Réponse au défi de la valorisation des déchets de pneus; comportement mécanique et modélisation numérique de mélanges de copeaux de pneus - sol

Philippe Gotteland — Stéphane Lambert — Christophe Salot — Pascal Villard

Lirigm, UJF 1381 rue de la piscine, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9 philippe.gotteland@ujf-grenoble.fr

RÉSUMÉ. Le problème du stockage des pneus usagés est un challenge important auquel doivent faire face les gestionnaires de déchets. Les déchets de pneus ont de multiples propriétés qui doivent permettre leur réutilisation dans l'ingénierie civil et géotechnique. L'article présente les résultats d'un programme de recherche engagé afin d'étudier le comportement mécanique de copeaux de pneus en association avec des sables (composites CP-S). L'étude expérimentale se base sur des essais de comportement à la cellule triaxiale de grande taille (150*300mm). Un modèle élément discret reproduisant le comportement du composite CP-S permet d'appréhender le comportement du matériau sur la base d'essais de caractérisation numérique de type TRX tri-tri, ou axisymétrique.

ABSTRACT. Problem of end of life tires deposit is a huge challenge for society. Due to their properties, waste tires are of interest to be re-used in civil or geotechnical engineering. Paper presents results from a research program aims at investigating the mechanical behaviour of tire ship –sand mixtures (CP-S composite). Experimental study consists in triaxial tests campaign with large cell (150*300mm). Discrete element modelling built to model the CP-S composite was calibrate on TRX tests tri-tri, or axisymetric.

MOTS-CLÉS : Déchets de pneus, réutilisation, mélanges, comportement mécanique, essais de laboratoire, modélisation

KEYWORDS: End of life tires, Reusing, mixtures, mechanical behaviour, laboratory tests, modelling

AUGC 2006- Nîmes- 1 et 2 juin 2006

2 AUGC 2006- Nîmes- 1 et 2 juin 2006

1. Introduction

Le problème du stockage des pneus usagés est un challenge important auquel doivent faire face les gestionnaires de déchets. Ceci est particulièrement vrai dans les pays économiquement développés où il existe déjà des stocks de vieux pneus en proportion alarmante. Compte tenu de leur non décomposition, les déchets de pneus et leur méthode de stockage conventionnelle ont un effet néfaste sur l'environnement, et plus largement sur la santé publique : ils occupent une large place dans les centres de stockage de classe 2 (CSD2) ce qui induit un coût important, leur mode de stockage en vrac reste très sensible au risque incendie, ces stocks sont propices à la prolifération des rongeurs et moustiques compte tenu de la grande quantité de vide et de poches susceptibles de retenir de l'eau.

C'est dans ce contexte que l'Union Européenne, par sa directive 1999/31/EC d'avril 1999, a incité tous ses membres à valoriser les résidus de pneus. Depuis juillet 2002 cette incitation est devenue par décret une exigence en France par l'interdiction de mise en décharge des pneus usagés. Les enjeux sont importants et représentent un défi. En France, la mise en place d'une taxe spécifique à l'achat (supportée par le consommateur) oblige les fabricants à mettre en place un système de collecte de ces résidus et à en assurer la valorisation ultérieure. Une entreprise (ALIAPUR) a été créée pour assurer la coordination. Ceci a pour conséquence de trouver de nouvelles pistes pour le recyclage de ces pneus en fin de vie, pistes autres que l'incinération comme combustible additionnel dans les fours de cimenterie (Edeskar 2004).

Les déchets de pneus ont de multiples propriétés qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique, tout particulièrement des travaux publics: durabilité, faible densité et forte porosité des mélanges, forte résistance des inclusions, propriétés de frottement fortes, non ou faible sensibilité à l'eau, faible conductivité thermique des mélanges,...Les mélanges peuvent se faire avec des matériaux granulaires non cohérents (Sables et Graviers), des matériaux cohérents (Argiles et Limons), des matériaux anthropiques tels que les MIOM. La recherche de débouchés en Travaux Publics a été et reste une piste de développement investiguée (Figures 1 et 2).



Figure 1. Applications de résidus de vieux pneus entiers : a) stabilisation de talus, b) protection érosion de berges, c) protection côtière

Comportement mécanique et modélisation numérique de mélanges CP-Sable 3



Figure 2. Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée,

a) sans mélange b) en mélange

L'article présente les résultats d'un programme de recherche engagé afin d'étudier le comportement mécanique de copeaux de pneus en association avec des sables (composites CP-S). L'objectif opérationnel est la réutilisation de ces composites comme matériaux de construction « d'ouvrages en terre ». Ainsi sont envisagés des remblais de masse ou de manière plus ciblée des éléments structurels de procédés de construction modulaires (technique cellulaire par exemple) en utilisant les propriétés adaptées (légèreté, grande déformation sous forte sollicitation, mélanges dissipant,...) de tels composites.

2. Matériaux

2.1. Copeaux de pneus

Les déchiquetés de pneus sont définis dans l'agrément CEN - CWA 14243. Ils consistent en morceaux de pneus usagés découpés suivant des méthodologies différentes pour arriver à des formes plus ou moins grossières. On distingue les déchiquetés grossiers (de forme plus ou moins allongés, découpés de manière plus ou moins franche, la structure métallique est visible ou non), les déchiquetés fins, bien découpé de formes rectangulaire ou circulaire, de taille plus petite. Les copeaux utilisés pour l'étude sont produits par poinçonnement de matrice circulaire. Le résultat est des copeaux circulaires, ou de partie circulaire, avec ou sans fils métalliques extérieurs (Figure 3). Pour l'étude, nous avons retenu uniquement des éléments circulaires pour lesquels nous avons coupé tous les fils métalliques extérieurs. Ce choix est fait pour pouvoir comparer les essais entre eux, et pour limiter les risques de détérioration des matériels. Le poids volumique moyen d'un copeau est de 13.3 kN/m3, en accord avec la bibliographie (Reddy et al. 2001).

4 AUGC 2006- Nîmes- 1 et 2 juin 2006



Figure 3. Copeaux CP sortis des presses de découpage, diamètre moyen 30mm

2.2. Sable

Deux types de sable ont été investigués : un sable normalisé (Hostun S28) et un sable de Seine représentatif d'un sable opérationnellement utilisable sur un chantier réel. Nous présenterons ici les résultats sur sable de Seine, classé D1 dans le GTR. Sable de la baie de Seine, il s'agit d'un sable roulé, qui contient quelques coquillés. Tamisé à 5mm, le poids volumique d'utilisation est de 17 kN/m3.

2.3. Mélanges

Différents types de mélange ont été réalisés. Des arrangements ou les copeaux étaient placés de manière aléatoire (quelconque) sans orientation préférentielle (NO), placés horizontalement ou placés verticalement dans l'échantillon manuellement. Afin de limiter les risques de dégradation des membranes des essais TRX, des copeaux sans acier (issus des bandes latérales des pneus) sont placés à la périphérie de l'échantillon. Le pourcentage de pneus inclus a varié, afin d'étudier l'influence sur le comportement. La densité du mélange varie en fonction du ratio sable / copeaux des mélanges.

2. Essais

Des essais triaxiaux Consolidés Drainés ont été menés sur échantillon sec suivant la norme NFP 94-074, à une vitesse de 2mm/m. La variation de volume de l'échantillon se fait par mesure externe indirecte. Compte tenu de la taille moyenne des copeaux (30mm de diamètre) une cellule de diamètre 150mm et de hauteur 300mm est utilisée. Les contraintes de confinement restent faibles (50, 75, 100 kPa) représentatives du niveau de sollicitation atteint dans des ouvrages d'une hauteur de 5 à 6m. L'obtention de la contrainte déviatoire ne tient pas compte de la variation de section des échantillons comme le préconise la norme. En effet l'aspect composite hétérogène du matériau induit des déformations très variables, et pour comparaison des échantillons et des résultats il a été décidé de se baser sur la section initiale. L'angle de frottement et la cohésion sont déterminés. Un angle de frottement équivalent est déterminé en posant la cohésion nulle (Gotteland et al. 2005).



Figure 4. *a) Vue de la mise en place des copeaux, échantillons après sollicitation TRX b) NO 50kPa c) NO 75 kPa*

4. Principaux résultats

Même si parfois des plans de rupture peuvent être visualisés, les échantillons menés à rupture (Figure 4) montrent une rupture diffuse au sein du composite. La proportion de CP affecte grandement la contrainte déviatoire (Figure 5a) et la variation de volume associée (Figure 5b). On observe un comportement très différent pour le sable seul, et les CP seul pour qui le comportement quasi linéaire est retrouvé (Zornberg et al. 2004) et le module initial (790kPA) est légèrement plus faible que celui déterminé à partir de la bibliographie (Yang et al. 2002). En fonction du ratio de CP le comportement évolue. On observe (Figure 5c) qu'un pourcentage optimum en CP ne doit pas excéder 50% afin de ne pas diminuer la résistance à la rupture. L'optimum de densité est de 13.2 kN/m³ (Figure 5d), correspondant au ratio en CP de 35%, reportée dans la littérature (Zornberg et al. 2004, Youwai and Bergado, 2003). Le pic n'étant pas très marqué, un ratio de 20 à 40 % semble acceptable.

5. Modélisation numérique

Une modélisation par la méthode des éléments discrets (MED) est retenue. La méthode représente un milieu granulaire modèle constitué d'éléments qui se déplacent indépendamment les uns des autres. Ces déplacements sont calculés à partir de la discrétisation dans le temps des équations de la dynamique. L'approche utilisée est ici celle de la dynamique moléculaire, développée par Cundall *et al.* 1992, qui considèrent que les éléments interagissent ponctuellement selon une loi de contact élastique. La loi de contact adoptée est caractérisée par des paramètres locaux dits micro-mécaniques. L'élasticité est caractérisée par une raideur normale k_n et une raideur tangentielle k_s . L'effort normal F_n exercé entre les deux particules i et j de rigidités k_{ni} et k_{nj} , est relié à l'interpénétration d_n par l'équation 1.

$$F_n = k_n d_n \text{ où } k_n = k_{ni} k_{ni} / (k_{ni} + k_{ni})$$
 équation (1)



Figure 5. Influence du ratio de CP sur le comportement (échantillons NO 75 kPa), a) contrainte déviatoire, b) variation volumique ; Influence du contenu en copeaux c) et du poids volumique du mélange d) sur les caractéristiques de résistance à la rupture (échantillons NO, 75 kPa)

La variation de l'effort tangentiel ΔF_s est évaluée à partir de l'incrément de déplacement tangentiel Δd_s par l'équation 2.

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta d_s \text{ où } k_s = k_{si} \cdot k_{sj} / (k_{si} + k_{sj})$$
 équation (2)

Une loi de frottement de type Coulomb caractérisée par un angle de frottement intergranulaire ϕ_i limite la force tangentielle au niveau des contacts par l'équation 3.

$$|F_s| \le \tan(\phi_i) \cdot F_n$$
 équation (3)

La forme des éléments constituant le modèle a une influence sur la réponse du modèle. Des éléments non sphériques sont créés par collage d'éléments sphériques (cluster), afin de conserver des temps de calcul rapides pour la recherche de contacts. Les éléments résultant sont formés de 2, 3, 4 ou 5 sphères (Figure 6a). Il ne s'agit pas de reproduire la forme exacte des grains et de reproduire le comportement microscopique mais de jouer sur la forme pour aboutir à des réponses

macroscopiques du modèle en accord avec ceux observés à l'échelle d'un échantillon représentatif. Le principe de la constitution des échantillons et de la réalisation des essais numériques sont développés dans Salot et al. 2006. Pour la modélisation numérique les CP sont modélisés par des clusters tels que présentés (Figure 6b). Les paramètres micromécaniques et géométriques des matériaux sont calés indépendamment. Les constituants sont en même proportion que l'expérimentation. Les échantillons numériques sont présentés (Figure 7). On apprécie la capacité du modèle à reproduire les résultats expérimentaux (Figure 8). A terme, ce modèle doit permettre de développer une loi de comportement « homogénéisée » de tels composites.



Figure 6. Clusters a) pour modélisation du sable et b) des inclusions CP



Figure 7. Modèles MED pour essais TRX a) axisymétrique b) tri-tri

5. Conclusion

L'étude engagée sur le comportement de composites Copeaux de Pneus - Sable permet de montrer l'existence expérimentale d'un optimum sur la résistance et la densité associée du matériau composite. Ces résultats sont issus de campagnes d'essais triaxiaux sous faibles contraintes de confinement réalisés dans des cellules de grande taille. La modélisation numérique par MED montre des potentialités et permet d'entrevoir des modélisations à l'échelle d'un ouvrage ou de modules constitutifs d'ouvrages de type cellulaire. Ce travail, réalisé dans le cadre de la Fédération VOR, reprend partiellement les résultats du travail d'étudiants effectué dans le cadre de travaux ou projets de fin d'étude. Les auteurs les remercient et les associent.

8 AUGC 2006- Nîmes- 1 et 2 juin 2006



Figure 7. Réponse du modèle MED pour essais TRX tri-tri

6. Bibliographie

AFNOR, NF P 94 074 - Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution. 1994, AFNOR: Paris. p. 36.

Cundall P.A., Hart R, Numerical modelling of discontinua, 1992, Pineridge press, p. 101-113.

Edeskar T., Technical and environmental properties of tyre shreds focusing on ground engineering apllications, 2004, ISSN1402, tecvnical report, 88 p.

Gotteland p, Lambert S, Balachowski L, Strength characteristics of tyre chips-snad mixtures, Studia Geotechnica et Mechanica, 2005, Vol. XXVII, N°1-2, p. 55-66.

Reddy K.R. and Marella A. Properties of different scrap tire shreds: implications on using as drainage material in landfill cover systems. in The 7th International conference on solid waste technology and management. 2001. Philadelpia

Salot C, Chevalier B, Gotteland P, Villard P, Etude du comportement mécanique du milieu granulaire composite sable - gravier et modélisation numérique discrète, Bulletin du laboratoire des ponts, à paraître,

Yang S., Lohnes R.A., and Kjartanson H., Mechanical properties of shredded tires. Geotechical testing journal, 2002. 25(1): p. 44-52.

Youwai S. and Bergado D.T., Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures. Canadian Geotechnical Journal, 2003. 40: p. 254-264.

Zornberg J.G., Cabral A.R., and V. C., Behaviour of tire shred-sand mixtures. Canadian Geotechnical Journal, 2004. 41: p. 227-241.