

Importance De La Protection Des Bassins Versants Et De La Restauration Des Sols Dégradés : Cas Des Routes Nationales Rn1 Et Rn2 A Madagascar

[Importance Of Watershed Protection And Restoration Of Degraded Soils: The Case Of The Rn1 And Rn2 National Roads In Madagascar]

¹Andrianjahanahasiniony RAKOTOARISON, ²Jeannot RAJAONARIVELO, ³ANDRIANOMENTSOA Bezanahary H; ⁴Achille RAVONINJATOVO, ⁵Lala ANDRIANAIVO

¹ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : hasiniony3@hotmail.fr

² Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : rajaonarivelejeannot@gmail.com

³ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : dr.hanitrabez@gmail.com

⁴ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : achillegc@yahoo.fr

⁵ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : andrianaivo.andri@gmail.com

Auteur Correspondant : Rakotoarison Andrianjahanahasiniony. Email : hasiniony3@hotmail.fr



Résumé - Les routes nationales RN1 et RN2, essentielles à Madagascar, sont des axes vitaux pour le développement économique et social du pays. Cependant, elles subissent une dégradation accélérée principalement en raison de l'érosion hydrique et de la sensibilité des bassins versants qui les entourent. Afin de mieux saisir l'origine de cette vulnérabilité, des travaux de recherches ont été entreprises dans l'optique d'identifier et d'inventorier les principaux paramètres permettant de gérer cette situation. Des échantillons de sol collectés au niveau des points sensibles le long de ces deux axes routiers ont été analysés au laboratoire du Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) pour déterminer leur caractère physico-chimique respectif. Les informations indiquent une acidité marquée avec un pH allant de 4,5 à 5,3 ; un faible pouvoir d'échange cationique compris entre 2,6 et 6,5 meq/100g et une teneur négligeable en matière organique ne dépassant pas 1 %. Ces circonstances signalent une liaison négative avec la stabilité structurelle et la fertilité des sols, exacerbant les mécanismes d'érosion, de ravinement et de glissements.

La détérioration des sols et l'instabilité qui en découle mettent en péril non seulement la pérennité des infrastructures routières, mais également la sécurité des habitants et l'efficacité des transactions commerciales entre les zones de production et les centres urbains. Dans ce cadre, la sauvegarde et le rétablissement des bassins versants se présentent comme des mesures indispensables. Les résultats des essais d'expérimentation moyennant les sols dégradés des bassins versants issus de ces deux axes routiers sont probants et prouvant que l'utilisation de méthodes de génie végétal, comme la culture du vétiver et du bambou, combinée à l'enrichissement en amendements organiques, contribue non seulement à renforcer la stabilité des sols, à améliorer leur capacité de résilience contre l'érosion due au

ruissellement mais aussi à stimuler leur fertilité. L'adoption de ces méthodes intégrales constitue une démarche stratégique et immédiate pour stabiliser les sols et renforcer la pérennité des infrastructures routières.

Mots-clés : Bassins versants, dégradation des sols, vétiver, érosion, RN1, RN2, Madagascar

Abstract- Madagascar's RN1 and RN2 national roads are vital to the country's economic and social development. However, they are undergoing accelerated degradation, mainly due to water erosion and the sensitivity of the surrounding watersheds. In order to gain a better understanding of the causes of this vulnerability, research work has been undertaken to identify and inventory the main parameters for managing this situation. Soil samples collected at sensitive points along these two roads were analyzed at the laboratory of the Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT) to determine their respective physico-chemical character. The results indicate a marked acidity, with a pH ranging from 4.5 to 5.3; a low cation exchange capacity of between 2.6 and 6.5 meq/100g; and a negligible organic matter content of no more than 1%. These circumstances signal a negative link with soil structural stability and fertility, exacerbating the mechanisms of erosion, gully and landslides.

Soil deterioration and the resulting instability jeopardize not only the durability of road infrastructures, but also the safety of inhabitants and the efficiency of commercial transactions between production areas and urban centers. In this context, safeguarding and restoring watersheds are essential measures. The results of experimental trials on the degraded soils of the catchment areas of these two roads are conclusive, proving that the use of plant engineering methods, such as vetiver and bamboo cultivation, combined with the enrichment of organic soil improvers, not only helps to reinforce soil stability and improve its resilience against erosion due to runoff, but also boosts its fertility.

Adopting these integral methods is a strategic and immediate step towards stabilizing soils and enhancing the sustainability of road infrastructures.

Keywords: Watersheds, soil degradation, vetiver grass, erosion, RN1, RN2, Madagascar

1. INTRODUCTION

Avec près de 90 % de son réseau routier constitué de routes non goudronnées, Madagascar est confronté à une détérioration préoccupante de ses infrastructures de transport. D'après la Banque Mondiale (2022), près de 300 km de routes s'effacent chaque année à cause des conséquences cumulatives de l'érosion, du déficit d'entretien et de la fragilité inhérente des sols [1]. Les Routes Nationales RN1 et RN2, considérées comme des corridors économiques essentiels reliant la capitale Antananarivo aux ports majeurs du pays, sont parmi les axes les plus stratégiques [2]. Ces voies de communication sont cruciales pour l'approvisionnement des marchés, l'exportation des produits agricoles et miniers ainsi que pour le déplacement des populations. Cependant, elles traversent des bassins versants sévèrement dégradés, sous l'effet d'une pression grandissante due à la déforestation et aux incendies.

Les études de sol réalisées dans le contexte de cette recherche facilitent l'établissement d'un diagnostic précis des raisons de ce déclin :

- L'acidification des sols ($\text{pH} < 5,5$) diminue fortement la disponibilité des nutriments indispensables (Ca, Mg, K), mettant en péril la productivité biologique ainsi que la capacité des sols à accueillir une végétation dense.
- La diminution de la matière organique (teneurs inférieures à 1 %) cause une réduction de la cohésion et de la porosité du sol, ce qui compromet sa structure et le rend plus vulnérable au tassement et au ruissellement.
- L'érosion hydrique, intensifiée par des précipitations tropicales sévères excédant 2 000 mm/an, accélère le phénomène de lessivage, de ravinement et de glissements de terrain, entraînant des interruptions successives dans la circulation routière.

La combinaison de ces éléments crée une spirale destructrice : la vulnérabilité accrue des bassins versants intensifie la déstabilisation des infrastructures, qui à son tour, génère d'importantes dépenses socio-économiques liées à l'entretien, au désenclavement des régions rurales et à la sécurisation des échanges commerciaux.

Par conséquent, cette recherche motive la nécessité d'agir en mettant en œuvre des mesures de réhabilitation des sols et de

sauvegarde des bassins versants. L'utilisation de méthodes de génie végétal (comme le vétiver, le bambou et les plantes fixatrices d'azote), associée à l'apport d'amendements organiques et calcaires, semble être une démarche prioritaire pour :

- Renforcer la stabilité structurelle des sols.
- Minimiser l'effet du ruissellement,
- Rétablir la fertilité,
- Et prolonger la longévité des infrastructures routières.

Ainsi, la sauvegarde des routes RN1 et RN2 ne se résume pas seulement à une question d'ingénierie civile, mais implique aussi une perspective écosystémique et intégrée, cruciale pour la résilience des régions et la croissance durable de Madagascar.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Zone d'étude

Les zones d'études touchées par ce travail de recherche sont sur deux routes clés de Madagascar :

- La Route Nationale 1 (RN1) : elle assure la liaison entre Antananarivo, Tsiroanomandidy et Maintirano.
- La Route Nationale 2 (RN2) : elle assure la liaison entre Antananarivo et le port de Toamasina.

Ces deux axes représentent deux contextes géo-climatiques différents, qui sont tous deux fortement exposés à l'érosion hydrique et aux dégradations causées par l'homme, mettant ainsi en péril la pérennité des infrastructures routières [3].

2.1.1. Route Nationale 1 (RN1)

La Route Nationale 1 (RN1) constitue l'un des axes majeurs du réseau routier de Madagascar. S'étendant sur près de 150 km, elle connecte la capitale Antananarivo à la ville d'Analavory, se dirige ensuite vers Tsiroanomandidy et finit par rejoindre Maintirano sur la côte occidentale. Cette voie est un axe économique crucial, facilitant le transport des produits agricoles tels que le riz, le maïs, le manioc et les arachides, ainsi que des produits d'élevage comme les zébus et les produits laitiers, des Hautes Terres vers les régions côtières. De même, elle assure l'approvisionnement de la capitale en produits de pêche et autres marchandises provenant de la région du Melaky.

2.1.1.1. Caractéristiques physiques et climatiques

La RN1 traverse une zone des Hautes Terres centrales, marquée par un relief inégal mêlant collines, plateaux et vallées encaissées. L'altitude varie de 1 200 m à plus de 1 500 m, avec des pentes habituellement abruptes qui encouragent l'érosion et le ravinement. Le climat est de type tropical d'altitude, présentant les caractéristiques suivantes :

- La majeure partie des précipitations annuelles, entre 1 200 et 1 800 mm par an, se regroupe essentiellement de novembre à mars.
- Une série de saisons distinctes (humides et sèches),
- Et des températures modérées (15–25 °C).
- La conjonction de ces conditions climatiques et de la susceptibilité des sols accentue les risques d'instabilité des pentes le long de la route.

2.1.1.2. Pédologie

Le long de la RN1, on trouve principalement des ferralsols et acrisols, qui sont le résultat d'une forte altération géologique. Ils proposent :

- Un pH inférieur à 5,5 indique une acidité élevée.
- Un faible niveau de substances organiques (<1%),
- Et une capacité limitée à échanger des cations.

Ces attributs reflètent une diminution de la fertilité et une susceptibilité prononcée à l'érosion par l'eau. L'infrastructure routière est directement menacée par le ruissellement de surface, le ravinement et les glissements de terrain qui sont favorisés par la combinaison de fortes pentes, la déforestation et l'occurrence fréquente de feux de brousse.

2.1.1.3. Enjeux socio-économiques

La RN1 joue un rôle crucial dans le désenclavement des zones occidentales et le commerce à l'échelle nationale. Elle représente un axe important pour :

- L'exportation des produits de l'agriculture et de l'élevage vers la capitale,
- L'acheminement des matériaux de construction,
- Et le déplacement des populations rurales vers les marchés urbains.

Toute détérioration ou interruption de cette voie de communication a pour effet des répercussions économiques importantes, comme l'augmentation des frais de transport, la disparition de produits agricoles périssables et l'enclavement d'immenses régions rurales.

2.1.1.4. Pressions anthropiques

La région par laquelle passe la RN1 est soumise à de fortes pressions d'origine humaine, notamment :

- L'agriculture sur brûlis (tavy) entraîne la déforestation.
- L'élevage en pâturage intensif,
- Et l'extraction manuelle de matériaux de construction tels que les sables, graviers et latérites. Ces actions précipitent la détérioration des bassins versants et mettent en péril la pérennité des infrastructures routières.

2.1.2. Route Nationale 2 (RN2)

La RN2, ou Route Nationale 2, est la voie de circulation la plus cruciale à Madagascar. Cette route connecte Antananarivo à la cité portuaire de Toamasina sur la côte Est, qui est le principal point d'entrée et de sortie des produits du pays. S'étendant sur environ 370 km, cette route est au cœur de la majeure partie du transport terrestre des produits destinés à l'exportation (comme la vanille, le litchi, le café et le girofle) et à l'importation (tels que le riz, les biens manufacturés et les hydrocarbures). On considère donc la RN2 comme le corridor économique crucial de Madagascar.

2.1.2.1. Caractéristiques physiques et climatiques

La RN2 parcourt une région de passage entre les Hautes Terres centrales et la plaine côtière orientale, caractérisée par des paysages accidentés avec des vallées encaissées et des pentes vertigineuses. La région d'Antananarivo présente une altitude allant de 1 200 m jusqu'à atteindre le niveau de la mer à Toamasina.

On observe un climat de type tropical humide, qui se caractérise par :

- Un taux de précipitations très important (2 000 à 3 500 mm/an),
- Une humidité presque constante,
- Et des températures plutôt stables (20–30 °C).

En raison de ces conditions et du terrain irrégulier, cette région présente une grande vulnérabilité géotechnique, avec des possibilités régulières de glissements de terrain et de coulées de boue.

2.1.2.2. Pédologie

Le long de la RN2, les sols prédominants sont des ferralsols fortement altérés et lessivés, qui présentent :

- Un pH acide (4,5 à 5,3),
- Une faible capacité d'échange cationique (2,6-6,5 meq/100 g),
- Un contenu organique très faible (<1 %).

Ces propriétés rendent leur structure instable, leur résistance mécanique faible et leur sensibilité à l'érosion par l'eau très élevée. L'intensité des précipitations tropicales exacerbe le processus de lessivage, provoquant d'importantes pertes de sol et la détérioration des pentes routières.

2.1.2.3. Enjeux socio-économiques

La RN2 joue un rôle important dans l'économie du pays, puisqu'elle établit la connexion entre la capitale et le principal port maritime de Madagascar (Toamasina), qui gère presque 80 % des échanges commerciaux internationaux du pays. Il joue donc un rôle essentiel pour :

- Le transport des produits agricoles et miniers destinés à l'exportation,
- L'importation de produits de consommation et d'énergie,
- Et le service assuré pour les villes intermédiaires telles que Moramanga et Brickaville.

Tout dysfonctionnement de cet axe provoque des effets néfastes économiques et sociaux, comme la hausse excessive des coûts des produits de base, l'interruption de la fourniture de carburants et l'isolement des régions orientales.

2.1.2.4. Pressions anthropiques

La région que traverse la RN2 subit de fortes contraintes humaines, dont :

- L'abattage intensif pour le charbon de bois et l'agriculture vivrière,
- Les incendies de broussailles qui mettent en péril la couverture végétale,
- Et l'exploitation à petite échelle des ressources forestières et minérales.

Ces méthodes favorisent l'aggravation de l'érosion, augmentant la sensibilité des bassins versants et mettant en péril la solidité de la chaussée.

2.2. Échantillonnage

Dans le cadre de cette recherche, des échantillons de sol ont été collectés le long des Routes Nationales RN1 et RN2 à Madagascar, englobant quatre zones déterminantes signalées comme prioritaires [4], [5]. Les lieux choisis illustrent des traits pédologiques distinctifs qui sont représentatifs des défis auxquels la région est confrontée.

La méthodologie d'échantillonnage a été conçue afin d'obtenir une représentativité des différents contextes rencontrés le long des deux routes.

- Points d'échantillonnage :
 - Sur chaque axe (RN1 et RN2), des sites de prélèvement ont été identifiés en fonction de :

- La topographie (talus routiers, versants adjacents, zones planes),
- Le degré de dégradation visible (zones érodées, zones végétalisées, zones ravinées),
- Et la proximité avec les infrastructures routières.
- Au total, 4 échantillons par route ont été collectés, soit 8 échantillons de sols.
- Profondeur d'échantillonnage :
 - Les prélèvements ont été réalisés à une profondeur de 0–20 cm, correspondant à l'horizon de surface le plus exposé aux processus d'érosion et de lessivage.
- Méthodologie de collecte :
 - Les échantillons ont été conditionnés dans des sacs en plastique hermétiques et étiquetés
- Analyses prévues :
 - pH (acidité des sols),
 - Matière organique (%),
 - Capacité d'échange cationique (CEC, meq/100 g),
 - Texture (sables, limons, argiles),
 - Paramètres complémentaires : taux d'azote total, phosphore assimilable et stabilité structurale.



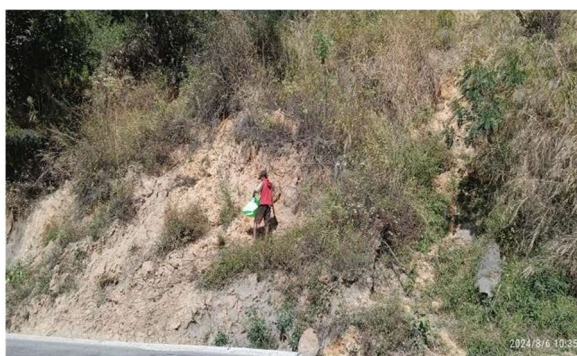
RN1 : 18.990 55° S , 46.949 55° E



RN1 : 18.949 21° S , 46.889 70° E



RN2 : 18.923 78° S , 47.931 50° E



RN2 : 18.924 54° S , 47.937 02° E

- Comparer la variabilité des propriétés physico-chimique

- Mettre en évidence le lien entre la dégradation des bassins versants et l'instabilité des sols,
- Fournir des données scientifiques solides permettant de recommander des mesures de restauration des sols (génie végétal, amendements organiques).

2.3. Analyses de laboratoire

Pour décrire les caractéristiques physico-chimiques des sols échantillonnés le long des routes RN1 et RN2, diverses évaluations en laboratoire ont été effectuées selon les procédures standardisées en pédologie. Ces études ont servi à déterminer les éléments qui rendent les sols vulnérables et à mesurer leur capacité de réhabilitation.

2.4. Préparations des échantillons

Les échantillons de sols collectés sur le terrain ont été :

- Verser et étaler le sol sur une feuille de papier portant la référence
- Glisser le sac d'origine sous l'échantillon afin de ne pas le séparer de ce dernier
- Ecraser les mottes de terre afin de favoriser le séchage
- Faire passer à travers un tamis de 2 mm d'ouverture
- 500g de chaque échantillon pour les analyses de routine
- Broyer 10g de chaque échantillon et faire passer à travers un tamis de 0,5 mm pour les analyses des carbones organiques, azote kjeldahl et fer extractable

Cette étape garantit la fiabilité et la comparabilité des résultats entre les différents sites.

2.4.1. Paramètres analysés

2.4.1.1. pH du sol

- Principe : la différence de potentiel créée entre une électrode de verre et une électrode de référence plongées dans une solution à analyser est une fonction linéaire du pH de celle-ci.
- Objectif : évaluer l'acidité des sols, facteur limitant de la disponibilité des nutriments et de l'activité biologique.

2.4.1.2. Carbone organique

- Principe : Oxydation humide selon Walkley & Black.
- Objectif : déterminer la teneur en carbone organique et estimer la stabilité structurale et la fertilité du sol.

2.4.1.3. Bases échangeables et capacité d'échange cationique

- Méthode : Extraction à l'acétate d'ammonium neutre (pH 7) suivie de titration.
- Objectif : mesurer la capacité du sol à retenir et échanger les nutriments essentiels (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}).

2.4.1.4. Granulométrie

- Méthode : Analyse par sédimentation bases sur la loi de Stokes
- Objectif : déterminer les proportions relatives de sables, limons et argiles, influençant l'infiltration, la rétention d'eau et la stabilité.

2.4.1.5. Nutriments majeurs (N, P, K)

• Méthodes :

- Azote total (Kjeldahl),
- Phosphore assimilable (méthode au bleu de molybdène),
- Potassium échangeable

• Objectif : évaluer la fertilité chimique du sol. Les analyses effectuées ont pour résultat de :

- Souligner les principales restrictions des sols analysés (acidité, teneur en matières organiques faibles, faible capacité d'échange cationique),
- Établir un lien entre ces paramètres et les phénomènes de ravinement, ruissellement et glissements de terrain.
- Suggérer des actions correctives telles que l'utilisation d'amendement organique, la chaulage et l'implantation d'espèces végétales hautement stabilisatrices (vétiver, bambou, légumineuses fixes d'azote).

3- RESULTATS : DIAGNOSTIC DE LA DEGRADATION DES SOLS

Les analyses en laboratoire réalisées sur les échantillons de sol collectés le long des routes RN1 et RN2 révèlent une notable détérioration de leurs caractéristiques chimiques et physiques. Ce phénomène est à l'origine de leur instabilité et de leur faible fertilité.

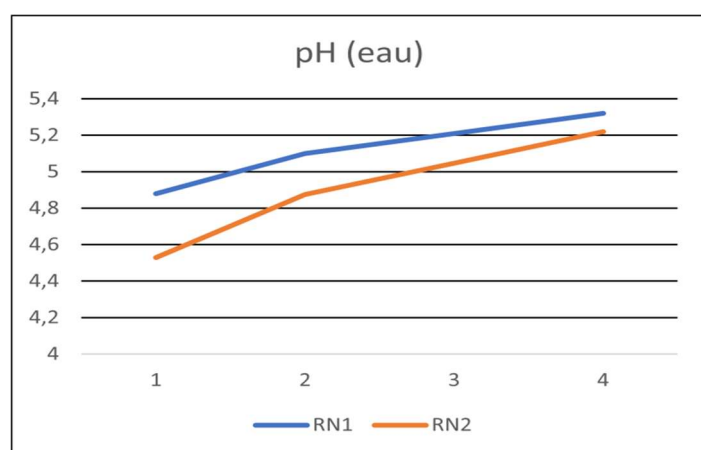
3.1. pH eau

Les valeurs observées : pH entre 4,53 et 5,32

pH (eau)		
	RN1	RN2
1	4.88	4.53
2	5.10	4.88
3	5.21	5.05
4	5.32	5.22

Les valeurs du pH sont très acides a fortement acide entrainant :

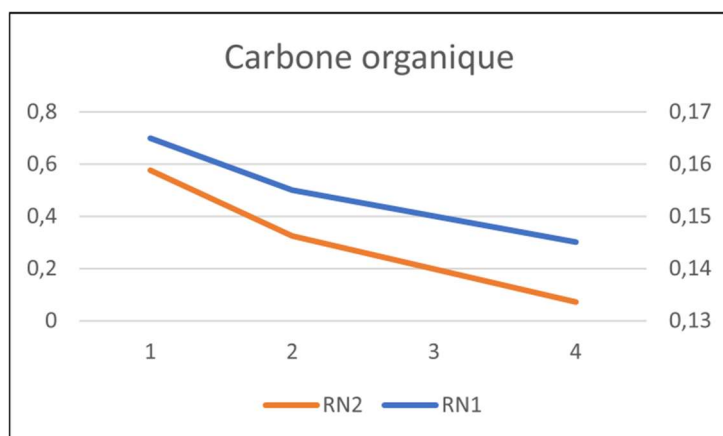
- Toxicité aluminique : la dissolution de l'aluminium devient préjudiciable à la racine, ce qui entrave la croissance des plantes
- Dégradation de la structure : l'acidité fragilise les agrégats du sol, augmentant l'érosion



3.2. Carbone organique

Les valeurs observées sont inférieures à 1%.

Carbone organique		
	RN1	RN2
1	0.165	0.5769
2	0.16	0.324
3	0.15	0.198
4	0.1451	0.0718



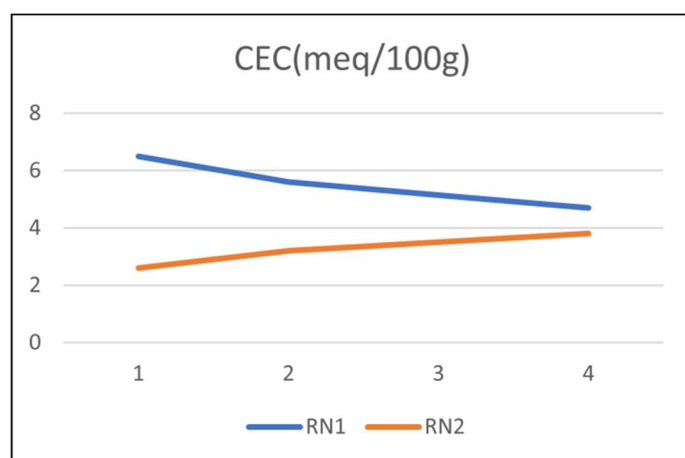
La teneur très faible en matière organique entraîne :

- Destruction du sol : pas de formation d'agrégats
- Faible activité microbienne : absence de recyclage des nutriments

3.3. Capacité d'échange cationique

Les valeurs observées sont comprises entre 2,6 à 6,5 meq/100g

CEC (meq/100g)		
	RN1	RN2
1	6.5	2.6
2	5.60	3.20
3	5.15	3.50
4	4.7	3.8



Les valeurs observées correspondent à une valeur de CEC très faible à faible ayant pour conséquence :

- Faible rétention des nutriments : les cations sont lessivés et appauvrissent le sol
- Sensibilité à la pollution : le sol ne peut pas filtrer les contaminants comme les métaux lourds

3.4. Granulométrie

	GRANULOMETRIE (%) RN1			GRANULOMETRIE (%) RN2		
	ARGILE	LIMON	SABLE	ARGILE	LIMON	SABLE
1	50	28	22	48	18	34
2	33.00	25.00	42.00	40.00	22.00	38.00
3	24.50	23.50	52.00	36.00	24.00	40.00
4	16	22	62	32	26	42

On observe :

- Une transition de sol argileux vers un sol sableux
- Les sols argileux posent des problèmes de ruissellement et de faible filtration
- Les sols sableux posent des problèmes d'érosion diffuse et de colmatage Ainsi les risques seront donc :
- Ravinement profond
- Envasement des ouvrages hydrauliques

3.5. Nutriments majeurs (N, P, K)

	NUTRIMENTS RN1			NUTRIMENTS RN2		
	N	P	K	N	P	K
1	0.021	4.8	0.48	0.021	3.1	0.039
2	0.02	28.65	0.33	0.028	3.30	0.24
3	0.026	40.58	0.26	0.032	3.40	0.35
4	0.028	52.5	0.185	0.035	3.5	0.45

- **Azote N :** Tous les échantillons montrent une carence sévère en azote ayant pour conséquence :
 - La limitation de la croissance végétale
 - Réduction de la biomasse racinaire
 - Faible activité microbiologique
- **Phosphore :** la majorité des échantillons présente une carence en phosphore outre les 3 échantillons de la RN 1 qui est due :
 - Aluminium en sol acide
 - Lessivage en sol sableux
- **Potassium :** les échantillons ont des teneurs acceptables en potassium outre les échantillons 4 de la RN1 et 1 de la RN2 qui ont une carence modérée.

Ces résultats montrent que les sols traversés par les RN1 et RN2 montrent une vulnérabilité extrême. L'explication pour l'acidité prononcée, la faible Capacité d'Échange Cationique (CEC) et la carence en matière organique est la suivante :

- Leur fertilité limitée (inaptitude à maintenir une végétation pérenne sans fertilisation),
- Leur sensibilité à l'érosion par l'eau (disparition de particules fines et de nutriments),
- Et le risque direct pour la pérennité des infrastructures routières, confrontées aux coulées de terrain et à l'érosion des

pentés.

Ces observations soulignent la nécessité impérieuse de mettre en place des actions de réhabilitation des sols et de sauvegarde des bassins versants, en utilisant notamment des méthodes de génie végétal (vétiver, bambou) associées à des contributions organiques.

4- DISCUSSIONS

Les examens physico-chimiques effectués sur les sols des lieux d'étude révèlent une détérioration prononcée des caractéristiques des bassins versants que traversent les RN1 et RN2.

- Acidité élevée et fertilité chimique réduite.
 - Le pH des sols est acide (4,5–5,3), ce qui est inférieur au seuil critique (5,5). Cela indique une toxicité due à l'aluminium et une obstruction du phosphore, deux facteurs cruciaux pour le développement des plantes.
 - Le potentiel d'échange cationique (CEC : 2,6–6,5 meq/100g) est très bas, indiquant une évacuation de nutriments par lessivage et une fertilité restreinte.
 - Le contenu organique (0,57-1,2%) est faible, ce qui diminue l'activité biologique et augmente la susceptibilité des sols à l'érosion.

Ces indicateurs chimiques indiquent que sans intervention et conservation, les bassins versants perdent leur productivité et ne peuvent plus soutenir de manière durable l'agriculture locale.

- Texture et érodibilité des sols
 - Les résultats de la granulométrie révèlent que les sols varient entre sablo-limoneux et sablo-argileux.
 - Les sols ayant une forte teneur en sable (>40 %) présentent une faible cohésion, ce qui favorise le ruissellement et l'érosion des sédiments
 - Dans les régions où l'argile prédomine (>40 %), le caractère acide associé à une structure dense entrave l'infiltration, ce qui entraîne la formation de ravines profondes (>3 m).

Ces sols participent à l'accélération de la détérioration des pentes : soit par le biais du ravinement sur les sols argileux, soit grâce à l'érosion diffuse sur les sols sableux.

- Impacts hydrologiques et environnementaux
 - L'augmentation du ruissellement intensifie les inondations et la variabilité hydrologique, diminuant la disponibilité en eau durant la saison sèche.
 - L'accumulation de sédiments dans les drains, rivières et retenues réduit leur volume de stockage et entraîne un colmatage accéléré des installations hydrauliques.
 - L'érosion des sols fertiles rend l'agriculture locale vulnérable et renforce la dépendance économique des habitants.

En l'absence de mesures correctives, les bassins versants ne sont plus en mesure d'assurer leur fonction de régulation hydrologique, de protection contre l'érosion et de source de production agricole.

Pour résumer, la protection des bassins versants est essentiel :

- Elle contribue à la préservation des sols et des nutriments.
- Elle diminue les pertes d'eau et de sédiments.
- Elle préserve la productivité dans le secteur agricole,

- Elle assure la pérennité des infrastructures routières et hydrauliques,
- Elle sert de garantie écologique face aux fluctuations climatiques et à la variabilité des précipitations.

CONCLUSION

L'étude menée sur les terrains des bassins versants le long des RN1 et RN2 met clairement en évidence une dégradation marquée de leurs propriétés physico-chimiques et hydrologiques. Les informations révèlent l'existence de terrains acides, pauvres en matière organique et en nutriments, qui sont liés à des textures favorisant soit le ruissellement superficiel, soit l'érosion par le ruisseau. Ces conditions entraînent une détérioration rapide, une baisse de la fertilité des sols agricoles, un ensablement des infrastructures hydrauliques et une escalade de l'instabilité des pentes routières.

La discussion a montré que la protection des bassins versants n'est pas seulement une nécessité environnementale, mais également une condition de durabilité socio-économique. En effet, les bassins versants jouent un rôle important dans la sécurité hydrique, la stabilité écologique et la production agricole. Leur dégradation compromet non seulement les écosystèmes, mais aussi la vie des populations locales qui dépendent directement de leurs services.

Il est donc essentiel de mettre en œuvre des approches de restauration et de gestion durable, telles que le reboisement sélectif, l'utilisation de végétaux stabilisateurs comme le vétiver et le bambou, l'assistance à la régénération naturelle, ainsi que la gestion conjointe de l'eau et des sols.

En définitive, la sauvegarde des bassins versants correspond à la conservation de la biodiversité, des ressources hydriques, des sols, des infrastructures et du développement socio-économique. Cette approche intégrale de conservation et de valorisation des bassins versants est directement associée à la pérennité des routes nationales étudiées, ainsi qu'à celle du territoire qu'elles connectent dans son ensemble.

REFERENCES

- [1] Banque Mondiale (2002). Madagascar diagnostic et stratégies pour le développement des infrastructures routières. Rapport interne. (Source pour les données sur l'état des routes nationales et les difficultés rencontrées).
- [2] JICA (Agence Japonaise de Coopération Internationale). (2023). Projet pour le développement et l'aménagement de l'axe économique Antananarivo-Toamasina (TaToM). Rapport final.
- [3] UNFCCC. (2020). Communication nationale initiale de Madagascar.
- [4] Madagascar tribune, rapport conseil des ministres 2023 sur la RN2 et autres routes nationales
- [5] Rapport SRAT Analamanga 2023-2043 financé par la Banque Mondiale (planification des infrastructures routières)