



COMPORTEMENT GEOMECHANIQUE DES SOLS LATERITQUES DE LA HAUTE ZONE D'ANTANANARIVO : CAS D'AMBOHIPOTSY

GEOMECHANICAL BEHAVIOR OF LATERITIC SOILS IN THE UPPER ZONE OF ANTANANARIVO : AMBOHIPOTSY CASE STUDY

RANIVOMANANTSOA¹Harivao Julie, RAVOKATRA²Fidiniavo.

¹Université d'Antananarivo, École Doctorale Ingénierie et Géosciences, Madagascar,

²Université d'Antananarivo, École Doctorale Ingénierie et Géosciences, Madagascar,

Résumé : Les sols latéritiques des Hautes Terres centrales conditionnent la stabilité des versants de la Haute Ville d'Antananarivo, régulièrement affectée par des glissements en saison des pluies de novembre à avril. Cette étude vise à caractériser leur comportement géomécanique pour comprendre les mécanismes de rupture. Dix échantillons remaniés et intacts ont été prélevés à Ambohipotsy (18°55'56.15"S ; 47°31'56.22"E) par tarière manuelle jusqu'à 5 m. Les essais selon les normes NF P 94-050 à 94-090 ont inclus granulométrie (NF P 94-056), limites d'Atterberg (NF P 94-051), Proctor modifié (NF EN 13286-2), cisaillement direct (NF P 94-071) et œdomètre (NF P 94-090). Les résultats montrent des limons argilo-sableux jaunâtres (LAS) de plasticité moyenne, indice de plasticité 17 à 19, classés A2 selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR). Le coefficient de compression C_c est de 0,16 à 0,22, la densité sèche maximale γ_{dmax} atteint 19,5 kN/m³ pour ω_{opm} 12,5%, e_0 vaut 0,78 et C_v vaut 9,79×10⁻⁷ m²/s. La résistance au cisaillement selon Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ donne c' de 11 à 16 kPa et ϕ' de 25 à 30°. L'analyse du facteur de sécurité FS révèle que la saturation par les fortes pluies, les pentes >25-30° et l'absence de drainage réduisent la succion matricielle et la résistance, favorisant les glissements superficiels et des tassements de 35 à 60 mm par mètre. Ces résultats constituent une base pour l'aménagement durable et des mesures de stabilisation adaptées aux sols latéritiques d'Antananarivo.

Mots-clés : sol latéritique ; caractérisation géomécanique ; stabilité des pentes ; talus ; Antananarivo

Abstract : Lateritic soils of the Central Highlands control slope stability in the Upper Town of Antananarivo, regularly affected by landslides during the rainy season from November to April. This study aims to characterize their geomechanical behavior to understand failure mechanisms. Ten disturbed and undisturbed samples were collected at Ambohipotsy (18°55'56.15"S ; 47°31'56.22"E) by hand auger up to 5 m depth. Tests according to French standards NF P 94-050 to 94-090 included particle size distribution (NF P 94-056), Atterberg limits (NF P 94-051), modified Proctor (NF EN 13286-2), direct shear (NF P 94-071) and oedometer (NF P 94-090). Results show yellowish sandy clayey silts of medium plasticity, plasticity index 17 to 19, classified as A2 according to the « *Guide des Terrassements Routiers (GTR)* ». Compression index C_c is 0.16 to 0.22, maximum dry density γ_{dmax} reaches 19.5 kN/m³ at optimum water content 12.5%, void ratio e_0 is 0.78 and consolidation coefficient C_v is 9.79×10^{-7} m²/s. Shear strength according to Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ gives c' of 11 to 16 kPa and ϕ' of 25 to 30°. Safety factor FS analysis reveals that saturation by heavy rainfall, slopes >25-30° and lack of drainage reduce matric suction and strength, promoting shallow landslides and settlements of 35 to 60 mm per meter. These findings provide a basis for sustainable urban planning and stabilization measures adapted to lateritic soils of Antananarivo.

Keywords : lateritic soil; geomechanical characterization; slope stability; embankment; Antananarivo

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23063587>

1 Introduction

Selon la synthèse mondiale présentée lors du 16e Congrès Mondial de Science du Sol (AFES, 1998), les sols latéritiques, caractérisés par leur teinte rougeâtre et leur enrichissement en oxydes de fer, d'aluminium et en kaolinite, constituent une part majeure de la couverture pédologique intertropicale.

À Madagascar, ils sont particulièrement présents dans les Hautes Terres centrales, où ils conditionnent de manière significative la stabilité des versants.

La ville d'Antananarivo, capitale de Madagascar, est fréquemment confrontée à des glissements de terrain, surtout pendant la saison des pluies. Ces phénomènes récurrents menacent directement la sécurité des populations et la durabilité des infrastructures urbaines.

Parmi les facteurs déclenchants le phénomène de glissement figure la nature pédologique et géomécanique des sols, le régime hydrique, et les conditions topographiques.

Les recherches antérieures ont mis en évidence le rôle central de l'altération chimique des roches mères dans la formation des lavaka et l'instabilité des sols (Ravokatra, 2017 : 45, Ramasiarinoro, 2008 : 112).

L'objectif de cette étude est d'analyser les caractéristiques géotechniques et géomécaniques des sols latéritiques de la haute zone d'Antananarivo afin de mieux comprendre leur rôle dans les phénomènes de glissement de terrain.

Cette étude s'articule autour de cinq parties principales :

- Une revue bibliographique permet de situer le contexte géologique et géotechnique des sols latéritiques tropicaux.
- La méthodologie détaille les procédures d'échantillonnage, les essais en laboratoire et les méthodes d'interprétation des données.
- Les résultats présentent les caractéristiques physiques et mécaniques des sols ainsi que les profils lithologiques.
- La discussion analyse ces résultats en lien avec les risques de glissement de terrain et les connaissances existantes.
- Enfin, la conclusion synthétise les apports de l'étude et propose des recommandations pour la gestion durable de la stabilité des versants en milieu urbain.

2 Méthodologies des études

2.1 Approche méthodologique

La caractérisation géo mécanique des sols latéritiques de la haute zone d'Antananarivo a été réalisée par des sondages à tarière manuelle permettant le prélèvement d'échantillons représentatifs. Les profils lithologiques ont été établis à partir des observations in situ. Les échantillons ont fait l'objet d'essais en laboratoire pour déterminer leurs propriétés physiques et mécaniques. Les résultats ont été interprétés afin d'extraire les paramètres géotechniques nécessaires à l'analyse de la stabilité des pentes du site.

2.2 Méthode des travaux

2.2.1 Revue bibliographique

Une analyse critique de la littérature a été conduite pour contextualiser les caractéristiques géologiques et géotechniques du site, ainsi que les méthodologies éprouvées en investigation et modélisation de la stabilité des sols.

2.2.2 Méthode d'échantillonnage

Les prélèvements ont été réalisés par sondages à la tarière manuelle, permettant l'extraction d'échantillons représentatifs et non perturbés, indispensables à la caractérisation précise des horizons géotechniques.

Deux (2) types d'échantillons ont été collectés :

- Échantillons remaniés : destinés aux essais de classification et d'identification, dont : la granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau.
- Échantillons intacts : obtenus par carottage, utilisés pour les essais mécaniques en état naturel, dont le cisaillement direct, et l'œdomètre.

2.2.3 Méthode des essais

Les analyses ont été réalisées conformément aux normes françaises NF P 94-050 à 94-090 :

- Identification :
 - Granulométrie par tamisage (NF P 94-056),
 - Limites d'Atterberg (NF P 94-051),
 - Teneur en eau pondérale (NF P 94-050).
- Compactage :
 - Essai Proctor modifié (NF EN 13286 – 2)
- Mécaniques :
 - Essai de cisaillement direct (NF P 94-071),
 - Essai de compression œdométrique (NF P 94-090).

2.2.4 Méthode d'interprétation

Les données in situ et en laboratoire ont été intégrées pour établir les profils lithologiques et extraire les paramètres géotechniques fondamentaux. Les facteurs de sécurité des pentes ont été calculés en s'appuyant sur une approche semi-analytique, prenant en compte les caractéristiques mécaniques obtenues.

2.2.5 Paramètres obtenus

Les paramètres déterminés, dont la cohésion effective c' , l'angle de frottement interne ϕ' , le module de compressibilité, et le coefficient de consolidation ont été utilisés pour modéliser le comportement mécanique des sols, notamment les phénomènes de tassement et de consolidation.

3 Résultats

3.1 Site d'étude

Les prélèvements ont été réalisés sur le flanc sud de la colline d'Antananarivo, au Fokontany Ambohipotsy dans la Commune Urbaine d'Antananarivo, aux coordonnées GPS : 18°55'56.15"S ; 47°31'56.22"E.

La région est caractérisée par un climat subtropical d'altitude avec deux saisons distinctes :

- Une saison chaude et humide de novembre en avril ;
- Et une saison fraîche et sèche, de mai en octobre.

Les températures varient de 14 à 28°C en moyenne, avec une forte amplitude thermique journalière. Ces conditions climatiques favorisent une altération chimique profonde, propice à la genèse des sols latéritiques.

3.2 Profil lithologique

Les analyses géotechniques réalisées sur le site étudié ont permis de dresser la coupe lithologique du sol de la figure 1, illustrant la succession des horizons depuis la plateforme jusqu'à 5,00 m de profondeur. Les sondages confirment la présence de sols résiduels issus de l'altération de la roche mère, caractéristiques des horizons latéritiques.

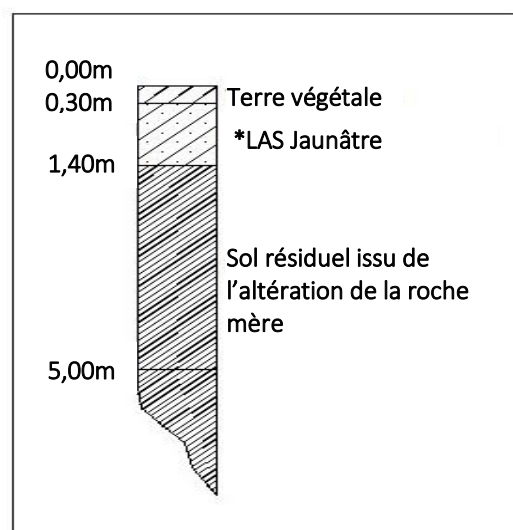


Figure 1 : Coupe lithologique du sol (Source : Auteurs, 2025)
*LAS : Limon Argileux Sableux

3.3 Propriétés géotechniques

Les résultats d'identification au laboratoire sont récapitulés sous les tableaux 1 et 2 ci-après :

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des échantillons de sol

Profondeur (m)	Nature Visuelle	Teneur en eau naturelle ω_{nat} (%)	Essai Proctor modifié		Résultats de cisaillement	
			Densité sèche maximale : γ_{dmax} (kN/m ³)	Teneur en eau optimum ω_{opt} (%)	Cohésion effective : c' (kPa)	Angle de frottement effectif : ϕ' (°)
0,30 – 1,40	LAS Jaunâtre	13,7	19,50	12,5	16	25
1,40 – 5,00	LAS Jaunâtre	13,2	19,05	15,2	11	30

*LAS : limon argileux sableux

(Source : Auteurs, 2025)

Tableau 2. : Propriétés physiques et classification GTR des échantillons de sol :

Profondeur (m)	% Fines (<0,08 mm)	Limites d'Atterberg			Coefficient de compression C_c	Classe GTR
		Limite de liquidité WL	Limite de plasticité WP	Indice de plasticité (IP)		
0,30 – 1,40	47	46	27	19	0,22	A ₂
1,40 – 5,00	39	43	26	17	0,16	A ₂

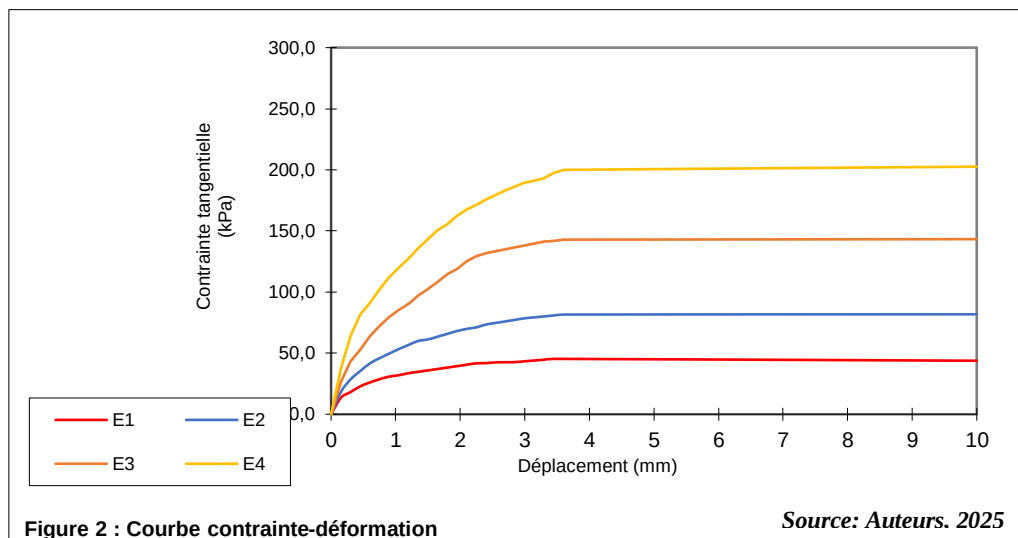
*A₂ : Sable légèrement argileux, limon sableux, grave sableuse, latérite peu plastique.

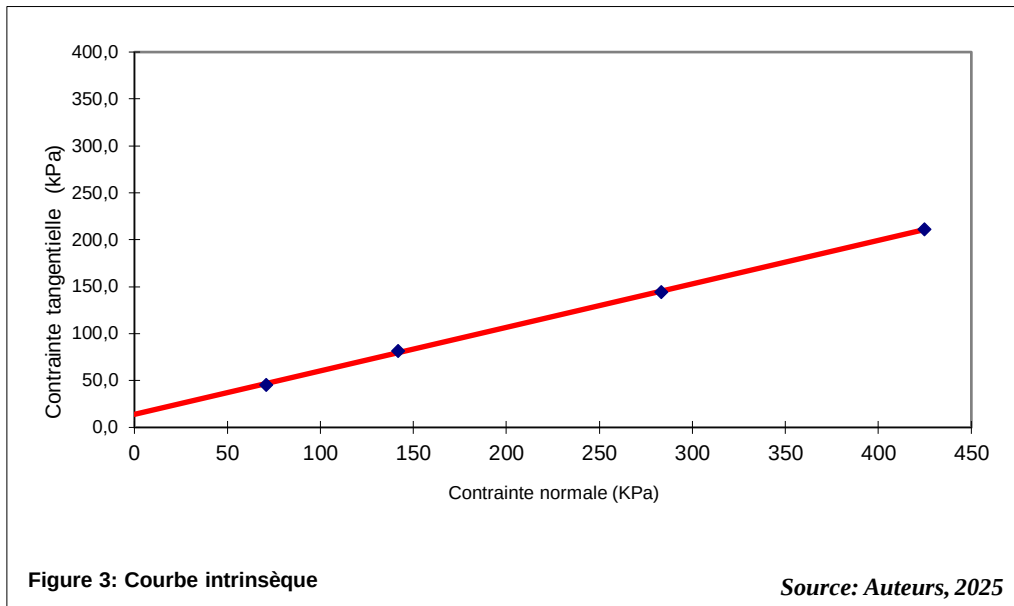
*C_c entre 0,16 et 0,22 : argiles plastiques à compressibilité moyenne à élevée

*GTR : Guide des Terrassements Routiers

(Source : Auteurs, 2025)

Les courbes de cisaillement direct sont présentées par les figures 2 et 3 :





Selon la *figure 2* : la tendance générale montre que la contrainte tangentielle maximale augmente avec la contrainte normale, ce qui est typique d'un matériau cohésif ou d'un sol résiduel latéritique.

La *figure 3* montre une relation linéaire entre la contrainte normale et la contrainte tangentielle maximale, en indiquant que le sol suit le critère de résistance au cisaillement de Mohr-Coulomb :

$$\tau = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

Les résultats œdométriques sont récapitulés dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Résultats des essais œdométriques :

Paramètres	Valeurs
Coefficient de consolidation : σ_v (m ² /s)	9,79E-07
Indice de vide e_o	0,78
Contrainte au repos σ'_{vo} (KPa)	80
Pression de préconsolidation σ'_p (KPa)	115
Indice de compression C_c	$0,16 \leq C_c \leq 0,22$
Indice de recompression C_s	2,72E-02

La figure 4 illustre la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte normale effective issue de l'essai œdométrique.

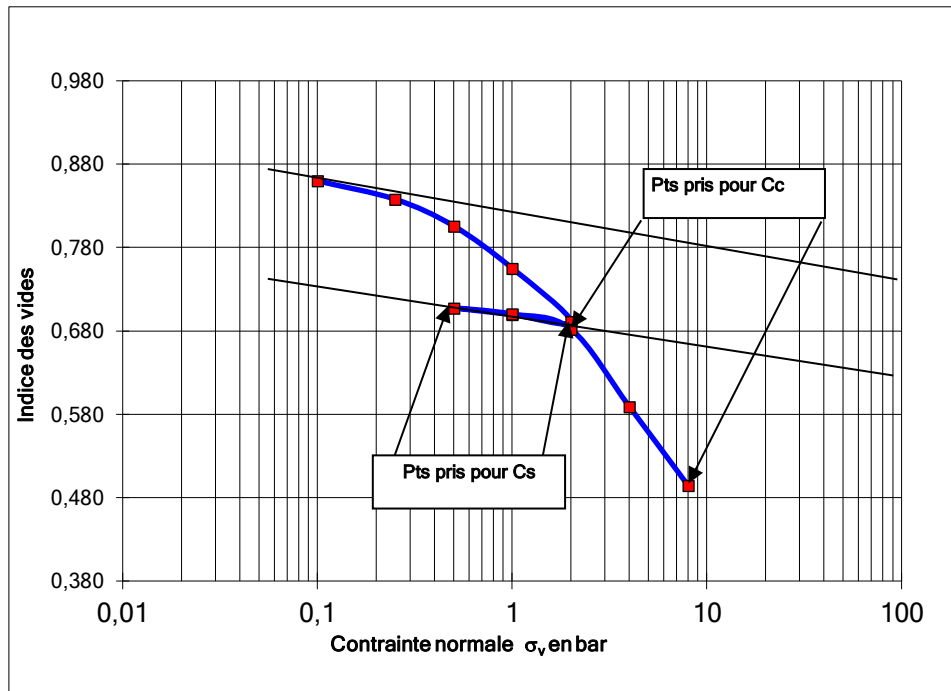


Figure 4 : Courbe œdométrique

(Source : Auteurs, 2025)

La diminution de e avec l'augmentation de σ'_v traduit le phénomène de consolidation du sol, avec une transition entre une phase de recompression et une phase de compression vierge. Les points indiqués ont été retenus pour la détermination des paramètres œdométriques.

Ce comportement est caractéristique d'un sol fin normalement à faiblement surconsolidé, sensible à l'augmentation des charges verticales.

4 Interprétation

4.1 Genèse des sols

Les résultats montrent que les sols étudiés sont des latérites peu plastiques, avec un indice de plasticité comprise entre $IP = 17$ à 19 , classées A_2 selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers). Leur compressibilité moyenne, avec la valeur de $C_c \approx 0,16-0,22$ indique une susceptibilité notable aux tassements et aux déformations sous charge.

La formation de ces horizons résulte d'une altération latéritique polyphasée :

- Hydrolyse et désagrégation de la roche mère ;
- Lixiviation des bases échangeables (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et de la silice ;
- Enrichissement résiduel en Fe et Al sous forme d'oxy-hydroxydes "(Ravokatra, 2017 ; Ramasiarinoro, 2008)."

Ces mécanismes, accentués par la dynamique hydrique et la topographie, expliquent la faible cohésion des sols contribuant à l'instabilité des versants.

À Antananarivo, la combinaison de ces propriétés avec les fortes pluies saisonnières entraîne une réduction de la résistance au cisaillement et favorise les glissements. Ces observations concordent avec celles de la littérature internationale (*Taylor & Francis, 2020*) sur les sols latéritiques en climat tropical.

Ces mécanismes sont typiques des sols des Hautes Terres malgaches, où la profondeur d'altération peut atteindre plusieurs mètres.

4.2 Résistance au cisaillement

Les essais de cisaillement direct montrent une résistance mobilisée caractérisée par :

$$C' \approx 11-16 \text{ kPa et } \phi' \approx 25-30^\circ.$$

Les essais de cisaillement direct mettent en évidence une résistance mobilisée caractérisée par une cohésion effective c' comprise entre 11 et 16 kPa, et un angle de frottement effectif ϕ' variant de 25° à 30° . Les courbes de cisaillement présentent un pic suivi d'une valeur résiduelle, signe d'un réarrangement des grains après quelques millimètres de déplacement. Ces caractéristiques indiquent une résistance essentiellement par frottement, en condition saturée la résistance baisse sensiblement, augmentant le risque de glissement des pentes lors de pluies intenses.

Ces valeurs restent cohérentes avec les latérites légèrement plastiques observées dans les environnements tropicaux humides.

4.3 Tassement et consolidation

La courbe œdométrique met en évidence une recompression suivie d'une compression primaire avec un indice C_c mesuré entre $\approx 0,16$ et $0,22$, dont une compressibilité moyenne.

$$S = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_o + \Delta\sigma}{\sigma_o}$$

Avec $e_0 = 0,78$ et $\sigma'_{vo} \approx 80$ kPa, une surcharge de 100 kPa sur 1 m d'horizon peut induire un tassement primaire d'environ 35–60 mm selon C_c retenu.

Le coefficient de consolidation $C_v \approx 9,8 \times 10^{-7}$ m²/s implique que l'essentiel du tassement primaire peut s'établir en quelques jours, dont $\approx 2,5$ jours pour $H = 1$ m drainé des deux faces, sous réserve de l'hypothèse de drainage.

4.4 Stabilité des pentes

En analyse de stabilité, le facteur de sécurité (FS) est classiquement défini comme le rapport entre la résistance au cisaillement disponible le long d'une surface potentielle de rupture et la contrainte de cisaillement mobilisée (Gidigas, 1976).

Il est défini par la relation :

$$FS = \frac{c' + (\sigma' \cdot \tan \phi')}{\tau_{mobilisée}}$$

Avec

- c' : cohésion effective,
- σ' : contrainte effective normale,
- ϕ' : angle de frottement effectif,
- τ mobilisée : contrainte de cisaillement mobilisée le long du plan de rupture.

L'analyse révèle que la stabilité des pentes est fortement influencée par la saturation des sols, la topographie, notamment une pente inférieure à 25–30° présentant un risque accru et la profondeur de la zone altérée. Les fortes pluies augmentent la pression interstitielle, réduisent la succion matricielle et diminuent ainsi la résistance au cisaillement, favorisant les glissements superficiels.

En termes de stabilité du tronçon étudié, l'analyse des paramètres de cisaillement indique que la résistance au cisaillement des sols est modérée :

$$c' = 11\text{--}16 \text{ kPa} ; \varphi' = 25\text{--}30^\circ.$$

En appliquant le critère de rupture de Mohr–Coulomb, la résistance mobilisable décroît rapidement lorsque la pression interstitielle augmente sous fortes pluies :

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

Les conditions de stabilité dépendent donc fortement des paramètres suivants :

- l'angle de pente, où les talus présentant un angle inférieur à 25–30° sont plus instables,
- la saturation en eau, où les pluies intenses réduisent rapidement l'angle de frottement φ' et la succion matricielle,
- la profondeur de la zone altérée, vue que les horizons de faible cohésion favorisent le glissement superficiel.

Ces résultats soulignent que la stabilité des sols latéritiques de la Haute Ville d'Antananarivo dépend d'une combinaison de paramètres géotechniques, des conditions hydriques et de facteurs anthropiques tels que les terrassements, le ruissellement et l'absence de drainage.

Ils mettent en évidence la nécessité d'une approche hydromécanique intégrée pour comprendre le déclenchement des glissements de terrain dans ce contexte tropical humide.

5 Discussion

Les études antérieures sur les risques de glissement de terrain dans la Haute Ville d'Antananarivo ont identifié comme principaux facteurs la pente, la lithologie, l'érosion des ruisseaux et l'anthropisation. La plupart des événements sont clairement déclenchés par des épisodes de fortes pluies (Rasolomanana, 2021).

Le Kenya et le Brésil constituent deux pays tropicaux aux mêmes conditions géologiques et climatiques à celles de Madagascar, avec des sols latéritiques, un climat humide, une topographie accidentée et une pression anthropique élevée.

Au Kenya dans la division de Tirap, l'étude en zones tropicales à relief marqué ont montré que les changements d'occupation du sol favorisent les glissements de terrain. Le phénomène de glissement de terrain lié avec la pente abrupte, déforestation et agriculture sur pentes accroissent la vulnérabilité (Kilimo, 2014). Ce phénomène est similaire à la situation observée à la Haute Ville d'Antananarivo, où la densité urbaine et les sols altérés aggravent le risque de mouvements de masse.

Les observations faites au Brésil sur les sols tropicaux très altérés « *latossols* » de couleur rouge à jaune, typique des régions humides tropicales sont également constatées à Madagascar sur les sols fortement altérés des hautes terres, notamment les sols latéritiques rouges d'Antananarivo et d'Analamanga.

Comme les *latossols* brésiliens, ces sols très altérés présentent une porosité élevée, une forte perméabilité verticale en état naturel et une sensibilité marquée à la déstructuration lorsque la couverture végétale disparaît ou que le profil est perturbé par les aménagements. Sous épisodes pluviométriques intenses, ils montrent une infiltration profonde suivie d'une réduction rapide de la résistance superficielle, ce qui favorise l'apparition de ravines, d'érosion en tunnels et parfois la réactivation de glissements superficiels sur les pentes urbaines (Marina, 2015).

Ce comportement, également observé dans les sols latéritiques des hautes terres malgaches, montre que les mécanismes se manifestent de façon comparable à Madagascar, où l'altération profonde et les interventions humaines aggravent la fragilité des pentes.

REFERENCES

- [1] *Association Française pour l'Étude du Sol (AFES) 1998. Répartition des sols dans le monde. In : Actes du 16ème Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier.*
- [2] *Assessing Landslide Hazard in the High City of Antananarivo, Madagascar 'UNESCO Tentative Site' publiée le 29 décembre 2023 menée par la 'University of Florence' et ses partenaires.*
- [3] *Evans, S. G., Guthrie, R. H., Roberts, N. J. & Bishop, N. F. 2007. The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines : a catastrophic landslide in tropical mountain terrain. Natural Hazards and Earth System Sciences, 7(1) : 89-101.*
- [4] *Gidigas, M. D. 1976. Laterite soil engineering : pedogenesis and engineering principles. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company.*
- [5] *Kilimo, J. K. 2014. Land cover changes and landslide occurrence : a case of Tirap division in Elgeyo Marakwet County, Kenya. Mémoire de Master, Université de Nairobi, Nairobi.*
- [6] *Lima, M. A. C. 2015. Propriétés physiques et hydriques d'un Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sous différents usages. Thèse de Doctorat, Université de Brasília, Brasília.*
- [7] *Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) 1988. Carte pédologique de Madagascar à 1:1 000 000. Paris : ORSTOM.*
- [8] *Raherimandimby, A. 2015. Propriétés géotechniques des sols latéritiques tropicaux à Madagascar. Mémoire de Master, Université d'Antananarivo, Antananarivo.*
- [9] *Ramasiarino, V. J. 2008. Études sur la rhéologie des latérites et la formation des lavaka, région d'Antananarivo. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Antananarivo.*
- [10] *Ravokatra, F. & Andrianaivo, L. 2017. Relation entre la teneur en oxyde de fer et les paramètres d'état dans les sols latéritiques nickélifères d'Ambatovy à Madagascar. Mada-Hary, 6 : 45-58.*
- [11] *Scholz, T., Dupont, M. & Ranaivo, F. 2019. Comportement mécanique des sols tropicaux saturés et incidences sur la stabilité des pentes. Antananarivo : Presses Universitaires de Madagascar.*
- [12] *Terzaghi, K. & Peck, R. B. 1967. Soil mechanics in engineering practice. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.*
- [13] *UNESCO & Université de Florence 2023. Assessing landslide hazard in the High City of Antananarivo, Madagascar – UNESCO Tentative Site. Rapport technique, UNESCO, Paris. Disponible sur : <https://whc.unesco.org/>*
- [14] *UNESCO & Université de Florence 2020. Projet Haute Ville d'Antananarivo : risques de glissements et interventions urbaines (Programme 2017-2020). Paris : UNESCO.*
- [15] *World Bank Group 2016. Profil de risque de catastrophe : Madagascar. Washington : World Bank. Disponible sur : <https://www.gfdr.org/>*
- [16] *World Bank Group 2022. Madagascar climatology. Climate Change Knowledge Portal. Disponible sur : <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/madagascar/climatology>*