



Caracterisation physico chimique par études Granulometriques, Geochimiques et Mineralogiques (Granulometrie Laser, Xrf, Xrd) de sols de la Ville de Mbanza-Ngungu pour leur utilisation dans un écomateriau composite

[Physicochemical characterization through Granulometric, Geochemical and Mineralogical studies (Laser granulometry, XRF, XRD) of soils from the city of Mbanza-Ngungu for use in a composite ecomaterial]

Bienvenu Doudou Ngesevua Lukuama^{1,2,5*}, Gracien Bakambo Ekoko², Blaise Mavinga Mbala², Ruben Kasongo Koy², Anatole Kifuani kia Mayeko², Junior Kanimba Kabongo⁵, Jean-Aimé Lokebo Mbanga², Daniel Nzau Samba³, Jean-Godard Mutala Disansukidi¹, Elie Biayi Mweze², Fiston Muela Kwetukudila⁴, Jean Thomas Vie⁶ & Xavier Gallet⁶

¹Institut Supérieur Pédagogique de Mbanza-Ngungu, Kongo Central, République Démocratique du Congo

²Département de Chimie et Industries, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

³Institut Supérieur Pédagogique de Matadi, Kongo Central, République Démocratique du Congo

⁴Institut Supérieur Pédagogique de Songololo, Kongo Central, République Démocratique du Congo

⁵Centre de recherche en sciences appliquées et technologiques de Kinshasa, République démocratique du Congo

⁶Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

Résumé

Face aux enjeux du changement climatique et à l'urbanisation rapide en RDC, la construction en sols bruts (terre crue) renforcés des fibres végétales apparaît comme une solution écologique durable, réduisant consommation énergétique, déforestation et émissions de CO₂. Les sols T1, T6 et T7 (% d'argiles et de limons jusqu'à 24 % et 72 %) garantiraient plasticité et cohésion favorables à l'adhésion des fibres et à la limitation des fissures tandis que T4, T5 et T8 contenant jusqu'à 57 % de sable moyen et grossier assureraient une meilleure résistance mécanique et stabilité dimensionnelle. Les résultats de la XRF identifient deux axes expliquant 69,3 % de la variance. Le premier opposant la silice dominante (jusqu'à 84,6 % à T1) aux oxydes d'aluminium et de fer, et un second distinguant la variabilité des minéraux potassiques (K₂O) et ferrique (Fe₂O₃). Les résultats de la XRD révèlent quant à eux la présence des minéraux qui influenceraient directement plasticité, élasticité, résistance et durabilité tels que la kaolinite (jusqu'à 56,7 % à T5), l'illite (12,97 % à T7), le quartz (47,9 % à T1), les feldspaths, l'hématite et la goéthite. Ces résultats combinés à ceux de la classification des sols selon normes USCS, AASHTO, EN ISO 14688 et WRB montrent que T3, T4, T5 et T7 classés en CL (argiles limoneuses), riches en kaolinite et illite peuvent être recommandés pour des besoins de cohésion et limitation des fissures tandis que T1 de type ML (limon sableux ou SC, sable argileux) ou aussi quartzitique nécessite un renfort fibreux pour compenser sa faible plasticité. Cette étude intégrant de manière combinée les approches granulométriques, minéralogiques et géochimiques avec des analyses statistiques (ACP et corrélations de Pearson) et dont les perspectives incluent la formulation et validation mécanique expérimentale constitue une base scientifique solide pour le développement d'écomatériaux biosourcés locaux, durables, performants et respectueux de l'environnement.

Mots clés : Sols bruts, Terre crue, Ecomatériau composite, Adobes fibrés, XRF, XRD, Caractérisation physico-chimique et minéralogique

Abstract

In the face of the challenges posed by climate change and rapid urbanisation in the DRC, construction on raw soils (unbaked earth) reinforced with plant fibres appears as a sustainable ecological solution, reducing energy consumption, deforestation, and CO₂ emissions. Soils T1, T6, and T7 (with clay and silt content up to 24% and 72%) would ensure plasticity and cohesion conducive to fibre adhesion and crack limitation, while T4, T5, and T8, containing up to 57% medium and coarse sand, would provide better mechanical resistance and dimensional stability. The XRF results identify two axes explaining 69.3% of the variance. The first contrasts the dominant silica (up to 84.6% at T1) with aluminium and iron oxides, and the second distinguishes the variability of potassic minerals (K₂O) and ferric minerals (Fe₂O₃). The XRD results reveal the presence of minerals that directly influence plasticity, elasticity, strength, and durability, such as kaolinite (up to 56.7% at T5), illite (12.97% at T7), quartz (47.9% at T1), feldspars, hematite, and goethite. These findings, combined with the soil classification according to USCS, AASHTO, EN ISO 14688, and WRB standards, show that T3, T4, T5, and T7, classified as CL (clayey silts), rich in kaolinite and illite, can be recommended for cohesion needs and crack limitation, whereas T1, of the ML type (sandy silt or SC, clayey sand), or also quartzitic, requires fibre reinforcement to compensate for its low plasticity. This study, which integrates granulometric, mineralogical, and geochemical approaches with statistical analyses (PCA and Pearson correlations), and whose future perspectives include formulation and experimental mechanical validation, provides a solid scientific basis for the development of local, sustainable, high-performance, and environmentally friendly biosourced eco-materials.

Keywords: Raw soils, raw earth, Ecomposite material, Fiber-reinforced adobes, XRF, XRD, Physico-chemical and mineralogical characterization

*Auteur correspondant : Bienvenu Doudou Ngesevua Lukuama, (doudoulukuama@gmail.com). Tél. : (+243) 816570788

Reçu le 27/04/2026 ; Révisé le 21/05/2026 ; Accepté le 15/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.026.v5.i3.297>

Copyright: ©2026 Lukuama et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Constitué de particules solides (cailloux, graviers, sables, limons et argiles), de l'air ainsi que de l'eau, le sol est un matériau triphasique, utilisé depuis plus de onze millénaires dans la construction (Anger, 2011).

Pour la production d'écomatériaux composites renforcés par des fibres végétales ou animaux, le sol brut (terre crue) est une base privilégiée grâce à ses propriétés environnementales et thermiques (Vissac et al., 2017).

Considérés comme matériaux d'avenir et à faible impact environnemental, le sol contribue à réduire la consommation énergétique, la déforestation et les émissions de CO₂, tout en assurant un confort thermique et hygrométrique appréciable (Dejeant et al., 2021; Gauzin-Müller, 2018).

Malgré ses avantages multiples, le sol brut (terre crue) souffre néanmoins de limites mécaniques comme la faible résistance à la traction et sa grande sensibilité aux fissurations (Danso et al., 2015).

Dans le but de palier ces contraintes, plusieurs chercheurs suggèrent l'introduction de fibres naturelles et d'autres substances organiques, souvent issues de déchets agricoles locaux ou de ressources renouvelables, comme solution efficace pour améliorer la résistance mécanique, la flexibilité et la durabilité des matériaux composites (Alene et al., 2022 ; Duong et al., 2021; Kasinikota et al., 2023; Xiao et al., 2022).

Ces travaux soulignent également le rôle des fibres dans la stabilisation des adobes (Yazıcı et al., 2023), en insistant sur l'intérêt écologique et technique des renforts naturels (Thanushan et al., 2022 ; Dejeant et al., 2021).

Par ailleurs, des études granulométriques ont démontré l'importance majeure des fractions fines (argile et limon) pour la plasticité et la cohésion des sols utilisés en construction (Anger, 2011). La granulométrie laser, notamment, est reconnue comme une méthode rapide et précise pour la caractérisation des sols (Yang et al., 2019 ; Lin et al., 2016).

En complément, l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X et l'évaluation géochimique par fluorescence X permettent de comprendre en détail les propriétés chimiques et minérales influençant la performance des matériaux (Bau & Dulski, 1996).

Malgré ces avancées, peu de recherches intègrent de manière combinée ces approches granulométriques, minéralogiques et géochimiques avec des analyses statistiques avancées (ACP, corrélations de Pearson) dans le contexte spécifique des sols urbains de la

République Démocratique du Congo (RDC) en général et de la ville de Mbanza-Ngungu en particulier. Cette lacune limite la compréhension locale nécessaire à l'optimisation des écomatériaux fibrés adaptés aux conditions environnementales et socio-économiques propres à la région.

Le présent travail vise donc à combler cette nécessité en réalisant une caractérisation physico-chimique complète de huit sols bruts de Mbanza-Ngungu, grâce à la granulométrie laser, à la fluorescence X, à la diffraction des rayons X et à des méthodes statistiques rigoureuses, ces sols bruts étant actuellement décrits comme des matériaux d'avenir avant leur intégration dans un écomatériau composite fibré performant et durable.

Afin de mieux qualifier les sols analysés notamment en fonction de leur granulométrie et de leur plasticité, et ainsi d'anticiper, sans hypothèses mécaniques non validées, leur comportement potentiel dans des matériaux composites fibrés, cette étude recourt aux classifications normalisées et reconnues internationalement.

Les classifications utilisées telles que l'USCS (Unified Soil Classification System), l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), la norme EN ISO 14688 et la classification WRB (World Reference Base) apportent un cadre objectif.

L'étude cherche à identifier les sols présentant un équilibre optimal entre fractions fines pour assurer plasticité et cohésion, et fractions plus grossières pour garantir résistance et stabilité dimensionnelle.

Cette approche repose sur l'hypothèse que ce double équilibre, identification des sols associé à un renforcement fibreux adapté, permettrait de développer des matériaux composites locaux, durables et performants, répondant aux enjeux environnementaux et développementaux actuels.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Origine

Huit échantillons de sol brut (terre crue), provenant de huit sites codifiés T1 à T8, prélevés dans la ville de Mbanza-Ngungu à l'aide d'une moto, dans des zones facile d'accès, exploitables et présentant un fort potentiel pour la production d'adobes fibrés ont été analysés.

Chaque échantillon a été conditionné après séchage à l'air libre puis en étuve à 35 °C afin de

préserver au mieux la composition chimique et minéralogique initiale.

Les sites d'échantillonnage retenus dans cette étude correspondent à des nouvelles carrières artisanales d'adobes situés dans des quartiers en pleine extension.

Des critères environnementaux, géologiques et socio-économiques comme l'accessibilité, le potentiel d'exploitation, l'acceptabilité locale visant à couvrir une diversité représentative des sols disponibles ont été des facteurs déterminant dans la sélection desdits sites.

Afin d'assurer une couverture systématique et représentative des zones d'études, une stratégie d'échantillonnage par grille définie à partir d'un protocole stratifié spatialement (dix points par site) et verticalement (six couches par point), a été retenu.

A chacun des points, six couches ont été prélevées, espacées de 25 cm, couvrant la zone « B » située entre 50 et 175 cm au-delà du sol arable, plage choisie en fonction d'observations pédologiques locales (variations de couleurs et textures des horizons).

Chaque sous-échantillon pesait environ 300 g, soit 1 800 g par point ($300 \text{ g} \times 6 \text{ couches}$) et un total de 18 000 g d'échantillon de sol par site ($1 800 \text{ g} \times 10 \text{ points}$) ont été prélevés pour les analyses au laboratoire et les futurs tests mécaniques.

Etant donné que cette étude se focalise exclusivement sur une caractérisation globale des sites étudiés, tous les sous-échantillons ont par la suite été homogénéisés pour constituer un échantillon composite représentatif par site.

Toutefois, dans nos prochaines publications, des analyses complémentaires sur certains sous-échantillons individuels sont envisagées afin d'évaluer plus finement la variabilité spatiale et verticale intra-site.

Afin de limiter toute altération chimique ou biologique, les échantillons ont été conservés dans des emballages spécifiques à l'échantillonnage des sols et sédiments, à l'abri de toute source d'humidité, et analysés 15 jours après leur prélèvement.

La collecte en une seule journée et en saison sèche afin de limiter la variabilité temporelle liée à l'humidité, bien que la prise en compte de la saisonnalité soit envisagée dans des études ultérieures.

Afin de garantir la traçabilité et la reproductibilité, la géolocalisation de la ville de Mbanza-Ngungu dans la province du Kongo-Central

par GPS ci-dessous, incluent les sites d'échantillonnage :

- Route menant au village Langa (T1) : Latitude : - 5.274403, S5°16'27.85152'', Longitude : 14.867089, E14°52'1.51932'' et Altitude 748 m a.s.l
- Savlo (T2) : Latitude : - 5.233710, S5°14'1.35528'', Longitude : 14.886510, E14°53'11.43708'' et Altitude 582 m a.s.l
- Savlo (T3) : Latitude : - 5.224803, S5°13'29.29116'', Longitude : 14.903368, E14°54'12.12552'' et Altitude 587 m a.s.l
- Camp Tranquille (T4) : Latitude : - 5.261302, S5°15'40.68756'', Longitude : 14.858414, E14°51'30.28968'' et Altitude 729 m a.s.l
- Kola en direction de Kanga Lumueno (T5) : Latitude : - 5.236443, S5°14'11.19516'', Longitude : 14.904393, E14°54'15.8148'' et Altitude 577 m a.s.l
- Mbanza Luvaka vers Matiefula (T6) : Latitude : - 5.267577, S5°16'3.27576'', Longitude : 14.847833, E14°50'52.19988'' et Altitude 703 m a.s.l
- Zone Est du Mausolée Dokolo (T7) : Latitude : - 5.268817, S5°16'7.74012'', Longitude : 14.857175, E14°51'25.82964'' et Altitude 362 m a.s.l
- Mbengo avant la traversée conduisant à la concession de l'église Mundayi (T8) : Latitude : - 5.243032, S5°14'34.91664'', Longitude : 14.854400, E14°51'15.84144'' et Altitude 692 m a.s.l

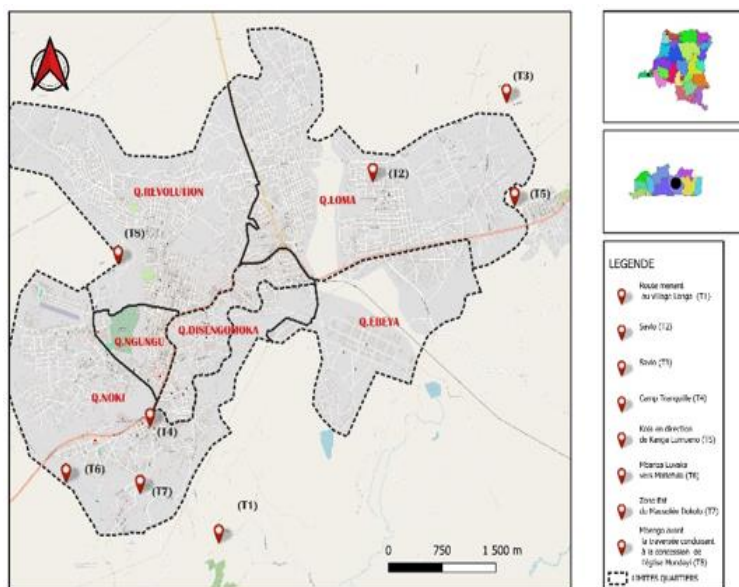


Figure 1 : Géolocalisation de la Ville de Mbanza-Ngungu, Territoire de Mbanza-Ngungu dans la province du Kongo-Central, en République Démocratique du Congo, incluant les sites d'échantillonnage.

2.2 Méthodes

A l'exception des logiciels spécifiques liés à la granulométrie laser, XRF et XRD, Microsoft Excel (Office 2021) et le logiciel OriginPro 2024 ont été utilisés pour créer des représentations graphiques, tandis que Python (Python 3.x) a été utilisé pour l'analyse en composantes principales (ACP) et les corrélations de Pearson.

2.2.1 Préparation

Les échantillons de sol destinés à la granulométrie laser, aux analyses XRF et XRD ont été séchés à l'air libre (température du laboratoire) et ensuite à l'étuve à 35°C afin de préserver la composition chimique et minéralogique. Ils ont ensuite été conservés dans des emballages hermétiques, à l'abri de l'humidité et de la lumière, afin d'éviter toute contamination.

2.2.2 Granulométrie laser

Cette technique a été réalisée avec le **Granulomètre Laser Malvern Hydro2000 MU** au laboratoire de sédimentologie du **Muséum national d'Histoire naturelle de Paris (salle 313)**.

En recourant à la norme ISO 13320 : 2020, la diffraction laser adaptée aux échantillons en suspension liquide a permis de mesurer avec précision de la distribution des tailles de particules solides des sols.

Pour faciliter une bonne défloculation et dispersion des particules argileuses, les échantillons des sols ont été mélangés avec de l'eau distillée et de l'hexamétaphosphate de sodium et placés sous agitation pendant 30 à 45 minutes.

Les échantillons des sols bruts, ceux où la matière organique a été dissoute par ajout de l'eau oxygénée (H₂O₂) et parfois ceux qui, ont subi préalablement une attaque des carbonates et certains oxydes avec ajout de l'acide chlorhydrique (HCl) ont fait l'objet des mesures à l'aide du granulomètre laser.

2.3 Fluorescence X (XRF)

La détermination de la composition en oxydes dans les échantillons de sols a été réalisée au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris en France, à l'aide du spectromètre XGLab ELIO (40 Kv/100 µA) avec une source au rhodium, dans le **laboratoire de caractérisation des archéomatériaux** (salle 310).

Afin de garantir un bon compromis entre précision, sensibilité et sécurité, les paramètres ci-dessous ont été choisis lors cette analyse :

- Un Temps de mesure de 300 secondes, suffisamment long pour améliorer le rapport signal/bruit et la détection d'éléments en faible concentration ;

- Une Tension intermédiaire de 40 kV pour exciter à la fois les éléments légers et lourds ;

- Un Courant modéré de 100 µA permettant d'éviter la surchauffe tout en fournissant des spectres détaillés).

Pour assurer le contrôle de l'acquisition, la visualisation en temps réel des concentrations ainsi que la réalisation de cartographies non destructives, le spectromètre XGLab ELIO a été associé au logiciel Eliosoftware 1.5.8.4.

Les calibrations (ainsi que les calculs) ont été effectués sous le logiciel Pymca sur la base des données obtenues sur les différents standards par ICPMS.

Le DR-N (Diorite) issu du Service d'Analyse des roches et des minéraux du CNRS / France (dont la composition élémentaire est disponible sur <https://sarm.cnrs.fr/index.html>) a été utilisé comme matériel de référence et les incertitudes analytiques, comprises entre 5 et 10% étaient variables selon les éléments chimiques.

Par ailleurs, signalons que les limites de détection ne permettent pas d'analyser et de quantifier les éléments chimiques plus légers que le magnésium dans le meilleur des cas.

2.4 Diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse XRD a eu pour objectif d'identifier le cortège minéral présent de façon qualitative et semi-quantitative.

Ces analyses minéralogiques sur des échantillons des sols en poudre (XRD, D2 Phaser, bruker, anticathode Cu, longueur d'onde 1.54Å) ont été réalisées en utilisant le logiciel TOPAS (Bruker) pour obtenir et affiner les phases cristallines des minéraux trouvés.

L'identification qualitative des phases a été réalisée en utilisant la base de données PDF-4+ fournie par l'ICDD (Centre International pour les Données de Diffraction).

Pour la quantification semi-quantitative des phases minérales, un affinage de Rietveld a été effectué en utilisant TOPAS, qui a permis d'estimer la proportion relative des phases identifiées à partir des profils de diffraction expérimentaux. L'approche combinée utilisée a permis de fournir une analyse structurale des échantillons des sols étudiés.

3. Résultats

3.1 Présentation des résultats de la distribution granulométrique de la terre crue

Tableau I. Distribution granulométrique des échantillons du sol (terre crue brute) par granulométrie laser

	ARGILE	LIMON	SABLE	SABLE FIN	SABLE MOYEN	SABLE GROSSIER
	0,01 à 2 μm	2 à 50 μm	50 à 2000 μm	50 à 200 μm	200 à 500 μm	500 à 2000 μm
T1 Brute	18,813	61,239	19,948	11,233	6,853	1,862
T2 Brute	14,25	50,837	34,913	1,141	29,975	3,798
T3 Brute	12,985	57,333	29,682	7,634	5,504	16,544
T4 Brute	13,863	28,581	57,556	28,273	27,868	1,415
T5 Brute	9,729	57,665	32,606	7,707	18,85	6,049
T6 Brute	24,066	65,131	10,803	6,788	3,806	0,209
T7 Brute	18,803	72,076	9,121	6,892	2,214	0,015
T8 Brute	15,3	37,387	47,314	23,604	22,829	0,881

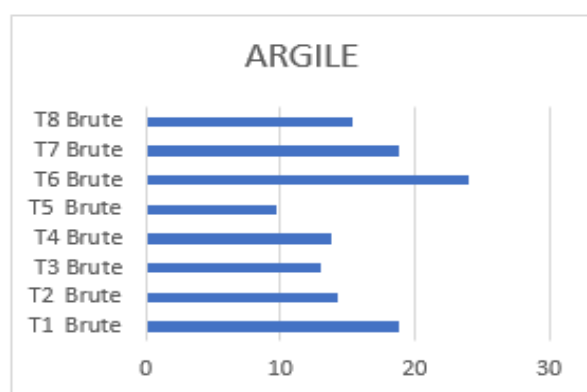


Figure 2. Distribution des argiles dans les échantillons de sol (terre crue brute)

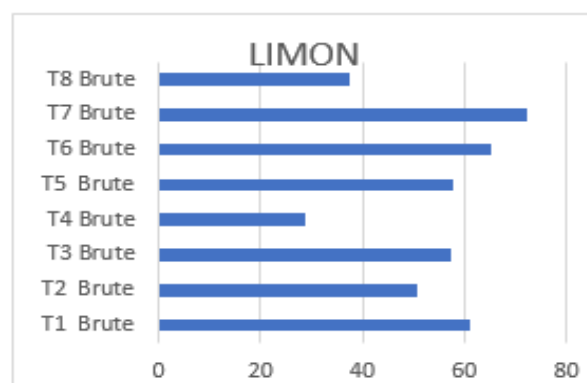


Figure 3. Distribution des limons dans les échantillons de sol (terre crue brute)

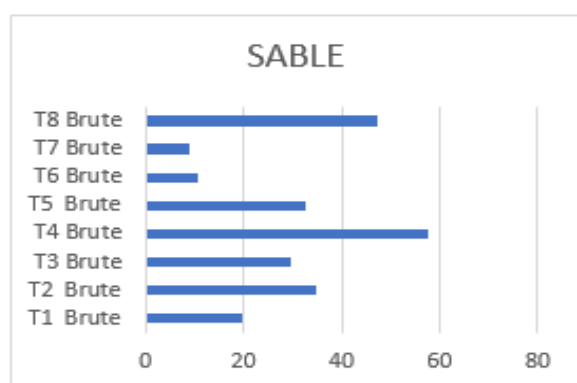


Figure 4. Distribution des sables dans les échantillons de sol (terre crue brute)

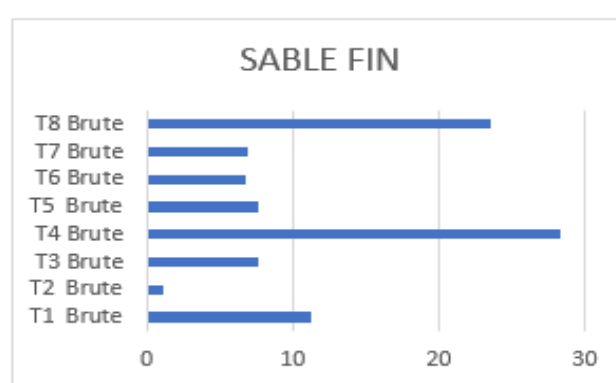


Figure 5. Distribution des sables fins dans les échantillons de sol (terre crue brute)

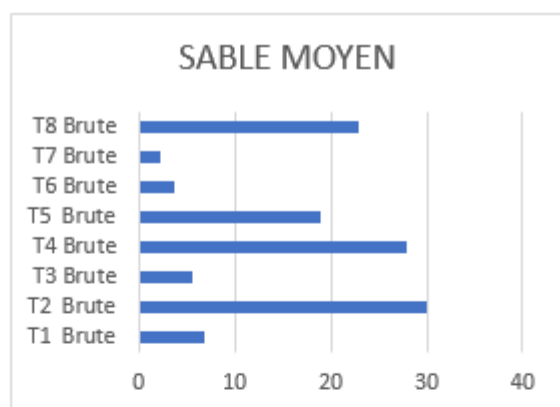


Figure 6. Distribution des sables moyens dans les échantillons de sol (terre crue brute)

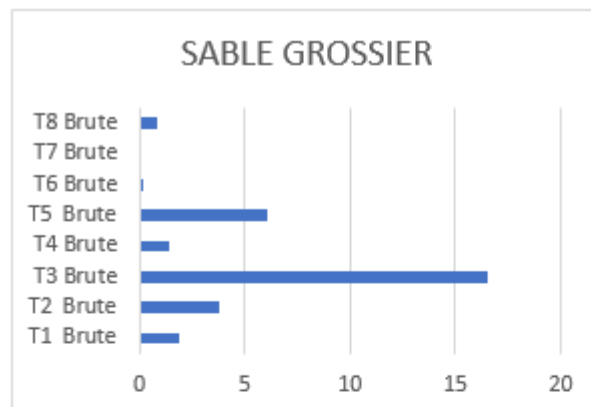


Figure 7. Distribution des sables grossiers dans les échantillons de sol (terre crue brute)

Tableau II. Distribution granulométrique des échantillons de sol par granulométrie laser après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

	ARGILE	LIMON	SABLE	SABLE FIN	SABLE MOYEN	SABLE GROSSIER
	0,01 à 2 µm	2 à 50 µm	50 à 2000 µm	50 à 200 µm	200 à 500 µm	500 à 2000 µm
T1-H ₂ O ₂	23,523	66,384	10,093	6,687	3,406	0
T2-H ₂ O ₂	25,487	74,513	0	0	0	0
T3-H ₂ O ₂	25,652	44,074	30,274	18,261	9,289	2,724
T4-H ₂ O ₂	16,808	33,241	49,951	21,535	27,702	0,714
T5-H ₂ O ₂	11,335	62,073	26,592	11,3	14,53	0,763
T6-H ₂ O ₂	22,327	55,359	22,314	11,639	9,918	0,757
T7-H ₂ O ₂	19,699	70,884	9,417	6,747	2,619	0,051
T8-H ₂ O ₂	11,566	29,218	59,216	21,326	35,407	2,483

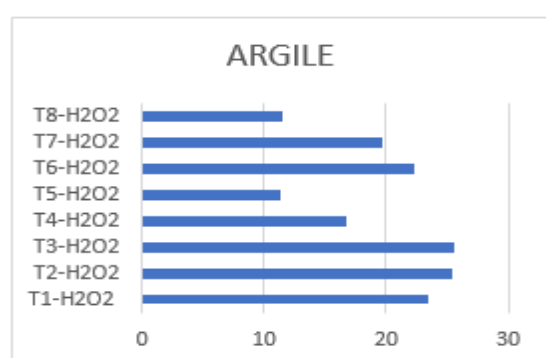


Figure 8. Distribution des argiles dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

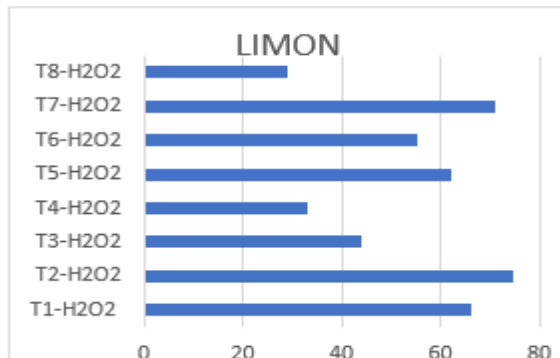


Figure 9. Distribution des limons dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

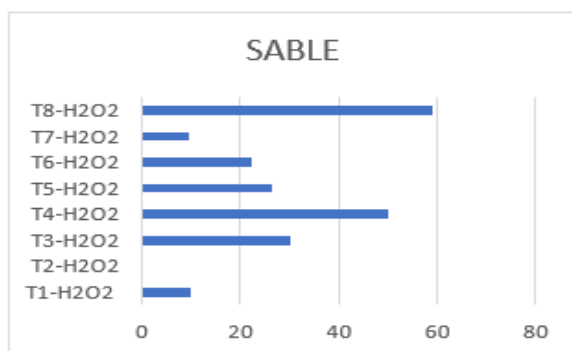


Figure.10 distribution des sables dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

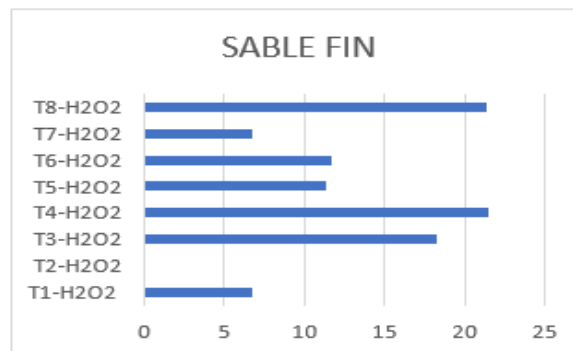


Figure.11 distribution des sables fins dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

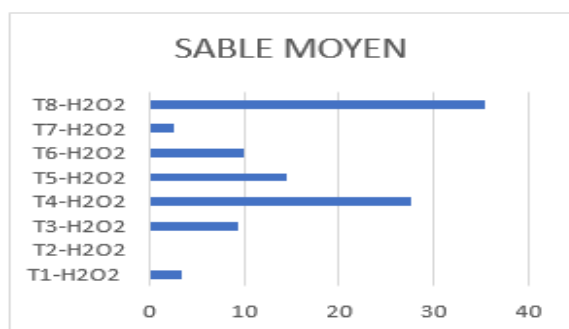


Figure.12 distribution des sables moyens dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

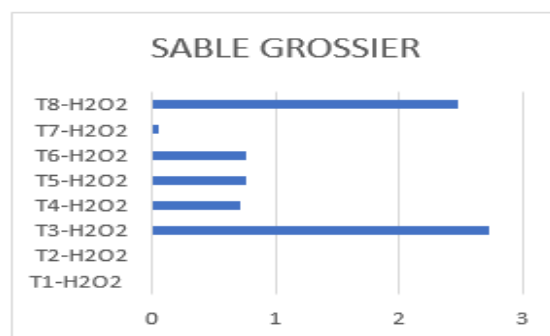


Figure.13 distribution des sables grossiers dans les échantillons de sol après traitement par NaHMP, HCl et H₂O₂

3.2. Composition en oxydes dans les échantillons de sols bruts analysés par fluorescence X (XRF)

Après analyse par fluorescence X (XRF) des huit échantillons des sols, une normalisation par mise à l'échelle ou normalisation linéaire ou encore normalisation proportionnelle a permis de déterminer la composition en oxydes.

Les résultats inscrits dans la matrice de corrélation globale, cercle des corrélations, éboulis des valeurs propres et projection des individus ont été obtenus après application de la transformation Centered Log-Ratio (CLR), définie pour chaque échantillon (Van den Boogaart & Tolosana-Delgado, 2013).

La standardisation des variables à l'aide d'un Z-score, une centralisation sur la moyenne et une réduction par écart-type a permis de classer les oxydes majeurs, mineurs et traces (Jolliffe & Cadima, 2016).

L'ACP a été réalisée à l'aide de la bibliothèque *scikit-learn* (version 1.x, Python 3.x) via la classe *PCA* (Pedregosa et al., 2011). La décomposition en valeurs singulières (SVD) est a été utilisée en interne.

Le critère de Kaiser (reliant la conservation des composantes avec $\lambda \geq 1$) et l'analyse du graphique en éboulis des valeurs propres (scree plot) ont été utilisés conjointement pour choisir le nombre de composantes à conserver. Le plan PC1–PC2 a été sélectionné comme référence principale pour l'interprétation, conformément à la pratique courante en géochimie multivariée.

Trois critères complémentaires ci-après ont été appliqués pour valider la pertinence des résultats d'ACP : Critère de Kaiser, Eboulis des valeurs propres (scree plot) et Seuil de variance cumulée. La significativité des coefficients de Pearson a été évaluée par le test bilatéral t de Student.

L'implémentation a été réalisée avec la méthode `corr(method='pearson')` de la bibliothèque *pandas* (McKinney, 2010) et visualisée avec *seaborn* et *matplotlib* (Hunter, 2007).

Tableau III. Résultats des Oxydes dans les échantillons de sols bruts analysés par fluorescence X (XRF)

RESULTATS XRF DEJA NORMALISES DE LA COMPOSITION CHIMIQUE (en %) EN OXYDES MAJEURS ($\geq 1\%$), OXYDES MINEURS (entre 0,1 % et 1 %, non inclus 1 %) ET OXYDES TRACES ($< 0,1\%$) DANS LES ECHANTILLONS DES SOLS BRUTS																																	
SITES	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	ClO ₂	K ₂ O	CaO	Ti ₂	V ₂ O ₅	CryO ₂	MN	FeO ₂	Ni ₂ O	CuO	ZnO	GaO ₂	AsO ₂	Ro	Sr	Y ₂ O ₃	Zr ₂	Ne ₂	Mo ₂	SnO ₂	So ₂	Co	BaO	LaO ₂	CEO ₂	WO ₂	Au ₂ O ₃	PbO
T1	2,99	17,28	63,20	0,13	0,07	0,12	1,92	0,06	1,40	0,12	0,07	0,01	12,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,05	0,01	0,00	0,05	0,03	0,03	0,14	0,01	0,05	0,04	0,01	0,03
T2	5,05	22,82	34,42	0,10	0,06	0,10	3,46	0,04	2,53	0,08	0,11	0,00	30,55	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07	0,01	0,00	0,03	0,05	0,06	0,21	0,02	0,00	0,02	0,01	0,03
T3	4,00	26,86	37,90	0,20	0,07	0,16	1,69	0,03	3,44	0,10	0,09	0,04	24,43	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,14	0,02	0,01	0,08	0,07	0,14	0,28	0,03	0,00	0,02	0,02	0,02
T4	0,43	25,04	53,00	0,28	0,02	0,15	0,36	0,04	2,70	0,08	0,11	0,00	17,12	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,03	0,00	0,03	0,14	0,03	0,04	0,04	0,05	0,03
T5	3,37	28,11	36,83	0,50	0,02	0,38	0,90	0,09	4,42	0,06	0,11	0,00	23,82	0,05	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,42	0,05	0,00	0,00	0,04	0,10	0,25	0,08	0,06	0,06	0,05	0,02
T6	2,91	22,36	47,74	0,14	0,01	0,11	1,18	0,06	2,40	0,10	0,07	0,02	22,38	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,14	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03
T7	1,66	19,49	47,80	0,16	0,02	0,12	1,72	0,06	1,72	0,07	0,07	0,43	25,85	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,01	0,00	0,04	0,04	0,01	0,39	0,00	0,03	0,04	0,02	0,03
T8	7,05	22,91	49,98	0,32	0,08	0,22	0,33	0,06	2,67	0,12	0,08	0,00	15,15	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,12	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,32	0,04	0,22	0,07	0,04	0,02

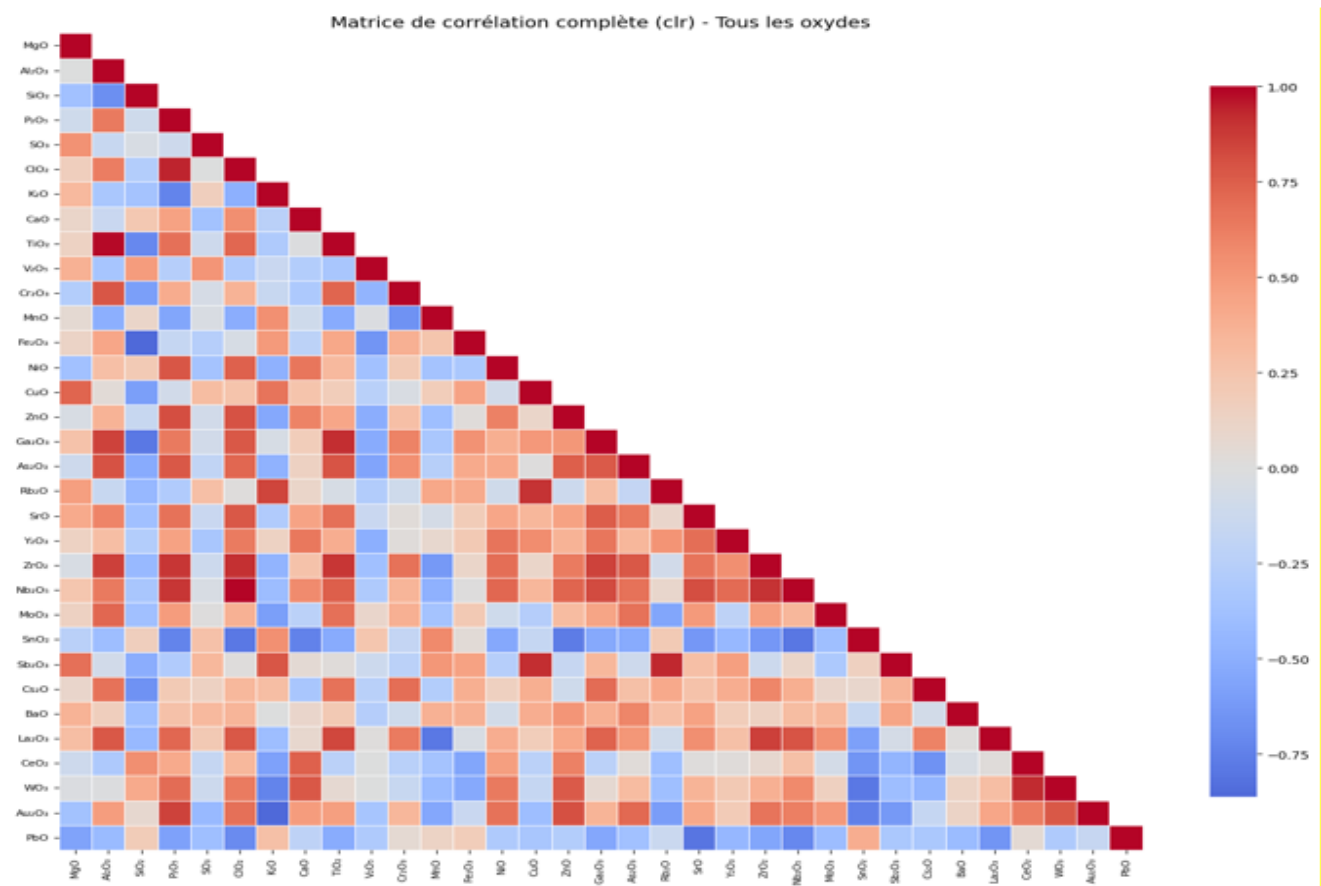


Figure 14 Matrice de corrélation globale et calculée à partir des 33 oxydes après transformation CLR

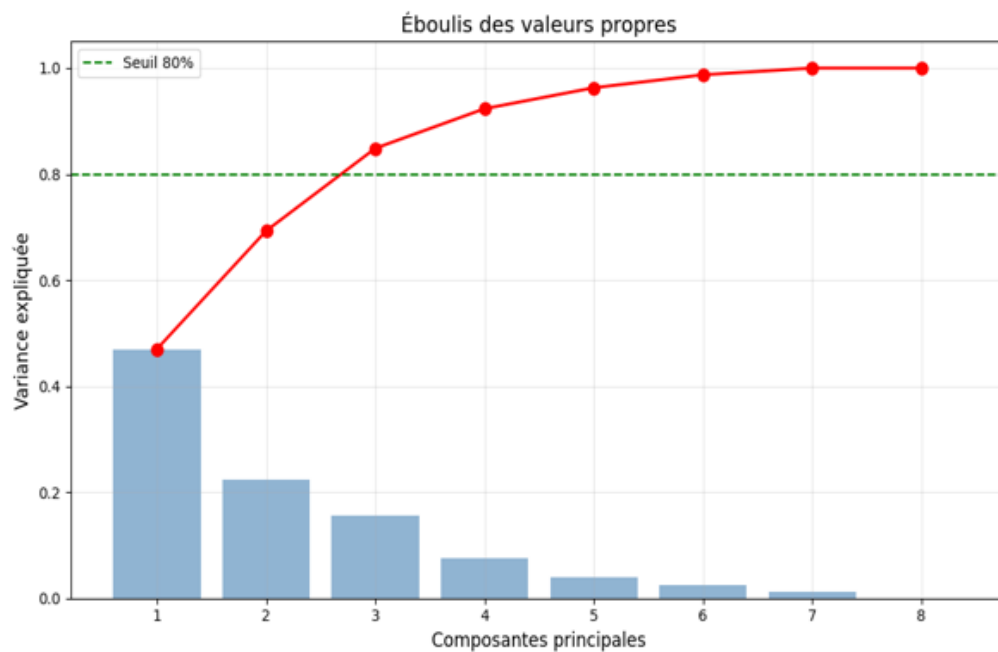


Figure 15. Éboulis des valeurs propres (scree plot) issu de l'ACP CLR globale

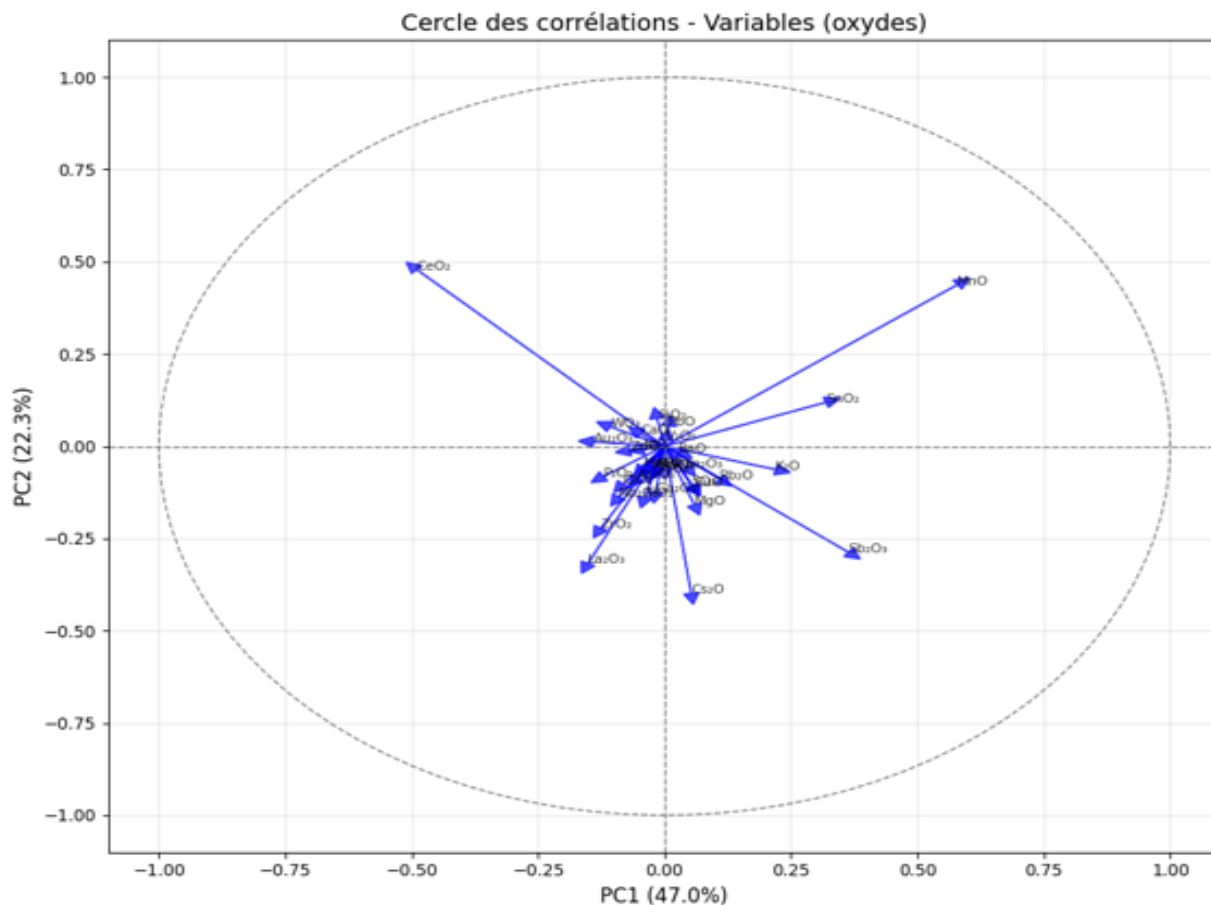


Figure 16. Cercle de corrélations et visualisation de la structure des associations entre variables dans le plan factoriel PC1-PC2

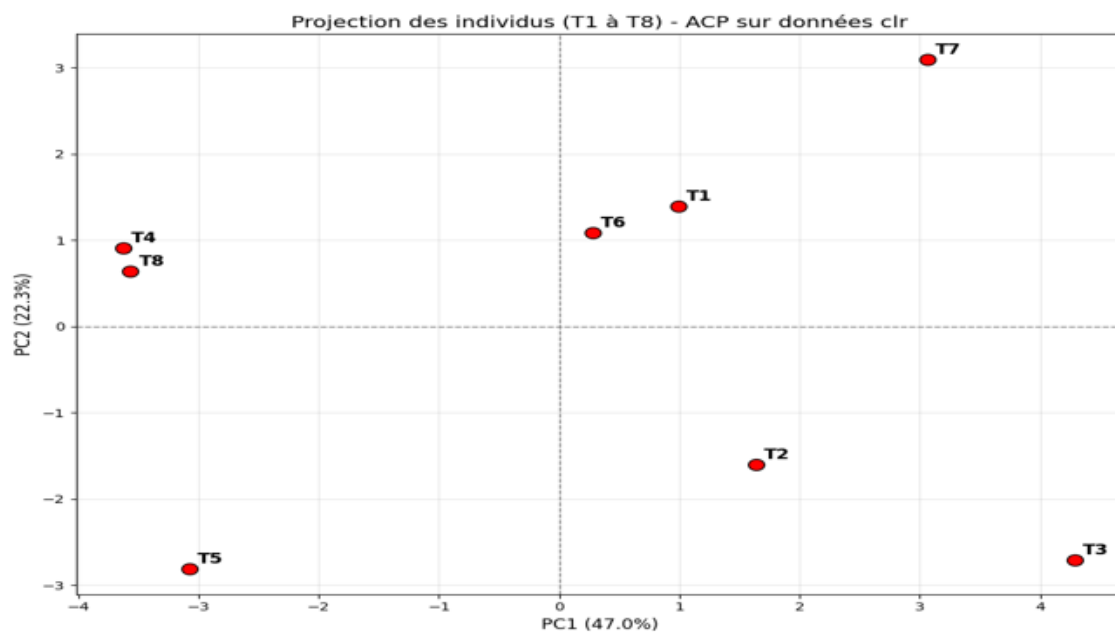


Figure 17. Projection des huit échantillons (T1 à T8) dans le plan PC1-PC2

Les résultats de l'analyse ACP qui sont présentés dans les éboulis, cercle des corrélations et projection des individus portent sur l'ensemble des 33 oxydes transformés par CLR dont les **Valeur propre (λ)** sont :

- PC1 : 14,27 ;
- PC2 retenue : 7,31 ;
- PC3 retenue : 5,87 ;
- PC4 retenue : 3,67 ;
- PC5 retenue : 3,06 ;
- PC6 retenue : 1,90 ;
- PC7 retenue : 1,63 ;
- PC8 (nulle) : 0,00

La PC8 est inutile car $n = 8$ individus avec un rang déficient après CLR. Les 7 premières composantes expliquent toute la variance. Le plan PC1–PC2 choisi explique $47,0 \% + 22,3 \% = 69,3 \%$ de la variance totale, confirmé par les axes des figures précitées.

Après analyses ACP des oxydes majeurs, mineurs et traces ; les lignes ci-dessous résument les pourcentages détaillés de contribution sur PC1 et PC2 des variables.

- Pour les oxydes majeurs, sur PC1 (50,3 %), les contributions principales proviennent de SiO_2 (55,2 %), TiO_2 (39,6 %) et Al_2O_3 (39,4 %). Sur PC2 (29,6 %), K_2O représente à lui seul 49,0 %, suivi de Fe_2O_3 à 18,4 %. Cela confirme que le premier axe reflète principalement l'opposition entre quartz et phyllosilicates, tandis que le second axe capture principalement les variations de K_2O .

- Pour les oxydes mineurs, Sur PC1 (73,3 %), ClO_2 , P_2O_5 et ZrO_2 contribuent de façon presque équivalente (~32–34 %), ce qui reflète leur comportement géochimique couplé. Sur PC2 (24,3 %), BaO est largement dominant (86,6 %), ce qui confirme son comportement indépendant par rapport aux trois autres oxydes mineurs.

- Pour les oxydes traces, sur PC1 (39,6 %), les principaux contributeurs sont Nb_2O_5 (10,2 %), La_2O_3 (9,2 %) et Ga_2O_3 (8,1 %), formant un axe d'enrichissement en éléments à affinités géochimiques similaires (lithophiles de haute valence). Sur PC2 (22,6 %), Sb_2O_3 (27,9 %), Rb_2O (24,0 %), Cs_2O (17,9 %) et CeO_2 (17,4 %) sont les principaux contributeurs.

Tableau IV. Résultats de la composition minéralogique des sols (terres crues) analysés par XRD

Ech	COMPOSES													
	Illite	Chlorite	Kaolinite	Quartz	Albite	Microcline	Hématite	Goethite	Rutile	Anatase	Calcite	Dolomite	Pyrite	Illite_II
T1	0,870	0,001	28,140	47,910	1,820	4,280	2,130	2,450	0,440	0,790	0,500	0,380	0,220	10,060
T2	2,970	1,160	43,220	16,000	2,570	6,470	1,480	8,310	0,890	1,890	0,610	0,760	0,290	13,400
T3	2,870	2,340	50,410	9,980	3,790	8,370	0,001	12,940	0,380	2,730	0,680	0,670	0,330	4,510
T4	0,470	1,530	47,430	10,010	4,690	9,240	0,001	14,870	0,670	3,480	1,000	0,910	0,410	5,310
T5	2,640	0,960	56,700	6,570	4,730	6,980	0,120	12,450	0,970	3,130	0,630	0,770	0,220	3,140
T6	0,600	1,630	38,690	22,890	3,550	6,840	0,310	12,200	0,350	1,820	0,610	0,690	0,170	9,650
T7	12,970	0,001	28,310	28,050	3,870	3,460	1,500	9,450	0,290	1,600	0,210	0,600	0,070	9,630
T8	2,470	0,001	36,500	20,470	4,110	6,050	0,001	17,240	0,740	2,650	0,490	0,940	0,180	8,170

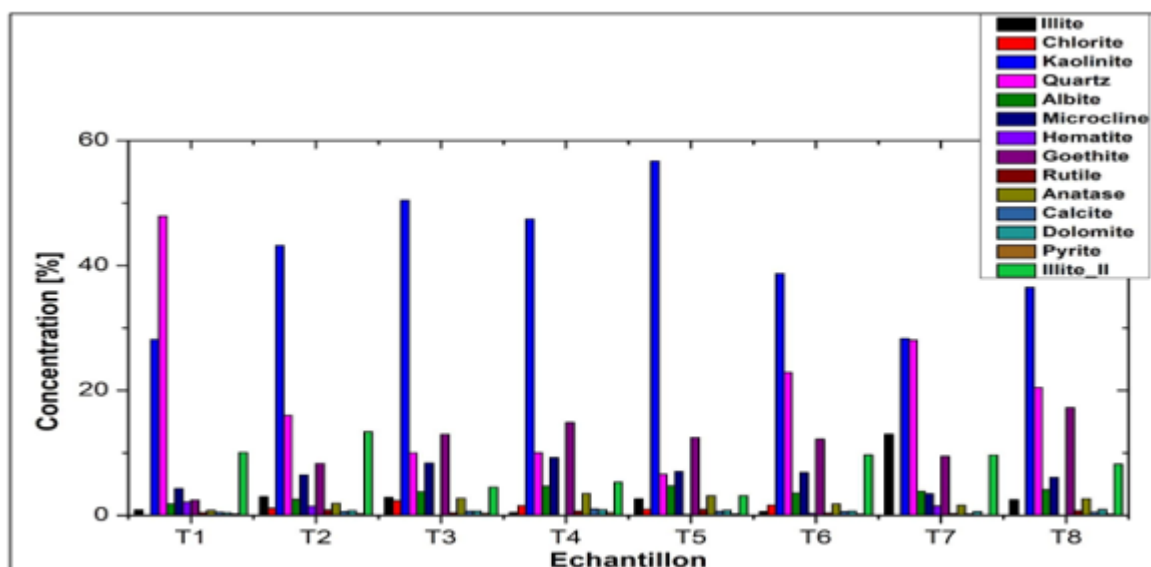


Figure 18. Résultats de la composition minéralogique des sols (terres crues) analysés par XRD

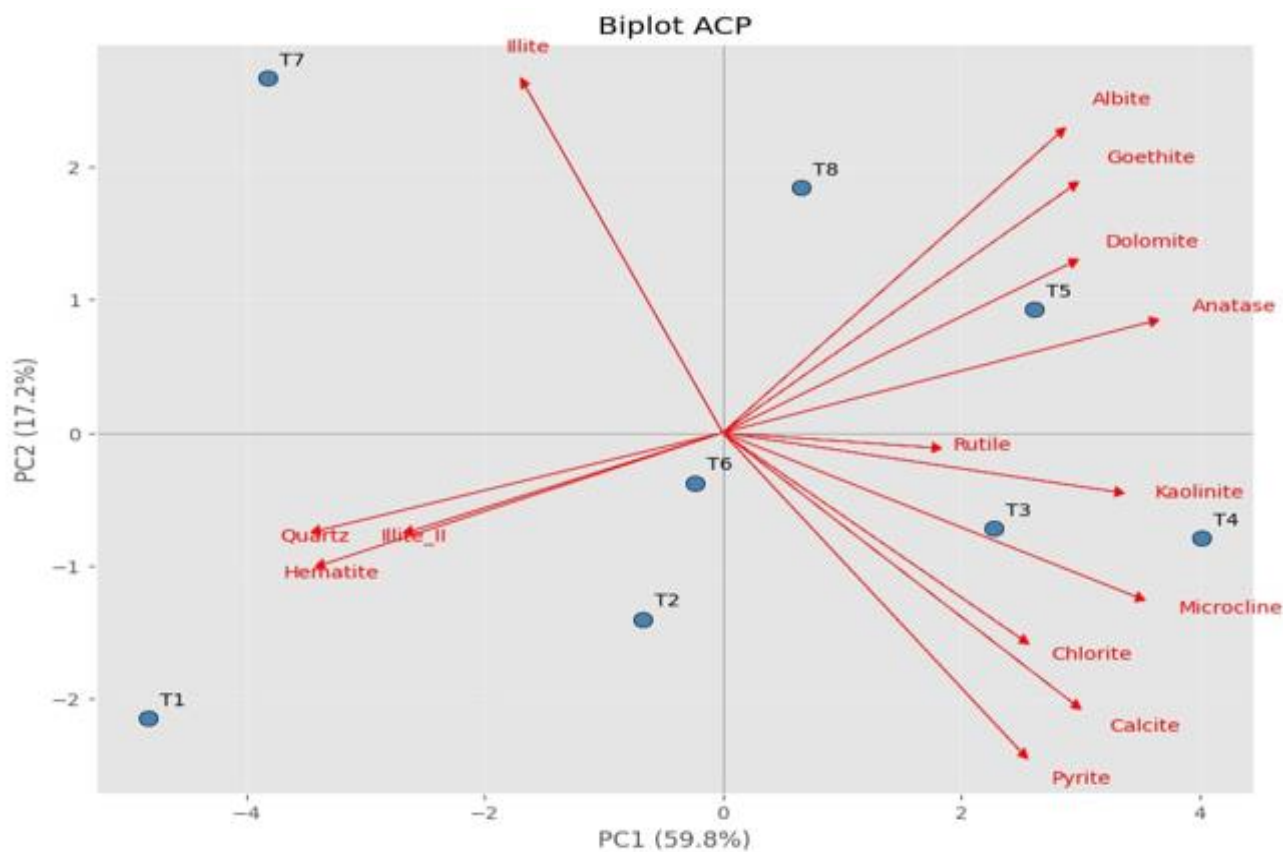


Figure 19. Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) de la composition minéralogique des sols (terres crues) analysés par XRD

Résultats de l'ACP

- PC1 : 59.76% de variance expliquée
- PC2 : 17.16% de variance expliquée
- PC3 : 9.01% de variance expliquée
- PC4 : 5.74% de variance expliquée
- PC5 : 4.78% de variance expliquée
- PC6 : 2.87% de variance expliquée
- PC7 : 0.68% de variance expliquée
- PC8 : 0.00% de variance expliquée
- Variance cumulée PC1+PC2 : 76.91%

Nous avons retenu P1 et P2 car il explique très bien les variables avec un total de variance de 76.91%

PC1 oppose deux groupes de minéraux :

- Fortement corrélés positivement (côté droit) : Anatase, Microcline, Kaolinite, Calcite, Goethite, Dolomite, Albite, Pyrite et Chlorite.

- Fortement corrélés négativement (côté gauche) : Illite_II, Hematite et Quartz

PC2 met en évidence :

- Corrélés positifs : Illite et Albite

- Corrélés négatifs : Pyrite

Échantillons extrêmes sur PC1 :

- Forte valeur PC1 (riche en kaolinite) : T4

- Faible valeur PC1 (riche en quartz, illite) : T1

Échantillon extrême sur PC2 (riche en goethite) : T7

· PC1 (environ 50-60 %) : distingue la Kaolinite (positive) du Quartz, de l'Illite et de l'Illite_II (négatifs). Les échantillons T5, T4, T3 sont très kaoliniques ; T1 et T7 sont quartzueux/illitiques.

· PC2 (environ 20-25 %) : isole la Goethite et l'Hématite (positif) des feldspaths (Microcline, Albite) et de l'Anatase (négatif). T8 est très riche en goethite, T1 est pauvre en goethite mais riche en microcline (négatif sur PC2).

· La qualité globale est bonne (PC1+PC2 > 75 % de variance).

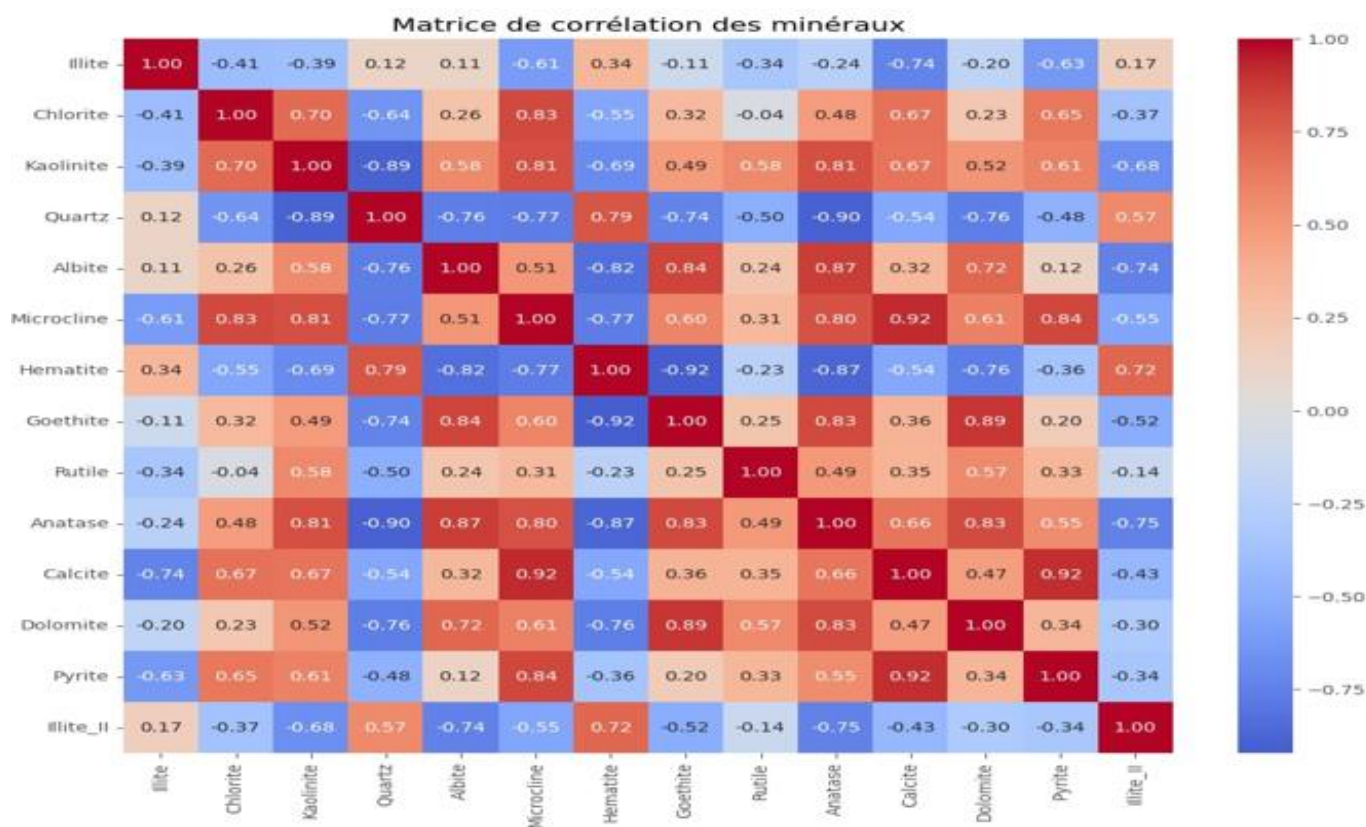


Figure 20. Matrice de corrélation de la composition minéralogique des sols (terres crues) analysés par XRD

Tableau V. Classification des sols bruts (de T1 à T8) selon les standards internationaux

Éch	Granulométrie dominante (% argile / limon / sable)	Minéralogie clé (XRD)	Chimie (XRF) dominante	Classification USCS	Classification AASHTO	Classification en ISO 14688	Classification WRB	Remarques principales
T1	18.8 / 61.2 / 20	Quartz 47.9 %, Kaolinite 28.1 %	SiO ₂ 63.2 %, Fe ₂ O ₃ 12 %	ML ou SC (limon sableux / sable argileux)	A-1-b ou A-3	Sables limoneux ou limons sableux	Sols quartzitiques peu altérés	Forte résistance mécanique, faible plasticité
T2	14.3 / 50.8 / 35	Kaolinite 43.2 %, Illite 2.97 %	Allo ₃ 22.8 %, Fe ₂ O ₃ 30.5 %	CL ou ML (argile limoneuse / limon sableux)	A-2-4 ou A-2-6	Argiles limoneuses	Ferra sol limoneux altéré	Bon compromis plasticité + résistance
T3	13.0 / 57.3 / 29.6	Kaolinite 50.4 %, Illite 2.87 %	Allo ₃ 26.9 %, Fe ₂ O ₃ 24.4 %	CL (argile limoneuse)	A-2-4 ou A-2-6	Argiles limoneuses	Ferra sol limoneux altéré	Kaolinite élevée, plasticité forte, bonne cohésion
T4	13.8 / 28.5 / 57.5	Kaolinite 47.4 %, Illite 0.47 %	SiO ₂ 53 %, Allo ₃ 25 %, Fe ₂ O ₃ 17 %	SM ou SC (sable limoneux ou sable argileux)	A-1-b ou A-3	Sables limoneux ou limons sableux	Sols quartzitiques peu altérés	Dominance sable, plasticité moyenne, besoin fibres
T5	9.7 / 57.6 / 32.6	Kaolinite 56.7 %, Illite 2.64 %	Allo ₃ 28.1 %, Fe ₂ O ₃ 23.8 %	CL (argile limoneuse)	A-2-4 ou A-2-6	Argiles limoneuses	Sol ferrugineux altéré	Très bon équilibre, kaolinite élevée
T6	24.0 / 65.0 / 11.0	Kaolinite 38.7 %, Illite 0.6 %	SiO ₂ 47.7 %, Allo ₃ 22.3 %, Fe ₂ O ₃ 22.4 %	CL ou ML (argile limoneuse / limon sableux)	A-2-4 ou A-2-6	Argiles limoneuses	Sol ferrugineux altéré	Forte plasticité/cohésion, risques de retrait
T7	18.8 / 72.0 / 9.0	Illite 12.97 %, Kaolinite 28.3 %	Fe ₂ O ₃ 25.9 %, Allo ₃ 19.5 %, SiO ₂ 47.8 %	CL (argile limoneuse)	A-2-4 ou A-2-6	Argiles limoneuses	Ferra sol limoneux altéré	Forte illite, bonne interaction fibres
T8	15.3 / 37.0 / 47.0	Kaolinite 36.5 %, Illite 2.5 %	SiO ₂ 50 %, Allo ₃ 23 %, Fe ₂ O ₃ 15 %	SM ou SC (sable limoneux ou sable argileux)	A-1-b ou A-3	Sables limoneux ou limons sableux	Sol ferrugineux altéré	Bonne stabilité, plasticité moyenne

Normes : USCS, AASHTO, EN ISO 14688 et WRB

4. Discussion

Les analyses granulométriques laser des échantillons de sols bruts (T1 à T8) révèlent une grande variabilité granulométrique d'un site à l'autre, soulignant le rôle essentiel de la composition granulaire dans les propriétés fonctionnelles des sols utilisées en construction.

La prédominance des fractions fines (limon et argile) dans certains profils confirme la littérature, où ces particules sont reconnues comme fondamentales pour la plasticité et la cohésion des sols (Anger, 2011).

La prédominance des fractions fines (limon et argile) dans certains sols étudiés confirme leur rôle essentiel dans la plasticité et la cohésion des matériaux terreux. Ces observations rejoignent celles évoquées dans les études de Laborel-Préneron et al. (2015), Bailly et al. (2024) et Riffia et al. (2026) qui soulignent l'importance desdites fractions dans l'amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité des composites produits à base des sols renforcés par des fibres naturelles.

Bien que l'intérêt des chercheurs sur ce mécanisme soit récente, ces auteurs soulignent que l'usage d'agrégats et de fibres végétales dans la construction à base des sols bruts (terre crue) remonte

à des millénaires. Cette complémentarité entre savoir traditionnel, recherches scientifiques et études modernes encourage à mieux comprendre les interactions particules (matières en grains du sol) - fibres pour améliorer les performances des composites.

Les résultats des distributions granulométriques des sols étudiés montrent que les ajouts de l'hexamétophosphate, de l'eau oxygénée et de l'acide chlorhydrique influencent fortement la granulométrie par la désaggrégation des agrégats liés à la matière organique et la libération des fines.

Ces observations corroborent les résultats de Yang et al. (2019) et Lin et al. (2016) qui, lors de leurs études ont constatés une amélioration de la plasticité et de la cohésion des sols due à ces désaggrégations.

Sur le plan granulométrique, les échantillons T1, T6 et T7 se caractérisent par une forte proportion de fractions fines (jusqu'à 72 % de limon et 24 % d'argile) conférant aux sols une bonne plasticité et cohésion, conditions favorables à la prévention des fissures liées au retrait (Gauzin-Müller, 2018).

Toutefois, cette forte teneur en fines, conjuguée à une faible proportion de sable grossier, peut engendrer un retrait significatif au séchage, impactant potentiellement la stabilité dimensionnelle des adobes (Yang et al., 2019 ; Lin et al., 2016).

Par leurs teneurs élevées en sable moyen à grossier (jusqu'à 57 %), les échantillons T4, T5 et T8 quant à eux peuvent favoriser la densité et limitant le retrait, ce qui suggère une meilleure stabilité dimensionnelle du composite.

Ainsi, afin d'assurer la plasticité et la cohésion dans la production des composites durables, les sols T4, T5 et T8 nécessitent un renforcement aux fibres naturelles à cause de leur déficit en fractions fines comme le souligne Dejeant et al., 2021 ; Gauzin-Müller, 2018 pour ce type des sols.

Les échantillons des sols bruts T2 et T3, théoriquement favorable en termes de maniabilité et cohésion, conditions nécessaires pour produire des adobes fibrés équilibrés présentent un équilibre granulométrique optimal entre particules fines (12,985–14,25 % d'argile, 50,837–57,333 % de limon) et sable (29,682–34,913 %).

L'analyse en composantes principales (ACP), réalisée avec la méthode reconnue pour lever la contrainte de fermeture des données composées (CLR), met en évidence des structures pertinentes du point de vue géochimique (Filzmoser et al., 2018).

Il ressort de cette analyse que les deux composantes PC1 et PC2 portent à eux seuls 69,3 % alors que l'ensemble des sept composantes retenues expliquent 93,1 % de la variance globale.

Sur L'axe principal, PC1 (50,3 %), les contributions principales proviennent de SiO₂ (55,2 %), TiO₂ (39,6 %) et Al₂O₃ (39,4 %). Sur PC2 (29,6 %), K₂O représente à lui seul 49,0 %, suivi de Fe₂O₃ à 18,4 %. Cela confirme que le premier axe reflète principalement l'opposition entre quartz et phyllosilicates et, que le second axe capture principalement les variations de K₂O et de Fe₂O₃.

Cette opposition nette en PC1 entre le quartz, phase la plus inerte, et les phases argileuses et ferrugineuses sont des reflets des processus d'altération chimique et physique tandis que les variations en PC2 liées aux minéraux potassiques et ferreux peuvent être associées aux conditions de drainage et au potentiel redox local (Bau et Dulski, 1996).

Comparés aux résultats de Lin et al., 2016, ces profils chimiques ci-dessus révèlent un contraste entre le profil ferralitique de l'échantillon T7 plus altéré et enrichi en Al₂O₃ et Fe₂O₃ les faciès quartzitiques peu altérés des échantillons des sols T1 et T4 riches en SiO₂ et pauvres en oxydes de fer.

Sur le plan minéralogique, les échantillons des sols T3, T4 et T5 contiennent de kaolinite en proportions significatives, indique un stade avancé d'altération pédogénétique et révèlent un potentiel favorable pour la cohésion et la plasticité des composites.

La forte teneur en illite dans l'échantillon T7 suggère un environnement pédologique différent, un net avantage pour la production des composites mettant en avant la souplesse du matériau (Alhassnawi et al., 2025).

Des caractéristiques fonctionnelles distinctes sont constatés lors que les résultats des analyses granulométriques sont combinés à ceux de la diffraction aux rayons X. A titre d'exemple, la prépondérance d'argile et de limon des sols T3 et T5 qui devrait influencer leur maniabilité et cohésion respectives contraste avec la dominance de sables fins et moyens dans les sols T1 et T8 (Gauzin-Müller, 2018).

De plus, les corrélations observées entre oxydes montrent une opposition d'associations minérales typiques entre Al₂O₃ avec TiO₂, SiO₂ au Fe₂O₃,

corroborant des mécanismes pédogénétiques classiques (Bau & Dulski, 1996).

Comme Danso et al., 2015 l'ont observé dans leurs études, les caractéristiques granulométriques et minéralogiques observées dans cette étude suggèrent des différences potentielles dans le comportement des huit échantillons de sols (de T1 à T8) en ce qui concerne les propriétés mécaniques, bien que non directement mesurées.

Par exemple, une forte proportion de quartz est souvent associée dans la littérature à une bonne résistance à la compression et à l'abrasion, tandis qu'une présence notable de kaolinite ou d'illite est généralement favorable à la plasticité et à la cohésion, facteurs importants pour la durabilité des matériaux composites fibrés (Danso et al., 2015 ; Dejeant et al., 2021). Ces interprétations restent toutefois à confirmer par des essais mécaniques ultérieurs.

Une cohérence est constatée lorsque les observations des analyses granulométriques, XRF, XRD sont associées aux les résultats de classification des sols (T1 à T8) selon les normes internationales (USCS, AASHTO, EN ISO 14688, WRB).

Les échantillons T2, T3, T5 et T7 (classés en CL, argiles limoneuses), représentent des profils qui offrent un bon compromis entre plasticité et aptitude structurale, en lien avec leur équilibre granulométrique et leur richesse en argiles minérales actives selon la norme ISO 14688-2 :2018 proposé par Kovacevic et al. (2018).

Cela suggère qu'ils pourraient être utilisés directement dans la fabrication d'adobes fibrés avec un potentiel intéressant pour la cohésion et la maniabilité (Sridharan et Prakash, 2000 ; Kovacevic et al., 2018).

En revanche, les sols classés comme ML (limons sableux) ou SC (sables argileux), notamment T1, T4 et T8, dont la granulométrie est dominée par les fractions grossières, devraient généralement nécessiter un renfort fibreux pour compenser leur faible plasticité et assurer la performance du matériau, conformément aux recommandations issues de la littérature normative et pratique.

Ainsi, même si cette étude s'est limitée à la caractérisation physico-chimique, la combinaison des données granulométriques, minéralogiques, chimiques et normatives permet de formuler des hypothèses robustes sur l'adéquation des sols à l'usage direct ou nécessitant des adaptations techniques, notamment par renfort fibreux, pour l'élaboration d'écomatériaux composites performants dans le contexte local de Mbanza-Ngungu.

Les écomatériaux composites fibrés (adobes fibrés) envisagés dans cette étude présentent l'avantage d'être produits à moindre coût par rapport aux briques en terre cuite (BTC) et aux briques en ciment, grâce à l'abondance, à la recyclabilité et à la disponibilité locale des sols bruts, ainsi qu'à la forte présence de fibres végétales issues de plantes telles que le bambou, la noix de coco, les bananiers et plusieurs lianes riches en fibres, largement répandues dans la ville de Mbanza-Ngungu et ses environs.

Cette accessibilité matérielle favorise une compétitivité économique ; cependant, il demeure nécessaire de mener des analyses détaillées des coûts, des modes de collecte, du traitement des fibres et de l'acceptabilité sociale afin d'assurer la viabilité technique, économique et sociale de ces matériaux dans le contexte local.

5. Conclusion

Cette étude s'est concentrée sur la caractérisation physico-chimique, granulométrique, géochimique et minéralogique de huit échantillons de sols bruts prélevés à Mbanza-Ngungu, considérés comme potentiellement adaptés à la production d'écomatériaux composites fibrés durables.

Les résultats des analyses par granulométrie laser, XRF, XRD et de classification des échantillons de sols bruts (T1 à T8) ont révélé une grande variabilité granulométrique, composition chimique et minéralogique d'un site à l'autre, éléments essentiels à l'optimisation des formulations des adobes fibrés.

Ces résultats mettent en évidence des teneurs élevées en fractions fines de certains sols, soient teneurs en argile variant de 9,7 % à 24,1 % et en limon pouvant atteindre 72 %, notamment dans les échantillons T1, T6 et T7, susceptible de conférer plasticité et cohésion favorables à l'adhésion des fibres naturelles et à la réduction du risque de fissuration.

En revanche, d'autres sols (T4, T5 et T8) sont dominés par des sables moyens et grossiers, jusqu'à 57 %, propices à une meilleure compacité, une densité accrue et une limitation du retrait potentiellement bénéfique à la stabilité dimensionnelle. Ces contrastes granulométriques suggèrent des ajustements techniques différenciés selon les sols.

La caractérisation minéralogique par diffraction des rayons X a mis en évidence la prédominance variable de minéraux clés : kaolinite (jusqu'à 56,7 % à T5), illite (jusqu'à 12,97 % à T7) et quartz (jusqu'à 47,9 % à T1).

Ces minéraux trouvés dans nos huit échantillons (T1 à T8) sont connus pour leur influence sur des propriétés comme la plasticité, la cohésion et l'élasticité des matériaux composites.

Néanmoins, les échantillons T1 à titre d'exemple, à plasticité faible suggère la nécessité d'un renfort fibreux accru pour assurer la flexibilité des adobes fabriqués à base des sols à forte teneur en quartz associée à une plasticité faible.

L'analyse de la composition chimique par fluorescence X met nettement en évidence un contraste géochimique entre, d'une part, des sols enrichis en silice (SiO_2), principalement T1, T4, T6 et T8 et, d'autres part, des sols à prédominance d'oxyde d'aluminium et de fer (Al_2O_3 et Fe_2O_3), tels que T2, T3 et T7. Cette dualité reflète des processus d'altération pédologique contrastés et conditionne les propriétés physico-chimiques de la matrice terreuse.

L'analyse en composantes principales (ACP), basée sur la transformation log-ratio centrée pour lever la contrainte de fermeture, met en lumière cette structuration chimique robuste. Les deux premiers axes, expliquant près de 70 % de la variance, distinguent clairement les sols quartzitiques des sols ferrugineux altérés et soulignent les variations pédogénétiques influençant la minéralogie et la chimie, éléments indispensables pour comprendre le comportement potentiel des sols dans les matériaux composites.

L'intégration des résultats dans les cadres normatifs internationaux (USCS, AASHTO, EN ISO 14688, WRB) permet de mieux cibler les sols selon leur aptitude présumée à la fabrication d'adobes fibrés. Les sols classés en CL (argiles limoneuses), notamment T2, T3, T5 et T7, présentent des caractéristiques physico-chimiques et granulométriques favorables à une utilisation directe, combinant plasticité et cohésion. À l'inverse, les sols de type ML (limons sableux) ou SC (sables argileux), tels que T1, T4 et T8, bien que présentant une bonne compacité grâce à leurs fractions grossières, nécessitent probablement un renfort fibreux plus important pour compenser leur moindre plasticité intrinsèque.

Il est important de rappeler que cette étude s'est limitée à la caractérisation des sols. Aucun essai mécanique n'a encore été réalisé sur des adobes fabriqués à partir de ces matériaux. Avant toute recommandation définitive, l'ajout des fibres, les formulations et la validation par essais, des propriétés

mécaniques, en particulier la résistance, la flexibilité et la durabilité demeure une étape incontournable.

Les perspectives incluent l'optimisation des formulations et les tests de la qualité des matériaux composites dans leurs conditions effectives d'utilisation.

Ainsi, cette étude fournit une base scientifique, étayée par la caractérisation chimique et une interprétation normée des sols, afin d'orienter le développement local d'écomatériaux biosourcés durables. Elle favorise la valorisation des ressources naturelles et des savoir-faire traditionnels, tout en apportant des réponses aux enjeux environnementaux et aux contraintes socio-économiques propres à la RDC.

Remerciements

Le Chef de Travaux Bienvenu Doudou LUKUAMA NGESEVUA tient à exprimer sa profonde gratitude à son équipe d'encadrement, au CNRS/France, à l'UMR 7194-PRETROP, à l'Institut Supérieur Pédagogique de Mbanza-Ngungu, au Centre de Recherche en Sciences Appliquées et Technologiques (CRSAT/Kinshasa), aux chercheurs des laboratoires A4 et A30 du Département de Chimie, Faculté des Sciences et Technologies, de l'Université de Kinshasa ainsi qu'à l'Ambassade de France en République Démocratique du Congo pour leur contribution majeure à ces recherches.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également au Dr Isis Mesfin, au Professeur Igor Matonda et à l'ensemble des chercheurs du Projet Paléocongo.

Financement

Financé par l'Ambassade de France en République Démocratique du Congo. L'hébergement et les modalités pratiques de séjour ont été organisés et pris en charge par le projet de recherche, de formation et de coopération PaléoCongo via le CNRS/France.

Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Considérations éthiques

Cette recherche est exclusivement axée sur la pratique. En conséquence, aucune approbation d'un comité d'éthique n'était nécessaire, conformément aux normes internationales de publication scientifique.

ORCID des auteurs

Lukuama N.B.D. : <https://orcid.org/0000-0003-2582-4156> ;
 Disansukidi M.J.G. : <https://orcid.org/0009-0000-6345-303X> ;
 Ekoko B.G. : <https://orcid.org/0009-0003-1523-1741> ;
 Mbala M.B. : <https://orcid.org/0000-0001-8020-6700> ;
 Mbanga L.J.A. : <https://orcid.org/00090001-5633-8591> ;
 Samba N.D. : <https://orcid.org/0009-0002-9528-9734> ;
 Kabongo K.J. : <https://orcid.org/0009-0002-1142-3335> ;
 Koy K.R. : <https://orcid.org/0000-0002-9147-5460> ;
 Kifuani K.M.A. : <https://orcid.org/0009-0008-3677-0775> ;
 Mweze B.E. : <https://orcid.org/0009-0008-4173-3661> ;
 Xavier G. : <https://orcid.org/0009-0005-6236-9529> ;
 Vie J.T. : <https://orcid.org/0009-0003-5537-6793> ;
 K.M.F. : <https://orcid.org/0009-0001-8489-8334>

Contribution des auteurs

L.N.B.D. a conçu le sujet, a analysé les échantillons des sols (terres crues) dans différents laboratoires. Collecte, synthèse et interprétation des données scientifiques, et a participé à la rédaction du manuscrit original (première version).

V.J.T., K.M.F. et X.G., ont participé dans la collecte de données, des modes opératoires et dans l'exécution des analyses au laboratoire.

M.B.E., V.J.T. et L.N.B.D. ont contribué à l'intégration de graphiques, carte et de tableaux.

K.M.F., S.N.D. et D.M.J.G. ont contribué à la géolocalisation des sites et collectes des échantillons.

K.K.R. a participé à l'encadrement, correction du texte, amélioration du style et sur le calibrage de méthodes analytiques exploitées.

K.k.M.A. a contribué à l'intégration des tableaux et interprétation des résultats, ainsi que la relecture critique et rigoureux du manuscrit.

M.L.J.M. et K.K.J. ont participé au choix de la partie méthodologique et analytique, et au relecture critique du texte et interprétation des résultats.

E.B.G. et M.M.B. ont coordonné l'équipe, lecture de la version finale, approbation avant soumission, validation de méthodes analytiques exploitées,

validation finale du texte proposé, et supervision scientifique du travail.

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit et acceptent d'en assumer la responsabilité scientifique.

Références bibliographiques

- Abdi, H., et Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abdi, H., et Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Alene, T. E., Mohammed, T. A., et Gualu, A. G. (2022). Use of sisal fiber and cement to improve load bearing capacity of mud blocks. *Materials Today Communications*, 33, 104557. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104557>
- Alhassnawi, N., Azmi, M., Fattah, M. Y., et Ahmad, F. (2025). Physical, chemical, and mechanical characterization of coated date palm leaf fiber from the Middle Region of Iraq for potential in civil engineering application. *Jurnal Kejuruteraan*, 37(1), 37–48. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37\(1\)-04](https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(1)-04)
- Al-Massri, G. M., Ghanem, H., Khatib, J. M., et Elkordi, A. (2025, February). Influence of adding banana fibers on the mechanical properties and volume stability of mortar for paving block applications. *Journal of Natural Fibers*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2464152>
- Anger, R. (2011). Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction (Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon). Lyon, France: INSA de Lyon. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00735722>
- Aouiche, I., Daoudi, L., Ihabach, F.-Z., et Ouahmane, B. (2016). Caractérisation minéralogique et granulométrique des sédiments littoraux de la baie d'Agadir (Maroc atlantique): Dynamique sédimentaire et sources des matériaux. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 7(1), 123–132.
- Bailly, G. C., El Mendili, Y., Konin, A., et Khoury, E. (2024). Advancing earth-based construction: A comprehensive review of stabilization and reinforcement techniques for adobe and

- compressed earth blocks. *Eng*, 5(2), 750–783. <https://doi.org/10.3390/eng5020041>
- Bau, M., et Dulski, P. (1996). Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79(1–2), 37–55. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
- Castro, G. M., Park, J., et Santamarina, J. C. (2023, November). Revised soil classification system: Implementation and engineering implications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(11), 04023109. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-10447>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. ISBN 978-0805802832
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., et Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
- Daryati, D., Widiyanti, I., Septiandini, E., Ramadhan, M. A., Sambowo, K. A., et Purnomo, A. (2019). Soil characteristics analysis based on the unified soil classification system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(2), 022028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022028>
- Dejeant, F., Garnier, P., et Joffroy, T. (2021). Local materials, materials of the future: Local resources for sustainable cities and territories in Africa. Villefontaine, France: CRAterre. <https://doi.org/10.58079/najm>
- Dethier, J. (2019). *Habiter la terre: L'art de bâtir en terre crue. Traditions, modernité et avenir*. Paris, France: Flammarion. ISBN 978-2081442818
- Duong, N. T., Satomi, T., et Takahashi, H. (2021). Potential of corn husk fiber for reinforcing cemented soil with high water content. *Construction and Building Materials*, 271, 121848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121848>
- Filzmoser, P., Hron, K., et Templ, M. (2018). *Applied compositional data analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96422-5>
- Fournier, J., Bonnot-Courtois, C., Paris, R., Voldoire, O., et Le Vot, M. (2012). *Analyses granulométriques : Principes et méthodes*. Dinard, France: CNRS. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13920079> (doi.org in Bing)
- Gauzin Müller, D., Sémon, P. (ill.), Doat, P., Fontaine, L., et Guillaud, H. (2016). *Architecture en terre d'aujourd'hui : Les techniques de la terre crue*. Paris, France: Museo. <https://doi.org/10.58079/naga>
- Guerreiro, S., Arsénio, P. M. R., Florentino, V., et Madeira, M. (2026). Land evaluation following updated World Reference Base (WRB) soil mapping: A tool for sustainable land planning in Mediterranean environments. *Land*, 15(3), 383. <https://doi.org/10.3390/land15030383>
- Gyasi, E. K., et Purushotham, S. (2023, November). Advancements in soil classification: An in-depth analysis of current deep learning techniques and emerging trends. *Air, Soil and Water Research*, 16(3), 11786221231214069. <https://doi.org/10.1177/11786221231214069>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 14688-1:2017 Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description*. Geneva: ISO.
- Jolliffe, I. T., et Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kafodya, I., et Okonta, F. (2018). Effect of fibre surface coating on the mechanical properties of natural fibre-reinforced soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 338–348. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1542557>
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and*

- Psychological Measurement*, 20(1), 141–151.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kasinikota, P., et Tripura, D. D. (2023). Effects of coir fibres and cement addition on properties of hollow interlocking compressed earth blocks. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(10).
<https://doi.org/10.1007/s41062-023-01240-4>
- Kovacevic, M. S., et Jurić Kačunić, D. (2014). European soil classification system for engineering purposes. *Grđevinar*, 66, 801–810.
<https://doi.org/10.14256/JCE.1077.2014>
- Kovacevic, M. S., Jurić-Kačunić, D., Libric, L., et Ivoš, G. (2018). Engineering classification of soil according to EN ISO 14688-2:2018. *Grđevinar*, 70(10), 873–879.
<https://doi.org/10.14256/JCE.2437.2018>
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Tribout, C., et Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
- Lê, S., Josse, J., et Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18.
<https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Li, C., Wang, K., Li, S., Gao, Y., et Cao, Y. (2026). Coupled hydro-mechanical processes in rainfall-triggered mudstone landslides revealed by 3D laser scanning and model testing. *PLoS ONE*, 21(4), e0345165.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0345165>
- Lin, Y., Mu, G., Xu, L., et Zhao, X. (2016). The origin of bimodal grain-size distribution for aeolian deposits. *Aeolian Research*, 20, 80–88.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.12.001>
- Liveneau, P., et Marin, P. (2012). Matérialités contemporaines – Materiality in its contemporary forms: Architecture, perception, fabrication, conception. MC 2012 Symposium, Villefontaine, novembre 2012. Villefontaine: Les Grands Ateliers. ISBN 978-2-913962-14-9
- McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. In *Proceedings of the 9th Python in Science Conference (SciPy 2010)* (pp. 56–61).
<https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>
- Ouedraogo, M., Dao, K., Millogo, Y., Aubert, J. E., Messan, A., Seynou, M., Zerbo, L., et Gomina, M. (2019). Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *Journal of Building Engineering*, 23, 250–258.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.005>
- Pawlowsky-Glahn, V., Egozcue, J. J., et Tolosana-Delgado, R. (2015). Modeling and analysis of compositional data. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119003144>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., et Dutter, R. (2008). Statistical data analysis explained: Applied environmental statistics with R. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470987605>
- Riffia, S., Ghorbel, E., Schmidt, F., et Cuccagna, F. (2026). Review of Natural Fiber-Reinforced Compressed Earth Blocks: Toward Enhanced Performance and Environmental Sustainability. *Journal of Natural Fibers*, 23(1), 2619017.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2026.2619017>
- Sally, N., Pemberton, J., et Awe, O. O. (2024, April). A comparative study of soil classification machine learning models for construction management. *International Journal of Construction Management*, 25(4), 1–10.
<https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2341500>
- Schober, P., Boer, C., et Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768.
<https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Serratrice, J.-F. (2016). Mesures des propriétés cycliques des sols limoneux ou argileux au laboratoire. *Revue Française de Géotechnique*, 148, 1–13.
<https://doi.org/10.1051/geotech/2016009>
- Sridharan, A., et Prakash, K. (2000). Classification procedures for expansive soils. *ICE Proceedings – Geotechnical Engineering*, 143(4), 235–240.
<https://doi.org/10.1680/geng.2000.143.4.235>
- Thanushan, K., et Sathiparan, N. (2022). Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. *Materialia*, 21, 101309.
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101309>
- Tourtlot, J., Bourgès, A., et Keita, E. (2021). Influence of biopolymers on the mechanical behavior of earth-based building materials. *Recent Progress*

-
- in *Materials*, 3(3), Article 31.
<https://doi.org/10.21926/rpm.2103031>
- Van den Boogaart, K. G., et Tolosana-Delgado, R. (2013). *Analyzing compositional data with R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36809-7>
- Vissac, A., Bourgès, A., Gandreau, D., Anger, R., et Fontaine, L. (2017). Argiles et biopolymères: Les stabilisants naturels pour la construction en terre. Villefontaine, France: CRAterre. ISBN 978-2-906901-88-9
- Xiao, Y., Tong, L., Che, H., Guo, Q., et Pan, H. (2022). Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 344, 128242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128242>
- Yang, Y., Wang, L., Wendroth, O., Liu, B., Cheng, C., Huang, T., et Shi, Y. (2019). Is the laser diffraction method reliable for soil particle size distribution analysis? *Soil Science Society of America Journal*, 83(2), 291–305. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0252>
- Yazıcı, M. F., et Keskin, N. (2024). Experimental investigation of the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced clay soil and development of predictive models: Effects of fiber length and fiber content. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(10). <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08688-7>