

Topographie : un facteur clé de la fertilité des sols de reboisement à Madagascar

Angelina Rondrotsifantenana Rasoarinaivo ⁽¹⁾, Bruno Bordron ^(1,2),
Ony Josephine Rabemiafara ⁽³⁾, Lovasoa Randriamanantena ⁽¹⁾, Louis Mareschal ⁽²⁾,
Tantely Razafimbelo ⁽⁴⁾, Jean-Pierre Bouillet ^(1,2)

⁽¹⁾ Cirad, dispositif de Recherche et d'Enseignement en Partenariat " Forêts et biodiversité à Madagascar ", Antananarivo 101 (Madagascar). E-mail : tsifantenana@yahoo.fr

⁽²⁾ Cirad, UMR Éco&Sols, F-34060 Montpellier (France).

⁽³⁾ Mention Science de la Terre et de l'Environnement, Université d'Antananarivo (Madagascar).

⁽⁴⁾ Laboratoire des Radio-Isotopes, Université d'Antananarivo, BP 3383, Route d'Andraisoro, Antananarivo 101 (Madagascar).

Reçu le 5 septembre 2024, accepté le 26 août 2025, mis en ligne le 25 septembre 2025.

Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)

DOI : 10.25518/1780-4507.21454

Description du sujet. À Madagascar, les reboisements contribuent à l'approvisionnement en bois-énergie de la population. Toutefois, les projets de reboisement sont confrontés à de faibles taux de réussite en raison de contraintes biophysiques.

Objectifs. Ce travail vise à évaluer l'impact de la position topographique sur les propriétés physico-chimiques des sols de sites potentiels de reboisement sur les Hautes-Terres Centrales de Madagascar.

Méthode. Des prélèvements de sol ont été effectués sur 16 sites non boisés pour un total de 192 échantillons analysés. Les résultats sont comparés à des seuils de carence et de déficience établis pour les sols ferrallitiques.

Résultats. Le pH_{eau} des sols varie peu, de 5,3 à 5,5. La profondeur 0-10 cm présente des teneurs significativement plus élevées en carbone organique (C_{org}), azote total (N_{tot}), phosphore disponible (P_{dispo}) et potassium échangeable (K_{éch}) que la profondeur 10-40 cm. Les sols sur versant sont significativement plus pauvres en N_{tot} et en K_{éch} qu'en bas de pente avec des teneurs moyennes de 1,3 g N·kg⁻¹ ± 0,07 et 0,09 cmolc·kg⁻¹ ± 0,01 contre 1,5 g N·kg⁻¹ ± 0,08 et 0,12 cmolc·kg⁻¹ ± 0,01, respectivement. Parmi les 16 sites, huit sont à écarter pour de futurs reboisements. Parmi les huit restants, deux seulement présentent des sols peu ou non carencés en N_{tot}, P_{dispo} et en K_{éch} sur 0-10 cm. Cependant, ils sont tous les deux déficients en P_{dispo}.

Conclusions. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance d'une caractérisation préalable des sols, du choix de la position topographique et recommande l'application d'une fertilisation starter pour la réussite des reboisements. Les résultats de cette étude constituent une contribution au choix des sites les plus appropriés pour le reboisement à Madagascar.

Mots-clés. Ferralsol, carbone, azote, phosphore, inclinaison du terrain, zone de montagne.

Topography: a key factor affecting the fertility of afforestation soils in Madagascar

Description of the subject. In Madagascar, afforestation plays a significant role in providing wood energy for the local population. However, reforestation projects often face low success rates due to biophysical constraints.

Objectives. The aim of this study was to evaluate the impact of topographic position on the physico-chemical properties of potential reforestation sites in the central highlands of Madagascar.

Method. The study covered 16 sites and analyzed 192 soil samples. The results were compared with deficiency thresholds established for Ferralsols.

Results. The soil pH_{water} varied slightly, from 5.3 to 5.5. The 0-10 cm depth showed significantly higher levels of organic carbon (C_{org}), total nitrogen (N_{tot}), available phosphorus (P_{dispo}), and exchangeable potassium (K_{ech}) than the 10-40 cm depth. Soils on the slope were significantly poorer in N_{tot} and K_{ech} than those on the bottom of the slope, with mean values of 1,3 g N·kg⁻¹ ± 0,07 and 0,09 cmolc·kg⁻¹ ± 0,01 compared to 1,5 g N·kg⁻¹ ± 0,08 and 0,12 cmolc·kg⁻¹ ± 0,01, respectively. Of the 16 sites, eight had to be discarded for future reforestation. Of the remaining eight, only two showed soils with little or no N_{tot}, P_{dispo}, and K_{ech} deficiency over 0-10 cm, but both were deficient in P_{dispo}.

Conclusions. This study highlighted the importance of prior soil characterization, choice of topographic position and recommends starter fertilization for successful reforestation. The results of this study are a contribution to the choice of the most appropriate afforestation sites in Madagascar.

Keywords. Ferralsols, carbon, nitrogen, phosphorus, slope, highlands.

1. INTRODUCTION

La restauration par le boisement et le reboisement des terres dégradées constitue une stratégie importante pour l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques (FAO, 2022). Au-delà des enjeux globaux de séquestration de carbone, les reboisements par les petites exploitations familiales dans les pays tropicaux constituent d'importantes ressources en bois pour l'énergie, la construction et la protection des terres contre l'érosion (Nambiar, 2021). Dans les pays en développement comme Madagascar, les forêts plantées jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en charbon de bois et en bois de chauffe utilisés pour la cuisson par 95 % de la population (Charpin et al., 2019).

Étant donné la croissance démographique, l'urbanisation et l'exode rural auxquels font face actuellement les pays tropicaux, les besoins en bois et bois-énergie vont continuer à s'accroître (Babanyara & Saleh, 2010 ; Madlener & Sunak, 2011). Pour freiner la déforestation croissante dans cette zone, les surfaces reboisées doivent augmenter (Global Forest Resources Assessment 2020).

D'ailleurs, il est constaté que les superficies existantes de reboisements ne sont pas suffisantes pour satisfaire les demandes actuelles en bois-énergie et que leur expansion reste limitée dans certaines zones présentant diverses contraintes (McEwan et al., 2020). En plus de celles financières et techniques, les conditions abiotiques (sites, fertilité du sol, pente) peuvent impacter le taux de réussite des plantations (Sprenkle-Hyppolite et al., 2016). L'expansion du reboisement se développe principalement sur des sites marginaux car les terres plus fertiles sont occupées en priorité par l'agriculture (Sandel & Svenning, 2013). Les Hautes Terres Centrales (HTC) de Madagascar, caractérisées par des sols ferrallitiques dégradés, en sont une illustration (Verhaegen et al., 2014). La productivité des plantations d'*Eucalyptus*, la principale espèce de reboisement à Madagascar, y est ainsi très faible (Randrianjafy, 1999 ; Razakamanarivo et al., 2012).

Des études ont montré que les facteurs environnementaux tels que les sites, la topographie, les propriétés du sol (humidité, texture, éléments organo-minéraux, acidité), la végétation et les conditions météorologiques ont des impacts importants et durables sur les performances des plantations (Del Campo et al.,

2021 ; Sena et al., 2022). La topographie est susceptible de modifier le microclimat, affecter les conditions d'infiltration et de ruissellement des eaux pluviales qui ont un effet sur les stocks de matière organique, de nutriments et sur la composition texturale des sols (Wang et al., 2001 ; Abate & Kibret, 2016).

À Madagascar, la faible productivité des plantations est souvent associée à la nature dégradée des terrains de reboisement. Encore peu d'études ont été menées afin d'identifier précisément les facteurs en cause comme, par exemple, les caractéristiques édaphiques, la position topographique des parcelles ou leur sensibilité à l'érosion. Si les propriétés physico-chimiques des sols sont bien étudiées pour les sols agricoles à Madagascar (Andriamananjara et al., 2019 ; Razafimbelo et al., 2022), ce n'est pas encore le cas pour les sols les plus pauvres destinés aux reboisements. La majorité des projets de reboisement sont conduits sans étude préalable des caractéristiques biophysiques des sites. La mise en place d'une approche simple et abordable pour l'identification de localisations *ad hoc* constitue donc une priorité pour assurer la réussite des programmes de reboisement.

La présente étude a pour objectif d'étudier les facteurs abiotiques les plus favorables pour l'expansion des surfaces de reboisements sur les HTC de Madagascar en se focalisant sur l'effet de la topographie et des sites sur les propriétés des sols. Nous avons posé les hypothèses suivantes :

- les positions topographiques impactent les propriétés édaphiques, les sols sur versant, plus proches de la roche mère, étant les plus riches chimiquement (Raunet, 2008) ;
- certains sites sont significativement plus fertiles et propices à la croissance des arbres car ils présentent des teneurs correctes en nutriments dans le sol (Bouillet, 2016).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Sites d'étude

Les sites d'étude ont été choisis dans 16 communes rurales issues de cinq districts appartenant à deux régions (Analamanga et Itasy) des HTC de Madagascar (**Figure 1**) : Ambato, Ambohitrambo, Ambohitrolomahintsy, Ambohitromby, Ambolotarakely, Ampanotokana, Anjozorobe,

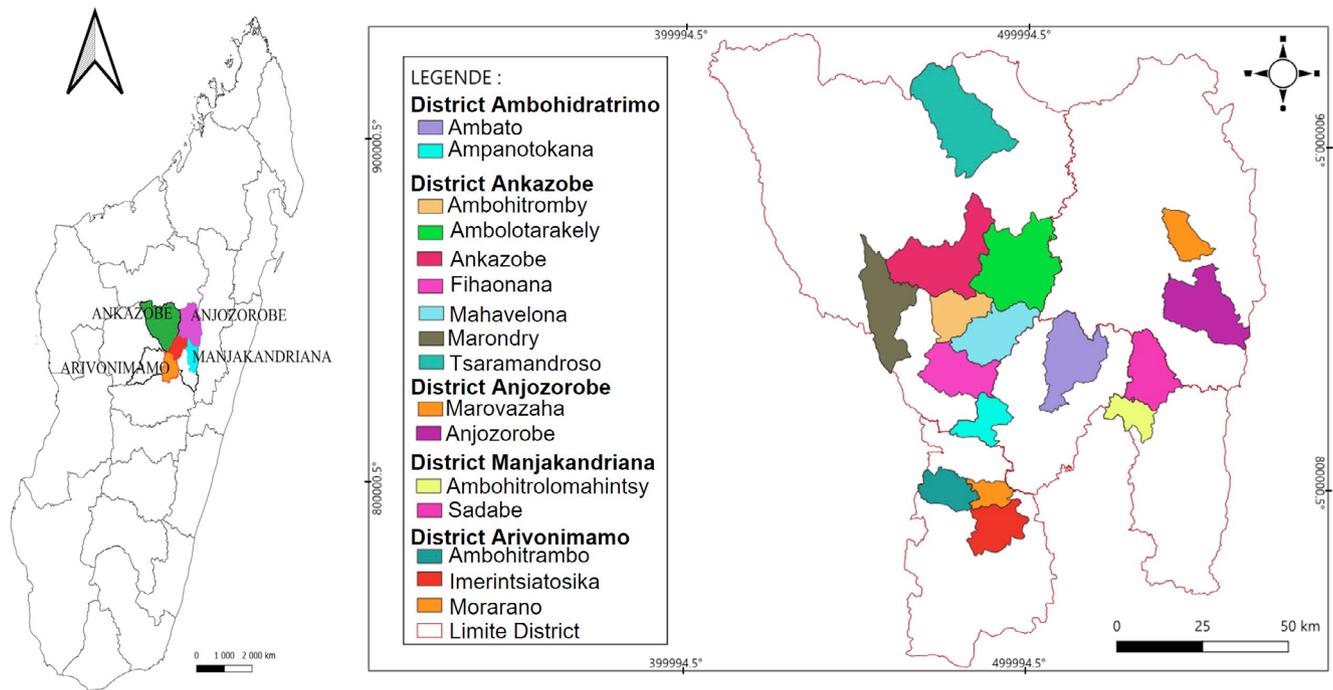


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude et photographie d'une toposéquence destinée aux reboisements sur les Hautes Terres Centrales de Madagascar — *Location map of the study area and photograph of a toposequence intended for reforestation in the Central Highlands of Madagascar.*

Ankazobe, Fihaonana, Imeritsiasosika, Mahavelona, Marondry, Marovazaha, Morarano Antongona, Sadabe, Tsaramasoandro. Ces communes, qui couvrent environ 400 000 ha au total, se caractérisent par la présence d'importantes surfaces de plantations d'*Eucalyptus* (cas d'Anjozorobe, Sadabe, Ankazobe) (Chaix & Ramamonjisoa, 2001) ou préemptées pour de futurs projets de reboisement selon les Schémas d'Aménagement Communaux (SAC).

Ces sites se situent entre 1 200 et 1 600 m d'altitude (**Tableau 1**). Les sites du district d'Ankazobe sont largement dominés par la savane et menacés régulièrement par le passage de feux (Kull et al., 2022). À l'inverse, ce risque est beaucoup moins élevé pour les sites des districts d'Anjozorobe et de Manjakandriana

qui disposent d'un fort taux de reboisement (Bouillet et al., 2019). Les paysages sur ces sites présentent souvent des lavakas et des ravinements (Raunet, 2008). Le substratum géologique de la région est constitué par des roches formées durant le Précambrien, essentiellement de type migmatitique et gneissique (Hottin, 1976 in Rakotondraompiana et al., 2003).

Dixey (1960) indique que la zone d'étude correspond à la surface d'aplanissement d'âge du Crétacé supérieur, définie par de basses collines d'altitude concordantes aux environs de 1 250-1 350 m. Néanmoins, Bourgeat et al. (1969), se basant sur des niveaux relatifs d'aplanissement plutôt que sur des surfaces datées, suggèrent que les sites des districts d'Ankazobe, d'Ambohidratrimo, d'Anjozorobe

Tableau 1. Description des sites (les coordonnées géographiques ainsi que l'altitude ont été relevées par GPS ; les données sur les types de roches mères par site ont été obtenues à partir des cartes géologiques de Madagascar [Service géologique, 1966] ; le pourcentage moyen de pente de chaque toposéquence a été calculé par division entre la différence d'altitude entre les points les plus et les moins élevés et la distance horizontale entre ces deux points) — *Site description (Geographical coordinates and altitude were recorded by GPS; data on source rock types per site were obtained from the geological maps of Madagascar (Service géologique, 1966); the average slope percentage for each toposéquence was calculated by dividing the difference in altitude between the highest and lowest points by the horizontal distance between these two points).*

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Niveau de surface d'aplatissement	Pente moyenne de la toposéquence (%)	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Roche-mère
Ambato	18°34'55.07"S	47°27'41.72"E	1 260	Tampoketsa	12	1 404	Gneiss
Ambohitrambo	18°54'12.62"S	47°9'57.17"E	1 311	Miarinarivo	10	1 260	Gneiss
Ambohitrolomahintsy	18°44'10.00"S	47°41'55.00"E	1 420	Tampoketsa	10	1 332	Migmatite
Ambohitromby,	18°27'24.59"S	47°7'32.01"E	1 259	Tampoketsa	7	1 404	Gneiss
Ambolotarakely,	18°22'38.61"S	47°17'41.18"E	1 460	Tampoketsa	14	1 404	Gneiss
Ampanotokana,	18°43'16.82"S	47°16'35.33"E	1 300	Tampoketsa	15	1 236	Gneiss
Anjozorobe	18°32'18.96"S	47°54'29.99"E	1 305	Tampoketsa	18	1 284	Granite
Ankazobe	18°14'55.28"S	47°7'38.89"E	1 280	Tampoketsa	12	1 404	Gneiss
Fihaonana	18°37'9.45"S	47°13'49.69"E	1 372	Tampoketsa	10	1 236	Gneiss
Imerintsiatosika	18°59'59.53"S	47°21'30.28"E	1 335	Miarinarivo	13	1 260	Granite
Mahavelona	18°31'24.46"S	47°16'42.35"E	1 307	Tampoketsa	7	1 404	Gneiss
Marondry,	18°25'48.09"S	47°0'15.29"E	1 250	Tampoketsa	6	1 404	Gneiss
Marovazaha	18°29'8.58"S	47°50'45.99"E	1 500	Tampoketsa	11	1 284	Migmatite
Morarano Antongona.	18°53'50.75"S	47°14'14.75"E	1 254	Miarinarivo	12	1 260	Gneiss
Sadabe	18°36'10.01"S	47°43'19.10"E	1 400	Tampoketsa	14	1 332	Migmatite
Tsamamasoandro	18°0'10.30"S	47°8'37.30"E	1 550	Tampoketsa	13	1 404	Gneiss

et de Manjakandriana appartiendraient au niveau supérieur (ou Tampoketsa) et les autres sites du district d'Arivonimamo relèveraient du niveau intermédiaire (ou Miarinarivo). Le niveau de Tampoketsa se caractérise par sa platitude et son aspect massif de haut plateau. Le niveau de Miarinarivo se distingue du précédent par un aplanissement relatif avec un relief présentant une association de lourdes collines interfluvies convexes se reliant à un système de bas-fonds peu développés et par des versants très redressés (Bourgeat et al., 1969).

Le climat de cette zone, représentatif de celui des HTC, est de type tropical d'altitude caractérisé par un hiver frais et sec de 4 à 5 mois (de mai à septembre) et un été chaud et humide de 7 mois (octobre à avril) (Razafimbelo et al., 2008). La pluviométrie moyenne annuelle varie de 1236 mm à 1404 mm selon les communes et la température moyenne annuelle, de 17 °C à 19 °C. Les sols sont généralement des ferralsols (FAO-UNESCO, 1974).

La couverture végétale observée sur les zones de prélèvements, typique des HTC, est caractérisée par la présence majoritaire de graminées (*e.g. Aristida* sp.) représentatives des savanes africaines (Codron et al., 2005) et par la rareté, voire l'absence, d'arbres (Figure 1).

2.2. Sélection des parcelles

Au niveau de chaque site, deux toposéquences à trois positions topographiques ont été étudiées : sommet, versant et bas de pente. Ces parcelles sont localisées sur des collines non boisées, réservées traditionnellement au pâturage extensif (Douzet et al., 2010). La surface moyenne des parcelles est de 0,3 ha reflétant la superficie moyenne des parcelles de reboisement dans la région (Bouillet et al., 2019). Les versants ont des pentes supérieures à celles des sommets et bas de pente.

2.3. Prélèvement d'échantillons de sol

Les échantillons de sols ont été prélevés sur des terrains non boisés. Il n'y a pas eu de passage de feux sur les points de prélèvement des échantillons. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une bêche, compte tenu de la forte compaction du sol, dans des fosses localisées sur quatre points disposés en étoile distants de 1 m du centre de la zone de prélèvement. Deux profondeurs du sol ont été considérées : 0-10 cm et 10-40 cm. Ce choix a été dicté par le fait que, même quand ils sont très profonds comme dans cette zone (Bourgeat & Aubert, 1972), la majeure partie des nutriments des sols ferrallitiques sont contenus dans les horizons superficiels (Laclau et al., 2010 ; Andriamananjara

et al., 2019). Pour chaque profondeur, les échantillons prélevés sur les quatre points ont été mélangés pour former un échantillon composite homogène. Au total, 192 échantillons de sol ont été collectés.

2.4. Analyses physico-chimiques du sol au laboratoire

Les échantillons du sol ont été séchés à l'air libre avant d'être préparés et tamisés à 2 mm et ensuite broyés à 0,2 mm. Les échantillons tamisés à 2 mm ont été utilisés pour la granulométrie et le pH_{eau} du sol selon le rapport de mélange de sol et de solution 1:2,5. Ceux broyés à 0,2 mm ont servi à la détermination des teneurs en carbone organique (C_{org}), azote total (N_{tot}), phosphore disponible (P_{dispo}) et K échangeable ($\text{K}_{\text{éch}}$). Le C_{org} du sol a été estimé par la méthode de Walkley et Black (1934), le N_{tot} par Kjeldahl, le P_{dispo} par Olsen modifiée par Dabin (1976) et le $\text{K}_{\text{éch}}$ par la méthode de Metson à pH égal à 7 conformément aux études réalisées par Boyer (1982) sur les mêmes types de sol.

La granulométrie a été effectuée selon la méthode de la pipette après destruction de la matière organique par de l'eau oxygénée à chaud et dispersion des particules à l'hexamétoposphate de sodium (Razafimbelo et al., 2008). L'argile (0-2 μm) et les limons fins (2-20 μm) ont été prélevés à la pipette de Robinson jusqu'à épuisement et les autres fractions, sables grossiers (200-2000 μm), sables fins (50-200 μm), limons grossiers (20-50 μm) ont été obtenues par tamisage (AFNOR, 2004).

2.5. Analyse statistique

Les effets de la profondeur, de la topographie et du site ont été testés sur les propriétés du sol. En outre, pour mieux appréhender les variabilités entre les sites et au sein d'un site, les effets sur les propriétés du sol de cinq facteurs descriptifs des sites (altitude, niveau de surface d'aplanissement, pente, précipitations moyennes annuelles et type de roche-mère) ont été étudiés. Une première analyse de variance a été ainsi effectuée pour tester l'effet des cinq facteurs (profondeur, topographie, site, niveau de surface d'aplanissement et type de roche-mère) et de leurs interactions de 1^{er} ordre sur les propriétés physico-chimiques du sol. Par la suite, une seconde analyse de variance incluant les interactions de 1^{er} ordre a été réalisée avec les seuls facteurs qualitatifs présentant des effets significatifs : profondeur, topographie et sites. Le test de Tuckey a été utilisé pour classer les groupes de traitements significativement différents entre eux. Les conditions de normalité et d'homoscédasticité des résidus de l'Anova ont été vérifiées. Des tests de corrélation et des régressions linéaires multiples ont été réalisés entre chaque propriété physico-chimique du sol et des

variables explicatives environnementales caractérisant le site : altitude, pente, précipitation moyenne annuelle. Enfin, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour replacer les propriétés physico-chimiques en fonction des sites d'étude (considérés comme variable supplémentaire). Les analyses statistiques ont été réalisées sous R (R Development Core Team, 2013), avec le seuil de signification statistique égal à 0,05.

Des seuils de carences ont été définis pour N_{tot} , P_{dispo} et $K_{éch}$ en dessous desquels la croissance des arbres est fortement limitée, ceci à partir des valeurs indiquées par Boyer (1982) pour des plantes agricoles tropicales poussant sur des sols ferrallitiques. Ces valeurs ont été arrêtées à $0,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $0,2 \text{ cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour N_{tot} , P_{dispo} et $K_{éch}$, respectivement. De même, des seuils de déficience au-dessus desquels la croissance des arbres est peu impactée ont été définis avec des valeurs de $1,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $0,4 \text{ cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour N_{tot} , P_{dispo} et $K_{éch}$, respectivement. Ces valeurs seuils établies pour des cultures agricoles et qui n'exploitent pas des volumes de sol comparables aux arbres (Christina et al., 2011) ont été utilisées pour catégoriser, en première approximation, la fertilité des sols destinés aux plantations forestières.

3. RÉSULTATS

3.1. Effet des facteurs descriptifs des sites sur les propriétés du sol

Il n'y a pas de corrélation significative entre l'altitude, la pente, les précipitations moyennes annuelles et les propriétés physico-chimiques du sol (Annexe 1). Aucun effet significatif de l'altitude n'a été observé. La pente a un effet significatif négatif sur les teneurs

en C_{org} , N_{tot} , argile et sable. La précipitation moyenne annuelle a un effet significatif positif uniquement sur les teneurs en C_{org} . Cependant, la capacité prédictive de ces facteurs sur les propriétés physico-chimiques des sols reste faible, les R^2 ajustés des modèles de régressions multiples variant de 0,06 à 0,15 (Annexe 2). De même, il n'y a pas d'effet significatif des facteurs biophysiques qualitatifs (niveau d'aplanissement et type de roche-mère) sur les propriétés physico-chimiques du sol (Annexe 3).

3.2. Propriétés physico-chimiques du sol en fonction de la profondeur et des positions topographiques

Toutes les propriétés physico-chimiques du sol, à l'exception du pourcentage de limons, varient significativement en fonction de la profondeur (Tableau 2), avec des valeurs deux fois plus élevées pour l'horizon 0-10 cm que 10-40 cm, à l'exception du pourcentage d'argile et du pH qui sont supérieurs à la profondeur 10-40 cm (Figure 2).

Les teneurs en N_{tot} et $K_{éch}$ ainsi que les pourcentages d'argile et de sable varient significativement entre positions topographiques (Tableau 2). Les sols des versants présentent des teneurs en N_{tot} significativement plus faibles que sur les sommets et les bas de pente avec des valeurs moyennes à 0-10 cm de profondeur, respectivement de $1,6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0,1$, $1,8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0,1$ et $1,9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0,1$ (Figure 2A). Les teneurs moyennes en $K_{éch}$ sur 0 à 10 cm sont comparables sur les versants et les sommets – en moyenne $0,13 \text{ cmolc}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0,001$ et sont significativement plus faibles que sur les bas de pente – en moyenne $0,18 \text{ cmolc}\cdot\text{kg}^{-1} \pm 0,01$ (Figure 2C). Les tendances des teneurs en N_{tot} et $K_{éch}$ sont les mêmes pour les deux profondeurs (Figure 2).

Il y a un effet significatif de la profondeur

Tableau 2. P-values de l'Anova sur les propriétés physico-chimiques du sol en fonction de la profondeur, de la topographie et des sites — Anova p-values on soil physicochemical properties as a function of depth, topography and site.

Propriétés du sol	Unité	Profondeur	Topographie	Site	Site x Topographie	Site x Profondeur	Topographie x Profondeur
C_{org}	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 0,00***	0,11	< 0,00***	0,06	0,21	0,91
N_{tot}	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 0,00***	< 0,01**	< 0,00***	0,04 *	0,76	0,57
P_{dispo}	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 0,00***	0,20	< 0,00***	0,03 *	0,28	0,67
$K_{éch}$	$\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 0,00***	< 0,01**	< 0,00***	0,20	0,05	0,89
C/N		< 0,01**	0,54	< 0,00***	0,46	0,43	0,81
pH		< 0,01**	0,35	0,244	0,87	0,02*	0,35
Argile	%	< 0,01**	0,08	< 0,00***	0,75	0,86	0,62
Limons	%	0,25	0,07.	< 0,00***	0,25	0,42	0,12
Sable	%	< 0,00***	0,02 *	< 0,00***	0,02 *	0,97	0,88

* : $p < 0,05$ — $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$ — $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$ — $p < 0,001$.

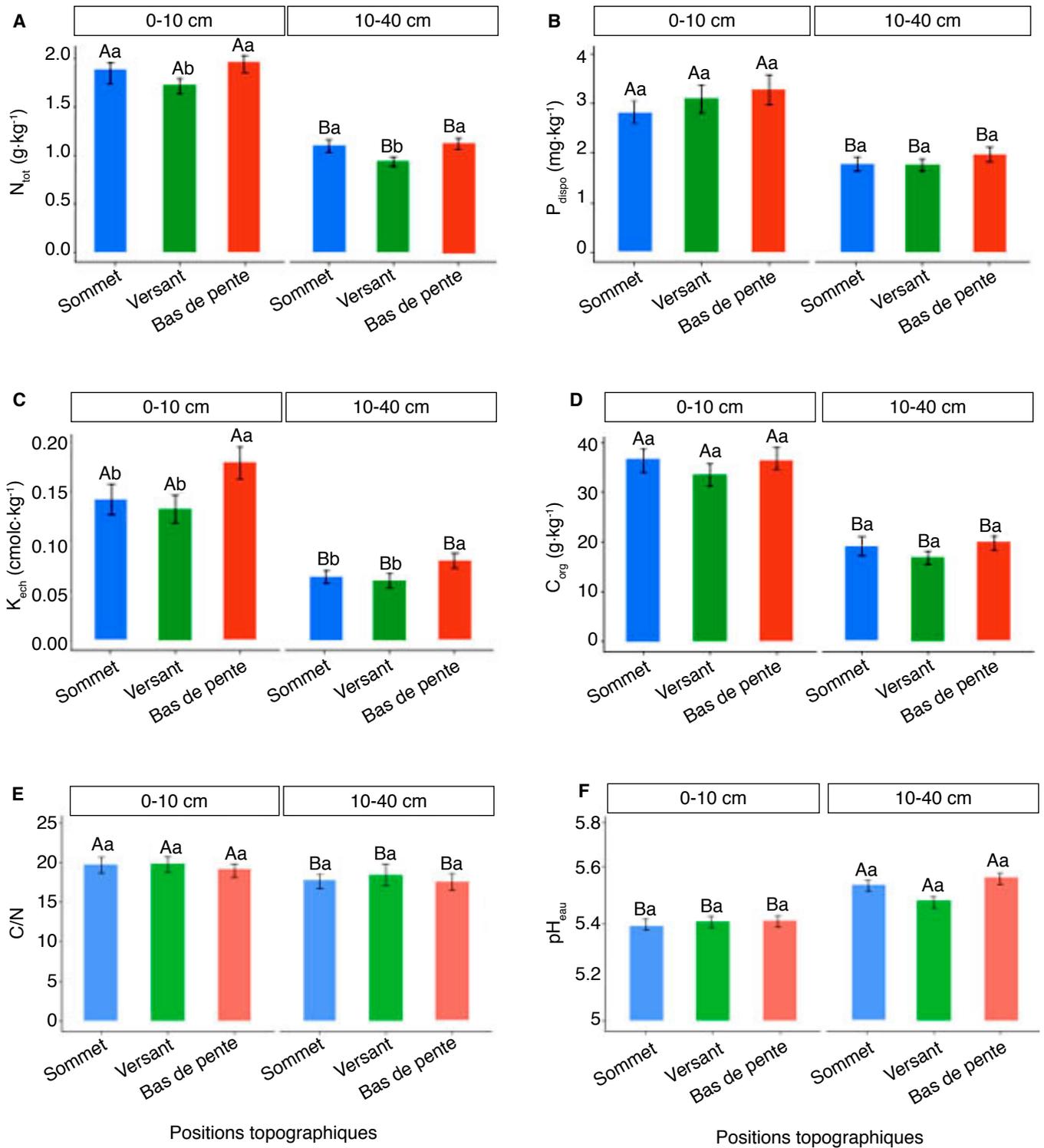


Figure 2. Propriétés chimiques du sol en fonction de la profondeur et des positions topographiques (n = 32). Les lettres différentes accompagnant les valeurs indiquent une différence significative à $p < 0,05$ entre les profondeurs (lettres majuscules) et les positions topographiques (lettres minuscules) — *Soil chemical properties as a function of depth and topographical position (n = 32). The different letters accompanying the values indicate a significant difference at $p < 0.05$ between depths (upper case letters) and topographical positions (lower case letters).*

sur les taux d'argile (**Tableau 2**). Cependant, les différences entre horizons sont faibles et les taux moyens sont respectivement de 44 % et 41 % sur 10-40 cm et 0-10 cm. L'inverse est observé pour les taux de sable avec des valeurs moyennes respectives significativement différentes, de 40 % et 45 %.

Contrairement aux tendances des propriétés chimiques du sol, le taux d'argile se présente d'un point de vue descriptif légèrement plus élevé sur le versant (44 %) et le sommet (43 %) plutôt que sur le bas de pente (39 %), bien que ce résultat soit statistiquement significatif (p -valeur = ...) (**Figure 3**). Le sol est significativement mais faiblement moins sableux sur le versant (41 %) que sur les deux autres positions topographiques (43 % sur le sommet et 44 % sur le bas de pente) (**Figure 3**).

Il existe des variations significatives entre sites sur les propriétés physico-chimiques du sol, sauf pour le pH (**Tableau 2**). Parmi les 16 sites, celui de Tsaramasoandro présente les teneurs moyennes en C_{org} , N_{tot} et P_{dispo} les plus élevées, associées à une forte teneur en limons égale à 22 % (**Figure 4**). Le site d'Ambohitrolomahinty est aussi caractérisé par des teneurs moyennes en N_{tot} , P_{dispo} et $K_{éch}$ élevées, également associées à un pourcentage élevé de limons. À l'inverse, Ambato présente les teneurs moyennes les plus faibles en C_{org} et en P_{dispo} , Imerintsiatosika en N_{tot} et Ambolotarakely en $K_{éch}$. Ce dernier site présente aussi les plus fortes teneurs en sable (**Figure 4**).

La comparaison des concentrations en N_{tot} , P_{dispo} et $K_{éch}$ de l'horizon 0 à 10 cm aux seuils de carence et de déficience de Boyer (1982) (**Tableau 3**) montre que les 16 sites peuvent être classés en quatre catégories :

- deux sites présentent des sols peu ou non carencés en N_{tot} , P_{dispo} et en $K_{éch}$; cependant, ils sont tous les deux déficients en P_{dispo} et un seul ne présente pas de déficience en $K_{éch}$ sur la moitié des échantillons de sol ;
- quatre sites présentent des sols peu ou non carencés en N_{tot} et en P_{dispo} mais fortement carencés en $K_{éch}$; ils sont par ailleurs tous déficients en P_{dispo} et $K_{éch}$;
- deux sites avec des sols non carencés en N_{tot} et moyennement en $K_{éch}$ mais fortement en P_{dispo} ; ils sont tous déficients en P_{dispo} et $K_{éch}$;
- huit sites fortement carencés en P_{dispo} et $K_{éch}$ et, logiquement, tous déficients en ces deux éléments. Pour cette dernière catégorie, trois sites présentent également des déficiences en N_{tot} pour la moitié des échantillons du sol (**Annexe 4**).

Une interaction significative entre site et topographie pour le P_{dispo} et le pourcentage de sable du sol a été notée (**Tableau 1**) : Anjozorobe, Marovazaha et Sadabe sont les seules communes présentant des sites où les teneurs moyennes en P_{dispo} du sol sont significativement plus élevées (p -valeur = 0,013) sur les versants que sur les bas et hauts de pente. Cependant, cette interaction ne

modifie pas le classement des positions topographiques en fonction des sites.

4. DISCUSSION

4.1. Pauvreté du sol des versants destinés au reboisement

Contrairement à notre première hypothèse, le versant, supposé être la position la plus riche en éléments minéraux, présente significativement les plus faibles teneurs en N_{tot} et en $K_{éch}$. Les autres propriétés physico-chimiques du sol (C_{org} , P_{dispo} , C/N, pH) ne varient pas significativement entre positions topographiques, avec toutefois une tendance de valeurs plus faibles sur les versants. L'érosion hydrique, favorisée par la pente, pourrait être à l'origine de cette pauvreté en éléments minéraux (Avakoudjo et al., 2015). Musa & Gisilanbe (2017) avancent que la variabilité des propriétés du sol sur une pente résulte de trois phénomènes successifs : le détachement, le transport et l'accumulation de matériaux du sol. Ainsi, les éléments minéraux solubles du sol sur les terrains en pente sont entraînés par les eaux de ruissellement vers les bas de pente. Plus les pentes sont fortes, plus l'intensité du ruissellement est élevée et plus les écoulements de surface s'accumulent dans les bas-fonds (Raunet, 2008). Les Hautes Terres Centrales de Madagascar sont soumises à un important risque d'érosion hydrique dû à la fragilité des sols et à l'intensité des précipitations (Bailly et al., 1976). Toutefois, la teneur sensiblement élevée en argile et la faible teneur en sable des versants (**Figure 3**) pourrait indiquer que l'érosion hydrique a favorisé le transport des sables fins mais n'a pas eu d'impact sur les teneurs en argile (Avakoudjo et al., 2015). Dubiez et al. (2014) suggèrent également que les teneurs en argile relativement élevées des versants pourraient provenir de sols rajeunis par l'érosion.

Rabhi et al. (2018) suggèrent que le milieu édapho-topographique le plus favorable aux plantations forestières est associé à une faible pente et à un sol profond. Étant donné que les espaces disponibles pour le reboisement à Madagascar se situent généralement sur les collines, il convient de considérer une limite maximale de pente acceptable lors de l'installation des plantations. Ainsi, Bouillet et al. (2019) ont suggéré de ne pas planter sur des pentes > 12 % sur les HTC de Madagascar. Des aménagements anti-érosifs (banquettes et terrasses) doivent être réalisés préalablement pour les zones à très forte pente (Rabhi et al., 2018). Ces paramètres liés à la topographie peuvent être obtenus à l'aide des modèles numériques de terrains (MNT) qui sont des représentations numériques de la topographie du terrain (Ouédraogo et al., 2014).

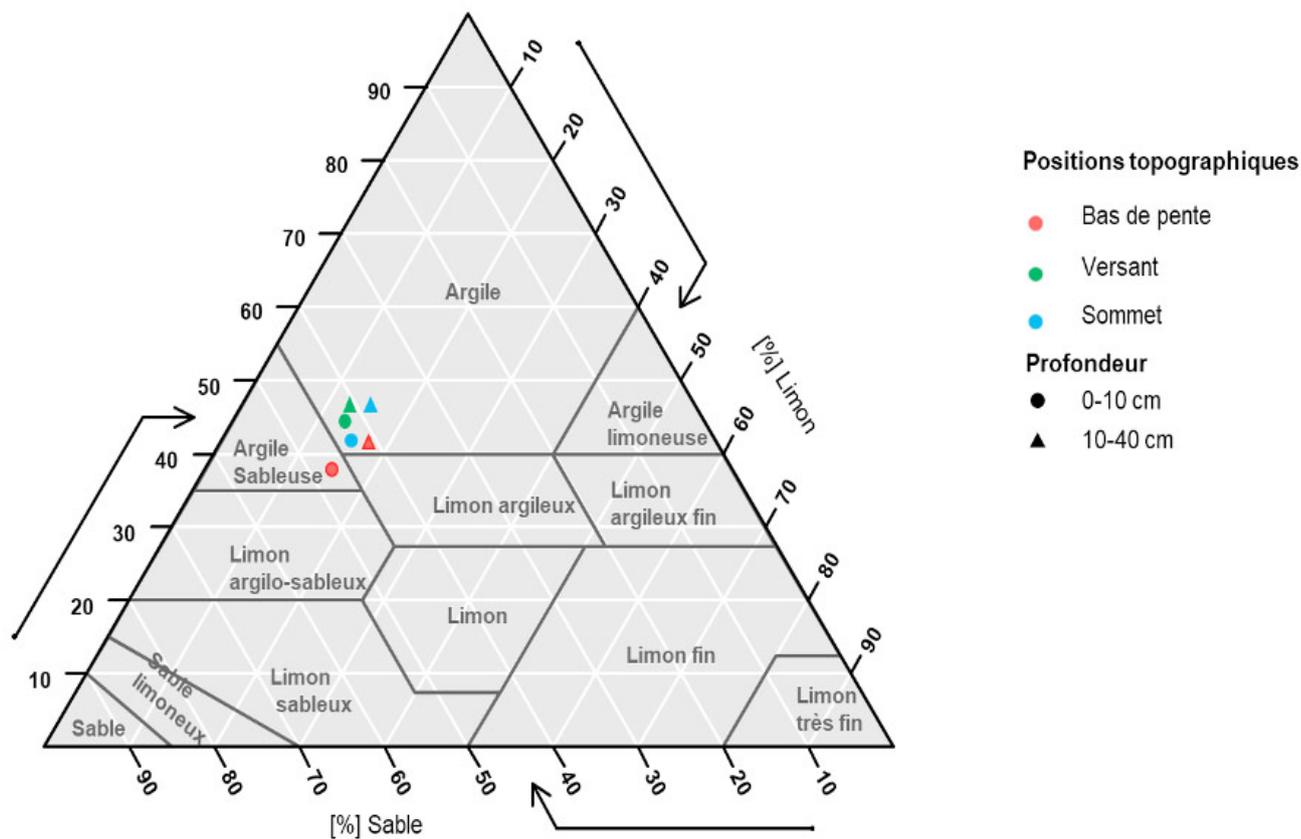


Figure 3. Texture du sol selon la classification américaine (USDA) en fonction de la profondeur et des positions topographiques (n = 32) — Soil texture as USDA classification as a function of depth and topographical position (n = 32).

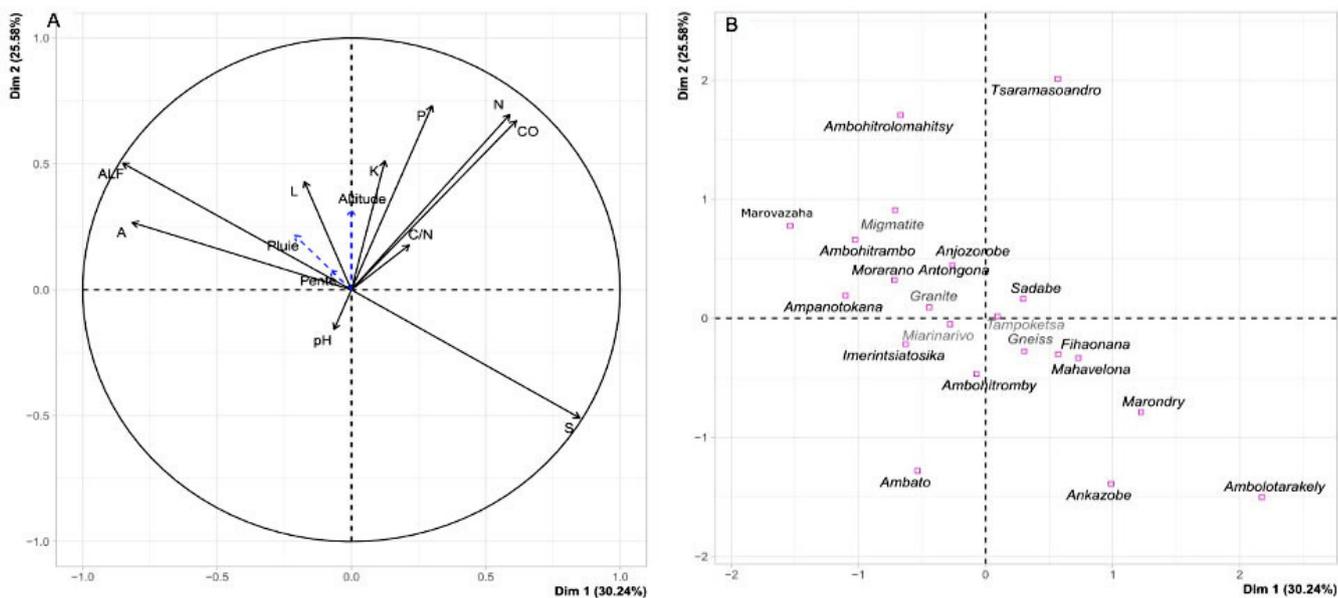


Figure 4. Graphes de corrélation des variables quantitatives (A) et des barycentres de la variable supplémentaire (B) suivant les deux premiers axes de l’ACP — Correlation graphs for the quantitative variables (A) and the barycentres of the supplementary variable (B) along the first two axes of the PCA.

A : argile — clay ; L : limon — silt ; S : sable — sand.

Les textures du sol influencent généralement la distribution et les teneurs en éléments nutritifs du sol, les sols à texture plus fine (forte teneur en argile et limon) ayant tendance à présenter une plus grande capacité de stockage de carbone et d'azote, comme observé sur les sols malgaches (Razafimbelo et al., 2008 ; Chevallier et al., 2013). L'absence de corrélation significative entre les teneurs en argile, ou argile + limon, notée dans la présente étude (**Annexe 1**) pourrait s'expliquer par la faible étendue des teneurs en argile (+ limons fins) des sols étudiés.

4.2. Sites favorables aux reboisements

En accord avec notre deuxième hypothèse, il existe sur la zone étudiée des sites plus fertiles et propices aux reboisements et d'autres très carencés en éléments minéraux et défavorables à la reforestation. Les sites avec les sols les moins carencés, de la 1^{ère} catégorie, sont caractérisés par les facteurs biophysiques et environnementaux suivants : une précipitation moyenne annuelle d'au moins 1330 mm, une pente moyenne inférieure à 15 %, une roche-mère du type migmatique avec un niveau d'aplanissement supérieur (ou Tampoketsa). La précipitation moyenne sur l'année, au-delà de son effet positif sur la croissance des arbres (Wise & Dannenberg, 2022), augmente le développement de la végétation (Chen & Weber, 2014) et augmente le C_{org} du sol, suggérant que les sites à plus fortes précipitations sont associés aux sites plus fertiles qui doivent être privilégiés pour le reboisement. Rakotondraompiana et al. (2003) suggèrent que les zones appartenant au niveau d'aplanissement supérieur sont peu sensibles à l'érosion par rapport au niveau d'aplanissement intermédiaire. Les sites de la 1^{ère} catégorie (Ambohitrolomahinty et Sadabe) présentent les sols les plus favorables pour l'installation de plantations forestières (**Tableau 3**). Cependant, tous les sites (à part Ambohitrolomahinty pour $K_{éch}$ sur la moitié des échantillons) présentent des déficiences en P_{dispo} et $K_{éch}$. L'apport de fertilisation, au moins en P et K, s'avérerait ainsi nécessaire pour assurer une production correcte des plantations, l'effet très positif sur la croissance d'*E. robusta* ayant déjà été montré sur un site des HTC de Madagascar (Bouillet et al., 2019) et dans d'autres pays tropicaux (Da Silva et al., 2016). Cette fertilisation minérale ou en mélange avec des fumures organiques, quand cela est possible, joue un rôle important pour une meilleure efficacité d'utilisation par les plants (Gram et al., 2020), serait aussi à apporter aux plantations mises en place sur les six autres sites de la 2^e et 3^e catégorie présentant des propriétés édaphiques moins favorables (**Tableau 3**). Les sites de la dernière catégorie (**Tableau 3**) sont les moins propices à la reforestation car ils présentent des sols très carencés. Ces derniers doivent donc être

évités, en particulier si la disponibilité des fertilisants est limitée. La variabilité entre sites peut être due à la pression anthropique et aux modes d'usage (e.g. déforestation, culture sur brûlis) qui affectent la dynamique du carbone et des nutriments dans les sols ferrallitiques (Saneho et al., 2014). Razafindrakoto (2015) a par ailleurs constaté que les sites localisés dans le Nord-Ouest des Hauts plateaux de Madagascar (districts d'Ambohidratrimo et d'Ankazobe) subissent d'importants problèmes d'érosion liés au passage très fréquent de feux de brousse. Par ailleurs, les feux pourraient entraîner une élimination importante de la matière organique, une détérioration de la structure et de la porosité du sol, une réduction du taux d'infiltration d'eau dans le sol, une forte perte d'éléments nutritifs par volatilisation ainsi qu'une altération de l'activité biologique du sol (Certini, 2005 ; Are et al., 2009).

À l'inverse, les sites localisés dans les zones à forts taux de reboisement (districts de Manjakandriana et d'Anjozorobe) bénéficient d'une meilleure protection du sol contre l'érosion grâce à la présence d'espaces boisés en amont du bassin versant et à la mise en place par les populations de techniques anti-érosives.

Les carences/déficiences nutritives varient entre sites, une classification préalable des zones de reboisement en fonction de leurs propriétés édaphiques est fortement recommandée pour déterminer les terrains potentiellement les plus productifs et les modes de gestion sylvicoles les plus appropriés (Titilope & Ade, 2011). Ramamonjisoa (1999) a rapporté que la productivité moyenne des taillis d'*Eucalyptus robusta* variait de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ sur sols carencés à $25-30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ sur bons sols, mais sans préciser les caractéristiques de ces derniers. Une telle catégorisation contribuerait aussi à préciser les quantités et la nature des fertilisants à apporter en fonction des sites et des positions topographiques. Dans cette logique, il est très important de conduire des essais de fertilisation, organique et/ou minérale. Ces essais doivent être pratiqués sur différentes espèces à croissance rapide à vocation bois-énergie (*Eucalyptus* sp., *Corymbia* sp., *Acacia* sp.), chacune ayant ses propres besoins et dynamiques de prélèvement et de recyclage d'éléments minéraux dans le sol (Laclau et al., 2010 ; Rasoarainivo et al., 2022).

5. CONCLUSIONS

La caractérisation de la variabilité des propriétés physico-chimiques des sols apparaît comme une étape préalable indispensable à l'implantation et à la réussite d'un programme de reboisement. La présente étude apporte de nouvelles connaissances sur les propriétés des sols ferrallitiques à Madagascar, qui portent la majorité des activités agricoles et

Tableau 3. Catégorisation des sites en fonction du dépassement des seuils de carence et de déficience de Boyer pour N_{tot} , P_{dispo} et $K_{\text{éch}}$ sur l'horizon 0 à 10 cm ($n = 6$) — *Categorization of sites based on exceeding Boyer's deficiency and deficiency thresholds for N_{tot} , P_{dispo} and $K_{\text{éch}}$ over a 0 to 10 cm horizon ($n = 6$).*

Catégorie	Site	Pourcentage des valeurs > seuils de carence de Boyer			Pourcentage des valeurs > seuils de déficience de Boyer		
		N_{tot} (g·kg ⁻¹)	P_{dispo} (mg·kg ⁻¹)	$K_{\text{éch}}$ (cmolc·kg ⁻¹)	N_{tot} (g·kg ⁻¹)	P_{dispo} (mg·kg ⁻¹)	$K_{\text{éch}}$ (cmolc·kg ⁻¹)
	Valeurs des seuils	0,5	3	0,2	1,5	10	0,4
1	Ambohitrolomahitsy	100 %	83 %	50 %	100 %	0 %	50 %
	Sadabe	100 %	67 %	67 %	83 %	0 %	0 %
2	Tsaramasoandro	100 %	67 %	0 %	83 %	0 %	0 %
	Anjozorobe	100 %	67 %	17 %	83 %	0 %	0 %
	Fihaonana	100 %	67 %	0 %	67 %	0 %	0 %
	Marovazaha	100 %	50 %	17 %	83 %	0 %	0 %
3	Ambohitrambo	100 %	50 %	33 %	67 %	0 %	0 %
	Ampanotokana	100 %	33 %	50 %	83 %	0 %	0 %
4	Mahavelona	100 %	33 %	0 %	100 %	0 %	0 %
	Marondry	100 %	33 %	17 %	83 %	0 %	0 %
	Ambohitromby	100 %	17 %	0 %	67 %	0 %	0 %
	Ankazobe	100 %	33 %	0 %	67 %	0 %	0 %
	Ambolotarakely	100 %	33 %	0 %	67 %	0 %	0 %
	Imerintsiasosika	100 %	17 %	0 %	50 %	0 %	0 %
	Morarano Antongona	100 %	33 %	0 %	50 %	0 %	0 %
	Ambato	100 %	17 %	0 %	50 %	0 %	0 %

sylvicoles des paysans des HTC. Ces caractérisations pédologiques combinées à l'application de modes de gestion forestière adaptés (limite de pente acceptable et fertilisation) apparaissent comme préalables à l'obtention d'une croissance correcte des plantations villageoises à vocation énergétique sur les HTC de Madagascar. Cette étude a également renforcé les connaissances sur les propriétés des sols ferrallitiques à Madagascar au travers de l'identification de seuils de déficience qui vont au-delà des seuils de carence habituellement décrits dans la littérature.

Bibliographie

- Abate N. & Kibret K., 2016. Effects of land use, soil depth and topography on soil physicochemical properties along the toposequence at the Wadla Delanta Massif, Northcentral Highlands of Ethiopia. *Environ. Pollut.*, **5**(2), 57-71, doi.org/10.5539/ep.v5n2p57
- Andriamananjara A. et al., 2019. Land management modifies the temperature sensitivity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in a ferralsol. *Appl. Soil Ecol.*, **138**, 112-122, doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.023
- Are K.S., Oluwatosin G.A., Adeyolanu O.D. & Oke A.O., 2009. Slash and burn effect on soil quality of an alfisol: soil physical properties. *Soil Tillage Res.*, **103**(1), 4-10, doi.org/10.1016/j.still.2008.08.011
- Avakoudjo J. et al., 2015. Effet de l'érosion hydrique sur les caractéristiques physicochimiques du sol des zones d'érosion (dongas) dans la Commune de Karimama au Bénin. *Agron. Afr.*, **27**(2), 127-143, doi.org/10.4314/AGA.V27I2
- Babanyara Y.Y. & Saleh U.F., 2010. Urbanisation and the choice of fuel wood as a source of energy in Nigeria. *J. Human Ecol.*, **31**(1), 19-26, doi.org/10.1080/09709274.2010.11906293
- Bailly C. et al., 1976. Étude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion. Expérimentation en parcelles élémentaires. *Bois For. Trop.*, **169**, 15-28, doi.org/10.19182/bft1976.169.a19278
- Bouillet J.-P., 2016. *Rapport de mission d'expertise pour le démarrage des activités C : « Reboisement et gestion durable des plantations ». Rapport complémentaire : « Résultats des analyses pédologiques-fertilisation des plantations ».* Programme d'appui à l'AgroSylviculture autour d'Antananarivo (ASA), MG/FED/024-637, Projet ARINA, <https://agritrop.cirad.fr/594880/3/ID594880.pdf>, (09/09/25).

- Bouillet J.-P., Rasamindisa A., Rakotondraoelina H.-A. & Razafimahatratra S., eds, 2019. *Capitalisation des réalisations et des acquis du projet Arina. Aménagement et reboisements intégrés dans le district d'Anjozorobe en bois-énergie*, <https://agritrop.cirad.fr/594874/1/Capitalisation-Projet-ASA-Arina.pdf>, (09/09/25).
- Bourgeat F. & Petit M., 1969. Contribution à l'étude des surfaces d'aplanissement sur les Hautes Terres centrales malgaches. *GEO*, **78**(426), 158-188, doi.org/10.3406/geo.1969.15837
- Bourgeat F. & Aubert G., 1972. *Les sols ferrallitiques à Madagascar*. Tananarive : ORSTOM.
- Boyer J., 1982. *Les sols ferrallitiques. Tome X. Facteurs de fertilité et utilisation des sols*. Paris : ORSTOM, 384.
- Certini G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, **143**(1), 1-10, doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8
- Chaix G. & Ramamonjisoa L., 2001. Production de semences pour les reboisements malgaches. *Bois For. Trop.*, **269**, 49-63.
- Charpin M., Legeay D., Rabemanantsoa N. & Richter F., 2019. Caractérisation des filières bois-énergie et élaboration du schéma d'approvisionnement en bois-énergie de la région Analamanga, Madagascar. *Bois For. Trop.*, **340**, 13-25, doi.org/10.19182/bft2019.340.a31704
- Chen F. & Weber K.T., 2014. Assessing the impact of seasonal precipitation and temperature on vegetation in a grass-dominated rangeland. *Rangeland J.*, **36**(2), 185-190, doi.org/10.1071/RJ13098
- Chevallier T. et al., 2013. Texture and organic carbon contents do not impact amount of carbon protected in Malagasy soils. *Sci. Agric.*, **70**, 204-208, doi.org/10.1590/S0103-90162013000300009
- Christina M. et al., 2011. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere*, **2**(3), art27, doi.org/10.1890/ES10-00158.1
- Codron J. et al., 2005. Taxonomic, anatomical, and spatio-temporal variations in the stable carbon and nitrogen isotopic compositions of plants from an African savanna. *J. Archaeol. Sci.*, **32**(12), 1757-1772, doi.org/10.1016/j.jas.2005.06.006
- Da Silva R. et al., 2016. Fertilization response, light use, and growth efficiency in *Eucalyptus* plantations across soil and climate gradients in Brazil. *Forests*, **7**(6), 117, doi.org/10.3390/f7060117
- Dabin B., 1976. Méthode d'extraction et de fractionnement des matières humiques du sol. Application à quelques études pédologiques et agronomiques dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM Pédol.*, **14**(4), 287-297.
- Del Campo A.D. et al., 2021. Assessing reforestation failure at the project scale: the margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean dryland. *Sci. Total Environ.*, **796**, 148952, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148952
- Dixey F., 1960. The geology and geomorphology of Madagascar and a comparison with Eastern Africa. *Quat. J. Geol. Soc.*, **116**, 236-268, doi.org/10.1144/gsjgs.116.1.0255
- Douzet J.M. et al., 2010. Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. *Étude Gestion Sols*, **17**(2), 131-142.
- Dubiez E., Yamba Yamba T., Mvolo B. & Freycon V., 2014. Perception locale des sols et de leur évolution dans des terroirs en cours de savanisation des populations Batandu en République démocratique du Congo. *Bois For. Trop.*, **319**, 19-29, doi.org/10.19182/bft2014.319.a20549
- FAO, 2020. *Global forest resources assessment 2020: main report*. Roma: FAO, doi.org/10.4060/ca9825en
- FAO-UNESCO, 1974. *Carte mondiale des sols. Vol. 1 : Légende*. Paris : Unesco ; Rome : FAO.
- Gram G. et al., 2020. Combining organic and mineral fertilizers as a climate-smart integrated soil fertility management practice in sub-Saharan Africa: a meta-analysis. *PLoS ONE*, **15**(9), e0239552, doi.org/10.1371/journal.pone.0239552
- Kull C. & Lehmann C., 2022. *Fire in highland grasslands: uses, ecology, and history*. In: Goodman S.M., ed. *The Natural History of Madagascar*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 197-203.
- Laclau J.-P. et al., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. *For. Ecol. Manage.*, **259**(9), 1771-1785, doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010
- Madlener R. & Sunak Y., 2011. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: what can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities Soc.*, **1**(1), 45-53, doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.006
- McEwan A., Marchi E., Spinelli R. & Brink M., 2020. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *J. For. Res.*, **31**(2), 339-351, doi.org/10.1007/s11676-019-01019-3
- Musa H. & Gisilanbe S.A., 2017. Differences in physical and chemical properties of soils on Yelwa-Dobora toposequence in Ganye local government area, Adamawa State, Nigeria. *Sky J. Soil Sci. Environ. Manage.*, **6**(1), 011-018.
- Nambiar E.K.S., 2021. Small forest growers in tropical landscapes should be embraced as partners for green-growth: increase wood supply, restore land, reduce poverty, and mitigate climate change. *Trees For. People*, **6**, 100154, doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100154
- Ouédraogo M.M., Degré A. & Debouche C., 2014. Synthèse bibliographique: le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **18**, 407-421.
- R Development Core Team, 2013. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation

- for Statistical Computing, <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>, (09/09/25).
- Rabhi K. et al., 2018. Bilan et croissance des reboisements de cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière, en Algérie : cas du Djurdjura et de l'Atlas blidéen. *Bois For. Trop.*, **337**, 3, doi.org/10.19182/bft2018.337.a31627
- Rakotondraompiana S., Randrianarison T. & Collet C., 2003. Caractérisation des zones d'érosion hydrique à partir des paramètres géomorphométriques : cas d'un bassin versant des Hautes-terres de Madagascar. *Télétection*, **3**, 53-67.
- Ramonjisoa B., 1999. *Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts - joindre les efforts nationaux et internationaux. Rapport de compilation et d'analyse des données existantes sur le secteur des plantations forestières de Madagascar : état des plantations villageoises et familiales malgaches d'aujourd'hui*. Rome : FAO ; Bruxelles : Commission européenne.
- Randrianjafy H., 1999. *Les plantations d'eucalyptus à Madagascar : superficie, rôle et importance des massifs. Collecte et analyse de données pour l'aménagement durable des forêts - joindre les efforts nationaux et internationaux*. Rome : FAO ; Bruxelles : Commission européenne.
- Rasoarainivo A.R. et al., 2022. Specific effects of tree species on soil carbon sequestration in a rice-tree association mesocosm experiment: evidence from natural ¹³C abundance. *Rhizosphere*, **21**, 100485, doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100485
- Raunet M., 2008. *Initiation à la lecture des paysages morpho-pédologiques de Madagascar*, https://open-library.cirad.fr/files/6/2125_5.pdf, (09/09/25).
- Razafimbelo T.M. et al., 2008. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayey soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. *Soil Tillage Res.*, **98**(2), 140-149, doi.org/10.1016/j.still.2007.10.012
- Razafimbelo T.M. et al., 2022. Priorities for soil research and sustainable management in Madagascar. *Geoderma Reg.*, **29**, e00518, doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00518
- Razafindrakoto M.A., 2015. Influences de diverses jachères de légumineuses arbustives sur la fertilité et la productivité d'un sol ferrallitique acide (Manankazo, Madagascar). In : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie*. Marseille, France : IRD Éditions, 93-101.
- Razakamanarivo R.H. et al., 2012. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass Bioenergy*, **45**, 1-10, doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020
- Sandel B. & Svenning J.-C., 2013. Human impacts drive a global topographic signature in tree cover. *Nat. Commun.*, **4**(1), 2474, doi.org/10.1038/ncomms3474
- Saneho H.G. et al., 2014. Stock de C et disponibilité des nutriments sous l'effet de changement de mode d'usage des terres à Madagascar. In : *Actes du Colloque 12^e Journées d'Étude du Sol, 30 juin-14 juillet 2014, Le Bourget du Lac, France*, 209-210, http://www.fsp-parrur.irenela.edu.mg/Data-FSP-PARRUR/Carbone/Ressources%20&%20publications%20scientifiques/Posters/AFES%20poster%20Tiana&Andry_LRI.pdf, (09/09/25).
- Sena K. et al., 2022. Wood bioenergy for rural energy resilience: suitable site selection and potential economic impacts in Appalachian Kentucky. *For. Policy Econ.*, **145**, 102847, doi.org/10.1016/j.forpol.2022.10284
- Sprenkle-Hyppolite S.D., Latimer A.M., Young T.P. & Rice K.J., 2016. Landscape factors and restoration practices associated with initial reforestation success in Haiti. *Ecol. Restor.*, **34**(4), 306-316, doi.org/10.3368/er.34.4.306
- Titilope B. & Ade J., 2011. Delineation of management zones by classification of soil physico-chemical properties in the Northern Savanna of Nigeria. *Front. Agric. Food Technol.*, **6**, 1-8.
- Verhaegen D. et al., 2014. *Eucalyptus robusta* pour une production durable de bois énergie à Madagascar : bilan des connaissances et perspectives. *Bois For. Trop.*, **320**, 15, doi.org/10.19182/bft2014.320.a20541
- 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 Sci.*, **37**, 29-38.
- Wang J., Fu B., Qiu Y. & Chen L., 2001. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. *J. Arid Environ.*, **48**(4), 537-550, doi.org/10.1006/jare.2000.0763
- Wise E.K. & Dannenberg M.P., 2022. Simulating the impacts of changes in precipitation timing and intensity on tree growth. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(22), e2022GL100863, doi.org/10.1029/2022GL100863