a pas constitué une exception. Les considérations subjectives deviennent relativement importantes.

D'après les tableaux 08 et 09, les variations des résultats de comparaison des données expérimentales avec celles obtenues par la simulation du modèle se situent entre -42% et +119%.

Les chiffres très exorbitants sont rares. Tous les échantillons peuvent être classés en 2 catégories selon le niveau de pourcentage de variation :

1^{ère} Catégorie : échantillons n°02, n°03 et n°04 qui ont une variation allant de -42% jusqu'au +119%. Comme cette grande différence a été identifiée seulement sur 3 échantillons parmi les 8 analysés, donc nous l'avons considérée comme due aux erreurs de manipulation lors des travaux en laboratoire. En plus, en se référant aux graphiques de la cinétique d'extraction du phosphore (voir §3.1.), l'allure des courbes de ces 3 échantillons n'est pas semblable à celle des 5 autres échantillons.

2^{ème} Catégorie : échantillons n°01, n°05, n°06, n°07 et n°08 qui ont une variation allant de -19% jusqu'au +47%. Cette différence peut être due aux données sources, car on peut voir que les 4 derniers échantillons sont tous dans le type de sol sur socle cristallin qui devrait avoir une autre information explicative au problème.

Donc ce modèle pourrait être reproductible dans d'autre système ou d'autre domaine à condition que l'on ait des données complètes et pertinentes, et que les erreurs de manipulations de ces données soient minimales. Sinon il faudrait envisager une autre méthode d'identification de modèle.

2.2. Applications du modèle

2.2.1. Mesures stratégiques pour la dissémination du modèle constitué

Dans le but d'analyser la disponibilité du phosphore dans différents types de sols ferrallitiques de la région de Vakinankaratra et d'étudier de quelle manière les pratiques culturales modifient la dynamique du phosphore dans des sols acides, les résultats de la simulation ont permis de prévoir que l'application de ce modèle ne serait valable que pour les cultures sous système semis direct à partir de sa deuxième ou troisième année, c'est-à-dire à partir du moment où les couvertures végétales ont des effets sur l'amélioration de la structure et de la stabilité du sol.

2.2.2. Limite du modèle

La région de Vakinankaratra, notamment les sites de Bemasoandro et d'Ibity, a été le premier terrain d'essai du modèle. Comme dans ces deux sites, les données sur les ressources de base étaient restreintes, il a été nécessaire de s'appuyer sur un nombre limité de résultats expérimentaux et sur les observations personnelles.

3. Importance économique du modèle

Il est vrai que le phosphore est un des éléments non négligeables dans la détermination des rendements des cultures, mais le modèle construit a démontré que l'effet de la fertilisation disparaît progressivement dans la minéralisation du phosphore organique et que celui du système de culture et du type de sol commencent à prendre leur place.

Un apport dosé est ainsi important au vu du coût des unités fertilisantes des engrais phosphatés et la perte causée par la non assimilation du phosphore par la plante. Cela constitue une immobilisation financière non justifiée.

Conclusion

L'étude bibliographique détaillée des caractéristiques physico-chimiques et du fonctionnement biologique des sols ferrallitiques et du système de culture en semis direct, a permis certaines constatations montrant que :

- Les sols ferrallitiques sont acides avec un pH allant de 4 à 5,6. Ils ont un taux de matière organique faible, une capacité d'échange cationique faible, une teneur en cations faible, un phosphore total élevé et un pouvoir fixateur en phosphore élevé,
- Le système de culture, semis direct, par les effets de ses couvertures végétales a des pouvoirs améliorants des caractéristiques physico-chimiques, de l'activité biologique des sols.

L'analyse de ces différentes constatations nous a amené à proposer notre principale hypothèse qui est l'adoption d'un modèle favorisant l'utilisation du système de culture semis direct avec ou sans fertilisation afin d'accroître la biodisponibilité du phosphore dans les sols ferrallitiques.

L'approche choisie a consisté à comparer les deux sols ferrallitiques.

Le modèle obtenu par la méthode de régression multilinéaire incrémentielle a montré que la variable « système de culture » a beaucoup d'influence sur la minéralisation de phosphore organique dans les sols ferrallitiques, mais cela ne peut se manifester que quelques années après sa première installation.

Ces résultats pourraient confirmer notre hypothèse mais avec une condition. Donc nous pouvons dire que notre objectif fixé au départ est atteint.

Cependant, comme nous n'avons pas pu avoir des données complètes sur toutes les variables considérées à tous les stades végétatifs de la culture tout au long d'un cycle complet, nous ne pouvons pas présenter un modèle qui est fonction du temps. Nous étions obligés de présenter le modèle pour chaque point de prélèvement de phosphore sur les suspensions acides de sol.

Il serait donc souhaitable de continuer cette recherche en considérant d'autres paramètres qui n'ont pas été pris en compte dans le présent travail mais qui pourraient servir à des explications cohérentes et à des validations du modèle.

Il serait nécessaire de valider le modèle avec un ensemble de situations, qui permettraient d'étudier la dynamique de prélèvement de phosphore par la plante.

Deux questions peuvent aussi être posées pour la suite de cette recherche :

Quels sont les paramètres qu'il faudrait considérer pour avoir un modèle valide et reproductible ?

Quel type de modèle peut être utilisé dans une problématique pareille et avec quelle méthode ?

BIBLIOGRAPHIE

1. Ehlert P.A.I, JA Nelemans, and W. van Tintelen, 2004. Comparaison of methods of determination of organic phosphorus in soils. Pp. 16-19. In : Critical evaluation of options for reducing phosphorus loss from agriculture. Eds. W.J. Chardon and G.F. Koopmans. 4th International Phosphorus Workshop, Wageningen, The Netherlands.
2. Fardeau, 1998. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine ? *Agronomie* 8 : 577-584.
3. Findeling A., 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydriques, thermiques et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Thèse de Doctorat d'université, 327p + annexes.
4. Juo A.S.R. et Lal R., 1979. Nutrient profile in a tropical alfisol under conventional and no-till systems. In *Soil Science*, 127, pp. 168-173.
5. Lal R., 1995. Tillage systems in the tropics. Management options and sustainability implications. In *FAO Soils Bulletin n°71*, Rome (Italie), 206 p.
6. Lopez-Hernandez D., Brossard M., and Frossard E., 1998. P-isotopic exchange values in relation to Po mineralisation in soil with very low P-sorbing capacities. *Soil Biol. Biochem.* 30 : 1663-1670.
7. Piéri C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de 30 ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara, MINCOOP, CIRAD, France, 444 p.
8. Rabeharisoa R. L., 1985. Etude de l'influence de l'aluminium échangeable sur la dynamique du phosphore et son assimilation par le blé dans un sol ferrallitique de la région d'Ambohimandroso. Utilisation du $^{32}\text{PO}_4^{--}$. DEA de Sciences biologiques appliquées. Option Physiologie végétale appliquée à l'agronomie, 59p.
9. Rabeharisoa R. L., 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des hautes terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat es Science. 176p + annexes.
10. Raunet M. et Rasolo F., 1998. Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Actes de l'atelier international du 23 au 28 mars 1998 à Antsirabe, Madagascar. 658p.
11. Raunet M., 2000. Travail en cours sur l'histoire du semis direct. CIRAD, Montpellier (France).
12. Reyes Gomez V. M., 2002. Quantification et modélisation des flux hydriques, thermiques, et azotés dans le système de culture en semis direct avec couverture végétale dans la région de Cerrados brésiliens. Thèse de Doctorat d'université, 178p + annexes.
13. Rollin D., 1994. Des rizières aux paysages : Eléments pour une gestion de la fertilité dans les exploitations agricoles de Vakinankaratra et du Nord Betsileo (Madagascar). Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Paris X Nanterre. 324p + annexes.

14. Rollin D., 1997. Quelles améliorations pour les systèmes de culture du Sud Ouest malgache ? Agriculture et développement n°16 pp. 57-72
15. Séguy L., 1996. Rapport de mission à Madagascar sur les systèmes de couverture et le travail du sol ; CIRAD ; 20 pages + annexes
16. Triomphe B., 1996. Un système de culture original et performant dans une zone de montagne du tropique humide : la rotation maïs-Mucuna au Nord-Honduras. In Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides, Actes du séminaire, Montpellier, France, 13-17 novembre 1995. CIRAD, collection Colloques, Montpellier, pp 318-328.
17. Triomphe B., 1999. Systèmes de culture avec des plantes de couverture au Mexique et en Amérique Centrale : expériences, leçons et perspectives futures. Actes de l'Atelier international : "Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture". 23-28 mars 1998. Antsirabé, Madagascar, ANAE-CIRAD-FAFIALA-FIFAMANOR-FOFIFA-TAFA. p.75-86.
18. Zou X., Binkley D. and Doxtarder K.G., 1992. A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. Plant Soil 147: 243-250.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES EFFETS DES COUVERTURES VÉGÉTALES SUR LES PROPRIÉTÉS DES SOLS

1. Impacts sur les caractéristiques physiques et hydriques du sol

Concernant les caractéristiques physiques des sols, nous verrons que ces techniques jouent également un rôle sur le stockage de l'eau dans le sol.

1.1. Impacts sur l'état structural du sol

▪ **Conséquences du non-travail du sol avant semis**

Un des objectifs principaux du travail du sol avant semis est l'amélioration de l'état structural du sol. Cependant, si les travaux du sol sont effectués dans de mauvaises conditions, trop sèches ou trop humides, les effets obtenus sont contraires à ceux attendus : apparition d'une semelle de labour, sol émietté en surface... De plus, en agriculture motorisée, des passages répétés du tracteur favorisent le tassement du sol.

Dans ces conditions, pratiquer le semis direct permet de limiter les interventions qui participent à la dégradation de la structure du sol. Cela suppose aussi d'améliorer la structure du sol et du sous-sol d'une autre manière que par le labour : c'est l'un des rôles de la couverture végétale.

▪ **Actions en profondeur du sol des plantes de couverture**

- Amélioration de la stabilité structurale du sol : en enrichissant le sol en matière organique, la couverture végétale participe à l'amélioration de sa stabilité structurale.
- Amélioration de la structure du sol : les plantes de couverture permettent de fragmenter le sol grâce à l'action de leurs racines qui s'introduisent dans les fissures et les agrandissent.

De plus, l'enrichissement en matière organique favorise la vie biologique dans le sol ; ce qui participe à l'augmentation de la porosité par le creusement de galeries.

Ainsi, comparativement au labour conventionnel, les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale entraînent en profondeur du sol :

- une augmentation de la proportion des pores moyens de 0,2 à 50 μm dans les couches superficielles du sol < 20 cm, au détriment des macropores, ceci sans augmentation de la porosité totale ;
- une augmentation de la porosité totale par contre en profondeur <30 cm.

1.2. Impacts sur le stockage de l'eau dans le sol

Les systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale influent sur la quantité d'eau utile stockée dans le sol ; ce qui est dû essentiellement à l'action des plantes de couverture. Celles-ci agissent d'une part sur les mécanismes de constitution des réserves en eau dans le sol, et d'autre part sur les facteurs de pertes en eau.

▪ **Meilleure valorisation des eaux de pluie**

- Amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol et diminution du ruissellement

Les systèmes de culture avec couverture végétale peuvent améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol et diminuer aussi le ruissellement ; le sol peut stocker beaucoup d'eaux pendant et après la pluie jusqu'à sa saturation.

- Augmentation de la capacité de stockage en eau du sol

L'enrichissement du sol en matière organique améliore la capacité de rétention en eau du sol ; ce qui est particulièrement intéressant pour les sols sableux.

- Amélioration de l'enracinement des cultures

En augmentant la porosité des sols en profondeur, les plantes de couverture favoriseraient un meilleur développement en densité et en profondeur de l'enracinement de la culture principale. L'eau stockée dans le sol serait ainsi mieux valorisée.

▪ **Evolution des pertes en eau**

De façon générale, les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale permettent :

- de limiter les pertes en eau occasionnées par les adventices. En effet, les plantes de couverture peuvent diminuer le développement des adventices en les dominant dans le champ de culture. En diminuant la pression des mauvaises herbes, la couverture réduit leur consommation en eau ;
- d'augmenter les pertes en eau par drainage en profondeur. En favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol, les plantes de couverture doivent également augmenter les risques de drainage de l'eau en profondeur, eau qui devient alors inaccessible aux cultures. Par contre, ce risque doit être compensé par un meilleur enracinement de ces cultures.

Mais des nuances doivent être faites selon le type de couverture végétale :

- une couverture morte permet de limiter l'évaporation du sol. En effet, la présence d'un mulch limite la remontée par capillarité de l'eau contenue en profondeur dans le sol. Les résultats des travaux de Philips (1980, cité par Guérif 1994) au Kentucky, montrent effectivement que l'évaporation du sol en semis direct avec mulch est bien inférieure comparativement à un labour sans couverture, et qu'elle reste faible < 50 mm, quelles que soient les conditions climatiques ;
- une couverture vivante augmente les pertes en eau du sol par transpiration. En effet, les plantes de couverture vivantes sont elles-mêmes consommatrices d'eau.

2. Impacts sur les caractéristiques physico-chimiques du sol

2.1. Conservation, ou amélioration du taux de matière organique dans le sol

La matière organique joue un rôle fondamental sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol notamment sur la stabilité structurale et sur le stockage de l'eau et des éléments minéraux. Or, dans les conditions climatiques des pays tropicaux, elle subit une minéralisation rapide ; ce qui pose le problème de sa conservation dans les sols cultivés si elle n'est pas renouvelée fréquemment. Ainsi, les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale influent sur le taux de matière organique des sols.

▪ Production de matière organique

Les plantes de couverture produisent une biomasse importante en quantité, sur et dans le sol, biomasse qui n'est pas exportée.

D'après Triomphe (1996), en dehors des grains de maïs produits et récoltés, l'association maïs-*Mucuna* au Honduras produit une biomasse résiduelle totale de l'ordre de dix tonnes de matière sèche par hectare et par an. Cette biomasse se divise en deux parties à peu près équivalentes : une verte, issue directement de la fauche du *Mucuna*, et une sèche.

A cette biomasse facilement quantifiable, il faudrait encore rajouter celle formée non seulement par les racines, mais aussi par la faune et la flore hypogée. Or la biomasse racinaire est loin d'être négligeable. Par exemple, une culture de sorgho peut produire 630 kg de matière sèche de racines (Piéri, 1989).

▪ Minéralisation de la matière organique

Le labour permet d'incorporer la matière organique dans le sol ; ce qui en accélère la minéralisation. Ainsi, le non-travail du sol limite la vitesse de décomposition de la matière organique ; ce qui est d'autant plus important sous les climats chauds et humides où cette décomposition est très rapide.

Sous les tropiques, des expérimentations qui comparent l'évolution du taux de matière organique de sols cultivés avec labour conventionnel ou avec semis direct sur couverture végétale, montrent que les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale permettent de maintenir ce taux après plusieurs années de culture, voire de l'augmenter dans les couches superficielles du sol <10 cm (Derpsch et al., 1991 ; Lal, 1995 ; Triomphe, 1999).

Cette conservation ou cette augmentation du taux de matière organique dans le sol diminue l'acidité du sol et accroît la quantité d'éléments minéraux disponibles pour les plantes cultivées.

2.2. Evolution de la disponibilité des éléments minéraux dans le sol

Il faut raisonner en terme de bilan, en considérant les effets des systèmes de culture semis direct sur couverture végétale sur les apports d'éléments minéraux d'une part et les pertes d'autre part.

▪ Les apports en éléments minéraux

- Remontée des éléments minéraux situés en profondeur des sols

Les plantes de couverture pourraient jouer le rôle de *pompes biologiques* en favorisant la remontée d'éléments minéraux situés à une trop grande profondeur du sol pour être accessibles aux plantes cultivées. Ce rôle n'est possible que pour les plantes de couverture qui disposent d'un enracinement suffisamment développé pour

aller absorber ces éléments en profondeur. Par la suite, la minéralisation de la biomasse végétale produite par la plante de couverture libère en surface les éléments minéraux ainsi captés et recyclés (Séguy et *al.*, 1996).

- Fixation symbiotique pour l'azote

C'est le rôle des légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique. La minéralisation de leur biomasse libère ensuite l'azote dans le sol.

- Rétention des ions dans le sol
- Minéralisation de la matière organique

La matière organique permet une augmentation de la capacité d'échange cationique du sol (CEC), donc un meilleur stockage des éléments minéraux dans le sol sous une forme assimilable par les plantes cultivées.

▪ **Les pertes en éléments minéraux**

- Erosion et ruissellement

Les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale diminuent le ruissellement, et par conséquent limitent les pertes d'éléments minéraux dues à ce phénomène.

- Volatilisation pour l'azote

En recouvrant le sol, la couverture végétale contribue à limiter le phénomène de perte d'azote du sol par volatilisation.

- Exportation par récolte

La biomasse végétale produite par la plante de couverture est laissée sur place. Par contre, les parties récoltées de la culture principale sont toujours exportées. Or, si les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale permettent d'augmenter les rendements des cultures, ces exportations seront d'autant plus importantes.

- Immobilisation temporaire

L'activation de la vie biologique des sols par la couverture végétale augmente la consommation en azote des micro-organismes ; ce qui peut provoquer, dans le cas où le rapport C/N est élevé, des carences en azote temporaires ou des faims d'azote.

Concernant les autres éléments minéraux, d'après les expérimentations de Juo et Lal (1979), les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale favorisent une concentration de la majorité des éléments minéraux comme le phosphore sur les premiers centimètres du sol.

2.3. L'acidité du sol

Dans les pays tropicaux, le semis direct sur couverture végétale n'a pas d'effet acidifiant sur les sols, et il peut même avoir des effets améliorateurs (Triomphe, 1999). En effet, l'augmentation des nutriments issus des résidus de culture laissés en superficie contribue à la réduction des problèmes d'acidité.

3. Impacts sur l'activité biologique du sol

La biologie du sol est caractérisée par l'activité des organismes, faune et flore hypogée, qui composent le système sol-plante. Ces organismes contribuent à la formation des caractéristiques physiques du sol (creusement de galeries), et aux transformations chimiques : ils décomposent la matière organique fraîche provoquant la libération d'éléments minéraux directement assimilables par les plantes ou la minéralisation primaire, ou à l'inverse participent à sa réorganisation sous forme d'humus ou humification. L'humus est à la fois une source d'approvisionnement en éléments minéraux pour les plantes par minéralisation secondaire, et un élément clé du comportement du sol en jouant sur ses caractéristiques physiques surtout la stabilité structurale et chimiques sur la capacité d'échange cationique. On voit donc l'importance de l'activité de ces organismes du sol.

Pour les micro-organismes du sol : microflore et microfaune

On suppose que les plantes de couverture, en créant des conditions de température et d'humidité favorables aux micro-organismes, et en fournissant plus de matière organique, favorisent leur prolifération et leur activité (Triomphe, 1999).

Ainsi, on peut dire que l'activation de la vie biologique du sol en semis direct sur couverture végétale contribue fortement à l'amélioration de sa structure (House et Parmelee, 1985). La transformation de la matière organique permet également une meilleure alimentation minérale des plantes cultivées.

Les systèmes de culture semis direct sur couverture végétale mettent en jeu des processus agrobiologiques nombreux et complexes. Les avantages entraînés en terme de réduction des phénomènes d'érosion sont les plus aisés à mettre en évidence. Pour le reste, il est nécessaire de raisonner sous forme de bilans, bilan hydrique et bilans minéraux, qui diffèrent selon le type de couverture, le milieu et notamment le climat, mais aussi les systèmes techniques dans lesquels le semis direct sur couverture végétale est intégré.

ANNEXE 2 : ETUDE DE L'ÉVOLUTION DES IONS PHOSPHATES LIBÉRÉS DE LA FRACTION ORGANIQUE DU PHOSPHORE DE DEUX DIFFÉRENTS TYPES DE SOL FERRALLITIQUES DES HAUTES TERRES DE MADAGASCAR

L'objectif de cet essai est d'abord d'appliquer la méthode d'extraction de P-organique adaptée pour la détermination du phosphore organique d'une boue, de celle de H. SAUNDERS et E.G. WILLIAMS, 1955), ensuite de suivre l'évolution des ions phosphates libérés de cette fraction dans la solution du sol.

Principe

Oxydation du P organique par calcination. Le P organique est estimé comme la différence de P extrait par un acide fort avant et après calcination.

Matériel

Deux échantillons de sol ferrallitique : sur dépôts fluvio lacustres et sur socle cristallin, séchés à l'air et tamisés à 2 mm

Four

Creuset en silice (1 par répétition)

H₂SO₄ 0.2N (50 ml par répétition). Pour 2 litres de solution H₂SO₄ 0.2N, introduire 1500 ml d'eau distillée dans une fiole de 2l ; ajouter avec précaution et lentement, 11.12 ml de solution d'acide sulfurique concentré (36N, 1.84g/l), et compléter à 2 litres avec de l'eau distillée.

Flacon de 120 ml (1 par répétition)

Balance précise à 0.01g

Protocole

Pour chaque série d'échantillons de sol, déterminer l'humidité résiduelle selon la norme ISO 11465 (faire 3 répétitions).

Peser 1g de sol séché dans un creuset en silice. Mettre au four à 550°C pendant 4 heures. Transférer l'échantillon de sol calciné dans un flacon en polyéthylène de 120 ml en prenant soin de bien rincer avec la solution de H₂SO₄ 0.2N et compléter à 50 ml.

Mettre en suspension 1g de sol séché non calciné et 50 ml de la solution de H₂SO₄ 0.2N

Agitation pendant 25H les échantillons calciné et non calciné.

Filtrer à 0.2µm

Faire le dosage colorimétrique

ANNEXE 3 : PROTOCOLE DE DOSAGE DU PHOSPHORE ORGANIQUE

Différentes méthodes d'extraction de P-organique ont été comparées

Calcination suivi d'une extraction à l'acide sulfurique 0.2N. Le P-organique représente la différence entre le P dosé sur deux échantillons de sol calcinés et non calcinés.
Extraction à chaud avec de l'acide Chlorhydrique 0.1N et de l'ammoniaque 0.5N.
Extraction à froid avec de la soude 0.1N.

Les résultats de ces différentes extractions ont montré que la première méthode serait la plus pratique à mettre en œuvre, avec des résultats comparables avec les autres méthodes, plus compliquées et plus long à utiliser.

Pour les sols acides à hydroxydes de fer et d'aluminium, comme les sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar, il semble suffisant d'utiliser la méthode de calcination en augmentant avec une concentration de 0.1N d'acide sulfurique pour améliorer la libération du P-organique. Quand à la température de calcination, il n'y a pas de différence significative entre 400 et 550°C, une augmentation de la température au-delà de 650° risque d'entraîner une perte de P par volatilisation.

Ainsi, pour les sols bien drainés, il semble judicieux d'utiliser la méthode de calcination et extraction à l'acide sulfurique concentré (0.1N).

Mode opératoire

peser 1g de sol de taille < 0.3 mm

calciner pendant 4h à 550°C

peser 1g de sol non calciné

extraire le P avec 50 ml d'acide sulfurique 0.1N et agiter pendant 5, 10, 100, 1000 min

doser le phosphore sur les deux extraits au vert malachite (H_2SO_4 6N)

la différence entre P calciné et P non calciné va donner le P-organique

Matériel

Creuset en silice : 2

H_2SO_4 0.1N , 1l

Fioles jaugées de 50 ml, 6

Fioles plastiques de 100 ml, 20

ANNEXE 4 : RESULTATS D'ANALYSE AU LABORATOIRE

Ech 27:humidité=4,55% et MS=0,9545

Ech° n°01	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,008	0,0266	4,01	0,018	0,2138	11,2	7,19
5 mn	0,014	0,1589	8,825	0,052	0,6804	35,64	26,81
10 mn	0,015	0,1726	9,0439	0,063	0,8313	43,55	34,51
100 mn	0,016	0,1864	9,7627	0,077	1,0235	53,61	43,85
1000 mn	0,016	0,1864	9,7627	0,067	0,8862	46,42	36,66

Ech 30:humidité=3,97% et MS=0,9603

Ech° n°02	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,004	0,0217	1,13	0,038	0,4883	25,42	24,29
5 mn	0,01	0,0104	5,42	0,051	0,6667	34,71	29,29
10 mn	0,013	0,1452	7,56	0,074	0,9823	51,15	43,59
100 mn	0,015	0,1726	8,99	0,075	0,996	51,86	42,87
1000 mn	0,018	0,2138	11,13	0,12	1,6136	84,01	72,88

Ech 45:humidité=4% et MS=0,9600

Ech° n°03	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,014	0,1589	8,28	0,057	0,749	39,01	30,73
5 mn	0,01	0,104	5,42	0,051	0,6667	34,72	29,3
10 mn	0,014	0,1589	8,28	0,057	0,749	39,01	30,73
100 mn	0,02	0,2413	12,57	0,06	0,7902	41,16	28,59
1000 mn	0,02	0,2413	12,57	0,097	1,3	67,6	55,03

Ech 48:humidité=3,70% et MS=0,9630

Ech° n°04	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,003	0,008	4,15	0,05	0,653	33,9	29,75
5 mn	0,013	0,1452	7,54	0,106	1,4214	73,8	66,26
10 mn	0,021	0,255	13,24	0,153	2,0664	107,29	94,05
100 mn	0,026	0,3236	16,8	0,042	0,5432	28,2	11,4
1000 mn	0,024	0,2962	15,38	0,065	0,8588	44,59	29,21

Ech 92:humidité=0,80% et MS=0,9920

Ech° n°5	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,028	0,351	17,69	0,043	0,5569	28,07	10,38
5 mn	0,015	0,1726	8,7	0,09	1,2019	60,58	51,88
10 mn	0,014	0,1589	8,01	0,112	1,5038	75,79	67,78
100 mn	0,016	0,1864	9,39	0,137	1,8468	93,09	83,7
1000 mn	0,043	0,5569	28,07	0,079	1,0509	52,97	24,9

Ech 93:humidité=0,84% et MS=0,9916

Ech° n°6	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,014	0,1589	8,01	0,04	0,5157	26	17,99
5 mn	0,019	0,2275	11,47	0,09	1,2019	60,6	49,13
10 mn	0,013	0,1452	7,32	0,099	1,3254	66,83	59,51
100 mn	0,019	0,2275	11,47	0,127	1,7096	86,2	74,73
1000 mn	0,027	0,3373	17,01	0,06	0,7902	39,84	22,83

Ech 95:humidité=1,80% et MS=0,9820

Ech° n°7	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,011	0,1178	6	0,046	0,5981	30,45	24,45
5 mn	0,016	0,1864	9,49	0,09	1,2019	61,2	51,71
10 mn	0,014	0,1589	8,09	0,101	1,3528	68,88	60,79
100 mn	0,025	0,3099	15,78	0,124	1,6684	84,95	69,17
1000 mn	0,018	0,2138	10,89	0,063	0,8313	42,33	31,44

Ech 97:humidité=1,79% et MS=0,9821

Ech° n°8	NON CALCINE			CALCINE			P Organique (ppm)
	DO	C°	P NCal (ppm)	DO	C°	P Cal (ppm)	
0 mn	0,012	0,1315	6,69	0,033	0,4197	21,37	14,68
5 mn	0,019	0,2275	11,58	0,132	1,7782	90,53	78,95
10 mn	0,019	0,2275	11,58	0,17	2,2997	117,08	105,5
100 mn	0,119	1,5998	81,45	0,18	2,4369	124,07	42,62
1000 mn	0,118	1,5861	80,75	0,168	2,2729	115,68	34,93

ANNEXE 5 : CODAGE DES VARIABLES POUR TOUS LES ÉCHANTILLONS

	TS	SC	F
	1 : Socle cristallin 2 : Fluviolacustre	1 : Labour 2 : Semis direct	1 : F0 2 : F1
Ech° n°01	2	2	1
Ech° n°02	2	2	2
Ech° n°03	2	1	1
Ech° n°04	2	1	2
Ech° n°05	1	1	1
Ech° n°06	1	1	2
Ech° n°07	1	2	1
Ech° n°08	1	2	2

ANNEXE 6 : TABLEAU MONTRANT LES PROCEDURES DE L'INCRÉMENTIELLE

▫ **le prélèvement à 5mn**

Tableau : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.000$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
Aucune				TS	2,8751
				SC	0<1
				F	0<1

Sur base du classement des valeurs de F, la procédure va donc introduire dans le modèle le candidat le plus représentatif, soit le TS.

Tableau : Sélection du TS comme régresseur expliquant la libération de Porg

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.323$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	77,920			SC	0<1
TS		-20,0025	2,8751	F	2.8279

▫ **le prélèvement à 10mn**

Tableau : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.000$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
Aucune				TS	0<1
				SC	0<1
				F	2,501

Sur base du classement des valeurs de F, la procédure va donc introduire dans le modèle le candidat le plus représentatif, soit le F.

Tableau : Sélection du F comme régresseur expliquant la libération de Porg

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.294$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	21,242			SC	0<1
F		27,210	2,501	TS	2,4854

▫ **le prélèvement à 100mn**

Tableau : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.000$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
Aucune				TS	9,472
				SC	0<1
				F	0<1

Sur base du classement des valeurs de F, la procédure va donc introduire dans le modèle le candidat le plus représentatif, soit le TS.

Tableau : Sélection du TS comme régresseur expliquant la libération de Porg

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.612$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	103,432			SC	0<1
TS		-35,877	9,472	F	5,775

▫ le prélèvement à 1000mn

Tableau : Initialisation de la régression multilinéaire incrémentielle ascendante

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.000$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
Aucune				TS	3,826
				SC	0<1
				F	0<1

Sur base du classement des valeurs de F, la procédure va donc introduire dans le modèle le candidat le plus représentatif, soit le TS.

Tableau : Sélection du TS comme régresseur expliquant la libération de Porg

Régression Multilinéaire Incrémentielle Ascendante : Phase d'initialisation Variable Dépendante : Porg Seuil de f d'inclusion : 1 Seuil de f d'exclusion : 0 $r^2=0.612$					
Variables dans le modèle	Valeur d'origine	Coefficient	f-Exclusion	Variables en dehors du modèle	f-Inclusion
	8,605			SC	2,579
TS		19,920	3,826	F	0<1

ANNEXE 7 : FRACTIONNEMENT DU PHOSPHORE LIÉ AUX MATIÈRES ORGANIQUES D'UN SOL FERRALLITIQUE SUR SOCLE CRISTALLIN DE MADAGASCAR (ANDRIAMAHADY, 1980)

Traitement	NPKCa		NKC <small>a</small> (sans P)		Pas de fumure	
	P en mg kg ⁻¹	% du P tot	P en mg kg ⁻¹	% du P tot	P en mg kg ⁻¹	% du P tot
P lié à AF	51	5	47	4	58	5
P lié à AH	336	31	317	29	272	26
P organique (P-AF +P-AH)	387	36	364	33	330	31
P-minéral	418	39	397	36	385	36
P-total	1076		1098		1058	