



**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
DÉPARTEMENT DES EAUX ET FORÊTS**

Promotion " FANAMBY " (2011 - 2012)

**MÉMOIRE DE DIPLÔME D'ÉTUDES APPROFONDIES  
*Foresterie – Développement – Environnement***

# **EVALUATION DES STOCKS DE CARBONE ET DE PHOSPHORE TOTAL DANS DIFFERENTS TYPES DE SOLS A MADAGASCAR**

**Présenté par : RAHARIMALALA Niela Dorlysse**

**Soutenu, le 24 Mai 2013**

**Devant les membres du jury composés de :**

**Président** : Pr. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène

**Rapporteur** : Dr. RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa

**Examineurs** : Dr. RAKOTO RATSIMBA Harifidy

Dr. BECQUER Thierry





## Remerciement

---

Ce présent mémoire n'a pu être réalisé sans la contribution de plusieurs personnes physiques et/ou morales, envers qui j'aimerais bien manifester ma profonde reconnaissance, plus particulièrement :

- ❖ A Monsieur **RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène**, Docteur ès Sciences, Professeur titulaire, Directeur Scientifique de la formation troisième cycle à l'Ecole Supérieure des Sciences agronomiques, qui a fait l'honneur de présider le Jury de cette soutenance,
- ❖ A Monsieur **RAZAFIMAHATRATRA Hery Manantsoa**, Docteur en Agro-Pédologie, Enseignant à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, notre encadreur scientifique, d'avoir consacré une partie de son temps à nous diriger durant l'élaboration de ce travail.
- ❖ A Monsieur **BECQUER Thierry**, HDR, Pédologue, Directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement, qui malgré ses nombreuses occupations a accepté de participer au jury de ce mémoire en tant qu'examineur,
- ❖ A Monsieur **RAKOTO RATSIMBA Harifidy**, Docteur de recherche à l'Université d'Antananarivo, maître de conférences, qui a bien voulu examiner ce travail,
- ❖ A Monsieur **RAMAMONJISOA Bruno Salomon**, Professeur, Docteur d'Etat, Coordinateur de la formation « troisième cycle de l'ESSA-Forêts », pour nous avoir orienté lors de notre formation,
- ❖ A Madame **RABEHARISOA Lilia**, Professeur, Docteur d'Etat, Directrice du Laboratoire des RadioIsotopes (LRI), de m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à :

- ❖ Tout le personnel du Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) à Ampandrianomby, pour les aides qu'ils nous ont fourni durant les travaux en laboratoire; et à tous les étudiants et doctorants du LRI pour leurs aimables collaborations,
- ❖ Tous les responsables et le personnel de la formation continue et à tous les intervenants du troisième cycle ESSA-Forêt (promotion FANAMBY),
- ❖ **À ma mère, mes aimables grand-frères, à mes adorables belles sœurs, à mon parrain et à ma marraine**, toute ma famille pour leurs soutiens, leurs compréhensions et encouragements durant la réalisation de ce mémoire.
- ❖ À tous mes ami(e)s et collègues.

Que ceux que je n'ai pas pu citer ici veuillent bien m'excuser et qu'ils puissent trouver dans ce mémoire, l'image de leur contribution et ma sincère gratitude. *Mille mercis à tous!!*

*Niela*

## RESUME

---

L'agriculture reste la principale activité de la majorité de la population malgache. Les deux tiers des terres arables de Madagascar, utilisés à cet effet, sont principalement constitués par des sols de « *tanety* », de types ferrallitiques, qui sont généralement des sols acides. Malgré leur faible productivité, les agriculteurs sont obligés de les exploiter suite à une forte pression démographique et d'autres problèmes sociaux. La mise en valeur des « *tanety* » s'impose alors face à la nécessité liée au développement de la production agricole. La mauvaise gestion de la fertilité des sols cultivés reste l'un des facteurs de blocage pour l'agriculture malgache. Le carbone via la matière organique et le phosphore du sol font partie des éléments les plus importants pour l'agriculture. Quels sont les facteurs qui influencent la variation de la teneur en ces deux éléments dans le sol ? La présente recherche tente de comprendre cette variation sur des échantillons de sol de Madagascar. Ces échantillons ont été prélevés le long des routes nationales tous les 20 km. Les résultats ont montré qu'en fonction des profondeurs, la teneur en carbone organique varie entre 3,87 à 31,42 g.kg<sup>-1</sup> de sol, la teneur en phosphore total oscille entre 203 et 433 mg.kg<sup>-1</sup> de sol. Les Ferralsols présentent des teneurs en carbone organique et phosphore total plus importantes par rapport aux autres types de sols. Enfin, la teneur en Carbone organique dépend des facteurs externes, tels que la température, alors que la teneur en phosphore total est contrôlée par la nature de la roche mère. Ainsi, cette étude pourra servir à améliorer nos connaissances sur la fertilité de différents groupes de sols de Madagascar à travers la connaissance des éléments fertilisants déjà contenus dans les sols.

**Mots clés** : Sols, Carbone organique, Phosphore total, Climat, Roche mère, Madagascar.

## Famintinana

---

Ny fambolena no asa ifotoran'ny Malagasy, ny roa ampahatelon'ny tany eto Madagasikara dia tanety karazana tany feralitika izay manana toetra asidra. Na eo aza ny hakelin'ny vokatra azo avy aminy dia tsy maintsy mamboly amin'io ny tantsaha hiatrehana ny fitomboan'ny mponina sy noho ny antony ara-piaraha-monina samihafa. Ny fitrandrahana ny tanety araka izany dia manampy amin'ny fampitomboana ny vokatra. Ny tsy fahalalana ny kasinga ao amin'ny tany anefa dia sakana ho an'ny fahafahana mamokatra eo aminy. Ny C sy ny P ao anaty tany dia isan'ny kasinga manandanja ho an'ny fambolena. Inona avy ny anton-javatra mety hanova ny tahan'ny kasinga (C sy P) ao amin'ny tany? Ity fikarohana ity dia natao mba hamantarana ny fiovaovan'ny tahan'ny kasinga ao anaty tany eto Madagasikara. Ny santionan-tany nanaovana ny fitiliana ireo kasinga ireo dia nalaina isaky ny 20 km manaraka ny lalam-pirenena. Ny tahan'ny karbôna hita tao aorian'ny fitiliana arakaraka ny halalin'ny nofon-tany nangalana azy dia eo anelanelan'ny 3, 87 g.kg<sup>-1</sup> hatramin'ny 31, 42 g.kg<sup>-1</sup>, ny tahan'ny faosfôro indray dia eo anelanelan'ny 203 sy 433 mg.kg<sup>-1</sup>. Ny ferralsols, izay isan'ny karazana misongadina amin'ny tany feralitika, no manana ny tahan'ny karbôna sy faosfôro ambony indrindra raha oharina amin'ny karazany tany hafa. Io tahan'ny karbôna io dia miankina amin'ny maripàna raha toa miankina amin'ny karazan'ny vato ao ambanin'ny tany kosa ny tahan'ny faosifôro. Ity fikarohana ity dia azo entina hanatsarana ny famokarana isaky ny vondron-tany misy eto Madagasikara sy hamantarana ny kasinga mpamokatra ao amin'ny tany.

**Voambolana manandaja:** Tany, Karbôna, Faosfôro, Maripàna, Vato ambanin'ny tany, Madagasikara.

## Abstract

---

Agriculture is the main activity of the majority of the malagasy population. Two-thirds of Madagascar's arable land, including the upland soil called “*tanety*”, are acidic ferrallitic soils. Increasing population and social life problems obliged farmers to use “*tanety*” despite of their low productivity. The valorization of “*tanety*” is needed to face the development of agricultural production. Lack of knowledge about soil nutrient level is one of the limiting factors of the malagasy agriculture. The organic matter is important elements for agriculture. What are the factors that influence variation in the content of these elements in the soil? This research attempts to understand the variation of soil samples from Madagascar. Sampling was done along the national roads every 20 km. The results showed the organic carbon content decreased with the soil depth and ranged from 3,87 to 31,42 g.kg<sup>-1</sup> and total phosphorus content ranged from 203 to 433 mg.kg<sup>-1</sup> for all types of soils. Ferralsols exhibit the highest levels of organic carbon and total phosphorus contents. In conclusion, the organic carbon content depends on external factors such as temperature, while the total phosphorus content is controlled by the nature of the origin rocks. This study can be used to improve the knowledge about the soil nutrient fertility of different groups of soils in Madagascar and the nutrient available for the plants need.

**Keywords:** Soils, Organic carbon, Total phosphorus, Climate, Origin rocks, Madagascar.

# Table des matières

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Partie I : ETAT DES CONNAISSANCES</b> .....	3
<b>I.1.La géologie de Madagascar</b> .....	3
<b>I.2.Synthèse des grands types de climat</b> .....	5
<b>I.3.Les sols de Madagascar</b> .....	8
<b>I.3.2.Selon la classification française des sols (CPCS)</b> .....	8
<b>I.3.3.Selon la classification FAO des sols</b> .....	10
<b>I.4.Le carbone et le phosphore dans le sol</b> .....	13
<b>I.4.1.Les matières organiques et le carbone du sol</b> .....	13
<i>I.4.1.1.Le cycle de la matière organique et du carbone dans le sol</i> .....	13
<i>I.4.1.2.Les rôles des matières organiques et du carbone du sol</i> .....	15
<b>I.4.2.Le phosphore du sol</b> .....	16
<i>I.4.2.1.Le cycle du phosphore du sol</i> .....	16
<i>I.4.2.2.Les rôles du phosphore dans l'agriculture et son impact dans l'environnement.</i> .....	17
<b>Partie II : MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....	19
<b>II.1.Problématique</b> .....	19
<b>II.2.Hypothèses</b> .....	20
<b>II.3.Objectifs</b> .....	21
<b>II.4.Méthodologies</b> .....	21
<b>II.4.1.Sites de prélèvements</b> .....	21
<b>II.4.2.Echantillonnage</b> .....	22
<b>II.4.3.Méthodes d'analyse</b> .....	23
<i>II.4.3.1.Mesure de la densité apparente (DA)</i> .....	24
<i>II.4.3.2.Dosage du carbone organique</i> .....	24

II.4.3.3. <i>Dosage du phosphore total</i> .....	25
II.4.4. <b>Extraction des données climatiques et géologiques par le Système d'Information Géographique (SIG)</b> .....	25
II.4.5. <b>Analyses statistiques</b> .....	26
<b>PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</b> .....	28
III.1. <b>Densité apparente (DA)</b> .....	28
III.2. <b>Teneurs et stocks de C organique</b> .....	30
III.2.1. <b>Teneurs en carbone organique du sol</b> .....	30
III.2.2. <b>Stock de C du sol</b> .....	34
III.3. <b>Teneurs et stocks de phosphore total</b> .....	36
III.3.1. <b>Teneurs de phosphore total du sol</b> .....	36
III.3.2. <b>Stock de P total du sol</b> .....	38
III.5. <b>Discussions</b> .....	43
III.5.1. <b>Variation de la densité apparente</b> .....	43
III.5.2. <b>Teneur et stock en C organique du sol</b> .....	43
III.5.3. <b>La teneur P total et stock en P total</b> .....	44
III.5.4. <b>Relations entre les teneurs de C organique et de P total avec le climat et la roche mère</b> .....	45
III.5.4.1. <b>Effet du climat sur la teneur en C organique</b> .....	45
III.5.4.2. <b>Effet de la roche mère et du climat sur la teneur en P total</b> .....	46
III.5.5. <b>Limites et perspective de l'étude</b> .....	46

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

Tableau 1 : Groupes des sols et nombre de sites de prélèvement .....	23
Tableau 2: Moyenne de la densité apparente par groupe de sol.....	27
Tableau 3 : Teneur moyenne en carbone organique .....	29
Tableau 4 : Stock moyenne de carbone du sol .....	33
Tableau 5 : Teneurs en P total des différents groupe de sol.....	35
Tableau 6 : Stock en P total des différents groupe de sols .....	36
Tableau 7 : Teneur moyenne en P total du sol en fonction de la nature des roches mères .....	38

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Carte géologique de Madagascar	5
Figure 2 : Carte de la pluviométrie annuelle de Madagascar	6
Figure 3 : Carte de la classe de température moyenne de Madagascar	7
Figure 4 : Carte pédologique de Madagascar selon la classification CPCS	9
Figure 5 : Carte pédologique de Madagascar selon la classification FAO	11
Figure 6 : Relation entre les classes de sol	12
Figure 7 : Cycle de la matière organique	15
Figure 8 : Cycle du carbone	15
Figure 9 : Cycle du Phosphore	17
Figure 10 : Carte des sites de prélèvement	22
Figure 11 : Démarche méthodologique de l'étude	26
Figure 12 : Distribution de la densité apparente par groupe de sol	28
Figure 13 : Variation de la teneur en carbone organique du sol	30
Figure 14 : Variation du stock de carbone des différents groupes de sol	31
Figure 15 : Distribution de la teneur en P total des différents groupes de sol sur 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	32
Figure 16 : Distribution du stock en P total des différents groupes de sol sur 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	34
Figure 17 : Teneur en carbone en fonction de la température aux profondeurs 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	35
Figure 18 : Teneur en P total en fonction de la température aux profondeurs 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	37
Figure 19: Teneur en P total en fonction de la pluviométrie aux profondeurs 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	39
Figure 20 : Teneur en carbone organique en fonction de la pluviométrie aux profondeurs 0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm	40

# LISTE DES ANNEXES

---

Annexe 1 : Proportion de différentes classes de sol à Madagascar selon la carte CPCS

Annexe 2 : Proportion de différentes classes de sol à Madagascar selon la carte FAO

Annexe 3 : Information sur les échantillons

Annexe 4 : Matériels

Annexe 5 : Test non paramétriques des analyses de sols

Annexe 6 : Protocoles d'analyse des sols au LRI

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

<b>ANOVA</b>	Analyse de variance (ANalyse Of VARIance)
<b>ADN</b>	Acide DésoxyriboNucléique
<b>ATP</b>	Adénosine Tri Phosphate
<b>ARN</b>	Acide Ribo Nucléique
<b>ADP</b>	Adénosine Di Phosphate
<b>C</b>	Carbone
<b>C‰</b>	Teneur en carbone
<b>Ca</b>	Calcium
<b>CH<sub>4</sub></b>	Méthane
<b>cm</b>	Centimètre
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centimètre cube
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de C
<b>COS</b>	Carbone Organique du Sol
<b>CPCS</b>	Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols
<b>FAO</b>	Food and Agricultural Organisation
<b>DA</b>	Densité Apparente
<b>DEA</b>	Diplôme d'Etude Approfondie
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GIEC</b>	Groupe Inter gouvernemental d'Expert pour le Changement Climatique
<b>g</b>	Gramme
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Acide sulfurique
<b>H</b>	Hydrogène
<b>IPCC</b>	Intergouvernemental Panel on Climate Change
<b>IRD</b>	Institut de Recherche pour le Développement
<b>km</b>	Kilomètre
<b>kg</b>	Kilogramme
<b>K</b>	Potassium
<b>L</b>	Litre
<b>LRI</b>	Laboratoire des RadioIsotopes
<b>RN</b>	Route National
<b>N</b>	Azote
<b>Mv</b>	MilliVolt
<b>ml</b>	Millilitre
<b>mg</b>	Milligramme
<b>Mg</b>	Mégagramme
<b>Mg</b>	Magnésium
<b>Ma</b>	Million d'année
<b>nm</b>	Nanomètre
<b>MOS</b>	Matière Organique du Sol
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Dioxyde d'azote

<b>p</b>	Prise
<b>P</b>	Phosphore
<b>pH</b>	potentiel d'Hydrogène
<b>PGRM</b>	Programme des Gestions des Ressources Minières
<b>ppm</b>	Partie par million ou $\text{mg.kg}^{-1}$
<b>S</b>	Soufre
<b>SQC</b>	Schisto-Quartzite Calcaire
<b>V<sub>t</sub></b>	Volume du témoin
<b>V<sub>s</sub></b>	Volume de la solution

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

Le carbone organique (C) et le phosphore (P) font parties des constituants majeurs du sol. Ils occupent une place importante pour l'agronomie et l'environnement en général (Lemercier *et al.*, 2006).

La présence de matière organique dans les sols, constitués essentiellement de substances carbonées, est à l'origine des propriétés physico-chimiques favorisant le développement des végétaux cultivés ou naturels. La matière organique joue ainsi un rôle important dans le fonctionnement du sol et sa mise en valeur. Pour la production agricole, sa présence contribue à une bonne nutrition des espèces cultivées, ce qui se traduit par l'augmentation des rendements et l'amélioration de la production. En effet, vis à vis de la qualité physique du sol, les matières organiques du sol (MOS) assurent le lien entre les particules minérales (argiles, limons et sables) à travers le complexe argilo-humique. Elles participent ainsi à la structuration du sol et à sa stabilité vis à vis des agressions extérieures telles que la pluie, la compaction entraînée par le passage du bétail ou d'engins agricoles... Elles assurent également le stockage et la mise à disposition pour la plante, à la suite de processus de minéralisation, des éléments nutritifs et stimulent l'activité biologique du sol.

Pour l'environnement, les MOS ont un rôle fondamental en retenant les micropolluants organiques et les pesticides. Elles participent ainsi au maintien de la qualité des eaux de surface et jouent un rôle épurateur majeur. Elles pourraient aussi jouer un rôle important dans le contrôle de la dynamique des principaux gaz à effet de serre (GES). L'augmentation récente de la concentration des GES, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le dioxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est d'origine anthropique. Diverses solutions sont proposées pour atténuer cette augmentation de la teneur en GES de l'atmosphère, l'une d'entre elles est la séquestration du carbone d'origine atmosphérique dans le sol (Razafimbelo, 2005).

Le phosphore est un élément indispensable pour la production végétale. Une faible teneur en P assimilable entraîne des risques de carences préjudiciables à la croissance des plantes. Le P intervient dans les transferts énergétiques (ATP), dans la transmission des caractères héréditaires (acides nucléiques), la photosynthèse et la dégradation des glucides. Cet élément est essentiel pour la floraison, la nouaison, la précocité, le grossissement des fruits et la maturation des graines. Par contre, le phénomène d'eutrophisation, ou enrichissement des eaux de surface en phosphore (Barroin, 2004), est à craindre dans les zones où les sols présentent des teneurs très élevées en P, suite à la migration de ce dernier par ruissellement ou lixiviation (Morel *et al.*, 2004). A l'état naturel, la richesse du sol en P est déterminée par celle de la roche mère sous-jacente.

A Madagascar, selon les estimations de Rakotomanana et Robilliard (2003), près de 77% de la population vit en zone rurale et environ 85% de cette population travaille dans le secteur agricole. Cette situation confirme l'importance des activités agricoles pour le pays. Par conséquent, tous les travaux de recherche axés sur l'amélioration de la compréhension des sources et de la dynamique des matières organiques impliquées dans le maintien (ou l'amélioration) de la fertilité des sols, entre autre le C et le P, contribueront toujours à une amélioration de la production agricole.

Plusieurs types de sol ont été identifiés et sont exploités essentiellement à des fins agricoles à Madagascar. L'analyse de la variabilité des stocks de C et de P des différents types de sol de Madagascar contribuera à une amélioration de la valorisation agricole de ces sols. Hormis les travaux de Grinand *et al.* (2009), qui présentent les premiers résultats sur l'estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar, les données disponibles à une échelle régionale (au sens sous-national) à Madagascar sont peu nombreuses, voire absente pour ce qui concerne le P.

C'est dans cette optique que le Laboratoire des Radio Isotopes (LRI), en collaboration avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), a initiée une étude visant à caractériser la fertilité des sols de Madagascar en tenant compte des caractéristiques pédologiques des sols et en fonction des différentes zones géographiques et climatiques de Madagascar. Un volet de cette étude porte sur l'évaluation des stocks de C et de P des principaux types de sols malgaches.

En travaillant sur différents types de sol prélevés à différents endroits, des questions se posent : la teneur en ces deux éléments varie-t-elle en fonction des types de sol et quels facteurs déterminent cette variabilité ? En général, les facteurs climatiques, qui ont joué aussi un rôle primordial durant la pédogénèse, sont toujours cités comme les premiers facteurs agissant sur la dynamique des éléments dans le sol. Des travaux d'échantillonnage sur différents types de sol et sous différents types de climats, dans divers endroits de Madagascar ont été réalisés pour pouvoir répondre à ces questions.

Le présent document comporte trois parties bien distinctes: la première partie rappellera l'état des connaissances sur le sujet. Les matériels et méthodes seront traités dans la deuxième partie et la troisième partie sera consacrée aux résultats et discussions.

# **ETAT DES CONNAISSANCES**

## **Partie I : ETAT DES CONNAISSANCES**

Le sol est la couche superficielle de l'écorce terrestre à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques. Parmi les facteurs les plus déterminants sur la pédogénèse se trouvent en premier lieu la nature de la roche mère et le type de climat. Ces 2 facteurs peuvent jouer des rôles considérables sur l'état et la dynamique des différents constituants du sol. Ainsi, les qualités agricoles des différents types de sol sont étroitement liées à leurs propriétés physico-chimiques (Demolon, 1949). Dans cette première partie, nous décrirons donc successivement la géologie de Madagascar et la nature des roches, puis les principales zones climatiques de Madagascar, ce sont les deux facteurs conditionnant la formation des sols. Ensuite, nous décrirons les principales classes de sols de Madagascar et présenterons les connaissances actuelles sur leurs teneurs en C et P.

### **I.1.La géologie de Madagascar**

Besairie (1973), affirme que les deux tiers de la superficie de Madagascar sont formés par un socle cristallin (des roches magmatiques et des roches métamorphiques) et un tiers par des formations sédimentaires.

Les terrains sédimentaires, d'âge phanérozoïques, occupent 4 bassins adossés au massif cristallin central :

- Au Nord : le bassin de Diégo occupé par des formations sédimentaires dominé par des grès ;
- Au Nord-Ouest : le bassin de Majunga dominé par le groupe de l'Isalo, avec des grès jaunâtre ou rougeâtre entrecroisé avec des argiles, et le groupe de Sakamena, constitué par des grès arkosiques ;
- A l'Ouest : le bassin de Morondava occupé par le groupe de Sakoa, présentant des schistes avec des intercalations de grès ;
- A Nord-Est : le bassin oriental occupé par des formations sédimentaires formées par des sables et des grès.

Plusieurs auteurs ont réalisé des études tectonométamorphiques et stratigraphiques ainsi que des études structurales du socle malgache. Parmi eux, Besairie (1973) et Hottin (1976) préconisent des études litho-stratigraphiques détaillées. La nouvelle carte géologique du PGRM (Projet de Gouvernance des Ressources Minérales) de 2008, qui fait la synthèse des travaux antérieurs, considère que le socle malgache est subdivisé en plusieurs unités tectoniques (Figure 1) :

- le système de base Antongilien et le domaine de Masora essentiellement granitique, d'âge Katarchéen à Archéen (Tucker *et al.*, 1997) ;
- le domaine d'Antananarivo et le complexe de Tsaratanana, d'âge Archéens, sont dominés par des granites à biotite, épidote, hornblende et sphène (Besairie, 1967)
- Parmi les unités d'âge protérozoïque, la ceinture de Bemarivo comprend deux régions discrètes: une région sud dominée par des amphibolites et granulite-gneiss meta-sédimentaires et une région nord caractérisée par des dômes et des massifs granitiques à migmatites et orthogneiss (Tucker *et al.*, 1997).
- Le domaine d'Itremo est formé essentiellement d'amphibolite, de gneiss, qui peuvent correspondre à l'orthogneiss du bloc d'Antananarivo, ainsi que par des métasédiments et finalement par des roches metavolcaniques (Collins, 2006 ; Collins et Windley, 2002). Les métasédiments, qui consistent en quartzites, pelites et en dolomite carbonaté (SQC), ont été déposés probablement pendant le protérozoïque avant la formation de Gondwana ( $1855 \pm 11$  Ma).
- Le domaine d'Ikalamavony est formé par des gneiss à biotite et des gneiss à amphibole qui sont très abondants, de quelques micaschistes et gneiss à sillimanite et grenat, des cipolins, des amphibolites feldspathiques à hornblende et labradorite parfois quartzifères (Hottin, 1976), d'âges mésoprotérozoïques et néoprotérozoïque (PGRM, 2008).
- Le domaine de Vohibory est composé par des roches essentiellement mafiques, des roches felsiques et des métasédiments d'âges 850-700 Ma (Collins *et al.*, 2006).
- Le domaine Androyen, d'âges mésoprotérozoïque et néoprotérozoïque (PGRM, 2008), renferme des métapelites, des metabasites et des anorthosites.
- Le domaine Anosyen est relié essentiellement au néoprotérozoïque (900-700 Ma) et l'âge des roches intrusives est daté entre 570 Ma et 520 Ma (PGRM, 2008). Il est divisé en deux groupes, Ihorombe et Iakora. Le groupe d'Ihorombe est constitué de plusieurs formations telles que les formations de Benato, de Manorira, de Taolagnaro et d'Antenina. Elles sont composées particulièrement par des leptynites à grenat avec ou sans cordiérite et spinelle et des leptynites à magnétite.

Le groupe d'Iakora se divise en plusieurs formations, d'après le PGRM (2008). La formation de Tranomaro renferme des leptynites à grenat et/ou à biotite, des gneiss à biotite et cordiérite et leur dominance en formations calco-magnésiennes telles que les pyroxénites, scapolitites, plagioclasites, wollastonitites et marbres, ainsi l'intercalation des lames de granites stratoïdes (PGRM, 2008). Les formations de Mafiefy et Mananara-Sud contiennent des micaschistes rubanés associés aux migmatites à grenat, biotite et

hornblende. Les formations d'Ihoso et Esira comportent des gneiss rubanés aux magnétites avec ou sans grenat, orthopyroxène et cordiérite.

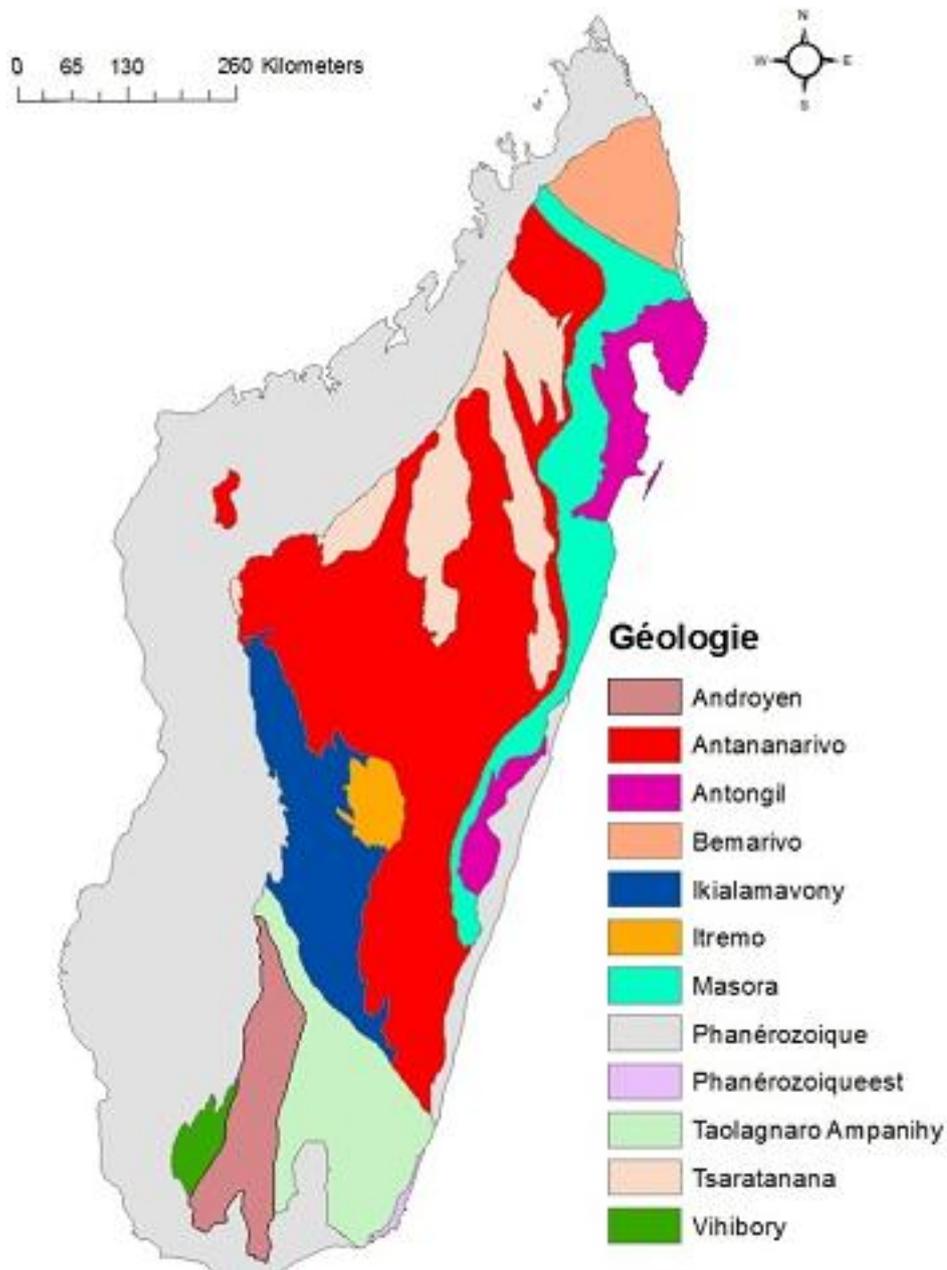


Figure 1: Carte géologique de Madagascar (PGRM, 2008)

## I.2.Synthèse des grands types de climat

Madagascar se trouve dans la zone intertropicale, le climat est surtout déterminé d'une part, par l'anticyclone des Mascareignes qui engendre l'alizé du Sud-Est, et d'autre part, par les basses pressions équatoriales généralement situées au Nord de l'île, provoquant la mousson du Nord-Ouest et qui atteignent par intermittence Madagascar durant la saison chaude (Cornet, 1973).

La partie Est de l'île, allant de Vohemar jusqu'à Fort Dauphin, demeure la zone la plus humide, avec une pluviosité annuelle variant de 1800 mm à plus de 3000 mm (Figure 2). Le Sud et le Sud-Ouest, avec Tuléar et l'Androy, sont les plus secs avec une pluviosité moyenne inférieure à 800 mm, pouvant descendre jusqu'à 200 mm par an. Les Hautes Terres ont en général une pluviosité moyenne annuelle entre 1200 mm et 2000 mm. Certaines zones humides du Nord-Ouest, notamment les zones de Sambirano et de Nosy Be, ont une pluviosité supérieure à 2000 mm tandis qu'une grande partie de la côte Ouest a une pluviosité entre 1200 mm et 1400 mm par an.

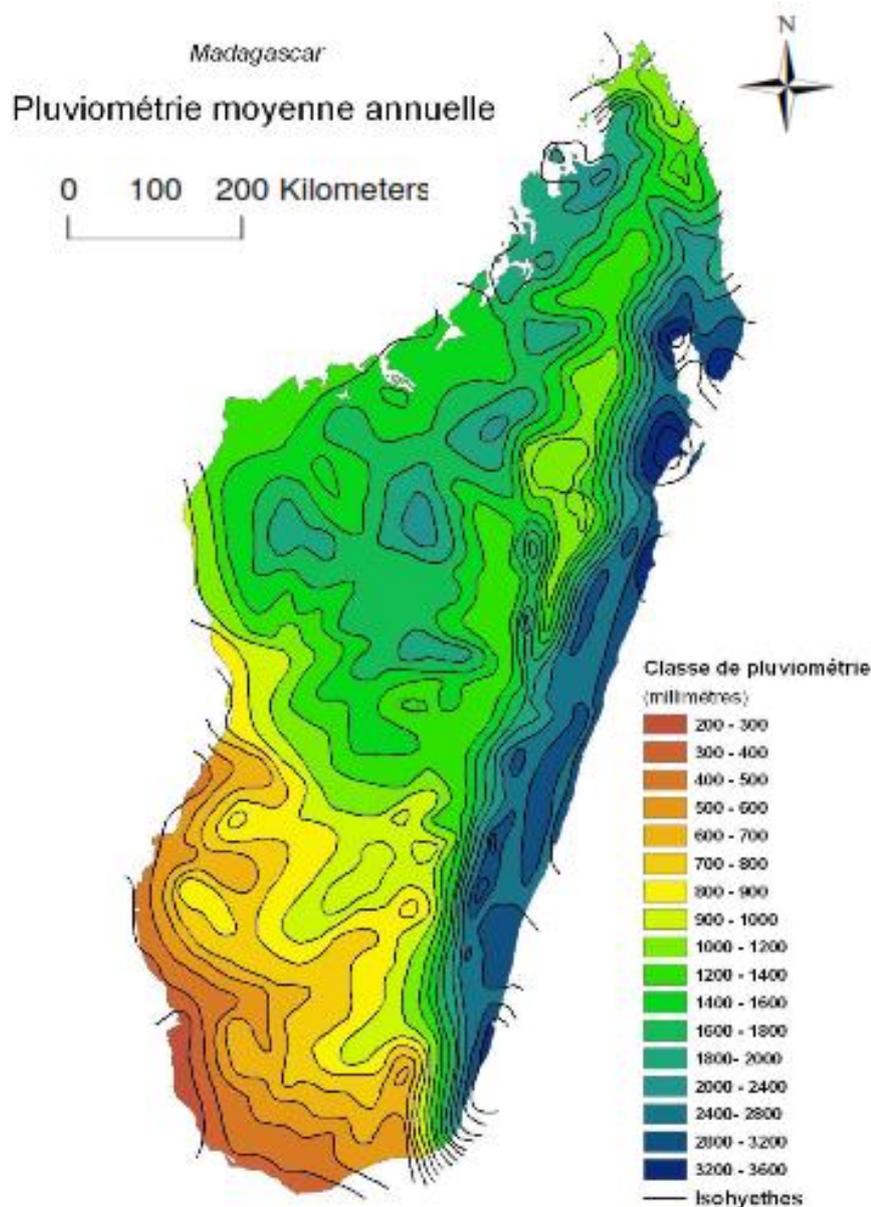


Figure 2: Carte de la pluviosité annuelle de Madagascar (Raunet, 1997)

Pour la température moyenne annuelle (Figure 3), les Hautes Terres centrales, Antananarivo et Fianarantsoa, restent les plus froides avec une température moyenne variant entre 15°C et 20°C. Les zones les plus chaudes sont celles situées sur la bordure Ouest de Madagascar (Morondava, Mahajanga). La température moyenne annuelle y varie de 25°C à 28°C.

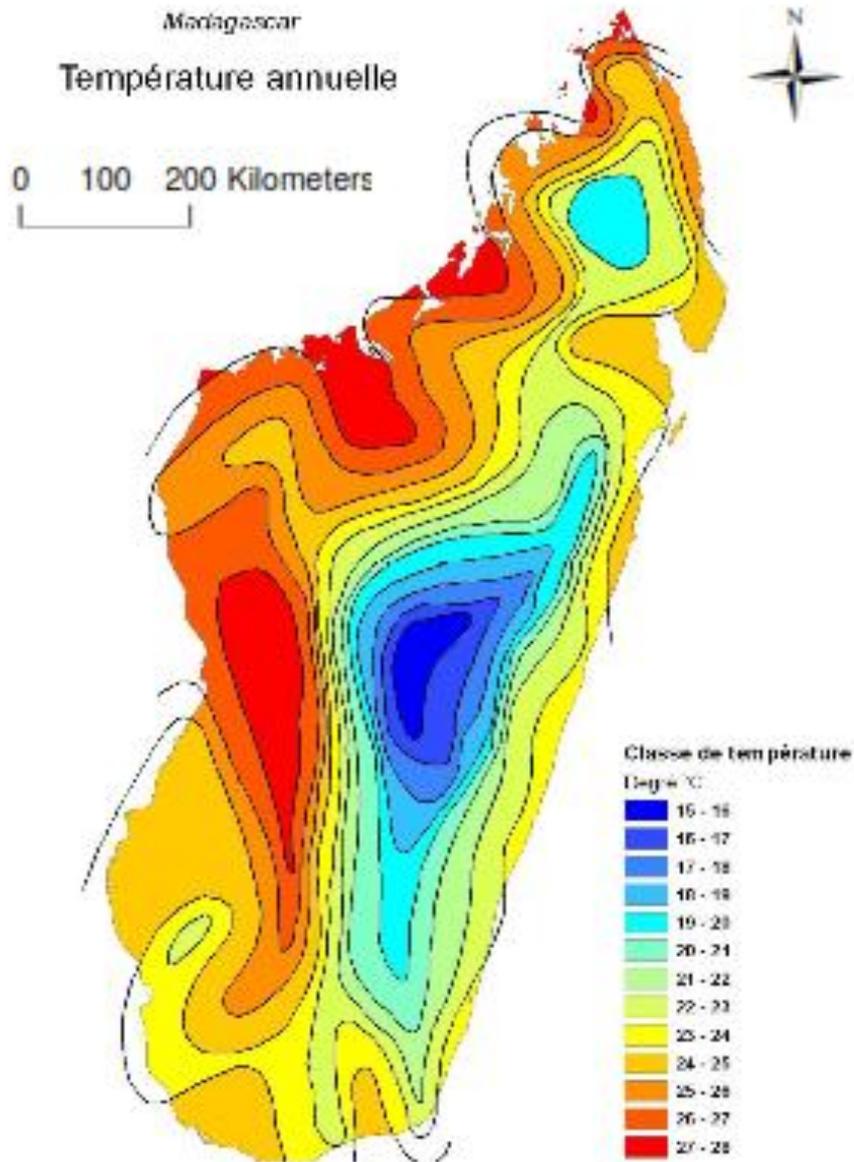


Figure 3: Carte de la classe de température moyenne de Madagascar (Raunet, 1997)

### **I.3. Les sols de Madagascar**

Plusieurs critères ont été utilisés par divers auteurs pour la classification des différents types de sol de Madagascar.

#### **I.3.1. Selon l'origine du sol**

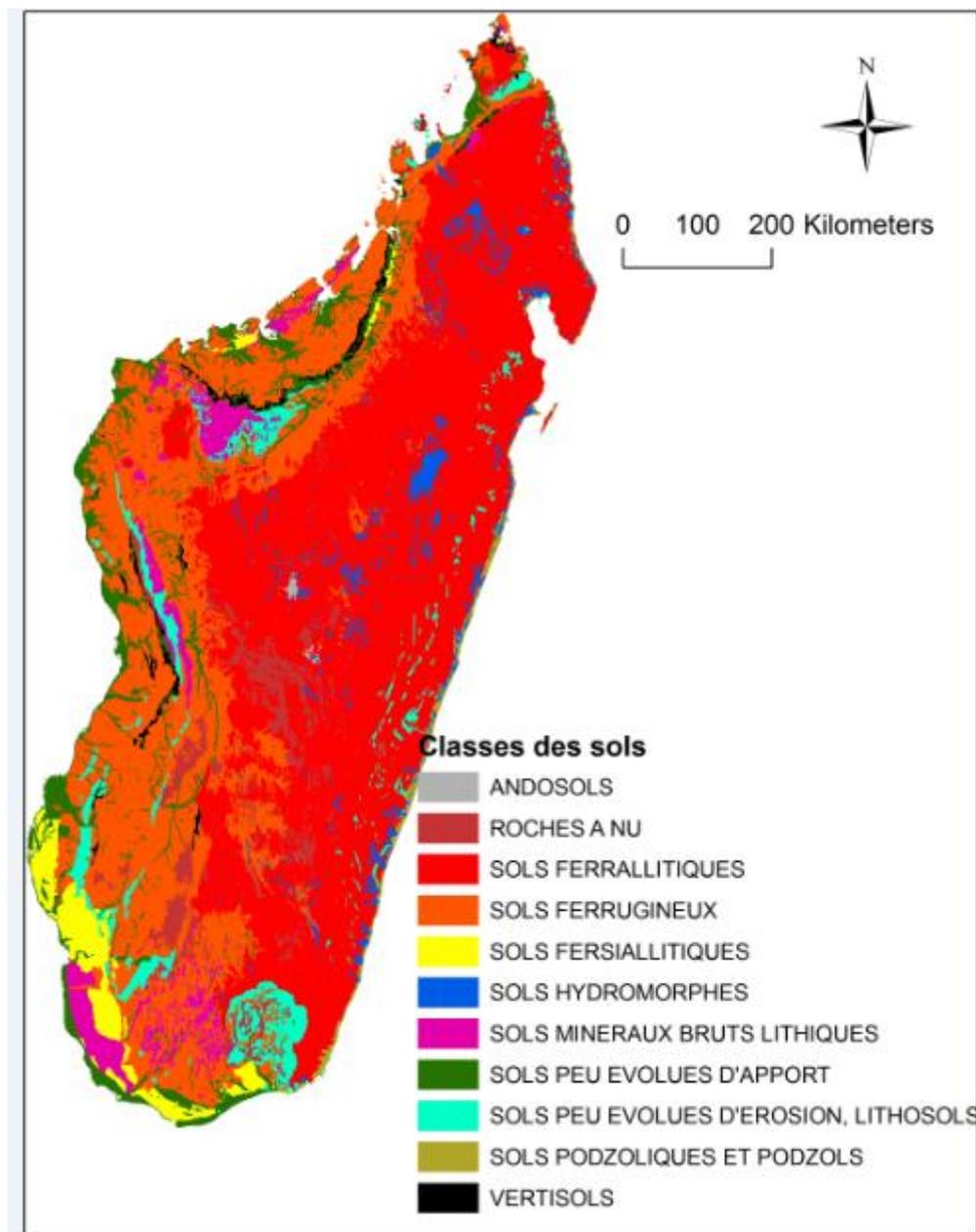
D'après Segalen (1956), les sols de Madagascar se divisent en 2 grands groupes, d'après leurs origines:

- ❖ **Les sols autochtones** qui sont des argiles latéritiques formées à partir des roches métamorphiques et éruptives. Ils se situent sur les zones des Hautes Terres et sur les plateaux (Tampoketsa et Ihorombe), ainsi que dans la partie Est de l'île. Certains sols, notamment dans la région de l'Itasy, proviennent de produits volcaniques récents, leur donnant une couleur brun sombre.
- ❖ **Les sols allochtones**, présentant des caractères argilo-sableux comme les sols alluviaux. Leurs remaniements constant par les eaux et le vent les font déplacer assez loin des roches mères qui leurs ont donné naissance. Ils se localisent essentiellement dans la partie Sud et Ouest de l'île.

#### **I.3.2. Selon la classification française des sols (CPCS)**

La classification CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 1967) est basée sur la description des processus de pédogénèse et les caractères des profils (Duchaufour *et al.*, 1998). Elle a été largement utilisée pour la classification des sols tropicaux et intertropicaux.

D'après la figure 4, deux grandes classes de sol prédominent en termes de surface (voir annexe 1) : les sols ferrallitiques qui occupent près de la moitié de la superficie de Madagascar et les sols ferrugineux qui longent plutôt le versant Ouest et Sud-Ouest de l'île. Les sols hydromorphes, localisés sur les bas-fonds, sont éparpillés dans divers endroits. Les sols fersiallitiques se rencontrent notamment dans la partie Sud-Ouest et les podzols le long de la côte-Est de Madagascar.



**Figure 2: Carte pédologique de Madagascar selon la classification CPCS (Dellene et Pelletier, 1981)**

Les paragraphes ci-après présentent les caractéristiques respectives des deux principales classes de sol de Madagascar, compte tenu de leur superficie, les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux.

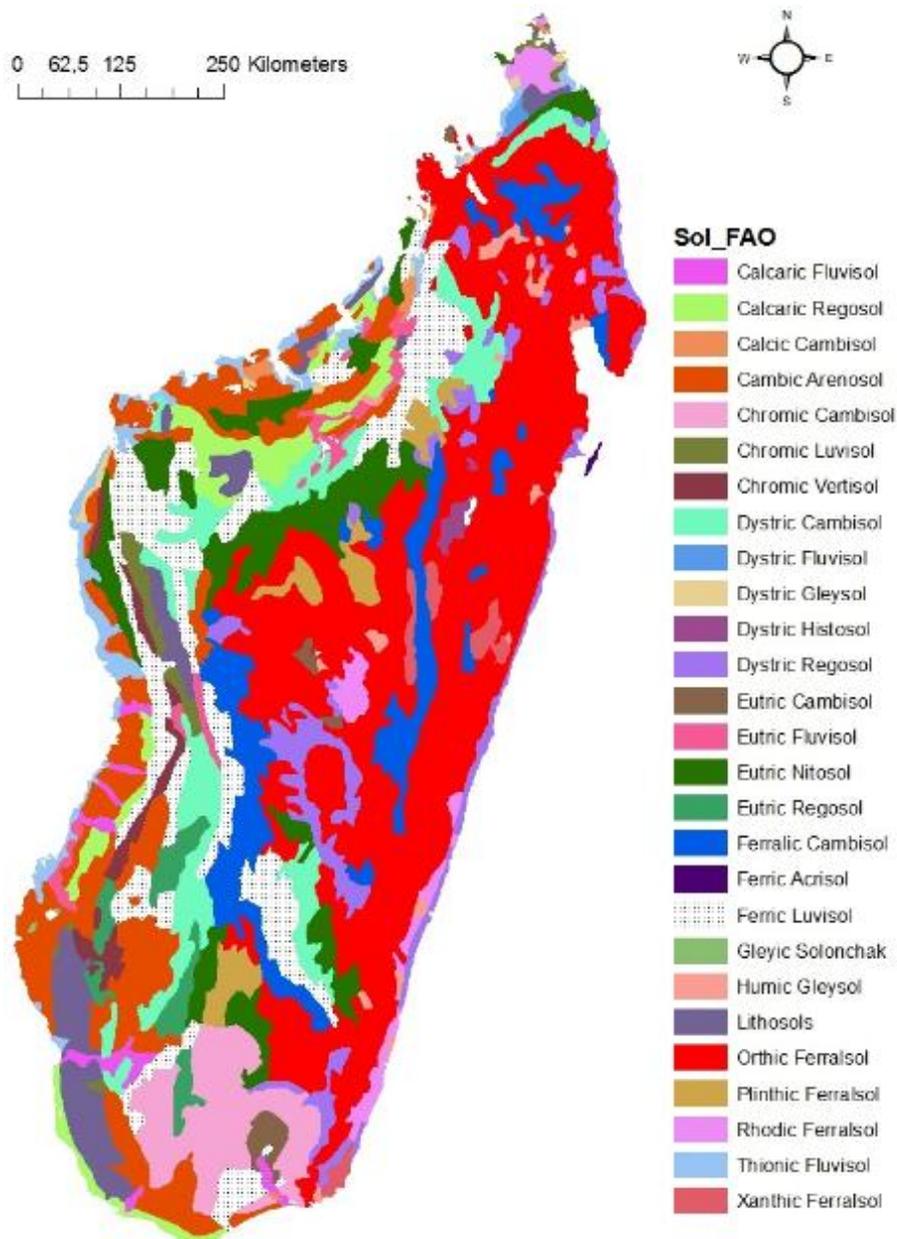
Anciennement dénommés sols latéritiques, les sols ferrallitiques ont été étudiés depuis 1807 par Buchanan, un géographe qui avait parcouru les Indes quelques années plus tôt. Il proposa le terme de «latérite » pour désigner une masse terreuse rouge, qui durcit à l'air et peut être utilisée comme matériaux de construction. Les prospections faites depuis un siècle et demi ont montré

que ce type de sol existe dans de nombreux pays, essentiellement en zones tropicales et équatoriales (Aubert, 1955). Les sols ferrallitiques sont des sols complexes (Riquier et Bourgeat, 1966), caractérisés par la dominance de kaolinite, d'hydroxydes d'alumine et d'oxydes de fer. On peut distinguer les sols ferrallitiques brun-jaunes et les sols ferrallitiques brun-rouges. Les premiers se développent sur les surfaces d'aplanissement généralement plus riche en goéthite, caractéristiques des régions humides des Hautes Terres et de la Côte Est. Les seconds sont formés à partir des glacis d'érosion quaternaire, qui correspondent à une évolution très poussée et récente du relief. Ils se situent essentiellement sur la bordure occidentale des Hautes Terres et dans le Moyen-Ouest. Ces derniers, d'âge quaternaire, ont une zone d'altération moins profonde. Ils sont plus riches en minéraux primaires, généralement en hématites et sont composés de fer amorphe non cristallisé (Herbillon et Nahon, 1988 ; cité par Rabeharisoa, 2004). L'accumulation de la matière organique est parfois importante (Segalen, 1956). Ce sont des sols à profil A(B)C ou ABC (Aubert, 1959).

Les sols ferrugineux sont caractérisés par la libération en quantité importante d'oxydes ou hydroxydes de fer, sans alumine. On distingue les sols ferrugineux tropicaux typiques qui sont les plus répandus. Ils dérivent de sables, de grès, de calcaires ou de basaltes (Segalen, 1956). Ce sont des sols rouges ou jaunes, d'une épaisseur variant entre 2 et 10 m. Leur texture est variable : une texture sableuse ou sablo-argileuse sur sables et sur grès, une texture argilo-limoneuse sur calcaire et sur basalte (Segalen, 1956). Ensuite, il y a également les sols ferrugineux lessivés qui dérivent de matériaux assez perméables comme le grès ou le sable. Les horizons A sont bien individualisés et épais de 20 à 30 cm. Enfin, il existe des sols ferrugineux tropicaux cuirassés, caractérisés par la présence d'une cuirasse. Elle se situe en général à 2- 3m de profondeur et est très riche en hydroxydes de fer. Parfois, elle peut affleurer en surface suite à l'action érosive des pluies. Leur degré de fertilité est variable et certains sont adaptés aux cultures d'arachide et de légumineuses. En culture irriguée, ils sont favorables aux cultures de coton.

### **I.3.3.Selon la classification FAO des sols**

Une classification fréquemment utilisée dans les communications internationales, la classification FAO des sols (IUSS, 2006) est basée sur l'origine « génétique » des sols, c'est-à-dire sur les processus à l'origine de leur genèse à partir des matériaux parentaux, des formes des reliefs... Les sols sont divisés en « groupes », qui sont définis soit par des horizons ou des propriétés diagnostiques.



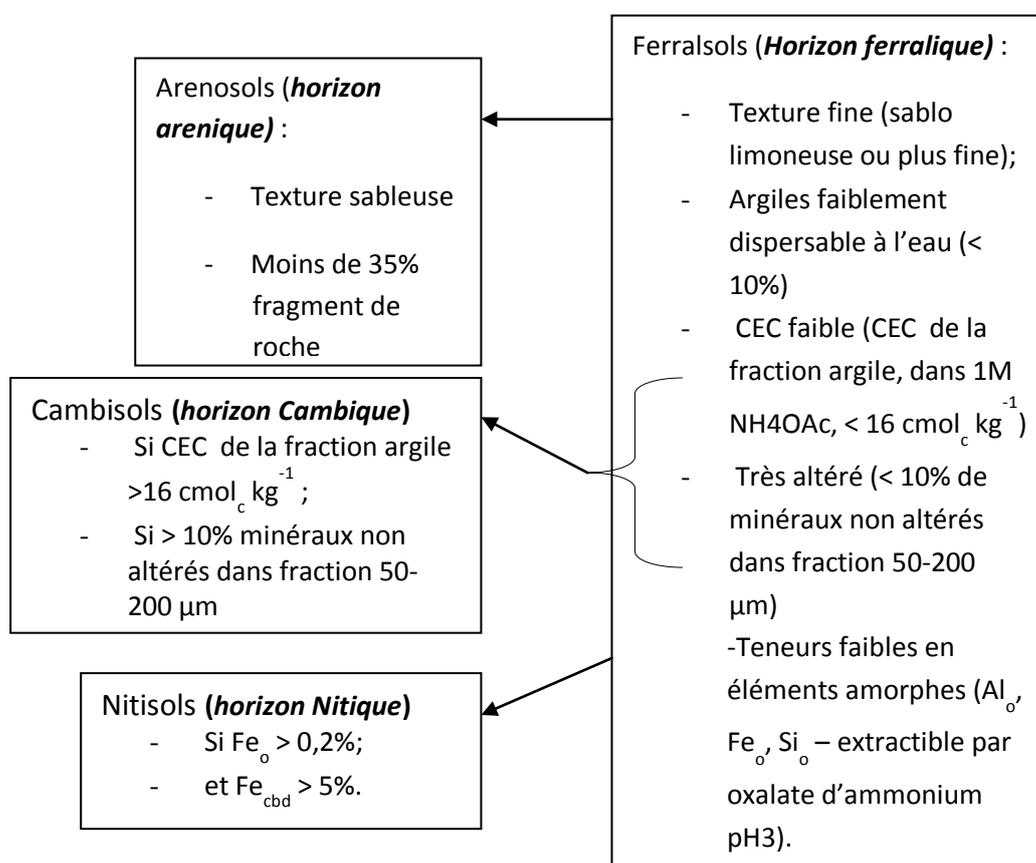
**Figure 5: Carte pédologique de Madagascar selon la classification FAO (FAO, 1974)**

Globalement, les sols ferrallitiques de la classification CPCS correspondent aux Ferralsols, Cambisols et Nitisols de la classification FAO. Les sols ferrugineux et les sols fersiallitiques réunissent les Luvisols et les Arenosols (Razafimahatratra, 2011). Dans certains cas bien définis, les Arenosols pourront être classés comme des sols minéraux bruts.

Les Ferralsols sont caractérisés par la présence d'un horizon ferrallique entre 25 et 200 cm, présentant une teneur de 10% ou plus d'argile dispersable dans l'eau, et une capacité d'échange cationique (à pH 7) inférieure ou égale à  $16 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  d'argile. Les Nitisols se distinguent par la présence d'un horizon nitique sur les 100 premiers centimètres. L'horizon nitique est un horizon subsuperficiel riche en argile dont le caractère principal est une structure polyédrique ou nuciforme, modérément à fortement développée, avec de nombreuses faces de peds brillantes,

qui ne peuvent pas être, ou seulement partiellement, attribuées à une illuviation d'argile. Les Cambisols sont caractérisés par un horizon cambique qui est un horizon subsuperficiel manifestant encore des marques d'altération par rapport aux horizons sous-jacents, avec un taux de saturation en bases inférieure à 50%. Les Arenosols sont surtout connus par leur texture sableuse au moins jusqu'à 100 cm de profondeur. Les Luvisols sont caractérisés par la présence d'un horizon argique qui est un horizon subsuperficiel ayant une teneur en argile nettement plus élevée que l'horizon sus-jacent et ayant une capacité d'échange cationique supérieure ou égale à  $24 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  d'argile.

Les relations ou les limites entre ces divers groupes de sol très altérés sont synthétisées dans la Figure 6.



**Figure 6: Relation entre les Ferralsols, les Cambisols, les Nitisols et les Arenosols.**

Géographiquement, les Ferralsols et les Cambisols se distribuent sur les Hautes Terres et la partie Est de l'île (Figure 5). Les Nitisols sont localisés sur les côtes ouest. Les Arenosols et les Luvisols se répartissent dans la zone du sud-ouest, ouest et nord de Madagascar.

Le sol est composé de divers éléments : des constituants organiques provenant des matières végétales et animales en décomposition et des particules minérales comme le sable, l'argile, les

pierres ou encore les graviers émanant de la roche mère. A l'état naturel, ces éléments constitutifs du sol déterminent sa fertilité. Pour la présente étude, nous avons choisi de traiter uniquement le C et le P total du sol, du fait de leur importance en agriculture et leur impact sur l'environnement.

## **I.4.Le carbone et le phosphore dans le sol**

Généralement, la performance des activités agricoles est souvent liée à l'état de fertilité des sols. Dans les sols naturels, la fertilité est largement dépendante de la matière organique (MO). Lors de sa minéralisation, elle libère des éléments nutritifs, comme le phosphore, le potassium, l'azote... et du CO<sub>2</sub> gazeux, émis vers l'atmosphère. Chaque élément nutritif libéré joue un rôle capital vis-à-vis de la croissance des plantes, les éléments majeurs comme le phosphore, le potassium, l'azote étant les plus exigés. En tant que premier élément constitutif des MO, le C joue également un rôle primordial sur l'environnement, à travers l'émission dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub>, le principal gaz à effet de serre. A Madagascar, la majorité des sols est constituée par des sols ferrallitiques acides et pauvres en matière organique. Afin d'assurer une bonne croissance des plantes, ces sols ont besoins de fertilisants supplémentaires (FAO, 2005). Longtemps indiqué, avec l'azote, comme le principal facteur limitant d'un bon développement des plantes, le P a une importance particulière sur la production agricole à Madagascar du fait de sa faible disponibilité dans les sols ferrallitiques (Rabeharisoa, 2004).

### **I.4.1.Les matières organiques et le carbone du sol**

La matière organique, qui peut parfois être conservée dans le sol pendant des siècles, voire des millénaires (Martel et Paul, 1974 ; Anderson et Paul, 1984 ; Jenkinson *et al.*, 1992, Corbeels, 2006), est constituée essentiellement par des substances carbonées.

#### ***I.4.1.1.Le cycle de la matière organique et du carbone dans le sol***

La matière organique désigne tout produit issu des organismes vivants, animal ou végétal, retourné au sol qui se décompose selon différents processus biologiques et chimiques (Kone *et al.*, 2008).

Selon McCauley *et al.* (2009), le cycle de la matière organique du sol est régulé par quatre procédés différents, réalisés essentiellement par les microorganismes du sol (Figure 7) :

- la décomposition des résidus organiques ;
- la minéralisation ;
- le transfert des éléments carbonés d'un pool de matière organique vers un autre ;
- la libération de dioxyde de carbone par le biais de la respiration et de l'oxydation.

La décomposition est un processus biologique combinant des transformations physiques et biochimiques qui réduisent les molécules organiques complexes des débris végétaux ou animaux en des produits ou molécules simples organiques et inorganiques (Juma, 1998). Les matières organiques peuvent être au-dessus (résidus de plante et d'animaux) ou au sein du sol (faune, microflore, plantes et animaux semi décomposés et substances humiques). Les résidus de plante comportent 60-90% d'eau et les matières sèches sont composées de C, H, S, N, P, K, Ca et Mg, qui sont des éléments importants dans la vie des plantes (Bot et Bentes, 2005). Ces résidus végétaux sont constitués par plusieurs composés complexes de carbone (cellulose, hémicellulose, etc). Ces chaînes de carbone correspondent à l'association de molécules simples, des sucres simples, des acides aminés et d'autres molécules plus complexes telles que des acides gras, formant de longues chaînes de carbone. La quantité de matière organique dans le sol dépend de la quantité apportée au sol et de sa vitesse de décomposition, ainsi que des pertes éventuellement occasionnées par la lixiviation et l'érosion (McCauley 2009).

Pour le carbone, dès lors que les molécules organiques ne font plus partie d'un organisme vivant (déjections ou cadavres), elles retournent au sol et vont évoluer sous diverses formes en fonction des conditions pédoclimatiques locales. Les possibilités d'évolution peuvent être regroupées dans trois tendances : minéralisation, humification et accumulation (Figure 8). La minéralisation est la décomposition des molécules organiques sous des formes simples, gazeuses ou solubles, qui sont émis vers l'atmosphère (CO<sub>2</sub>) ou servent de nutriments pour les microorganismes et les plantes mais peuvent également subir des phénomènes de lixiviation. L'humification est ici définie comme une réorganisation de la matière organique par l'activité microbienne, sous des formes insolubles pouvant être à nouveau minéralisées, après des temps de résidence plus ou moins long, atteignant des dizaines ou des centaines d'années dans certains cas. L'accumulation concerne les matières organiques qui échappent à l'activité biologique, c'est-à-dire qui ne sont ni minéralisées, ni humifiées ; elles alimentent un cycle géologique (tourbe, charbon, ...) mais ne participent pas à la fertilité du sol. Ces trois phénomènes existent dans tous les sols mais dans des proportions très variables. L'accumulation ou l'humification importante de la matière organique contribue à son stockage dans les sols alors que sa minéralisation limite ce processus. Les cycles des matières organiques et du carbone du sol sont présentés dans les Figures 7 et 8.

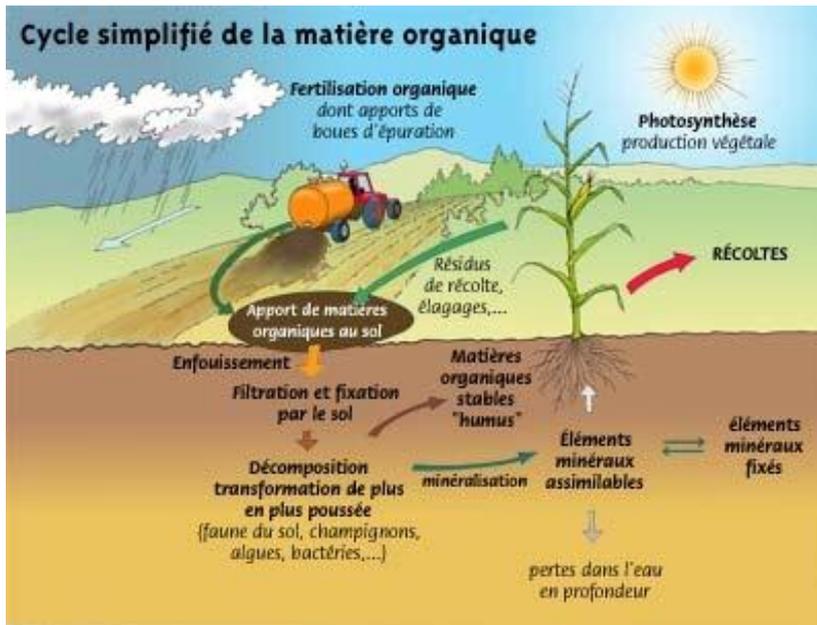


Figure 7: Cycle de la matière organique (Mc Cauley *et al.*, 2009)

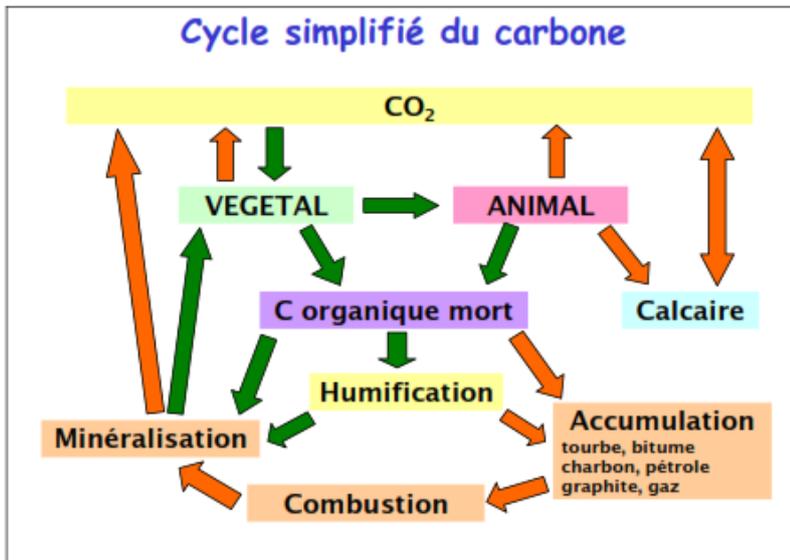


Figure 8: Cycle du Carbone (Massenot, 2008)

#### 1.4.1.2. Les rôles des matières organiques et du carbone du sol

D'après Feller et Beare (1997), la matière organique du sol (MOS) assure une fonction importante dans la détermination de la fertilité et de la productivité des sols. Elle joue des rôles essentiels sur la physique du sol à travers la structure, sur la chimie du sol en agissant au niveau du cycle de la nutrition minérale des plantes et sur la biologie du sol en intervenant d'une manière directe ou indirecte sur les activités biologiques du sol (Balesdent, 1996). Leur protection est considérée comme un facteur critique pour la stabilité des sols tropicaux et subtropicaux très altérés (Feller et Beare, 1997 ; Balesdent *et al.*, 2000).

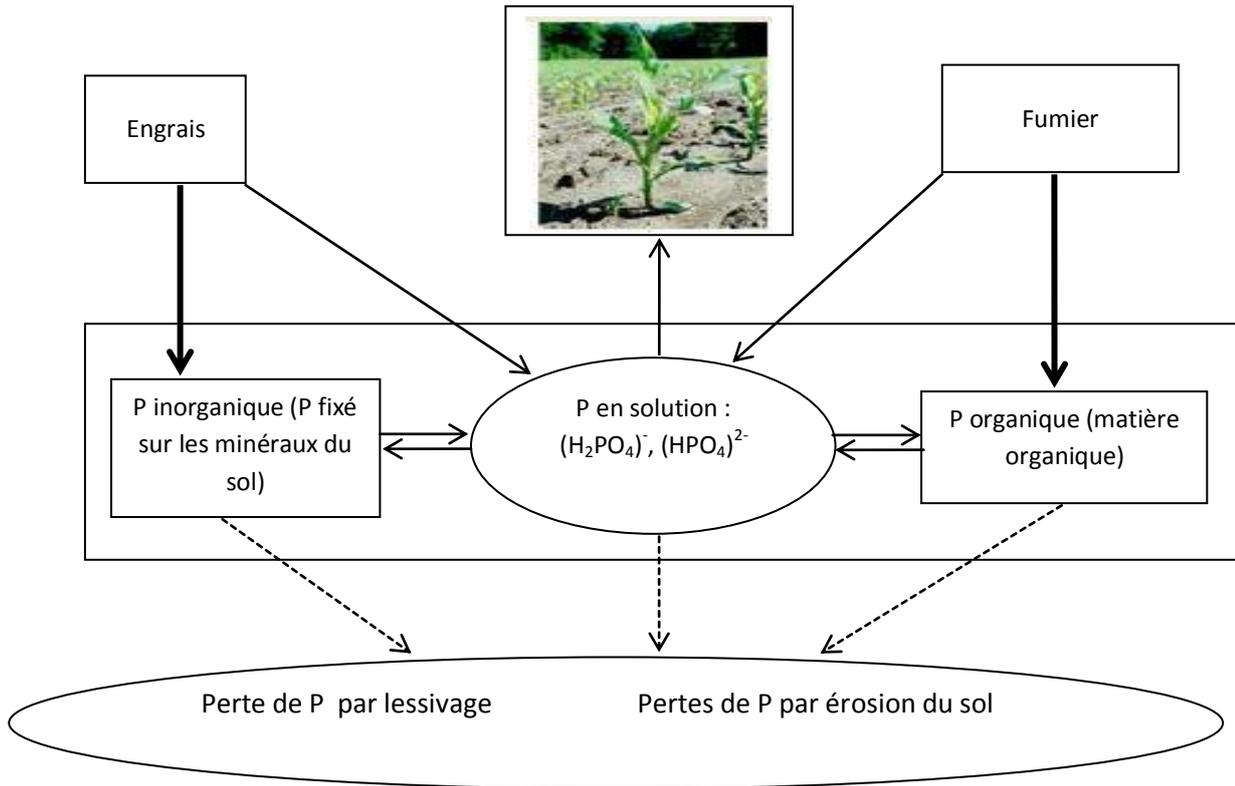
## **I.4.2. Le phosphore du sol**

Le phosphore a été découvert en 1669 par le chimiste allemand Hennig Brand. Il est classé comme le onzième élément le plus abondant parmi les éléments de la croûte terrestre (0,12%) (Encyclopédie, 2010 et Wikipédia). Les roches mères constituent les premières sources de P des sols. Dans les roches, le P est essentiellement présent dans des minéraux comme l'apatite :  $\text{Ca}_5(\text{HPO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ . Pour le cas des sols cultivés, les quantités d'engrais phosphatés apportés s'ajoutent à celles déjà existant initialement dans le sol. La teneur en P du sol est de l'ordre de 0,02 à 3% alors que dans les végétaux, elle varie de 0,1 à 0,4% (Andriamaniraka, 2009).

### ***I.4.2.1. Le cycle du phosphore du sol***

Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel de la nutrition minérale des plantes au même titre que l'azote et le potassium. Il est toutefois un élément nutritif critique des plantes à cause de sa faible concentration dans le sol (teneur moyenne de 600 ppm de P total) et, surtout de sa faible solubilité (teneurs de 0,05 mgP.L<sup>-1</sup> de solution) du sol, pour les sols ferrallitiques sur dépôts fluviolacustres à 0,005 mgP.L<sup>-1</sup>, pour les sols ferrallitiques sur socle cristallin, selon Rabeharisoa (2004). Le phosphore existe dans le sol sous des formes inorganiques et organiques. Les formes inorganiques sont associées à des composés amorphes ou cristallins d'aluminium et de fer dans les sols acides et à des composés de calcium dans les sols alcalins. Les formes de P organique sont associées à la matière organique du sol.

Des échanges continus ont lieu entre les différentes formes de phosphore dans le sol (figure 9). Les plantes absorbent du phosphore dissous dans la solution du sol. Ces prélèvements de phosphore par les plantes diminuent le phosphore dissous dans la solution du sol. Cette réduction de phosphore est accentuée par sa fixation sur les fines particules minérales du sol et par son utilisation dans les activités microbiennes. La baisse de la concentration du phosphore dans la solution du sol déclenche la désorption du phosphore fixé sur les constituants minéraux au profit de la solution du sol. En outre, la minéralisation des résidus végétaux sous l'effet de l'activité microbienne augmente la teneur du sol en phosphore assimilable (phosphore labile et phosphore dissous). Toutes les formes de phosphore peuvent aussi être modifiées par l'apport d'engrais phosphatés ou de fumiers. Les processus d'érosion du sol et de lessivage peuvent entraîner une diminution de toutes les formes de phosphore dans le sol. Mais la lixiviation de phosphore est quasi inexistante dans les sols tropicaux.



**Figure 9: Cycle du phosphore (d'après Karemangingo, 2004)**

#### ***1.4.2.2. Les rôles du phosphore dans l'agriculture et son impact dans l'environnement.***

Le phosphore joue un rôle essentiel chez les végétaux dans le stockage de l'énergie et sa cession aux cellules lorsque celles-ci en ont besoin. Ce processus se fait au moyen de molécules organiques complexes appelées ADP (adénosine diphosphate) et ATP (adénosine triphosphate). Ces deux composés sont formés et régénérés en présence d'une quantité suffisante de phosphore. Le phosphore est également un composant structural important des acides nucléiques, ADN (acide désoxyribonucléique) et ARN (acide ribonucléique), de coenzymes, des phosphoprotéines, des phospholipides et des glycérophosphates.

Un apport adéquat de phosphore est donc important aux premiers stades de la croissance des plantes et lors du développement des organes reproductifs. Le phosphore est nécessaire à la prolifération des racines et à la maturation hâtive des fruits, particulièrement des céréales. Les graines et les fruits renferment de grandes quantités de phosphore. Un apport approprié de phosphore améliore la qualité de certains fruits, des fourrages et des cultures légumières. Le phosphore augmente aussi la résistance des plantes au froid, aux maladies et aux conditions de croissance défavorables. Le phosphore est mobile dans les plantes. En cas de carence, le

phosphore se déplace des tissus âgés vers les tissus jeunes et plus actifs. La décoloration pourpre des feuilles ou du bord des feuilles est un symptôme commun de carence en phosphore.

Mais comment le phosphore devient-il un problème environnemental ? Le phosphore n'est pas toxique pour les plantes. Les apports d'engrais phosphatés sont généralement effectués en quantités supérieures aux prélèvements de la plante, en particulier dans les pays développés. Une petite fraction du phosphore disponible dans le sol est ainsi absorbée par les plantes. La quantité de phosphore qui reste dans le sol, par opposition à celle qui est prélevée, est appelée phosphore résiduel. Le phosphore résiduel contribue à augmenter le niveau de phosphore du sol, notamment la fraction de phosphore disponible dans la couche arable du sol.

En conditions favorables à l'érosion du sol, le phosphore fixé aux particules de sol peut être transporté jusqu'aux cours d'eau, où il contribue à l'enrichissement des eaux de surface en phosphore. Le phénomène d'enrichissement de l'eau en phosphore est aussi appelé eutrophisation de l'eau. Elle provoque une prolifération des plantes aquatiques. A leur mort, leur décomposition consomme l'oxygène dissous de l'eau, ce qui nuit au développement des organismes aquatiques aérobies (poissons, plantes, larves d'insectes, phytoplancton...).

# **MATERIELS ET METHODES**

## Partie II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

### II.1.Problématique

Dans le monde, la croissance démographique galopante et les difficultés pour intensifier l'utilisation des terres agricoles obligent les agriculteurs à se déplacer et à exploiter d'autres territoires vierges pour de nouvelles terres agricoles (FAO, 2005).

A Madagascar, les activités agricoles ont encore un poids considérable sur l'économie nationale. Cette situation est largement justifiée, sachant que près de 75% de la population vit en milieu rural et œuvre dans les activités agricoles. La riziculture se trouve en tête sur la priorisation des cultures pratiquées. De préférence, les paysans exploitent les zones de bas fond pour le riz et les zones de *tanety* ou sols de colline pour les cultures vivrières comme le manioc ou encore le maïs. Traditionnellement, la restauration de la fertilité de ces sols était assurée par des jachères assez longues entre les périodes de cultures vivrières. Pourtant, les zones de bas fond ne sont plus suffisantes pour répondre aux besoins de la population, notamment en riz. Ainsi, l'exploitation des zones de *tanety* est devenue une option incontournable pour les paysans. Cette utilisation accrue de ces zones ne permet plus de maintenir des jachères de longue durée. Pour faire face à ces contraintes, les agriculteurs doivent optimiser la production par une meilleure gestion de la fertilité du sol. En effet, la gestion de l'occupation des sols influe sur leurs capacités à constituer à la fois une source de nutriments et un puits de matière organique avec une capacité de stockage de la MO permettant un maintien de la fertilité des sols. Cette gestion de la fertilité requière une certaine connaissance de l'état initial des différents éléments impliqués dans le maintien de la fertilité des sols et dans la nutrition des plantes, notamment les ressources en C et P.

Pour les terres non ou peu anthropisées, ce qui est le cas pour la présente étude, l'évaluation de la fertilité initiale ou l'analyse de certains éléments, notamment du C et du P total du sol, vont contribuer au choix des cultures à pratiquer et à la formulation du mode de gestion des sols. D'une part, le C du sol, qui outre son rôle majeur dans le phénomène relatif à l'effet de serre et au changement climatique, constitue un élément clé de la structuration et de la fertilité des sols (Razafimbelo, 2008). D'autre part, le processus de pédogénèse explique que le P du sol a été hérité de celui de la roche mère. La problématique liée au P reste encore un sujet d'actualité dans la production agricole à Madagascar. En effet d'après Rabeharisoa (2004), les sols malgaches, particulièrement les Ferralsols sont riches en P mais sous forme non assimilable pour la plante. Par conséquent, il devient un facteur limitant pour l'obtention d'un rendement élevé. Rappelons que le P contrôle les échanges d'énergie, favorise la croissance et la reproduction chez les plantes.

Par ailleurs, les facteurs « climats et roches mères » peuvent jouer des rôles importants dans la dynamique du C et du P dans le sol. En conditions naturelles, le principal facteur affectant la teneur en MOS est le climat, plus particulièrement la température et les précipitations (Jenny, 1986). Le climat agit également sur le processus d'altération des roches dans le sol. L'augmentation de la pluviosité et de la température a des impacts sur l'altération des roches et sur la quantité d'argile néoformée (Alvarez et Lavado, 1998). Ce contexte nous a conduits à poser la question suivante: *quels sont les principaux facteurs expliquant la variabilité spatiale de la teneur en C et en P des différents groupes de sol de Madagascar ?*

## **II.2.Hypothèses**

Afin de répondre au questionnement susmentionné, notre étude se propose de vérifier les trois hypothèses suivantes:

➤ **Hypothèse1 : Les stocks de C et de P total varient en fonction du type de sol.**

La variation de la teneur en C du sol peut être due à divers facteurs. D'après Feller *et al.* (1997), les stocks de C organique sont corrélés positivement à la teneur en argile et en limon fin des sols. Les propriétés physiques des différents groupes de sol influenceront ainsi leurs teneurs en C. Une étude comparative de la teneur en C de ces groupes de sol permettra de vérifier cette première hypothèse.

➤ **Hypothèse 2 : La température et la pluviosité sont les variables climatiques qui affectent le niveau de la teneur en C du sol.**

Le niveau de restitution de biomasse, source de MO, est lié à la pluviosité. La production primaire reste plus importante dans des zones humides. Le taux de minéralisation du C organique du sol dépend de la température (Kirschbaum, 1995 cité par Ralaizafiarisoa, 2012). Une étude de la relation entre ces variables climatiques et la teneur en C du sol permettra de vérifier cette hypothèse.

➤ **Hypothèse 3: La nature des roches mères détermine la richesse en P des différents groupes de sol.**

A l'état naturel, la roche mère reste la seule source de P du sol. Pour le cas des terres cultivées, des apports supplémentaires en engrais phosphatés permettent d'augmenter la teneur en P du sol. Cette hypothèse sera vérifiée en analysant les relations entre la nature des roches mères et la teneur en P du sol.

### **II.3.Objectifs**

Le principal objectif de cette étude est d'étudier la variabilité de la teneur en C et en P total des différents groupes de sol de Madagascar, en appréhendant leurs relations avec les variables climatiques et la nature des roches mères.

Pour ce faire, 3 objectifs spécifiques ont été retenus :

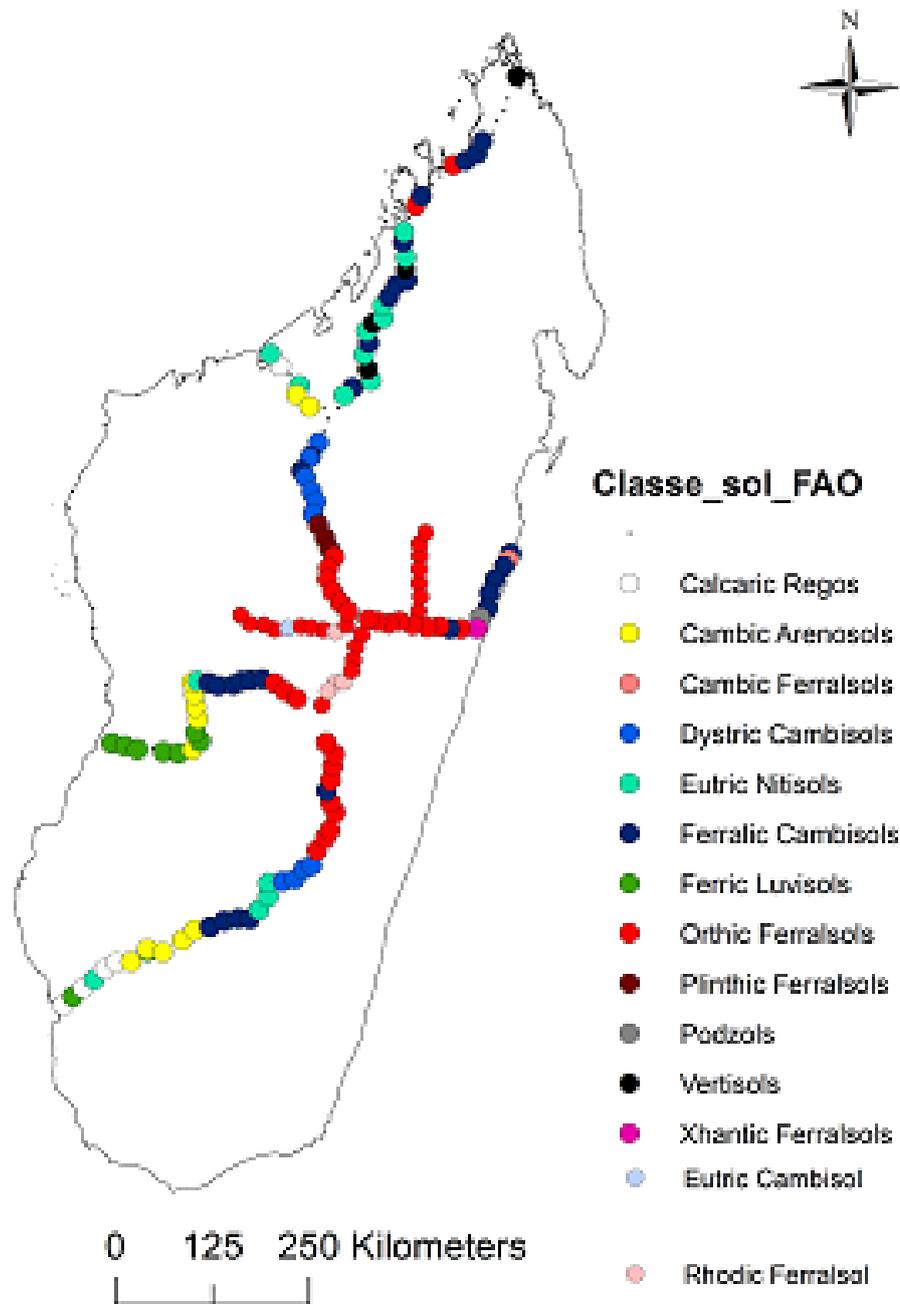
- Quantifier la teneur en C et en P total des groupes de sol étudiés ;
- Analyser les corrélations entre la température, la pluviosité et la teneur en C et en P ;
- Etudier la variation de la teneur en P total en fonction du type de roche mère.

### **II.4.Méthodologies**

#### **II.4.1.Sites de prélèvements**

Les échantillons utilisés pour le présent travail proviennent de deux études différentes : des échantillons prélevés dans le cadre de la thèse de doctorat de Razafimahatratra (2011) et d'autres échantillons prélevés dans le cadre de ce DEA et d'une autre thèse de doctorat initiée en 2012 et qui est focalisée sur les sols ferrallitiques. Tous les échantillons ont été prélevés aux abords des routes nationales reliant : Antananarivo-Majunga (RN4), Tamatave (RN2), Tuléar (RN7), Tsiroanomandidy (RN1), Morondava (RN34), Moramanga-Ambatondrazaka (RN44), Ambondromamy-Diégo (RN6). (Figure 10).

Chaque site de prélèvement sont placés à une distance d'environ 20 km les uns des autres. Ces prélèvements systématiques le long des axes routiers a permis de collecter les différents groupes de sol de Madagascar. Ils permettent également de prendre en compte au maximum les différents gradients de température et de pluviosité. Au total, le nombre de site s'élève à 142. Les prélèvements ont été réalisés sur des zones de *tanety*, non encore cultivées. Les détails concernant les informations sur les échantillons se trouvent en annexe 3. Pour des raisons techniques liées à l'utilisation de l'appareil de prélèvement, les zones de bas fond ont été exclues de la campagne de prélèvement.



**Figure 10: Carte de localisation des sites de prélèvement**

#### **II.4.2.Echantillonnage**

Les endroits retenus pour les prélèvements sont des endroits représentatifs du paysage local pour chaque site. Pour le cas des terrains en pente, les prélèvements étaient réalisés au 1/3 ou 2/3 du flanc de la colline. Les prélèvements ont été faits sur un carré de 100m<sup>2</sup> dont les 4 extrémités constituent les points de répétition. Les profondeurs de prélèvement sont les suivants: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 50-60 cm et 80-90 cm. Deux types de prélèvements

ont été effectués: un prélèvement au cylindre pour la mesure de la densité apparente, et des prélèvements à la tarière pour effectuer les analyses de C organique et P total. Des échantillons composites ont été préparés en mélangeant les échantillons des 4 répétitions pour chacune des profondeurs considérées.

Le tableau 1 ci-après montre le nombre de site de prélèvement par groupe de sol selon la classification CPCS et leur correspondance avec la classification FAO des sols.

**Tableau 1: Groupes de sols et nombre de sites de prélèvement**

Groupe de sol FAO	Classe de sol CPCS	Nombre de site	Superficie de chaque type de sol (km <sup>2</sup> ) selon FAO
Ferralsols	Sols ferrallitiques typiques	61	209 104 069
Cambisols	Sols faiblement ferrallitiques	38	106 317 440
Nitisols	Sols ferrallitiques rajeunis	19	39 597 850
Arenosols	Sols ferrugineux non lessivé	11	57 502 344
Luvisols	Sols ferrugineux lessivé	9	60 083 661
Vertisols	Vertisols	4	7 146 038
<b>Total</b>		<b>142</b>	

Les Ferralsols, les Cambisols et les Nitisols, qui font partie des sols ferrallitiques de la classification CPCS, ont le nombre de site le plus élevé (118) : suivis par les Arenosols et les Luvisols (sols ferrugineux) avec 20 sites.

### **II.4.3.Méthodes d'analyse**

Les analyses ont été effectuées sur les échantillons de surface 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. L'horizon 0-30 cm est considéré comme la couche de référence par le GIEC (Groupe

d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour suivre l'évolution des stocks de C des sols (IPCC, 2007). Cette même couche a été utilisée pour estimer les stocks de P.

La détermination des stocks de C et P des sols nécessite de déterminer la densité apparente (DA) du sol et d'analyser les teneurs en C organique et en P total des sols. Avant de procéder aux analyses, les échantillons préalablement tamisés à 2 mm sont broyés à 0,2 mm. Ils sont séchés à l'étuve à 105°C durant 48 heures avant analyse pour éliminer l'eau résiduelle.

#### ***II.4.3.1. Mesure de la densité apparente (DA)***

La DA est le rapport entre le poids sec total et le volume des échantillons, exprimé en  $\text{g.cm}^{-3}$ . Un cylindre métallique de 508  $\text{cm}^3$  de volume a été utilisé durant le prélèvement, une seule répétition par horizon a été prélevé sur trois profondeurs : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm. Après pesage à l'état humide, une partie (aliquote) de chaque échantillon a été collectée pour pouvoir calculer l'humidité du sol. Au laboratoire, ces aliquotes ont été passées à l'étuve à 105°C durant 48 heures afin de déterminer l'humidité pondérale. La masse de sol sec a ensuite été calculée et la DA est déterminée en divisant la masse de sol sec totale par le volume du cylindre de collecte.

Le mode de calcul pour la densité apparente est la suivante :

$$\text{DA (g.cm}^{-3}\text{)} = \text{Poids sec (g)} / \text{Volume de la cylindre (cm}^{-3}\text{)} \quad (\text{équation 1})$$

#### ***II.4.3.2. Dosage du carbone organique***

La méthode Walkley & Black (1934) a été utilisée pour le dosage de la teneur en C organique. Cette méthode consiste à faire une attaque du carbone par une oxydation au bichromate de potassium  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  1N en milieu acide, en utilisant une solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5N. Ensuite, l'excès de bichromate est titré avec le sel de Mohr à l'aide du «Titrateur Crisson » (voir annexe 4). La fin de la titration est déterminée électriquement par une électrode redox combinée, réglée sur le point final du couple  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  à 770 mV.

Le mode de calcul pour la teneur en C organique est la suivante :

$$\text{C}\% = (\text{Vt} - \text{Vs}) * 19,5 / \text{Vt} / \rho \quad (\text{équation 2})$$

Avec : C‰ : Poids de carbone en g pour 1000 de terre

V<sub>t</sub> : Volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour le témoin

V<sub>s</sub> : Volume de sel de Mohr 0,5 N en ml pour l'échantillon

p : La prise d'essai en grammes

Pour le cas de la MO, la formule suivante permet d'avoir la teneur en pourcentage

$$\text{MO} = 1,724 * \text{C‰} \quad (\text{équation 3})$$

#### ***II.4.3.3. Dosage du phosphore total***

La détermination de la teneur en phosphore total du sol consiste en une attaque à chaud avec de l'acide perchlorique (HClO<sub>4</sub>) concentré durant deux heures de 0,1g de sols broyés à 0,2mm. La concentration a été mesurée en utilisant la méthode colorimétrique « au bleu » de Murphy et Riley : les ions orthophosphates en solution réagissent avec les ions molybdates en formant un complexe coloré mesuré à une longueur d'onde de 882 nm au spectrophotomètre (annexe 4). La teneur en P total est calculé selon la formule :

$$\text{P tot (mg.kg}^{-1}\text{)} = \text{A} * \text{1/B} * \text{V/M} \quad (\text{équation 4})$$

Avec : A : La concentration de P dans le filtrat en mg.L<sup>-1</sup>

B : dilution en ml

V : Volume filtrat en ml

M : Poids de sol en g

Le stock de la P total peut calculer à partir de la formule suivante :

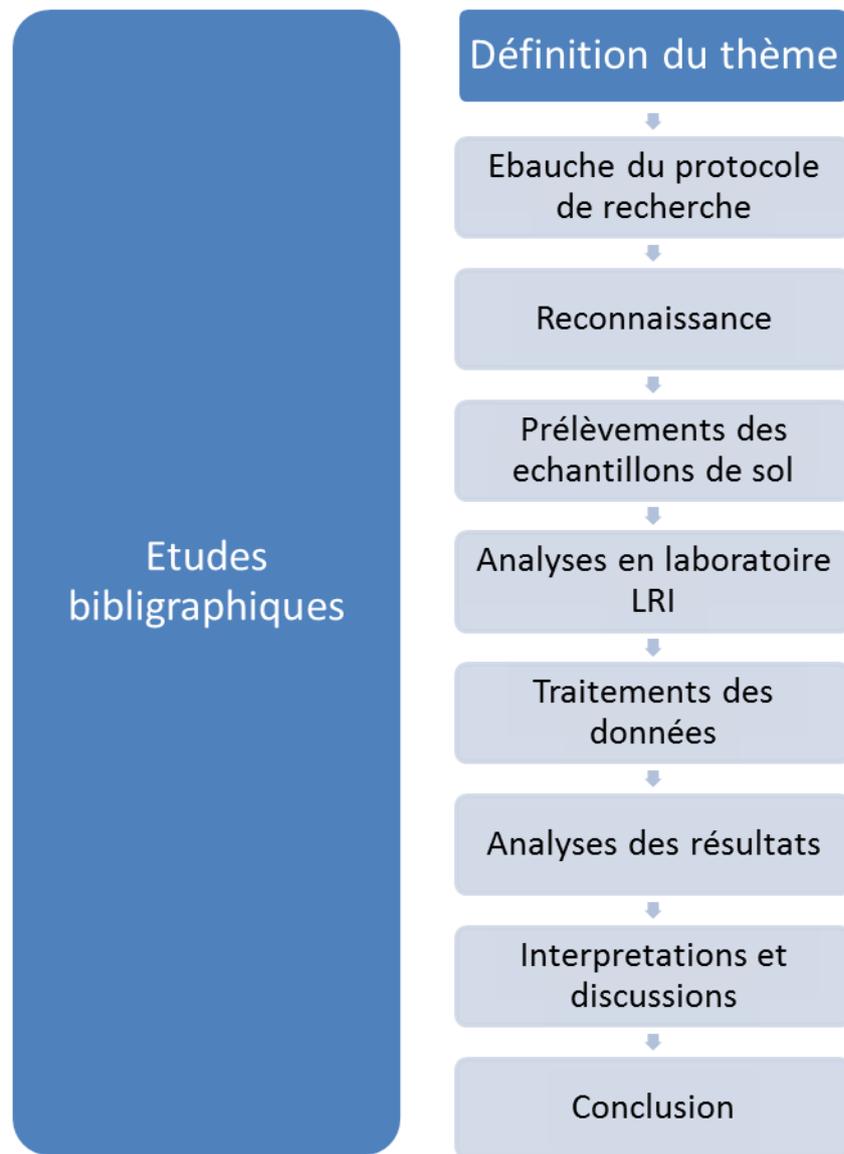
$$\text{Stock P total (Mg P.ha}^{-1}\text{)} = \text{P tot (mg.kg}^{-1}\text{)} * \text{DA} \quad (\text{équation 5})$$

#### **II.4.4.Extraction des données climatiques et géologiques par le Système d'Information Géographique (SIG)**

Les données sur la température et la pluviosité ont été extraites de la base de données Worldclim (Hijmans *et al.*, 2005). Il s'agit d'une base de données mondiale sur le climat. Pour cela, les valeurs de chaque point sur le raster ont été extraites en utilisant le logiciel Arcgis. Pour la géologie, nous avons utilisé les données cartographiques de la PGRM sur les différents systèmes géologiques de Madagascar. Cette carte est la plus récente disponible car elle date de 2008.

#### **II.4.5. Analyses statistiques**

Les analyses statistiques comprennent l'analyse descriptive des résultats, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis et le test de corrélation de Pearson. Pour l'analyse descriptive, les résultats de différentes analyses effectuées sont présentés sous forme de « boîte à moustache ». Cette méthode permet d'obtenir la distribution de tous les résultats, à savoir les valeurs moyenne, minimale et maximale, quartiles, de la teneur en carbone et P total pour chaque groupe de sol. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour comparer les moyennes des variables étudiées au seuil de 5%. Si la probabilité calculée est inférieure à 0,05, il existe au moins une différence significative entre les résultats. Le logiciel utilisé est XLSTAT PRO 8.0. Enfin, la corrélation entre la température ou la pluviométrie et les teneurs en carbone ou P total ont été déterminées par le test de corrélation de Pearson et l'ACP. L'ensemble de la démarche suivie au cours de l'étude est synthétisée dans la Figure 11.



**Figure 11 : Schéma de la démarche méthodologique adoptée pour l'étude.**

# **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### III.1.Densité apparente (DA)

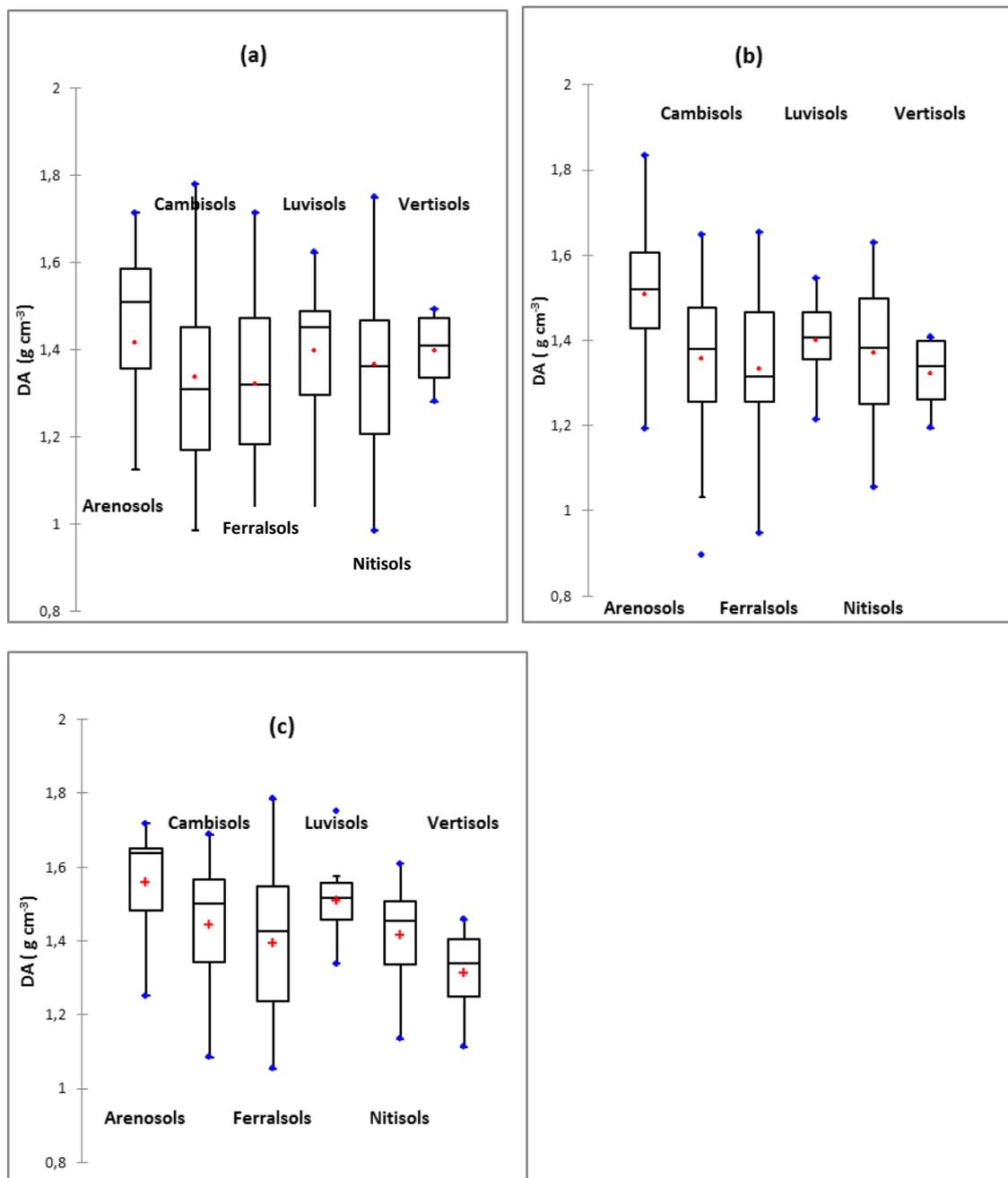
La moyenne de la densité apparente pour chaque groupe de sol a été calculée pour les profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Le tableau 2 montre les résultats des tests statistiques sur les valeurs moyennes par profondeur.

**Tableau 2 : Moyenne  $\pm$  écart type de la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) par groupe de sol (selon classification FAO, 2006)**

Profondeurs	Types de sols					
	Arénosols	Cambisols	Ferralsols	Luvisols	Nitisols	Vertisols
0 – 10 cm	1,42 $\pm$ 0,30a	1,34 $\pm$ 0,23 a	1,32 $\pm$ 0,23a	1,40 $\pm$ 0,18a	1,37 $\pm$ 0,21a	1,40 $\pm$ 0,10a
10 – 20 cm	1,51 $\pm$ 0,18a	1,36 $\pm$ 0,17 a	1,39 $\pm$ 0,21a	1,51 $\pm$ 0,12a	1,42 $\pm$ 0,14a	1,32 $\pm$ 0,10a
20 – 30 cm	1,56 $\pm$ 0,15a	1,44 $\pm$ 0,17a	1,39 $\pm$ 0,20a	1,51 $\pm$ 0,12a	1,42 $\pm$ 0,14a	1,31 $\pm$ 0,15a

*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal Wallis,  $p < 0,05$ ).*

La densité apparente moyenne varie de 1,31 à 1,56  $\text{g.cm}^{-3}$  pour l'ensemble des échantillons des diverses classes de sols analysés. Excepté pour le cas des Vertisols, la densité apparente augmente légèrement vers la profondeur. De 0-10 cm vers 20-30 cm, elle varie de 1,32 à 1,39  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les Ferralsols et 1,34 à 1,44  $\text{g.cm}^{-3}$  les Cambisols, 1,42 à 1,56  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les Arenosols, 1,40 à 1,51  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les Luvisols et 1,37 à 1,42  $\text{g.cm}^{-3}$  pour les Nitisols. La gamme de variation de l'ensemble des échantillons est comprise entre 1,32 à 1,42  $\text{g.cm}^{-3}$  pour 0-10 cm de profondeur, 1,32 à 1,51  $\text{g.cm}^{-3}$  pour 10-20 cm et 1,31 à 1,56  $\text{g.cm}^{-3}$  pour la profondeur 20 à 30 cm. Pour les profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm, les tests statistiques de la DA ne montrent pas de différences significatives entre les types de sol.



**Figure 12 : Distribution de la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) par groupe de sol, pour les horizons 0-10 (a), 10-20 (b) et 20-30 cm (c).**

La Figure 12 présente la distribution de la densité apparente pour chaque groupe de sol et par profondeur. Pour la profondeur 0 à 10cm, à l'exception des Cambisols qui présentent une moyenne de la densité apparente supérieure à la médiane avec une distribution orientée vers les grandes valeurs, les Arenosols, les Luvisols et les Vertisols présentent une moyenne de la densité apparente inférieure à la médiane. Pour les Ferralsols et les Nitisols, la distribution est symétrique avec la moyenne et la médiane qui se superposent. Pour la profondeur 10-20 cm, à part les Luvisols qui montrent une superposition de la moyenne de la densité apparente avec

la médiane avec une distribution symétrique, les Arenosols, Cambisols, Nitisols et Vertisols présentent la moyenne inférieure à la médiane. Seul les Ferralsols ont une moyenne supérieure à la médiane. Pour la profondeur 20-30 cm, la moyenne est toujours inférieure à la médiane.

## III.2. Teneurs et stocks de C organique

### III.2.1. Teneurs en carbone organique du sol

Le tableau 3 montre les résultats de la moyenne de la teneur en C et les résultats des tests statistiques des différents groupes de sol.

**Tableau 3: Moyenne  $\pm$  écart type de la teneur en carbone organique ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) par groupe de sol (selon classification FAO, 2006)**

Profondeurs	Types de sols					
	Arénosols	Cambisols	Ferralsols	Luvisols	Nitisols	Vertisols
0 – 10 cm	15,52 $\pm$ 7,05a	19,90 $\pm$ 11,79 a	31,42 $\pm$ 12,94a	12,91 $\pm$ 6,25a	14,62 $\pm$ 9,26a	12,27 $\pm$ 8,76a
10 – 20 cm	9,71 $\pm$ 5,36a	12,80 $\pm$ 7,30a	22,52 $\pm$ 10,37b	7,78 $\pm$ 4,76a	8,60 $\pm$ 5,90a	4,40 $\pm$ 2,61a
20 – 30 cm	6,29 $\pm$ 4,29a	7,42 $\pm$ 3,25 a	16,0 $\pm$ 9,76b	5,08 $\pm$ 3,43a	6,19 $\pm$ 3,21a	3,87 $\pm$ 1,20a

*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal-wallis,  $p < 0,05$ ).*

Pour l'ensemble, les résultats montrent que la teneur en C organique du sol diminue avec la profondeur. D'après ce tableau, les Ferralsols ont la teneur moyenne en C organique la plus élevée sur les 3 profondeurs d'analyse. Elle diminue de 31  $\text{g.kg}^{-1}$  en surface à 16  $\text{g.kg}^{-1}$  pour 20-30 cm de profondeur. Après les Ferralsols, les Cambisols affichent des teneurs élevées avec

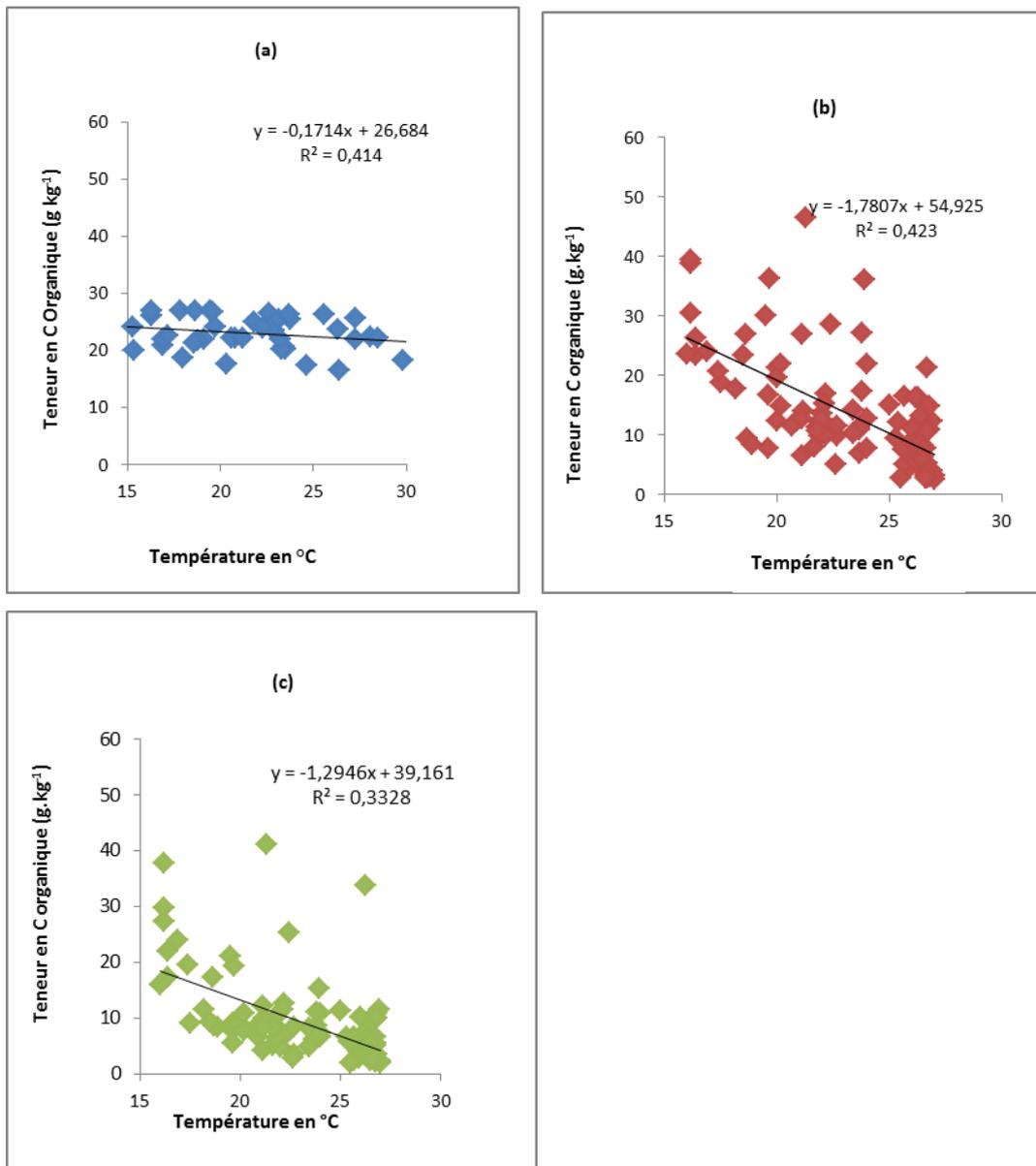
19,9  $\text{g.kg}^{-1}$  pour la profondeur 0-10 cm, suivi des Arenosols et des Nitisols avec respectivement 15,5  $\text{g.kg}^{-1}$  et 14,6  $\text{g.kg}^{-1}$  pour la même profondeur. Les teneurs les plus faibles avoisinent les

12  $\text{g.kg}^{-1}$  pour les Luvisols et les Vertisols en surface et entre 3 et 7  $\text{g.kg}^{-1}$  pour les deux autres profondeurs.

Les analyses statistiques montrent qu'à 0-10cm, il n'y a pas de différences entre les divers types de sols. Les Ferralsols se différencient de tous les autres groupes sur 10-20 cm et 20-30 cm, avec des teneurs en C significativement supérieures pour les Ferralsols.

Le climat influe sur la teneur des éléments dans le sol. Dans ce contexte, il est nécessaire de vérifier, d'une part, si les roches mères sur lesquelles se sont développés les sols influent sur les réserves de P total des sols, d'autre part, si les facteurs climatiques par leurs effets sur la lixiviation ou la minéralisation des matières organiques, modifient également les teneurs en P total.

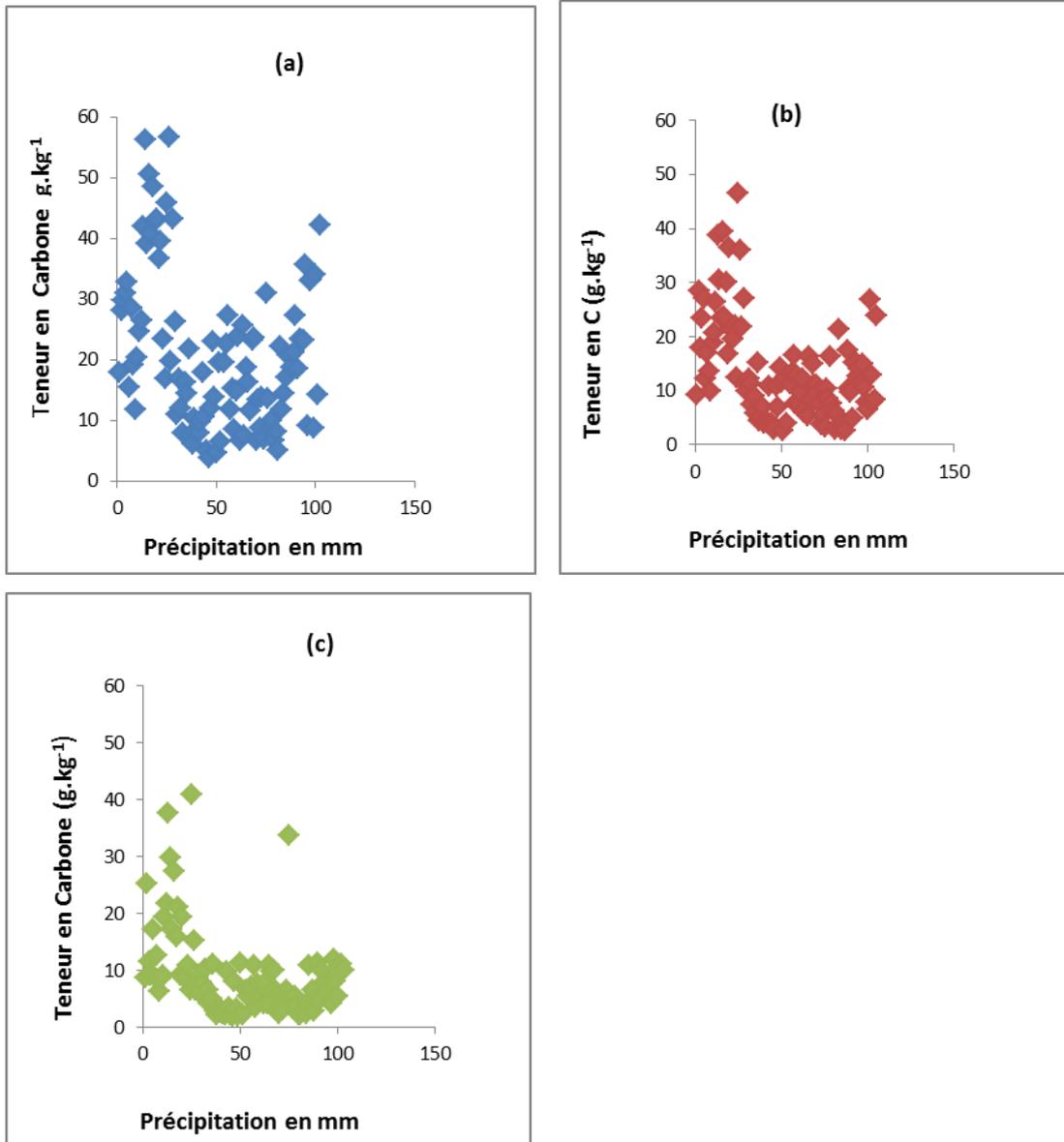
Les corrélations entre la teneur en carbone organique des sols et la température (Figure 13) montrent qu'il y a des corrélations négatives à toutes les profondeurs (0 à 10 cm, 10 à 20 cm et 20 à 30 cm), avec des coefficients de corrélation de 41% pour 0 -10 cm, 42% pour 10 -20 cm et 33% pour 20 -30 cm. Les trois corrélations sont significatives au seuil de  $P = 0,05$ . Ces diminutions linéaires indiquent qu'il y a une dépendance entre la teneur en carbone organique du sol et la température : l'augmentation de la température favorise la minéralisation de la matière organique, donc des teneurs en C plus faibles.



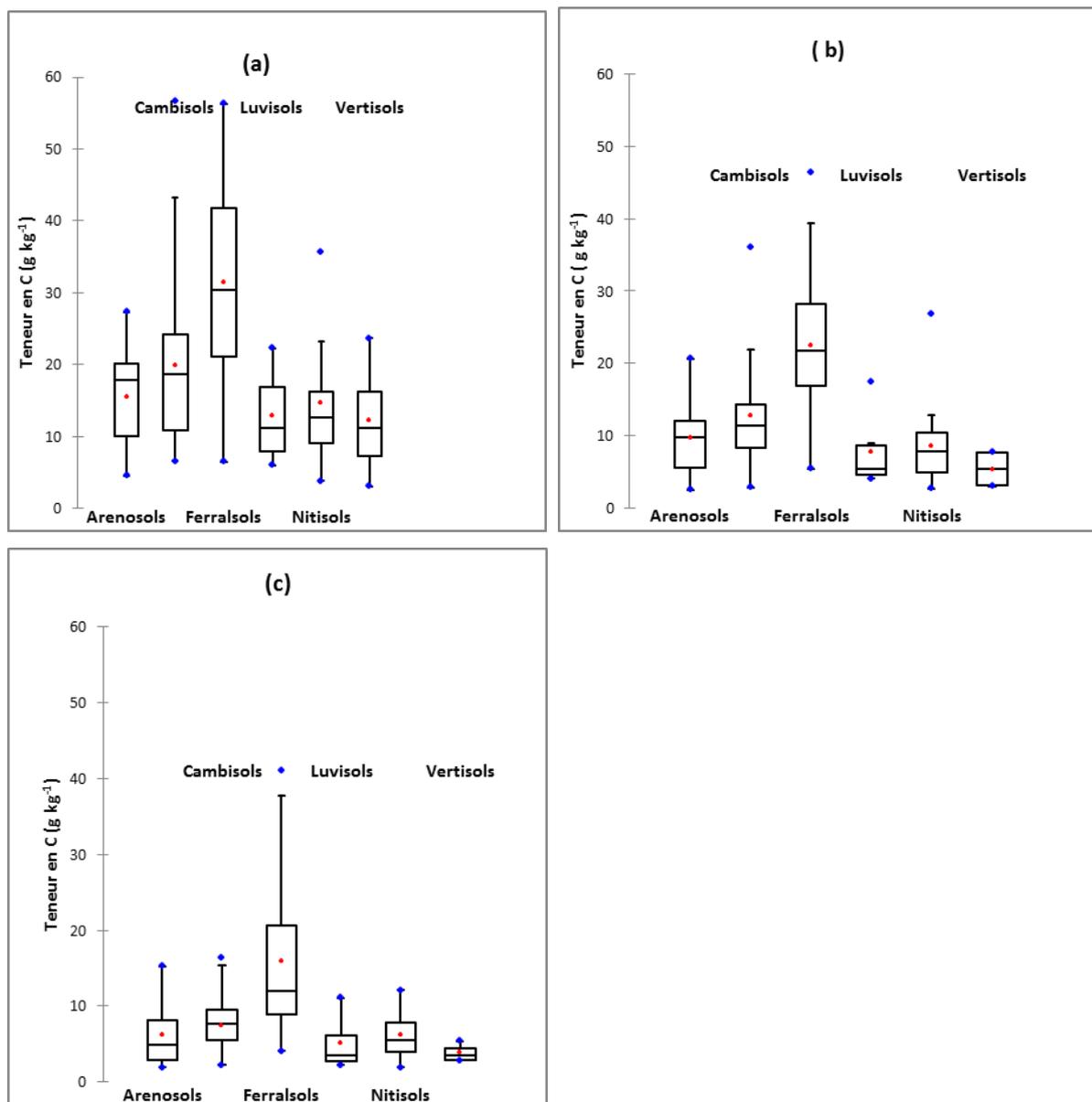
**Figure 13 : Teneur en C en fonction de la température aux profondeurs 0 à 10 cm (a), 10 à**

**20 cm (b) et 20 à 30 cm (c)**

Par contre, les relations de la teneur en carbone organique avec la pluviométrie (Figure 14) ne sont pas significatives au seuil de  $P = 0,05$ .



**Figure 14 : Teneur en carbone organique en fonction de la pluviométrie aux profondeurs 0 à 10 cm (a), 10 à 20 cm (b) et 20 à 30 cm (c)**



**Figure 15: Variation de la teneur en C du sol ( $g.kg^{-1}$ ) par groupe de sol, pour les horizons 0-10cm (a), 10-20cm (b) et 20-30 cm (c).**

La figure 15 montre la distribution de la moyenne de la teneur en carbone organique dans différents groupes de sols. En général, tous les groupes de sols montrent des moyennes de la teneur en carbone organique supérieure aux médianes, la distribution est allongée vers la grande valeur pour toutes les profondeurs, sauf pour les Arenosols à la profondeur 0 -10 cm.

### III.2.2. Stock de C du sol

Les stocks de C du sol, calculés pour les 3 profondeurs d'analyse, sont présentés dans le

Tableau 4. Les Ferralsols ont les stocks en carbone les plus élevés avec 39 MgC.ha<sup>-1</sup> en surface, 29 MgC.ha<sup>-1</sup> pour 10 à 20 cm et 21 MgC.ha<sup>-1</sup> pour 20-30 cm. Pour les autres groupes de sol, les stocks de carbone sont compris entre 16 à 25 MgC.ha<sup>-1</sup> pour 0-10 cm, entre 7 à 17 MgC.ha<sup>-1</sup> pour 10-20 cm et entre 5 et 9 MgC.ha<sup>-1</sup> pour 20-30 cm. Les tests statistiques ont confirmé aussi qu'à 0-10 cm, il n'y a pas de différences entre les groupes de sols. Par contre, à 10-20 cm et 20-30 cm les stocks de C des Ferralsols sont significativement supérieurs à ceux des autres groupes de sol.

Les Ferralsols présentent les stocks les plus élevés sur 0-30 cm avec 90 MgC.ha<sup>-1</sup> alors que les Vertisols ne présentent que 29 MgC.ha<sup>-1</sup> pour cette même profondeur. Les stocks cumulés des autres types de sols varient de 36 à 53 MgC.ha<sup>-1</sup>. Seuls les Ferralsols présentent des différences significatives avec les autres types de sols.

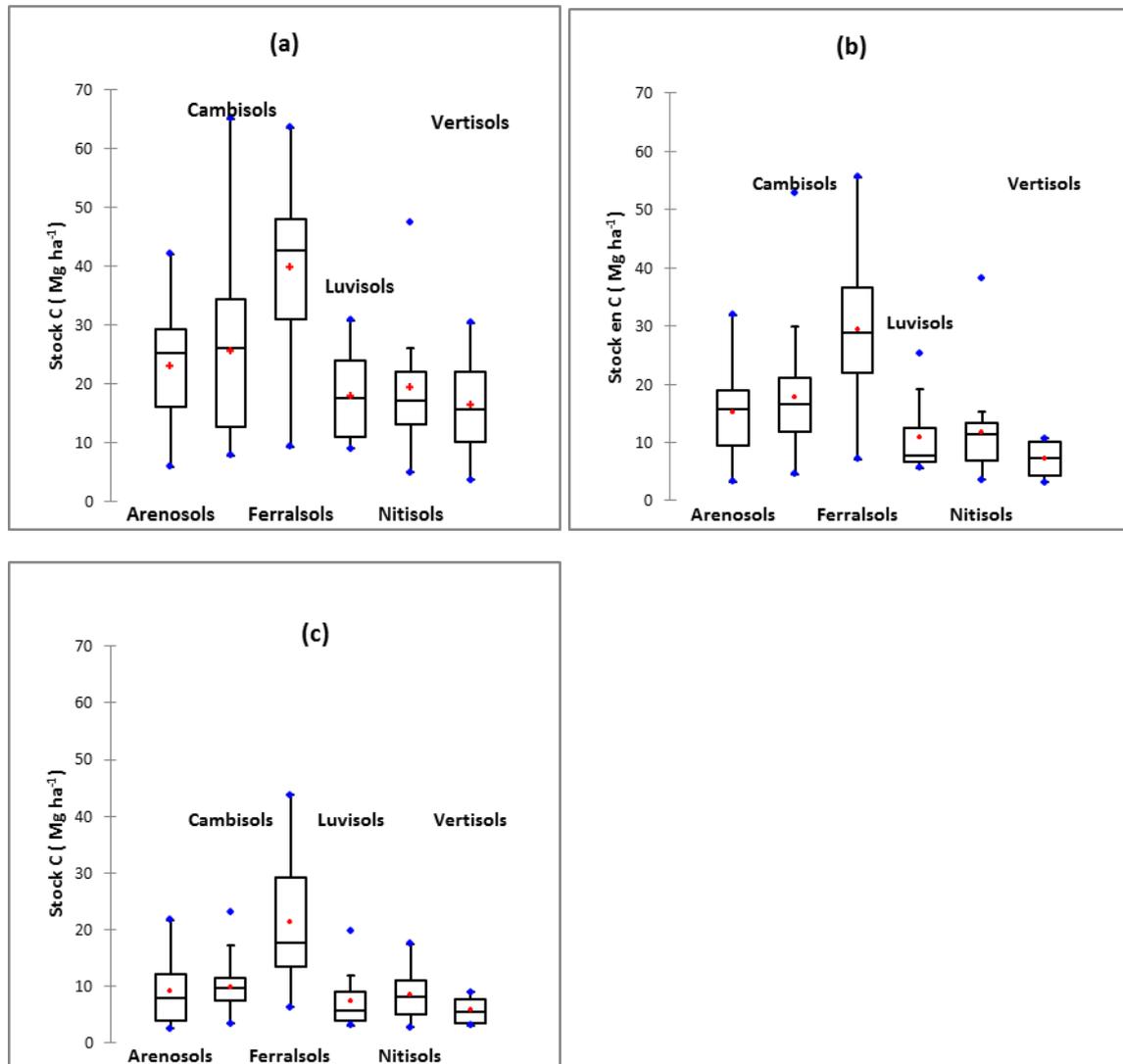
**Tableau 4 : Moyenne ± écartype des stocks de C (MgC.ha<sup>-1</sup>) par groupe de sol (selon classification FAO, 2006)**

Profondeurs	Types de sols					
	Arénosols	Cambisols	Ferralsols	Luvisols	Nitisols	Vertisols
0 – 10 cm	22,97 ± 10,81a	25,47 ± 13,97 a	39,78 ± 14,06a	17,80 ± 7,89a	19,44 ± 11,92a	16,34 ± 11,31a
10 – 20 cm	15,18 ± 8,28a	17,85 ± 10,31a	29,44 ± 11,44b	10,91 ± 6,53a	11,75 ± 8,07a	7,11 ± 3,71a
20 – 30 cm	9,13 ± 6,54a	9,73 ± 4,47a	21,16 ± 10,70b	7,40 ± 5,71a	8,43 ± 4,30a	5,67 ± 2,90a
0 – 30 cm	47,28 ± 6,94a	53,05 ± 7,87a	90,38 ± 9,33b	36,11 ± 5,29a	39,62 ± 5,65a	29,12 ± 5,79a

*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal-wallis, p<0,05).*

La figure 14 montre la distribution du stock de C dans différents groupe de sol pour les 3 profondeurs d'analyse. Aux profondeurs 0 à 10 cm, la moyenne du stock en carbone est inférieure à la médiane, la distribution est orientée vers les valeurs faibles pour les Arenosols et Ferralsols, tandis que les Nitisols et Vertisols montrent la moyenne supérieure à la médiane, la distribution est orientée vers les grandes valeurs, et les Luvisols et les Cambisols affichent une superposition de la moyenne du stock en carbone et de la médiane, avec une distribution symétrique. Aux profondeurs 10-20 cm et 20-30 cm, la majorité des échantillons présentent des moyennes du stock en carbone supérieure à la médiane, excepté pour les Arenosols, les

Nitisols et les Vertisols à 10-20 cm et les Cambisols, les Nitisols et les Vertisols à 20-30 cm qui présentent des moyennes similaires à la médiane.



**Figure n°16: Variation des stocks de C (MgC.ha<sup>-1</sup>) des différents groupes de sol pour les horizons 0-10cm (a), 10-20 cm (b) et 20-30 cm (c)**

### III.3. Teneurs et stocks de phosphore total

#### III.3.1. Teneurs de phosphore total du sol

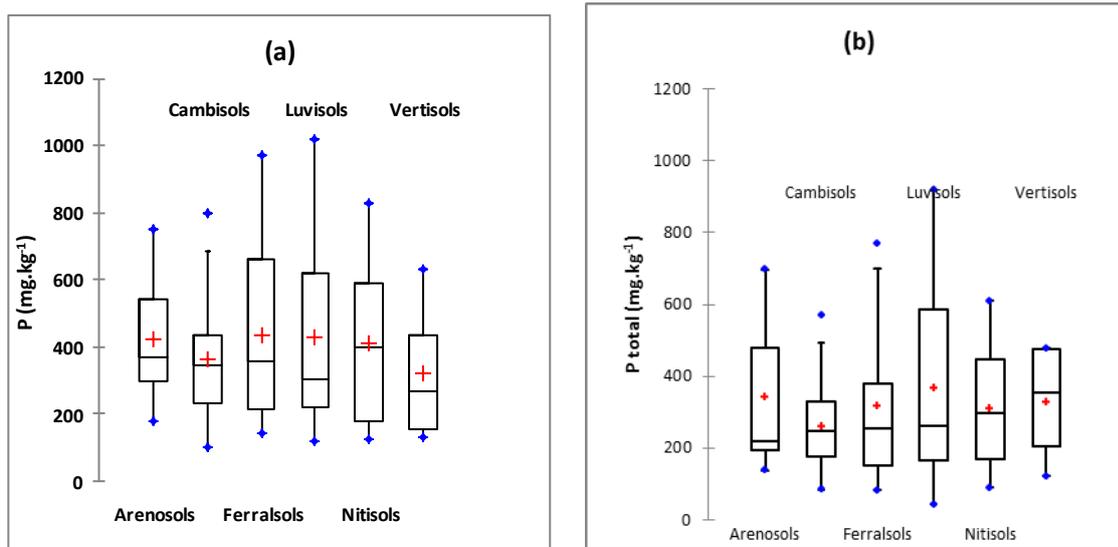
Le tableau 5 montre la variation de la teneur en P total du sol. Les analyses statistiques ont montré qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes de sols et ceci pour les 3 profondeurs d'échantillonnage. Cependant, pour tous les horizons, les Ferralsols ont les teneurs en P total les plus élevées et les Cambisols les plus faibles. Les teneurs en P total pour les Ferralsols diminuent avec la profondeur, passant, en moyenne, de 433 mg.kg<sup>-1</sup> pour 0-10 cm, à 317 mg.kg<sup>-1</sup> pour 10-20 cm et à 244 mg.kg<sup>-1</sup> pour 20-30 cm.

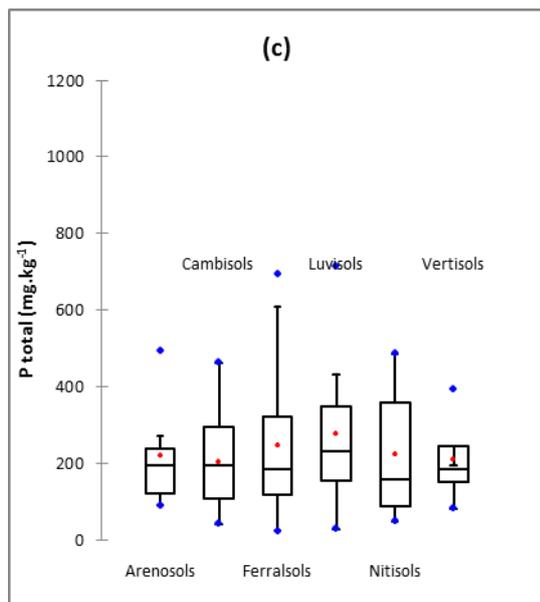
**Tableau 5: Teneurs en P total (en mg.kg<sup>-1</sup>) des différents groupes de sols**

Profondeurs	Types de sols					
	Arénosols	Cambisols	Ferralsols	Luvisols	Nitisols	Vertisols
0 – 10 cm	425 ± 197 <sup>a</sup>	361 ± 168 <sup>a</sup>	433 ± 260 <sup>a</sup>	430 ± 309 <sup>a</sup>	408 ± 236 <sup>a</sup>	323 ± 232 <sup>a</sup>
10 – 20 cm	341 ± 211 <sup>a</sup>	260 ± 116 <sup>a</sup>	317 ± 212 <sup>a</sup>	364 ± 288 <sup>a</sup>	310 ± 172 <sup>a</sup>	326 ± 178 <sup>a</sup>
20 – 30 cm	220 ± 138 <sup>a</sup>	203 ± 115 <sup>a</sup>	244 ± 176 <sup>a</sup>	277 ± 194 <sup>a</sup>	223 ± 152 <sup>a</sup>	210 ± 130 <sup>a</sup>

*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal-Wallis, p=0,05).*

La Figure 17 montre la répartition des teneurs en P total des différents groupes de sols. La majorité des échantillons présentent la moyenne de la teneur en P total supérieure à la médiane, la distribution est orientée vers la grande valeur pour la plupart des types de sols et des profondeurs.





**Figure n°17 : Distribution de la teneur en P total ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ) des différents groupes de sol sur 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) et 20-30 cm (c)**

### III.3.2. Stock de P total du sol

Les stocks de P total du sol, calculés pour les 3 profondeurs d'analyse, sont présentés dans le Tableau 6. Pour la profondeur 0 à 10 cm, les Nitisols, Ferralsols et Luvisols ont les stocks en P total les plus élevés au-delà de  $600 \text{ MgP.ha}^{-1}$ , pour les Arenosols et Cambisols les stocks de P total sont proches de  $540 \text{ MgP.ha}^{-1}$  et les Vertisols montrent le stock la plus faible ( $381 \text{ MgP.ha}^{-1}$ ). Pour la profondeur 20 à 30 cm, la majorité des groupes de sol montre des stocks en P total entre  $328$  à  $391 \text{ MgP.ha}^{-1}$  excepté les Vertisols qui ont le stock en P total de  $271 \text{ MgP.ha}^{-1}$  sur la même profondeur.

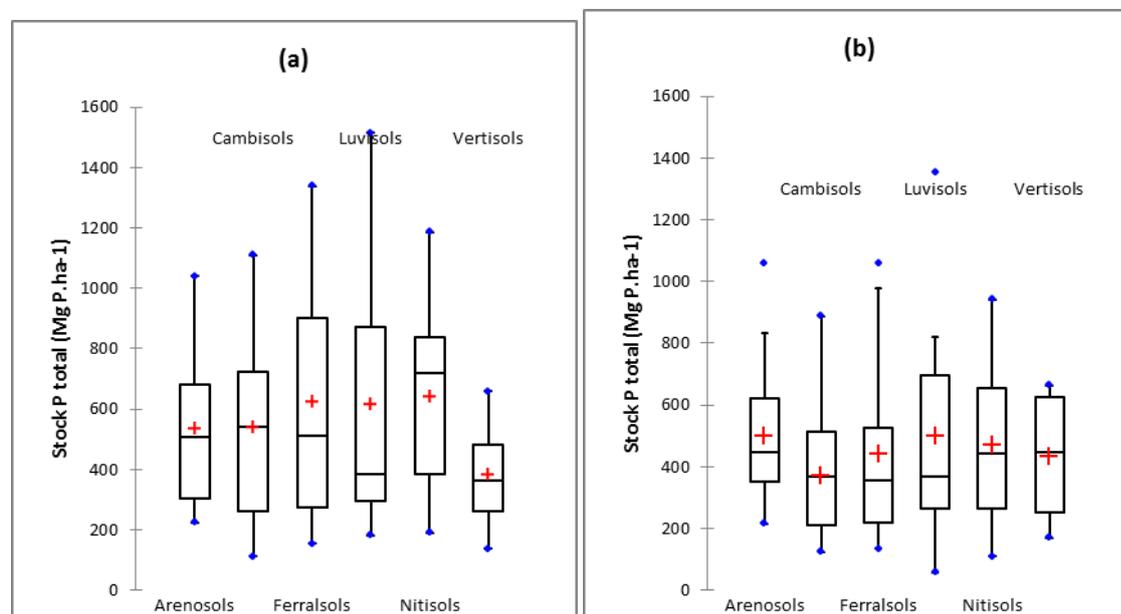
Les tests statistiques ont confirmé aussi qu'à 0-10 cm, il n'y a pas de différences entre les groupes de sols. Aux 0-30 cm, les Luvisols ont les stocks les plus élevés ( $1490 \text{ MgP.ha}^{-1}$ ) alors que les Vertisols affichent les stocks les plus faibles ( $1083 \text{ MgP.ha}^{-1}$ ). Le tableau 6 ci-après montre les stocks du P total dans différents groupe de sol aux profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm.

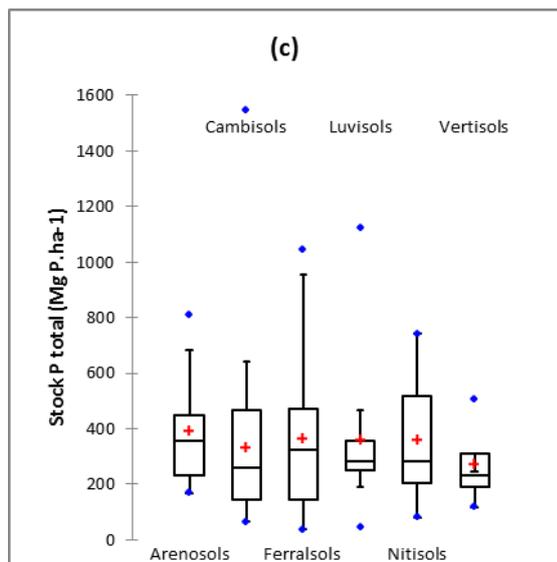
**Tableau 6 : Moyenne  $\pm$  écartype des stocks de P total (MgP.ha<sup>-1</sup>) par groupe de sol (selon classification FAO, 2006**

Profondeurs	Types de sols					
	Arénosols	Cambisols	Ferralsols	Luvissols	Nitisols	Vertisols
0 – 10 cm	536 $\pm$ 251a	540 $\pm$ 309 a	622 $\pm$ 381a	614 $\pm$ 465a	641 $\pm$ 295a	381 $\pm$ 219a
10 – 20 cm	498 $\pm$ 244a	368 $\pm$ 197a	440 $\pm$ 305a	497 $\pm$ 384a	471 $\pm$ 254a	431 $\pm$ 244a
20 – 30 cm	391 $\pm$ 199a	328 $\pm$ 276a	365 $\pm$ 259a	359 $\pm$ 290a	358 $\pm$ 219a	271 $\pm$ 166a
0 - 30 cm	1425 $\pm$ 74a	1236 $\pm$ 112a	1427 $\pm$ 132a	1490 $\pm$ 127a	1470 $\pm$ 142a	1083 $\pm$ 81a

*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal-Wallis, p=0,05).*

La figure 18 ci-après montre la distribution du stock en P total des différents groupes de sol. En général la distribution est orientée vers la grande valeur pour tous les échantillons et pour toutes les profondeurs, hormis le cas des Nitisols sur 0-10 cm et Vertisols aux 10-20 cm.





**Figure n°18 : Distribution du stock en P total (MgP.ha<sup>-1</sup>) des différents groupes de sol sur 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) et 20-30 cm (c)**

A l'état naturel, la roche mère demeure la principale source en P du sol. Nous avons essayé d'étudier les relations entre les roches mères, définies à partir de la carte géologique de Madagascar (PGRM, 2008), et la teneur en P total des sols.

Tableau 7 montre les teneurs en phosphore total des sols en fonction de la nature des roches mères.

**Tableau 7 : les teneurs en phosphore total des sols en fonction de la nature des roches mères.**

Profondeurs	Types des roches mères					
	Gneiss à biotite	Gneiss mafiques	Granites	Grès	Leptynites	Métapélites
0-10 cm	504 ± 172 <b>b</b>	420 ± 251 <b>ab</b>	144 ± 40 <b>a</b>	367 ± 213 <b>ab</b>	609 ± 268 <b>b</b>	278 ± 72 <b>ab</b>
10-20 cm	415 ± 138 <b>a</b>	322 ± 207 <b>a</b>	122 ± 38 <b>a</b>	278 ± 177 <b>a</b>	449 ± 171 <b>a</b>	271 ± 33 <b>a</b>
20-30 cm	422 ± 107 <b>b</b>	236 ± 162 <b>ab</b>	86 ± 26 <b>a</b>	290 ± 207 <b>ab</b>	306 ± 18 <b>ab</b>	238 ± 28 <b>ab</b>

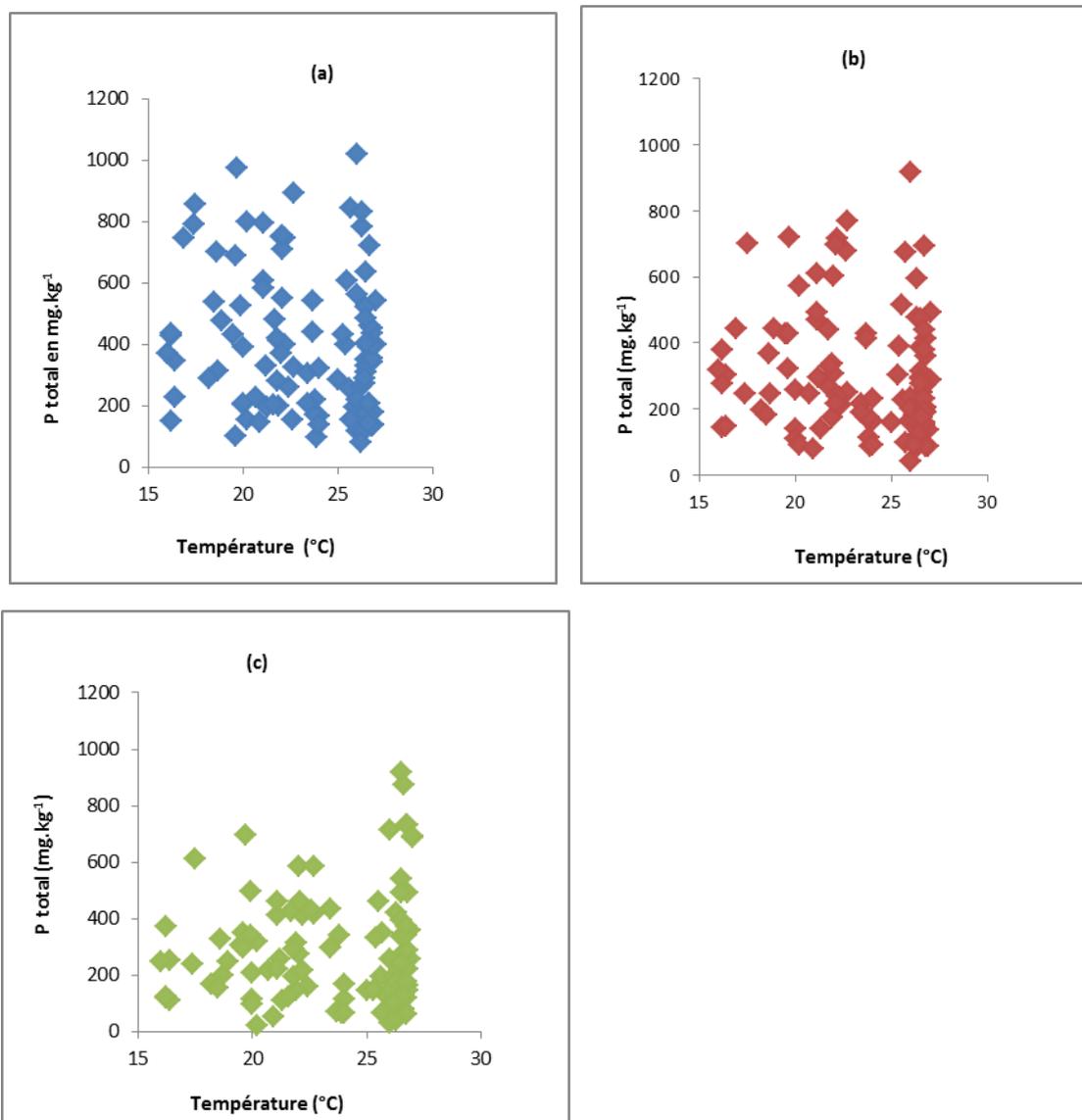
*\*\*Les valeurs suivies d'une lettre minuscule différente à l'intérieur d'une même ligne et pour une même profondeur sont significativement différentes (Test Kruskal-wallis, p=0,05).*

Les résultats obtenus montrent (Tableau 7) que les sols sur les gneiss à biotite et les leptynites ont les teneurs les plus élevées en P total aux alentours de 500 et 600 mg.kg<sup>-1</sup> tandis que ceux sur des granites affichent les teneurs les plus faibles (environ 144 mg.kg<sup>-1</sup>) pour la profondeur 0 à 10 cm. Les sols sur les gneiss mafiques et les grès ont des teneurs assez importantes de

420 et 367  $\text{mg.kg}^{-1}$  respectivement pour 0-10 cm et entre 236 et 290  $\text{mg.kg}^{-1}$  pour 20 à 30 cm de profondeur.

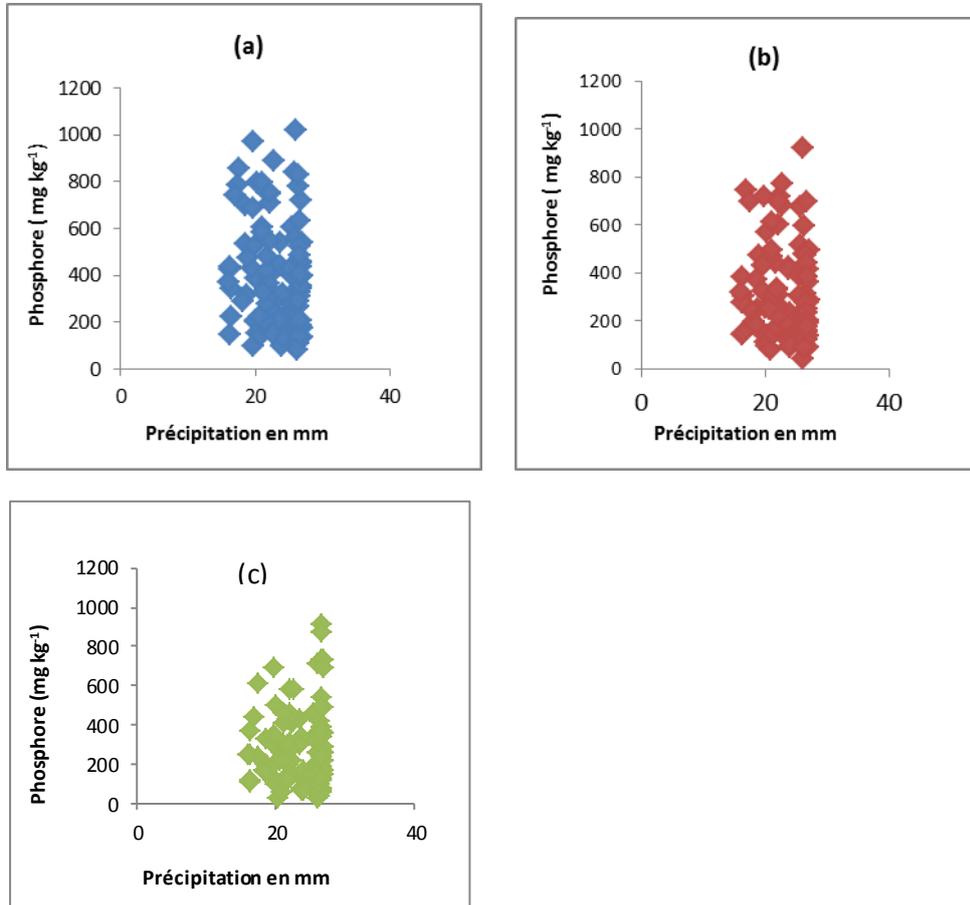
Les tests statistiques ont montré que les teneurs en P des sols sur gneiss à biotites présentent une différence significative par rapport aux teneurs en P des sols sur granites pour les profondeurs 0 -10 cm et 20-30cm ; pour 10- 20 cm il n'y a pas de différences entre les groupes de sol.

Les relations entre la teneur en P total et la température sont présentées sur la Figure 19. Les corrélations de Pearson entre les teneurs en P et la température ont montré des valeurs très faibles et non significatives au seuil de  $P = 0,05$ .



**Figure 19: Teneur en P total en fonction de la température aux profondeurs 0 à 10 cm (a), 10 à 20 cm(b) et 20 à 30 cm(c)**

Les corrélations de Pearson entre la teneur en P total et la pluviométrie (Figure 20) ne sont également pas significatives au seuil de  $P = 0,05$ .



**Figure 20 : Teneur en P total en fonction de la pluviométrie aux profondeurs 0 à 10 cm (a), 10 à 20 cm (b) et 20 à 30 cm (c).**

### **III.5.Discussions**

#### **III.5.1.Variation de la densité apparente**

En général, la moyenne de la DA augmente le long de la profondeur. Selon Marchao *et al.* (2009), la DA est faible en surface et s'accroît progressivement vers la profondeur, car l'essentiel des activités biologiques se déroule sur la partie superficielle du sol. Cet horizon est également la zone de concentration des débris végétaux qui constitueront une importante source de matière organique pour les organismes du sol, notamment la macrofaune, qui contribuent à la structuration et à la constitution de la porosité des sols. En général, les horizons avec une forte activité biologique et une importante quantité de matière organique ont une structure grumeleuse. Dans ce cas, la porosité du sol est plus importante par rapport aux horizons de profondeur. En dessous, le sol devient plus compact du fait de l'insuffisance des activités biologiques. Dans les sols tropicaux, les horizons humifères, relativement structurés (Boissezon, 1965) se caractérisent par des densités apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive. Pour la présente étude, les valeurs moyennes de la DA pour l'ensemble des groupes de sol sont comprises entre 1,31 et 1,56 g.cm<sup>-3</sup>, avec 1,32 g.cm<sup>-3</sup> pour les Ferralsols, 1,42 g.cm<sup>-3</sup> pour les Arenosols, 1,37 g.cm<sup>-3</sup> pour les Nitisols et 1,34 g.cm<sup>-3</sup> pour les Cambisols sur 0 à 10 cm de profondeur. D'après Razafimbelo *et al.* (2008), la valeur moyenne de la DA des sols ferrallitiques est de 1,11 g.cm<sup>-3</sup> contre 1,51 g.cm<sup>-3</sup> pour les sols ferrugineux pour les profondeurs inférieure à 40 cm. Grinand *et al.* (2009) ont avancé que la moyenne de la DA des sols ferrallitiques est de 1,25 g.cm<sup>-3</sup> et qu'elle est de 1,39 g.cm<sup>-3</sup> pour les sols ferrugineux sur la même profondeur. Razafimahatratra (2011) ont mentionné des valeurs moyennes de la DA de 1,15 g.cm<sup>-3</sup> pour les Ferralsols et 1,41 g.cm<sup>-3</sup> la moyenne pour les Arenosols sur 0-10 cm de profondeur. Cette différence peut-être due à la variabilité des sites de prélèvements et aux types de végétations présentes sur le terrain.

#### **III.5.2.Teneur et stock en C organique du sol**

Les Ferralsols ont la teneur en C organique la plus élevée de l'ordre de 31,42 g.kg<sup>-1</sup>, dans la partie superficielle et 16 g.kg<sup>-1</sup> en profondeur. Pour l'ensemble des groupes de sol, les teneurs moyennes en carbone organique du sol varient entre 3,87 g.kg<sup>-1</sup> et 31,42 g.kg<sup>-1</sup> pour 0 -10 cm, 10 - 20 cm et 20-30 cm de profondeur. Ces valeurs restent très variées à cause de la diversité des types de sols étudiés, qui ont été prélevés dans plusieurs endroits de Madagascar présentant des caractéristiques pédoclimatiques contrastées. D'après Razafimbelo (2006), sur

0-20 cm, la teneur en C des sols Ferrallitiques se situe entre 30 et 50 g.kg<sup>-1</sup>. Nos résultats sont proches de ceux de Razafimbelo (2006) pour la profondeur 0-20 cm. L'abondance de carbone organique du sol est expliquée par l'importance des quantités de biomasses donc de la matière organique dans cet horizon de surface mais également par la présence d'une forte activité biologique.

Pour le stock de carbone, il varie de 5,67 à 39,78 MgC.ha<sup>-1</sup> en fonction des types de sol et des horizons considérés. Les Ferralsols présentent les stocks les plus élevées, à la fois dans l'horizon de surface (0-10 cm à 20-30cm), avec 39,78 à 21,16 MgC.ha<sup>-1</sup>, et pour la couche 0-30 cm, avec 90,4 MgC.ha<sup>-1</sup>. Rappelons que les Ferralsols, les Cambisols et les Nitisols de la classification FAO des sols correspondent aux sols ferrallitiques de la classification CPCS des sols et que les Arenosols et les Luvisols font parties des sols ferrugineux.

Grinand *et al.*, (2009) ont trouvé un stock de carbone 60,8 MgC.ha<sup>-1</sup> sur les sols Ferrallitiques de 0-30 cm. L'abondance du stock de C en surface peut être expliquée par le développement de la végétation dans la partie superficielle du sol. La diversité des sites de prélèvement et la différence du nombre d'échantillons prélevés pour chaque type de sol peuvent aussi expliquer les variations des stocks de C observées. L'augmentation de la température du sol ne fera qu'augmenter le taux de minéralisation conduisant à une diminution de la COS (Lal, 2004). Ceci se traduit, comme nous l'avons observé pour les sols de Madagascar, à une baisse des stocks de C lorsque la température moyenne de la région augmente.

### **III.5.3.La teneur P total et stock en P total**

Dans les sols agricoles, le phosphore est majoritairement sous forme de phosphate, dont environ 1/3 est associé à la matière organique et 2/3 associés à la fraction minérale.

La teneur en P total varie entre 203 et 433 mg.kg<sup>-1</sup> pour 0-10 cm, 10-20cm, 20-30cm, pour l'ensemble des types de sols. Les Ferralsols ont la teneur en P total la plus élevée, avec une teneur moyenne de 433 mg.kg<sup>-1</sup>. Cette grande variabilité peut-être due à différentes raisons comme la diversité des sites de prélèvements, la diversité des toposéquences, les effets d'anciens modes d'usage des sols,... Dans les zones cultivées, les teneurs peuvent-être bien plus importantes que dans les zones non anthropisées, avec, par exemple, des teneurs pouvant varier de 436 à 2046 mg.kg<sup>-1</sup> pour une petite région agricole des Hautes Terres de Madagascar (Rajaonarison, 2012). Néanmoins, les teneurs en P total observées dans notre étude sont proche de celles généralement observées dans les sols n'ayant reçu aucun amendement.

Pour les stocks en P total, elles sont comprises entre 271 à 641 MgP.ha<sup>-1</sup> pour l'ensemble d'échantillon et à toutes les profondeurs. Aux 0-30 cm, les Luvisols ont le stock le plus élevé (1490 MgP.ha<sup>-1</sup>) alors que les Verisols affichent les stocks les plus faibles (1083 MgP.ha<sup>-1</sup>). Comme le stock de P total est en fonction de la densité apparente ; Cette oscillation du stock en P total peut-être aussi causée par la diversité des types de sols puisque certains ont des textures argileuses et d'autres présente des textures sableuses.

Nous avons constaté que les sols évoluant sur gneiss à biotite, sur métapélites et sur leptynites à grenat affichent des teneurs en P total plus importantes tandis que les sols sur gneiss mafiques, sur granites et sur grès présentent des teneurs en P total assez faibles. La teneur en P est faible dans la roche mère et lorsque la roche mère commence à s'altérer. Ensuite, au fur et à mesure que le sol se développe, le P prend de plus en plus d'importance pour atteindre un maximum, puis diminue dans les sols lorsqu'ils sont très fortement altérés (Syers et Curtin, 1989 ; Cité par Brossard et Laurent, 1992). D'après Simon et Schuster (1978) l'abondance en P est d'abord reliée aux teneurs des minéraux phosphatés contenus dans les roches, puis ensuite au degré d'altération subit par les roches. Brossard et Laurent (1991) affirment que lors de l'altération des roches, la silice, ainsi que le calcium et d'autres cations basiques quittent le système. Des constituants secondaires peu mobiles, des oxydes de fer et d'aluminium, se forment, sur lesquels des phosphates s'adsorbent très fortement (phosphates d'aluminium et phosphates de fer). Le P a ainsi tendance à s'accumuler dans la partie superficielle des sols.

### **III.5.4.Relations entre les teneurs de C organique et de P total avec le climat et la roche mère**

#### **III.5.4.1.Effet du climat sur la teneur en C organique**

Les stocks des éléments dans les sols, et en particulier ceux du carbone, sont en constante évolution sous l'effet de facteurs naturels (climat, végétation, effets de l'altération, de la lixiviation, et plus généralement de l'ensemble des processus pédogénétiques) et anthropiques (impacts locaux de l'utilisation des sols, effets diffus d'apports hydriques et atmosphériques).

Les préoccupations concernant le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en termes de source ou de puits de carbone (Post *et al.*, 1982), et sur l'impact des actions humaines, particulièrement en milieu tropical ou subtropical (Detwiler, 1986 ; Lugo & Brown, 1993 ; Bernoux *et al.*, 1998 cité par Razafimbelo (2005). Les facteurs climatiques

(température et pluviométrie) ont une influence majeure sur le stockage du carbone dans le sol, en affectant la minéralisation de la matière organique du sol.

### **III.5.4.2.Effet de la roche mère et du climat sur la teneur en P total**

De grandes étendues de terres dans les régions tropicales et subtropicales d'Asie, d'Afrique et d'Amérique Latine sont couvertes de sols fortement lessivés et naturellement infertiles. Ces secteurs donnent de faibles productions et sont sujets à la dégradation des terres en raison de la déforestation, du surpâturage et des pratiques agricoles inadéquates. En plus des facteurs socio-économiques, les principales contraintes sont l'acidité du sol et la faible fertilité naturelle en azote et phosphore (Lal, 2004). Afin d'améliorer le statut phosphaté du sol et assurer la croissance normale des plantes ainsi que des rendements adéquats, des résidus de récolte et d'autres produits organiques, ainsi que des intrants phosphatés, doivent être appliqués (Sanchez et Buol, 1975; Date *et al.*, 1995). Cependant, la plupart des pays en voie de développement importent ces engrais, qui sont souvent en quantité limitée et représentent des dépenses importantes pour les agriculteurs pauvres.

### **III.5.5.Limites et perspective de l'étude**

Etant donné qu'il s'agit d'un travail à l'échelle nationale, des limites s'imposaient sur divers points des différentes démarches aboutissant à la réalisation de cette étude, quelques limites de l'étude et perspective peuvent être citées.

#### *Limites de l'étude :*

- Dans certains sites, nous avons été obligés d'échantillonner sur des parcelles anthropisées (sous eucalyptus ou sous culture). Ces conditions ont pu influencer sur l'estimation du stock en carbone organique pour ces sites.
- Le stock de carbone dans le sol varie selon le groupe de sol, les Ferralsols ont la teneur la plus élevée par rapport aux autres types de sol. La majorité des sols à Madagascar sont des Ferralsols.
- Pour une large part, la nature des roches mères sous-jacentes est assez mal connue et la présente étude ne permet de faire qu'un zonage géologique très grossier.

#### *Perspectives d'avenir :*

- Il serait nécessaire de développer la partie portant sur la géologie pour affiner l'étude de la relation entre le type de roche mère et les sources de P des sols afin de pouvoir intégrer ces données dans des bases de données et améliorer la spatialisation des

teneurs en P des sols de Madagascar. En particulier l'échelle de la carte géologique (PGRM, 2008) au 1/1 000 000 est d'une précision insuffisante pour définir correctement le type de roche associé à chaque point d'observation.

- Il est nécessaire d'affiner cette étude afin de relier plus finement les teneurs ou stocks de C dans les sols en fonction des caractéristiques des sols, notamment leur texture ou leur minéralogie.
- Il serait également utile d'analyser les effets des types de sol ou de leurs caractéristiques sur la minéralisation du C ou le potentiel de stockage de C en fonction des pratiques agricoles ou sylvicoles auxquels ils sont soumis.

# CONCLUSION

## CONCLUSION

---

Face à la nécessité de développer la production agricole, l'amélioration de la fertilité des sols de *tanety*, qui sont des sols fragiles, acides, assez pauvres en éléments nutritifs (ou éléments disponibles) demeure un défi pour les paysans. Les recherches sur la dynamique de la fertilité de ces sols devront être poursuivies afin de relever ce défi. Au cours de la présente étude, l'évaluation des stocks de C et des teneurs en P total a conduit à pour finalité de connaître les facteurs responsables de la variation des teneurs de ces éléments dans le sol. Les prélèvements ont été réalisés tous les 20 km aux abords de certaines routes nationales. Les résultats ont montré que la moyenne de la DA varie de 1,31 à 1,56 g.cm<sup>-3</sup> et il n'y a pas de différences significatives entre les divers groupes de sols. Les teneurs en C et P varient suivant les types de sol, le type de climat et la profondeur. Les Ferralsols ont la teneur moyenne la plus élevée, avec 39,78 MgC.ha<sup>-1</sup> pour le stock de carbone et 433 MgP.ha<sup>-1</sup> pour la teneur en P total. L'horizon supérieur affiche des teneurs en C et en P total élevées et elles diminuent le long des profils. La teneur en carbone est influencée par des facteurs externes comme le climat (température) tandis que la teneur en P total des sols est plutôt contrôlé par la nature des roches mères. Les recoupements de toutes les informations et les résultats obtenus ont permis d'en déduire que les trois hypothèses émises au départ sont confirmées.

- La première hypothèse selon laquelle *les stocks de C et de P total varient en fonction du type de sol* est vérifiée. Néanmoins, il faut noter qu'un seul type de sol, les Ferralsols, se distinguent nettement avec des stocks de C significativement plus importants.

- La deuxième hypothèse est également confirmée. *La température et la pluviosité sont les variables climatiques qui affectent de la teneur en C du sol.* La température influe négativement sur la teneur en carbone organique du sol, en favorisant la minéralisation de la matière organique dans le sol. Par contre, la pluviométrie est sans effet sur les stocks de C et P.

- la troisième et dernière hypothèse selon laquelle *la nature des roches mères détermine la richesse en P des différents groupes de sol* est confirmée. La nature des roches mères joue un rôle sur la teneur en phosphore total dans le sol où la teneur en P total des sols reste plus élevée dans le gneiss à biotite et les leptynites. A Madagascar, les recherches effectuées sur le P total des sols n'ont pas souvent pris en compte la géologie des formations sous-jacentes.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Alvarez R., Lavado R.S., 1998- Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83, 127–141.

Andriamaniraka H., Rabeharisoa L., Michellon R., Moussa N., Morel C., 2009- L'effet du système de culture semis direct sous couverture végétale (SCV) sur les ions phosphates dans la solution des sols cultivés de Haute Terre de Madagascar. *Étude et Gestion des Sols*. 17(2), 119-130.

Arrouays D., Kicin J.L., Péliissier Ph., Vion I., 1994- Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation. *Etude et Gestion des Sols* n°2, 29- 38.

Aubert, 1955 -Les sols latéritiques. Extrait des actes et comptes rendus du Vè Congrès international de la science du sol, Léopoldville. Volume 1, 103-118.

Aubert, 1959- Influences de la végétation sur le sol. ORSTOM n° 14289, 10-22.

Balesdent J., 1996- Les biotransformations du carbone et de l'azote. In: *Sol : interface fragile*, Stengel P, Gelin S. coord. Edition INRA, 67-82.

Barroin G., 2004- Phosphore, azote, carbone... du facteur limitant au facteur de maîtrise. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA* n°52, p25.

Bayer C., Neto L., Mielniczuk J., Dieckow J., Amado Y., 2006- C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed. *Geoderma* 122, 110-119.

Bayer C., Neto L., Mielniczuk J., Pavienato A., Dieckow J., 2009-Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research* 86, 237-246.

Besairie, 1973- Précis de géologie Malgache. *Annales géologiques de Madagascar* n°XXXVI, p141.

Boissezon P, 1965- Les matières organiques des sols ferrallitiques. *Pédologue de l'ORSTOM, Centre de Tananarive*, 10-55.

Bot, A. et Bentes J., 2005- The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food and production. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy*, p 95.

Bourgeat F. and Aubert G., 1972- Les sols ferrallitiques à Madagascar. *Madagascar revue de géographie, Université de Madagascar*, 1-23.

Brossard M., Laurent J.Y., 1992- Le phosphore dans le vertisols de la Martinique. Cahier Orstom. Vol XXVII n°1, 109-119.

Chien S.H., 1989- Potential agronomic value of calcium in some phosphate rocks from South America and West Africa, Soil Soc. 53, 459-462.

Collins, 2006- The tectonic significance of PGM-bearing chromitites at the Ranomena mine, Toamasina chromite district, Madagascar. Ore Geology Review, 70-81.

Collins et Windley, 2002. Madagascar: Heads It's a Continent, Tails It's an Island CIGCES. Geological Sciences, University of Cape Town, Rondebosch 7701, South Africa. Vol. 31, 213-248.

Corbeels M., Scopel E., Cardoso A., Bernoux M., Douzet J., Neto M., 2006- Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrado of Brazil. Global change biology, p 15.

Cornet A., 1973- Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. Terre malgache n°15. Université de Madagascar. Ecole Supérieure Nationale Agronomique. p14.

CPCS, 1967- Classification des sols. Travaux C.P.C.S. Rapp. Mult. p96

Dabin B., 1984-1985- Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXI(1), 7-19.

Dabin B., 1985- Les sols tropicaux acides. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, XXI, 7-19.

Delenne M.F. et Pelletier F., 1981- Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1 000000. ORSTOM. Bondy, France.

Demolon A., 1949- Principes d'agronomie, croissance des végétaux cultivés. 2<sup>e</sup> Edition, Dunod. p 475.

Duchaufour P., Souchier B. and Bonneau M., 1991- Constituants et propriétés du sol. Edition Masson (Paris-FRA). p459

FAO, 2005-Notions de nutrition des plantes et de fertilisation des sols. Manuel de formation. Projet Intrants. p24.

Falinirina V., 2010- Valorisation agricole des apports organiques contenus dans les déchets urbains: qualité des matières organiques et service écosystémiques. Thèse de Doctorat. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques- Université d'Antananarivo, p173.

- Feller C. and Beare M.H., 1997- Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79, 69-116.
- Frossard. E., 2004- Phosphore dans les sols. Cahier de l'environnement, N°368, Office fédéral de l'environnement, Berne. p 180.
- Gavaud M., 1977- Essai sur la classification génétique des sols. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XV, no 1, 63-87.
- Grinand C., Rajaonarivo A., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T.M., Albrecht A. and Le Martret H., 2009- Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16(1), 23-33.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G. and Jarvis A., 2005- Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
- Hottin G., 1976- Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. *Bulletin du BRGM Section IV n°2*, 118-151.
- IPCC, 2007- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, In Cambridge University Press. *The Physical Science Basis*. p 996.
- IUSS Working Group WRB, 2006- World Reference Base for soil resources 2<sup>nd</sup> edition *World Soil Resources Reports N° 103*. FAO, Rome, p 128.
- Jenny, 1986- Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry Volume 2*, 3-27.
- Juma N. G., 1998- The pedosphere and its dynamics: a systems approach to soil science. Volume1. Quality Color Press Inc. Edmonton, Canada. p 315.
- Koné B., Ettien J. B., Amadji G., et Diatta S., 2008- Caractérisation de la tolérance de NERICA à la sécheresse de mi-saison en riziculture pluviale. *African Crop Science Journal* 8(2), 133-145.
- Lal R., 2004-Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1-22.
- Lemercier B., Walter C. , Schwartz C, Saby N., Arrouays D. et Follain S., 2006- Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. *Etude et Gestion des Sols*, Volume 13, 3, 2006 , 165 - 180.

Marchao L., Becquer T., Brunet D., Balbino C., Vilela L., et Brossard M., 2009. Provided for non-commercial research and education use. Soil and Tillage Research, Volume 103, 442-450.

Massenet D., 2008- L'agriculture bio-dynamique, le carbone et l'azote. Étude et Gestion des Sols, Volume 4, p8.

Mathieu V., 2010- Perspectives d'évolution pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée. Agro-systèmes, p5.

McCauley A., Jones C., et Jacobsen J., 2009- Soil pH and organic matter. Nutrient Management Module No. 8. A self-study course from MSU Extension Continuing Education Series. Extension 4449-8. Montana State University, USA, p12.

Monique L. G., 1977- La boîte à moustaches de TUKEY : un outil pour initier à la Statistique MATISSE-CNRS UMR8595. Maison des Sciences Economiques, 106-112.

Morel C., Cachot C., Martinez J., Peu P., Elsass F., Robert M. et Fardeau J.-Cl., 2004- Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier. Étude et Gestion des Sols. Volume 11, 403- 418.

PGRM, 2008- Les unités tectono-métamorphiques de Madagascar modifié. p 30.

Post M. W., 1982 - Global patterns of soil nitrogen storage. Nature 317, 613 – 616.

Rabeharisoa L., 2004- Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Faculté des Sciences- Université d'Antananarivo, Madagascar, p202.

Rajaonarison A., 2012- Caractérisation des propriétés chimiques des sols ferrallitiques dans le cadre du diagnostic agronomique des composantes en riz pluvial dans la zone d'Antsampanimahazo. In ASJA. Mémoire d'Ingénieur, p52.

Rakotomanana F.H. et Robilliard A.S, 2003- Agriculture à Madagascar. INSTAT n°9639, p 26.

Ralaizafisolarioviny N.A., 2012- Fertilisation organique et biodisponibilité de phosphore cas d'utilisation de fumier, de terreau d'Andralanitra et du compost sur le sol ferrallitique des Hautes terres de Madagascar. In ESSA Agriculture. Mémoire d'Ingénieur. Université d'Antananarivo, p74.

Raunet M., 1997- Les Ensembles Morpho-pédologiques de Madagascar, Projet Conservation des sols, Cirad, Madagascar, p 76.

Razafimahatratra H.M, 2011. Sols Malgaches et spectroscopie dans le moyen infra-rouge : classification, caractérisation et sensibilité aux climats, Thèse de Doctorat. p 189.

Razafimbelo T. M, 2005- Stockage et protection de carbone dans un sol ferrallitiques sous-systèmes en semis direct avec couverture végétale des hautes terres Malgaches Thèse de Doctorat. p 123.

Razafimbelo T.M, 2008- Les sols tropicaux en semis directe sous couvertures végétales. Terre Malgache n°15, p 177.

Razafindramanana N.C., 2006- Afforestation et stockage de carbone en lisière Ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar). Mémoire de DEA.

Département des eaux et Forêts- Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo, p78.

Riquier J., 1966- Les sols ferrallitiques. Cahier ORSTOM, Série Pédologique, 4(4), 33-37.

Riquier J. et Bourgeat F., 1966- Histoire des sols ferrallitiques de Madagascar. Cahier ORSTOM, n° 10975, p8.

Roederer P., 1971- Les sols de Madagascar, ORSTOM, p 58.

Sanjay K., Lauren G., Duxbury J., 2009- Influence of soil texture and cultivation on carbon and nitrogen levels in soils of the eastern Indo-Gangetic plains. Geoderma 153, 304-311.

Sanchez P.A.et Buol G., 1984- Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity, 471-514.

Segalen, 1956- Les principaux groupes de sols du Nord-ouest de Madagascar. ORSTOM, 561-564.

Segalen P., 1994- Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome I, II, III, p579.

Simon and Schuster, 1978- Rocks and Minerals. Edited by Martin P., George H. & Joseph P., The American museum of natural history, p 377.

Sisti C., Santos H., Kohhann R., Alves B, Urquiaga S., Boddley M., 2004- Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil, Soil & Tillage Research 76, 39-58.

Sollins P., Homann P. et Caldwell B. A., 1996- Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. Geoderma 74, 65-105.

Tucker R., Brasier M., McCarron G., Leather G., Allen P. et Shields G., 1997- New U-Pb zircon dates for the Neoproterozoic Ghubrah glaciation ,Geology Vol 28, 175-178.

Walkley A. and Black I.A., 1934- An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science37, 29-38.

Zinn Y., Lal R., Resck D, 2005- Changes in soil organic carbon stock under agriculture in Brazil. Soil & Tillage84, 28-40.

## Annexes

---

Annexe1 : Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte de Delenne et Pelletier, 1981 (in Grinand et al. 2009)

<b>Classes</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Aire relative (%)</b>
Sols ferrallitiques	274 561	46,5
Sols ferrugineux	164 510	27,8
Sols fersiallitiques	16 375	2,8
Sols peu évolués d'apport	37 752	6,4
Sols peu évolués d'érosion	24 824	4,2
Sols minéraux bruts	20 252	3,4
Sols hydromorphes	15 172	2,6
Sols podzolisés	5 598	0,9
Vertisols	5 341	0,9
Andosols	542	0,1
Sols calcimagnésiques	n.c.*	-
Sols sodiques	n.c.*	-
Roche à nu	26 097	4,4

n.c.\* : non cartographié

Annexe2: Proportion des différentes classes de sol de Madagascar selon la carte

FAO, 1974

<b>Groupes</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Aire relative (%)</b>
Luvisols	60 083 661	10,2
Cambisols	106 317 440	18
Regosols	54 394 709	9,2
Arenosols	57 502 344	9,7
Vertisols	7 146 038	1,2
Fluvisols	25 278 558	4,3
Gleysols	6 480 420	1,1
Histosols	1 620 121	0,3
Nitisols	39 597 850	6,7
Acrisols	223 547	0,04
Solonchak	148 943	0,03
Lithosols	21 558 230	3,7
Ferralsols	209 104 069	35,4
Acrisols	223 547	0,04
Non cartographié	1 274 120	0,2

### Annexe 3: Informations sur les échantillons

Site	Coordonnées GPS						Altitude	Topographie	Position du colline	Type de sol	Type de roche	Pierrosité de surface	Type et taux de couverture
	18°	55'	472	48°	13'	848							
RN44-1	18°	55'	472	48°	13'	848		Plat	plat	??? Noir en haut jaune en bas	??	Présence de beaucoup de particule de quartz	bozaka+anjavidy 25% pce eucalyptus à 40m
RN44-2	18°	46'	52	48°	15'	461	940,2 m	colline	2/3 sup	Ferralitique	?	Faible	Bozaka 60%
RN44-3	18°	36'	23	48°	16'	833	903,6 m	plat	plat	Ferralitique	?	Faible	bozaka+anjavidy 50% pce d'eucalyptus à proximité
RN44-4	18°	26'	422	48°	15'	835	916,2 m	Pente forte >12%	Milieu versant	Ferralitique jaune sur rouge/rajeuni	?	faible	bozaka+eucalyptuspce litière≈3cm
RN44-5	18°	07'	263	48°	15'	810	978,9 m	plat	plat		?	faible	bozaka+eucalyptus à côté pce anjavidy
RN44-8	17°	50'	488	48°	20'	122	814,8 m	plat	Presque plat	Ferralitique	?	Faible	bozaka à 60% pce eucalyptus à proximité
RN44-7	17°	58'	742	48°	15'	646	835,5 m	pente >20%	Milieu	Ferralitique	?	Moyen pce du grain de quartz	bozaka 80%
RN44-6	18°	16'	682	48°	15'	890	857,7 m	plat	plat	Ferralitique jaune	?	Faible	bozaka à 70% pce eucalyptus à proximité
RN7a-7	19°	43'	131	47°	08'	869	1,630 m	pente faible	1/3 inf	Ferralitique			bozaka 80%
RN7a-6	19°	37'	288	47°	14'	517	1,610 m	pente forte >40%	1/3 inf	Ferralitique		élevé	bozaka 70%
RN7a-5	19°	36'	813	47°	20'	243	1,602 m	pente très faible<5%	milieu	Ferralitique	Granite	élevé	bozaka 70%

Site	Coordonnées GPS						Altitude	Topographie	Position du colline	Type de sol	Type de roche	Pierrosité de surface	Type et taux de couverture
	19°	28'	690	47°	25'	997							
RN7a-4	19°	28'	690	47°	25'	997	1,489 m	plat					bozaka 20%
RN7a-3	19°	20'	950	47°	27'	620	1,438 m	pen<15%	1/2 sup	Ferrallitique		faible	bozaka 80%
RN7a-2 près de Behenjy	19°	11'	681	47°	29'	472	1,404 m	pen<10%	2/3 sup	Ferrallitique	Granite	faible	bozaka 60%
RN7a-1 Ambatofotsy	19°	03'	258	47°	33'	258	1,366 m	pen<20%	1/3 sup	Ferrallitique	Granite	moyen	bozaka 90%
RN1-1	18°	56'	692	47°	22'	621	1,270 m	Pente douce<20%	1/2 pied	Ferrallitique		Faible	
RN1-2	19°	01'	476	47°	13'	894	1,367 m	Pente douce<15%		Ferrallitique		Faible	Bozaka 70%
RN1-3	18°	59'	879	47°	04'	781	1,394 m	Pente douce <15%		Ferrallitique		élevé	
RN1-4	18°	58'	264	46°	56'	174	1,399 m	plat		Ferrallitique	Granite	moyen	bozaka 80 % des arbres à côte
RN1-5	18°	57'	474	46°	48'	616	1,184 m	pen<15%	1/3 sup	Ferrallitique		moyen	bozaka 30à40%
RN1-6	18°	58'	809	46°	39'	36	1,177 m	plat		Andosol		faible	
RN1-7	18°	59'	732	46°	29'	15	912 m	± plat		Ferrallitique		faible	bozaka 50%
RN1-8	18°	56'	345	46°	21'	405	953 m	Pente faible < 5%		Ferrallitique		faible	Bozaka 70%
RN1-9	18°	55'	397	46°	10'	866	853 m	Pente<20%		Ferrallitique	Granite	faible	Bozaka 70% pce de termitière
RN1-10	18°	49'	593	46°	03'	986	888 m	plat		Ferrallitique		faible	bozaka 60%

Annexe 4 : matériels



Mortier



Tamis



Micropipette



Titrateur rédox automatique



Balance de précision



Spectrophotomètre



Plaque chauffante



Dispenset

Annexe 5: Test non paramétrique des analyses de sol

**1-Test statistique pour la densité apparente :**

**\*0-10cm**

Variable	Nombres d'échantillons	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
DA 0-10 cm Arénosols	11	0,676	1,713	1,415	0,297
DA 0-10 cm Cambisols	37	0,660	1,779	1,336	0,227
DA 0-10 cm Ferralsols	26	0,687	1,714	1,320	0,230
DA 0-10 cm Luvisols	10	1,016	1,623	1,399	0,178
DA 0-10 cm Nitisols	16	0,985	1,750	1,365	0,205
DA 0-10 cm Vertisols	4	1,282	1,492	1,399	0,099

**\*10-20 cm**

Variable	Nombres d'échantillons	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
DA 10-20 cm Arénosols	11	1,193	1,834	1,507	0,181
DA Cambisols 10-20	37	0,896	1,648	1,358	0,174
DA Ferralsols 10-20	26	1,054	1,785	1,393	0,202
DA Luvisols 10-20	10	1,338	1,753	1,508	0,119
DA Nitisols 10-20	16	1,135	1,610	1,416	0,137
DA Vertisols 10-20	4	1,195	1,408	1,321	0,101

**\*20-30 cm**

Variable	Nombres d'échantillons	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
DA Arénosols	11	1,252	1,719	1,560	0,148
DA Cambisols	37	1,085	1,689	1,444	0,169
DA Ferralsols	26	1,054	1,785	1,393	0,202
DA Luvisols	10	1,338	1,753	1,508	0,119
DA Nitisols	16	1,135	1,610	1,416	0,137
DA Vertisols	4	1,114	1,459	1,313	0,149

## 2-Pour la teneur en C organique :

### \*0-10 cm

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
C‰ Arénosols	11	4,516	27,279	15,517	7,051
C‰ Cambisols	36	6,589	56,589	19,897	11,794
C‰ Ferralsols	26	6,480	56,272	31,424	12,942
C‰ Luvisols	10	5,974	22,249	12,908	6,245
C‰ Nitisols	16	3,763	35,710	14,624	9,256
C‰ Vertisols	4	3,048	23,675	12,265	8,759

### \*10-20 cm

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
C‰ Arénosols	11	2,567	20,618	9,705	5,363
C‰ Cambisols	36	2,906	36,085	12,804	7,297
C‰ Ferralsols	26	5,427	46,464	22,520	10,367
C‰ Luvisols	10	4,050	17,432	7,779	4,764
C‰ Nitisols	16	2,731	26,910	8,598	5,898
C‰ Vertisols	4	3,048	7,696	5,403	2,614

**\*20-30 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
C‰ Arénosols	11	1,947	15,310	6,290	4,293
C‰ Cambisols	36	2,231	16,349	7,422	3,248
C‰ Ferralsols	26	4,110	41,007	15,999	9,755
C‰ Luvisols	10	2,274	11,194	5,082	3,435
C‰ Nitisols	16	1,951	12,086	6,190	3,208
C‰ Vertisols	4	2,884	5,421	3,871	1,198

**3-Pour les stocks de carbone****\*0-10 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Stock C/ Arénosols	11	5,854	42,106	22,970	10,806
Stock C/ Cambisols	36	7,724	65,098	25,472	13,971
Stock C/ Ferralsols	26	9,317	63,611	39,776	14,064
Stock C/ Luvisols	10	8,900	30,780	17,803	7,885
Stock C/ Nitisols	16	4,921	47,514	19,441	11,919
Stock C/ Vertisols	4	3,640	30,400	16,336	11,312

**\*10-20 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
StockC/Arénosols	11	3,264	31,865	15,178	8,281
StockC/ Cambisols	36	4,552	52,926	17,848	10,311
StockC/ Ferralsols	26	7,154	55,624	29,439	11,441
StockC/ Luvisols	10	5,697	25,316	10,907	6,529
StockC/ Nitisols	16	3,632	38,259	11,754	8,074
StockC/ Vertisols	4	3,212	10,670	7,117	3,707

**\*20-30 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Stock C/ Arénosols	11	2,437	21,705	9,129	6,540
Stock C/ Cambisols	36	3,339	22,978	9,728	4,466
Stock C Ferralsols	26	6,231	43,775	21,164	10,692
Stock C/ Luvisols	10	3,043	19,623	7,397	5,172
Stock C/Nitisols	16	2,692	17,473	8,424	4,296
Stock C/ Vertisols	4	2,995	8,859	5,667	2,895

### **3- Pour le P total**

#### **\*0-10 cm**

Variable	Nombres d'échantillons	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P Arénosols	11	175,759	751,490	425,142	197,360
P Cambisols	33	97,986	799,480	361,737	168,961
P Ferralsols	26	144,883	973,180	433,357	260,030
P Luvisols	10	116,349	1018,194	430,398	309,870
P Nitisols	20	121,806	830,050	408,341	236,388
P Vertisols	4	132,243	634,017	323,882	232,722

#### **\*10-20 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P Arénosols	11	136,906	697,347	341,241	211,484
P Cambisols	33	84,283	570,644	260,773	116,466
P Ferralsols	26	80,969	771,235	317,177	212,665
P Luvisols	10	42,074	918,440	364,896	288,972
P Nitisols	20	88,007	610,748	310,739	172,261
P Vertisols	4	120,609	477,778	326,440	178,906

### **\*20-30 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P Arénosols	11	90,127	492,404	220,035	138,187
P Cambisols	33	41,098	462,100	203,226	115,503
P Ferralsols	26	23,665	694,663	244,612	176,639
P Luvisols	10	28,742	712,986	277,760	194,877
P Nitisols	20	47,458	485,838	223,526	152,798
P Vertisols	4	80,841	392,270	210,747	130,794

### **4-Phosphore et roche-mère**

#### **\*0-10 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P -Gneiss à biotite	7	303,426	795,044	504,295	172,431
P - Gneiss mafique	35	98,889	973,180	420,606	251,505
P -Granites	3	97,986	169,455	144,391	40,231
P - Grès	43	79,675	1018,194	367,647	213,643
P - Leptynites	2	419,760	799,480	609,620	268,503
P - Métapélites	2	226,761	329,431	278,096	72,599

**\*10-20 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P - Gneiss à biotite	7	216,027	610,748	415,025	138,304
P - Gneiss mafique	35	80,969	771,235	322,028	207,327
P - Granites	3	87,143	163,613	122,005	38,679
P - Grès	43	42,074	918,440	278,435	177,642
P - Leptynites	2	328,628	570,644	449,636	171,132
P - Métapélites	2	247,749	294,494	271,121	33,054

**\*20-30 cm**

Variable	Nombres d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
P - Gneiss à biotite	7	221,571	585,361	422,399	107,112
P - Gneiss mafique	35	23,665	694,663	236,602	162,981
P - Granites	3	67,830	116,778	86,563	26,417
P - Grès	43	28,742	873,426	290,985	207,048
P - Leptynites	2	294,138	319,668	306,903	18,053
P - Métapélites	2	218,509	258,103	238,306	27,998

## **Annexe 6 : PROTOCOLES D'ANALYSE DES SOLS AU L.R.I**

### **1-Mesure d'humidité**

- ✓ Peser la boîte à tare vide, noter le poids (T)
- ✓ Rajouter environ 10 g de sol humide (T+SH)
- ✓ Mettre à l'étuve 105°C pendant 24 heures (en théorie jusqu'à poids constant)
- ✓ Sortir de l'étuve, refroidir au dessiccateur, peser et noter le poids de sol sec (T+SS)

$$\text{Humidité pondérale en \%} = [(T+SH) - (T+SS)] \times 100 / [(T+SS) - (T)]$$

soit  $\text{perte d'eau à } 105^{\circ}\text{C} \times 100 / \text{masse du sol sec}$

### **REMARQUE**

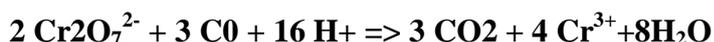
Par convention, l'humidité des sols est toujours exprimée en % du sol sec.

### **2-Dosage du carbone organique (Méthode de WALKLEY et BLACK)**

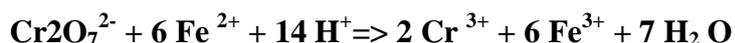
#### **Principe**

La matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. On ne considère que la chaleur de dissolution de H<sub>2</sub>O (120°C) est suffisante pour oxyder 77 % du carbone. L'excès de dichromate est dosé par le sel de Mohr.

La réaction d'oxydation du carbone peut s'écrire :



La réaction de titrage du dichromate par le sel de Mohr peut s'écrire :



#### **-Préparation des solutions**

- ✓ **Bichromate de potassium, solution N** ( $M_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} = 294.19$  ; solution normale pour rédox = M/6)

Peser exactement 49.032 g de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  séché à l'étuve à 105°C. Les dissoudre dans 800ml d'eau distillée. Compléter le volume à 1000 ml dans une fiole jaugée.

- ✓ **Acide sulfurique, solution 0.5 N environ**

Verser 14 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré ( $d = 1,84$ ) dans 1 litre d'eau distillée. Utiliser cette solution pour la préparation du sel de Mohr

✓ **Sel de Mohr [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Fe (SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 6 HO], solution 0.5 N**

Dissoudre 196.1 g de sel de Mohr pour 1 litre de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 N. Déterminer le titre exact du sel de Mohr par le dichromate chaque jour de dosage. Conserver la solution en flacon brun. Cette solution ne se conserve pas plus de 3 jours (si conservation plus longue, dépôts de fer ferreux qu'il faudra nettoyer à l'acide).

**PREPARER LE VOLUME MINIMUM NECESSAIRE**

**-Mode opératoire**

- ✓ Peser un poids P de sol broyé à 200 µm. La prise P doit contenir 5 à 12.5 mg de carbone.

Elle est déterminée en fonction du taux d'azote du sol pour un rapport C/N supposé égal à 10. Si on ne connaît pas la teneur en azote: faire un premier essai sur une prise de 0.5 g de terre (compost: 0.5 g ; engrais: 0.025 g ; sol riche: 0.25 g ; sol pauvre: 0.5 g)

**DANS TOUS LES CAS, LA PRISE NE DOIT PAS DEPASSER 5 g**

- ✓ Mettre la prise P dans une fiole cylindro-conique de 125 ml.
- ✓ Faire un témoin sans sol (titrage du sel de Mohr par le dichromate).
- ✓ Ajouter 5 ml de dichromate N à la pipette automatique

10 ml d'acide sulfurique concentré (d = 1, 84) avec la dispensette.

- ✓ Agiter une minute. Laisser 30 minutes sur une plaque isolante résistante à la chaleur (bois).
- ✓ Ajouter 100 ml d'eau distillée puis un barreau aimanté
- ✓ Introduire l'électrode redox et la pointe de burette dans la fiole

**-Calculs**

a) Détermination du poids P de la prise d'essai :

Si on connaît la teneur en azote : calculer P à partir de la formule suivante :

$$P = \frac{7.5}{10 N^{o/oo}}$$

7.5 est le poids moyen en mg de carbone dans la prise P.

10 est la valeur moyenne du rapport C/N

N o/oo est la teneur en azote en g pour 1000g de sol.

Si on ne connaît pas la teneur en azote: faire un premier essai sur une prise de 0.5 à terre.

### -Calcul des limites du volume de sel de Mohr :

Soient :  $V_t$  le volume de sel de Mohr nécessaire pour le témoin

$V_s$  le volume de sel de Mohr nécessaire pour l'échantillon

$V_s$  doit être inférieur à  $(C > 5 \text{ mg})$ , soit  $V_s \text{ maxi} = 0.74 V_t$

$V_s$  doit être supérieur à  $(C < 12.5 \text{ mg})$ , soit  $V_s \text{ mini} = 0.36 V_t$

Soit  $V_S$  compris entre 3.6 ml et 7.4 ml pour 5 ml de  $K_2 Cr_2 O_7 N$  et sel de Mohr N/2

### - Calcul de la prise P' pour le second essai :

Seulement pour le cas où V sort des limites :

Soient C mg de carbone dans la 1ère prise P :  $C \approx (V_t - V_s) \cdot 2$

$C'$  mg de carbone recherché pour la prise P' :  $C' \approx 8$  e poids P' de sol pour la seconde prise est donné par la formule approchée :

$$P' = \frac{4P}{V_t - V_s}$$

### -Expression des résultats

5 ml de dichromate correspond à soit 19.5 mg de C (voir base théorique)

Soient P la prise d'essai en grammes

$V_t$  le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour le témoin

$V_s$  le volume de sel de Mohr 0.5 N en ml pour l'échantillon

$C_{o/oo}$  le poids de carbone en g pour 1000g de terre

$$C_{o/oo} = (V_t - V_s) \times \frac{19.5}{V_t} \times \frac{1}{P}$$

On obtient la teneur en matière organique M.O en multipliant le résultat ci-dessus par 1.724.

### 3-Mesure du phosphore total

#### EXTRACTION

**Réactif :** Acide perchlorique concentré ( $HClO_4$ )

**Procédé d'extraction :**

Peser exactement environ 0,1g de sol broyé à 0,2mm dans un tube pyrex de 12ml

2- Ajouter avec la dispensette 2ml de  $HClO_4$  concentré et homogénéiser au vortex

3-Placer les tubes + mini-entonnoirs dans le bloc chauffant réglé à 132°C, puis monter la température à 205°C ; laisser bouillir 2h à partir du moment où l'affichage a atteint 200°C

- 4-Laisser refroidir dans le bloc chauffant, puis placer les tubes sur un portoir plastique
- 5-Transvaser le contenu des tubes dans une série de fioles jaugées de 50ml en rinçant les tubes à l'eau distillée ; ajuster au trait de jauge à l'aide d'une pipette automatique de 1000 $\mu$
- 6-Boucher les fioles avec du parafilm, bien homogénéiser par retournement, puis transvase environ 10ml dans une série de tubes (on peut alors mettre au lavage les fioles jaugées)
- 7-Laisser décanter le solide dans les tubes pendant une nuit (milieu final HClO<sub>4</sub> 4%)

## **DOSAGE PAR LA METHODE DE MURPHY ET RILEY**

### **Réactif A**

- Dissoudre 12 g de molybdate d'ammonium dans 250 ml d'ED et 0.2908 g d'émétique KSbOC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub> dans 100 ml d'ED (ajuster)
- Mélanger les 2 solutions à 1 l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 N (139 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Concentré dans un litre d'eau)
- Diluer à 2 litre avec ED et conserver dans un flacon en pyrex brun

### **Réactif B**

Dissoudre 1,056 g d'acide ascorbique dans 200 ml du réactif A, juste avant l'emploi. Ajuster les proportions au nombre d'échantillons à analyser.

**NB : Conservation 24h maximum, à l'abri de la lumière (flacon coloré ou placard)**

### **Points de gamme**

- Solution mère P 1000ppm : KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> séché 1 nuit à 60°C, pesé 4,3937 g dans 1 litre d'ED
- Solution fille à 10ppm de P : 500 $\mu$ l de solution mère dans 50ml d'ED
- Gamme d'étalonnage calculée pour un volume final de 10 ml, préparée à partir de la solution fille à 10ppm à 10 ppm de P (Concentration HClO<sub>4</sub> identique à celle des échantillons dosés) dans une série de tubes d'environ 35ml (long 160 mm, diamètre 16mm).

Gamme P (ppm)	µl solution P 10 ppm	µl HClO <sub>4</sub> conc	µl Eau Distillée
0.00	0	100	9900
0.03	30	100	9870
0.10	100	100	9800
0.25	250	100	9650
0.50	500	100	9400
0.75	750	100	9150
1.00	1000	100	8900

**Remarque : gamme ci-dessus uniquement valable pour 2.5ml extrait HClO<sub>4</sub> 4% + 7.5 ml ED**

### DOSAGE COLORIMETRIQUE

-Dans une série de tubes (environ 30 ml) numérotés, préparer suivant le tableau ci-dessous

Gamme d'étalonnage	Echantillons
Dans chaque tube de la gamme	Surnageant : 2.5ml (à la pipette, sans agiter) Eau distillée : 7.5 ml
Réactif B : 2ml	Réactif B : 2ml

-Agiter au vortex

-Lecture :

Spectrophotomètre allumé depuis 30 minutes, lecture à 882 nm (visible)

Dans une cuve en verre trajet optique 1cm

Après développement de la coloration bleue (10minutes minimum après ajout du réactif B)

Auto zéro de l'appareil sur le zéro de la gamme, puis gamme croissante

Rinçage de la cuve 3 fois avec le point de gamme ou l'échantillon suivant (pas d'eau distillée, sauf avant un blanc de la gamme ou l'attaque ; la différence entre 2 échantillons est toujours inférieure à celle entre un échantillon et l'ED)

Pour une grosse série, mesurer zéro et étalon 0.5 ppm chaque 10 échantillon.

## **EXPRESSION DES RESULTATS**

### **Concentration de P de ppm (=mg L<sup>-1</sup>)**

-dans Excel, tracer avec les valeurs une courbe ppm= f (absorbance)

-ajouter une courbe de tendance linéaire (interception non définie ; afficher l'équation et R2

-calculer le P en ppm à partir de cette équation

$$\text{P Total (mg/kg)} = (\text{ppm filtrat} - \text{ppm blanc}) * 1/\text{dilution} * \text{volume (ml)} / \text{Prise (g)}$$

**Corriger ces résultats de l'humidité résiduelle déterminée par ailleurs (24 h à 105°C)**