

CARACTÉRISATION DES PLAQUETTES DE PNEUS POUR LEUR VALORISATION EN REMBLAI ALLÉGÉ

CHARACTERIZATION OF TIRE-DERIVED AGGREGATES FOR USE AS LIGHTWEIGHT EMBANKMENT FILL

Samer GHOSN^{1,2}, Laurent BRIANÇON¹, Jean-Philippe FAURE²

¹ INSA Lyon, Laboratoire GEOMAS, Lyon, France

² ALIAPUR

RÉSUMÉ – Les sociétés ALIAPUR et FRP produisent des plaquettes de caoutchouc type Draingom issues du recyclage des pneumatiques et ont souhaité caractériser ce matériau en vue d'une utilisation en remblai allégé et/ou technique. Dans ce cadre, des essais ont été réalisés au laboratoire GEOMAS de l'INSA Lyon pour caractériser ce matériau en termes de poids volumique, densité, paramètres de cisaillement, et compressibilité.

ABSTRACT – The companies ALIAPUR and FRP produce tire-derived aggregates (TDA) resulting from the recycling of used tires and wished to characterize this material with a view to use it as lightweight embankment fill. Within this framework, tests were carried out in the GEOMAS laboratory at INSA Lyon to characterize this material in terms of unit weight, density, shear parameters, and to study its compressibility.

1. Introduction

ALIAPUR et FRP sont des sociétés spécialisées dans la collecte, le recyclage et la valorisation des pneus usagés en France. En 2020, 355000 tonnes de pneus ont été collectées par ALIAPUR (ALIAPUR, 2021). Parmi les différents types de valorisation de pneus usagés, ALIAPUR et FRP produisent des plaquettes de caoutchouc issues du recyclage des pneumatiques et ont souhaité caractériser ce matériau en vue d'une utilisation en remblai allégé et/ou technique.

Dans ce cadre, les sociétés se sont rapprochées du laboratoire GEOMAS de l'INSA Lyon pour étudier le comportement de ce matériau. L'objectif est de réaliser des tests de caractérisation sur les plaquettes de pneus et d'établir leurs caractéristiques géotechniques en remblais. Pour cela, des appareils d'essai de grandes dimensions, adaptés à ce type de matériaux constitués de gros éléments, ont été utilisés et adaptés à ce géo-matériau.

Les plaquettes de pneus possèdent des propriétés qui les rendent adaptées à un certain nombre d'applications de génie civil. Leur poids léger les rend appropriés pour remplacer les matériaux de remblai conventionnels en réduisant les efforts dans les remblais, les murs de soutènement, les culées de pont et les zones de glissement de terrain (Cheng, 2016). Les caractéristiques viscoélastiques des plaquettes de pneus en font un bon matériau pour l'amortissement des vibrations ferroviaires et éventuellement les utiliser pour des applications sismiques. Les plaquettes de pneus sont également très perméables, ce qui en fait un bon matériau de drainage. C'est également un matériau très durable : il n'est pas biodégradable et ne perd pas ses propriétés mécaniques.

Dans les remblais, les plaquettes de pneus pèsent la moitié à un tiers du poids d'un matériau de remplissage conventionnel et produisent donc des pressions plus faibles sur le matériau sous-jacent. Cela réduit la quantité de tassement qui se produira dans les zones de sols de fondation faibles et réduit également le risque de rupture d'un remblai en raison des effets de pressions verticales excessives. Étant donné que les plaquettes sont

également drainantes, leur utilisation comme remblai réduira considérablement la possibilité de rupture due à une couche de fondation saturée.

Dans cette étude, les résultats des essais visant à déterminer le poids volumique, l'indices des vides, la densité, l'absorption et les paramètres de cisaillement des plaquettes de pneus sont présentés, en plus des résultats de l'essai de compressibilité.

2. Synthèse bibliographique

Comme déjà indiqué, l'utilisation des plaquettes de pneus en remblais présente de nombreux avantages potentiels, et plusieurs études ont caractérisé leurs propriétés géotechniques.

Les plaquettes de pneu sont des matériaux largement compressibles et, pour cela, leur poids volumique peut changer considérablement pendant la construction. Le poids volumique des plaquettes augmente avec la mise en place et le compactage, puis augmente encore avec l'application d'une contrainte verticale de surcharge. Humphrey et al. (1993) ont trouvé que le poids volumique non compacté du matériau en vrac est $3,35 \text{ kN/m}^3$, et le poids unitaire compacté avec un effort équivalent à 60 % de l'effort Proctor normal était de $6,07 \text{ kN/m}^3$. Ahn et al. (2015) ont rapporté que les poids volumiques non compactés varient entre $3,30$ à $4,90 \text{ kN/m}^3$, et les poids volumiques compactés varient entre $4,47$ et $6,92 \text{ kN/m}^3$.

Humphrey et al. (1992) ont mesuré la densité et l'absorption des plaquettes de pneus. Les résultats ont donné des valeurs variantes entre 1.01 et 1.05 pour la densité, et entre 2 et 4,3% pour l'absorption. D'autre part, Rodríguez-Abad et Estaire (2010) ont rapporté des valeurs de 1,25 pour la densité et de 3,9% pour l'absorption.

Les paramètres de résistance au cisaillement des plaquettes de pneus sont difficiles à déterminer car les essais de cisaillement nécessitent un appareil expérimental de grande taille pour s'adapter à la taille des plaquettes. Les plaquettes nécessitent également un large déplacement horizontal pour atteindre la résistance au cisaillement maximale (Ahn et al., 2015). Les données disponibles sur la résistance au cisaillement donnent une cohésion apparente entre 13 et 14 kPa, et un angle de frottement largement variable, entre 22 et 36°. Ghaaowd et al. (2017) ont constaté que l'enveloppe de la rupture interne en cisaillement est non linéaire, l'angle de frottement sécant diminuant de 39,6° à 30,2° lorsque la contrainte normale augmente de 19,5 à 76,7 kPa.

Différents chercheurs ont décrit la compression des plaquettes de différentes manières. Warith et al. (2004) l'ont décrit comme initialement plastique sous contraintes verticales, la compression plastique pouvant aller jusqu'à 40% de l'épaisseur de mise en place initiale, et ensuite la compression est élastique et dépendante de la réduction de la porosité. Ahmed et Lovell (1993) l'ont décrit comme consistant de trois mécanismes : le premier est le réarrangement des plaquettes résultant en une compression plastique minimale pendant le chargement initial ; le second est la flexion et l'aplatissement des plaquettes entraînant la majorité de la compression récupérable ; la troisième est la compression élastique des plaquettes (compression du volume solide des plaquettes), qui est minimale et entièrement récupérable.

Les tassements immédiats et à long terme des plaquettes de pneus doivent être considérés pour la conception en raison de la compressibilité élevée du matériau. L'ampleur du tassement immédiat peut être importante et dépend principalement de la taille des plaquettes, de l'épaisseur de la couche de plaquettes, et des conditions de contraintes appliquées. Pendant la construction, le tassement immédiat peut être compensé par l'ajout de remblais supplémentaires. Cependant, le tassement à long-terme peut également être important et influencer la performance. La majorité du tassement en fonction du temps se produit dans les 60 jours suivant la construction (Wartman et al., 2007).

Sur la base des études précédentes sur les plaquettes de pneus présentées ci-dessus, on peut conclure qu'il n'est pas simple de caractériser les propriétés des plaquettes en utilisant les appareils d'essais conventionnels utilisés pour la caractérisation des sols. Pour cela, des appareils d'essai de grandes dimensions, adaptés à ce type de matériaux constitués de gros éléments, seront utilisés et adaptés à ce géo-matériau.

3. Matériaux et méthodes

Les plaquettes de pneus qui seront utilisées dans cette étude proviennent du recyclage des pneus usagés non réutilisables (PUNR) des véhicules légers (VL). 80% des pneus collectés sont du VL, il est donc plus simple de fournir des quantités importantes pour les terrassiers sur cette catégorie. De plus, les pneus poids lourds (PL) ont des quantités de fils métalliques plus importantes et la qualité de coupe est donc plus complexes à réaliser. Les 3 composants du pneu sont encore présentes : caoutchouc, textile, métal.

Dans cette étude, les essais sont réalisés sur des plaquettes de format SMALL A. Ce format est celui qui est majoritairement produit et livré aujourd'hui pour toutes les voies de valorisations, il est donc aisément disponible.

Pour le SMALL A, plus de 85% des plaquettes sont entre 20 et 110 mm, plus de 97% des plaquettes sont inférieures à 125 mm et plus de 93% des plaquettes sont sans fils métalliques supérieurs à 20 mm. Le Tableau 1 résume les caractéristiques de ce format. Les valeurs présentées dans le tableau ont été établies à partir des retours d'expérience par les clients sur les formats sur les formats qui leur sont adaptés, et le contrôle de la distribution granulométrique des plaquettes a été fait suivant la norme XP T47-753 en utilisant un appareil développé par ALIAPUR (Figure 1.a) qui mesure automatiquement la plus grande longueur projetée des plaquettes sans déformation et hors barbules (excroissances métalliques) en traitant les images des échantillons de plaquettes.

Tableau 1. Caractéristiques du format SMALL A

Produits cisailés issus de PUNR de catégories A		SMALL A
PNC ^(a)	Plus de 85% \pm_3 des pièces dans classes centrales* *Classes 1,2,3,4,5,6	Classe 1 20 - 35 Classe 2 35 - 50 Classe 3 50 - 65 Classe 4 65 - 80 Classe 5 80 - 95 Classe 6 95 - 110 Classe 7 110 - 150 35-110 mm
PNG ^(b)	Moins de 3% \pm_2 des pièces supérieures à	125 mm
PMF ^(c)	Masse des fines (< à 20mm) inférieure à	10 %
PNB ^(d)	Moins de 7% \pm_1 des pièces ayant une barbule supérieure à	20 mm

^(a)PNC : Pourcentage en Nombre des plaquettes en classes Centrales, ^(b)PNG : Pourcentage en Nombre de pièces Grosses, ^(c) PMF : Pourcentage en Masse de la fraction Fine., ^(d)PNB : Pourcentage de pièces ayant une barbule dont la longueur est supérieure à ... mm

Les essais pour déterminer le poids volumique et l'indice des vides ont été réalisés sur des plaquettes de pneus placées dans un cylindre métallique d'un diamètre de 100 cm et d'une hauteur de 100 cm. L'essai a été fait pour des plaquettes de pneus non compactées

placées en vrac et pour des plaquettes compactées en couches de 20 cm avec un effort équivalent à 60% de l'effort Proctor normal.

Les essais pour déterminer la densité et l'absorption ont été faits suivant la norme NF EN 1097-6.

Les essais de cisaillement ont été réalisés sur des plaquettes de pneus placées dans une boîte de cisaillement composée d'une boîte inférieure de 46 cm de long, 30 cm de large et 20 cm de haut, et d'une boîte supérieure de 30 cm de long, largeur et hauteur étant identiques à la boîte inférieure (Figure 1.b). Pour le cisaillement, la boîte supérieure est fixe et un déplacement horizontal est appliqué sur la boîte inférieure avec une vitesse constante de 4 mm/min et la force horizontale nécessaire pour imposer ce déplacement a été mesurée. Le déplacement horizontal maximal de la boîte est de 60 mm. L'essai a été réalisé pour trois contraintes verticales différentes : 10 kPa, 20 kPa et 30 kPa et l'essai a été répété 4 fois pour chacune d'entre elles, et pour des échantillons différents.

Les essais de compressibilité ont été réalisés sur des plaquettes de pneus placés sans compactage dans une boîte d'une longueur de 200 cm, d'une largeur de 100 cm et d'une hauteur de 100 cm (Figures 1.c, 1.d). La charge a été appliquée en utilisant un vérin pneumatique. La charge appliquée a été augmentée de 0 à 50 kPa avec paliers de charge de 10 kPa, puis diminuée jusqu'à 0 kPa suivant la même méthode. Le passage d'un palier de charge à l'autre a été fait lorsque la variation de tassement à la surface des plaquettes est inférieure à 0,1mm pour deux périodes consécutives de 10 minutes. Des capteurs de pression totale ont été installés au fond de la cuve sur les parois et entre les plaquettes et le vérin pneumatique. Un capteur de tassement a été placé à la surface des plaquettes, et un autre à mi-hauteur. Les contraintes et les tassements ont été enregistrés toutes les deux minutes.



Figure 1. Appareils expérimentaux utilisés pour cette étude

4. Résultats et discussions

4.1. Poids volumique et indice des vides

Les résultats des essais de poids volumique et indices des vides, présentés dans le Tableau 2, donnent des valeurs comparables à ceux trouvés dans la bibliographie. L'effet du compactage est considérable, puisque le poids volumique des plaquettes augmente

d'environ 35% et leur indice des vides diminue de plus que 40% lorsqu'elles sont compactées.

Tableau 2. Poids volumique et indice des vides des plaquettes de pneus

Sans compactage			Avec compactage		
	Poids volumique (kN/m ³)	Indices des vides		Poids volumique (kN/m ³)	Indices des vides
Essai 1	4,77	2,09	Essai 1	6,25	1,27
Essai 2	4,56	2,17	Essai 2	6,36	1,28
Moyenne	4,67	2,13	Moyenne	6,31	1,28

4.2. Densité et absorption

Les résultats de la mesure de la densité et l'absorption sont présentés dans le Tableau 3. L'absorption est dans le même intervalle que celui donné par Humphrey et al. (1992), alors que la densité est entre les valeurs données par Humphrey et al. (1992) et Rodríguez-Abad et Estaire (2010).

Tableau 3. Densité et absorption des plaquettes de pneu

	Densité	Absorption (%)
Echantillon 1	1,13	3,2
Echantillon 2	1,16	3,4
Moyenne	1,14	3,3

4.3. Paramètres de cisaillement

La Figure 2 présente les courbes typiques pour chaque charge verticale, et les résultats de tous les essais sont donnés dans le Tableau 4.

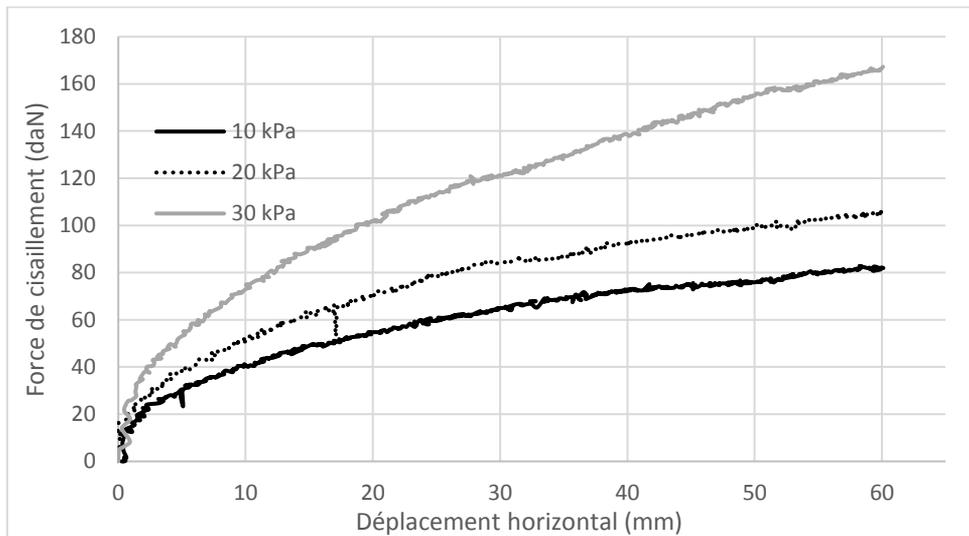


Figure 2. Courbes des forces de cisaillement en fonction du déplacement

Tableau 4. Résultats des essais de cisaillement

Contrainte verticale (kPa)		10	20	30
Force de cisaillement maximale (daN)	Essai 1	79,5	107	163
	Essai 2	82	101,8	172,2
	Essai 3	73,75	122,5	168,9
	Essai 4	90	106,5	152,5
	Moyenne	81,31	109,45	164,15
Contrainte de cisaillement maximale τ_{max} (kPa)	Moyenne	9,03	12,16	18,24

Comme dans la majorité des études précédentes, les résistances maximales au cisaillement n'ont pas été atteintes et donc les résultats représentent les résistances mobilisées dans des conditions de service et non de rupture et peuvent être utilisées comme des estimations conservatives de la résistance au cisaillement pour l'analyse technique. En raison de la grande capacité de déformation de ces plaquettes, ces conditions peuvent être plus pertinentes pour la conception que les conditions de résistance maximale.

La détermination des paramètres de cisaillement est présentée dans la Figure 3. Les résultats montrent que les plaquettes de pneus ont une cohésion apparente $c = 3,9$ kPa et un angle de frottement $\phi = 24,7^\circ$. La cohésion apparente est due à l'engrènement des plaquettes lorsqu'elles sont sollicitées en cisaillement et l'angle de frottement est proche de l'enveloppe inférieure des valeurs trouvées dans la bibliographie.

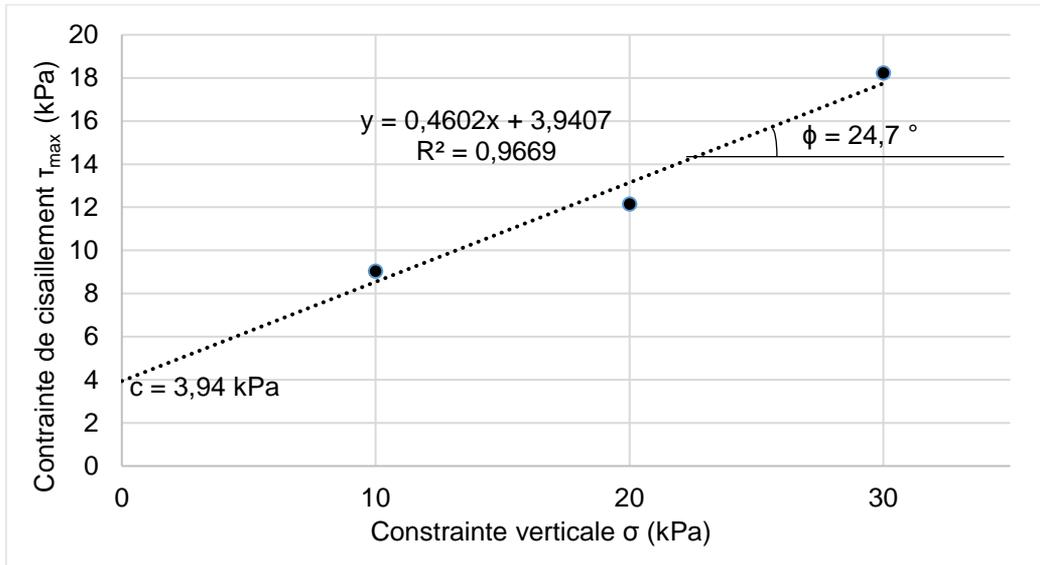


Figure 3. Détermination des paramètres de cisaillement

4.4. Compressibilité

Les tassements en fonction du temps dans la phase de chargement pour la couche inférieure (hauteur < 50 cm), couche supérieure (hauteur > 50 cm), et la hauteur totale sont présentés dans la Figure 4.

Les courbes présentent un tassement immédiat important lors de l'application de la charge, suivi par un tassement moins important avec le temps. Pour quantifier la compressibilité des plaquettes, le module M , défini comme le rapport entre la variation de la contrainte verticale et la variation de la déformation verticale ($M = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_v}$), a été calculé.

Les résultats présentés dans le Tableau 5 montrent que le module des plaquettes de pneu augmente presque linéairement avec l'augmentation de la charge verticale, ce qui est en accord avec les résultats de Ahn et al. (2015) qui ont proposé une équation linéaire qui prédit l'évolution du module des plaquettes de pneu en fonction de la contrainte verticale.

En plus, après déchargement total des plaquettes, un tassement résiduel d'environ 90mm a été constaté. Ceci confirme que la compressibilité des plaquettes de pneu est due à deux phénomènes, l'un élastique et l'autre plastique.

La contrainte verticale mesurée au fond de la boîte est presque égale à celle mesurée à la surface des plaquettes pour une charge de 10 kPa, puis la différence entre les deux augmente avec la charge, jusqu'à ce que la charge au fond atteigne 80% de celle à la surface pour une charge de 50 kPa. Figure 5 présente l'évolution de la contrainte horizontale σ_h en fonction de la contrainte verticale σ_v au fond de la boîte. Cette évolution est linéaire, avec un coefficient de poussé moyen $k = \sigma_h / \sigma_v = 0,46$.

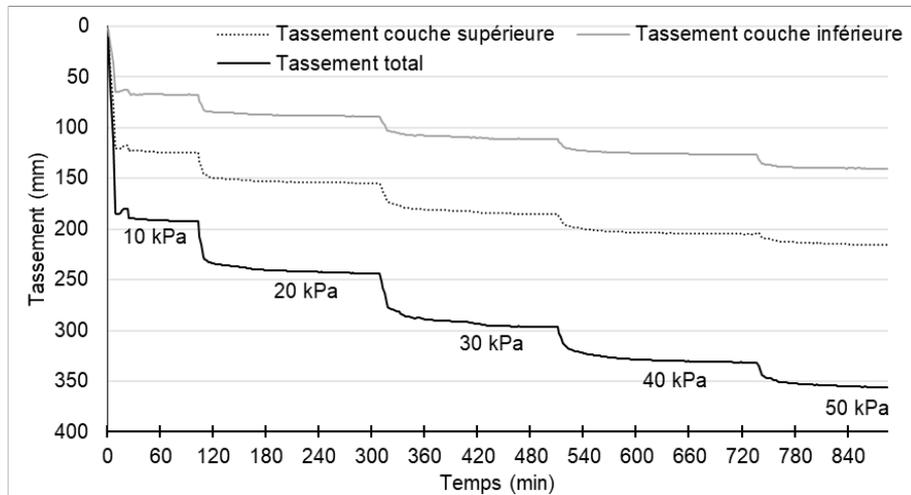


Figure 4. Tassement en fonction du temps, phase de chargement

Tableau 5. Résultats du module des plaquettes de pneus

Charge (kPa)	M pour couche supérieure (kPa)	M pour couche inférieure (kPa)	M pour hauteur totale (kPa)
10	40,04	73,75	51,90
20	64,63	112,09	81,99
30	80,99	134,36	101,06
40	97,62	157,91	120,66
50	116,16	177,76	140,50

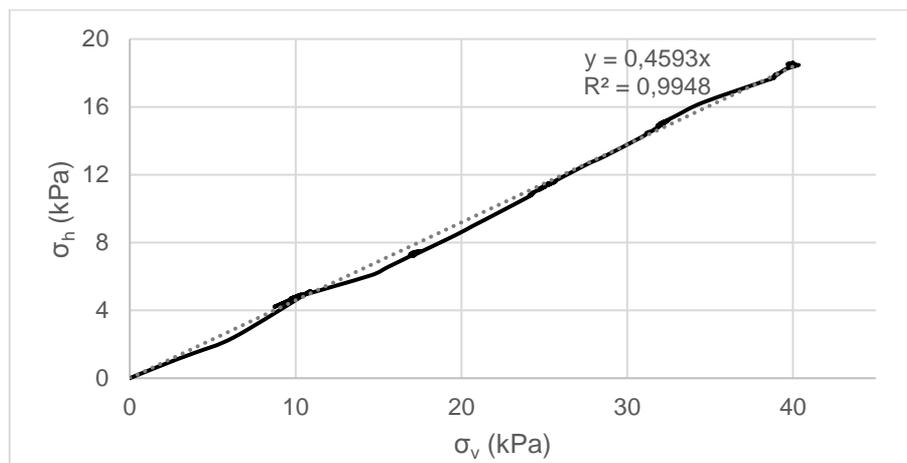


Figure 4. Evolution de la contrainte horizontale en fonction de la contrainte verticale

5. Conclusions

Cette étude avait comme objectif de déterminer les caractéristiques géotechniques des plaquettes de pneus usagés en vue de les utiliser en remblai allégés et/ou technique. Les essais réalisés ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les plaquettes des pneus non-compactées ont un poids volumique de $4,67 \text{ kN/m}^3$ et un indice de vides de 2,13. Ces valeurs deviennent $6,31 \text{ kN/m}^3$ et 1,28 pour les plaquettes compactées.

- Les plaquettes de pneu ont une densité intrinsèque moyenne de 1,14 et une absorption de 3,3%.
 - La cohésion apparente et l'angle de frottement des plaquettes sont 3,94 kPa et 24,7°. Ces valeurs correspondent à des conditions de service et non de rupture.
 - La compressibilité des plaquettes de pneus est divisée en deux parties : un tassement immédiat, suivi par un tassement avec le passage du temps et qui est moins important.
 - Le module des plaquettes des de pneu augmente linéairement avec la charge verticale appliquée.
 - Les plaquettes de pneu ont un coefficient de poussé $k = 0,46$.
- Des essais complémentaires seront réalisés pour vérifier l'incidence du compactage et de la taille des plaquettes sur ces résultats.

6. Références bibliographiques

- Abad-Rodriguez, R. and Estaire, J. (2010). "Geotechnical and environmental properties of tire-used shreds for use in civil construction." Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics, 8th-12th Nov., New Delhi, India
- Ahmed, I. and Lovell, C. W. (1993). Tire chips as permeable aggregate in landfills. In Proceedings of the 1st Annual Great Lakes Geotechnical/Geoenvironmental Conference, Toledo Section of the American Society of Civil Engineers, Toledo, USA, pp. 83-90.
- Ahn, I. S., Cheng, L., Fox, P. J., Wright, J., Patenaude, S., and Fujii, B. (2015). Material properties of large-size tire derived aggregate for civil engineering applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9).
- ALIAPUR (2021). L'essentiel, rapport d'activité 2020. www.aliapur.fr
- Cheng (2016). Usage guide for tired-derived aggregate, California Department of Resources Recycling and Recovery.
- Ghaaowd, I., McCartney, J. S., Thielmann, S. S., Sanders, M. J., and Fox, P. J. (2017). Shearing behavior of tire-derived aggregate with large particle size. I: Internal and concrete interface direct shear. *JGGE*, 143(10).
- Humphrey, D. N, and Sandford, T. C. (1993). Tire chips as lightweight subgrade fill and retaining wall backfill. In Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities Denver, Colorado October 19-22, Vol 5, pp 87-99.
- Humphrey, D.N. and Eaton, R.A. (1993). Tire chips as subgrade insulation – field trial. In Proceedings of the Symposium on Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities, Federal Highway Administration, Denver, Colorado, USA, pp. 5-55 - 5-68.
- NF EN 1097-6 (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- Warith, M. A., Evgin, E., and Benson, P. A. (2004). Suitability of shredded tires for use in landfill leachate collection systems. *Waste Management*, 24(10): 967–979.
- Wartman, J., Natale, M. F., and Strenk, P. M. (2007). Immediate and time dependent compression of tire derived aggregate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(3): 245-256.
- XP T47-753 (2007). Pneus usagés non réutilisables (PUNR) - Détermination du format des produits issus du broyage primaire - Méthode basée sur la mesure automatisée de la plus grande longueur projetée.