



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

**Etude expérimentale sur le comportement
élastoplastique du matériau granulaire de
Bréfauchet à différents états hydriques
initiaux**

Auteur(s) / Organisme(s) :

Cyrille Chazallon – INSA DE STRASBOURG

Peng Jing – INSA DE STRASBOURG

Thème de rattachement :

Thème 1 – Mécanismes de dégradation des chaussées

DVDC/R/010(FR)

NLC/17/DVDC/13

Date 30/08/2018

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Eric LAYERLE et Christine LEROY

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	3
2 Introduction	3
3 Matériau étudié	4
3.1 Courbe granulométrique	4
3.2 Essai Proctor modifié	5
3.3 Courbe de rétention	6
4 Essais triaxiaux	9
4.1 Essais de cisaillement monotone	11
4.2 Essais triaxiaux à chargements répétés	11
4.3 Méthodes de fixation des capteurs de déplacement	13
5 Comportement mécanique des graves non traitées	15
5.1 Droite de rupture du matériau	15
5.2 Comportement sous chargements répétés	17
5.2.1 Etude du comportement à long terme	17
5.2.2 Etude du comportement résilient	19
6 Modelisation du comportement cyclique des graves non traitées	21
6.1 Modelisation des déformations permanentes axiales	21
6.2 Modelisation du comportement réversible	22
7 Conclusion	25
8 ANNEXE: GNT - Maraîchère	26
9 Références	27

1 Résumé

Résumé en français

L'objectif de ce rapport est de présenter les résultats obtenus sur l'étude du comportement résilient, et à degré moindre sur le comportement à long terme, en laboratoire de la grave non traitée (GNT) Bréfauchet. Ce matériau sera utilisé comme couche d'assise sur une planche d'essai (chaussées à faible trafic) pour des essais de chargement routier de type FABAC à l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) à Nantes. Les résultats sont également utilisés pour optimiser les paramètres d'un modèle prédictif à la fois pour le comportement résilient et le comportement à long terme (déformations permanentes).

Le rapport présente premièrement certaines caractéristiques de base des expériences en laboratoire, telles que la courbe granulométrique, la teneur en eau optimale, la densité sèche maximale et la courbe de rétention d'eau du matériau. Ensuite, les procédures d'essais triaxiaux (essais triaxiaux monotones et essais triaxiaux à chargements répétés (TCR)) sont détaillées en tenant compte de l'effet de la teneur en eau. Puis, sur la base des résultats du test, la résistance au cisaillement et le comportement à long terme et résilient sous charges cycliques sont présentés. Enfin, les modèles prédictifs résilients et permanents sont utilisés pour reproduire le comportement obtenu au TCR.

2 Introduction

Les chaussées routières souples sont généralement constituées de couches d'enrobés bitumineux reposant sur une ou plusieurs couches de GNT, lesquelles sont compactées sur une couche de sol approprié. Les matériaux GNT sont des matériaux granulaires à gradation continue, constitués en général de particules de roche concassées. Ils contiennent généralement une certaine quantité de fines (généralement 4 à 10%) et de l'eau (ils sont généralement partiellement saturés).

Dans le corps de chaussée et sous trafic routier, la réaction des matériaux GNT se traduit par des déformations résilientes et permanentes. D'un côté, les déformations élastiques dépendent des caractéristiques de rigidité du matériau qui doivent être suffisamment élevées pour éviter la fissuration en fatigue des couches d'asphalte sus-jacentes. De l'autre côté, l'accumulation progressive de déformations permanentes, bien qu'elles soient très faibles au cours de chaque cycle de chargement, peut entraîner la formation d'ornières excessives. Par conséquent, une chaussée bien conçue devrait subir une accumulation de déformations

permanentes au cours de sa vie en service, qui finira par cesser puis donnera lieu (principalement) à une réponse stable : la réaction résiliente (Cerni et al., 2012).

Dans cette étude, nous étudions principalement en laboratoire le comportement mécanique en déformations permanentes et résilientes de la GNT Bréfauchet à différentes teneurs en eau initiales. Les résultats serviront à optimiser les paramètres du modèle élastoplastique existant.

3 Matériau étudié

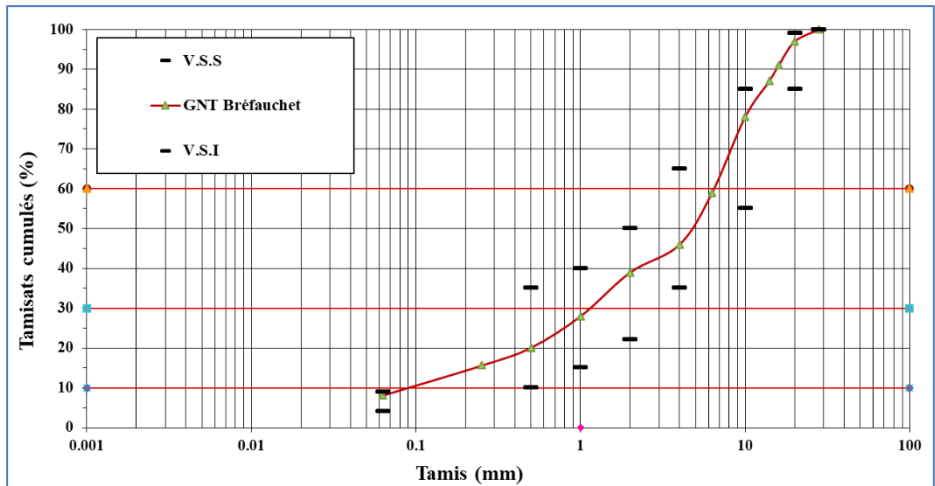
Le matériau étudié, GNT Bréfauchet, est un agrégat de gneiss concassé de la carrière de Bréfauchet en France, comme le montre de la Figure 1. La taille des particules varie entre 0 et 28 mm. Ce matériau est utilisé comme couche d'assise dans les chaussées à faible trafic.



Figure 1 : GNT Bréfauchet

3.1 Courbe granulométrique

Dans la Figure 2, la principale caractéristique granulométrique de ce matériau est présentée.



Tamis (mm)	Tamisats cumulés (%)
28	100
20	97
16	91
14	87
10	78
6.3	59
4	46
2	39
1	28
0.5	20.1
0.25	15.6
0.063	8.1

Figure 2 : Courbe granulométrique de la GNT des Bréfauchets (COLAS - NF EN 933-1)

Avant les essais, environ 2 kg de matériau, d’une taille supérieure à 20 mm, sont éliminés. En conséquence, la taille réelle des particules varie entre 0 et 20 mm. Ensuite, le matériau est uniformisé selon la méthode en quatre partie égale (Figure.3).



Figure 3 : Uniformisation du matériau

3.2 Essai Proctor modifié

L’essai Proctor modifié a été réalisé respectivement par la méthode manuelle et la méthode automatique (NF P 94-093). La teneur en eau varie de 3,8% à 7,8%, ce qui permet d’étudier la courbe de compactage. Le sol est compacté en 5 couches dans un moule CBR. L’équipement de l’essai Proctor modifié automatique (INSA-Strasbourg) est présenté à la Figure.4.



Figure 4: Compacteur automatique PROCTOR

La Figure 5 présente les courbes Proctor Modifié de la GNT de Bréfauchet avec deux méthodes. Sur la base des résultats, la teneur en eau optimale (OMC = 6,1%) et la densité sèche maximale (MDD = 2,218 Mg / m³) peuvent être obtenues.

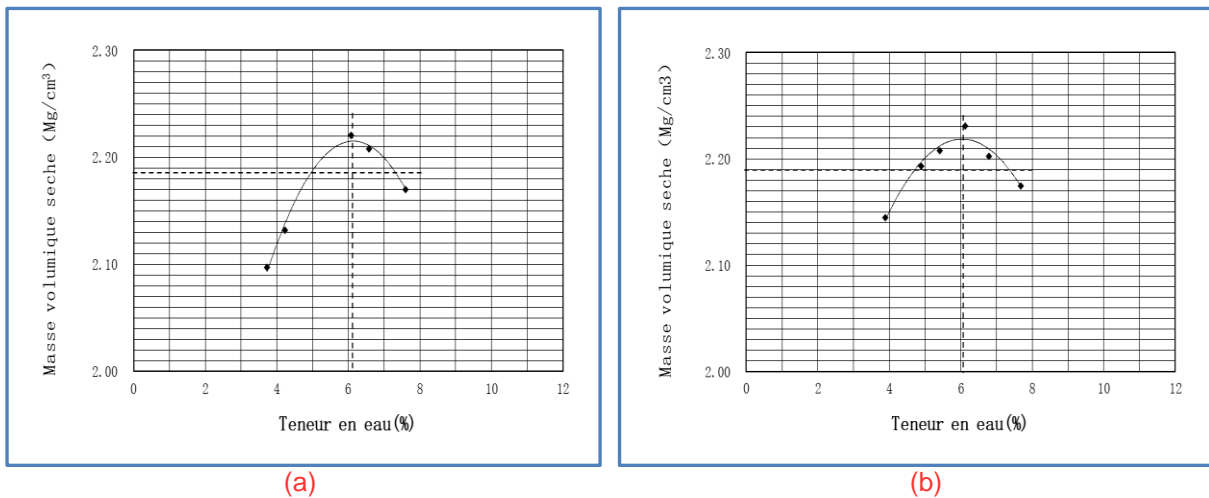


Figure 5 : Courbes Proctor Modifié de la GNT de Bréfauchet: (a) Manuelle (b) Automatique

3.3 Courbe de rétention

La méthode du papier filtre est largement utilisée pour mesurer la succion du sol sur la base de l'hypothèse d'un équilibre (débit d'humidité) entre le papier filtre et le sol à une succion donnée. Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre. Elle est utilisée couramment en laboratoire. La méthode du papier filtre a été acceptée comme une méthode normalisée de mesure de succion avec le papier filtre: Whatman No.42. Elle demande l'utilisation d'un papier filtre et d'une balance précise de 10^{-4} g. Le principe de cette méthode est de déterminer la teneur en eau du papier filtre pour déduire la valeur de la succion correspondante. La mesure

de la succion matricielle est assurée par un papier filtre mis en contact direct avec le sol (Figure.6). Cette méthode peut mesurer des succions jusqu'à 10 MPa.

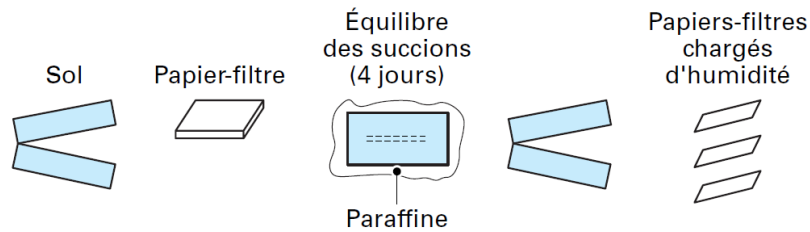


Figure 6 : Papier filtre de mesure de la succion matricielle (Ho, 2013)

Dans le présent travail, la succion matricielle, sur le chemin d'humidification, est mesurée par la méthode du papier filtre (ASTM D5298-10, 1995). Les échantillons sont préparés à une teneur en eau variant de 2% à 5,3% avec une densité sèche initiale de 2,00 Mg / m³. Les échantillons de sol sont compactés en deux couches d'épaisseur de 3 cm dans un moule CBR. Le papier filtre Whatman No.42 est placé entre deux autres morceaux de papier filtre de plus grand diamètre. Trois papiers filtres sont ensuite insérés entre deux couches de sol. Ensuite, les échantillons sont scellés dans le moule CBR pendant 10 jours pour atteindre l'état d'équilibre. Enfin, la pièce centrale du papier filtre est pesée par une balance avec une précision de 10⁻⁴ g pour obtenir la teneur en eau, puis la valeur de succion matricielle est déterminée par la courbe d'étalonnage du papier filtre Whatman No 42 (voir Figure 8). L'équipement et les échantillons de GNT Bréfauchet sont présentés en Figure 7.





Figure 7 : Dispositifs utilisés pour la réalisation des échantillons et l'introduction de papiers filtres et la balance

La figure 9 montre la variation de la succion matricielle avec la teneur en eau de le GNT Bréfauchet sur le chemin d'humidification. On peut dire que la succion matricielle est très faible dans la couche de base GNT (inférieure à 100 kPa). Le résultat est également comparé à la succion avec un autre matériau GNT - Maraîchère sur le chemin de séchage. Les valeurs de succion plus élevées pour le GNT Bréfauchet pourraient indiquer une teneur en argile plus élevée pour ce matériau. Les caractéristiques de la GNT Maraîchère sont décrites en annexe.

En outre, le modèle de van Genuchten (van Genuchten, 1980) est utilisé pour ajuster les données mesurées. L'équation de van Genuchten est présentée comme suit:

$$[1] \quad w = w_r + \frac{(w_s - w_r)}{[1 + (\alpha s)^n]^m}$$

où :

w est la réelle teneur en eau du sol à la succion s (kPa); w_s (%) et w_r (%) représentent la teneur en eau saturée et la teneur en eau résiduelle; α est un paramètre lié à la succion d'entrée d'air; m et n sont les paramètres du modèle avec la relation: $m = 1 - 1/n$. La Figure 9 montre également l'estimation du modèle qui montre que le modèle de van Genuchten calfeutre bien aux valeurs mesurées. Les paramètres du modèle sont résumés dans le Tableau 1.

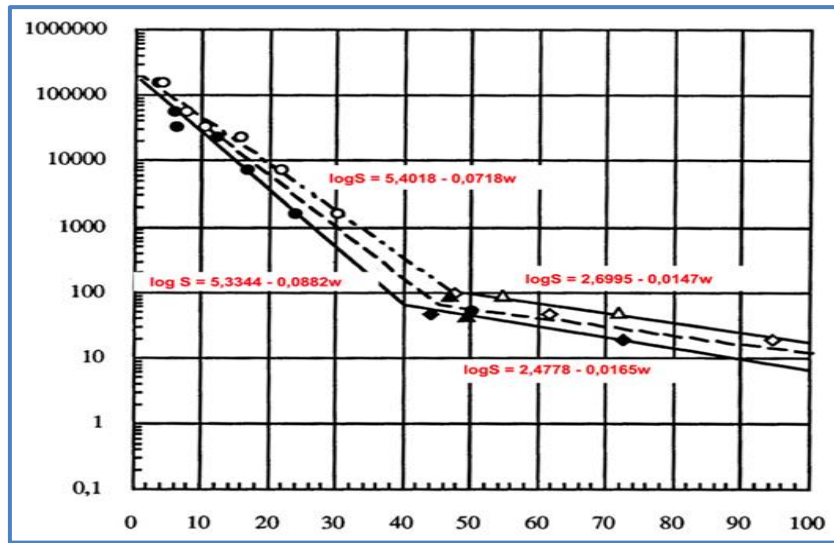


Figure 8 : Courbes d'étalonnage du papier filtre (Whatman No.42)

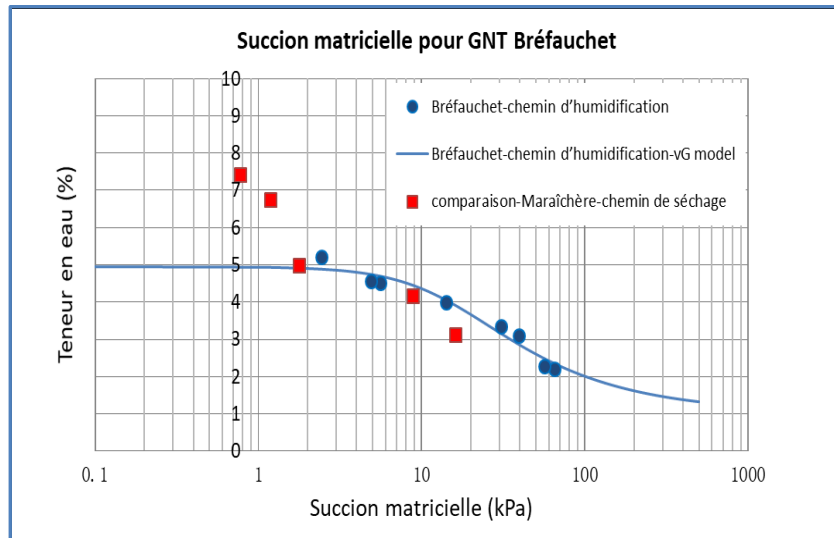


Figure 9 : Variation de la succion en fonction de la teneur en eau du sol pour GNT Bréfauchet et modélisation (vG model)

Paramètres de la fonction de van Genuchten	α	n	m	w_s (%)	w_r (%)
GNT Bréfauchet- chemin d'humidification	0.199	1.932	0.482	5.4	2.9

Tableau 1 : Paramètres du modèle van Genuchten

4 Essais triaxiaux

Tous les échantillons sont fabriqués avant d'être soumis à des essais triaxiaux. Les matériaux sont placés en étuve pendant 24 heures avant mélange avec de l'eau. Ensuite, L'eau ajoutée au sol sec est mélangée de façon homogène par le malaxeur. Le contrôle précis de la teneur en eau du matériau est délicat. Il faut éviter les pertes d'eau lors du malaxage par séchage, et

faire attention au conditionnement du matériau. Les matériaux humides sont ensuite stockés dans un sac en plastique bien scellé pendant au moins 24 heures pour une homogénéisation de l'humidité. Le compactage est effectué à l'aide d'un marteau vibrant suivant la norme française (NF EN 13286-4) en 7 couches pour chaque échantillon. Tous les spécimens testés sont préparés à une densité sèche de $2,13 \text{ Mg / m}^3$ (96% de la densité sèche maximale). C'est la densité sèche maximale qui peut être atteinte avec cette méthode de compactage.

Pour tester la GNT Bréfauchet avec les plus grosses particules dont le diamètre peut atteindre 20 mm, on utilise un dispositif triaxial à échelle moyenne (Wykeham Farrance, Figure 10) permettant de tester des éprouvettes de 150 mm de diamètre et de 280 mm de hauteur. Dans un essai triaxial, une pression axiale (σ_1) et une pression de confinement (σ_3) sont appliquées sur l'échantillon dans la cellule triaxiale simulant l'état de chargement sous la chaussée pour mesurer la déformation verticale (ε_1) et la déformation radiale (ε_3). La pression axiale et la pression de confinement sont fournis par le système de chargement pneumatique.



Figure 10 : Dispositif général d'essai (INSA-Strasbourg)

Le principal système de mesure constituées d'un capteur de force immergé et de capteurs de déplacement. Les capteurs typiquement utilisés dans cette étude sont:

- deux capteurs de déplacements verticaux. Ils mesurent le déplacement entre les deux embases. L'utilisation de deux capteurs permet d'obtenir une valeur plus représentative de la déformation verticale,

- un capteur de déplacement radial. Il permet de mesurer la variation de diamètre de l'échantillon,
- un capteur de force axiale,
- un capteur de pression de la cellule,
- un capteur de pression interstitielle pour les essais à forte teneur en eau.
- un LVDT;

4.1 Essais de cisaillement monotone

Pour déterminer les paramètres de la résistance au cisaillement de la GNT Bréfauchet (angle de frottement et cohésion), des essais triaxiaux monotones sont d'abord réalisés avec une teneur en eau de $w = 4,4\%$ et sous différentes pressions de confinement (0 kPa, 7 kPa, 22 kPa, 45 kPa). L'essai de cisaillement est contrôlé à une vitesse de 0,1% / min et s'arrête lorsque la déformation axiale est de 5%.

4.2 Essais triaxiaux à chargements répétés

L'essai le plus utilisé pour étudier le comportement mécanique des matériaux GNT est l'essai triaxial à chargements répétés (TCR). L'avantage de ce test est la possibilité d'étudier le comportement du matériau sous des chargements cycliques, simulant avec précision les conditions in situ.

Le principe de l'essai TCR est rappelé sur la Figure 11. Dans les essais TCR réalisés à l'INSA de Strasbourg, et qui seront utilisés pour ce projet, le matériau est soumis à une contrainte verticale cyclique σ_1 et à une pression de confinement constante σ_3 en phase de conditionnement (constant confining pressure, CCP). Mais, pour les essais résilients, une contrainte verticale cyclique σ_1 et une pression de confinement cyclique σ_3 varient en phase (variable confining pressure, VCP).

La Figure 12 présente un exemple typique de réponse d'un matériau granulaire dans un essai TCR. La réponse du matériau est essentiellement élasto-plastique et on peut observer que:

- La déformation permanente s'accumule rapidement pendant les premiers cycles de charge, mais elle a tendance à se stabiliser (au moins pour les niveaux de contrainte étudiés) et la réponse du matériau devient essentiellement élastique.
- La partie élastique de la réponse du matériau est fortement non linéaire (dépendante de la contrainte).

Pour étudier ce comportement cyclique complexe de la GNT Bréfauchet (comportement permanent et résilient), nous avons réalisé une phase de conditionnement pour stabiliser l'accumulation de déformations permanentes et une phase d'essais résilients pour étudier le comportement élastique non linéaire (NF EN 13286-7):

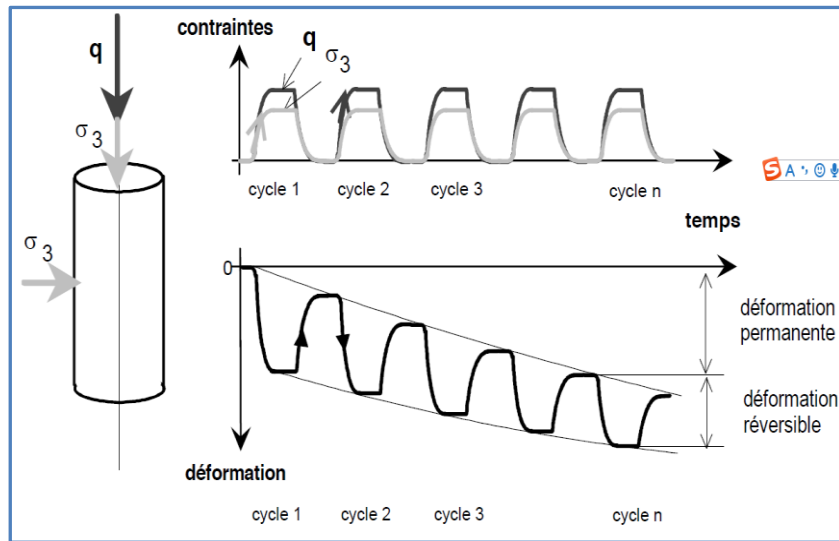


Figure 11 : Type de sollicitations reproduites lors d'un essai triaxial

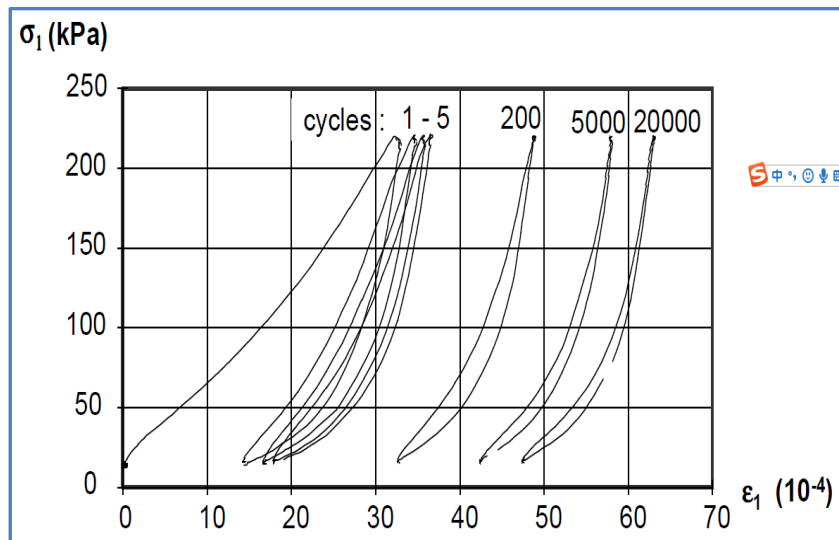


Figure 12 : Comportement cyclique non linéaire des GNT (Hornych et al, 1998)

- Dans la phase de conditionnement, le chemin de contrainte cyclique de $\Delta q/\Delta p = 3$ ($\Delta p = 166.67$ kPa et $\Delta q = 500$ kPa) à partir d'un état de contrainte initial ($p_0 = 70$ kPa, $q_0 = 0$ kPa) est appliqué à une fréquence de $f = 0.5$ Hz.. Le nombre de cycles choisi est $N = 20000$ cycles. Lorsque le taux de déformation permanente par cycle $\Delta \epsilon_1^p/\Delta N$ est inférieur à 1×10^{-7} , on peut affirmer que la déformation permanente atteint l'état stable (NF EN 13286-7).

La contrainte moyenne (p) et la contrainte déviatorique (q) sont reportées ci-après :

[2a]
$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

et

[2b]
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Ou, σ_1 et σ_3 sont les contraintes principales majeures et mineures.

- Dans la phase résiliente, cinq chemins de contrainte ($\Delta q/\Delta p = 0; 1; 1.5; 2; 2.5$) sont appliqués sur le même échantillon en séquence à partir d'un état de contrainte initial ($p_0 = 20$ kPa, $q_0 = 0$ kPa). Chaque chemin de contrainte contient 100 cycles de chargement et de déchargement, à une fréquence de $f = 0.05$ Hz.

La Figure 13 et le Tableau 2 résument les chemins de contrainte utilisés dans la phase de conditionnement et la phase d'essai résilient.

Matériau	$\Delta q/\Delta p$	Δp (kPa)	Δq (kPa)	pression de confinement (kPa)
GNT Bréfauchet	3(Conditionnement)	166.67	500	70
	0	250	0	270
	1	400	400	286.67
	1.5	400	600	220
	2	300	600	120
	2.5	90	225	35

Tableau 2 : Chemins de chargement appliqués pour les phases conditionnement et résiliente

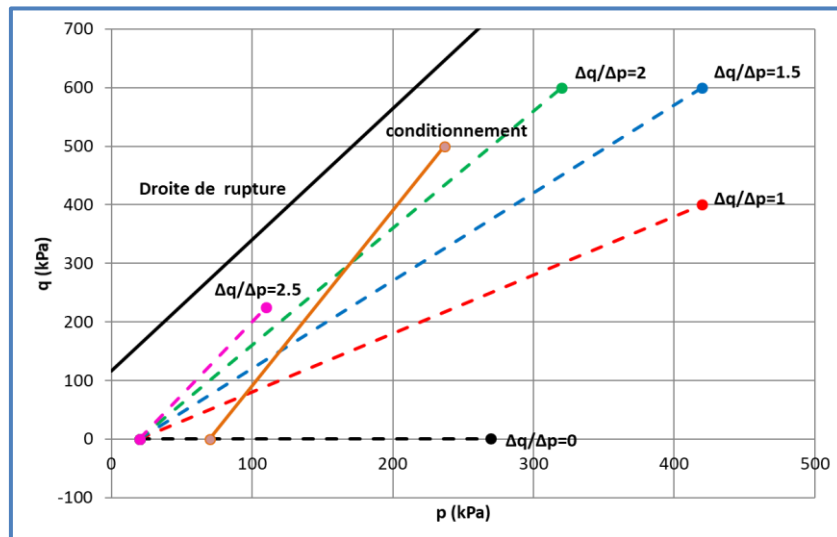


Figure 13 : Chemins de chargement appliqués pour les phases conditionnement et résiliente

4.3 Méthodes de fixation des capteurs de déplacement

Dans cette étude, nous avons développé deux ensembles de dispositifs de fixation pour les capteurs de déplacement sur les échantillons GNT afin de les adapter aux plus grosses particules en les comparant aux échantillons de sable.

Pour la première méthode (comme illustré à la Figure 14), les bases des capteurs et les vis pré-incorporées sont utilisées pour fixer les capteurs de déplacement verticaux. Le capteur de déplacement radial est fixé par du gel de silice. Cependant, l'épaisseur de 2 mm pour la base métallique est nécessaire pour la fixation et difficile à suivre dans le cas d'une grande déformation. En outre, la fixation sans contact du capteur de déplacement radial génère toujours une déformation radiale très sensible à l'existence de gros éléments sous la membrane sous les appuis.

En conséquence, une autre méthode est développée avec des tubes (comme le montre la figure 15): les tubes (environ 5 cm) sont remplis de gel de silice et pré-incorporés dans le spécimen (environ 2,5 cm) pendant le compactage. Ensuite, les capteurs de déplacement vertical et radial peuvent être fixés par des aiguilles insérées dans les tubes.

Dans cette étude, nous adoptons principalement la méthode avec des tubes pour fixer les capteurs de déplacement.



Figure 14 : Dispositifs utilisés pour la fixation des capteurs de déplacement avec vis

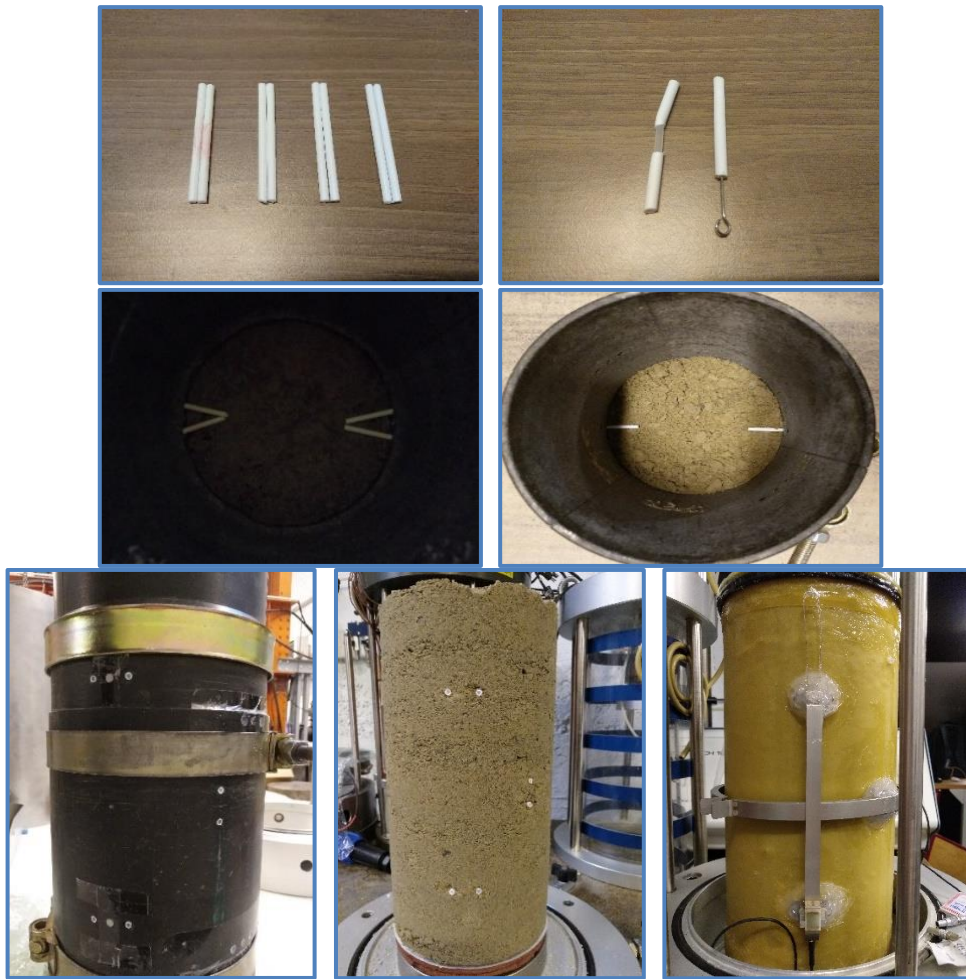


Figure 15 : Dispositifs utilisés pour la fixation des capteurs de déplacement avec tubes

5 Comportement mécanique des graves non traitées

5.1 Droite de rupture du matériau

Les résultats d'essais triaxiaux monotones sur la GNT Bréfauchet réalisés à une teneur en eau de $w = 4,4\%$ sous différentes pressions de confinement (0 kPa, 7 kPa, 22 kPa, 45 kPa) sont présentés à la Figure 16. Dans l'ensemble, avec une pression de confinement plus élevée, la contrainte déviatorique de rupture est plus élevée, comme prévu. La forme de la courbe de cisaillement est cohérente avec le comportement des matériaux denses.

Sur la base de la valeur maximale de la contrainte déviatorique de chaque courbe, la ligne de rupture est calculée comme indiqué sur la Figure 17 ($c = 72.9\text{kPa}$ and $\varphi = 54.6^\circ$), où c est la cohésion; φ est l'angle de friction interne au sens du critère de Mohr Coulomb.

A la fin de chaque test, l'échantillon est découpé en sept parties identiques pour mesurer la teneur en eau. Un exemple (échantillon: $w = 4,4\%$; pression de confinement = 22 kPa) est

présenté Figure 18, qui indique que la teneur en eau est homogène dans l'échantillon pendant l'essai.

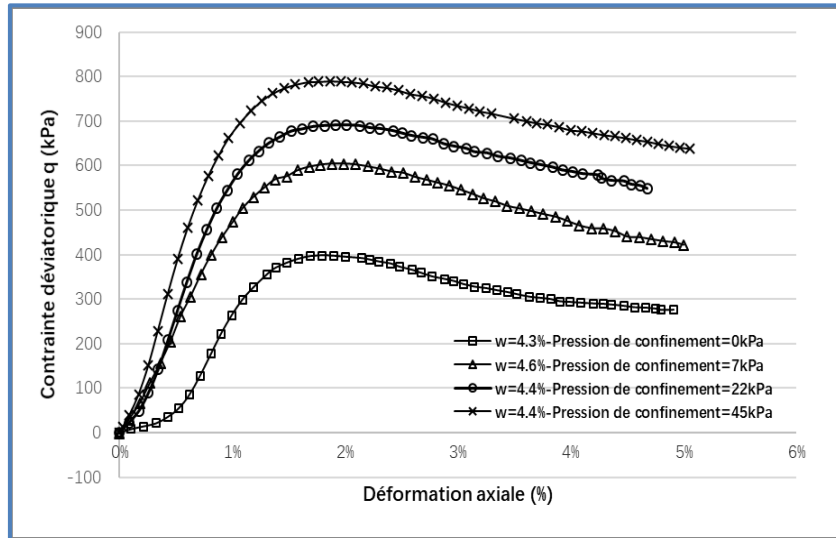


Figure 16 : Essais de cisaillement monotone pour la teneur en eau de 4.4%

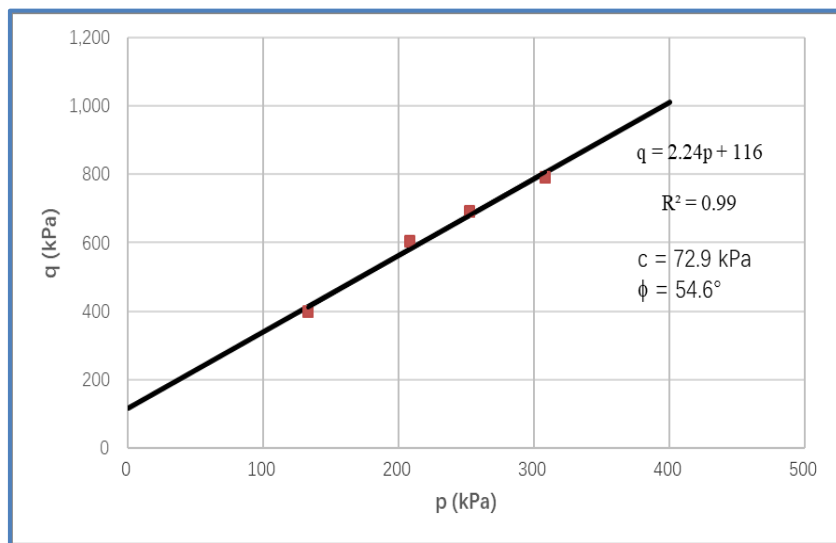


Figure 17 : Droites de rupture du matériau obtenues pour la teneur en eau de 4.4% et la densité de 2.13 Mg/m³

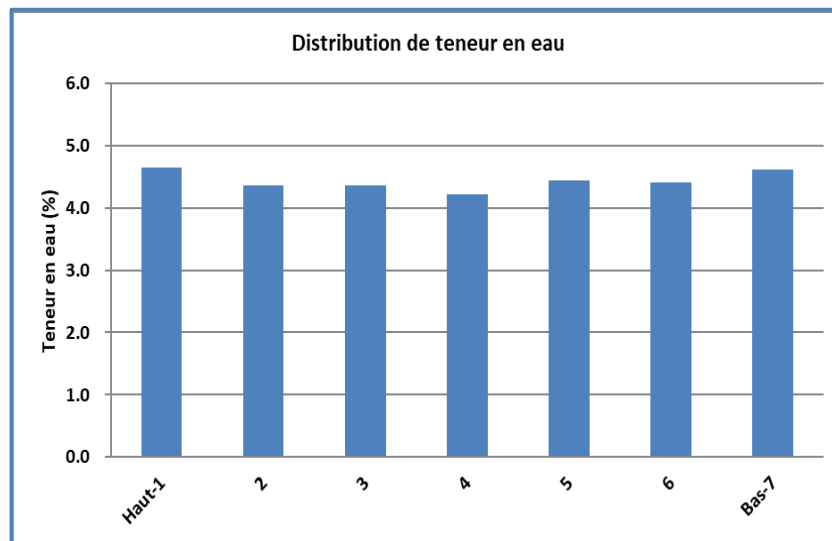


Figure 18 : Distribution de teneur en eau dans un échantillon (teneur en eau de 4.4%; pression de confinement de 22 kPa)

5.2 Comportement sous chargements répétés

5.2.1 Etude du comportement à long terme

Les résultats montrent que la déformation axiale permanente ε_t^p augmente avec le nombre de cycles pour les différentes teneurs en eau, comme illustré Figure 19 (a). Dans l'ensemble, la teneur en eau élevée engendre une déformation axiale permanente plus importante. Pour la plupart des teneurs en eau, la déformation axiale permanente augmente rapidement pendant les premiers cycles et tend ensuite à se stabiliser avec un léger accroissement pour chaque cycle de chargement. En particulier, à une teneur en eau de $w = 5,6\%$, l'échantillon est rapidement détruit sous les charges répétées. L'évolution de la vitesse de déformation axiale permanente en fonction de la déformation axiale permanente accumulée à diverses teneurs en eau est également présentée Figure 19 (b). On peut affirmer que le taux de déformation axiale permanente diminue rapidement avec une augmentation de la déformation axiale permanente lorsque la teneur en eau est inférieure à 4,2%. Cependant, le taux de déformation axiale permanente est encore important ($>2 \times 10^{-7}$) avec une déformation axiale permanente importante ($> 1,5\%$) lorsque la teneur en eau est supérieure à 4,3%.

Par conséquent, les taux de déformation axiale permanente ($\Delta\varepsilon_t^p/\Delta N$) à la fin de chaque essai sont inférieurs ou proches de $10^{-7}/\text{cycle}$ pour les teneurs en eau ($w \leq 4,3\%$). Nous pouvons affirmer que la déformation axiale permanente a atteint l'état d'équilibre après 20000 cycles.

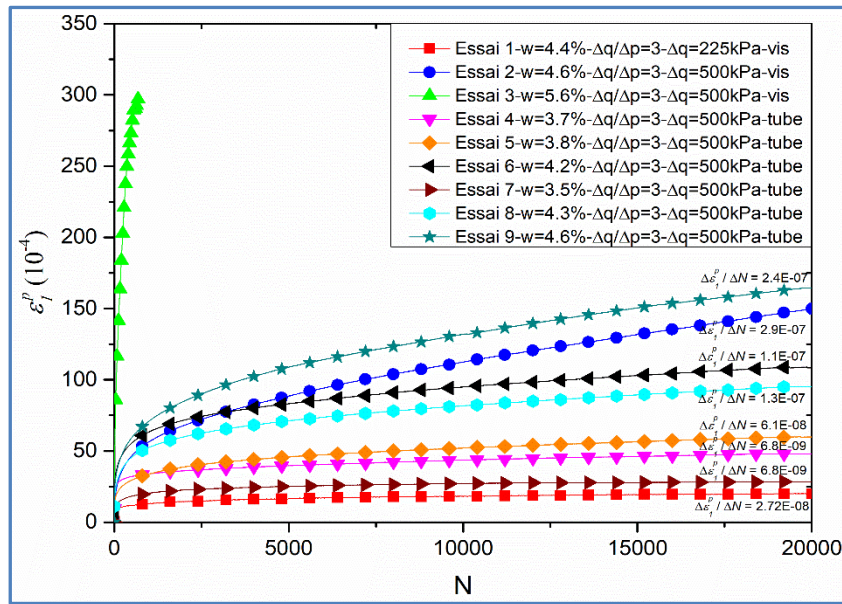


Figure 19 (a) : Evolution des déformations permanentes axiales

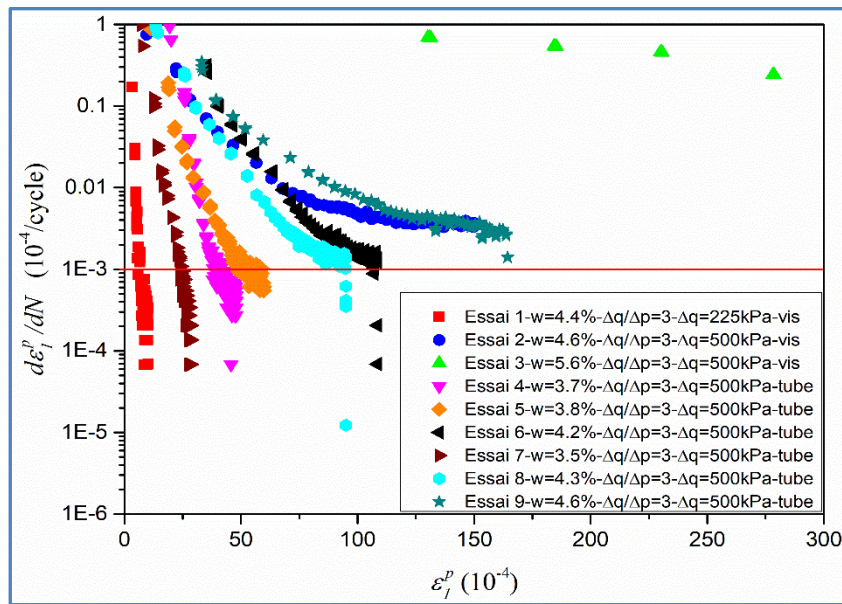


Figure 19 (b) : Représentation quantitative du taux de déformations permanentes axiales par cycle

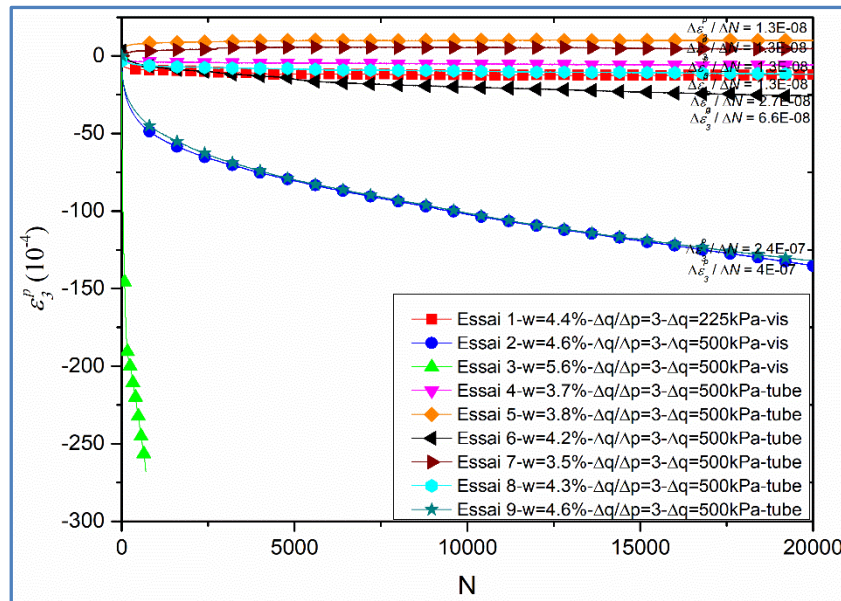


Figure 20 : Evolution des déformations permanentes radiales

Pour la déformation radiale permanente, les résultats montrent que ε_3^p augmente également avec le nombre de cycles à différents teneurs en eau, comme le montre la Figure.20. L'effet de la teneur en eau sur la déformation radiale permanente est identique à la déformation axiale permanente dans l'ensemble: une teneur en eau élevée engendre une déformation radiale permanente plus importante.

Sur la base de la valeur de $\Delta\varepsilon_3^p/\Delta N$ à la fin de chaque test, on peut également indiquer que la déformation radiale permanente aux teneurs en eau ($w \leq 4,3\%$) atteint l'état d'équilibre après 20000 cycles.

5.2.2 Etude du comportement résilient

Sur les Figures 21 et 22, nous présentons les déformations volumiques résilientes ε_v^r et les déformations déviatoriques résilientes ε_q^r , respectivement, obtenues pour différents chemins de contrainte ($\Delta q/\Delta p = 0; 1; 1.5; 2; 2.5$) et des teneurs en eau choisies de 3,5%, 4,2% et 4,6%. Sur ces figures, les observations suivantes peuvent être formulées:

- Les cycles présentent une légère hystérésis, ce qui montre que le comportement n'est pas purement élastique. L'hystérésis est bien plus importante avec l'augmentation de la teneur en eau de 3,5% à 4,6%.
- Le comportement dépend fortement de la contrainte moyenne p et du chemin de contraintes $\Delta q/\Delta p$.
- L'effet de la teneur en eau sur les déformations élastiques est obtenue: ε_v^r et ε_q^r présentent les valeurs les plus élevées pour l'échantillon ayant une teneur en eau plus élevée (4,6%) et cela pour tous les chemins de contrainte.

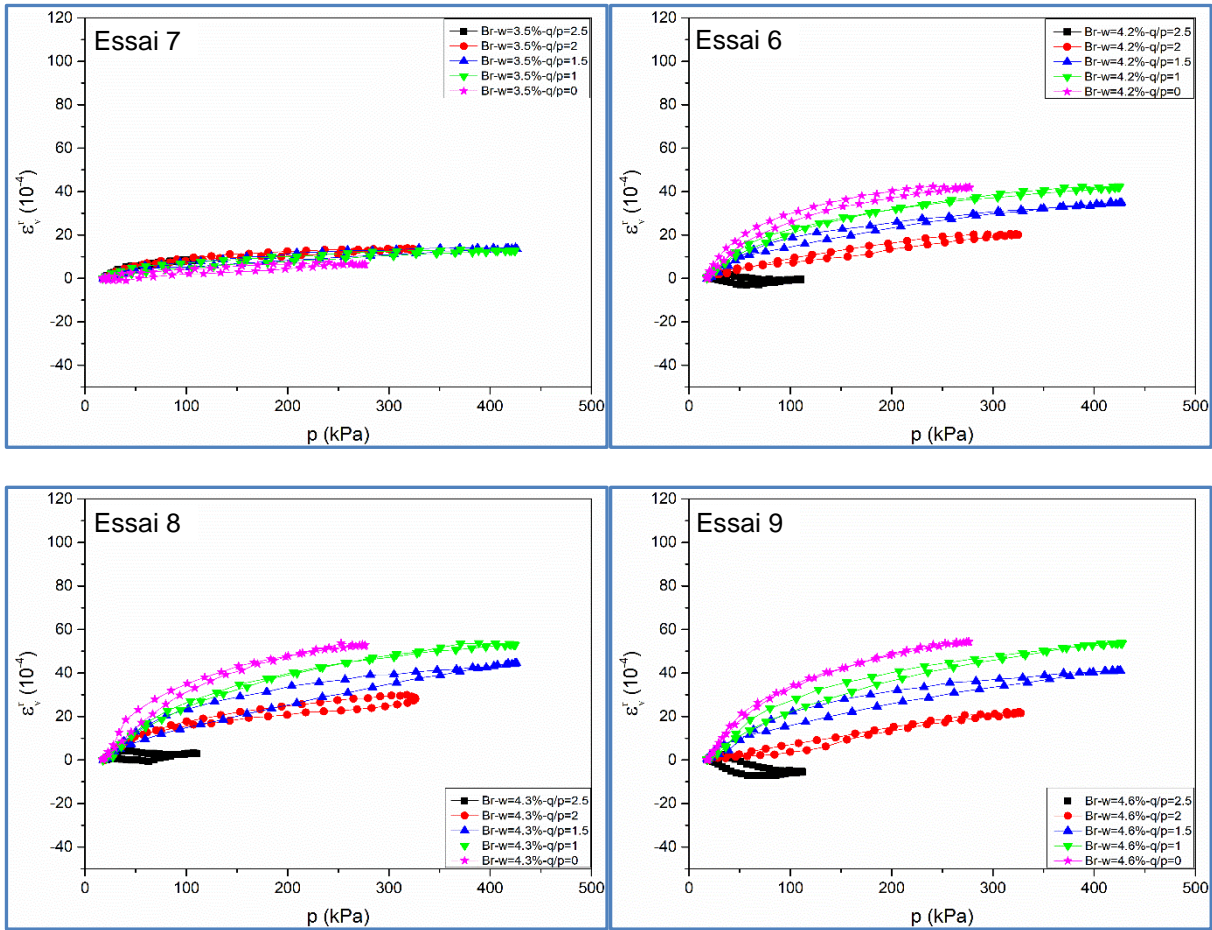
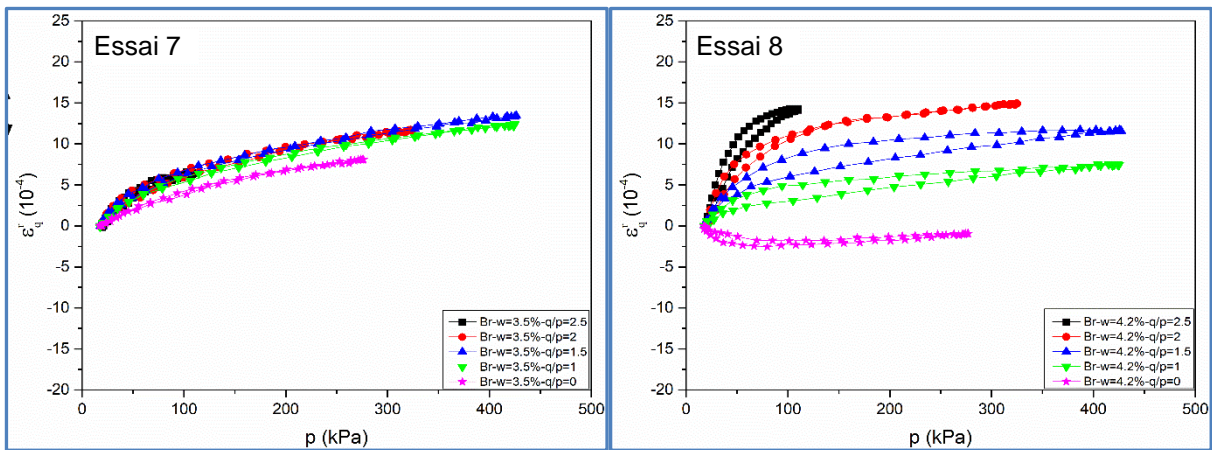


Figure 21 : Evolution des déformations volumiques



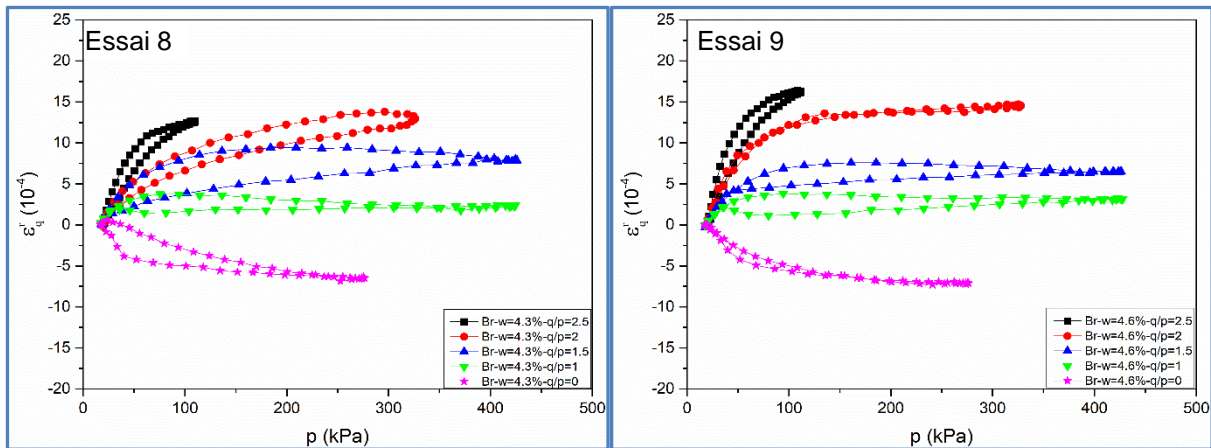


Figure 22 : Evolution des déformations déviatoriques

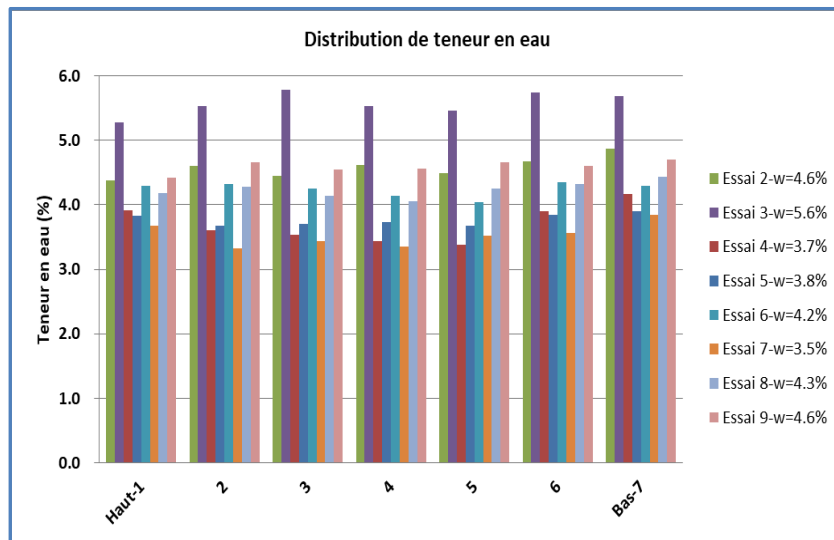


Figure 23 : Distribution de la teneur en eau dans les échantillons

Comme pour les essais monotones, chaque échantillon est coupé pour mesurer la teneur en eau après le test. On voit Figure 23 la distribution homogène de la teneur en eau dans les échantillons.

6 Modélisation du comportement cyclique des graves non traitées

6.1 Modélisation des déformations permanentes axiales

Dans cette partie, on a testé pour notre matériau la loi d'évolution des déformations permanentes proposée pour les GNT lors d'une étude récente (Jing et al., 2018). Cette relation permet d'ajuster les déformations en fonction des contraintes, des teneurs en eau, des teneurs en fines et du nombre de cycles. Mais, on ne considère pas la teneur en fine et les contraintes dans cette étude. Donc, le modèle utilisé s'écrit sous la forme :

$$[3] \quad \varepsilon_1^p = a \cdot \left(\frac{w}{v}\right)^o \cdot \left(1 - \left(\frac{N}{N_0}\right)^{\left(\frac{v'}{w}\right)}\right)$$

Où,

ε_1^p est la déformation permanente axiale; w est la teneur en eau ; N est le nombre de cycles ; N_0 est le nombre de cycles avant la première mesure; a , v , o et v' sont les paramètres du modèle.

Les simulations pour les déformations permanentes axiales choisis ($w=3.5\%$, 3.8% , 4.3% , 4.6% et 5.6%) sont satisfaisantes (Figure 24). Les paramètres du modèle sont résumés dans le Tableau 3.

GNT	a	v	o	v'	Corrélation
Bréfauchet	712.971	3.112	6.474	-0.007	0.976

Tableau 3 : Paramètres du modèle des déformations permanentes axiales (Jing et al., 2018)

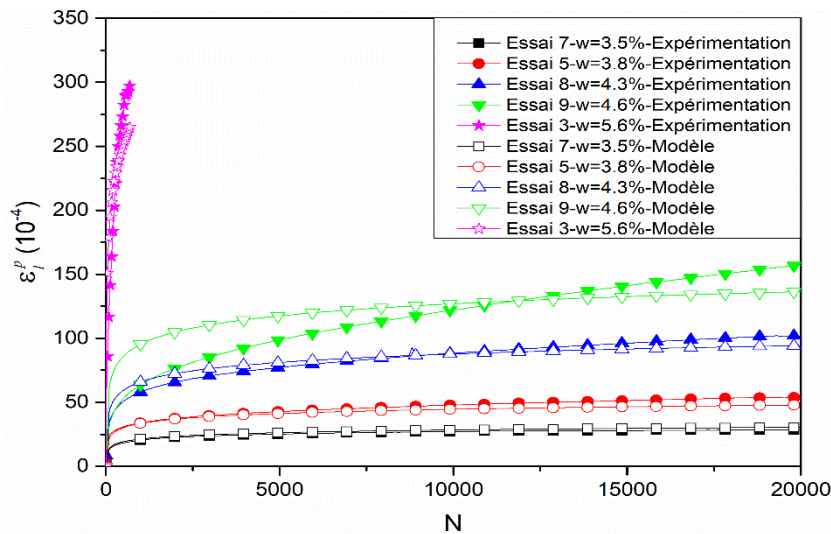


Figure 24 : Ajustements des déformations axiales permanentes

6.2 Modélisation du comportement réversible

Pour le comportement réversible, nous avons utilisé le modèle de Boyce anisotrope modifié par Hornyh (équations 4a et 4b), dans lesquelles, K_a , G_a , n , γ sont les paramètres du modèle.

$$[4a] \quad \varepsilon_v^r = \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left[\frac{\gamma_1 + 2}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} (\gamma_1 + 2) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*}\right)^2 + \frac{\gamma_1 - 1}{3 \cdot G_a} \cdot \frac{q^*}{p^*} \right]$$

et

$$[4b] \quad \varepsilon_q^r = \frac{2}{3} \cdot \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left[\frac{\gamma_1 - 1}{3 \cdot K_a} + \frac{n-1}{18 \cdot G_a} (\gamma_1 - 1) \cdot \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 + \frac{2 \cdot \gamma_1 + 1}{6 \cdot G_a} \cdot \frac{q^*}{p^*} \right]$$

Ou :

$$[5a] \quad p^* = \frac{\gamma_1 \sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3}$$

$$[5b] \quad q^* = \gamma_1 \sigma_1 - \sigma_3, \quad 0 < \gamma_1 < 1$$

Ces paramètres ont été optimisés avec la méthode des moindres carrés dans laquelle l'erreur quadratique suivante est minimisée:

$$[6] \quad S_{\min} = \frac{\sum (\varepsilon_v - f(p^*, q^*))^2}{\sum (\varepsilon_v - m_v)^2} + \frac{\sum (\varepsilon_q - g(p^*, q^*))^2}{\sum (\varepsilon_q - m_q)^2}$$

Où :

$f(p^*, q^*)$, $g(p^*, q^*)$ sont les déformations volumiques et déformations déviatoriques issues du modèle;

m_v , m_q sont les valeurs moyennes des déformations volumiques et déformations déviatoriques élastiques expérimentales.

Le coefficient de corrélation est exprimé par :

$$[7] \quad C_{\text{corrél.}} = 1 - \sqrt{\frac{S_{\min}}{2}}$$

Ces paramètres ont été optimisés à différentes teneurs en eau pour le matériau GNT. Les teneurs en eau considérées dans cette optimisation sont de 3.5%, 4.2%, 4.3% et 4.6%. Le Tableau 4 présente les paramètres du modèle de Boyce ainsi que les coefficients de corrélation. Notons qu'à chaque teneur en eau correspond cinq chemins de contraintes ($\Delta q/\Delta p = 0; 1; 1.5; 2; 2.5$).

w (%)	$\Delta q/\Delta p$	Paramètres				Corrélation
		K_a (MPa)	G_a (MPa)	n	γ	
3.5	0; 1; 1.5; 2; 2.5	152.63	118.54	0.02	29.07	0.636
4.2	0; 1; 1.5; 2; 2.5	16.77	38.47	0.27	0.80	0.799
4.3	0; 1; 1.5; 2; 2.5	14.15	32.06	0.33	0.64	0.835
4.6	0; 1; 1.5; 2; 2.5	9.04	23.42	0.20	0.56	0.827
Valeur moyenne		48.15	53.12	0.21	7.77	0.77

Tableau 4 : Paramètres du modèle de Boyce pour la GNT Bréfauchet

Sur les Figures 25 et 26, nous présentons les ajustements obtenus avec le modèle de Boyce anisotrope pour le GNT Bréfauchet à quatre teneurs en eau de 3.5% et 4.6%.

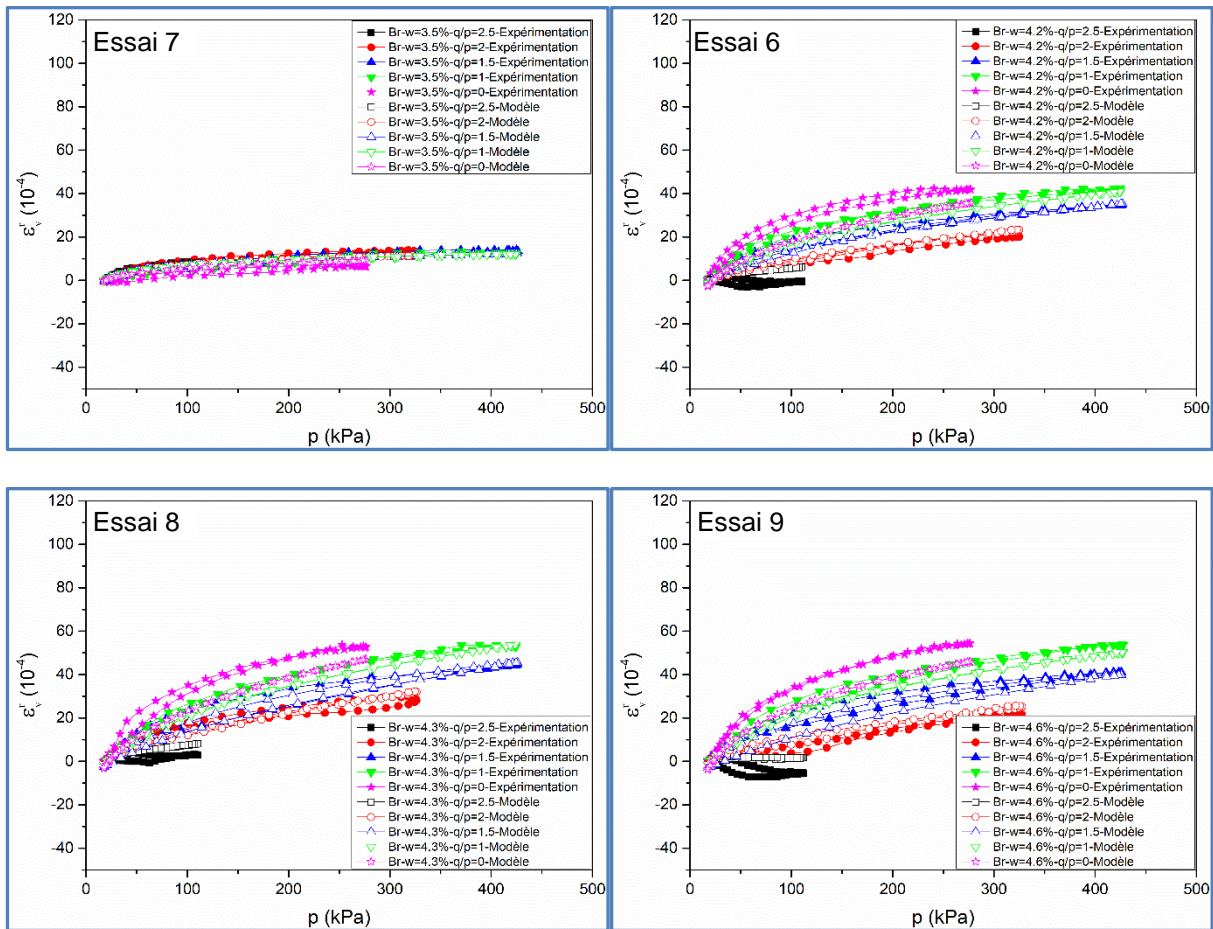
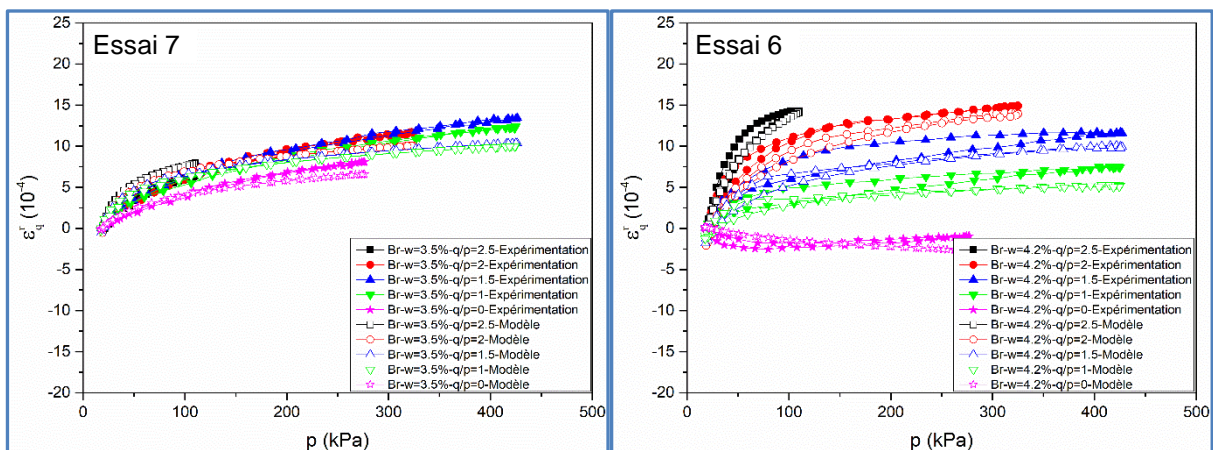


Figure 25: Réponse du modèle et résultats des essais : déformations volumiques



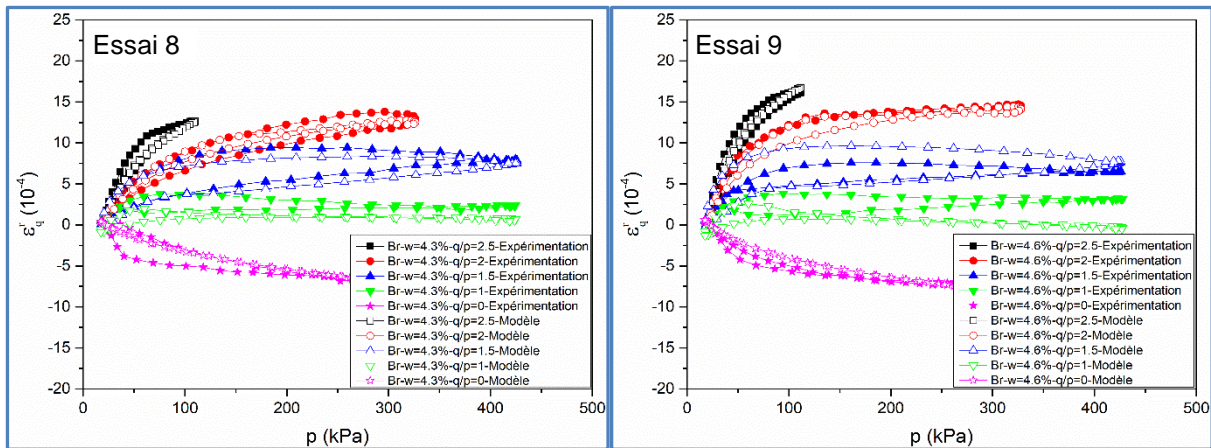


Figure 26 : Réponse du modèle et résultats d'essai : déformations déviatoriques

Pour l'évolution des déformations volumiques (Figure 25) et des déformations déviatoriques (Figure 26), on constate que le modèle de Boyce décrit relativement bien l'évolution des déformations pour les différents chemins de contraintes et les différents teneurs en eau. Mais, en fonction des paramètres optimisés du modèle, l'ajustement est moins précis pour les résultats à teneur en eau de $w=3.5\%$ bien que les valeurs de l'ajustement soient très proches de l'évolution réelle en raison du faible niveau de déformation.

7 Conclusion

Ce rapport présente d'abord le travail expérimental pour le matériau GNT Bréfauchet: l'analyse granulométrique montre que le matériau a une bonne composition avec une teneur en fines d'environ 9%. L'essai Proctor modifié présente la teneur optimale en eau (6,1%) et la densité sèche maximale (2.218 Mg/m^3). La courbe de rétention du matériau (SWRC) est également obtenu sur le chemin d'humidification pour la GNT Bréfauchet.

Ensuite, les procédures et les résultats des essais triaxiaux (l'essai monotones et l'essai triaxial à chargements répétés (TCR)) sont présentés en détail. La droite de rupture de la GNT Bréfauchet à la teneur en eau de $w=4,4\%$ est obtenue par des tests monotones. On observe que la déformation permanente sous le chargement cyclique augmente avec le nombre de cycles et la teneur en eau. Le comportement résilient dépend fortement de la contrainte moyenne p et du chemin de contraintes $\Delta q/\Delta p$. En outre, comme la déformation permanente, les déformations résilientes augmentent avec la teneur en eau.

Finalement, les modèles de Jing (Jing et al., 2018) et le modèle Boyce modifié sont utilisés pour ajuster respectivement les déformation permanentes mesurées et les comportements résilients. En générale, on peut dire que la simulation est en bon accord avec les résultats expérimentaux à différents teneurs en eau.

8 ANNEXE: GNT - Maraîchère

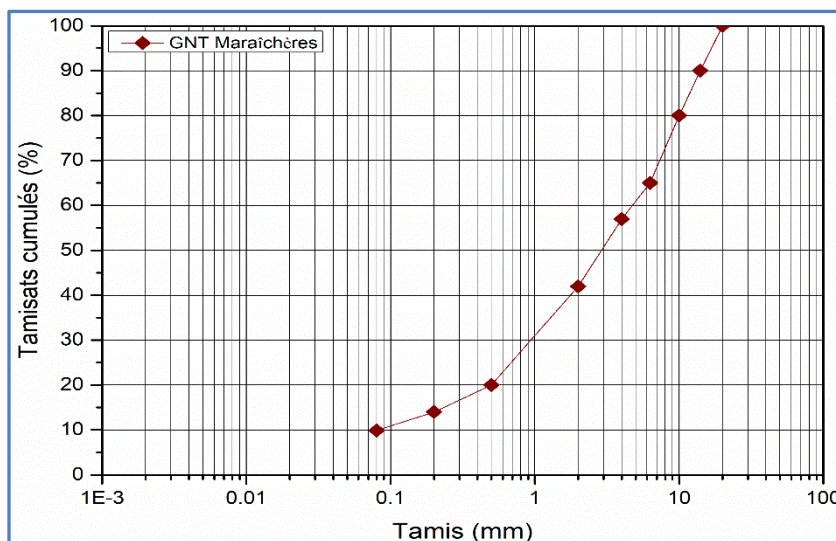
Le GNT maraîchère est utilisé en couche d'assise dans le cadre d'un essai de fatigue sur le manège de fatigue de l'IFSTTAR en 2003. Ce matériau est une sorte de gneiss d'une taille de 0/20 mm (Figure Annexe.1).



Figure Annexe.1 : GNT Maraîchère

Ce matériau est composé d'un mélange de 5 compositions différentes: sable 0/4 mm, gravier 2/6.3 mm, gravier 4/10 mm, gravier 10/20 mm, gravier 14/20 mm. La Figure Annexe. 2 montre la distribution granulométrique de la GNT maraîchère. Pour ce matériau, le VBS est 0,79 et le module élastique est 400 MPa.

La Figure Annexe.3 présente également les courbes de compactage Proctor modifiées pour la GNT maraîchère. La teneur optimale en eau (MOC) est de 5,8% et la densité sèche maximale (DDM) est de 2,20 Mg/m³.



Tamis (mm)	Tamisats cumulés (%)
20	100
14	90
10	80
6.3	65
4	57
2	42
0.5	20
0.2	14
0.08	9.9

Figure Annexe.2 : Courbe granulométrique de la GNT de Maraîchère

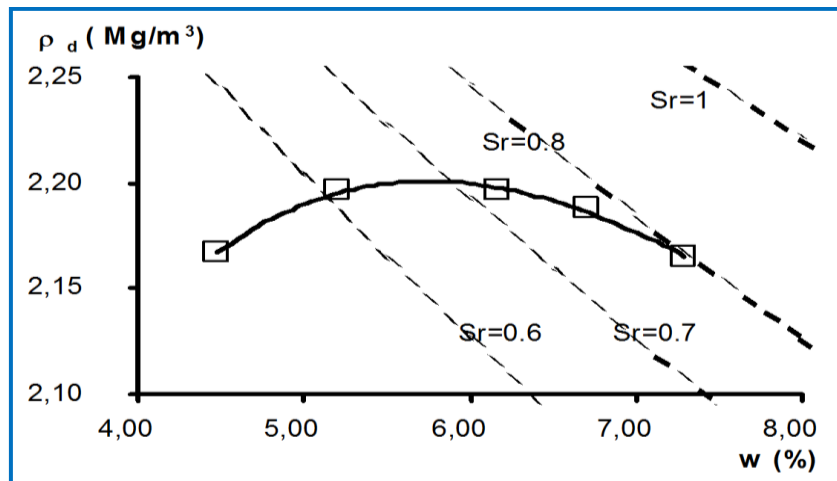


Figure Annexe.3 : Courbe Proctor Modifié de la GNT de Maraîchère:

9 Références

Boyce, H. R. (1980). A non-linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading. Proceeding of International Symposium on Soils under Cyclic and Transient loading, Swansea, UK, 285-294.

Cerni, G., Cardone, F., Virgili, A. & Camilli, S. (2012). Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading. Construction and Building Materials, 28(1), 79–87.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, INC.

Ho, X. N. (2013). Comportement hydromécanique des matériaux granulaires compactés non saturés. Doctoral thesis, University of Strasbourg.

Hornych, P., Kazai, A., & Piau, J. M. (1998). Study of the resilient behavior of unbound granular material. In: Proceedings 5th conference on bearing capacity of roads and airfields, Trondheim, 3, 1277–1287.

Jing, P., Nowamooz, H., & Chazallon, C. (2018). Permanent Deformation Behaviour of a Granular Material Used in Low Traffic Pavements. Road Materials and Pavement Design, 19(2), 289-314.

Jing P., Nowamooz H. & Chazallon C., Unsaturated Mechanical Behaviour of a Granular Material, Road Materials and Pavement Design,
<https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1447506>

van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44(5), 892–898.

ASTM D5298-10. (1995). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.

NF P94-093. (1999). Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.

NF EN 13286-4. (2003). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Méthodes l'essai pour la masse volumique de référence et la teneur en eau en laboratoire- Marteau vibrant.

NF EN 13286-7. (2004). Melanges avec ou sans liant hydraulique Essai triaxial sous charge cyclique pour melanges sans liant hydraulique.

NF EN 933-1. (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage.