

Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques du sable HN31

M. BALBAL^{1,2}, F. JAMIN¹, R. BOUFERRA², M. BENJELLOUN¹

¹Laboratoire de mécanique et génie civil – Université de Montpellier

²Laboratoire de Géorressources, Géoenvironnement et Génie civil – Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

RESUME : Le volume de pneus usagés augmente de manière exponentielle, posant un défi environnemental majeur, notamment en raison de leur stockage dans les décharges. Ce travail explore la valorisation des granulats de caoutchouc issus du recyclage des pneus usés en les intégrant dans le sol, offrant ainsi une solution prometteuse pour des applications en génie civil. L'objectif de cette communication est d'étudier l'effet des granulats de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable d'Hostun. Une série d'essais de cisaillement rectiligne à la boîte (NF P 94-071-1) a été réalisée en laboratoire sur le sable HN31 mélangé avec différentes teneurs massiques de granulats de caoutchouc concassés allant de 0 à 40 %. Les tests de cisaillement direct ont été effectués sur des échantillons compactés à une densité relative initiale $D_r = 55$ % qui ont été testés après une phase de consolidation suivant un cycle de chargement / déchargement identique. Les résultats montrent que la teneur en granulat de caoutchouc a un effet sur la compressibilité et la résistance au cisaillement du sable.

Mots-clés : Compressibilité, Résistance au cisaillement, Sable – caoutchouc, Cisaillement direct

I. INTRODUCTION

En raison de l'augmentation du nombre de pneus usagés dans les décharges à travers le monde, il y a un intérêt croissant pour quantifier l'utilisation de ces pneus usagés en combinaison avec du sable pour former un mélange non conventionnel pour certaines applications géotechniques. L'avantage consiste tout d'abord à réutiliser le caoutchouc des pneus usagés, et à contribuer ainsi à l'économie circulaire de ces matériaux de base. En effet, le caoutchouc possède des propriétés particulièrement intéressantes pour les applications géotechniques telles qu'une bonne capacité d'amortissement, la légèreté, l'élasticité et surtout, les mélanges sable-caoutchouc se sont montrés avoir des propriétés intéressantes notamment vis-à-vis de la résistance au cisaillement des sols sableux. Des études récentes ont démontré que l'incorporation de granulats de caoutchouc dans le sable améliore la résistance au cisaillement des mélanges. Par exemple, F. Liu et al. (2023) ont montré que l'ajout de caoutchouc augmente la résistance au cisaillement jusqu'à un certain pourcentage optimal, au-delà duquel les propriétés mécaniques diminuent. Cette amélioration est attribuée à la flexibilité et à la capacité d'absorption d'énergie du caoutchouc, qui renforcent la structure granulaire du sable.

En outre, l'utilisation de mélanges sable-caoutchouc comme remblai derrière les murs de soutènement a été explorée. Une étude, réalisée par S. Bali Reddy et al. (2014), a évalué les

propriétés de ces mélanges pour des applications géotechniques durables, mettant en évidence leur potentiel en tant que matériaux de remblai légers. Ces mélanges présentent une densité réduite par rapport aux remblais traditionnels, ce qui diminue les charges sur les structures de soutènement et améliore leur stabilité globale. Plusieurs chercheurs (Contreras-Marín et al., 2021) et Hidalgo et Bustamante-Hernández, 2020) confirment ces résultats où ils mettent en évidence l'intérêt de l'utilisation des pneus usagés dans des projets de génie civil.

Par ailleurs, les propriétés d'amortissement des vibrations des mélanges sable-caoutchouc ont été exploitées pour des applications en isolation sismique. Des recherches (Forcellini et al., 2024) et (Sağlam & Tonaroğlu, 2025) ont montré que l'intégration de couches de sable mélangé avec du caoutchouc recyclé sous les fondations peut atténuer les forces sismiques transmises aux structures, offrant ainsi une solution efficace pour améliorer la performance sismique des bâtiments.

Enfin, l'utilisation de ces mélanges contribue à la réduction de l'empreinte environnementale des projets de construction. Une revue complète réalisée par (L. Liu et al., 2020) a souligné les avantages environnementaux et les propriétés techniques des mélanges de sable et de caoutchouc recyclé, renforçant leur pertinence dans le contexte du développement durable.

Ainsi, l'étude approfondie des propriétés mécaniques des mélanges sable-caoutchouc est essentielle pour optimiser leur utilisation dans diverses applications géotechniques, tout en répondant aux enjeux environnementaux actuels.

Le présent travail concerne une étude expérimentale au laboratoire sur le comportement du sable d'Hostun renforcé ou non par ajouts de granulats de caoutchouc en utilisant des essais de cisaillement direct.

II. MATÉRIAUX UTILISÉS

L'étude de l'influence des granulats de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable d'Hostun (HN31) a été investiguée en utilisant des granulats Technigom de la société Delta-Gom.

Le sable HN31 est un sable de granulométrie moyenne, constitué de grains quartzeux de forme angulaire, avec un diamètre moyen (D_{50}) de 0,385 mm. Il est classé comme un sable bien gradué. Par ailleurs, les granulats de caoutchouc utilisés dans cette étude proviennent du recyclage des pneus usagés, procédé réalisé par la société ALIAPUR, spécialisée dans la collecte et la valorisation de ces pneus, notamment par le biais du broyage et du déchiquetage, afin d'obtenir la granulométrie souhaitée. La classe granulaire choisie est entre 2 mm et 5 mm car ce choix de granulométrie permet une interaction optimale avec la matrice sableuse, influençant directement les propriétés mécaniques du mélange en termes de résistance au cisaillement et de comportement en déformation (Clauzade et al., 2012). Concernant la qualité environnementale, les émissions de composés organiques volatils (COV) des granulats de caoutchouc ont été évaluées par l'entreprise ALIAPUR en 2021, conformément aux réglementations en vigueur : allemande (AgBB, 2018), belge (Décret royal belge C-2014/24239) et française (Norme d'étiquetage des produits de construction, articles R221-22 à R221-28, 2011). Les résultats des essais démontrent que les granulats utilisés respectent l'ensemble de ces exigences réglementaires européennes. En complément, plusieurs études antérieures (Schneider et al., 2020) portant sur les granulats de caoutchouc destinés aux terrains de sport synthétiques confirment l'absence de risques sanitaires pour les utilisateurs.

Le programme expérimental de cette étude a comporté des essais de cisaillement direct, conformément à la NF P 94-071-1, pour différents teneurs massiques de granulats de caoutchouc

($GC = 0\%, 10\%, 20\%, 30\%$ et 40%). Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude était une boîte de cisaillement circulaire de diamètre 60 mm et de hauteur 30 mm pour réaliser tous les essais de cisaillement direct. Le mélange des deux matériaux est obtenu par malaxage manuel à sec pour une durée d'une minute pour assurer une bonne homogénéité. La préparation des échantillons est effectuée par compactage statique en trois couches pour atteindre une densité relative $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = 55\%$. À la fin de chaque phase de consolidation (chargement jusqu'à 800 kPa et déchargement), l'échantillon est soumis à un essai de cisaillement direct sous différentes contraintes normales σ_N variant de 50 kPa à 800 kPa. Les caractéristiques physiques du sable HN31 et des granulats de caoutchouc sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques physiques du sable et des granulats de caoutchouc

| Matériaux | d/D (mm) | D ₁₀ (mm) | D ₃₀ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₆₀ (mm) | C _u (l) | C _c (l) | ρ_s (kg/m ³) | e _{min} (l) | e _{max} (l) |
|-------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Sable d'Hostun | 0,080/0,5 | 0,230 | 0,300 | 0,385 | 0,42 | 1,83 | 1,13 | 2630 | 0,763 | 1,136 |
| Granulats de caoutchouc | 2/5 | 2,6 | 2,9 | 3,3 | 3,60 | 1,38 | 0,90 | 1140 | 1,020 | 1,359 |

Les courbes granulométriques du sable HN31 et des granulats de caoutchouc ont été déterminées par tamisage conformément à la norme NF P 94-056. Les résultats sont présentés dans la figure 1.

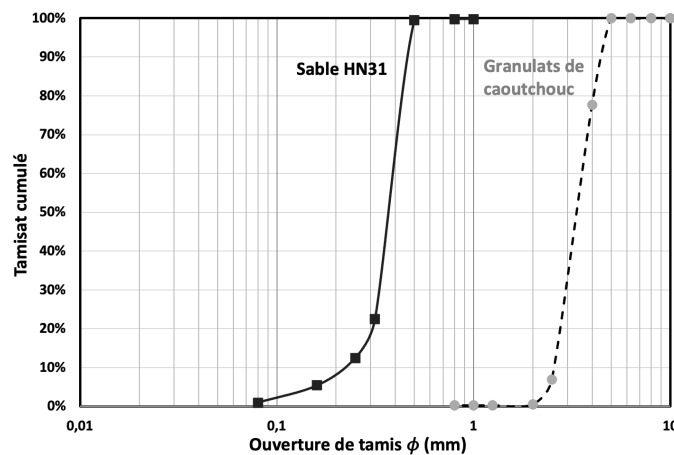


FIGURE 1. Courbes granulométriques du sable HN31 et des granulats de caoutchouc

La détermination des masses volumiques spécifiques ρ_s a été faite selon la norme NF P94-054. La figure 2(a) présente la variation de la masse volumique spécifique ρ_s en fonction de la teneur massique en granulats de caoutchouc GC . On note que la valeur de la masse volumique spécifique expérimentale trouvée est dans le même ordre que la valeur théorique. La détermination des masses volumiques minimale $\rho_{d,min}$ et maximale $\rho_{d,max}$ des sols non cohérents a été faite selon la norme NF P94-059. La figure 2(b) présente la variation des indices des vides maximal e_{max} (correspondant à l'état le plus lâche – $\rho_{d,min}$) et minimal e_{min} (correspondant à l'état le plus dense – $\rho_{d,max}$) en fonction des teneurs massiques en caoutchouc GC . On note que ces deux indices des vides diminuent avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc jusqu'à 50 %. Ce comportement peut s'expliquer par la masse volumique spécifique du sable qui est supérieure à celle des granulats de

caoutchouc. Les densités spécifiques du sable et des granules de caoutchouc sont respectivement égales à 2,63 et 1,14. Au-delà de 50 % de teneur massique en caoutchouc, les indices de vide des mélanges augmentent avec l'augmentation des granules de caoutchouc, les grains de sable remplissant les vides entre les granules de caoutchouc.

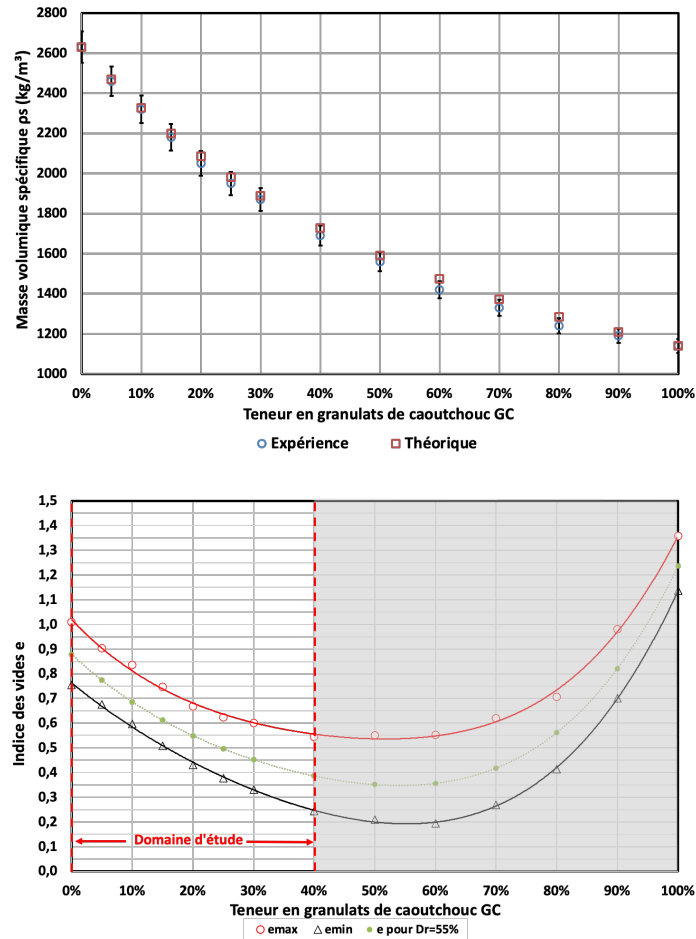


FIGURE 2. Variations de la masse volumique spécifique ρ_s et des indices des vides e_{max} et e_{min} en fonction de la teneur massique en granules de caoutchouc GC

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Phase de consolidation

Dans un premier temps, les échantillons secs sont compactés à une densité relative initiale $D_r = 55\%$ ont été soumis à une phase de consolidation suivant un cycle de chargement incrémental jusqu'à une contrainte normale $\sigma_N = 800$ kPa suivie d'un déchargement jusqu'à des contraintes normales $\sigma_N = 50, 100, 200, 400$ et 800 kPa. Les figures 3 donnent l'évolution de la déformation verticale ε_v au cours de la phase de consolidation pour différentes teneurs massiques en granules de caoutchouc GC allant de 0% à 40%.

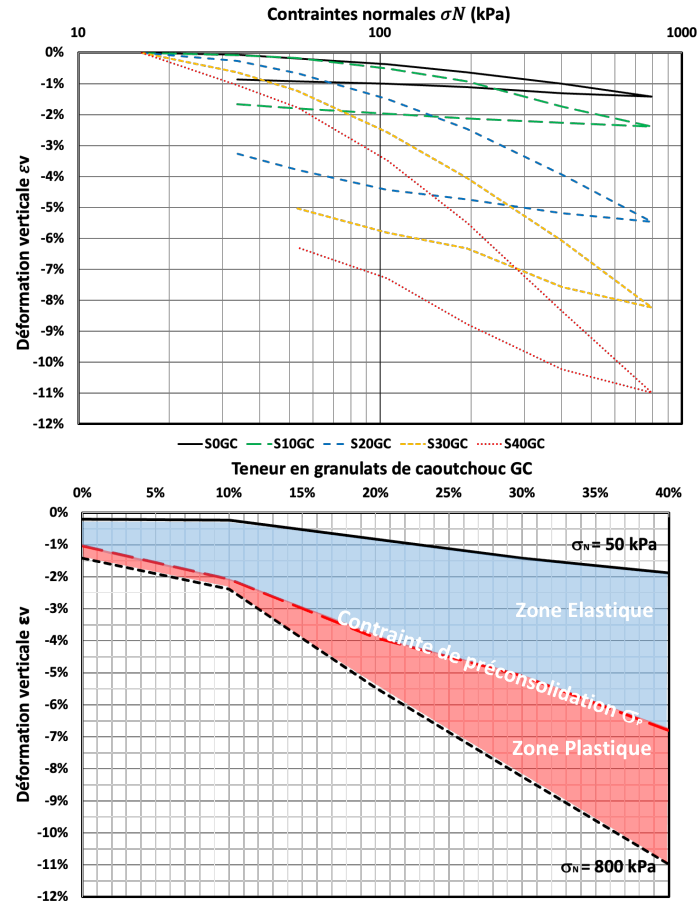


FIGURE 3. Déformation verticale ε_v en fonction de la contrainte normale σ_N pour différentes teneurs massiques en granules de caoutchouc GC et des teneurs massiques en granules de caoutchouc GC pour une densité relative initiale $D_r = 55\%$

Les résultats montrent que la compressibilité des mélanges sable-caoutchouc augmente avec la teneur en granules de caoutchouc avec un élargissement notable des domaines d'élasticité et de plasticité. Pour une teneur en granulat de caoutchouc inférieure à 10 %, on constate que la déformation verticale reste quasiment constante pour une faible contrainte verticale de 50 kPa et une légère variation de cette dernière pour une contrainte de 800 kPa qui due au réarrangement des grains dans le mélange pendant le chargement. En revanche, pour une teneur en granulat de caoutchouc au-delà de 10%, le mélange sable-caoutchouc subit des déformations plus importantes, en raison des propriétés élastiques du caoutchouc. Les figures 4 illustrent les variations de la contrainte de préconsolidation σ_p ainsi que des indices de compression C_c et de gonflement C_s pour différents mélanges sable-caoutchouc. L'ajout de granulat de caoutchouc dans le sable HN31 entraîne une diminution linéaire de la contrainte de préconsolidation σ_p . A titre d'exemple, la contrainte de préconsolidation pour $GC = 40\%$ est égale à 85% de celle du sable pur. Par ailleurs, les indices de compression C_c et de gonflement C_s croissent également linéairement avec l'augmentation de la teneur massique en granules de caoutchouc. Vis-à-vis de la consolidation des mélanges sable – caoutchouc, cette étude expérimentale montre que le potentiel de déformation devient non négligeable au-delà de 10% de teneur massique en granules de caoutchouc. Même si

les grains de caoutchouc augmentent les propriétés élastiques du sable tout en limitant leurs incidences sur la contrainte de préconsolidation, le potentiel de gonflement des mélanges apparaît comme un paramètre important à prendre en compte pour les l'étude de l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol par ajout des granulats de caoutchouc.

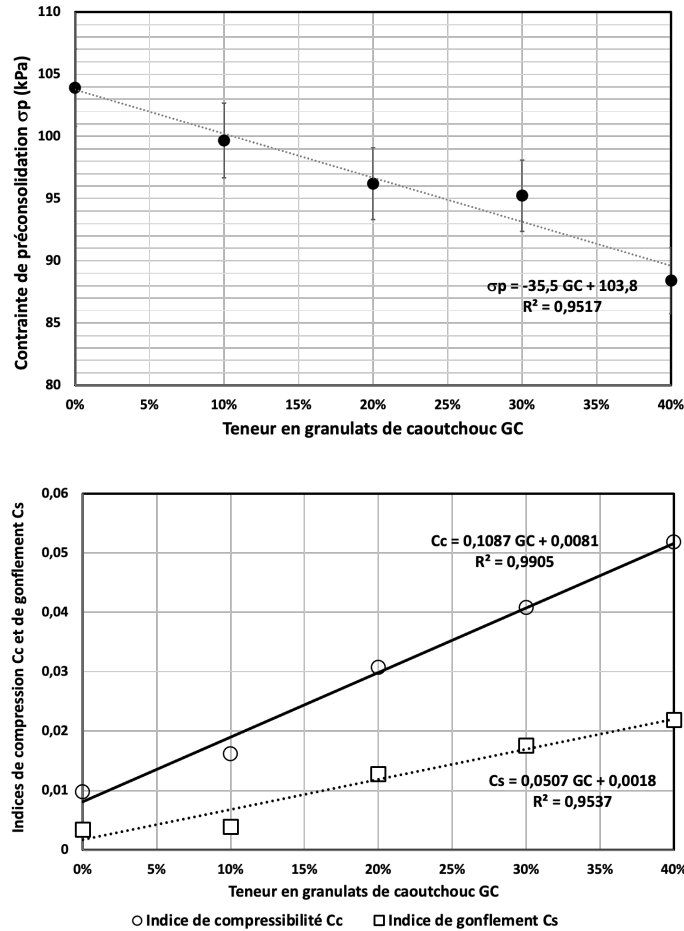


FIGURE 4. Variation de la contrainte de préconsolidation σ_p et des indices de compression C_c et de gonflement C_s pour différents mélanges sable-caoutchouc

B. Phase de cisaillement direct

Dans un second temps, des essais de cisaillement direct ont été réalisés sur les mélanges sable – caoutchouc sous des contraintes normales $\sigma_N = 50, 100, 200, 400$ et 800 kPa après la phase de déchargement. Les figures 5 montrent l'effet de l'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance au cisaillement τ des mélanges sable-caoutchouc sous une contrainte normale de 100 kPa (figure 5(a)) et les contraintes maximales de résistance au cisaillement τ_{max} en fonction de la teneur massique de granulats de caoutchouc et sous différentes contraintes normales de 50 kPa à 800 kPa (figure 5(b)).

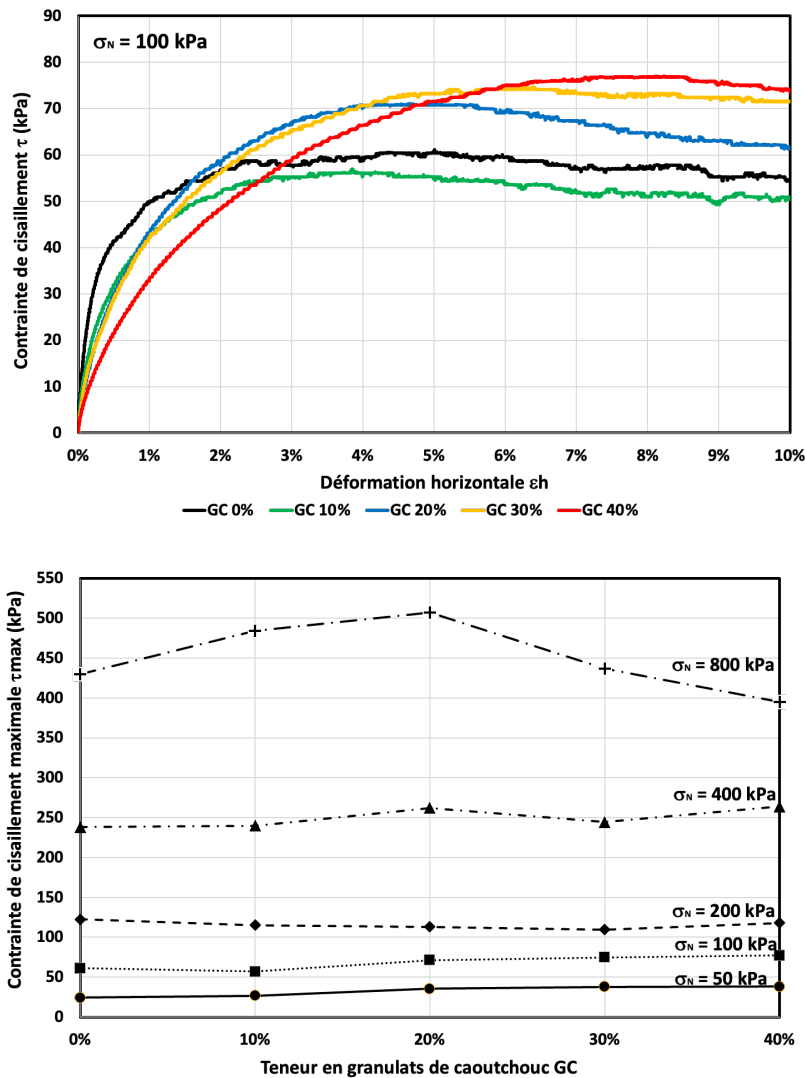


FIGURE 5. Résistance au cisaillement τ des mélanges sable-caoutchouc sous une contrainte normale $\sigma_N = 100$ kPa et contrainte maximale de résistance au cisaillement τ_{max} en fonction de la teneur massique de granulats de caoutchouc GC sous différentes contraintes normales σ_N de 50 kPa à 800 kPa

Un pic de la contrainte de cisaillement est observé pour tous les mélanges sable-caoutchouc sous une contrainte normale de 100 kPa. On remarque également que la contrainte de cisaillement augmente avec la teneur en caoutchouc, atteignant jusqu'à 40 %. L'ajout de caoutchouc aux particules de sable améliore la résistance au cisaillement par rapport au sable pur. Toutefois, la déformation de cisaillement associée à la contrainte maximale de cisaillement augmente avec la teneur en caoutchouc. La figure 5 montre une augmentation de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc, pour des contraintes normales de 50 et 100 kPa. Cette augmentation est due à la présence accrue de caoutchouc dans le plan de rupture, ce qui accentue l'effet du frottement caoutchouc-caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable. En effet, sous l'application de la contrainte normale, les granulats de

caoutchouc interagissent avec le sable et contribuent à une redistribution des efforts au sein de la structure granulaire, ce qui améliore la résistance au cisaillement du mélange sable-caoutchouc. Les particules de caoutchouc agissent ici comme des éléments de remplissage, améliorant l'emboîtement et la résistance de cisaillement globale du mélange, tout en conservant une bonne flexibilité. Ces observations sont en accord avec les conclusions de Enquan & Qiong, 2019, qui soulignent le rôle bénéfique des particules de caoutchouc dans l'amélioration des propriétés de cisaillement des mélanges sable-caoutchouc à faibles niveaux de confinement. Dans le cas d'une contrainte normale élevée, entre 400 et 800 kPa, la résistance maximale au cisaillement atteint un pic pour une teneur en granulats de caoutchouc de 20 %.

Toutefois, au-delà de ce seuil, elle diminue. Ce phénomène est cohérent avec les observations rapportées par Benjelloun et al. (2021), qui révèlent qu'à haute pression, l'effet amortissant et compressible des granulats de caoutchouc devient prépondérant, réduisant par la suite l'efficacité des transferts d'efforts entre grains de sable rigides. L'ajout excessif de caoutchouc engendre ainsi la perte de rigidité du mélange affectant sa capacité portante, ce qui s'explique par la capacité du caoutchouc à se déformer et à dissiper la force de cisaillement appliquée.

Un cas particulièrement intéressant est observé au niveau de la contrainte normale de 200 kPa, où la contrainte de cisaillement maximale semble relativement stable quel que soit le taux de granulats de caoutchouc ajouté. Ce passage suggère une zone dite de transition entre deux régimes mécaniques différents. A ce niveau de confinement, les effets bénéfiques du caoutchouc (amélioration de la déformabilité, dissipation d'énergie) et ses effets limitants (baisse de rigidité et de frottement interne) semblent s'équilibrer. Ce point est étayé par les travaux de Al-Rkaby (2019), qui identifient des seuils de transition semblables dans mélanges sable-caoutchouc, où les effets combinés de la dilatance, de la compressibilité et de la friction aboutissent à un comportement quasi-neutre.

Les droites de rupture montrent une variation en fonction du pourcentage de granulats de caoutchouc ajouté au sable (figure 6(a)), ce qui influence la résistance au cisaillement et l'angle de frottement du mélange. La figure 6(b) indique que l'angle de frottement augmente avec l'ajout de caoutchouc, l'angularité des granulats de caoutchouc contribuant à cette augmentation. Cependant, lorsque la proportion de caoutchouc devient trop élevée, l'angle de frottement diminue. Cela est dû à un excédent de caoutchouc par rapport au sable dans la zone de cisaillement, ce qui entraîne une réduction du frottement à l'interface sable-sable et sable-caoutchouc.

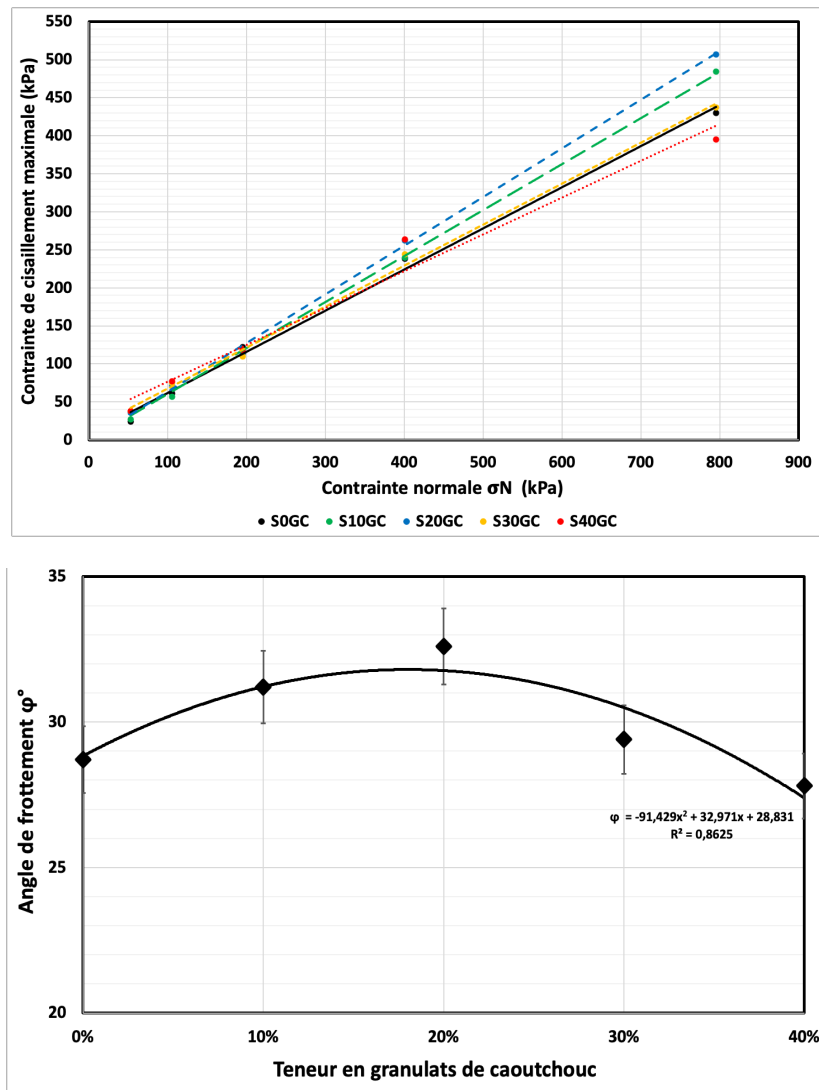


FIGURE 6. Contrainte maximale de résistance au cisaillement τ_{max} en fonction de la contrainte normale σ_N sous différentes teneurs en granulats de caoutchouc GC et angle de frottement en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc GC .

IV. CONCLUSION

Dans le cadre de cette étude, des essais de cisaillement direct ont été menés sur une série de mélanges sable-granulats de caoutchouc à l'état sec et à une densité relative initiale moyenne ($D_r = 55\%$), dans le but d'évaluer leur comportement physique et mécanique et pour examiner leur potentiel en tant que matériau léger pour des applications en génie civil. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les indices de vide maximum et minimum diminuent progressivement avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc concassés, ce phénomène s'explique par la compacité relative des mélanges améliorée par l'introduction de particules souples et irrégulières.

- La compressibilité des mélanges sable-caoutchouc augmente avec la proportion de caoutchouc ajoutée, en raison de caractère déformable et hyper-élastique des granulats de caoutchouc.
- Les indices de compression et de gonflement augmentent de manière quasi-linéaire avec la teneur en caoutchouc dans le mélange, mettant en évidence une plus grande sensibilité à la charge et à la détente mécanique dans les mélanges enrichis en polymères. En parallèle, l'ajout des granulats Technigom dans le sable entraîne une baisse de la contrainte de préconsolidation, traduisant une moindre résistance initiale à la déformation sous charge.
- La résistance au cisaillement montre un comportement un peu spécial dépendant du chargement initial. Sous des faibles contraintes normales (< 100 kPa), la résistance au cisaillement augmente avec l'ajout de granulats de caoutchouc, grâce à une meilleure redistribution des efforts et à l'effet amortisseur de caoutchouc au sein de la matrice granulaire. De l'autre cote, sous des fortes contraintes normales (> 400 kPa), la résistance au cisaillement révèle un optimum pour une teneur en granulats de caoutchouc d'environ 20%, au-delà duquel les propriétés du caoutchouc semblent entraîner une perte de rigidité globale du système. Entre les deux cas de chargement, la résistance semble intouchée par le taux de caoutchouc ajouté ce qui indique un équilibre entre les caractéristiques élastiques du caoutchouc et le comportement rigide du sable.
- L'angle de frottement montre aussi un optimum pour un pourcentage de 20% en teneur massique des granulats de caoutchouc ajoutés.

Ainsi, les mélanges sable-granulats de caoutchouc ont un grand potentiel technique comme matériaux géotechniques innovants, légers et recyclés. Leur comportement mécanique, flexible selon les conditions de chargement et la proportion de caoutchouc, les rend adaptés à une variété d'applications telles que les remblais allégés, les couches de fondation, les murs de soutènement, et potentiellement dans des solutions d'atténuation des vibrations ou de liquéfaction sismique. Au-delà des performances mécaniques, l'emploi de granulats de caoutchouc dans les projets de génie civil s'inscrit pleinement dans une logique de transition écologique, en contribuant à la valorisation des déchets de pneus usagés, à la réduction des volumes enfouis ou incinérés, et à la promotion de l'économie circulaire dans le secteur de la construction.

REFERENCES

- [1] . Al-Rkaby, A. H. J. (2019). Strength and Deformation of Sand-Tire Rubber Mixtures (STRM) : An Experimental Study. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41(2), 74-80. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0007>
- [2] . Benjelloun, M., Bouferra, R., Ibouh, H., Jamin, F., Benessalah, I., & Arab, A. (2021). Mechanical Behavior of Sand Mixed with Rubber Aggregates. *Applied Sciences*, 11(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/app112311395>
- [3] . Clauzade, C., Hugrel, C., Palluau, M., & Osset, P. (2012). Analyse des cycles de vie de différentes voies de valorisation des pneus usagés non réutilisables (PUNR) : Le point de

- vue du commanditaire : retour d'expérience et valeur ajoutée des travaux. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, N° 66(2), 49-56. <https://doi.org/10.3917/re.066.0049>
- [4] . Contreras-Marín, E., Anguita-García, M., Alonso-Guzmán, E. M., Jaramillo-Morilla, A., Mascort-Albea, E. J., Romero-Hernández, R., & Soriano-Cuesta, C. (2021). Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls. *Applied Sciences*, 11(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app11136159>
- [5] . Enquan, Z., & Qiong, W. (2019). Experimental Investigation on Shear Strength and Liquefaction Potential of Rubber-Sand Mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 5934961. <https://doi.org/10.1155/2019/5934961>
- [6] . Forcellini, D., Chiaro, Gabriele, Palermo, Alessandro, Banasiak, Laura, & Tsang, H.-H. (2024). Energy Dissipation Efficiency of Geotechnical Seismic Isolation with Gravel-Rubber Mixtures : Insights from FE Non-Linear Numerical Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(9), 2422-2439. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2312915>
- [7] . Liu, F., Li, H., & Sun, H. (2023). Effect of rubber-sand particle size ratio on shear properties of rubber-sand mixtures under normal cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 406, 133415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133415>
- [8] . Liu, L., Cai, G., Zhang, J., Liu, X., & Liu, K. (2020). Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering : A compressive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 126, 109831. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109831>
- [9] . S. Bali Reddy, Pradeep kumar dammala, & A. Murali Krishna. (2014). Evaluation of sand - tire chip mixture properties for sustainable geotechnical applications. *American Society of Civil Engineers*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001335).
- [10] . Sağlam, D., & Tonaroğlu, M. (2025). Investigation of Geotechnical Seismic Isolation Systems Based on Recycled Tire Rubber-Sand Mixtures. *Applied Sciences*, 15(4), 2133. <https://doi.org/10.3390/app15042133>
- [11] . Schneider, K., de Hoogd, M., Madsen, M. P., Haxaire, P., Bierwisch, A., & Kaiser, E. (2020). ERASSTRI - European Risk Assessment Study on Synthetic Turf Rubber Infill – Part 1 : Analysis of infill samples. *Science of The Total Environment*, 718, 137174. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137174>