

DEDICACE	iv
REMERCIEMENTS.....	v
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES PHOTOS	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES CARTES.....	xii
LISTES DE FORMULES.....	xiii
LISTE DES UNITES.....	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	xvi
GLOSSAIRE	xvii
RESUME	xviii
ABSTRACT.....	xix
FINTINA	xx
INTRODUCTION	1
1. MATERIELS ET METHODES	1
1.1. Présentation de la zone d'étude : Moramanga-Brickaville	1
1.1.1. Localisation de la zone	1
1.1.2. Milieu physique	2
1.2. Les points de prélèvement.....	3
1.3. Mode de prélèvement.....	3
1.4. Analyse des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols	5
1.4.1. Préparation des échantillons	5
1.4.2. Détermination de la densité apparente.....	5
1.4.3. Analyse spectrale des échantillons	6
1.4.4. Détermination de la teneur en C-N-P	7
1.4.5. Calcul des stocks du C, N et P	8
1.5. La cartographie numérique des sols (CNS)	9
1.5.1. Principe général	9
1.5.2. Les données spatiales sur les sols	9
1.5.3. Elaboration des modèles spatiaux.....	10
1.5.4. Prédiction et représentation cartographique des propriétés des sols.....	11
2. RESULTATS	12
2.1. Modélisation de la teneur en Carbone, azote	12
2.2. Statistiques descriptives des composantes des stocks	12
2.2.1. Densité apparente.....	12

2.2.2.	Refus	13
2.2.3.	Teneurs en Carbone, Azote et Phosphore	13
2.2.4.	Stock de C, N et P des sols	14
2.2.5.	Caractéristiques des modèles spatiaux.....	15
2.2.6.	Répartition spatiale des stocks des propriétés des sols	18
3.	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATION.....	22
3.1.	Discussions.....	22
3.1.1.	Sur la méthodologie de cartographie numérique des sols.....	22
3.1.2.	Concernant la modélisation spatial	22
3.1.3.	Discussion sur les résultats	23
3.2.	Recommandations	26
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	27
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	28
	ANNEXES	
	TABLES DES MATIERES	

Figure 1 : Dispositif de prélèvement des échantillons	4
Figure 2 : Caractéristiques des modèles de prédiction des teneurs en C	12
Figure 3 : Caractéristiques des modèles de prédiction des teneurs en N	12
Figure 4 : Importances relatives des variables dans la modélisation des stocks.....	15
Figure 5 : Importances relatives des variables dans la modélisation des stocks.....	16
Figure 6 : Caractéristiques des modèles spatiaux respectivement pour le C, N et P	17

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Séchage en serre des échantillons	5
Photo 2 : Sol broyé et tamisé à 0,2mm	5
Photo 3 : Détermination de l'humidité des échantillons de sol	6
Photo 4 : Analyse au SMIR des échantillons de sol	7
Photo 5 : Oxydation de la matière organique et dosage du mélange avec l'appareil CRISON ..	7
Photo 6 : Pesage des échantillons et libération de l'azote minérale	8

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombres d'échantillons prélevés pendant les travaux de terrain	4
Tableau 2 : Liste des co-variables utilisées dans la cartographie	10
Tableau 3 : Densité apparente des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm.....	13
Tableau 4 : Pourcentage de refus des sols suivant la profondeur su 0-30 cm	13
Tableau 5 : Teneur en C, N et P des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm.....	14
Tableau 6 : Stock de C, N et P des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm	14
Tableau 7 : Comparaison des caractéristiques des modèles spatiaux avec d'autres auteurs.....	24

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation spatiale de la zone Moramanga-Brickaville	1
Carte 2 : Carte pédologique de la zone Moramanga-Brickaville (Hervieu, 1960)	2
Carte 3 : Localisation des points de prélèvement dans la zone Moramanga-Brickaville	3
Carte 4 : Répartition spatiale des stocks de C de la zone Moramanga-Bricakaville	19
Carte 5 : Répartition spatiale des stocks de N de la zone Moramanga-Bricakaville	20
Carte 6 : Répartition spatiale des stocks de P de la zone Moramanga-Bricakaville.....	21

LISTES DE FORMULES

Formule 1 : Densité apparente	5
Formule 2 : Calcul du stock sans correction	8
Formule 3 : Calcul du stock avec correction	9

%	: Pour cent
°	: degré
°C	: degré Celsius
mm	: millimètre
cm	: centimètre
cm³	: centimètre cube
g	: gramme
ha	: hectare
g/cm³	: gramme par centimètre cube
Nm	: nanomètre
g/kg	: gramme par kilogramme
MgC/ha	: Méga gramme de carbone à l'hectare
MgN/ha	: Méga gramme d'azote à l'hectare
MgP/ha	: Méga gramme de phosphore à l'hectare
Gg/ha	: Giga gramme à l'hectare

Annexe 1 : Carte pédologique de reconnaissance d'Hervieu (1960).....	I
Annexe 2 : Coordonnées des points de prélèvements.....	II
Annexe 3 : Tableau caractéristique des profils étudiés.....	III
Annexe 4 : Mesure de l'humidité relative des échantillons.....	V
Annexe 5 : Protocole d'analyse Walkley & Black de la teneur en Carbone (Laboratoire des Radio Isotopes)	VI
Annexe 6 : Protocole d'analyse de la teneur en Phosphore total (Laboratoire des Radio-isotopes)	IX
Annexe 7 : Protocole d'analyse de la teneur en Azote total (Laboratoire des Radio-isotopes)	XI
Annexe 8 : Importances relatives des variables spatiaux	XIII
Annexe 9 : Valeurs des stocks de C, N et P observées versus prédites	XIV
Annexe 10 : Script de l'élaboration des modèles spatiaux sous Rstudio.....	XV

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

CNS	: Cartographie Numérique des sols
MEEF	: Ministère de l'Écologie, de l'Environnement et des Forêts
GPS	: <i>Global Positioning System</i>
SMIR	: Spectrométrie Moyen Infra Rouge
PLS	: Partial Least Square
NDVI	: <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	: <i>Normalized Difference Water Index</i>
NIRI	: <i>Normalized Infra-Red Index</i>
RMSEC	: <i>Root Mean Squared Error of Calibration</i>
RMSEP	: <i>Root Mean Squared Error of Prediction</i>

Cartographie : La cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace réel avec comme objectif la simplification pour une meilleure compréhension des phénomènes.

Modèles spatiaux : Ce sont des représentations schématiques des réalités matérielles ou immatérielles basés sur des méthodes de statistiques spatiales.

Random Forest : Les forêts d'arbres décisionnels (random forest) est une technique d'apprentissage automatique qui effectue un apprentissage sur de multiples arbres de décision entraînés sur des sous-ensembles de données légèrement différents.

Aérosols : Un aérosol est un ensemble de fines particules, solides ou liquides, d'une substance chimique ou d'un mélange de substances chimiques, en suspension dans un milieu gazeux. Émis par les activités humaines ou naturelles (volcans, incendies de forêt).

Spectrométrie : est l'étude expérimentale du spectre d'un phénomène physique, c'est-à-dire de sa décomposition sur une échelle d'énergie, ou toute autre grandeur se ramenant à une énergie (fréquence, longueur d'onde, etc.).

PLS : C'est une méthode itérative développée par Herman Wold dans les années 60 et permet la construction de modèles prédictifs quand les variables sont nombreuses et fortement corrélées entre elles. Cette méthode peut également être utilisée quand le nombre de variables dépasse celui des observations.

Validation croisée ou cross validation : C'est une méthode d'estimation de fiabilité d'un modèle fondé sur une technique d'échantillonnage.

RMSE : C'est la différence moyenne entre les valeurs mesurées et prédites dans l'étape de calibration et de validation.

R^2 : C'est le coefficient de détermination de la qualité d'un modèle. Elle exprime le degré de relation entre les valeurs mesurées et les valeurs de prédiction. Cette valeur étant toujours entre 0 et 1, plus elle proche de 1, plus la relation est dite parfaite

Le sol occupe une place importante dans le fonctionnement de la vie à travers ses services écosystémiques. Afin de favoriser les connaissances des sols dans le but d'améliorer l'agriculture et la gestion des terres à Madagascar, une étude a été réalisée dans les sols malgaches de la zone Moramanga – Brickaville. Cette étude consiste à représenter la répartition spatiale des stocks de Carbone (C), d'Azote (N) et de Phosphore (P) de la zone sur les trente premières centimètres du sol par le principe de la cartographie numérique des sols. Des prélèvements d'échantillons de sols ont été réalisés sur 27 profils représentatifs de la zone d'étude. Ces échantillons ont ensuite fait l'objet : (i) des analyses chimiques conventionnelles au laboratoire, (ii) des analyses par la Spectrométrie à Moyen Infrarouge (SMIR), (iii) et des traitements statistiques avec l'aide de variables spatiales climatiques, topographiques et végétales pour l'élaboration des modèles de prédiction spatiaux pour la cartographie. Les résultats obtenus ont montré que les qualités des modèles obtenus sont identiques pour le Carbone et l'Azote sauf pour le Phosphore qui est très faible par rapport aux précédents. Pour la répartition spatiale des stocks des propriétés des sols, les résultats ont montré que les déterminants de la répartition des stocks sont la végétation et la température pour le Carbone, la végétation pour l'Azote et le type de sol pour le Phosphore. Cependant, l'insuffisance des données spatiales a réduit la qualité des modèles spatiaux et n'a pas permis de prédire les stocks dans certaines parties de la zone d'étude mais qui peuvent être remédié en augmentant les nombres d'échantillonnages ou en utilisant des bases de données de sols existantes.

Mots clés: modèles spatiaux, random Forest, répartition spatiale, stock, variables spatiaux

Soil is important in the running of life with his eco systemic services. To have further knowledge about Malagasy soil, a study was realized at Moramanga – Brickaville area. This study aim to elaborate the spatial allocation of soil properties which are the pools of Carbon, Nitrogen and phosphorus in 0-30 cm depth layer of soil with numeric soil mapping. Soils samples were collected in 27 soils sections in the studied area. Those samples was: (i) conventionally analyzed, (ii) analysed by Mean infra-Red spectrometry (MIRS), (iii) and treated with statistical analysis with other co-variables to obtain spatial models to predict soil properties stocks. Results show that model's attribute are the same for Carbon and Nitrogen. But Phosphorus model prediction has a lower attribute compared to carbon and nitrogen. About the spatial allocation of Carbone, Nitrogen and Phosphorus, results show that the determinant of stock allocation are: temperature and land use for Carbon pools, vegetation for Nitrogen pools and soil type for Phosphorus. Meanwhile, the lack of soil data had reduce the model's attribute and prevent to realize the prediction of the pools of soil's properties in some area.

Keywords: pool, random Forest, spatial model, spatial variable, spatial allocation

Ny tany dia manan-danja mavesatra ho an'ny zava-manan'aina rehetra amin'ny alalan'ireo asa sy andraikitra ataony. Koa mba ahafahana mamakafaka sy mahafantatra ny momba izany tany izany indrindra, mba ampitombona ny vokatra avy amin'ny voly, dia nisy ny fikarohana natao momba ny fitsinjaran-toeran'ny singa Karbaona, Azota ary ny Faosifaoro ao amin'ny 0 ka hatramin'ny 30 santimetatrin'ny tany any amin'ny faritra Moramanga-Vohibinany. Izany dia atao arakin'ny fitsipikin'ny saritany nomerika. Mba anatosana izany fikarohana izany dia nisy ny fitsongana santionan-tany natao tamin'ny toerana 27 tao amin'ilay faritra. Ireo santionan-tany ireo izay nangalana ny fatran'ireo singa telo naafahana nanao ny saritan'ny fitsinjaran-toerany. Ny vokatra azo avy eo dia nahitana fa tsara ny kalitaon'ny lasitra nanaovana ny karbaona sy azote ary ratsy kokoa ny lasitrin'ny faosifaoro. Ary ita ihany koa fa ny fitsinjaran-toeran'ny Karbaona dia miankina amin'ny zavamaniry sy ny hafanana, ny azota miankina amin'ny haben'ny zava-maniry, ary ny faosifaoro kosa dia miankina amin'ny karazan-tany. Kanefa, noho ny tsy fahafantarana ny fatran'ireo singa any amin'ny faritra sasany, izay afaka ahitsy amin'ny alalan'ny fampiasana ireo tahirin-kevitra taloha, dia tsy nahafahana namoaka ny fitsinjaran'ireo singa any amin'izany faritra izany.

Teny manan-danja: fatra, Lasi-tany, fitsinjaran-toerana

INTRODUCTION

Le sol, bien que ce soit le support physique de toutes choses, constitue une ressource essentielle pour l'Agriculture et l'humanité (FAO, 2015b) et offre plusieurs services éco-systémiques (Cardona, 2012). Le sol est un élément important dans la lutte contre l'insécurité alimentaire du fait que la productivité dépend aussi de la fertilité des sols. Il en est de même, la lutte contre le changement climatique grâce à son action à travers la séquestration du Carbone tout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Lal, 2004 ; Lagacherie et *al.*, 2013 ; Fang et *al.*, 2014 ; FAO, 2015a). Dans tous cela, toutes les propriétés des sols : physique, chimique et biologique demeurent importantes. En tant que propriété chimique, le Carbone (C) des sols joue un rôle important dans le fonctionnement global du sol, qui a des conséquences majeures sur la matière organiques des sols. (Soco, 2009 ; Borvon, 2013). Quant à l'azote (N) et le phosphore (P), bien que peu abondant par rapport au carbone, prennent aussi de grande part dans la fertilité des sols (Duguet, 2005).

Il est donc reconnu que le sol occupe une place majeure dans le fonctionnement de la vie. Ainsi, pour pouvoir l'exploiter et l'améliorer dans son utilisation, il est nécessaire de connaître le sol et ses composants. Il est alors indispensable de disposer des outils et des bases de données permettant de mieux le connaître. Avec l'évolution des technologies de recherche, plusieurs outils, rapide et peu coûteux, ont été élaborés et appliqués dans les études pédologiques comme la cartographie numérique des sols (CNS) proposée par McBratney et *al.* (2003). La CNS, étant un outil d'aide à la décision (Poidevin et Bondue, 1999), a connu un essor dans les recherches scientifiques depuis, et a fait l'objet de plusieurs ouvrages et d'articles scientifiques. Pour Madagascar, avec des sols prédominés par les types ferralitiques soit 46% des sols malgaches (Chaminade, 1949), la CNS reste encore minoritaire à l'échelle nationale alors que c'est un pays à vocation agricole où l'agriculture nécessite une importante valorisation des sols. En effet, Grinand et *al.* (2009) ainsi que Ramifohiarivo et *al.* (2016) ont élaboré des représentations cartographiques des sols malgaches mais se porte principalement sur le C. Les représentations cartographiques des autres propriétés des sols comme le N et le P n'ont pas encore été réalisés alors que ces deux éléments jouent aussi un rôle important dans la production agricole (Khasawneh et *al.*, 1980 ; Spiertz, 2009). Ainsi que la répartition spatiale des stocks de C au niveau régionale n'a pas encore été déterminée dans la zone. Dans notre cas, l'étude consiste à élaborer une représentation cartographique des propriétés des sols de la zone Moramanga-Brickaville suivant leurs stocks en Carbone, en Azote et en Phosphore. Les stocks de ces éléments sont calculés pour les 30 premiers centimètres des sols qui sont la zone d'influence biologique (Nihorimbe et *al.*, 2011). La zone Moramanga-Brickaville présente une énorme potentialité en ressources naturelles, avec plus de 100000 ha de réserves naturelles, plus de 300000 ha de parcs nationaux, et des ressources hydriques et édaphiques considérables (INSTAT, 2004), nécessitant aussi une grande valorisation des sols.

Ainsi, les connaissances sur la répartition de ces trois éléments sur une échelle régionale restent moindres pour le cas de Madagascar, plus précisément sur cette zone, mêmes avec le développement de la cartographie numérique des sols utilisant les données satellitaire. Ainsi, se pose alors la question suivante :

Comment se présente-t-elle la répartition spatiale des stocks de carbone (C), de l'azote (N) et du phosphore (P) des sols de la zone Moramanga-Brickaville?

L'objectif global de cette étude est donc d'élaborer une représentation cartographique des stocks des propriétés des sols, notamment pour le C, N et P. Pour atteindre cet objectif, la présente étude a comme objectifs spécifiques:

- Objectif spécifique 1 : Elaborer des modèles spatiaux des propriétés des sols ;
- Objectif spécifique 2 : Elaborer les cartes des stocks de C, N et P des sols sur les 30 premiers centimètres du sol.

Selon Sanders (2007), les modèles spatiaux élaborés lors de la CNS dépendent de la nature statistique des variables et de leurs relations où il est alors nécessaire de savoir les différences entre les modèles pour chaque élément. Et selon Lagacherie et *al.* (2013), les déterminants pour expliquer les variabilités des sols varient d'une étude à d'autres, selon les types de sols et les objectifs attendus. De ces faits, nous avons supposé que:

- Hypothèse 1 : Les qualités des modèles spatiaux varient suivant les propriétés des sols.
- Hypothèse 2 : Les déterminants des variabilités spatiales des propriétés des sols sont différents pour le C, le N et le P.

Pour le traitement du thème, le document sera divisé en trois parties : la méthodologie, que nous allons voir après cette partie introductive, présentant le déroulement de l'étude ; suivie de la présentation et l'interprétation des résultats; et enfin, les discussions et recommandations.

1. MATERIELS ET METHODES

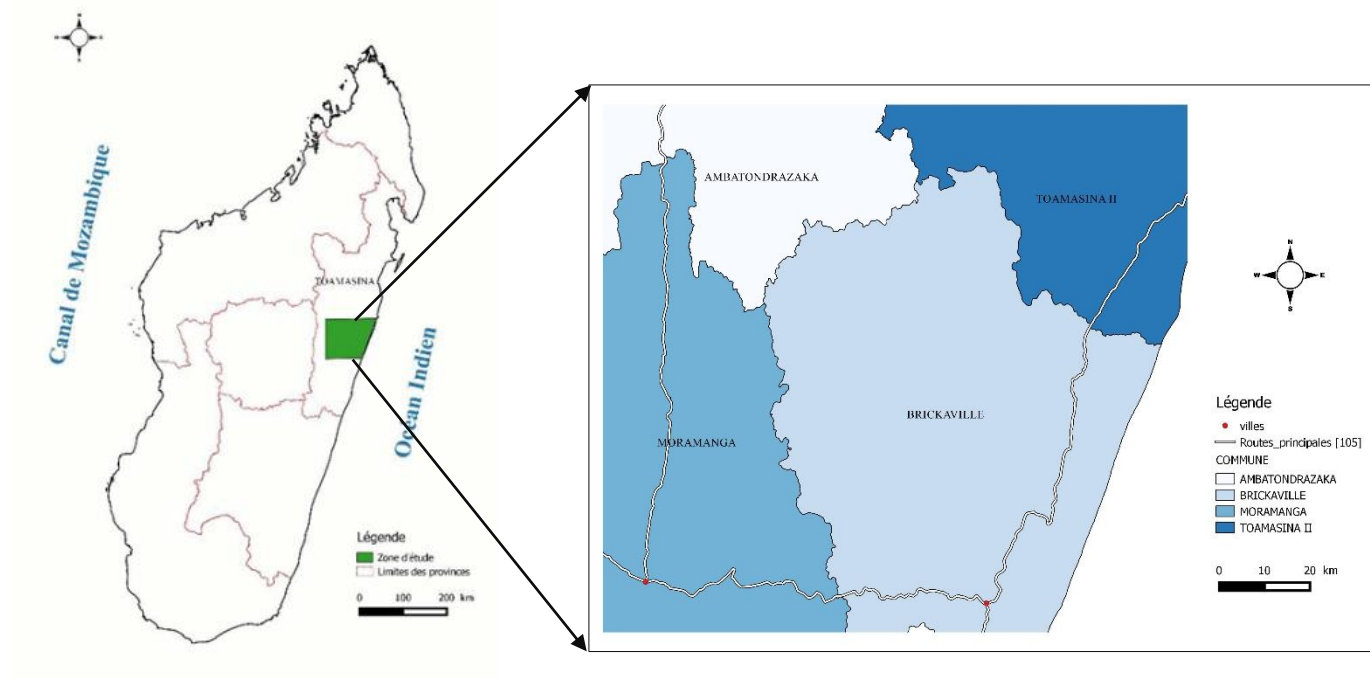
Afin de vérifier les hypothèses avancées, la présente étude s'est basée sur l'élaboration des modèles spatiaux. Et pour parvenir à cela, l'étude s'est déroulée en trois étapes. La première étape consiste à faire des études sur terrains pour : la collecte des échantillons de sols, effectuer des études de profils pédologiques, et des études du paysage. La seconde étape consiste à doser la teneur en C, N et P des échantillons collectés. Et la troisième étape consiste à faire les traitements des données pour la représentation cartographique des propriétés des sols de la zone d'études selon leur teneur en C, N, P.

1.1. Présentation de la zone d'étude : Moramanga-Brickaville

1.1.1. Localisation de la zone

L'étude a été réalisée dans la partie Moyen-Est et Est de Madagascar du côté de Moramanga et Brickaville, dans la province de Toamasina (carte 1). Elle se trouve entre la latitude 18.18400° et 19.10270° Sud et la longitude 48.211988° et 49.37827° Est, avec les mêmes limites que la carte pédologique de reconnaissances d'Hervieu en 1960 (Annexe 1).

Concernant le choix de la zone, la partie Est de Madagascar possède une grande variabilité des types de sols, de la végétation, du relief et de l'occupation des sols (Zone forestière, zone agroforestière, agricole et aussi minière). Mais plus important, la zone Moramanga-Brickaville possède une carte pédologique de reconnaissance à 1/200000, et où le stock d'azote et du phosphore ne sont pas encore représentés en cartographie



Carte 1 : Localisation spatiale de la zone Moramanga-Brickaville

1.1.2. Milieu physique

1.1.2.1. Climat

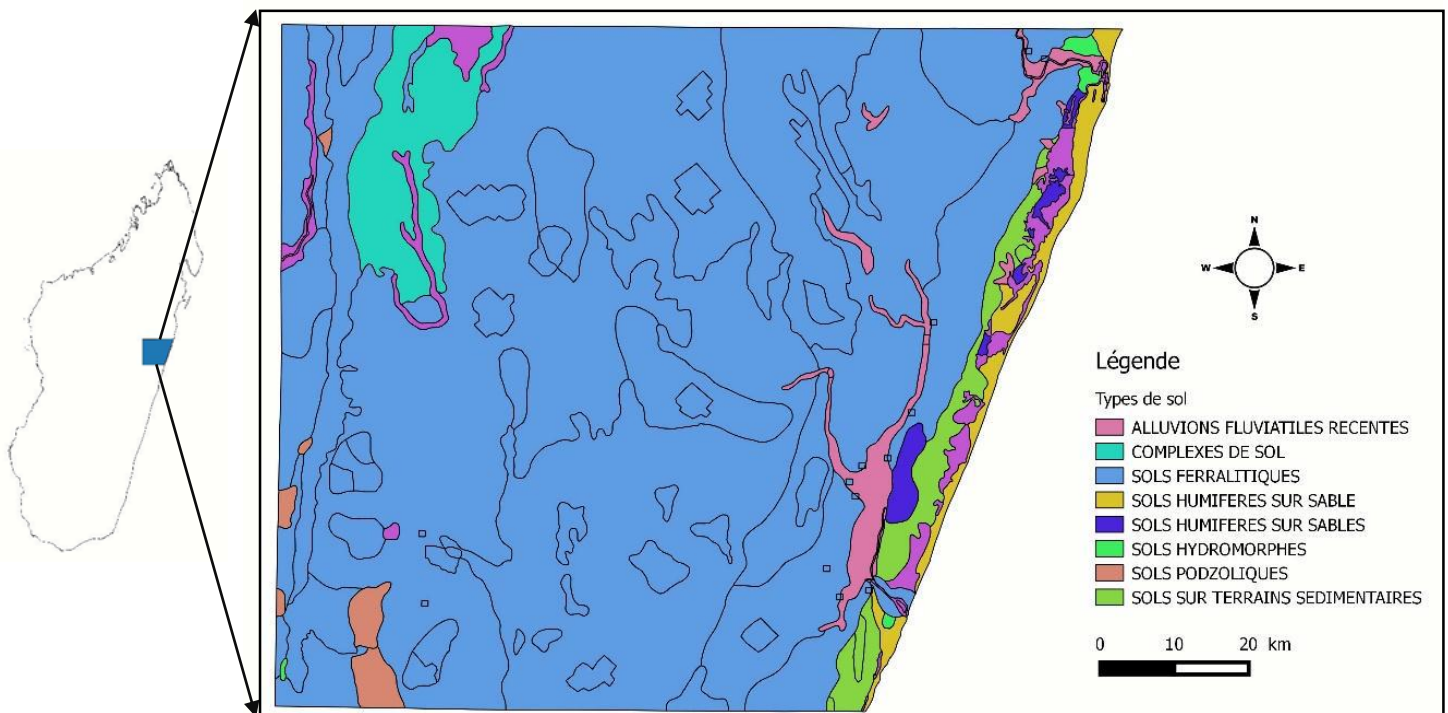
La partie Est de Madagascar possède un climat tropical humide. En effet, les précipitations de la zone sont importantes surtout en allant vers le littoral Est. Même lors des mois les plus secs, les averses persistent encore. La température moyenne est de 23.9 °C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 2864 mm.

1.1.2.2. Végétation

La partie Est présente une grande diversité de végétation (MEEF, 2006) dont :

- La forêt dense humide qui est localisée entre 800 et 2000 m d'altitude. Elle est caractérisée par une strate supérieure arborée, à canopée fermée. La strate herbacée est relativement dense avec une abondance de fougères et d'espèces à larges feuilles.
- Les savoka ou brousse de tavy qui est la résultante des cultures sur brulis.
- Le pseudo steppe, constituée d'une végétation herbeuse
- Les sols nus issus de dégradations importantes des végétations herbeuses

1.1.2.3. Pédologie



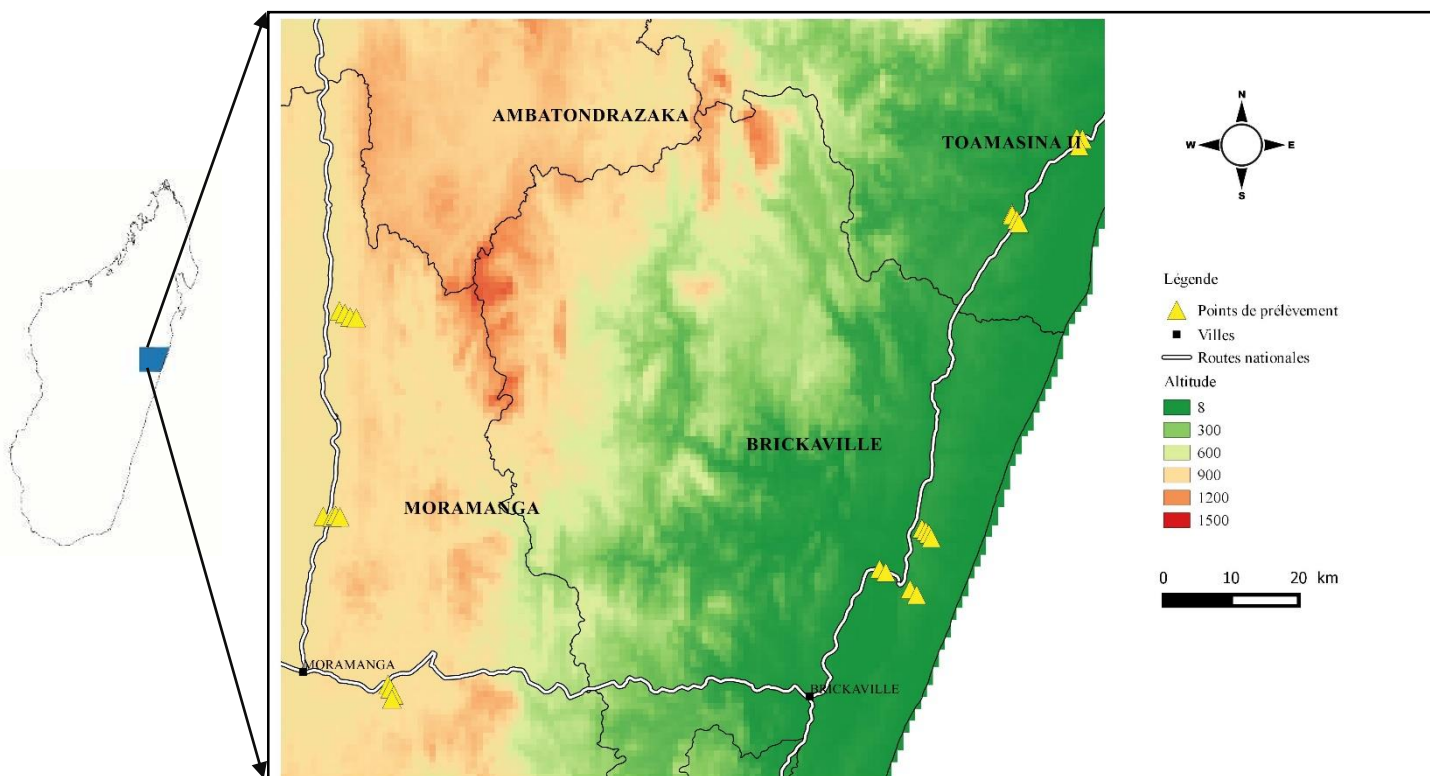
Carte 2 : Carte pédologique de la zone Moramanga-Brickaville (Hervieu, 1960)

La carte pédologique de reconnaissance de la zone d'étude (carte 2), ancienne mais précise, montre l'existence de 8 grands groupes de sols dont : les sols ferralitiques, les complexes de sol, les sols alluvionnaires, les sols hydromorphes, les sols sédimentaires, les complexes de sol et les sols sableux.

1.2. Les points de prélèvement

Le choix des transects des points de prélèvement tient compte des aspects morpho-pédologique et de la végétation du milieu. Quant au choix des sites, pré-localisés (Annexe 2), les critères se basent sur une bonne répartition des points dans la zone et l'accessibilité.

Les prélèvements ont été réalisés sur 27 points (carte 3) dont 7 points dans la zone de Toamasina II à Fanandrana, 8 points localisés à Brickaville, et 12 points localisés dans la zone Moramanga à Ampasipotsy et Amboasary.



Carte 3 : Localisation des points de prélèvement dans la zone Moramanga-Brickaville

1.3. Mode de prélèvement

La localisation des points de prélèvement se fait à l'aide d'un GPS. La sélection des points se base sur le type de sol, le relief, l'occupation du sol et la couverture du sol. Les travaux de

terrain consistent à faire une fosse pédologique de 100 cm x 100 cm x 100 cm pour la description pédologique du sol et effectuer des prélèvements de sol au cylindre creux de 8 cm de diamètre et 10 cm de hauteur sur 5 profondeurs (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 50-60 cm, et 80-90 cm). Chaque échantillon sur ces profondeurs seront mises dans un sachet hermétique pour les conserver jusqu'à l'analyse aux laboratoires. Des prélèvements de sol à la tarière sur les trois sommets d'un triangle équilatérale dont la fosse pédologique est le centre avec un rayon de 10 m sur les couches de 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm seront effectués pour servir d'échantillon composite pour chaque profondeur. Les points de prélèvements des échantillons de sol étaient au centre (dans la fosse) et sur trois points de la circonférence (T1, T2, T3) faisant chacun un angle de 120° (figure 1). Le nombre total des échantillons de sol est présenté par le tableau 1. Les caractéristiques de chaque profil sont montrées dans l'annexe 3.

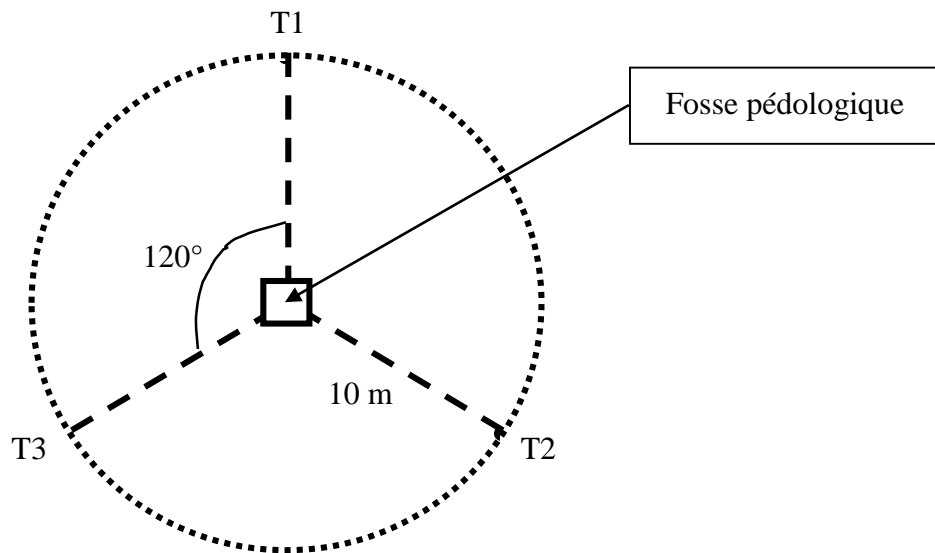


Figure 1 : Dispositif de prélèvement des échantillons

Tableau 1 : Nombres d'échantillons prélevés pendant les travaux de terrain

Point de prélèvements	Profils	Profondeurs (cylindre)	Humidités	Composites (tarière)	TOTAL échantillons
27	1 par points	5 (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm 50-60 cm 80-90 cm)	5 (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm 50-60 cm 80-90 cm)	3 (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm)	351 (27 classes x 1 profils x 13 échantillons)

1.4. Analyse des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols

1.4.1. Préparation des échantillons

Les échantillons sont séchés pendant 15 jours dans une serre (Photo 1) avant d'être broyés et tamisés à 2 mm puis à 0,2 mm (Photo 2). Les échantillons broyés à 0,2 mm sont utilisés pour les analyses des propriétés chimiques c'est-à-dire les déterminations des teneurs en C, N et P. Pendant le broyage, les refus (matériaux outre que le sol ; cailloux, résidus de racines, concrétion) sont triés puis mise à part puis pesés. Ces derniers sont utilisés dans les calculs de stock de C, N et P.



Photo 1 : Séchage en serre des échantillons



Photo 2 : Sol broyé et tamisé à 0,2mm

1.4.2. Détermination de la densité apparente

C'est le rapport entre le poids total sec et le volume de l'échantillon, exprimé en g/cm³. Les échantillons issues du cylindre, provenant des 5 profondeurs, ont été pesées humides sur terrain. Afin de calculer l'humidité relative, des échantillons humides ont été prélevé sur les 5 profondeurs (Annexe 4). Ces échantillons seront pesées à l'état humide (Photo 3), passées à l'étuve à 105°C pendant 24h, puis pesées à sec afin d'obtenir le taux d'humidité relative. La formule pour le calcul de la densité apparente s'exprime comme suit :

$$DA = \frac{Ps}{V}$$

Formule 1 : Densité apparente (Yoro et Godo, 1990)

Avec :

DA = densité apparente (g/cm³)

Ps = Poids sec en (g)

V = Volume du cylindre qui est de 502,65 cm³

La densité apparente est utilisée pour le calcul des stocks de carbone, d'azote et de phosphore des sols.



Photo 3: Détermination de l'humidité des échantillons de sol

1.4.3. Analyse spectrale des échantillons

Les échantillons broyés à 0,2 mm sont passés au SMIR (Spectrométrie Moyen Infra Rouge) avec un spectromètre portatif nommé « the agilent 4100 Exoscan FTIR » (Photo 4). Après l'analyse au SMIR, les spectres sont prétraités sur un logiciel nommé ASAP utilities avant leur traitement avec le logiciel Unscrambler. Ce dernier est utilisé pour identifier les échantillons représentatifs, au nombre de 41, utilisées pour la prédiction des teneurs en C et N des échantillons restants. Les teneurs en C et N de ces 41 échantillons seront dosées conventionnellement, les teneurs obtenues seront utilisées pour la prédiction.

Pour le P, la teneur des 27 points sont dosées conventionnellement sur les 30 premiers centimètres du sol.

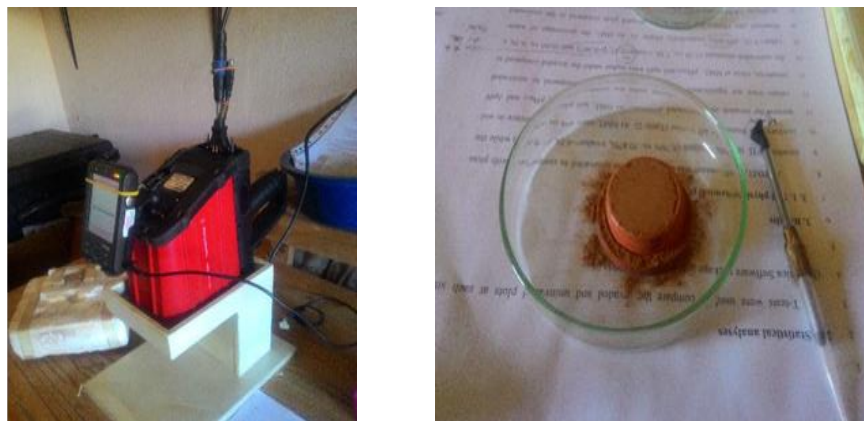


Photo 4 : Analyse au SMIR des échantillons de sol

1.4.4. Détermination de la teneur en C-N-P

1.4.4.1. Dosage conventionnelle des propriétés des sols

a. Dosage conventionnelle de la teneur en Carbone total

La méthode de dosage de carbone, pour les 41 échantillons, utilisée est celle de Walkley et Black (1934) (Annexe 5). La méthode consiste à oxyder la matière organique sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium en excès. Le bichromate de potassium change de couleur selon la quantité de produits réduits dans l'échantillon. Ce virage de couleur peut être comparé à la quantité de carbone organique présent dans cet échantillon. L'excès de dichromate est ensuite dosé par une solution de fer II (sel de Mohr) avec l'appareil de titrage automatique CRISON (Photo 5).



Photo 5 : Oxydation de la matière organique et dosage du mélange avec l'appareil CRISON

b. Dosage conventionnelle du phosphore total

La teneur en P des échantillons de sol a été déterminée par la méthode de colorimétrie au bleu de Jackson (1958) (Annexe 6). L'acide perchlorique attaque et libère le P dans l'échantillon. Pour le dosage colorimétrique, deux réactifs ont été utilisés. Les échantillons sont passés sur un bloc chauffant, refroidies puis laisser se reposer avant la colorimétrie (photo 6). Le dosage colorimétrique est réalisé avec la méthode de Murphy et Riley en utilisant un spectrophotomètre avec la bande de lecture à 882 nm. Les échantillons témoins subissent les mêmes traitements que tous les échantillons.

c. Dosage de l'azote

La méthode de dosage utilisée est la minéralisation Kjeldahl modifiée (2001) en dosant les NH_4^+ par la réaction de Berthelot en utilisant de l'acide sulfurique concentré (Annexe 7). Les

échantillons sont pesés, portés à ébullition pour la minéralisation (figure 5), laissés décanter puis titrés. Le titrage est effectué par l'appareil de titrage automatique CRISON.



Photo 6 : pesage des échantillons et libération de l'azote minérale

1.4.4.2. Dosage par prédiction : SMIR et utilisation des modèles de prédiction du C et N

La prédiction des teneurs en C et N des sols a été effectuée en utilisant un modèle issu de la régression PLS ou régression Partial Least Square en utilisant le logiciel The Unscrambler. La prédiction consiste à élaborer un modèle linéaire à partir des teneurs de C et N issues des dosages conventionnels à partir des spectres obtenues. Les modèles ont subi un prétraitement *smoothing* ou lissage. Cela consiste à réduire les bruits dans les données sans réduire le nombre des variables.

1.4.5. Calcul des stocks du C, N et P

Le calcul des stocks des propriétés des sols a été réalisé pour une épaisseur de sol de 0 à 30 cm, en additionnant les stocks de C, N et P calculés de 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur. Les stocks de C, N et P des sols (en Mg/ha) sont obtenus après calcul en utilisant les teneurs (en g/kg), les densités apparentes, la profondeur des sols (en cm) et le refus (en %), en utilisant la formule d'Ellert et Bethany(1995) :

$$St = \frac{t \times DA \times e}{10}$$

Formule 2 : Calcul du stock sans correction

Avec :

St = stock en Mg/ha

DA = Densité apparente

e = épaisseur en cm

Eliminant les refus, la formule devient :

$$St = \frac{t \times (100 - tr) \times DA \times e}{10}$$

Formule 3 : Calcul du stock avec correction

Avec :

tr = pourcentage de refus

Les stocks des propriétés des sols sont utilisés dans l'élaboration des modèles spatiaux.

1.5. La cartographie numérique des sols (CNS)

1.5.1. Principe général

Le principe général de la cartographie numérique se base sur la prédiction des classes de sol ou des propriétés de sol en utilisant d'une part les données pédologiques disponibles sur la zone à étudier et, d'autre part, les données spatiales représentant des éléments du paysage en relation avec les sols. Ces prédictions sont réalisées par des fonctions de prédiction élaborée soit par des modèles statistiques ou géostatistiques prenant en compte les données disponibles, comme dans notre cas, soit par des formalisations numériques.

1.5.2. Les données spatiales sur les sols

En Cartographie Numérique des Sols, les données spatiales sont principalement les caractérisations du sol et les données de paysages auxiliaires au sol ou co-variables des sols issues du capteur Landsat 8. Les caractérisations des sols regroupent les classes de sols et les mesures des propriétés physiques et chimiques des sols. Les co-variables des sols regroupent les variables présentées par le tableau 2. A noter que les résolutions spatiales des images utilisées dans la CNS ont une résolution de 30 m pour améliorer la précision.

Le NDVI ou l'indice ou indice de végétation par différence normalisée, est construit à partir des canaux rouges (R) et proche infra-rouge (PIR). Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation, et est obtenu par la formule : $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$. L'indice de teneur en eau par différence normalisée ou NDWI utilise la bande proche infrarouge et une bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde. Au lieu de la bande rouge, où la réflectance est affectée par la chlorophylle, le NDWI utilise une bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (entre 1500 et 1750 nm), où l'eau possède un pic d'absorption. Elle est obtenue par la formule : $NDWI = (NIR - IRM2) / (IRM2 + NIR)$. Le NIRI ou Indice d'infra-rouge normalisée est obtenu par la formule : $NIRI = (R - NIR) / (IRM2 + NIR)$. Les bandes bleu, vert et rouge correspondent respectivement à la couleur bleu, vert et rouge dans la plage de la lumière visible.

Tandis que la bande aérosol est liée à la quantité de particules aérosols dans l’atmosphère au-dessus de la zone de capture d’image. L’occupation du sol utilisée est celle de Hansen allant des sols nus, des terres dégradés, des jachères herbeuses et ligneuses, aux zones forestières.

Tableau 2 : Liste des co-variables utilisées dans la cartographie

Catégories	Dénomination	Unités	Min - Max
Pente	pente	Pourcentage	0.10 à 4.55
Altitude	altitude	Mètre	9 à 1020
Occupation du sol	hansen	-	-
Précipitation	precipitat	mm	1501 à 3147
Température	temperatur	degré	18.9 à 24.1
Orientation des pentes	exposition	degré	45 à 315
Couverture végétale	vegkew	%	8 à 74
NDVI	NDVI	µm	0.16 à 0.44
NDWI	NDWI	µm	0.03 à 0.43
Band 1 – Aérosols	Aerosol	nm	9533 à 10238
Band 2 - Bleu	bleu	nm	8590 à 9501
Band 3 - Vert	vert	nm	7923 à 9285
Band 4 - Rouge	rouge	nm	6934 à 10209
Band 5 – Infrarouge moyen1	IRM1	nm	10150 à 17121
Band 6 - Infrarouge moyen2	IRM2	nm	7105 à 13233
NIRI	NIRI	µm	-0.44 à -0.14

Source: www.usgs.com; worldclim

1.5.3. Elaboration des modèles spatiaux

La calibration des modèles spatiaux ont été réalisée sous Rstudio 3.1.3 avec le package random Forest ou Forêts d’arbres décisionnels. RandomForest nous prédit les stocks à partir des caractéristiques des profils et des variables spatiales y afférents.

Sur random Forest, les modèles spatiaux ont été élaborés pour chacun des propriétés des sols. Pour la calibration de chaque modèles, les 27 points ont été divisés en 9 sous échantillons soit

3 points par sous échantillons. La calibration et la validation ont été réalisées par validation croisée, en itérant les 9 sous échantillons en 9 sous modèles spatiaux, puis en prenant comme caractéristiques du modèle spatial final, les caractéristiques des moyennes des valeurs prédites issues des sous modèles obtenus notamment des coefficients de détermination (R^2) et des erreurs standard (RMSE). On a donc obtenus 9 sous modèles pour chaque propriété des sols. Les modèles sont évalués avec leur R^2 et les RMSE. Pour le R^2 plus sa valeur est proche de 1, plus le modèle est robuste. Et plus le RMSE est petit, plus le modèle est robuste. Et concernant les importances des variables, leurs importances sont jugées avec leurs importances relatives issues de randomForest.

1.5.4. Prédiction et représentation cartographique des propriétés des sols

Les stocks des propriétés des sols de la zone d'étude ont été prédits en utilisant les sous modèles spatiaux issues de random Forest. Pour chaque sous modèles, on a obtenu une carte. La répartition finale des stocks est obtenue en faisant la moyenne de toutes les cartes de stocks obtenus pour chaque propriété des sols.

2. RESULTATS

2.1. Modélisation de la teneur en Carbone, azote

Les teneurs en C et N des échantillons ont été obtenues par analyses conventionnelles au laboratoire et par prédiction en utilisant le modèle de prédiction PLS ou régression Partial Least Square issue des données spectrales. Tandis que pour le P, tous les échantillons, au nombre de 27 ont été analysées conventionnellement au laboratoire. Pour le carbone et l'azote, le modèle de Vagen *et al.*, a été utilisée pour la prédiction, celle-ci a été établie avec les 41 échantillons qui ont été analysées au laboratoire par les méthodes, respectivement, de Walkley et Black et de Kjeldahl. Pour la validation, comme le nombre d'échantillon est minime, on a procédé avec une validation croisée.

Les caractéristiques du modèle sont les suivants :

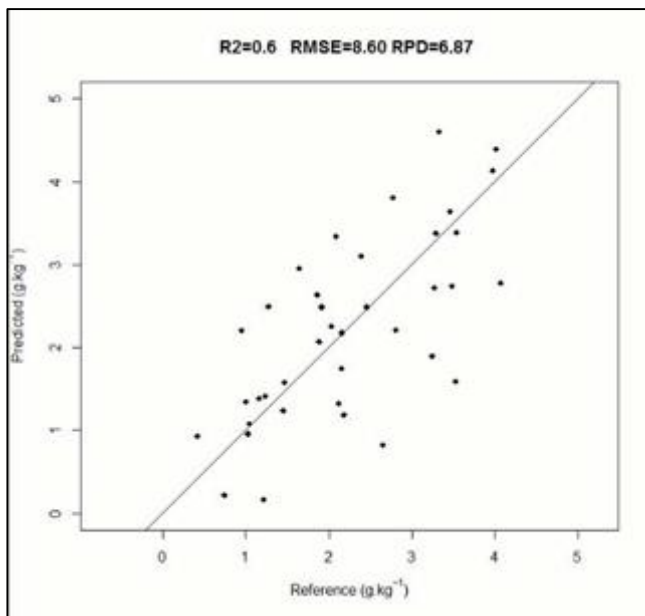


Figure 2 : Caractéristiques des modèles de prédiction des teneurs en C

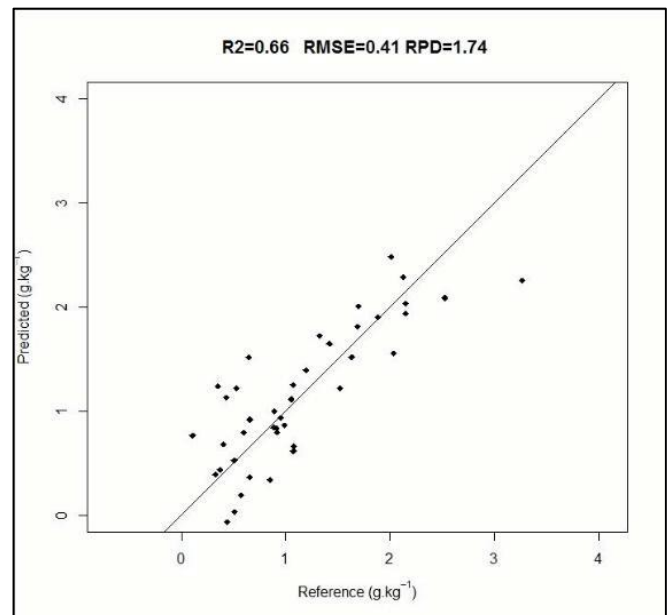


Figure 3 : Caractéristiques des modèles de prédiction des teneurs en N

Pour le C, avec un $R^2 = 0,97$ en calibration et un $R^2 = 0,60$ en cross validation, ainsi que des RMSEC égale à 2,65 et 2,28, la qualité du modèle de prédiction du C est robuste (figure 1). Pour le N, le modèle est robuste avec un R^2 de calibration égale à 0.87 et un R^2 en validation égale à 0,66 ainsi que des RMSEC respectivement de 0,25 et 0,41 (figure 2).

2.2. Statistiques descriptives des composantes des stocks

2.2.1. Densité apparente

Le tableau 3 montre la densité apparente des sols suivant la profondeur.

Tableau 3 : Densité apparente des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm

Profondeur (cm)	Densité apparente	Max	Min
0 – 10	1,15 ± 0,028 a	1,38	0,92
10 – 20	1,26 ± 0,034 ab	1,62	0,97
20 – 30	1,32 ± 0,036 bc	1,58	0,80
0 – 30	1,24		

***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, $p=0,05$)*

On peut voir que la densité apparente des sols augmente suivant la profondeur. Avec une densité apparente moyenne de 1,24 sur 0 à 30 cm de profondeur, elle présente une densité apparente qui est de $1,32 \pm 0,036$, la plus élevée et est significativement différent de la densité des sols dans les horizons 0-10 et 10-20 la plus faible avec $1,15 \pm 0,028$.

L'horizon intermédiaire (10 – 20), avec une densité apparente de $1,26 \pm 0,034$ n'est pas significativement différent de deux autres densités apparentes.

2.2.2. Refus

Le tableau 4 montre le taux de refus, en pourcentage (%), dans le sol.

Tableau 4 : pourcentage de refus des sols suivant la profondeur su 0-30 cm

Profondeur	Refus en %	Max en %	Min en %
0 – 10	2,63 ± 0.63 a	12,01	0
10 – 20	3,42 ± 0,93 a	18,93	0
20 – 30	2,70 ± 0,81 a	16,74	0
0 – 30	8,75		

***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, $p=0,05$).*

Le taux de refus varie de 0 à 18,93% pour tous les points, et ne présente pas de différence significative malgré une grande variabilité dans les différentes profondeurs des sols.

La moyenne la plus élevée est de 3,42% dans les profondeurs de 10 à 20 cm et celle la plus faible est de 2,63 % dans les 10 premiers centimètres du sol.

2.2.3. Teneurs en Carbone, Azote et Phosphore

Le tableau 5 suivant montre la teneur des propriétés des sols, en g/kg de sol dans les 3 profondeurs du sol (en cm) qui sont respectivement de 0-10, 10-20, et 20-30.

Tableau 5 : Teneur en C, N et P des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm

Profondeur (cm)	C (g/kg)	N (g/kg)	P (g/kg)
0-10	51,07 ± 9,06 a	1,92 ± 0,11 a	0,55 ± 0,28
10-20	26,23 ± 5,55 b	1,65 ± 0,11 ab	
20-30	28,33 ± 7,45 b	1,40 ± 0,10 b	
0-30	105,63	4,97	0,55

***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 moyennes de stocks de C dans les sols ne diminuent pas en fonction de la profondeur. On note une diminution significative du stock de C dans les horizons 10 – 20 cm, par rapport à l'horizon 0 – 10 cm ; puis une ré-augmentation, mais non significative, par rapport à 10-20 cm, dans l'horizon 20 – 30 cm. A noter que la teneur la plus élevée est de 51,07 ± 9,06 gC/kg de sol dans les 10 premiers centimètres du sol.

Pour le N, la teneur en N du sol diminue en fonction de la profondeur du sol. Et on note une différence significative de la teneur dans 0-10 cm et 20-30 cm de profondeur. Tandis que la teneur dans 10-20 cm qui est de 1,65 ± 0,11 gN/kg de sol n'est pas significativement différent des deux teneurs précédents.

Le phosphore présente une teneur de 0,55 ± 0,28 gP/kg dans 0 à 30 cm de profondeur.

2.2.4. Stock de C, N et P des sols

Le tableau 6 montre les stocks de C, N et P en Mg/ha, des sols dans les 30 premiers centimètres des sols.

Tableau 6 : Stock de C, N et P des sols suivant la profondeur sur 0-30 cm

	C (Mg/ha)	N (Mg/ha)	P (Mg/ha)
0-10	56,31 ± 10, 28 a	2,13 ± 0,12 a	1,96
10-20	31,53 ± 6,83 b	1,97 ± 0,13 ab	
20-30	36,26 ± 9,71 b	1,78 ± 0,12 b	
0-30	124,1	5,88	1,96

***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 le C, les moyennes des stocks varient de 31.53± 6,83 à 56.31 ± 10, 28 MgC/ha. Elle présente une différence significative dans les 10 premiers cm (51,07 ± 9,06 MgC/ha) des sols par rapport au stock de C dans les profondeurs inférieures.

Pour le N, les stocks diminuent en fonction de la profondeur avec un maximum de 2.13 ± 0,12

MgN/ha et un minimum de $1.78 \pm 0,12$ MgN/ha. On note une différence significative des stocks de N entre l'horizon 0-10 cm et 20-30 cm, tandis que le stock dans l'horizon intermédiaire n'est pas significativement différent de a et b.

Pour le P, le stock moyen sur 0 à 30 cm de profondeur est de 1.96 MgP/ha.

2.2.5. Caractéristiques des modèles spatiaux

2.2.5.1. Importances des variables spatiales

Les variables utilisées dans la modélisation sont toutes importantes, mais il existe ceux qui présentent des importances significatives qui varient suivant les propriétés des sols (Annexe 8).

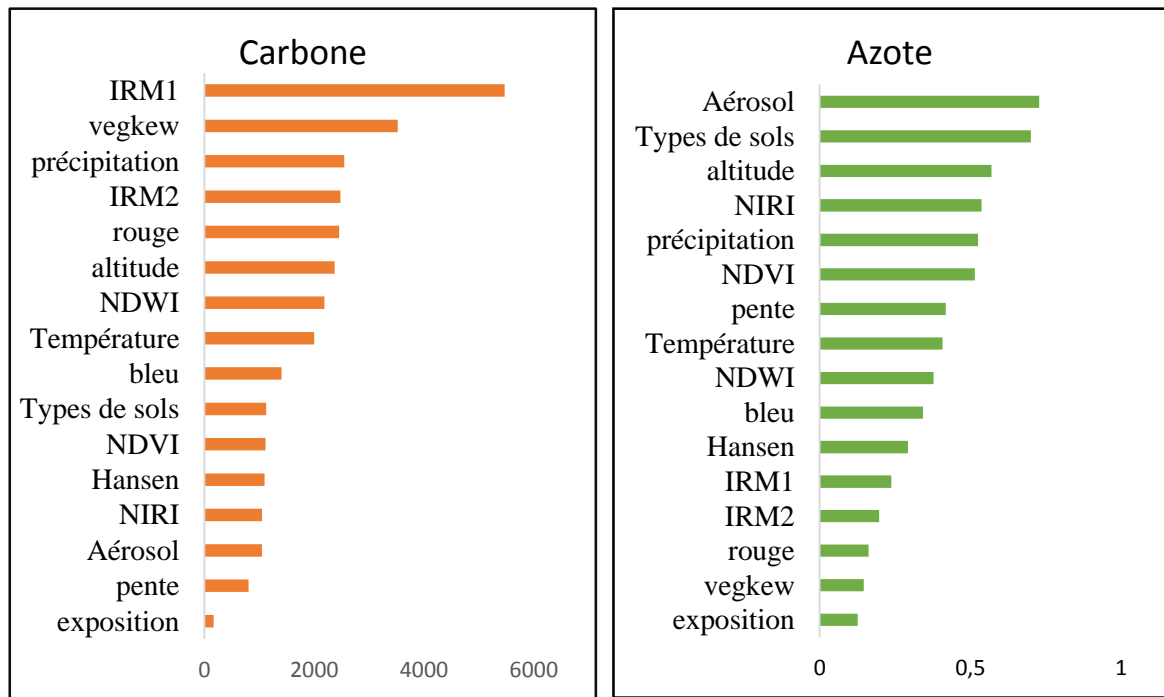


Figure 4 : Importances relatives des variables dans la modélisation des stocks

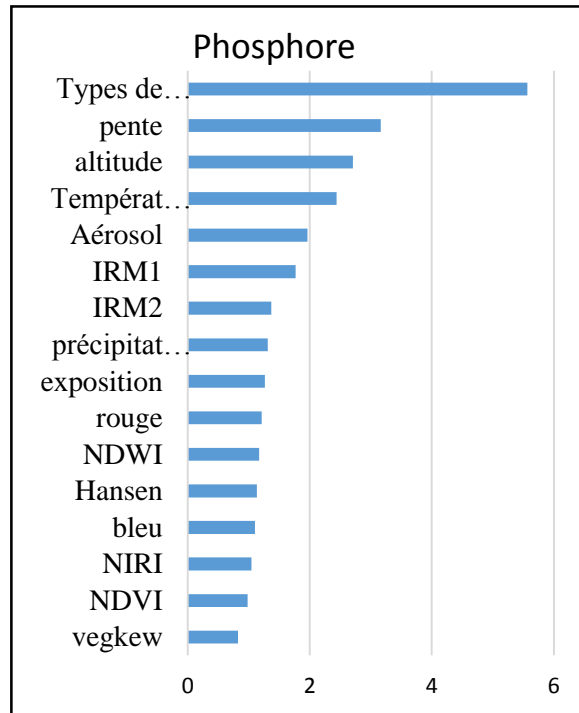


Figure 5 : Importances relatives des variables dans la modélisation des stocks

Pour le C, les variables ayant les plus d'importances dans la modélisation sont : les indices de moyen infrarouge 1 (5467), et l'occupation du sol (3518). Tandis que les variables ayant des faibles importances sont : la pente (800), et l'exposition (166) (figure 3).

Pour le N, les variables déterminants la répartition des stocks sont la quantité d'aérosol (0,728) et le type de sols (0,701). Quant au P, seul le type de sol (5,568) est déterminant dans la répartition spatiale des stocks (figure 4).

2.2.5.2. Caractéristiques des modèles spatiaux

Les figures suivantes montrent les caractéristiques des modèles spatiaux obtenus pour les propriétés des sols respectivement pour le C, N et P.

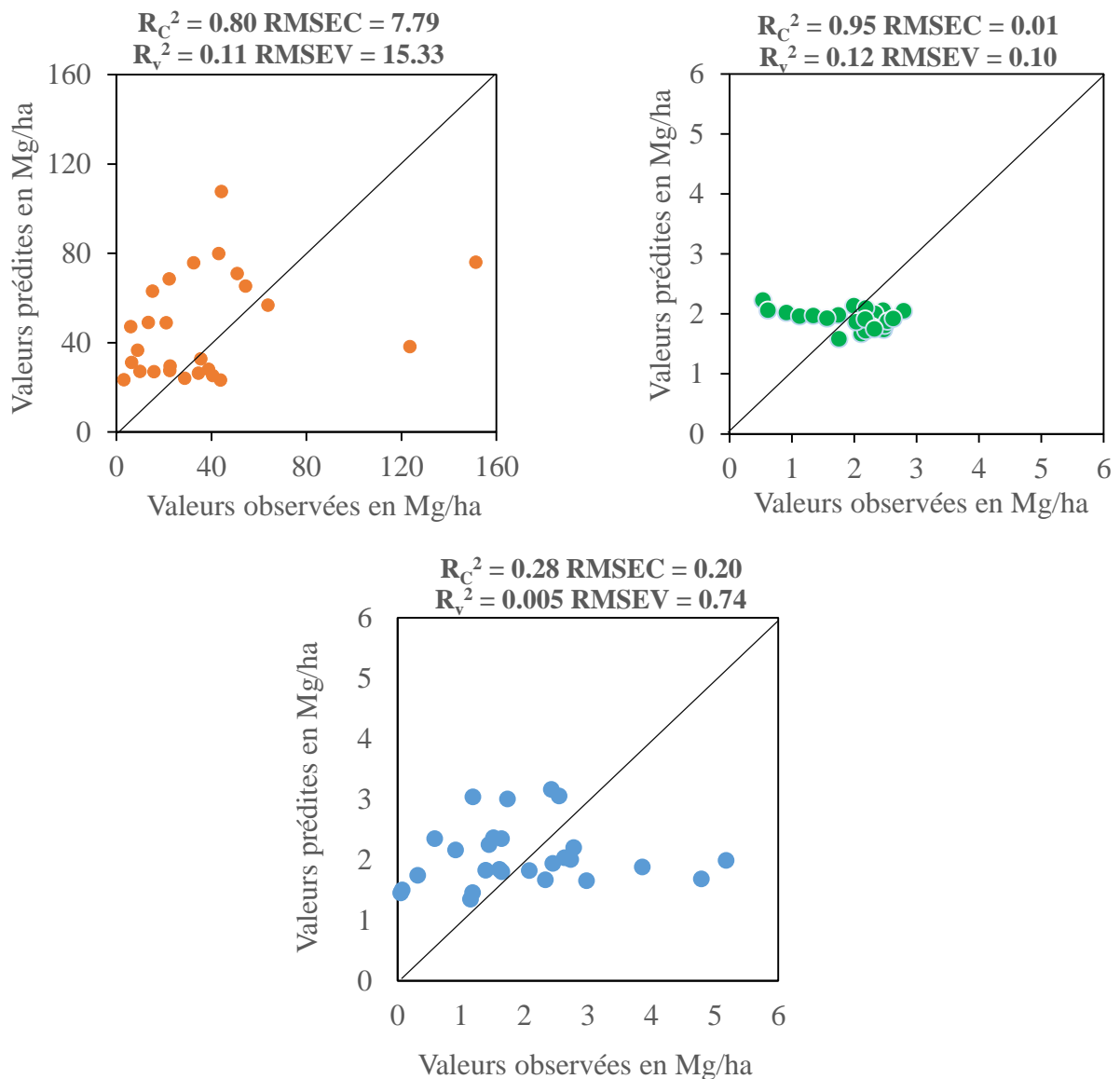


Figure 6 : Caractéristiques des modèles spatiaux respectivement pour le C, N et P

L'azote présente le modèle le plus robuste en calibration et en validation contrairement au phosphore qui possède un modèle faible que ce soit en calibration qu'en validation. Pour le C, le modèle le plus robuste possède un $R^2 = 0.80$ avec un RMSE en calibration (RMSEC) = 7.79 MgC/ha en calibration et un $R^2 = 0.11$ avec un RMSE en validation (RMSEV) = 15.331 MgC/ha en validation; pour le N, le modèle le plus propice possède, en calibration, un $R^2 = 0,95$ avec un RMSEC = 0,01 MgN/ha et en validation, un $R^2 = 0,12$ avec un RMSEV = 0,105 MgN/ha. Et quant au P, la qualité du modèle la plus élevée possède, en calibration un $R^2 = 0,28$ avec un RMSEC = 0,54MgP/ha, et en validation un $R^2 = 0,05$ avec un RMSEV = 0.745 MgP/ha (Annexe 9).

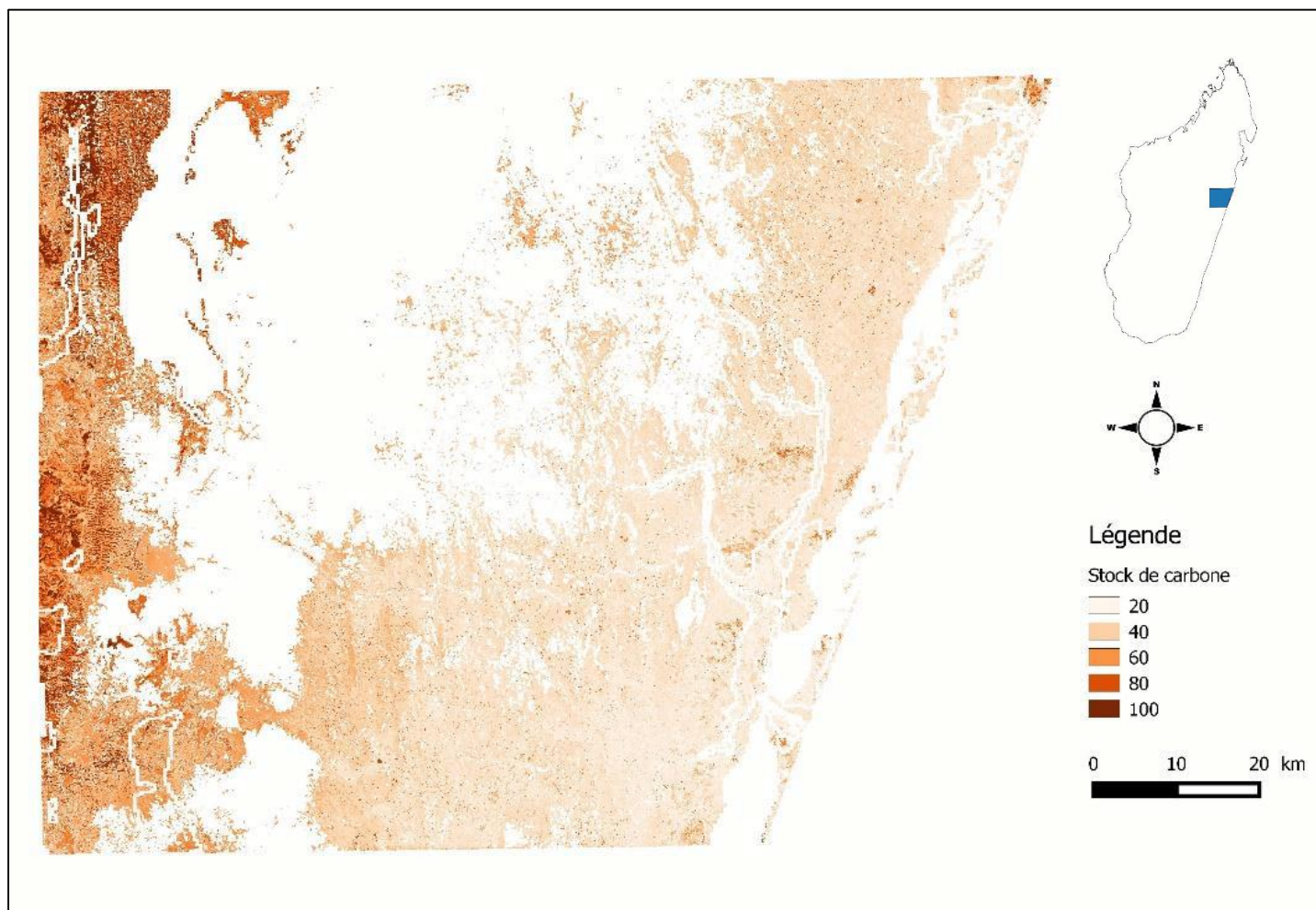
Les moyennes des stocks de C, N et P prédits sont respectivement 44,80 MgC/ha, 1,94MgN/ha et 2,054 MgP/ha. On note des surestimation des stocks des propriétés des sols pour les valeurs des stocks faibles tandis qu'il y a sous-estimation des valeurs pour les valeurs élevés.

Pour le C, les valeurs de références la plus élevée et la plus basse sont respectivement 164,30 Mg/ha et 3,15 MgC/ha. Tandis que avec les prédictions celles-ci varie de 111,51 Mg/ha à 23,20 Mg/ha. Pour le N, Les valeurs prédites varient de 1,57 Mg/ha à 2,25 Mg/ha contre 0,53 Mg/ha à 2,79 Mg/ha pour les valeurs observées. Et pour le P, les valeurs prédites et observées varient respectivement de 1,337 Mg/ha à 3,187 Mg/ha et 0,049 Mg/ha à 5,176 Mg/ha (figure 5).

2.2.6. Répartition spatiale des stocks des propriétés des sols

Les cartes suivantes montrent les répartitions spatiales des stocks de C, N et P dans la zone Mormanga-Brickaville avec une résolution spatiale de 30m soit 1 pixel de la carte est équivalent à 30m² sur distance réelle.

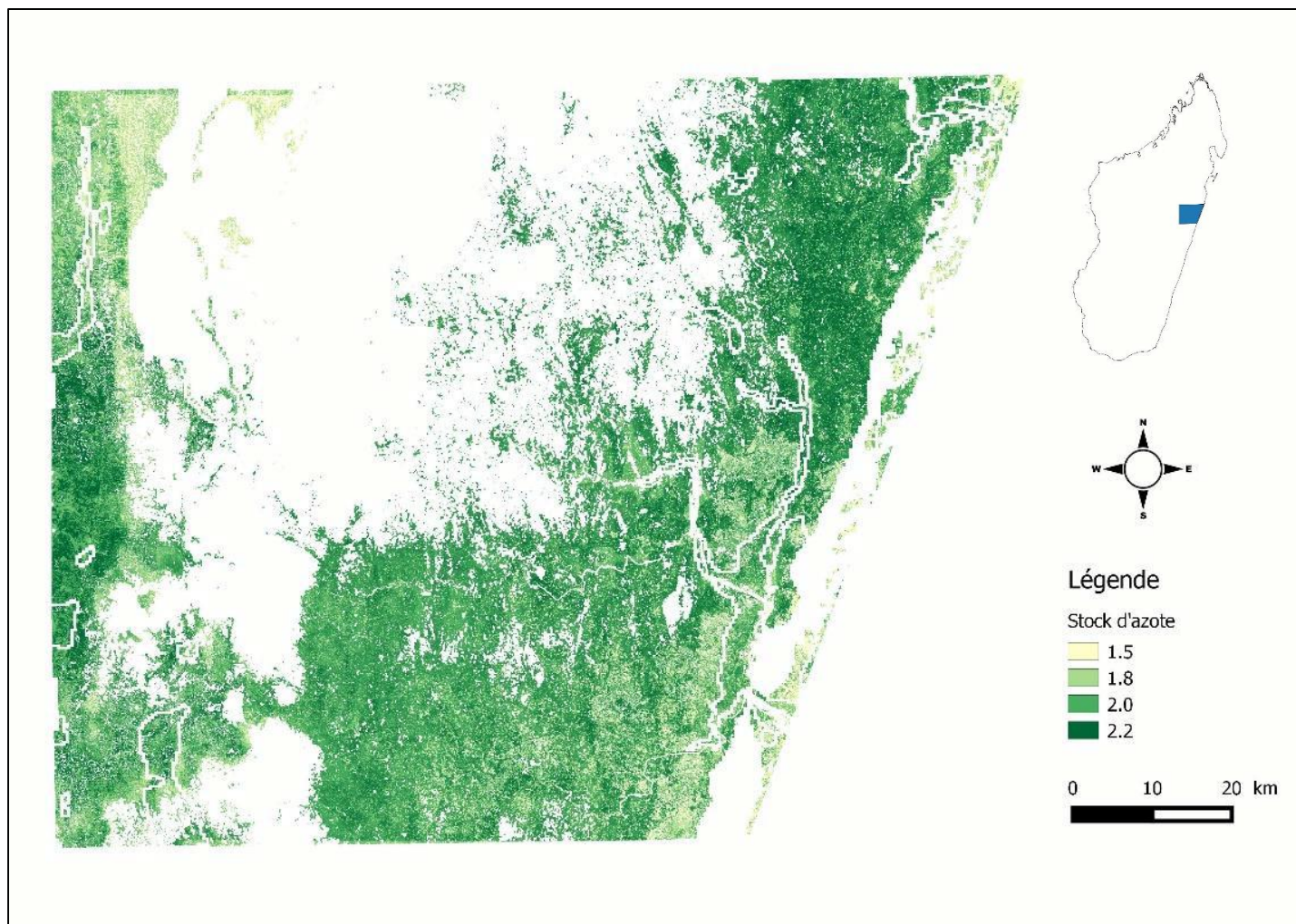
Les zones blanches sont des zones où les stocks des trois éléments n'ont pas été prédits.



Carte 4 : Répartition spatiale des stocks de C de la zone Moramanga-Bricakaville

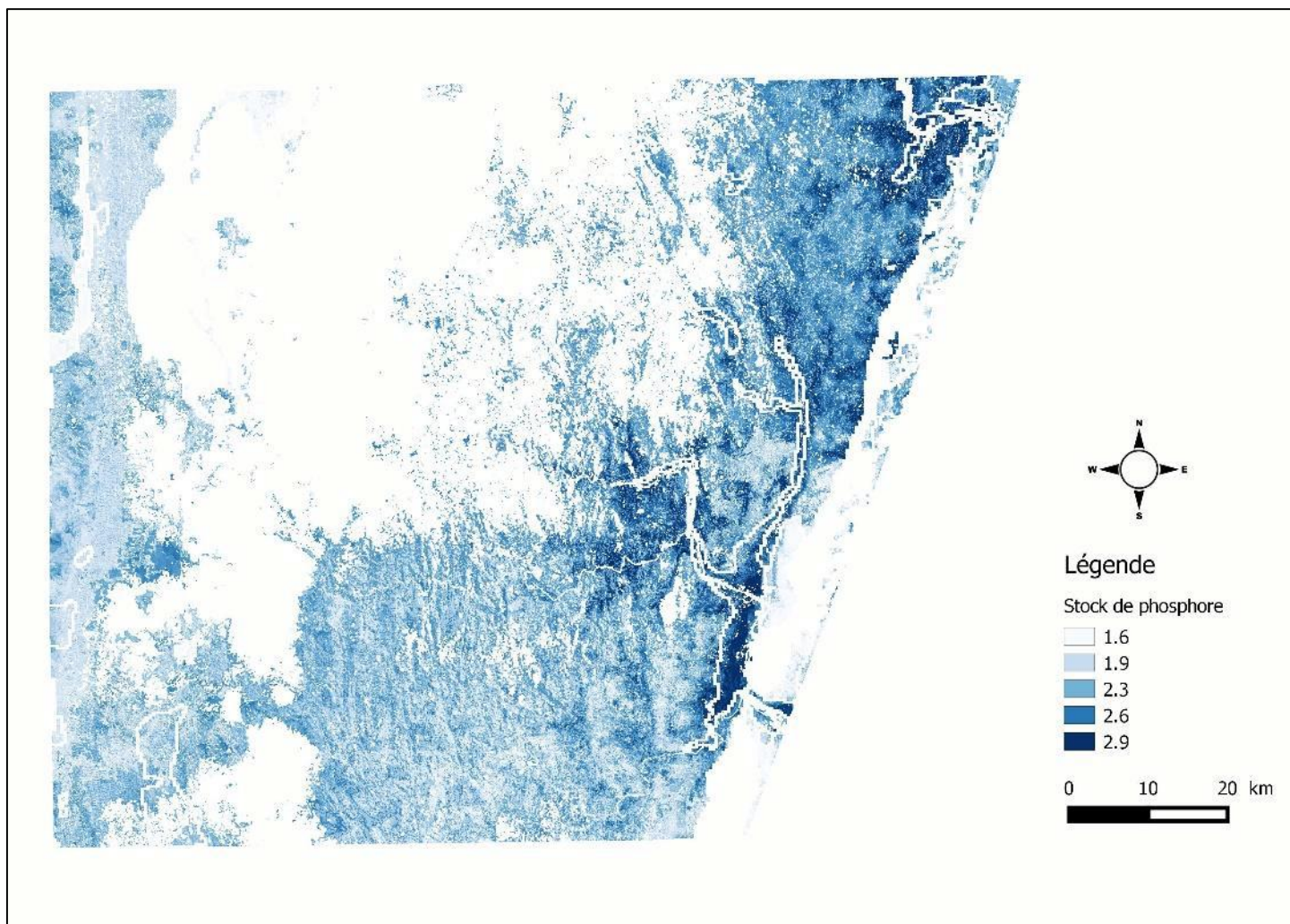
Pour le C, la moyenne du stock est de 40,74 MgC/ha dans toute la zone avec un stock total de 271,15 GgC. Ceux-là varient de 21,80 MgC à 94,36 MgC.

La répartition des stocks de carbone de la zone est homogène avec une accumulation de stock de C élevé dans la partie Ouest (≥ 100 Mg/ha) puis diminue en allant vers le littoral Est (≤ 20 Mg/ha).



Pour le N, la moyenne du stock est de 2,02 MgP/ha, avec un total de 13,48 GgN. La variation des stocks est comprise entre 1,66 Mg/ha et 2,22 Mg/ha. La répartition des stocks de N est hétérogène dans la zone étudiée.

Carte 5 : Répartition spatiale des stocks de N de la zone Moramanga-Bricakaville



Carte 6 : Répartition spatiale des stocks de P de la zone Moramanga-Bricakaville

Pour le P, le stock avec une moyenne de 2,25 MgP/ha, varie de 1,631MgP/ha à 2,9 MgP. Le stock total de P de la zone est de 14,989 GgP.

On constate que le stock de P de la partie Orientale est élevée ($\geq 2,6$ Mg/ha) par rapport à ceux de la partie Occidentale ($\leq 1,9$ Mg/ha).

3. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATION

3.1. Discussions

3.1.1. Sur la méthodologie de cartographie numérique des sols

Pour la prédiction de la teneur en C et N dans le sol, l'utilisation du SMIR a permis de minimiser le coût des analyses des propriétés des sols et d'obtenir des résultats plus rapidement tout en obtenant des résultats fiables (Janik *et al.*, 2007 b). Les calibrations et les validations des modèles de prédiction ont été effectuées par cross-validation. En effet, la validation croisée est indispensable pour réduire la variance et améliorer la précision lorsque la taille de l'échantillon initial est trop réduite ($n = 27$) pour en extraire un échantillon de validation ou test de taille suffisante (Milhem, 2012). Concernant la qualité du modèle, avec un $R^2 = 0.97$ en calibration et un 0.60 en validation pour le C, le modèle est moins robuste comparé à d'autres modèles de prédiction comme dans Rakotovo (2013) avec un R^2 en calibration égale à 0,91 et un R^2 en validation égale à 0,86. Ou encore dans Ramifehiarivo (2014) avec un R^2 de calibration = 0,96 et un R^2 de cross-validation de 0,91. On note un écart entre les R^2 de validation entre les études citées ci-dessous et le R^2 de cette étude dû au nombre d'échantillons de modélisation réduite dans notre cas.

Cependant, avec la prédiction de la teneur en C et N des sols à partir des données spectrales, certaines valeurs ont été sous-estimées ou surestimées. Or, la teneur étant une des composantes des stocks des propriétés des sols, cela a affecté les caractéristiques des modèles spatiaux lors de la calibration augmentant ainsi les risques d'erreurs.

3.1.2. Concernant la modélisation spatiale

Pour l'élaboration de la représentation cartographique dans cette étude, les principes de la cartographie numérique de Lagacherie (2013) ont été utilisés en prédisant les propriétés des sols à partir des données spatiales représentant les éléments de paysage en relation avec le sol. Le nombre des co-variables utilisés dans cette étude sont les mêmes que Grinand *et al.* (2017) ont utilisés, à part quelques co-variables dû au manque de données (pour le cas de l'uranium, potassium et du thorium). Comparé à d'autres études, Ramifehiarivo (2016) n'a pas considéré les données numériques qui sont les bandes issues des images satellitaires.

Concernant l'importance des variables spatiales, les critères d'importance utilisés sont les *NodePurity* ou Indice d'importance relative calculés par la Forêts d'arbres décisionnels comme dans Grinand *et al.* (2017) où les importances relatives sont utilisées pour évaluer l'importance des variables liées aux sols.

De plus, avec un nombre de point réduit pour la zone, la modélisation de la répartition spatiale des éléments n'est pas représentative et amène à réduire la robustesse des modèles. À part cela, les insuffisances de données : stock des propriétés des sols et des variables spatiales ont limitées les prédictions des stocks de C, N et P dans certaines zones de l'étude. En effet, plusieurs variables spatiales utiles pour la cartographie n'existent pas encore à Madagascar comme la

texture du sol, la teneur en d'autres éléments du sol ayant des relations avec les propriétés des sols étudiés.

3.1.3. Discussion sur les résultats

3.1.3.1. Stock de C, N et P

Comparés à d'autres études, pour le stock de C, la moyenne du stock est assez faible. En effet, la valeur trouvée par Razakamanarivo (2009), est de 83,56 MgC/ha sous des parcelles d'eucalyptus. Ainsi que celle trouvée par Andriamananjara (2016), avec une moyenne des stocks de C de 91,6 MgC/ha dans les 0-30 cm de profondeur sous des zones forestières. Cette différence s'explique par la variation de l'occupation des sols, des propriétés des sols et de l'environnement climatique des zones (Arrouays *et al.*, 2003). D'ailleurs, les zones d'études avec ces moyennes présentes des zones forestières ayant des moyennes de stock de C élevée, alors que la présente étude n'inclut pas les forêts. De plus, il existe plusieurs occupations du sol dont les terres dégradées et les parcelles de cultures présentant des moyennes faibles des stocks de C (31,73 MgC/ha à 44,71 MgC/ha), influençant la moyenne de l'ensemble.

Pour le N, Randrianandrasana (2014) a trouvé comme stock de 1,7 MgN/ha tandis que le stock de N est de 1,97 MgN/ha dans la présente étude. Cette différence s'explique par le mode d'occupation des sols. En effet, Randrianandrasana a réalisé les études seulement sur des parcelles de cultures fourragères et sur un même type de sol, qui ont des effets sur le stock de N dans le sol (Mary *et al.*, 2003).

Concernant le P, Raharimalala (2013) a trouvé un stock moyen de 1,355 MgP/ha dans 0-30 cm de profondeur qui n'est pas significativement différent du stock trouvé dans la présente étude qui est de 1,96 MgP/ha. Alors que Raharimalala (2013) a déterminé les stocks de P de plusieurs zones de Madagascar surtout dans la zone Ouest alors que la présente étude s'est déroulée seulement dans la zone Est de Madagascar. Cependant, les teneurs en P du sol peuvent varier suivant les conditions du milieu. D'ailleurs, Grierson *et al.* (1999) ont montré qu'une élévation de la température de 15°C à 38°C conduisait à une augmentation de 13 à 53 % de la teneur en phosphore minéralisée.

3.1.3.2. Les caractéristiques des modèles spatiaux

Le tableau suivant compare les caractéristiques des modèles de la présente étude à d'autres études.

Tableau 7 : Comparaison des caractéristiques des modèles spatiaux avec d'autres auteurs

	R ²	RMSE	
Carbone	0.11	15.33	Auteur
	0.59	25.8	Ramifehiarivo et <i>al.</i> ,
	0.72	14	Grinand et <i>al.</i> , 2017
Azote	0.12	0.10	Auteur
	0.52	0.39	Wang et <i>al.</i> , 2017
Phosphore	0.005	0.74	Auteur
	0.62	0.92	Henderson et <i>al.</i> , 2005

Comparée à d'autres résultats (tableau 7), les caractéristiques des modèles de la présente étude sont peu vigoureuses. Les modèles de prédiction spatiales de la présente étude R² faible par rapport à ceux de Ramifehiarivo et *al.*, 2016, Grinand et *al.*, 2017, Wang et *al.*, 2017, Henderson et *al.*, 2005, alors que les variables utilisées sont identiques. Cela est dû par l'insuffisance des valeurs observées des propriétés des sols. En effet, le nombre des points utilisés est faible avec 27 points pour l'ensemble de la zone, avec une densité de 1 point tous les 500 km². Alors que dans Grinand et *al.* (2017), la densité de point est de 1 point pour 16 km². En outre, l'insuffisance des données observées n'ont pas permis de prédire les stocks dans certaines parties de la zone d'étude surtout dans les zones forestières.

Particulièrement pour l'azote, les caractéristiques du modèle de Wang et *al.* (2017) ont été obtenues après calcul de la moyenne des modèles de prédiction spatiales dans 0-10 cm, 10-20 cm et 20 à 30 cm de profondeur. Le modèle est robuste car la prédiction des stocks de N dans le sol a été réalisée pour chacun des profondeurs ci-dessus favorisant une meilleure prédiction. On peut voir que les caractéristiques des prédictions spatiales des stocks de C et N des sols ne présentent pas une grande différence (0.11 et 0.12) sauf pour le P qui présente un R² presque nulle (0.005). Par conséquent, l'hypothèse 1 affirmant que les qualités des modèles spatiaux varient suivant les propriétés des sols est partiellement vérifiée.

3.1.3.3. La répartition spatiale de C, N et P

Rappelons que pour le C, N et P, les variables ayant des importances élevées dans la modélisation sont respectivement: L'indice d'infra rouge (liée avec la température) et l'occupation des sols, l'aérosol, et le type de sol. Ces variables présentent des importances sur le stock de ces éléments dans les 30 premiers centimètres du sol car elles affectent directement sur la variation de la teneur en C, N et P des sols notamment par la minéralisation. En effet, pour les types de sols, la variation la texture et du pH induit une variation de la vitesse de la minéralisation du C et N. En effet, la vitesse de minéralisation des éléments dans le sol est plus rapide dans les sols à texture sableuse qu'argileuse ; quant au pH, la vitesse de minéralisation

est optimum entre un pH de 5-7 (Riquier J., 1960). Concernant la température (liée avec l'indice d'infra-rouge), c'est un facteur déterminant dans la minéralisation des éléments organiques des sols (Nicolardot., 2006).

On a vu que pour le C, la valeur des stocks est élevée dans la partie Ouest de la zone d'étude et diminue progressivement en allant vers le littoral Est. Or, les variables ayant des importances élevées dans la modélisation sont : l'indice de moyen infrarouge 1 (IRM 1) et l'occupation des sols. Ramifehiarivo (2016) a trouvé comme variables ayant des importances relatives élevées : la température, l'altitude et la température. L'IRM 1 est une bande associée à la chaleur (Boureau, 2008). Or, l'élévation de la température du sol est liée à la température de la zone, et à la présence de carbone dans le sol qui augmente la température du sol dû aux activités biologique (Nicolardot., 2006) d'où la relation chaleur et stock de C. Pour l'occupation du sol, le stock de C varie en fonction de l'occupation du sol. En effet, il existe une différence significative des stocks de C sous forêt et dans les sols non forestiers (Ramifehiarivo, 2014), de plus la forêt tropicale humide se trouve dans la partie Ouest, d'où la valeur élevée de ces stocks. En somme, la variation de la répartition des stocks de C est déterminée par l'occupation des sols et la température.

Pour l'azote, avec sa répartition homogène, les variables ayant des importances relatives marquées sont : la bande aérosol et le type de sol. La bande aérosol est liée à la quantité de particules de petites tailles dans l'atmosphère issue des activités humaines ou naturelles comme la quantité de végétation, d'où l'importance relative élevée de cette variable. D'ailleurs, plus le sol est couvert, plus la teneur en azote du sol est élevée (Mary et Justes, 2001). En tout, la répartition spatiale des stocks d'azote est déterminée par l'abondance de la végétation.

Pour le P, le stock de P des sols sont beaucoup plus importante dans la partie Est et diminue progressivement vers l'Ouest. On a vu dans les importances relatives des variables que le type de sol est la variable ayant le plus d'influence dans la modélisation car le phosphore provient de la roche mère. Cependant, le sol de cette zone ayant un stock élevée de P est de type ferralitiques, or les sols ferralitiques présentent des faibles stocks de P (Raharimalala, 2013). Intervient alors la pente qui est faible dans cette zone. En effet, cela limite la mobilité des éléments chimiques dans le sol, d'où l'accumulation du P dans ces types de sol. On a vu que les répartitions spatiales des stocks de C, N et P sont déterminées par des variables spatiales différentes. Par conséquent, l'hypothèse 2 affirmant que les déterminants des variabilités spatiales des stocks de carbone, d'azote et de phosphore sont différents est vérifiée.

3.2. Recommandations

Certes, la présente étude a permis d'élaborer les représentations spatiales des propriétés des sols de la zone Moramanga-Brickaville. Mais quelques recommandations sont avancées afin d'améliorer les résultats.

D'abord, au niveau des travaux d'échantillonnage, il est nécessaire d'augmenter le nombre d'échantillonnages, ou d'utiliser les bases de données existantes sur le sol au niveau de la zone d'étude car les 27 profils étudiés n'ont pas été suffisant pour la représentation de la zone entière conduisant aux zones blanches. De plus, cela permettra d'améliorer les précisions des résultats. Il est aussi nécessaire de faire des investigations dans certaines zones car les bases de données existantes sont généralement pour les zones cultivées. Cette investigation est aussi nécessaire pour le N et le P dont les bases de données sont encore très faibles.

Pour la prédiction des teneurs en C et N, les erreurs de prédiction montre l'importance des analyses conventionnelles en dépit des coûts des analyses afin de minimiser les erreurs et améliorer la précision des résultats.

Ensuite, au niveau de la modélisation, l'augmentation des nombres d'échantillons est nécessaire pour avoir des modèles robustes (que ce soit pour les modèles de prédiction des teneurs ou pour les modèles spatiaux) et pouvant satisfaire la prédiction spatiale de la zone entière pour les modèles spatiaux. Il est aussi important de regrouper des variables spatiales numériques pour améliorer les prédictions spatiales comme les teneurs en argile, sable et limon.

En tout, pour être utilisables, les cartes de la répartition spatiales des stocks de C, N et P de la zone Moramanga-Brickaville élaborées nécessite de grande amélioration de la prédiction des modèles spatiaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La fonction des sols est vitale pour l'homme et son environnement. L'acquisition des connaissances sur les propriétés physiques et chimiques des sols est donc un grand pas pour mieux valoriser ses services. Avec l'évolution des technologies, principalement de la cartographie, cet outil est utilisé davantage dans les études des sols. D'où la cartographie des propriétés des sols malgaches, cas du C, N et P de la zone Moramanga-Brickaville.

Il a été constaté que la moyenne des stocks des propriétés des sols, dans la zone d'étude, ont été respectivement : 40,74 MgC/ha, 2,02 MgN/ha et de 2,25 MgP/ha.

Le modèle spatial du C présente un $R^2 = 0.11$ avec un RMSE = 15.33 MgC/ha. Pour le N, le modèle présente un $R^2 = 0.12$ avec un rmse = 0.10 MgN/ha. Et pour le P, celui-ci a un $R^2 = 0.005$ et un RMSE= 0.745 MgP/ha. Le C et N présente presque les mêmes R^2 alors que la valeur de celui du P est très basse. Ainsi, seule une partie de l'hypothèse 1 avancée affirmant que les qualités des modèles spatiaux varient suivant les éléments a été partiellement vérifiée.

Pour la représentation cartographique, il a été constaté que la répartition des stocks de C est influencée principalement par la température et l'occupation des sols. Pour l'azote, la répartition des stocks est déterminée par l'abondance de la végétation et le type de sol. Et la répartition spatiale des stocks de P de la zone d'étude est déterminée seulement par le type de sol. Ainsi, l'hypothèse 2 avancées affirmant que les déterminants des variabilités spatiales des propriétés des sols sont différents est vérifiée.

Cette étude nous a permis de déterminer, à la fois la répartition spatiales des propriétés des sols de la zone Moramanga-Brickaville notamment pour le cas du C, N et P, mais aussi de déterminer des méthodologies d'amélioration de la prédiction spatiale sur les sols. Cependant, l'insuffisance de donnée sur les stocks des propriétés des sols, ainsi que les variables spatiaux en relation avec les stocks de C, N et P n'a pas permis de prédire les stocks dans certaines parties de la zone d'étude. Les insuffisances des données sur les stocks peuvent être satisfaites en augmentant le nombre d'échantillonnages ou en utilisant les bases de données existantes pour les sols de la zone d'étude. Mais la disponibilité des données concernant les co-variables du sol restent difficiles. Ce qui nous amène à dire que l'élaboration des répartitions spatiales des autres propriétés des sols tels comme la texture seraient des perspectives d'avenir intéressantes afin d'améliorer la prédiction des propriétés des sols.

Malgré ces résultats, cette étude a été une étude exploratrice qui pourrait être utilisé pour améliorer la cartographie des propriétés des sols malgaches.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

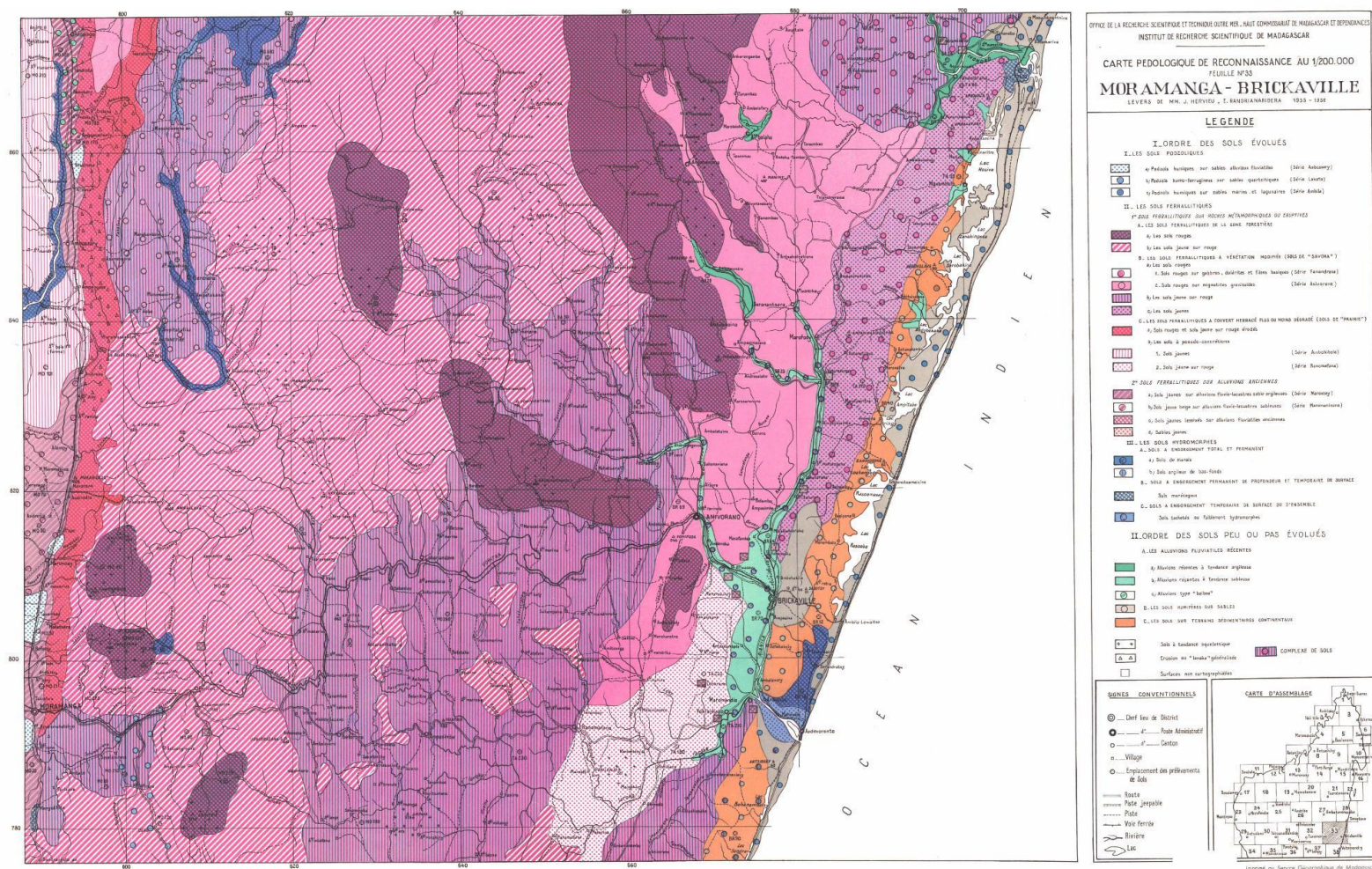
- ❖ Andriamananjara A., Hewsonb J., Razakamanarivoa H., Andrisoa R.H., RanaivosonaN., Ramboatiana N., Razafindrakotoa M., Ramifehiarivoa N., Razafimanantsoa M.P., Rabeharisoa L., Ramananantoandro T., Andriambolantsoa R., Rabetokotany N., Razafimbelo T., 2016. Land cover impacts on aboveground and soil carbon stocks in Malagasy rainforest. Elsevier: Geoderma, vol 233; 15 p.
- ❖ Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M., Cerri C., 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 10, 4, 2003 - pp 347-355
- ❖ Borvon G., 2013. Histoire du carbone et du CO₂. Paris : Vuibert, impr. 2013, cop. 2013, Vol 1, 249 p.
- ❖ Boureau J.G., 2008. Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges Application aux milieux forestiers et naturels. Inventaire forestier national, 268p.
- ❖ Breiman L., 2001. « Statistical Modeling: The Two Cultures », *Statistical Science*, vol. 16, no 3, 2001, p. 199-231
- ❖ Chaminade R., 1949. La pédogenèse et les types de sols à Madagascar. Office de la recherche scientifique outre-mer. Paris, ORSTOM n0 : 37263
- ❖ Cardona A., 2012. L'introduction de la notion de " services éco systémiques " : pour un nouveau regard sur le sol? 6ème Journées de Recherches en Sciences Sociales, Dec 2012, Toulouse (France), France. SFER, 14 p.
- ❖ Delenne, M.F. and Pelletier, F., 1981. Carte du potentiel des unités Physiques, au 1:1000 000. ORSTOM. Bondy, France
- ❖ Duchaufour P., 1996. La classification des sols
- ❖ Duguet F., 2005. Minéralisation de l'azote et du phosphore dans les sols organiques cultivés du Sud-Ouest du Québec. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en sols et environnement pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.), Mars 2005, 105 p.
- ❖ Fang JY., Guo ZD., Hu HF., Kato T., Muraoka H., Son Y., 2014. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology* (issue 20). 2019–2030p.
- ❖ FAO, 2015a. Les sols contribuent à lutter contre le changement climatique et à s'adapter à ses effets : les sols jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone. Pp 2-4.
- ❖ FAO, 2015b. Agriculture durable, productivité et fertilité du sol. *Année internationale des sols*, 2015. 1-4p
- ❖ GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale,

- ❖ Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages
- ❖ Grierson P. F., Comerford, N. B., Jokela, E. J. 1999. Phosphorus mineralization and microbial biomass in a florida spodosol : effect of water potential, temperature and fertilizer application. *Biol. Fertil. Soils* 28: 244-252.
- ❖ Grinanda G., Le Maire G., Vieilledent G., Razakamanarivo H., Razafimbelo T., Bernoux M., 2017. Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 54 (2017) p 1–14.
- ❖ Henderson B.L., Bui E.N., C.J. Moran, Simon D.A.P., 2005. Australia-wide predictions of soil properties using decision trees, *Geoderma*, Volume 124, Issues 3–4, February 2005, 383-398 pp.
- ❖ Hervieu J., 1960. Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000, Feuille N° 33, Brickaville- Moramanga.
- ❖ Institut National de la Statistique (INSTAT), 2004. Les 22 régions de Madagascar en chiffres. 256p.
- ❖ Janik, L. J., R. H. Merry and S. T. Forrester (2007). Rapid Prediction of Soil Water Retention using Mid Infrared Spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal* 71(2). 507-514p
- ❖ Khasawneh, F.E., Sample E.C., Kamprath, E.J., 1980. The role of phosphorus in agriculture. National Fertilizer Development Cent., Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, Alabama, USA. 910p.
- ❖ Lal R., 2004. Soil Carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, Vol. 123, pp 1-22
- ❖ Langacherie P., Arrouays D., Walter C., 2013. Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. *Etude et gestion des sols*, volume 20, 1, 2013. Pp 83-98
- ❖ Lagacherie P., and McBratney A.B., 2007 - Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. In : Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M. (eds.), *Digital Soil Mapping*
- ❖ Wang S., Zhuang Q., Wang Q., Jin X., Han C., Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China, In *Geoderma*, Volume 305, 2017, Pages 250-263, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.048>
- ❖ Mary B, Beaudoin N, Justes E, Machet JM., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soils using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science* 50: 549-566.
- ❖ Mary B. et Justes E., 2001. La fourniture d'azote par les matières organiques du sol, 1INRA Unité d'Agronomie de Laon-Péronne 2INRA Unité d'Agronomie de Reims, 11p.

- ❖ McBratney A.B., Mendonca Santos M.L., and Minasny B., 2003 - On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, pp. 3-52
- ❖ Milhem H., 2012. Erreur de prédiction, Institut de Mathématiques de Toulouse, INSA Toulouse, France. IUP SID, 2011 – 2012. 27 p
- ❖ Minten B., Ralison E., 2003. Environnement, Agriculture et Pauvretés à Madagascar. USAID.Cornell University/FOFIFA/INSTAT. 174p.
- ❖ MEEF (Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts), 2006. Carte de végétation de madagascar, Rapport d'atelier Antananarivo, Avril 2006.
- ❖ Nihorimbe V., Ogena M., Smargiassi M., Thonart P., 2011. Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2011 15(2), 327-337 pp
- ❖ Nicolardot B., 2006. Effet de la température sur la minéralisation de différents produits organiques apportés dans les sols, Impacts du recyclage des déchets agro-industriels : Actes de l'atelier de clôture de l'ATP, 1-2 juillet 2004. Findeling Antoine (ed.), Marlet Serge (ed.), Montange Denis (ed.), Saint Macary Hervé (ed.). CIRAD. Montpellier : CIRAD, 10 p.
- ❖ Poidevin D. et Bondue J.P., 1999. La carte : moyen d'action. In : *Espace, populations, sociétés*, Volume 17, Numéro 3, p. 501
- ❖ Raharimalala N.D., 2013. Evaluation des stocks de carbone et de Phosphore total dans différents types de sols à Madagascar. Mémoire de diplôme d'études approfondies, 2013. Ecoles Supérieures des Sciences Agronomiques, Foresterie et Environnement, 93p.
- ❖ Rakotovao N., 2013. Utilisation de la spectrométrie dans le moyen infrarouge (SMIR) pour la classification des principaux groupes de sol et établissement de modèles de prédiction du carbone organique du sol. Région Itasy – Madagascar. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'études approfondies. Départements des eaux et forêts, 65 p.
- ❖ Ramifehiarivo N., Brossard M., Grinand C., Andriamananjara A., Razafimbelo T., Andriambolantsoa R., Razafimahatratra H., Seyler F., Ranaivoson N., Rabenarivo M., Albrecht A., Razafindrabe F., Razakamanarivo H., 2016. Mapping soil organic carbon on a national scale: Towards an improved and updated map of Madagascar. Elsevier, *Geoderma regional*-00108. 10p
- ❖ Randrianandrasana L.N., 2014. Evaluation des stocks de carbone et d'azote des sols dans la zone de production laitière de Vakinankaratra. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Option Foresterie-EnvironnementDéveloppement, 2013. 95 p.
- ❖ Razakamanarivo H., 2009. Fonction de puits de carbone des taillis d'eucalyptus à Madagascar. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Eaux et forêts, BP 175 Université d'Antananarivo, 101 Antananarivo. Madagascar

- ❖ Riquier J., 1966. La matière organique dans les sols ferrallitiques. 33-36 pp
- ❖ Soco (Sustainable Agriculture and Soil Conservation), 2009. Réduction du taux de matière organique, 35p.
- ❖ Spiertz J.H.J., 2009. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. Agronomy journal, Agron. Sustain. Dev. 43-55pp.
- ❖ Yoro G. et Godo G., 1990. Les méthodes de mesure de la densité apparente : Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 12 octobre 1990. 6p

Annexe 1 : Carte pédologique de reconnaissance d'Hervieu (1960)



Annexe 2 : Coordonnées des points de prélèvements

Zone	Transects	points	longitude	latitude
Fanandrana	1	FAN_P1	-18.19653	49.31919
Fanandrana	1	FAN_P2	-18.19819	49.32716
Fanandrana	1	FAN_P3	-18.20843	49.32264
Fanandrana	2	FAN_P4	-18.30284	49.22805
Fanandrana	2	FAN_P5	-18.3052	49.22839
Fanandrana	2	FAN_P6	-18.31166	49.2347
Fanandrana	2	FAN_P7	-18.31687	49.23798
Vohibinany	3	VHB_P8	-18.74656	49.1013
Vohibinany	3	VHB_P9	-18.75017	49.10666
Vohibinany	3	VHB_P10	-18.75383	49.11101
Vohibinany	3	VHB_P11	-18.75956	49.11444
Vohibinany	4	VHB_P12	-18.80336	49.04163
Vohibinany	4	VHB_P13	-18.80802	49.05041
Vohibinany	4	VHB_P14	-18.83193	49.08466
Vohibinany	4	VHB_P15	-18.83954	49.09383
Ampasimpotsy (Lakato)	5	AMP_P16	-18.96621	48.34978
Ampasimpotsy (Lakato)	5	AMP_P17	-18.97189	48.35297
Ampasimpotsy (Lakato)	5	AMP_P18	-18.98077	48.35796
Ampasimpotsy (Lakato)	5	AMP_P19	-18.98621	48.35529
Ampasimpotsy (Morarano)	6	AMP_P20	-18.7293	48.25867
Ampasimpotsy (Morarano)	6	AMP_P21	-18.73053	48.27119
Ampasimpotsy (Morarano)	6	AMP_P22	-18.72822	48.27629
Ampasimpotsy (Morarano)	6	AMP_P23	-18.73013	48.28222
Morarano_Gara (Amboasary)	7	MOG_P24	-18.44036	48.28138
Morarano_Gara (Amboasary)	7	MOG_P25	-18.4441	48.28911
Morarano_Gara (Amboasary)	7	MOG_P26	-18.44884	48.29646
Morarano_Gara (Amboasary)	7	MOG_P27	-18.4505	48.305

Annexe 3 : Tableau Caractéristiques des profils étudiés

	Occupation des sols	Type sol	texture	Topo séque nce	Antécédent	Forme paysage	Epaisseur Litière (cm)	Masse Litière (g)	Altitude (m)	Pente (°)
P1	terre_degrade	hydromorphe	AS	mid	culture	accidente	0.5	10.925	18	5.4
P2	culture	ferrallitique	AS	mid	culture	accidente	1.0	19.725	28	19.2
P3	Jachère herbeuse	hydromorphe	AS	plate	deforestation	plate	2.6	65.000	14	1.4
P4	culture	ferrallitique	AS	inf	cult_p	accidente	2.8	121.900	42	10.65
P5	Jachère arborée	ferrallitique	A	sup	feu	accidente	1.4	44.425	42	18.8
P6	terre_degrade	ferrallitique	A	mid	deforestation	accidente	0.5	4.725	21	27.95
P7	Jachère herbeuse	ferrallitique	A	inf	deforestation	depression	1.5	38.350	23	25.55
P8	terre_degrade	hydromorphe	AS	mid	paturage	plate	0.0	0.000	91	4.75
P9	culture	ferrallitique	AS	sup	culture	accidente	0.8	7.100	83	19.4
P10	Jachère arborée	ferrallitique	AS	sup	feu	accidente	2.0	119.100	76	15.15
P11	terre_degrade	humifere	S	mid	feu	accidente	0.0	0.000	59	17.8
P12	culture_perenne	hydromorphe	A	plate	paturage	plate	0.0	0.000	13	4.6
P13	culture	ferrallitique	A	plate	culture	plate	0.0	0.000	17	3.75
P14	terre_degrade	peu_evolue	S	mid	feu	accidente	0.3	2.950	91	10.35
P15	terre_degrade	peu_evolue	S	sup	feu	accidente	0.0	0.000	73	10.15
P16	culture	hydromorphe	A	plate	culture	plate	1.0	2.225	938	2.5
P17	culture	ferrallitique	AS	inf	feu	accidente	2.0	36.800	942	19.65
P18	culture	humifere	A	inf	feu	accidente	1.3	14.225	947	16.9
P19	terre_degrade	humifere	AL	mid	deforestation	accidente	0.6	7.325	943	5.65

P20	culture	hydromorphe	AL	plate	cult_p	plate	1.0	9.475	908	0.7
P21	culture	hydromorphe	A	mid	culture	accidente	0.5	1.400	928	9.3
P22	culture	humifere	AL	plate	culture	plate	1.7	8.625	923	0.35
P23	culture_perenne	ferrallitique	AS	mid	cult_p	accidente	0.0	0.000	948	19.15
P24	terre_degrade	hydromorphe	A	plate	cult_p	plate	1.0	4.000	915	0.75
P25	terre_degrade	ferrallitique	AL	sup	cult_p	accidente	1.1	10.300	1017	10.75
P26	culture_perenne	ferrallitique	AL	sup	cult_p	accidente	0.6	9.825	1018	23.5
P27	culture_perenne	humifere	S	mid	cult_p	accidente	1.4	20.075	1022	19.5

Annexe 4 : Mesure de l'humidité relative des échantillons

Sur terrain, des mottes de terres ont été prélevée comme échantillons d'humidité appelée aliquote. Les aliquotes sont mises dans des sachets fermés hermétiquement et de masse connues. L'ensemble est ensuite pesé et ramenées au laboratoire.

Au laboratoire :

- Peser la boîte à tare vide, noter le poids (T)
- Rajouter environ 10 g de sol humide ou de l'aliquote (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)

L'humidité relative de l'échantillon est calculée par la formule suivante :

$$\text{Hum en \%} = [(T + SH) - (T + SS)] * 100 / [(T+SS) - T]$$

Annexe 5 : Protocole d'analyse Walkley & Black de la teneur en carbone (Laboratoire des Radio Isotopes)

1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Estimation de la teneur en carbone d'un échantillon de sol, en l'absence de matériel pour la combustion (tel que l'analyseur CHN, méthode de référence actuelle)

2. TEXTE DE RÉFÉRENCE

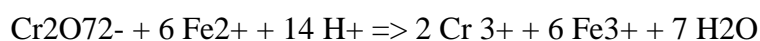
Walkley, A.; Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37:29-38.

3. PRINCIPE

La matière organique est oxydée sans chauffage externe par une solution sulfurique de dichromate de potassium. On considère que la chaleur de dissolution de H₂SO₄ (120°C) est suffisante pour oxyder 77 % du carbone (résultats expérimentaux).

L'excès de dichromate est dosé par le sel de Mohr : (NH₄)₂ Fe (SO₄)₂, 6 H₂O

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

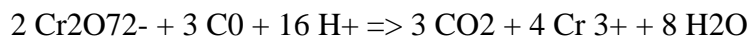


Commentaire :

Une solution normale de sel de Mohr contient 1 mol/l (1mole Fe²⁺ libère 1mole e⁻)

Une solution normale de Cr₂O₇²⁻ contient 1/6 mol/l

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



Commentaire :

Une mole de Cr₂O₇²⁻ oxyde 1.5 mole de C

Une solution normale de Cr₂O₇²⁻ (M/6) oxyde 1.5/6 = 0.25 mole de C soit 0.25 x 12 = 3 g de C

Donc 5 ml de Cr₂O₇²⁻ N correspond à 3x5/1000x1000 = 15 mg de C

4. MATERIELS

- Hotte aspirante
- Titrateur Crison équipé d'une électrode rédox combinée
- Béchers de 250 ml
- Plaque isolante (plateau en bois)

5. REACTIFS

- Dichromate de potassium, solution N (MK₂Cr₂O₇ = 294.19 ; solution normale pour rédox = M/6): Peser exactement 49.035 ± 0.0005 g de K₂Cr₂O₇ P.A. séché à l'étuve à 105°C. Dissoudre dans 800 ml d'eau distillée. Compléter le volume à 1000 ml dans une fiole jaugée.

- Acide sulfurique, solution 0.5 N environ :

Verser 14 ml de H₂SO₄ concentré technique (d = 1,84) dans 1 litre d'eau distillée. Utiliser cette solution pour la préparation du sel de Mohr.

- Sel de Mohr [(NH₄)₂ Fe (SO₄)₂, 6 H₂O], M=392.1, solution 0.5 N :

Dissoudre 196.1 g de sel de Mohr P.A. dans 1 litre de H₂SO₄ 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**
REMARQUE : suivant les opportunités d'approvisionnement, on peut remplacer le sel de Mohr par du sulfate de fer ferreux P.A. [Fe (SO₄)₂, 7 H₂O], M=278.0 ; pour préparer 1 litre de solution 0.5 N, la masse à peser sera alors de 139 g.

6. ATTAQUE

- Dans une fiole cylindroconique de 125 ml (ou un becher de même diamètre à la base), peser un poids P de sol broyé à 200 µm séché à l'air suivant la procédure [MO-001 Traitement échantillons]. 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.

- Sous hotte, ajouter 5 ml de dichromate N à la pipette automatique 10 ml d'acide sulfurique concentré technique (d = 1, 84) avec la dispensette.

- Faire 2 témoins sans sol (titrage du sel de Mohr par le dichromate).

- Agiter une minute. Laisser 30 minutes sur une plaque isolante résistante à la chaleur (bois).

- Ajouter environ 100 ml d'eau distillée dans chaque témoin et échantillon (la quantité exacte n'a pas d'influence, mais dosage impossible si le milieu est trop concentré)

7. TITRAGE RÉDOX AUTOMATISÉ (TITRATEUR CRISON)

- Après avoir rempli de sel de Mohr le flacon réactif 2 (gauche), rincer la seringue 3 fois (Execute Program 5) **ATTENTION** : à la question " Return reagent into bottle ? ", répondre NO (touche 2)

- Vérifier que c'est bien l'électrode rédox qui est branchée (anneau de platine), sinon, remplacer l'électrode pH par la rédox en dévissant la tête de l'électrode

- Vérifier que c'est bien la pointe de burette n°2 qui est positionnée pour le dosage

- Introduire un petit barreau aimanté dans le becher témoin (les grands barreaux bloquent)

- Introduire l'électrode rédox et la pointe de burette dans le becher (contrairement à une burette classique, la pointe de burette doit tremper dans la solution pour une bonne sensibilité)

- Titrer l'excès de dichromate par la solution 0.5 N de sel de Mohr (Execute Program 3)

- Dosage identique pour tous les témoins et échantillons

Remarque : dans le cas où la prise d'essai de sol est trop forte (tout le dichromate consommé), l'appareil renvoie un message d'erreur "Erreur de tendance" (le dosage vise 850 mV en tendance négative, ce qui est impossible si le potentiel est déjà inférieur à 850 mV)

- Noter le volume RESULT de sel de Mohr (ne pas confondre avec le volume final, volume total délivré par la seringue en fin de manip). Si ce volume sort des limites, recommencer le dosage en changeant le poids P de la prise d'essai de sol (voir ci-dessous Calcul des limites et de la prise P' pour le second essai)

8. CALCUL

1°) Détermination du poids P de la prise d'essai :

Si on connaît la teneur en azote : calculer P à partir de la formule suivante : $P = 7.5 / (10 * N \text{ o/oo})$ avec :

- 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 1000 g de sol.

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

2°) 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

Avec :

- V_s doit être inférieur à $(V_t - V_t/19.5) * 5$ (C supérieur à 5 mg), soit $V_s \text{ maxi} = 0.74 V_t$
- V_s doit être supérieur à $(V_t - V_t/19.5) * 12.5$ (C inférieur à 12.5 mg), soit $V_s \text{ maxi} = 0.36 V_t$

Soit V_s compris entre 3.6 et 7.4ml pour 5ml de $K_2Cr_2O_7$ N et Sel de Mohr N/2

3°) 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 : $C \propto (V_t - V_s)^2$
- C' mg de carbone dans la prise P' : $C' \propto 8$.

Le poids P' de sol pour la seconde prise est donné par la formule approchée : $P' = 4P / (V_t - V_s)$

9. EXPRESSION DES RÉSULTATS

5 ml de dichromate correspond à 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.

On a :

$$C \text{ o/oo} = (V_t - V_s) * 19.5 / V_t * 1/P$$

Annexe 6 : Protocole d'analyse de la teneur en phosphore total (Laboratoire des Radio-isotopes)

1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Attaque à l'acide perchlorique concentré à chaud d'un échantillon de sol broyé à 200 µm.
Pour des échantillons fortement organiques, en raison des risques d'explosion, une attaque préalable doit être réalisée avec de l'acide nitrique (HNO₃) concentré.

2. TEXTE DE REFERENCE

Methods of Soil Analysis, Part 3 - Chemical Methods, éd.1996, SSSA - (Jackson, 1958) page 872

3. MATERIELS

- Balance analytique précision 1/10^{ème} de mg
- Bloc de minéralisation pour tubes pyrex diamètre 15 mm

4. REACTIFS

- 4-1- Réactif d'attaque : Acide perchlorique concentré (HClO₄ 70% pro analysi)
- 4-2- Solution titrée de phosphore à 200 mg/L (200 ppm) (pour échange et dosage)
 - sécher environ 1 g de Potassium dihydrogénophosphate (KH₂PO₄) pour analyses 1 nuit à 60°C.
- 4-3- Réactif A (pour le dosage colorimétrique) : Molybdate d'ammonium (NH₄)₆Mo₇O₂₄, 4H₂O
 - Dissoudre 12 g de molybdate d'ammonium P.A. dans 250 ml d'E.D.
 - Dissoudre 0.2908 g d'émétique KSbOC₄H₄O₆ P.A. dans 100 ml d'E.D. (à ajuster)
 - Mélanger les 2 solutions ci-dessus à 1 litre de H₂SO₄ 5N P.A. (139 ml de H₂SO₄ concentré dans un litre d'E.D.)
 - Diluer à 2 litres avec E.D.
 - Conserver dans un flacon en pyrex brun
- 4-4- Réactif B préparé extemporanément à partir du réactif A :
 - Dissoudre 1.056 g d'acide ascorbique P.A. dans 200 ml du réactif A, juste avant l'emploi ajuster les proportions au nombre d'échantillons à analyser (ex: 0.528 g / 100 ml)NB : conservation 24 h maximum, à l'abri de la lumière (flacon coloré ou placard)
- 4-5- Echantillon témoin de sol, à inclure systématiquement dans chaque série d'attaque

5. ATTAQUE ACIDE

- 5-1- Dans un tube pyrex diamètre 15 mm, longueur 16 ou 20 mm, peser exactement 0.1 ± 0.01g de sol broyé à 0.2 mm [cf. MO-001 Traitement échantillons]
- 5-2- Préparer 7 tubes identiques pour la gamme numérotée E0, S1, S2, S3, S4, S5, S6 et y ajouter respectivement 0, 30, 100, 250, 500, 750, 1000 µl de solution P 200 ppm ce qui donne

0, 30, 100, 250, 500, 750, 1000 ppm de P en final (dans les 10ml avant addition du réactif B)

5-3- Ajouter avec la dispensette 2 ml de HClO_4 concentré et homogénéiser au vortex

5-4- Placer les tubes + mini-entonnoirs dans le bloc chauffant réglé à 132°C , puis monter la température à 205°C ; laisser bouillir 2 h à partir du moment où l'affichage a atteint 200°C

5-5- Laisser refroidir dans le bloc chauffant, puis placer les tubes sur un portoir plastique.

5-6- Transvaser le contenu des tubes dans une série de fioles jaugées de 50 ml en rinçant les tubes à l'eau distillée ; ajuster au trait de jauge à l'aide d'une pipette automatique de 1000 μl

5-7- Boucher les fioles avec du para film, bien homogénéiser par retournement, puis transvaser environ 10 ml dans une série de tubes (on peut alors mettre au lavage les fioles jaugées)

6. DOSAGE COLORIMETRIQUE DE P PAR LA MÉTHODE DE MURPHY ET RILEY

- Dans une série de tubes (environ 30ml) numérotés, préparer pour chaque échantillon : Etalon :

2.5 ml (à la pipette, sans agiter) ; eau distillée : 7.5 ml, Réactif B : 2 ml.

Agiter au vortex

- Lecture :

- spectrophotomètre allumé depuis 30 minutes, lecture à 882 nm (visible)
- dans une cuve en verre trajet optique 1 cm
- 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 d'attaque ; la différence entre 2 échantillons est toujours inférieure à celle entre un échantillon et l'E.D.)
- pour une grosse série, mesurer zéro et étalon 0.5 ppm chaque 10 échantillons)

7. CALCUL ET EXPRESSION DES RESULTATS

7-1- Concentration de P en ppm (= mg/l)

- dans Excel, tracer avec les valeurs lues une courbe $\text{ppm} = f(\text{Absorbance})$

(x = Absorbance, y = ppm, pas l'inverse, car c'est les ppm que l'on veut calculer à partir des DO)

- ajouter une courbe de tendance linéaire (interception non définie ; afficher équation et R^2)

- calculer le P en ppm à partir de cette équation

Annexe 7 : Protocole d'analyse de la teneur en Azote total (Laboratoire des Radio-isotopes)

1. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Attaque totale de l'azote des sols ; dosage par colorimétrie automatique du NH_4^+

2. TEXTE DE REFERENCE

Méthode Laboratoire des Moyens Analytiques IRD-Dakar 2001

3. PRINCIPE

Minéralisation Kjeldahl modifiée, dosage NH_4^+ par la réaction de Berthelot

4. MATERIELS

- Bloc minéralisation (fabrication artisanale)
- Tubes pyrex diamètre 15 mm, hauteur 160 mm (fabrication artisanale)

5. REACTIFS

- Solution mère 5000 ppm de N (NH_4Cl séché 105°C : 1.9095 g/100ml)
- Acide sulfurique concentré technique (H_2SO_4) PORTER DES LUNETTES
- Catalyseur : K_2SO_4 P.A.: 45 g + Se : 2.25 g broyés intimement au mortier

6. ATTAQUE

- Peser exactement environ 0.1 g de sol broyé à 0.2 mm dans une série de tubes pyrex diamètre 15 mm, haut 160 mm
- Ajouter environ 0.2 g de catalyseur pesé par différence : pot de catalyseur posé sur la balance au mg (si possible, trouver une mesurette pour ces 0.2 g)
- Préparer 6 tubes pour la gamme, contenant chacun 0.2 g de catalyseur ; dans ces tubes, numérotés S1, S2, S3, S4, S5, S6, ajouter respectivement la solution N 5000 ppm 0, 100, 200, 300, 400, 500 μl
- Ajouter avec la dispensette 1 ml de H_2SO_4 concentré et homogénéiser au vortex
- Placer les tubes + mini-entonnoirs dans le bloc chauffant réglé à 200°C , puis monter la température progressivement en surveillant l'ébullition jusqu'à 338°C (température de consigne) ; laisser bouillir 1 h à partir du moment où l'affichage a atteint 325°C
- Laisser refroidir dans le bloc chauffant, puis placer les tubes sur un portoir plastique.
- Rincer intérieur et extérieur de l'entonnoir (doucement : eau + H_2SO_4 = énergie)
- Transvaser le résidu d'attaque dans une série de fioles jaugées de 50 ml, rincer les tubes, compléter à 50 ml, boucher les fioles avec du para film et bien homogénéiser par retournement (milieu final H_2SO_4 2 %)
- Dans une série de tubes, conserver environ 10 ml de chaque échantillon ou étalon et jeter le reste ; laisser décanter le solide dans les tubes pendant une nuit

- le dosage colorimétrique, rediluer au 1/10ème en tube puis vortexer :
- échantillons : 500 µl éch. + 4500 µl eau (ou 700+6300 µl)
 - étalons S1, S4 : 10 ml dans une fiole de 100 ml
 - étalons S2, S3, S5, S6 : 5 ml dans une fiole de 50 ml
- (Milieu final H₂SO₄ 0.2 %)

Annexe 8 : Importances relatives des variables spatiaux

Variables	Carbone	Azote	Phosphore
Aérosol	1046.687	0.728	1.964
IRM1	5467.265	0.238	1.770
IRM2	2477.841	0.197	1.369
NDVI	1111.056	0.515	0.981
NDWI	2183.925	0.378	1.170
NIRI	1049.867	0.537	1.046
altitude	2372.465	0.570	2.708
bleu	1402.971	0.343	1.102
exposition	166.716	0.126	1.264
Hansen	1096.404	0.293	1.133
pente	800.496	0.418	3.161
précipitation	2547.575	0.526	1.312
rouge	2451.906	0.162	1.212
Types de sols	1124.432	0.701	5.568
Température	1999.085	0.408	2.440
vegkew	3518.908	0.146	0.825

Annexe 9 : Valeurs des stocks de C, N et P observées versus prédites

Points	Carbone		Azote		Phosphore	
	Préd.	Réf.	Préd.	Réf.	Préd.	Réf.
1	15.79	3.15	2.14	2.21	1.621	1.187
2	32.80	40.59	2.15	2.16	2.218	2.422
3	35.12	43.75	1.98	2.11	2.012	1.733
4	28.94	13.46	2.32	2.46	2.907	2.73
5	20.62	15.85	2.17	2.13	2.912	2.629
6	31.82	38.81	2.22	2.33	3.655	4.785
7	19.83	8.87	1.36	0.91	3.017	2.776
8	31.89	34.51	2.20	2.47	1.946	1.15
9	26.49	28.72	2.15	2.28	2.061	1.183
10	24.37	22.63	2.01	2.07	1.140	0.586
11	23.11	22.48	1.71	1.75	0.738	0.317
12	31.90	20.94	1.96	2.18	2.782	2.544
13	15.42	9.89	1.97	1.99	4.763	5.176
14	21.57	6.03	1.21	0.53	2.211	0.072
15	12.86	6.41	1.20	0.61	2.295	0.049
16	48.43	54.37	2.12	2.18	3.471	1.641
17	51.27	50.89	2.41	2.79	4.131	2.444
18	37.72	22.27	1.90	1.74	4.301	2.977
19	82.30	123.48	2.23	2.49	3.928	1.635
20	104.38	151.34	2.30	2.53	3.825	1.387
21	66.59	32.5	2.12	2.03	4.148	2.075
22	57.35	43.1	2.28	2.62	4.396	2.328
23	82.25	44.23	2.06	2.17	4.319	1.441
24	38.56	15.15	1.47	1.12	4.530	1.509
25	38.93	35.56	1.99	2.32	5.555	3.856

Annexe 10 : Script de l'élaboration des modèles spatiaux sous Rstudio

```
#chargement répertoire
Dir = setwd('F:/~ /Fichier SIG')
library(maptools)
library(hydroGOF)

#importation donnée
shape = readShapePoints('points.shp')
pl

#transfo shapepoint en tableau
shapetab = as.data.frame(shape)
write.csv(shapetab, 'data')

#eliminer col inutile
ntab = shapetab[,-c(1, 2, 3, 4, 6, 25, 26)]

#factorisation
ntab$vegkew = as.factor(ntab$vegkew)
ntab$sols = as.factor(ntab$sols)
str(ntab)

#lot calib et valid
calibcv1 = ntab[-(1:3),]
validcv1 = ntab[1:3,]
calibcv2 = ntab[-(4:6),]
validcv2 = ntab[4:6,]~
~
calibcv9 = ntab[-(25:27),]
validcv9 = ntab[25:27,]

#rf
library(randomForest)
set.seed(2345)

#calibration du model 1
modell = randomForest(SON~., calibcv1, importance = TRUE, type = 'regression')
modell$importance
```

```

calibrationcv = predict(model1, calibcv1)
calibrationcv = as.data.frame(calibrationcv)
calibrationcv$ref = calibcv1$SON
View(calibrationcv)
lim = lm(calibrationcv ~ -1 + ref, calibrationcv)
summary(lim)
plot(calibrationcv$calibrationcv, calibrationcv$ref)
rmsec = rmse(calibrationcv$calibrationcv, calibrationcv$ref)
rmsec

```

```

#validation model 1
validationcv = predict(model1, validcv1)
validationcv = as.data.frame(validationcv)
validationcv$ref = validcv1$SON
View(validationcv)
lim = lm(validationcv ~ -1 + ref, validationcv)
summary(lim)
plot(validationcv$validationcv, validationcv$ref)
lim
rsquaredv= (cor(validationcv$ref,validationcv$validationcv))^2
rsquaredv
rmsev = rmse(validationcv$validationcv, validationcv$ref)
rmsev

```

```

#chargement raster
library(rgdal)
library(sp)
library(raster)
library(tiff)
imageIn=stack(new.a, new.b, c ,new.d ,new.e ,new.f, new.g, new.h, .i,new.j, .k,new.l, new.m,
new.n, .o,new.p, new.q, new.r)
plot(imageIn)

```

```

#prediction
prediction = predict(model = model, imageIn, format = 'GTiff')
plot(prediction)
hist(prediction)

```

```

#export tif

```

```
writeRaster(prediction, 'N9.tif', 'GTiff', overwrite = FALSE)
```


TABLES DES MATIERES

DEDICACE	iv
REMERCIEMENTS.....	v
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES PHOTOS	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES CARTES.....	xi
LISTES DE FORMULES.....	xiii
LISTE DES UNITES	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	xvi
GLOSSAIRE	xvii
RESUME	xviii
ABSTRACT.....	xix
FINTINA	xx
INTRODUCTION	1
1. MATERIELS ET METHODES	1
1.1. Présentation de la zone d'étude : Moramanga-Brickaville	1
1.1.1. Localisation de la zone	1
1.1.2. Milieu physique	2
1.1.2.1. Climat	2
1.1.2.3. Pédologie	2
1.2. Les points de prélèvement.....	3
1.3. Mode de prélèvement.....	3
1.4. Analyse des propriétés physico-chimiques des échantillons de sols	5
1.4.1. Préparation des échantillons	5
1.4.2. Détermination de la densité apparente.....	5
1.4.3. Analyse spectrale des échantillons	6
1.4.4. Détermination de la teneur en C-N-P	7
1.4.4.1. Dosage conventionnelle des propriétés des sols.....	7
a. Dosage conventionnelle de la teneur en Carbone total.....	7
b. Dosage conventionnelle du phosphore total	7
c. Dosage de l'azote.....	7
1.4.4.2. Dosage par prédiction : SMIR et utilisation des modèles de prédiction du C et N.....	8
1.4.5. Calcul des stocks du C, N et P.....	8
1.5. La cartographie numérique des sols (CNS)	9
1.5.1. Principe général	9

1.5.2.	Les données spatiales sur les sols	9
1.5.3.	Elaboration des modèles spatiaux	10
1.5.4.	Prédiction et représentation cartographique des propriétés des sols.....	11
2.	RESULTATS	12
2.1.	Modélisation de la teneur en Carbone, azote	12
2.2.	Statistiques descriptives des composantes des stocks	12
2.2.1.	Densité apparente.....	12
2.2.2.	Refus	13
2.2.3.	Teneurs en Carbone, Azote et Phosphore	13
2.2.4.	Stock de C, N et P des sols	14
2.2.5.	Caractéristiques des modèles spatiaux.....	15
2.2.5.1.	Importances des variables spatiaux	15
2.2.5.2.	Caractéristiques des modèles spatiaux	16
2.2.6.	Répartition spatiale des stocks des propriétés des sols	18
3.	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATION.....	22
3.1.	Discussions.....	22
3.1.1.	Sur la méthodologie de cartographie numérique des sols.....	22
3.1.2.	Concernant la modélisation spatial	22
3.1.3.	Discussion sur les résultats	23
3.1.3.1.	Stock de C, N et P.....	23
3.1.3.2.	Les caractéristiques des modèles spatiaux	23
3.1.3.3.	La répartition spatiale de C, N et P.....	24
3.2.	Recommandations	26
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	27
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	28
	ANNEXES	
	TABLES DES MATIERES	