

Variabilité Géotechnique Et Implications Pour Le Dimensionnement Routier : Cas De La Rn12a A Madagascar

RAKOTONDRAINIBE Herilanjia Andriamihamina.^{1,1}, RAVELOALISON Haja Nirina.^{1,2},
RAHARINIERANA Hantaniaina^{1,3}, RAKOTO David Rambintntsoa.^{1,4}

^{1,1} rakotondrainibeh@gmail.com ^{1,2} univ.espa.igat@gmail.com ^{1,3} raharinieranahanta@gmail.com ^{1,4}
rakotodav@yahoo.fr

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences^{1,1 1,2 1,4},
Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation^{1,3},
Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo
Auteur correspondant : RAKOTONDRAINIBE Herilanjia Andriamihamina



Resume : La plaine d'Antananarivo est régulièrement affectée par des inondations fluviales, dont Cette étude présente une analyse de la variabilité géotechnique des sols de la Route Nationale 12A (RN12A) à Madagascar et ses implications pour le dimensionnement des chaussées. Les investigations réalisées le long du tracé ont porté sur la caractérisation de la portance (CBR à 95 % OPM), des paramètres de plasticité (WL, IP), de la teneur en fines et du potentiel de gonflement. Les valeurs de CBR varient globalement entre 4 % et 37 %, correspondant à des modules équivalents compris entre 20 MPa et 185 MPa, traduisant une hétérogénéité marquée du sol support. Les limites de liquidité s'échelonnent approximativement entre 30 % et 60 %, avec des indices de plasticité majoritairement compris entre 8 % et 22 %. L'analyse statistique met en évidence une corrélation négative entre la plasticité et la portance, ainsi qu'une influence significative de la teneur en fines sur les performances mécaniques. La classification selon le GTR confirme la prédominance de sols fins à portance moyenne. Ces résultats soulignent la nécessité d'un dimensionnement différencié et de mesures d'amélioration ciblées dans les zones à faible capacité portante.

Mots-clés : variabilité géotechnique ; CBR ; plasticité ; dimensionnement routier ; RN12A Madagascar

Abstract: This study presents an analysis of the geotechnical variability of soils along Route Nationale 12A (RN12A) in Madagascar and its implications for pavement design. Investigations conducted along the alignment focused on characterizing bearing capacity (CBR at 95% OMC), plasticity parameters (LL, PI), fines content, and swelling potential. CBR values generally range from 4% to 37%, corresponding to equivalent moduli between 20 MPa and 185 MPa, indicating marked heterogeneity of the subgrade soil. Liquid limits range approximately from 30% to 60%, with plasticity indices mostly between 8% and 22%. Statistical analysis highlights a negative correlation between plasticity and bearing capacity, as well as a significant influence of fines content on mechanical performance. Classification according to the GTR system confirms the predominance of fine soils with medium bearing capacity. These findings underscore the need for differentiated pavement design and targeted ground improvement measures in areas with low load-bearing capacity.

Keywords: geotechnical variability; CBR; plasticity; pavement design; RN12A Madagascar.

INTRODUCTION

La performance et la durabilité des infrastructures routières en contexte tropical humide dépendent fortement des caractéristiques géotechniques des sols supports. La variabilité naturelle des formations superficielles, notamment dans les régions côtières et alluvionnaires, influence directement la portance, la déformabilité et la sensibilité hydrique des plateformes routières [1]. Dans les pays tropicaux, les sols latéritiques et alluvionnaires présentent souvent des comportements mécaniques contrastés, marqués par une forte dépendance à la teneur en fines et aux paramètres de plasticité [2]. L'indice CBR (California Bearing Ratio) demeure un paramètre fondamental pour l'évaluation de la capacité portante des sols de fondation et le dimensionnement des chaussées souples [3]. De nombreuses études ont montré l'existence de corrélations significatives entre le CBR, les limites d'Atterberg et la granulométrie, permettant d'anticiper les performances mécaniques à partir des paramètres d'identification [4]. Par ailleurs, l'utilisation de relations empiriques reliant le module élastique équivalent au CBR constitue une pratique courante en ingénierie routière pour simplifier l'analyse structurelle des chaussées [5]. Dans le contexte malgache, et plus particulièrement le long de la côte Est, les formations sableuses littorales et les latérites argileuses présentent une hétérogénéité spatiale importante susceptible d'affecter la conception des infrastructures routières [6]. La Route Nationale 12A (RN12A), reliant plusieurs zones stratégiques du sud-est de Madagascar, traverse ainsi des environnements géologiques variés caractérisés par des sols fins à plasticité modérée et des dépôts alluvionnaires récents.

Face à ces enjeux, l'analyse intégrée de la variabilité géotechnique, combinant paramètres de plasticité, portance, teneur en fines et classification GTR, apparaît indispensable pour adapter le dimensionnement routier aux conditions locales [7]. La présente étude vise ainsi à évaluer la variabilité des propriétés mécaniques des sols le long de la RN12A et à en dégager les implications pratiques pour la conception et la durabilité des chaussées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les données exploitées dans cette étude proviennent des investigations géotechniques réalisées le long de la RN12A, incluant les essais d'identification (limites d'Atterberg, teneur en fines, masse volumique sèche maximale et teneur en eau optimale issues des essais Proctor) ainsi que les essais mécaniques de portance CBR à 95 % de l'OPM. Les essais de limites de liquidité et de plasticité ont été conduits conformément aux procédures normalisées en vigueur, tandis que les essais CBR ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons compactés, selon les recommandations techniques internationales [8][9]. Les classes de sols ont été établies en référence au Guide des Terrassements Routiers (GTR) et aux principes de classification basés sur les paramètres d'identification [10]. Le traitement et l'analyse des données ont été réalisés à l'aide du langage Python, choisi pour sa robustesse et sa reproductibilité scientifique dans l'analyse de données géotechniques. Les bibliothèques NumPy et pandas ont été utilisées pour la structuration, le nettoyage et le traitement numérique des jeux de données, notamment pour le calcul des statistiques descriptives, des corrélations linéaires de Pearson et des transformations nécessaires à l'estimation du module équivalent à partir de la relation empirique $E = 5 \times \text{CBR}$ [11]. La visualisation graphique a été effectuée avec Matplotlib, permettant la production des profils longitudinaux, des diagrammes de Casagrande incluant la A-ligne, des boîtes à moustaches pour l'analyse de variabilité et des cartes d'isovaleurs par interpolation [12].

L'interpolation bidimensionnelle du CBR dans l'espace WL-IP a été réalisée à l'aide des outils scientifiques de SciPy, en appliquant des méthodes d'interpolation spatiale adaptées aux nuages de points irrégulièrement distribués, afin d'obtenir une surface continue et des isovaleurs représentatives des tendances globales [13]. L'ensemble du processus a été conduit dans un environnement reproductible, garantissant la traçabilité des calculs et la cohérence des représentations graphiques utilisées pour l'interprétation géotechnique et les recommandations de dimensionnement routier.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1-Analyse longitudinale de la portance, du module équivalent, de la teneur en fines et du potentiel de gonflement le long de la RN12A

La figure suivante présentée met en évidence l'évolution longitudinale des principaux paramètres géotechniques caractérisant le sol support de la chaussée le long du tracé étudié, à savoir l'indice CBR à 95 % OPM, le module équivalent E estimé par la relation $E = 5 \times \text{CBR}$, le pourcentage de fines (%F) et le potentiel de gonflement (G%). L'objectif de cette représentation est d'apprécier la variabilité spatiale des performances mécaniques et du comportement hydromécanique des matériaux rencontrés, en vue d'orienter les choix de dimensionnement et les éventuelles mesures d'amélioration du sol.

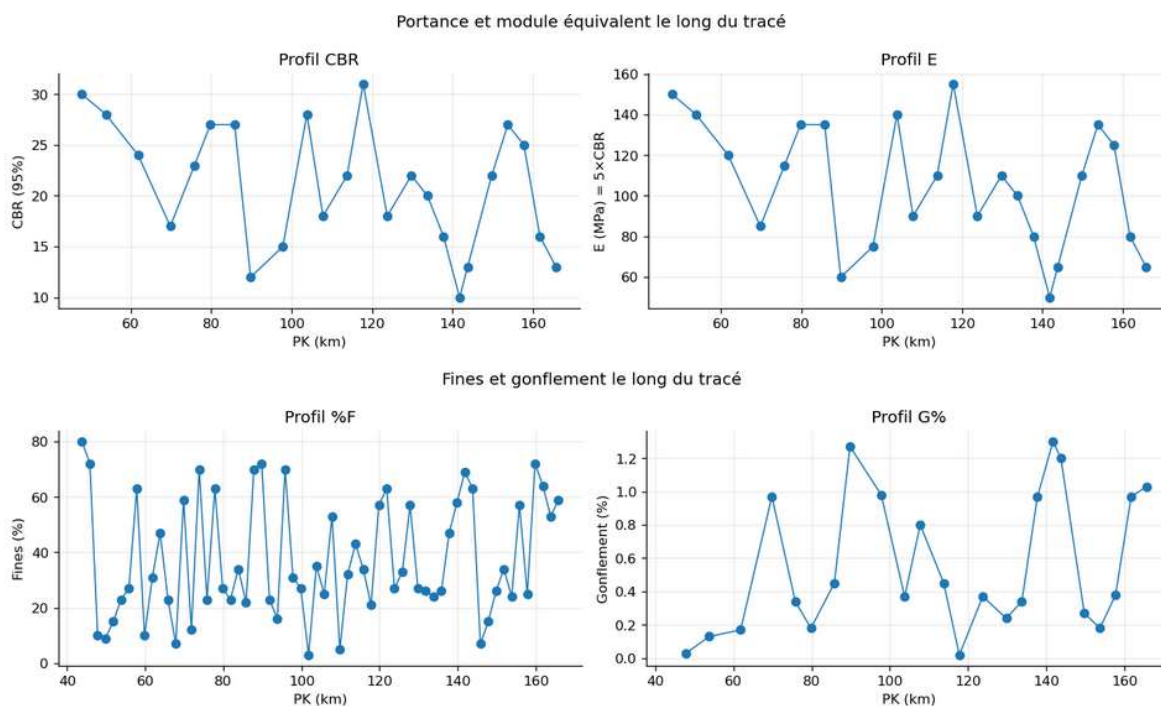


Figure 1: Analyse longitudinale de la portance, du module équivalent, de la teneur en fines et du potentiel de gonflement le long de la RN12A, Source : Auteur

Interprétation

Le profil de portance indique des valeurs de CBR comprises globalement entre 10 % et 31 %. En début de tronçon, aux environs des PK 50 à 55, le CBR varie entre 28 % et 30 %, traduisant une bonne capacité portante correspondant à des modules équivalents de l'ordre de 140 à 150 MPa. Une diminution est observée vers le PK 65, où le CBR atteint environ 17 %, soit un module voisin de 85 MPa. Par la suite, les valeurs oscillent de manière irrégulière entre 12 % et 28 % sur la section centrale du tracé, avec un minimum notable proche de 10 % aux alentours du PK 140, correspondant à un module équivalent d'environ 50 MPa. Un maximum est observé vers le PK 120 avec un CBR avoisinant 31 %, soit un module proche de 155 MPa, indiquant localement la présence de matériaux plus compétents, vraisemblablement latéritiques graveleux. Le profil du module équivalent E reproduit logiquement la même dynamique, avec des valeurs comprises approximativement entre 50 MPa et 155 MPa. Les zones où le module descend en dessous de 60 MPa correspondent aux secteurs où le CBR est inférieur ou égal à 12 %, traduisant des sols

à portance faible à moyenne, potentiellement sensibles à la déformation sous trafic et nécessitant une attention particulière au stade du dimensionnement.

L'analyse du pourcentage de fines révèle une variabilité très marquée le long du tracé, avec des valeurs comprises entre moins de 10 % et plus de 75 %. Les teneurs les plus élevées, supérieures à 70 %, sont observées notamment vers les PK 50, 90 et 155–160, traduisant la présence de sols fins à dominante limono-argileuse. À l'inverse, certaines sections présentent des teneurs en fines inférieures à 15 %, indiquant des matériaux plus sableux ou graveleux. De manière générale, les zones à forte teneur en fines coïncident souvent avec des diminutions de CBR, ce qui confirme l'influence défavorable des fractions fines sur la portance, particulièrement en présence d'humidité. Le profil de gonflement met en évidence des valeurs globalement modérées, comprises entre 0 % et environ 1,3 %. Les pics les plus significatifs, atteignant environ 1,2 % à 1,3 %, sont observés aux environs des PK 95 et 140–145. Ces valeurs, bien que restant dans une plage modérée, traduisent la présence locale de sols à potentiel expansif non négligeable, probablement liés à des fractions argileuses actives. Les zones où le gonflement est inférieur à 0,3 % correspondent généralement à des matériaux plus granulaires ou faiblement plastiques. La confrontation des quatre profils met en évidence une corrélation qualitative entre la teneur en fines, le potentiel de gonflement et la portance. Les secteurs caractérisés par des pourcentages élevés de fines et des gonflements supérieurs à 1 % tendent à présenter des CBR plus faibles, confirmant la sensibilité mécanique des sols argileux à l'eau et aux variations volumétriques. À l'inverse, les zones où le CBR dépasse 25 % et où le module équivalent excède 125 MPa correspondent à des matériaux plus grossiers, à faible potentiel de gonflement.

2- Evolution longitudinale de la portance (CBR) et du module équivalent le long de la RN12A

La figure ci-après illustre la variation longitudinale de la portance des sols de plateforme, exprimée par l'indice CBR à 95 % OPM, ainsi que du module équivalent E estimé selon la relation empirique $E = 5 \times \text{CBR}$, sur le tronçon de la RN12A compris entre les PK 44+850 et PK 203+800. Cette représentation graphique permet d'apprécier la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques du sol support et d'identifier les zones potentiellement favorables ou défavorables au dimensionnement de la structure de chaussée, notamment au droit des ouvrages d'art situés entre les PK 56 et PK 175.

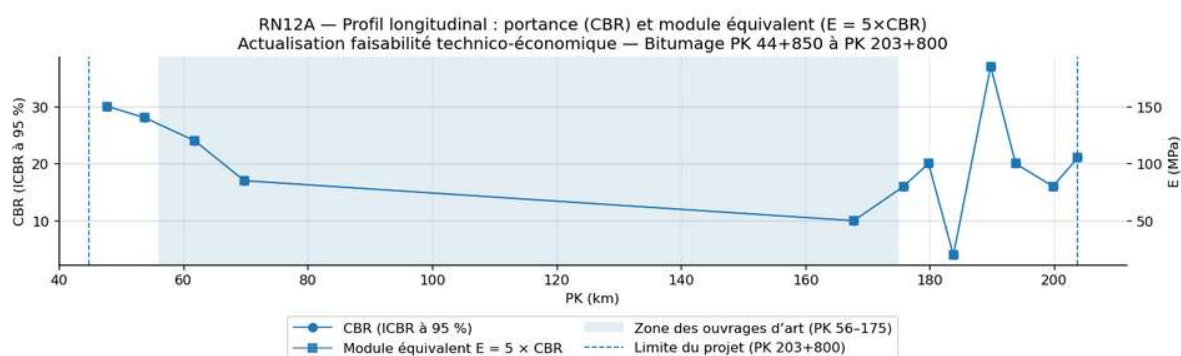


Figure 2: Evolution longitudinale de la portance (CBR) et du module équivalent le long de la RN12A, Source : Auteur

Interprétation

L'analyse du profil met en évidence une portance relativement élevée dans la partie initiale du tronçon. Au voisinage du PK 50, le CBR atteint environ 30 %, correspondant à un module équivalent proche de 150 MPa. Cette valeur demeure élevée au PK 55 avec un CBR d'environ 28 % ($E \approx 140$ MPa), puis décroît progressivement vers 24 % au PK 60 ($E \approx 120$ MPa). À partir du PK 65, la portance diminue plus nettement pour atteindre environ 17 % ($E \approx 85$ MPa), traduisant une transition vers des sols moins compétents. Entre les PK 70 et PK 170, on observe une tendance générale à la diminution progressive du CBR, qui atteint environ

10 % aux environs du PK 165–170, soit un module équivalent voisin de 50 MPa. Cette zone correspond à la traversée du secteur comprenant plusieurs ouvrages d'art, ce qui suggère la présence de formations alluvionnaires plus fines ou localement plus humides, susceptibles d'engendrer une capacité portante réduite et une sensibilité accrue aux variations hydriques. Au-delà du PK 175, la portance présente une variabilité plus marquée. Le CBR remonte à environ 16 % au PK 178 ($E \approx 80$ MPa), puis à près de 20 % au PK 182 ($E \approx 100$ MPa), avant de chuter brutalement aux alentours du PK 185 où il atteint une valeur minimale d'environ 4 %, correspondant à un module équivalent de l'ordre de 20 MPa. Cette valeur particulièrement faible traduit la présence probable de sols très compressibles ou fortement saturés, constituant un point singulier nécessitant des mesures de renforcement ou de substitution. En revanche, une amélioration significative est observée vers le PK 190, où le CBR atteint approximativement 37 %, soit un module équivalent proche de 185 MPa, indiquant la présence d'un horizon latéritique graveleux ou d'un matériau naturellement bien compacté. Cette amélioration demeure toutefois hétérogène, puisque les valeurs redescendent à environ 20 % au PK 195 ($E \approx 100$ MPa) et 16 % au PK 200 ($E \approx 80$ MPa), avant de se stabiliser autour de 21 % à la limite du projet au PK 203+800, correspondant à un module d'environ 105 MPa.

Dans l'ensemble, le profil met en évidence une forte variabilité longitudinale des caractéristiques mécaniques du sol support, avec des CBR variant approximativement de 4 % à 37 %, soit des modules équivalents compris entre 20 MPa et 185 MPa. Cette hétérogénéité confirme la nécessité d'un dimensionnement différencié de la structure de chaussée et d'une attention particulière aux zones à faible portance, en particulier dans les secteurs alluvionnaires et au droit de certains ouvrages d'art, afin d'assurer la durabilité et la stabilité de l'infrastructure projetée.

3- Synthèse géotechnique et classification des sols de la RN12A : plasticité, portance et corrélations mécaniques (PF1 à PF62)

La figure ci-dessous présentée constitue une synthèse des principaux résultats géotechniques obtenus sur les plateformes PF1 à PF62 le long de la RN12A. Elle regroupe le diagramme de plasticité de Casagrande (WL–IP), la classification des plateformes selon les classes PF déduites du module équivalent $E = 5 \times \text{CBR}$, la matrice de corrélation linéaire entre paramètres physiques et mécaniques, ainsi que la variabilité du CBR en fonction des classes GTR. Cette approche intégrée permet d'apprécier simultanément la nature des sols, leur comportement mécanique et les relations statistiques entre les différents paramètres mesurés.

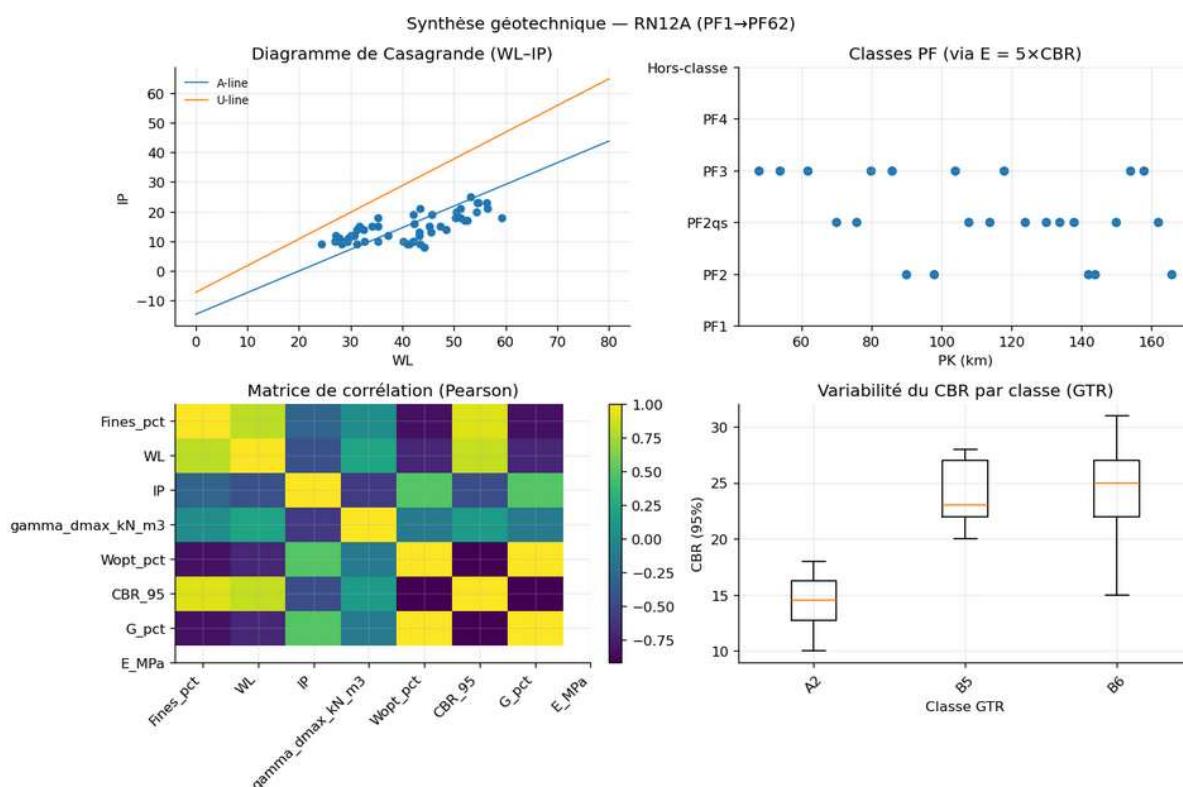


Figure 3: Synthèse géotechnique et classification des sols de la RN12A : plasticité, portance et corrélations mécaniques (PF1 à PF62) , Source : Auteur

Interprétation

Le diagramme de Casagrande montre que l'ensemble des points expérimentaux se situe au-dessus de la A-line et en dessous de la U-line, indiquant majoritairement des sols fins à dominante argileuse de plasticité faible à moyenne. Les limites de liquidité (WL) varient approximativement entre 30 % et 60 %, tandis que les indices de plasticité (IP) s'échelonnent globalement entre 8 % et 22 %. La majorité des échantillons se concentre dans l'intervalle $WL = 35\text{--}50\%$ et $IP = 10\text{--}18\%$, traduisant des sols argileux à plasticité modérée. Cette distribution confirme la présence significative de formations latéritiques argileuses altérées, cohérentes avec le contexte géologique régional de la côte Est malgache.

La classification des plateformes en classes PF, établie à partir du module équivalent dérivé du CBR, met en évidence une prédominance des classes intermédiaires. Les plateformes se répartissent principalement entre les classes PF2qs et PF3, correspondant à des modules équivalents généralement compris entre environ 80 MPa et 130 MPa. Quelques points relèvent de la classe PF2, associés à des modules plus faibles, de l'ordre de 60 à 90 MPa, traduisant des portances moyennes à localement insuffisantes. Les classes supérieures (PF4) apparaissent peu représentées, ce qui confirme l'absence généralisée de sols très performants sur l'ensemble du linéaire étudié. La matrice de corrélation de Pearson met en évidence des relations statistiques cohérentes avec le comportement mécanique attendu des sols fins. Une forte corrélation positive est observée entre le CBR et le module équivalent E, ce qui est conforme à la relation empirique adoptée. Le CBR présente également une corrélation négative marquée avec la teneur en fines et la teneur en eau optimale (Wopt), traduisant l'influence défavorable des fractions fines et de l'humidité sur la portance. Par ailleurs, l'indice de plasticité (IP) est positivement corrélé au pourcentage de fines et au potentiel de gonflement, ce qui confirme que l'augmentation de la fraction argileuse entraîne simultanément une hausse de la plasticité et du

risque de variations volumétriques. La masse volumique sèche maximale (γ_{dmax}) montre quant à elle une corrélation positive modérée avec le CBR, soulignant l'effet bénéfique d'une meilleure compacité sur la résistance mécanique. L'analyse de la variabilité du CBR par classe GTR révèle des différences significatives entre les familles de sols. Les sols de classe A2 présentent des valeurs de CBR comprises approximativement entre 10 % et 18 %, avec une médiane proche de 14–15 %, traduisant une portance faible à moyenne. Les sols de classe B5 affichent des CBR généralement compris entre 20 % et 28 %, avec une médiane autour de 23–24 %, indiquant une amélioration sensible des performances mécaniques. Les sols de classe B6 présentent les valeurs les plus élevées, pouvant atteindre environ 31 %, avec une médiane voisine de 25 %, bien que la dispersion y soit plus marquée. Cette hiérarchisation confirme la cohérence entre la classification GTR et le comportement porteur mesuré.

4- Cartographie interpolée du CBR (95 %) dans l'espace de plasticité WL–IP et analyse des isovaleurs

La figure ci-après illustre la surface interpolée du CBR à 95 % de l'OPM dans le plan défini par la limite de liquidité (WL) et l'indice de plasticité (IP). Les points expérimentaux sont projetés dans cet espace de plasticité et comparés à une surface continue permettant de visualiser les tendances globales de la portance en fonction des paramètres de consistance. La droite A-line du diagramme de Casagrande est également représentée afin de situer les sols par rapport au domaine des argiles inorganiques.

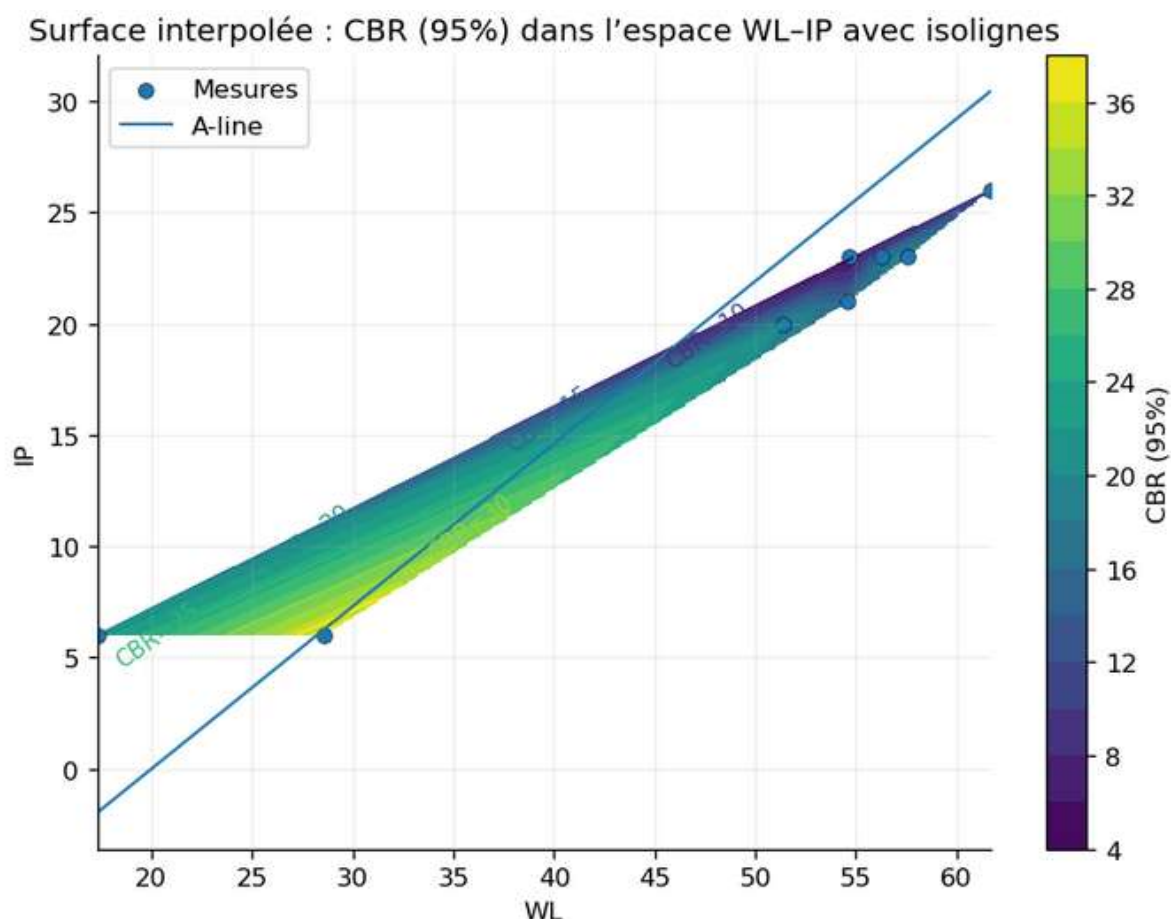


Figure 4: Cartographie interpolée du CBR (95 %) dans l'espace de plasticité WL–IP et analyse des isovaleurs, Source : Auteur

Interprétation

L'analyse graphique met en évidence une organisation structurée des valeurs de CBR dans le plan WL–IP. Les isovaleurs montrent que les CBR les plus élevés, supérieurs à 30 %, se situent dans la zone correspondant à des indices de plasticité modérés à faibles, généralement compris entre 8 % et 12 %, pour des limites de liquidité variant approximativement entre 30 % et 40 %. Cette configuration traduit des sols à plasticité relativement faible, probablement à matrice latéritique ou sablo-argileuse, présentant une meilleure capacité portante. À l'inverse, lorsque la limite de liquidité dépasse 50 % et que l'indice de plasticité atteint des valeurs supérieures à 20 %, le CBR interpolé diminue sensiblement pour atteindre des valeurs comprises entre 8 % et 15 %. Cette tendance confirme l'influence défavorable d'une plasticité élevée sur la résistance mécanique, en raison d'une plus grande sensibilité à l'eau et d'une compressibilité accrue des fractions argileuses. La distribution des points expérimentaux montre que la majorité des sols se situe au-dessus de la A-line, confirmant leur nature argileuse. Dans cet ensemble, une augmentation conjointe de WL et de IP s'accompagne d'une décroissance progressive des isovaleurs de CBR, ce qui traduit une corrélation négative globale entre la plasticité et la portance. Les zones colorées les plus claires, correspondant à des CBR de l'ordre de 30 à 35 %, sont concentrées vers les faibles IP, tandis que les zones plus sombres, associées à des CBR inférieurs à 10 %, apparaissent pour des couples WL–IP élevés. Cette représentation tridimensionnelle projetée met ainsi en évidence une relation fonctionnelle cohérente entre paramètres de plasticité et performance mécanique. Elle permet d'anticiper, à partir des seuls paramètres d'identification (WL et IP), un ordre de grandeur de la portance du sol support. Une telle approche constitue un outil d'aide au diagnostic géotechnique, notamment dans les phases préliminaires de conception, en facilitant l'identification des domaines de plasticité compatibles avec les exigences de portance pour le dimensionnement des chaussées de la RN12A.

Dans l'ensemble, la surface interpolée confirme que les sols à plasticité modérée présentent des performances mécaniques satisfaisantes, tandis que l'augmentation de la plasticité s'accompagne d'une dégradation progressive du CBR, soulignant la nécessité de mesures d'amélioration ou de stabilisation dans les secteurs caractérisés par des limites de liquidité et des indices de plasticité élevés.

DISCUSSION

Les résultats obtenus mettent en évidence une variabilité géotechnique marquée le long de la RN12A, traduite par des valeurs de CBR comprises entre 4 % et 37 % et des modules équivalents variant approximativement de 20 MPa à 185 MPa. Cette dispersion confirme le caractère hétérogène des formations latéritiques et alluvionnaires rencontrées en contexte tropical humide, où les processus d'altération intense et les conditions hydriques influencent fortement la structure et la résistance des sols. La prédominance de limites de liquidité comprises entre 30 % et 60 % et d'indices de plasticité majoritairement situés entre 8 % et 22 % indique la présence dominante de sols fins à plasticité faible à modérée, dont le comportement mécanique dépend étroitement de la teneur en eau. La corrélation négative observée entre la plasticité et la portance est cohérente avec les travaux antérieurs montrant que l'augmentation de la fraction argileuse et de l'indice de plasticité entraîne une diminution de la résistance au cisaillement non drainé et une plus grande sensibilité aux variations volumétriques [14]. Les zones caractérisées par des CBR inférieurs à 10 % correspondent généralement à des teneurs élevées en fines et à des potentiels de gonflement plus marqués, ce qui peut induire des tassements différentiels et une dégradation prématurée des couches de chaussée en l'absence de mesures correctives. Par ailleurs, les secteurs présentant des CBR supérieurs à 25 % et des modules excédant 125 MPa traduisent la présence d'horizons latéritiques plus denses et moins plastiques, offrant des conditions favorables au support des charges de trafic. Toutefois, la variabilité spatiale observée impose un dimensionnement différencié et, dans certains cas, le recours à des techniques d'amélioration telles que la stabilisation à la chaux ou aux liants hydrauliques, particulièrement adaptées aux sols fins plastiques en milieu tropical [15].

Dans l'ensemble, les résultats confirment que la prise en compte conjointe des paramètres de plasticité, de portance et de classification géotechnique constitue une approche pertinente pour optimiser la conception des chaussées en contexte malgache, en réduisant les risques de pathologies structurelles liées à l'hétérogénéité du sol support.

CONCLUSION

La présente étude a permis de mettre en évidence la variabilité géotechnique significative des sols rencontrés le long de la RN12A à Madagascar et d'en analyser les implications pour le dimensionnement des chaussées. Les résultats montrent une large dispersion des valeurs de portance, avec des CBR variant de 4 % à 37 %, traduisant des modules équivalents compris entre 20 MPa et 185 MPa. Cette hétérogénéité reflète la diversité lithologique du tracé, dominé par des formations sableuses alluvionnaires et des latérites argileuses d'altération tropicale. L'analyse conjointe des limites d'Atterberg, de la teneur en fines et du potentiel de gonflement confirme l'influence déterminante de la plasticité sur les performances mécaniques du sol support. Les secteurs caractérisés par des indices de plasticité élevés et une forte proportion de fines présentent généralement des CBR plus faibles et une sensibilité accrue aux variations hydriques, ce qui peut compromettre la durabilité de la structure de chaussée en l'absence de mesures adaptées. La corrélation observée entre paramètres d'identification et portance démontre la pertinence d'une approche intégrée combinant classification GTR, analyse statistique et modélisation graphique pour orienter les choix techniques. Les résultats soulignent la nécessité d'un dimensionnement différencié le long du linéaire étudié, ainsi que la mise en œuvre éventuelle de techniques d'amélioration des sols dans les zones à faible capacité portante.

En définitive, cette étude confirme que la prise en compte rigoureuse de la variabilité géotechnique constitue un facteur essentiel pour assurer la performance structurelle, la sécurité et la pérennité des infrastructures routières en contexte tropical humide, tel que celui de la RN12A.

Références

- [1] Das, B.M. (2010) Principles of Geotechnical Engineering. 7th ed. Stamford: Cengage Learning.
- [2] Gidigas, M.D. (1976) Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles. Amsterdam: Elsevier.
- [3] ASTM (2016) Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils (ASTM D1883). West Conshohocken: ASTM International.
- [4] Alhassan, M. (2008) 'Correlation between CBR and index properties of soils', Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13, pp. 1–6.
- [5] Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. (1962) 'Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction', Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 667–679.
- [6] UNDP (Programme des Nations Unies pour le Développement) (2014) Profil environnemental de Madagascar. Antananarivo: PNUD.
- [7] LCPC-SETRA (1992) Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Paris: LCPC.
- [8] ASTM (2016) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D4318). West Conshohocken: ASTM International.
- [9] ASTM (2016) Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils (ASTM D1883). West Conshohocken: ASTM International.
- [10] LCPC-SETRA (1992) Guide des Terrassements Routiers (GTR). Paris: LCPC.
- [11] McKinney, W. (2010) 'Data structures for statistical computing in Python', Proceedings of the 9th Python in Science Conference, pp. 51–56.
- [12] Hunter, J.D. (2007) 'Matplotlib: A 2D graphics environment', Computing in Science & Engineering, 9(3), pp. 90–95.

-
- [13] Virtanen, P. et al. (2020) 'SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python', Nature Methods, 17, pp. 261–272.
- [14] Bell, F.G. (2007) Engineering Geology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [15] Little, D.N. and Nair, S. (2009) 'Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials', National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 676. Washington, DC: Transportation Research Board.