

« EVALUATION DE L'EFFICACITE DES MATERIAUX ROUTIERS TRAITES AUX LIANTS HYDRAULIQUES A MADAGASCAR »

1- RAKOTOARILALA Fetraniaina
Ecole Doctorale INGE

2- RANDRIAMALALA Tiana Richard ⁽²⁾

Docteur, Chef de département recherche développement et matériaux LNTPB

3- RAKOTONIRINA Solonjatovo
Professeur Titulaire
Ecole Doctorale INGE

RÉSUMÉ

Dans les pays en développement, et en particulier à Madagascar, l'utilisation des sols traités aux liants hydrauliques comme matériau de construction routière reste encore marginale, voire inexistante, malgré les nombreux avantages que cette méthode offre. En effet, les sols ainsi traités présentent une rentabilité mécanique notable à un coût compétitif, tout en assurant une excellente capacité portante et une durabilité accrue. De plus, l'utilisation de ce type de matériau contribue à réduire l'impact environnemental, générant moins de pollution comparativement à d'autres matériaux de construction.

L'objectif de cette recherche est de démontrer, de manière approfondie, l'efficacité des matériaux routiers traités aux liants hydrauliques dans une approche de construction sans déchet et sans recours à de nouveaux emprunts. Cela implique la réutilisation des matériaux en place et la réduction de l'utilisation de machinerie lourde.

Les résultats obtenus montrent que le traitement des sols typiques de Madagascar avec de la chaux et/ou du ciment améliore significativement leurs propriétés mécaniques, notamment la résistance en compression simple, l'indice CBR, et le module de déformation élastique. Ces sols, initialement considérés comme inadaptés, deviennent ainsi aptes à être utilisés comme couche de forme ou d'assise dans la construction routière. Le traitement combiné chaux-ciment s'est révélé être la solution la plus optimale.

En termes d'innovation, les performances mécaniques des sols traités aux liants hydrauliques offrent une perspective prometteuse pour leur valorisation future, renforçant leur potentiel en tant que matériau de construction durable.

Mots clés : Stabilisation ; chaux-ciment ; résistance en compression ; Flocculation ; Réaction pouzolannique.

ABSTRACT

In developing countries, particularly in Madagascar, the use of soil stabilized with hydraulic binders as a road construction material remains marginal or even nonexistent, despite the numerous advantages this method offers. Stabilized soils exhibit significant mechanical efficiency at a competitive cost while ensuring excellent load-bearing capacity and enhanced durability. Moreover, the use of such materials contributes to environmental sustainability by generating less pollution compared to conventional construction materials.

The objective of this research is to comprehensively demonstrate the effectiveness of road construction materials treated with hydraulic binders in a zero-waste approach, eliminating the need for external borrow materials. This approach emphasizes the reuse of in-situ materials and reduces reliance on heavy machinery.

The findings reveal that treating typical soils from Madagascar with lime and/or cement significantly enhances their mechanical properties, particularly in terms of unconfined compressive strength (UCS), California Bearing Ratio (CBR), and elastic modulus. These soils, initially deemed unsuitable, are thus rendered viable for use as subgrade or base layers in road construction. The combined treatment of lime and cement has been identified as the most optimal solution.

From an innovation standpoint, the improved mechanical properties of soils stabilized with hydraulic binders offer a promising outlook for their future utilization, strengthening their potential as a sustainable construction material.

Keywords: Stabilization; lime-cement; compressive strength; flocculation; pozzolanic reaction

I. INTRODUCTION

Le développement des infrastructures routières constitue un pilier fondamental pour le progrès économique et social des pays en voie de développement, dont Madagascar fait partie. La qualité du réseau routier influence directement l'efficacité des échanges commerciaux, la mobilité des populations, et l'accès aux services de base. Cependant, le réseau routier malgache est fréquemment affecté par des défaillances structurelles, en raison de la mauvaise qualité des matériaux de construction utilisés, de l'intensité des charges de trafic, et des conditions climatiques particulièrement agressives. Ces facteurs contribuent à une dégradation rapide des infrastructures, compromettant leur durabilité et entraînant des coûts de maintenance élevés.

Dans ce contexte, la stabilisation des sols par l'incorporation de liants hydrauliques, tels que la chaux et le ciment, se présente comme une solution prometteuse. Ces traitements visent à améliorer les propriétés mécaniques des sols, en augmentant leur résistance à la compression, leur capacité portante, et leur module de déformation. L'hydratation et la réaction pouzzolanique induites par ces liants entraînent une réduction de la plasticité des sols, ainsi qu'une augmentation de leur densité et de leur cohésion. Néanmoins, l'application de ces techniques à Madagascar demeure limitée, principalement en raison d'un manque de données locales spécifiques et de connaissances sur les performances à long terme des sols ainsi traités dans des contextes géotechniques variés.

L'objectif scientifique de cette étude est de caractériser et de quantifier les effets des liants hydrauliques sur les matériaux routiers employés à Madagascar, dans le but d'optimiser leur utilisation pour la construction d'infrastructures plus résistantes et pérennes. Il s'agit d'analyser de manière rigoureuse les mécanismes d'interaction entre les liants et les sols locaux, afin de déterminer les gains en termes de résistance mécanique, de durabilité, et de stabilité sous charges répétées. L'étude se concentrera sur des paramètres critiques tels que la résistance en compression simple, l'indice de portance Californien (CBR), et le module de déformation élastique des sols traités.

La problématique principale à résoudre est de vérifier si les sols malgaches, naturellement caractérisés par une faible résistance et une forte susceptibilité aux variations hydriques, peuvent être efficacement transformés en matériaux de construction routière répondant aux standards internationaux après traitement aux liants hydrauliques. Il est crucial d'évaluer la durabilité de ces améliorations sous l'influence des conditions climatiques et des sollicitations mécaniques locales. Cette étude ambitionne de combler ce manque de données en apportant

une contribution scientifique significative, qui pourrait guider la mise en œuvre de stratégies de stabilisation des sols à grande échelle, réduisant ainsi la nécessité d'importer des matériaux coûteux ou de dépendre de ressources locales insuffisantes.

Les résultats de cette recherche offriront des perspectives innovantes pour l'amélioration des infrastructures routières à Madagascar, en fournissant une base scientifique robuste pour l'adoption de pratiques de construction plus durables et économiquement viables.

II. METHODOLOGIE

II.1 Introduction et cadre expérimental

La méthodologie adoptée pour évaluer l'efficacité des matériaux routiers traités aux liants hydrauliques à Madagascar repose sur une approche expérimentale rigoureuse, visant à quantifier les améliorations des propriétés mécaniques. Trois types de sols locaux ont été sélectionnés pour cette étude : S1, un sol similaire à un limon argileux; S2, un sol proche d'une argile limoneuse; et S3, une latérite. Ces sols ont été choisis en raison de leur prévalence dans les conditions géotechniques malgaches et de leur importance pour les travaux routiers. Le traitement des sols a été réalisé avec trois types de liants hydrauliques : la chaux seule, le ciment seul, et un mélange chaux-ciment, afin de déterminer l'effet optimal de chaque traitement sur les propriétés mécaniques des sols.

II.2 Préparation des échantillons

Les échantillons de sol ont été prélevés dans diverses localités représentatives des conditions géologiques malgaches : le sol S1 a été recueilli aux coordonnées GPS $-18^{\circ}51'35''$ S et $47^{\circ}27'15''$ E; le sol S2 à $-19^{\circ}10'00''$ S et $46^{\circ}43'59''$ E; et le sol S3 à $-18^{\circ}52'40''$ S et $47^{\circ}42'08''$ E. Chaque type de sol a été minutieusement échantillonné et préparé selon les normes NF EN 17892 pour les analyses granulométriques et NF P 94-051 pour la détermination des limites d'Atterberg. Les échantillons ont ensuite été traités avec des dosages variés de liants hydrauliques : 2 %, 4 %, et 6 % en poids sec du sol, afin d'explorer un large éventail de conditions de traitement.

II.3 Protocole de traitement

Les traitements ont été réalisés selon trois configurations distinctes :

- **Traitement à la chaux seule** : La chaux vive (CaO) a été appliquée en dosages variant de 1 % à 6 %. Ce traitement vise à améliorer la floculation des particules du sol, réduire sa plasticité, et stabiliser ses propriétés à long terme. De plus, l'ajout de chaux diminue la teneur en eau du sol, rendant ce dernier moins sensible aux variations hydriques et plus facile à compacter.

- **Traitement au ciment seul** : Le ciment utilisé est du type Portland CEM II (ciment LOVA CEM II 32,5), appliqué à des dosages allant de 1 % à 10 %. Ce traitement est conçu pour augmenter les résistances mécaniques du sol, notamment la résistance à la compression, le module de déformation, l'indice CBR, et la résistance au cisaillement. L'ajout de ciment améliore la cohésion interne du sol et sa capacité à supporter des charges élevées.
- **Traitement combiné chaux-ciment** : Une combinaison des deux liants a été utilisée pour maximiser les avantages des deux traitements. Les proportions varient en fonction du type de sol : 4 % de chaux + 6 % de ciment pour S1, 4 % de chaux + 7 % de ciment pour S2, et 2 % de chaux + 5 % de ciment pour S3. Cette approche vise à tirer parti des effets synergétiques de la chaux et du ciment pour optimiser les propriétés mécaniques des sols traités, en combinant la floculation et la stabilisation chimique à long terme avec l'amélioration de la résistance mécanique.

II.4 Essais mécaniques et mesures des propriétés physico-chimiques

Après préparation et traitement, les échantillons ont été soumis à une batterie d'essais mécaniques pour évaluer les changements dans leurs propriétés physiques et mécaniques :

- **Résistance en compression simple (Rc)** : Cet essai a été réalisé selon la norme NF P94-093 pour mesurer la résistance maximale des sols traités sous compression uniaxiale.
- **Essais de cisaillement** : L'essai de cisaillement direct (NF P94-080) a été effectué pour déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne des sols traités.
- **Module de déformation élastique (E)** : Ce paramètre a été mesuré à l'aide d'un essai triaxial (NF P94-074), permettant de quantifier la rigidité des sols sous différentes contraintes.
- **Indice de Portance Californien (CBR)** : L'essai CBR (NF P 94-078) a été réalisé pour évaluer la capacité portante des sols traités, essentielle pour la conception des couches de fondation des routes.
- **Indice de Portance Immédiate (IPI)** : Cet indice a été mesuré pour évaluer la portance immédiate des sols après traitement, suivant la méthode NF P94-078.

II.5 Analyse des résultats

Les résultats obtenus ont été analysés en termes de variations des propriétés mécaniques en fonction des dosages des liants appliqués. Chaque série d'essais a été réalisée en trois répétitions pour assurer la fiabilité statistique des données. Les analyses incluent :

- **Comparaison des performances des sols traités à la chaux, au ciment et au mélange chaux-ciment** : Une comparaison détaillée des propriétés R_c , CBR, module élastique, et résistance au cisaillement a été effectuée pour chaque sol.
- **Évaluation de l'efficacité du traitement en fonction du dosage** : Les résultats ont été présentés sous forme tableau ou de courbes de performance pour chaque type de sol et chaque traitement, illustrant les tendances d'amélioration des propriétés mécaniques avec l'augmentation du dosage.
- **Étude de la synergie entre la chaux et le ciment** : L'analyse des échantillons traités au mélange chaux-ciment a été approfondie pour identifier les effets synergétiques qui pourraient offrir une optimisation des performances mécaniques des sols.

II.6 Discussions et interprétations

Les résultats ont été interprétés en tenant compte des spécificités géotechniques des sols et des conditions climatiques locales. Les discussions portent sur :

- **L'impact du traitement sur la durabilité des sols** : L'effet des traitements sur la stabilité à long terme des sols sous conditions de cycle humide/sec a été examiné.
- **Optimisation des dosages pour des applications spécifiques** : Sur la base des résultats obtenus, des recommandations ont été formulées pour les dosages optimaux des liants en fonction des applications routières prévues (couche de forme, couche de fondation, etc.).
- **Implications pour la construction routière à Madagascar** : Les avantages potentiels de l'utilisation des sols traités aux liants hydrauliques dans le contexte malgache ont été mis en avant, avec des suggestions pour une mise en œuvre à grande échelle.

III. RESULTATS

III.1 Traitement à la chaux seule

Les figures 1, 2 et 3 illustrent respectivement l'évolution de la résistance en compression simple (R_c), de l'indice CBR, de l'indice de portance immédiate (IPI) et du module de déformation élastique (E) en fonction du dosage en chaux pour les trois échantillons étudiés

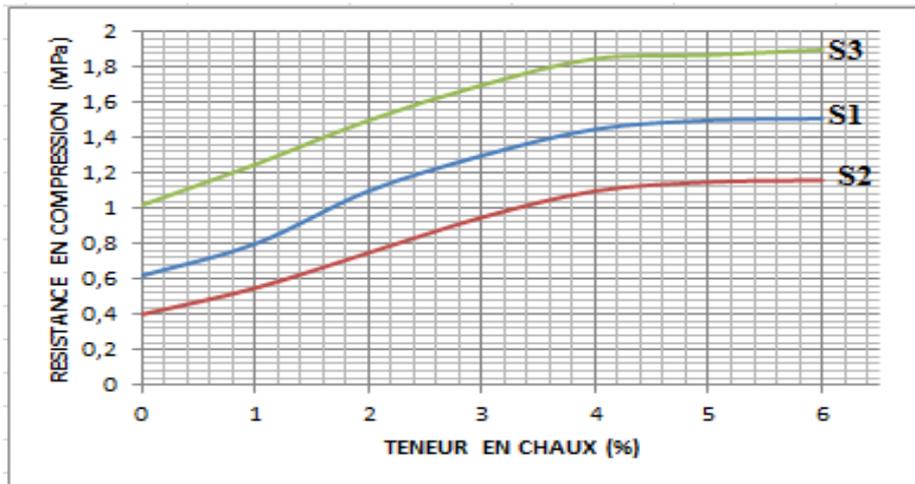


Figure 1 : Influence de dosage en chaux sur la résistance en compression simple des trois échantillons de sol

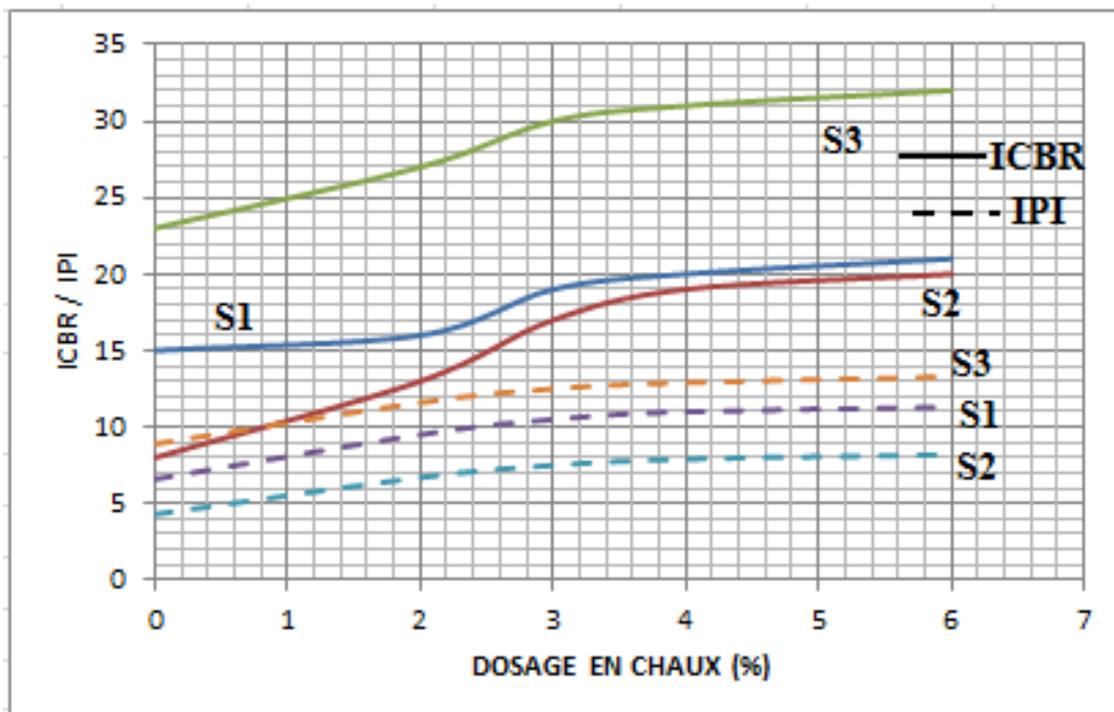


Figure 2 : Variation de l'ICBR et de l'IPI à l'optimum Proctor en fonction de dosage en chaux (LNTPB)

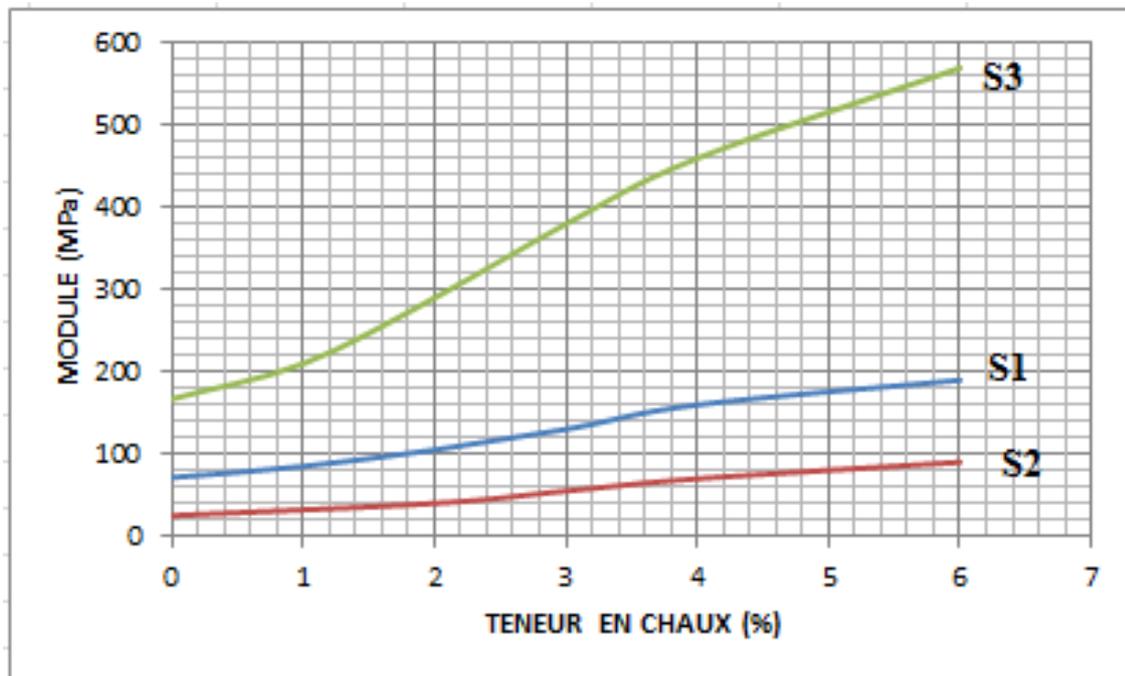


Figure 3 : Influence de dosage en chaux sur les modules élastiques des trois sols

Le tableau 1 montre l'évolution des paramètres de cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) des trois échantillons à 2% ; 3% ; 4% de dosage en chaux.

| Echantillons | | Angle de frottement interne (φ en °) | | | Cohésion (C en kPa) | | |
|-----------------|------|--|------|------|---------------------|-------|------|
| | | S1 | S2 | S3 | S1 | S2 | S3 |
| Dosage en chaux | 0% | 15,7 | 10,4 | 35,0 | 21,5 | 34,5 | 85,6 |
| 2% | 16,2 | 11,3 | 36,8 | 32,3 | 45,7 | 103,5 | |
| 3% | 16,7 | 11,9 | 37,4 | 41,5 | 51,3 | 112,3 | |
| 4% | 17,0 | 12,4 | 38,6 | 49,8 | 62,5 | 120,6 | |

Tableau 1 : Evolution de l'angle de frottement interne et de la cohésion des trois sols témoins à 2% ; 3% ; 4% de dosage en chaux.

III.2 Traitement au ciment seul

Les figures 3, 4 et 5 illustrent respectivement l'évolution de la résistance en compression simple (R_c), de l'indice CBR, de l'indice de portance immédiate (IPI) et du module de déformation élastique (E) en fonction du dosage en ciment pour les trois échantillons étudiés.

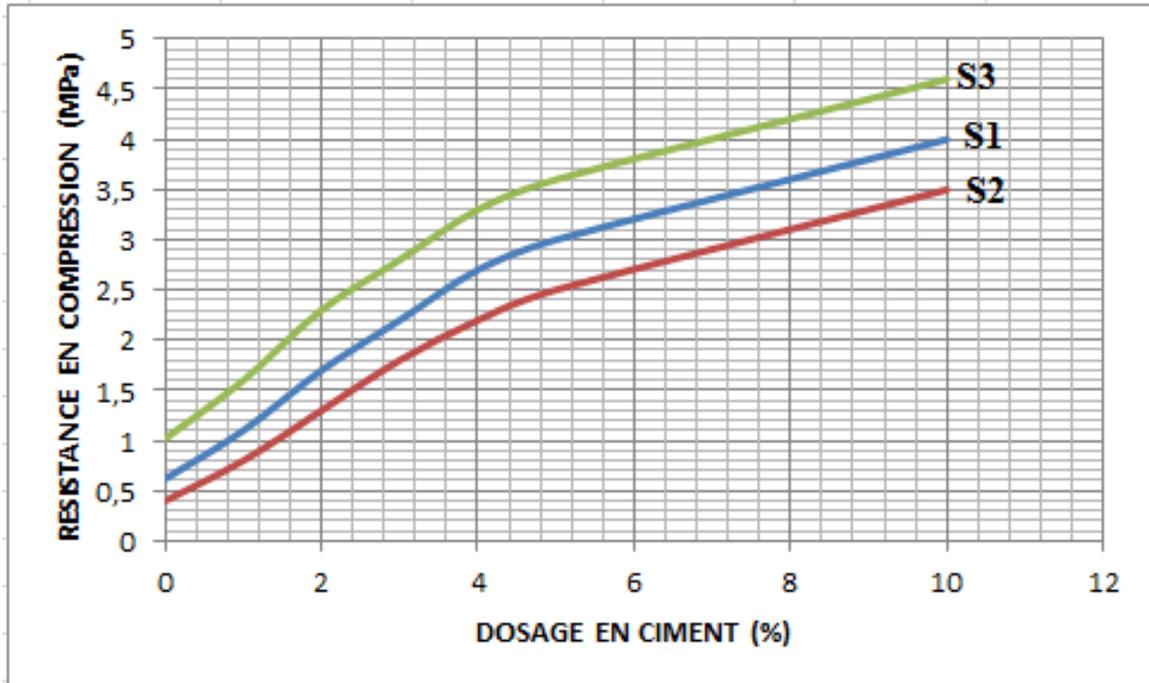


Figure 4 : Influence de dosage en ciment sur la résistance en compression simple pour les trois

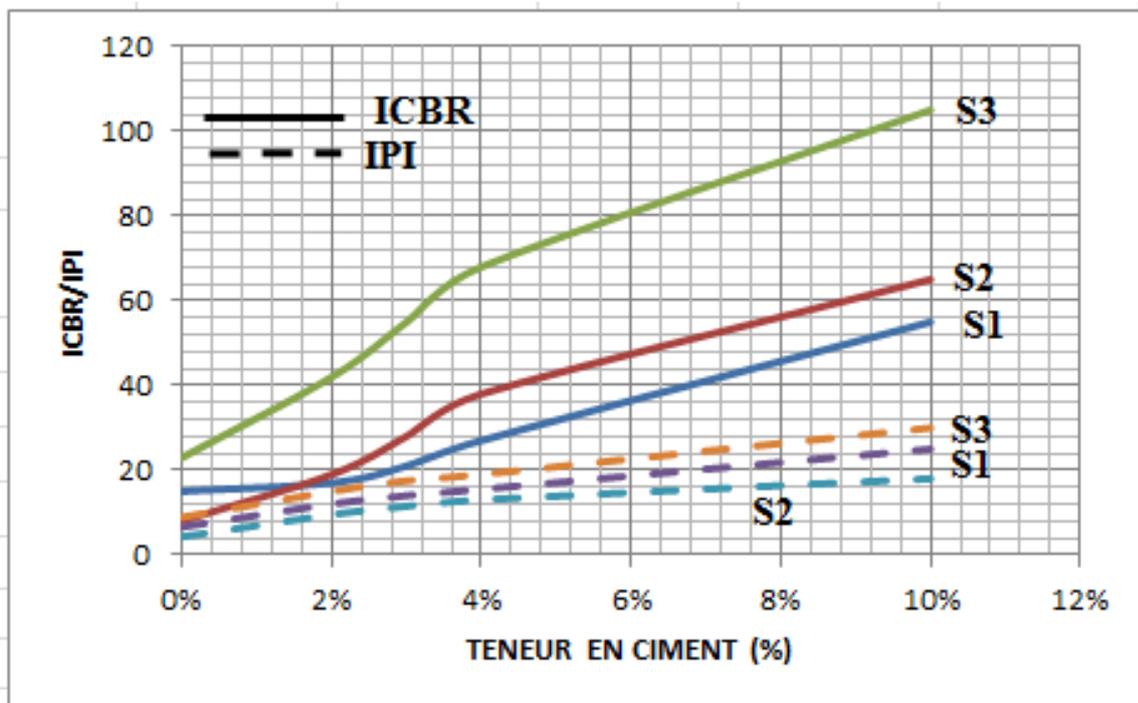


Figure 5 : Influence de dosage en ciment sur l'ICBR et l'IPI des sols étudiés (LNTPB)

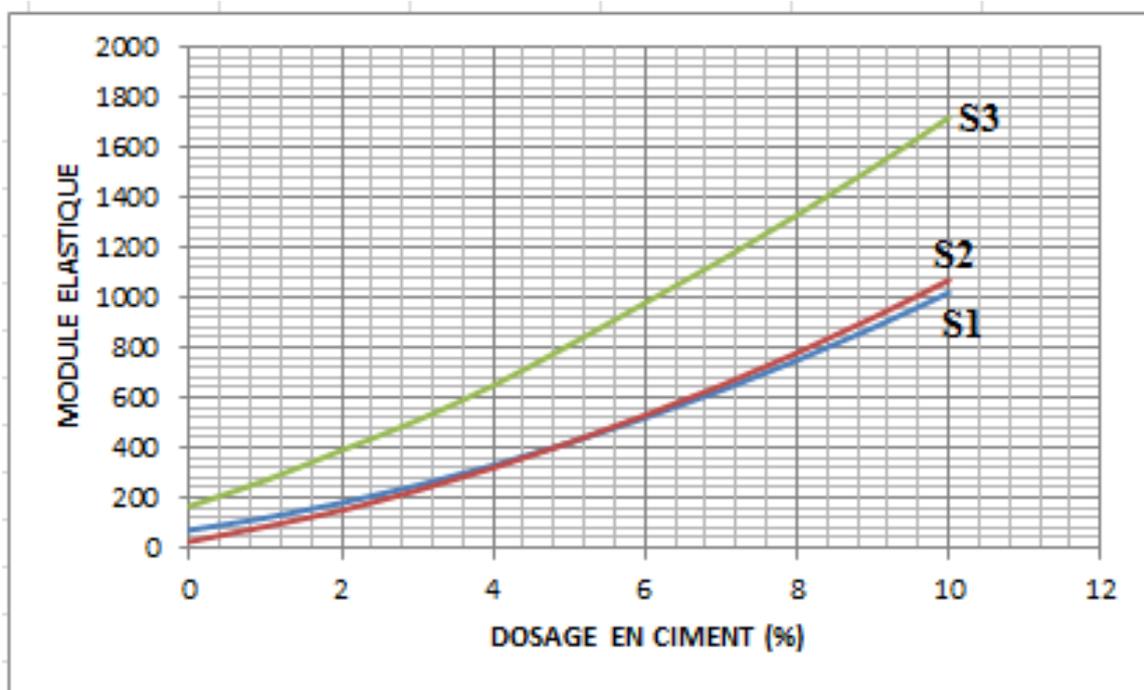


Figure 6 : Influence de dosage en ciment sur le module de déformation élastique des trois sols

Le tableau 2 montre l'évolution des paramètres de cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) des trois échantillons à 2% ; 3% ; 4% de dosage en ciment.

| Echantillons Dosage en ciment | Angle de frottement interne (φ en °) | | | Cohésion (C en kPa) | | |
|----------------------------------|--|------|------|---------------------|------|-------|
| | S1 | S2 | S3 | S1 | S2 | S3 |
| 0% | 15,7 | 10,4 | 35,0 | 21,5 | 34,5 | 85,6 |
| 2% | 16,5 | 11,2 | 36,5 | 35,2 | 50,1 | 104,5 |
| 3% | 17 | 11,7 | 37,5 | 45,1 | 63,3 | 119,3 |
| 4% | 17,5 | 12,2 | 38,5 | 55,0 | 74,9 | 134,6 |

Tableau 2 : Influence de dosage en ciment sur les paramètres de cisaillement pour les trois sols étudiés

III.3 Traitement mixte chaux-ciment

Les tableaux 3, 4, 5 et 6 présentent respectivement les valeurs de la résistance en compression simple (R_c), de l'indice CBR, de l'indice de portance immédiate (IPI), du module de déformation élastique (E), ainsi que des paramètres de cisaillement des sols non traités et traités avec une combinaison chaux-ciment.

| Sols | Traitement | Résistance en compression simple (MPa) |
|------|-----------------------|--|
| S1 | 0% chaux et 0% ciment | 0,62 |
| | 4% chaux + 6% ciment | 3,70 |
| S2 | 0% chaux et 0% ciment | 0,40 |
| | 4% chaux + 7% ciment | 2,90 |
| S3 | 0% chaux et 0% ciment | 1,02 |
| | 2% chaux + 5% ciment | 5,40 |

Tableau 3 : Valeurs des résistances en compression simple des échantillons traités au mélange chaux-cimen

| Sols | Traitement | ICBR | IPI |
|------|-----------------------|------|------|
| S1 | 0% chaux et 0% ciment | 15 | 6,6 |
| | 4% chaux + 6% ciment | 35,7 | 13,5 |
| S2 | 0% chaux et 0% ciment | 8 | 4,3 |
| | 4% chaux + 7% ciment | 41,2 | 13,8 |
| S3 | 0% chaux et 0% ciment | 23 | 8,9 |
| | 2% chaux + 5% ciment | 75,4 | 75,4 |

Tableau 4 : Evolution de l'IPI et CBR des trois échantillons traités au mélange chaux-ciment

| Sols | Traitement | Module à court terme | Module à 360 jours |
|------|----------------------|----------------------|--------------------|
| S1 | 4% chaux + 6% ciment | 1070,5 | 1427,3 |
| S2 | 4% chaux + 7% ciment | 1090,3 | 1453,7 |
| S3 | 2% chaux + 5% ciment | 1112,6 | 1483,5 |

Tableau 5 : Valeurs des modules de déformation élastique des échantillons étudiés traitées au mélange chaux-ciment

| Sols | Traitement | Angle de frottement interne (°) | Cohésion (kPa) |
|------|----------------------|---------------------------------|----------------|
| S1 | 4% chaux + 6% ciment | 17 | 105 |
| S2 | 4% chaux + 7% ciment | 17,3 | 115 |
| S3 | 2% chaux + 5% ciment | 41,3 | 145,6 |

Tableau 6 : Valeurs des paramètres de cisaillement pour les sols témoins traités au mélange chaux-ciment

IV. ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse des résultats des traitements des sols S1, S2, et S3 avec la chaux, le ciment, et leur combinaison révèle des variations significatives des propriétés mécaniques et physiques de ces sols, mettant en lumière l'efficacité de chaque type de traitement. Pour le traitement à la chaux seule, on observe une amélioration progressive de la résistance en compression simple (R_c), de l'indice CBR, du module élastique (E), et des paramètres de cisaillement (angle de frottement interne ϕ et cohésion C) avec l'augmentation du dosage en chaux. Cependant, cette amélioration atteint un plateau au-delà de 4 % de chaux, suggérant une limite d'efficacité de la chaux seule. Par exemple, la R_c du sol S1 passe de 0,62 MPa à 1,51 MPa avec un dosage de 6 % de chaux, tandis que l'indice CBR de ce même sol augmente de 15 à 21, et le module élastique passe de 71,4 MPa à 190 MPa. Des tendances similaires sont observées pour les autres sols, bien que les performances du sol S3, une latérite, soient légèrement supérieures, indiquant une meilleure compatibilité de ce sol avec le traitement à la chaux. En termes de cisaillement, la cohésion du sol S1 augmente de 21,5 kPa à 49,8 kPa pour un dosage de 4 % de chaux, tandis que l'angle de frottement interne augmente légèrement. Ces améliorations sont significatives mais restent inférieures à celles obtenues avec le traitement au ciment seul.

Le traitement au ciment montre une amélioration nettement plus marquée des propriétés mécaniques par rapport à la chaux. La résistance en compression simple des sols augmente de manière significative, avec des valeurs qui atteignent 4 MPa, 3,5 MPa, et 4,6 MPa

respectivement pour S1, S2, et S3 à un dosage de 10 % de ciment. De plus, l'indice CBR pour S3, par exemple, passe de 23 à 105 pour un dosage de 10 % de ciment, tandis que le module élastique atteint des valeurs très élevées, dépassant 1720 MPa pour le sol S3, confirmant l'efficacité supérieure du ciment dans l'amélioration des propriétés mécaniques des sols, en particulier pour les sols initialement riches en argile comme S2. En termes de cisaillement, la cohésion des sols traités au ciment augmente considérablement, avec le sol S2 atteignant 74,9 kPa pour un dosage de 4 %, ce qui est nettement supérieur aux résultats obtenus avec la chaux seule. L'angle de frottement interne augmente également mais de manière plus modeste.

La combinaison chaux-ciment présente une synergie notable, combinant les avantages des deux liants pour obtenir des améliorations optimales des propriétés des sols. Par exemple, la résistance en compression simple du sol S3 traité avec 2 % de chaux et 5 % de ciment atteint 5,4 MPa, surpassant largement les résultats obtenus avec la chaux ou le ciment seuls. De plus, l'indice CBR et l'indice de portance immédiate (IPI) de S3 montrent des augmentations spectaculaires, avec un CBR atteignant 75,4 et un IPI atteignant 75,4 également, ce qui est bien au-delà des améliorations observées avec les traitements séparés. Cette synergie est particulièrement efficace pour les sols latéritiques comme S3, où les propriétés mécaniques sont presque doublées par rapport au ciment seul. Le module élastique des sols traités avec la combinaison chaux-ciment montre également des valeurs très élevées, atteignant 1483,5 MPa pour S3, avec une augmentation continue à long terme, ce qui démontre la durabilité du traitement combiné. En termes de cisaillement, la combinaison des deux liants permet d'obtenir un angle de frottement interne plus élevé, avec une cohésion atteignant 145,6 kPa pour le sol S3, ce qui souligne encore l'efficacité du traitement combiné. L'évaluation de l'efficacité en fonction du dosage montre que, bien que des dosages plus élevés de ciment ou de chaux améliorent les performances, la combinaison des deux à des dosages optimisés (par exemple, 4 % chaux + 6 % ciment pour S1) donne des résultats supérieurs à l'utilisation de chacun des liants séparément. Cette synergie entre la chaux et le ciment est due à la complémentarité de leurs mécanismes d'action : la chaux améliore la plasticité et stabilise les argiles, tandis que le ciment apporte une rigidité et une résistance accrues grâce à la formation de gels cimentaires. Ce phénomène est particulièrement bénéfique pour les sols à granulométrie fine comme S2, où la stabilisation avec du ciment seul peut parfois être insuffisante en raison de l'expansion ou du retrait des argiles. Enfin, d'autres propriétés telles que l'amélioration de la résistance à long terme, la durabilité en environnement humide, et la réduction de l'expansion volumique sont également optimisées par cette combinaison. La

comparaison des traitements montre que, bien que le ciment seul fournisse une résistance élevée, la combinaison chaux-ciment permet d'atteindre des propriétés mécaniques optimales tout en minimisant les coûts et en maximisant la durabilité, en particulier pour les sols complexes comme S2 et S3. Les résultats montrent que la combinaison des deux liants, à des dosages optimaux, est la méthode la plus efficace pour améliorer les propriétés des sols étudiés, confirmant ainsi la pertinence de ce traitement pour des projets d'ingénierie géotechnique exigeant des performances élevées et une durabilité à long terme.

V. DISCUSSIONS

Les résultats obtenus à travers le traitement des sols S1, S2, et S3 avec la chaux, le ciment, et leur combinaison soulignent des tendances claires en matière d'amélioration des propriétés mécaniques des sols, mais révèlent également des nuances importantes quant à l'efficacité relative de chaque type de traitement. Le traitement à la chaux seule montre une amélioration notable, en particulier pour la cohésion et la stabilisation à court terme, mais ses effets atteignent un plateau à des dosages élevés, limitant son efficacité pour des applications nécessitant des résistances mécaniques élevées. Le ciment, en revanche, démontre une capacité nettement supérieure à renforcer la résistance en compression et les paramètres de cisaillement, confirmant son rôle crucial dans les projets où la rigidité et la durabilité sont primordiales. Cependant, l'analyse montre que la combinaison chaux-ciment dépasse les performances de chaque liant utilisé séparément, surtout pour des sols à granulométrie fine comme S2 et des latérites comme S3. Cette synergie est particulièrement remarquable dans l'amélioration de la résistance à long terme, de la durabilité en environnement humide, et de la réduction de l'expansion volumique, ce qui en fait une solution optimale pour la stabilisation des sols dans des conditions complexes. De plus, l'utilisation conjointe de la chaux et du ciment permet non seulement d'obtenir des propriétés mécaniques supérieures, mais aussi de minimiser les coûts et les effets indésirables associés à l'utilisation excessive de l'un ou l'autre liant. Cette approche combinée apparaît donc comme la plus efficace pour atteindre un équilibre optimal entre performance, coût et durabilité dans les projets de génie civil, tout en offrant une solution adaptée aux particularités de chaque type de sol. Ces conclusions suggèrent que pour des projets d'ingénierie géotechnique exigeants, la combinaison des deux liants devrait être privilégiée pour maximiser les bénéfices, en particulier dans les contextes où la stabilité à long terme et la résistance mécanique élevée sont essentielles.

VI. CONCLUSION

La présente étude a mis en évidence l'efficacité variable des traitements à la chaux, au ciment, et à leur combinaison pour améliorer les propriétés mécaniques des sols S1, S2, et S3. Les résultats démontrent que, bien que la chaux seule soit efficace pour augmenter la cohésion et améliorer la stabilité initiale des sols, son impact reste limité pour des besoins de résistance mécanique accrue. Le ciment, de son côté, s'est avéré être un agent stabilisateur très efficace, offrant des gains significatifs en termes de résistance en compression et de module élastique, ce qui le rend particulièrement adapté aux projets nécessitant une rigidité et une durabilité élevées. Cependant, la synergie obtenue par l'utilisation conjointe de la chaux et du ciment dépasse les performances des traitements individuels, notamment pour les sols fins et les latérites. Cette combinaison offre une amélioration notable de la résistance à long terme, de la durabilité en milieu humide, et de la stabilité dimensionnelle, tout en optimisant les coûts et en réduisant les effets négatifs d'une utilisation excessive de l'un ou l'autre liant. Pour les projets géotechniques où la performance à long terme et la résistance élevée sont cruciales, le traitement combiné chaux-ciment apparaît comme la solution la plus efficace, permettant d'adapter de manière optimale les caractéristiques du sol aux exigences spécifiques du projet. Cette stratégie devrait donc être privilégiée pour maximiser la stabilité et la durabilité des infrastructures, tout en tenant compte des particularités de chaque type de sol.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ColloqueTerDOUEST 2013 Seminar** Evolution mécanique et physico-chimique à long terme d'un sol limoneux traité à la chaux
- [2] **COMITE FRANÇAIS DE MECANIQUE DES SOLS (CFMS)** (3 décembre 2008) Valorisation des sols médiocres « traitement en place en terrassements »
- [3] **DJEBLI Taoufik Mohamed Abdelkaoui** (2020) Amélioration des propriétés mécaniques d'un sol fin argileux traité par la chaux: Influence de la durée de cure
- [4] **Dr Zemouli Samira** (2021) Université Badji Mokhtar Annaba Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil. Amélioration des sols.
- [5] **DTCES-CETE** (Juillet 1990) Chaussée, Dépendance 59. Traitement des sols à la chaux et (ou) au ciment.
- [6] **E.ALONSO** Cemagref 50. avenue de Verdun 33612 Cestas Cedex emmanuel.alonso@cemagref.fr Compactage et comportement de sols fins humides
- [7] **Fiches techniques génie hippique.** Département Ingénierie. Novembre 2004 Traitement des sols à la chaux ou au ciment

- [8] **Fabien Szymkiewicz** (5 Apr 2013) <https://theses.hal.science/tel-00808139> Évaluation des propriétés mécaniques d'un sol traité au ciment
- [9] **Hossein Nowamooz** (18 Oct 2008) Retrait/gonflement des sols argileux compactés et naturels.
- [10] **J. Eid, S. Taibi, A. Lefebvre, J.E. Dandjinou**, (2015) Le traitement des Sols à la chaux et aux liants hydrauliques - Aspect Physico Chimique
- [11] **J.-M. FLEUREAU** Professeur Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux CNRS UMR 8579 et Ecole Centrale de Paris Grande Voie des Vignes 92295 Chatenay-Malabry, France Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants.
- [12] **LCPC, Guide technique** (Janvier 2000) TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX ET/OU AUX LIANTS HYDRAULIQUES Application à la réalisation des remblais et des couches de forme
- [13] **Marc-Antoine BERNIER RACINE** (2018) Etude expérimentale sur la formulation des sols-ciment.
- [14] **Michel KERGOET** Ingénieur Chef de la section Terrassements et Construction des chaussées Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien. Contrôle de travaux de de traitement des sols