

Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés

RÉSUMÉ

L'orniérage, dû aux déformations permanentes des matériaux non traités (assise en grave non traitée et sol support de chaussée), est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées souples à faible trafic. Malgré cela, il n'existe aujourd'hui aucune méthode réellement satisfaisante pour caractériser les déformations permanentes de ces matériaux en laboratoire et faire des prédictions d'orniérage sur chaussées.

Des recherches sont réalisées depuis plusieurs années dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) sur le comportement mécanique des graves non traitées, au moyen d'essais triaxiaux à chargements répétés. Toutefois, concernant les déformations permanentes, les études effectuées jusqu'à présent visaient principalement à comparer les performances des matériaux, en réalisant des essais cycliques sous un seul niveau de chargement. Cet article présente une nouvelle procédure d'essai, qui permet d'étudier l'évolution des déformations permanentes pour une large gamme de niveaux de contraintes, avec un nombre réduit d'essais, et d'en déduire des lois de variation des déformations permanentes en fonction des contraintes.

La nouvelle procédure est appliquée à l'étude de deux graves non traitées. Les résultats obtenus permettent de proposer une relation empirique, décrivant l'évolution des déformations permanentes axiales en fonction des contraintes maximales appliquées et du nombre de cycles de chargement. L'application de cette loi à des prédictions d'orniérage sur chaussée est ensuite discutée.

DOMAINE : Routes.

Gunther GIDEL

Doctorant de l'université Bordeaux I, CDGA
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux

Pierre HORNYCH

Ingénieur des Travaux publics de l'État
Section Conception de chaussées et géotechnique routière
Division Matériaux et structures de Chaussées
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes

Jean-Jacques CHAUVIN

Ingénieur
Unité Gestion et mécanique des Chaussées
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux

Denys BREYSSE

Professeur
Université Bordeaux I, CDGA

Alain DENIS

Maître de conférence
Université Bordeaux I, CDGA

Introduction

L'orniérage, dû aux déformations permanentes des matériaux non traités (assise en grave non traitée et sol support de chaussée), est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées souples à faible trafic. Malgré cela, la méthode française de dimensionnement des chaussées ne permet pas de prédire cet orniérage de façon satisfaisante [1] : les calculs de dimensionnement sont réalisés en élasticité linéaire, et les valeurs de module d'élasticité des graves non traitées sont déterminées à partir d'une classification empirique ; le critère de dimensionnement vis-à-vis de l'orniérage consiste seulement à limiter la déformation élastique verticale ϵ_z au sommet des couches non liées. De plus, le critère utilisé dépend uniquement des conditions de trafic. L'objectif de cet article est de proposer une nouvelle approche pour étudier l'évolution des déformations permanentes des graves non traitées sous chargements cycliques, et de développer des lois d'évolution des déformations permanentes, utilisables pour la prédiction de l'orniérage des chaussées. Cette approche utilise les résul-

tats d'essais de laboratoire, à l'appareil triaxial à chargements répétés.

L'appareil triaxial à chargements répétés (TCR) a été développé pour étudier le comportement mécanique des matériaux de chaussées non traités. Son principe consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à des sollicitations cycliques répétées, simulant les chargements routiers. Dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC), un appareil triaxial spécialement conçu pour l'étude des graves non traitées a été mis au point par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Saint Brieuc [2].

Sous chargement cyclique, les graves non traitées (GNT) présentent un comportement élastoplastique, caractérisé par une augmentation de la rigidité et une accumulation de déformations permanentes avec la répétition des chargements. L'approche adoptée pour étudier ce comportement au TCR [3] consiste à étudier et modéliser séparément :

- le comportement réversible stabilisé obtenu après un grand nombre de cycles de chargement, qui peut être décrit par des modèles élastiques non linéaires ;
- l'accumulation des déformations permanentes en fonction du nombre de cycles.

L'étude du comportement réversible a fait l'objet de nombreuses recherches, et on dispose aujourd'hui de procédures d'essai bien établies, et de modèles permettant de décrire de façon satisfaisante ce comportement [3]. L'évolution des déformations permanentes a été moins étudiée, pour plusieurs raisons :

- la lourdeur des essais : étant donné la forte influence de l'histoire des contraintes [4, 5], une éprouvette n'est sollicitée qu'à un seul niveau de chargement. Un nombre important d'essais (au moins une dizaine d'essais à grand nombre de cycles) est donc nécessaire pour étudier l'influence des contraintes sur l'accumulation des déformations permanentes ;
- la difficulté de passage des résultats de l'essai de laboratoire à la prédiction du comportement sur chaussée. Celle-ci tient au fait que, dans la chaussée, le matériau est soumis à une histoire de chargement complexe (phase initiale de construction de la chaussée, chargements très variés dus au trafic, variations des conditions climatiques), que l'essai de laboratoire ne reproduit que de façon très simplifiée ;
- enfin, la dispersion non négligeable des résultats d'essais.

Cet article présente une procédure nouvelle pour l'étude des déformations permanentes des GNT au triaxial à chargements répétés [13], qui permet d'obtenir plus d'informations sur une même éprouvette (gain de temps et de matériaux, réduction de la dispersion expérimentale). Il propose également des exemples de modes de chargement pour l'étude de l'influence des contraintes sur l'accumulation des déformations permanentes en vue d'établir des lois d'évolution des déformations permanentes, en fonction du nombre de cycles et des contraintes cycliques appliquées. Des essais réalisés aux LRPC de Toulouse et de Bordeaux et au LCPC (Centre de Nantes) montrent l'intérêt de cette nouvelle procédure pour la formulation de telles lois.

Essai triaxial à chargements répétés et comportement des graves non traitées

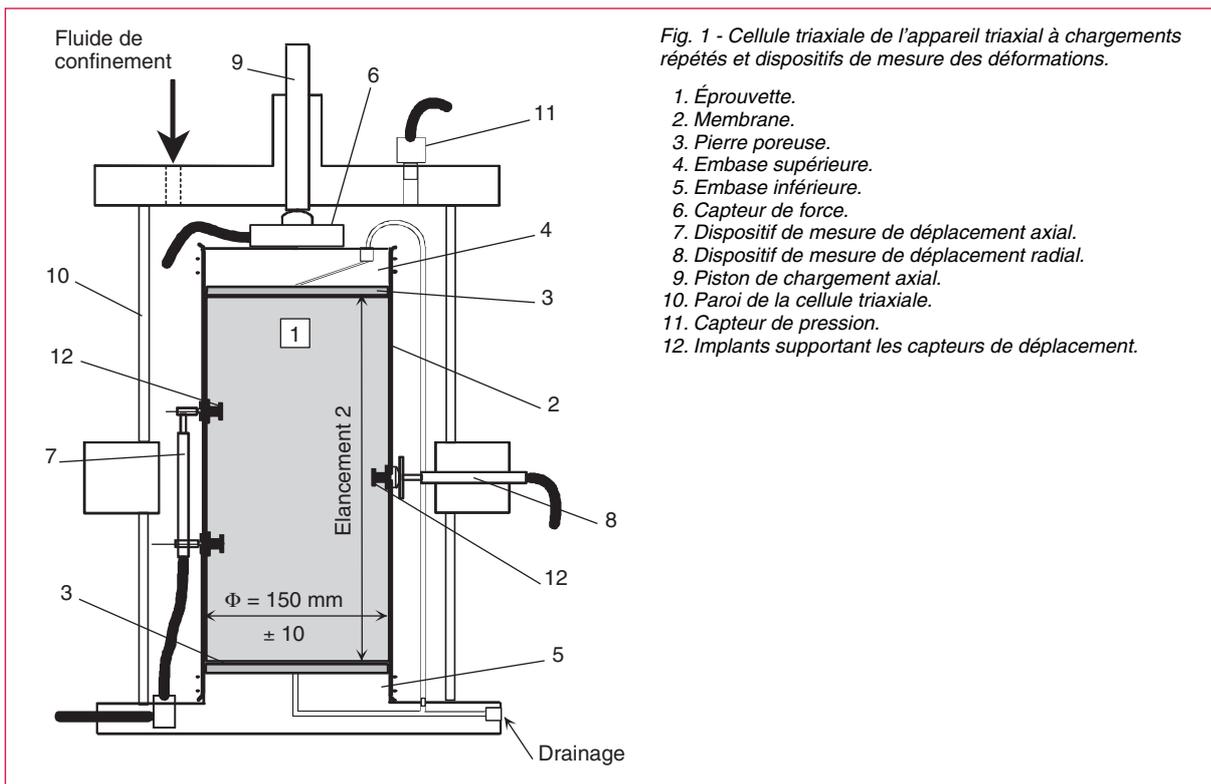
Présentation de l'essai triaxial à chargements répétés

L'appareil triaxial à chargements répétés pour l'étude des graves non traitées (TCR-G) est conçu pour des éprouvettes de 160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur [2]. Ces dimensions conviennent pour des matériaux de granulométrie 0/20 mm (voire au maximum 0/31,5 mm). Les éprouvettes sont fabriquées par vibrocompression selon la norme NF P 98-230-1. L'appareil possède un système de chargement pneumatique, permettant de faire varier de façon cyclique la pression de confinement et la contrainte verticale, et donc de réaliser des chargements cycliques suivant différents chemins de contraintes. L'éprouvette est équipée de capteurs de déplacement à induction (LVDT), qui mesurent les déformations axiales et radiales de l'éprouvette dans sa partie centrale (pour s'affranchir des effets de bords). La figure 1 présente la cellule triaxiale et son instrumentation.

L'essai TCR fait l'objet d'une norme AFNOR (NF P 98-235-1), qui définit également des procédures d'essai pour caractériser le comportement réversible et les déformations permanentes des graves non traitées.

Comportement irréversible des graves non traitées sous sollicitations cycliques

La procédure d'essai généralement utilisée pour étudier les déformations permanentes des graves non traitées, au triaxial à chargements répétés, consiste à réaliser un grand nombre de cycles de chargement (10^5 cycles et plus), avec un seul



niveau de contraintes. La figure 2 présente un exemple typique de résultats obtenus dans ce type d'essai (évolution des déformations permanentes axiales (ε_1^p) et radiales (ε_3^p) en fonction du nombre de cycles). Il s'agit ici d'un essai effectué sur une GNT 0/20 mm issue d'un microgranite, pour des conditions moyennes de densité et de teneur en eau ($\rho_d = 0,97 \cdot \rho_{dOPM}$, $w = w_{OPM} - 2\%$). Lorsque les contraintes cycliques sont nettement inférieures aux contraintes de rupture de la GNT

(ce qui est normalement le cas dans les chaussées), l'évolution des déformations permanentes est caractérisée par une augmentation rapide lors des premiers cycles, suivie par une stabilisation progressive. Le niveau de déformation de l'éprouvette dépend des caractéristiques du matériau et du chargement appliqué.

Pour décrire l'évolution de la déformation permanente axiale en fonction du nombre de cycles N , la

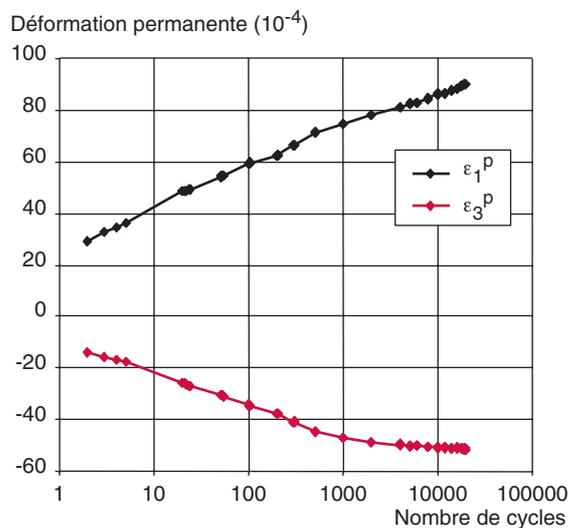
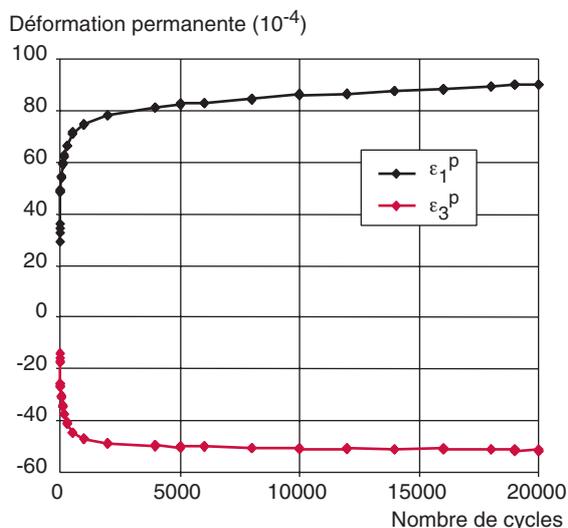


Fig. 2 - Évolution des déformations permanentes axiales et radiales au cours d'un essai TCR (essai sur une grave non traitée 0/20 mm issue d'un microgranite).

norme de l'essai TCR (NF P 98-235-1), propose la relation suivante [12] :

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_1^p(100) + A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right]$$

avec

- A_1 et B paramètres à valeurs positives ;
- $\varepsilon_1^p(100) + A_1$ représente la limite de ε_1^p pour N infini.

Pour comparer les performances de différents matériaux, la norme NF P 98-235-1 définit une déformation permanente caractéristique, notée A_{1c} , qui représente la valeur du paramètre A_1 déterminée pour un chargement normalisé (20 000 cycles avec une contrainte moyenne

$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} = 300$ kPa et une contrainte déviatorique $q = \sigma_1 - \sigma_3 = 600$ kPa).

Influence des contraintes

Dans un essai triaxial, les contraintes appliquées sont généralement définies en termes de contrainte moyenne $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ et de contrainte déviatorique $q = \sigma_1 - \sigma_3$ avec σ_1 contrainte verticale et σ_3 contrainte radiale). Les résultats expérimentaux montrent que les déformations permanentes augmentent lorsque la contrainte déviatorique q augmente, et diminuent lorsque la

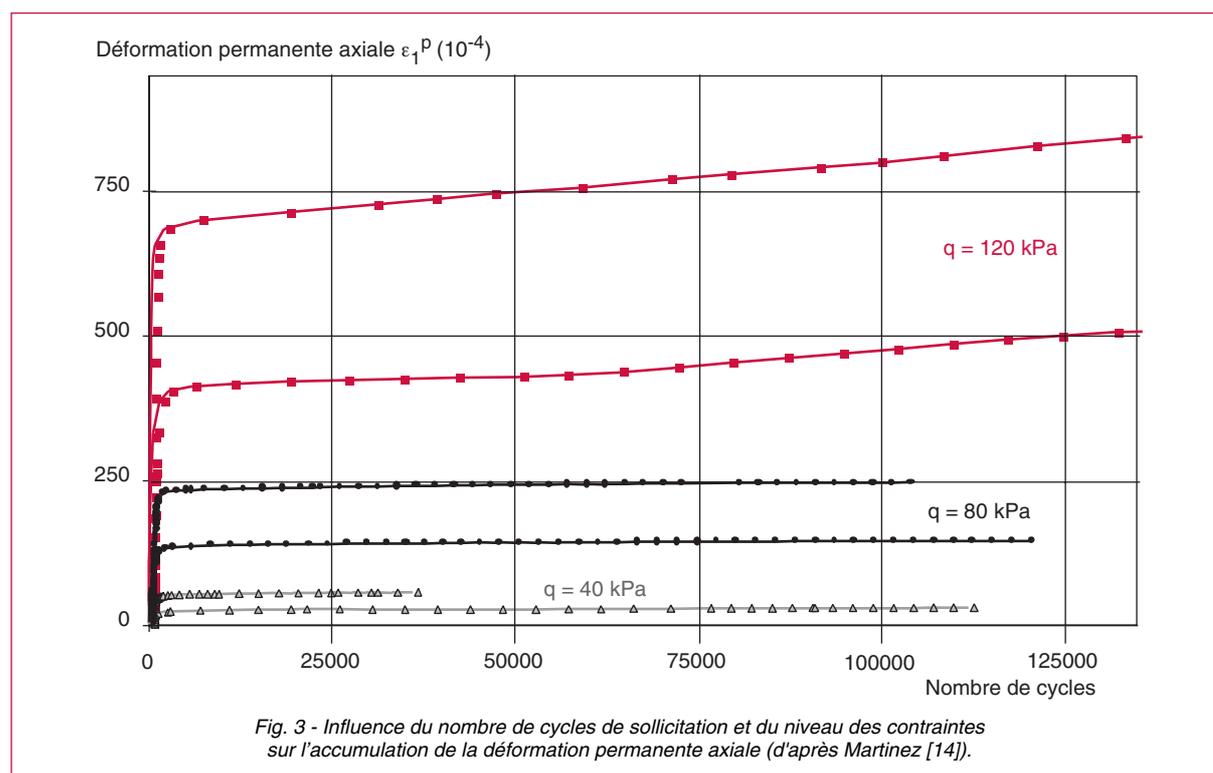
contrainte moyenne p ou la contrainte latérale σ_3 augmente.

La figure 3 représente l'évolution de la déformation permanente axiale ε_1^p d'une grave granitique ($w = w_{OPN} + 2\% = 13\%$ et $\rho_d = 0,97 \cdot \rho_{dOPN} = 1\,850$ kg/m³) en fonction du nombre de cycles de sollicitation pour trois niveaux de contraintes (deux essais par niveau). Ces essais sont réalisés avec une pression de confinement constante ($\sigma_3 = 20$ kPa), et des valeurs croissantes de la contrainte déviatorique q (40, 80, 120 kPa) [14]. On observe que ε_1^p augmente rapidement lorsque la contrainte déviatorique q augmente et que, pour la valeur la plus élevée de q , il n'y a plus stabilisation de la déformation. De plus, les résultats présentent une dispersion importante, avec des différences de l'ordre de 50 % pour des chargements identiques.

Influence des caractéristiques du matériau

Les études expérimentales montrent que la résistance aux déformations permanentes des GNT dépend :

- **de la nature minéralogique du matériau.** Son influence est illustrée sur la figure 4, qui présente des courbes de variation de la déformation permanente axiale obtenues pour trois graves de nature différente (Sorèze : calcaire dur ; Écuellen : calcaire tendre et Poulmarch : microgranite) [12], pour le même chargement (80 000 cycles de char-



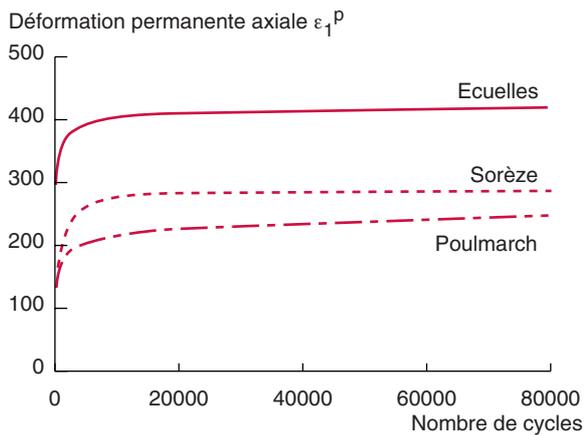


Fig. 4 - Évolution de la déformation permanente axiale en fonction du nombre de cycles pour trois graves de nature différente (d'après Hornych [12]).

gement avec $p = 200$ kPa et $q = 400$ kPa) et pour des conditions identiques de densité et de teneur en eau ($\rho_d = 0,97 \rho_{dOPM}$ et $w = w_{OPM} - 2\%$). C'est la grave issue du calcaire tendre qui présente les déformations les plus importantes ;

- **de la teneur en eau.** La figure 5 montre, pour les trois graves précédentes, l'influence de la teneur en eau sur la déformation permanente axiale caractéristique A_{1c} (déformation permanente limite pour un chargement normalisé). On observe que, pour les trois matériaux, il existe une valeur de teneur en eau à partir de laquelle les déformations permanentes augmentent très rapidement. Cette valeur se situe vers $w_{OPM} - 3\%$ pour le calcaire dur et $w_{OPM} - 1\%$ pour le calcaire tendre et le microgranite ;

- **de la densité.** L'augmentation de la densité entraîne une diminution des déformations permanentes, mais son influence est assez faible pour la plage de densité généralement obtenue sur chaussée (généralement entre 95 et 100 % de ρ_{dOPM}) ;
- **de la granulométrie.** La meilleure résistance aux déformations permanentes est obtenue avec une granulométrie continue et assez riche en fines (entre 6 et 10 % de fines environ), conduisant à une compacité élevée. Enfin, la forme des grains est également importante : ce sont les graves concassées, avec des grains anguleux, qui présentent les meilleures performances.

Lois d'évolution des déformations permanentes

Les recherches sur l'évolution des déformations permanentes des graves non traitées sous chargements cycliques sont peu nombreuses. Les lois d'évolution des déformations permanentes proposées sont généralement des relations empiriques, reliant les déformations permanentes aux contraintes cycliques appliquées et au nombre de cycles de chargement. Plusieurs chercheurs ont proposé des relations exprimant la déformation permanente axiale ϵ_1^p obtenue après un nombre de cycles fixé en fonction des contraintes cycliques appliquées [6, 7, 8], de la forme : $\epsilon_1^p = f(\sigma_3, q)$ ou $\epsilon_1^p = f(p, q)$. D'autres relations décrivent l'évolution de ϵ_1^p en fonction du nombre de cycles de sollicitation N : $\epsilon_1^p = f(N)$, pour un niveau de chargement donné [9, 10, 11, 12]. Les relations les plus fréquemment utilisées sont présentées en annexe de cet article.

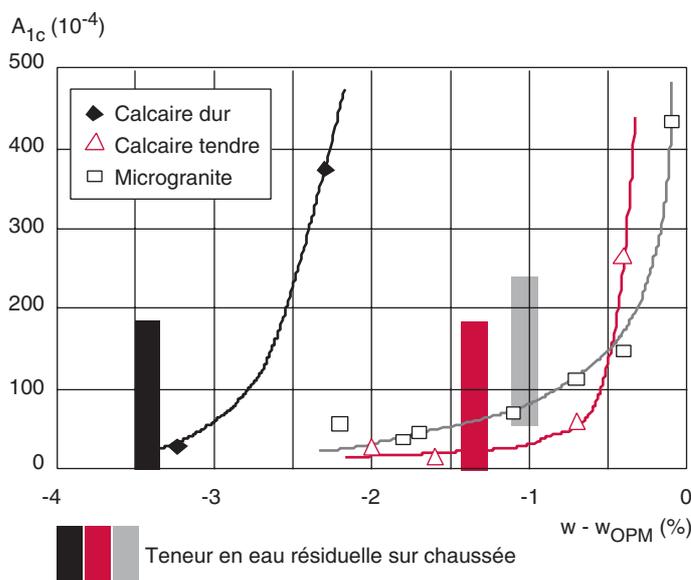


Fig. 5 - Influence de la teneur en eau sur la déformation permanente caractéristique de trois graves non traitées (d'après Hornych [15]).

Dans les relations empiriques précédentes, les effets du nombre de cycles sont décrits sous la forme d'un cumul non linéaire des déformations permanentes, et posent le problème de la définition pertinente d'un état de référence (la déformation à 100 cycles peut ainsi être l'un des paramètres de la loi). Les effets des contraintes sont, eux aussi, décrits comme non linéaires. La principale lacune de ces formules est qu'aucune ne couple explicitement les effets du nombre de cycles et des contraintes.

Nouvelle procédure d'essai pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées

Principe de la procédure d'essai par paliers

La procédure d'essai généralement adoptée pour l'étude des déformations permanentes des GNT au triaxial consiste à solliciter chaque éprouvette sous un seul niveau de contraintes. L'inconvénient de cette procédure est qu'elle conduit rapidement à des nombres d'essais élevés lorsque l'on veut étudier l'influence des contraintes sur l'évolution des déformations permanentes. Une approche différente a donc été testée, consistant à réaliser des essais par paliers, c'est-à-dire à solliciter une même éprouvette sous plusieurs niveaux de contraintes successifs croissants (on effectue N_1 cycles de chargement au premier niveau de contraintes, puis N_2 cycles au second niveau, etc.). Ceci permet de réduire largement le nombre d'essais à réaliser (gain de temps et de matériau), mais aussi de diminuer la dispersion expérimentale, puisque l'on utilise une même éprouvette pour obtenir des informations à plusieurs niveaux de contraintes.

La procédure de chargement par paliers est illustrée sur la figure 6. Elle consiste à soumettre l'éprouvette à des chargements à contraintes imposées, avec un rapport de contraintes q/p constant, et avec plusieurs amplitudes croissantes des contraintes cycliques Δp et Δq (quatre ou cinq paliers successifs, d'une durée d'environ 10 000 cycles chacun).

Les niveaux de contraintes choisis correspondent à ceux rencontrés dans une assise de chaussée ($\Delta p < 300$ kPa, $\Delta q < 600$ kPa et $0 \leq \Delta q/\Delta p \leq 3$).

Mise au point et validation de la procédure

Une première étude a été menée au LRPC de Bordeaux [13] sur une grave dioritique 0/14 (grave de

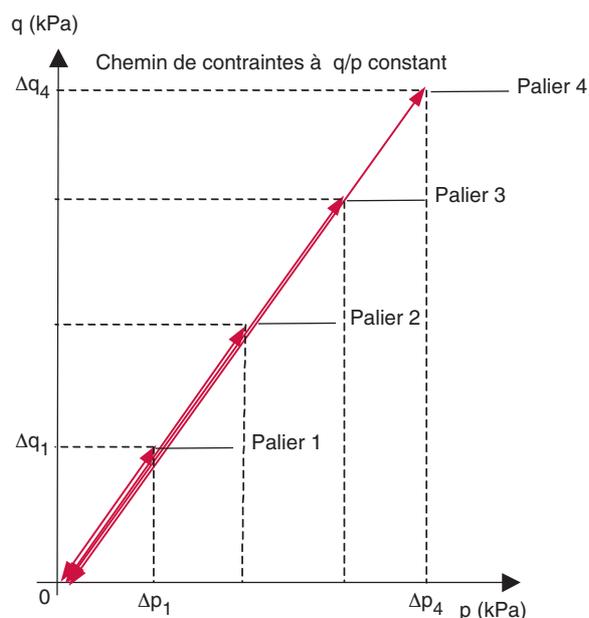


Fig. 6 - Chargements cycliques appliqués dans les essais par paliers.

Mazière) pour évaluer la nouvelle procédure, et la comparer à des essais à un seul niveau de contraintes. Tous les essais ont été réalisés suivant des chemins de contraintes à $q/p = 2$, sur des éprouvettes de caractéristiques identiques.

Étude de l'influence de niveaux croissants de contraintes

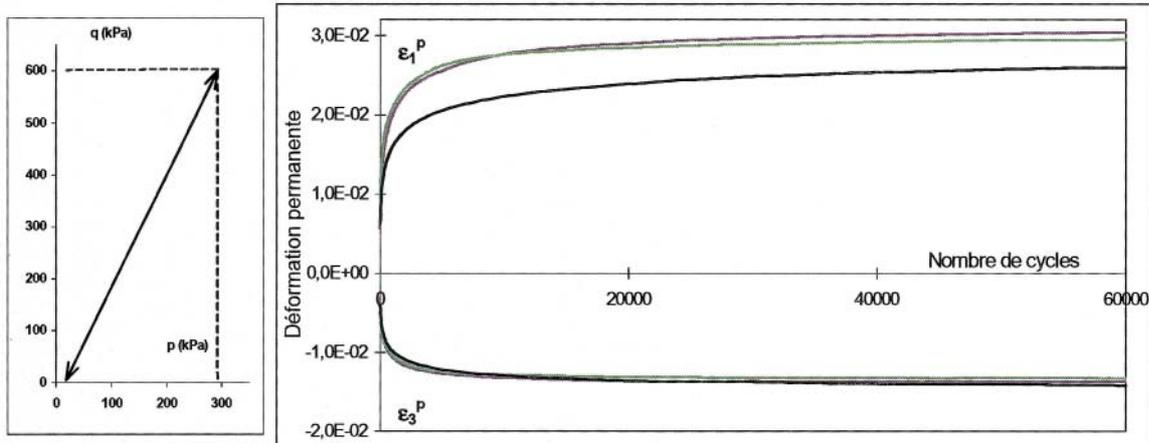
On a d'abord réalisé trois essais d'une durée de 60 000 cycles, avec un seul niveau de chargement correspondant à un déviateur maximal $q = 600$ kPa (avec $q/p = 2$). Ce premier mode de chargement ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7a. La valeur moyenne de ϵ_1^p en fin d'essai est de $286 \cdot 10^{-4}$, l'écart type est de $23 \cdot 10^{-4}$.

Trois autres éprouvettes ont été soumises à cinq paliers de chargement de contraintes croissantes (second mode de chargement), tels que le dernier niveau corresponde au chargement du premier mode. Ce second mode de chargement ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7b. La valeur moyenne de ϵ_1^p en fin d'essai est de $248 \cdot 10^{-4}$, avec un écart type de $29 \cdot 10^{-4}$.

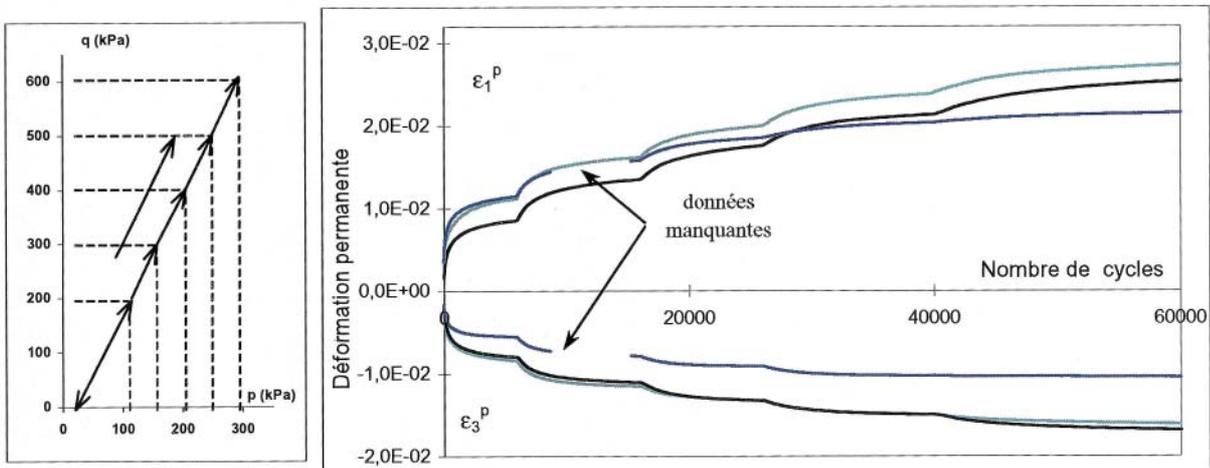
Ces résultats montrent que :

- malgré une répétition rigoureuse des différentes étapes de l'essai, les résultats présentent de la dispersion ;
- les déformations permanentes finales (à la fin du dernier palier) tendent, à la dispersion expérimentale près, vers une valeur comparable pour les deux modes de chargement. L'état final de déformation de l'éprouvette ne semble donc pas dépen-

Fig. 7 - Chemin de contraintes et de déformations permanentes.



a. Premier mode de chargement (un seul niveau de contraintes).



b. Second mode de chargement (cinq niveaux de contraintes croissants).

dre de façon significative des paliers de chargement précédents, de niveaux de contraintes plus faibles ;

➤ enfin, pour le mode de chargement 2, on a observé que la déformation permanente axiale en fin de palier variait de façon pratiquement linéaire avec q (ou avec p car ici q/p est constant). Ceci est illustré sur la figure 8. Pour deux des trois essais réalisés, la corrélation obtenue est très élevée ($R^2 > 0,99$) ; pour le troisième essai, les résultats sont moins bons.

À partir de ces résultats, on a cherché à relier les déformations axiales obtenues avec les deux modes de chargement. Pour cela, on a procédé en deux étapes :

① **première étape.** On a déterminé la courbe moyenne correspondant au premier mode de chargement, sans paliers (que l'on appellera par la suite « courbe de référence »), puis en s'appuyant

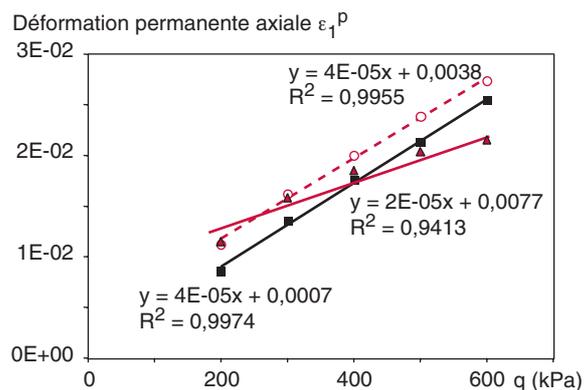


Fig. 8 - Second mode de chargement - Évolution de la déformation permanente axiale en fin de palier en fonction de q .

sur l'hypothèse que ϵ_1^p varie de façon linéaire avec q , on a construit, proportionnellement à la valeur de q , les autres courbes d'évolution de ϵ_1^p pour les quatre niveaux de contraintes correspondant au second mode de chargement (fig. 9a) ;

② **seconde étape.** À partir de ces courbes de référence, on a construit une courbe d'évolution de ϵ_1^p correspondant au deuxième mode d'essai, en procédant comme suit :

- pour le premier palier, on prend les N_1 premiers cycles de la courbe de référence du premier niveau de contraintes,
- on construit le deuxième palier en prenant les N_2 cycles de la courbe de référence du second niveau de contraintes partant de la déformation atteinte lors du premier palier de chargement (fig. 9a),
- on répète l'opération autant de fois qu'il y a de paliers pour obtenir la courbe complète de l'essai (dans la suite, les courbes construites de cette façon seront appelées MODELE).

Les figures 9a et 9b illustrent cette construction et comparent la courbe obtenue avec les résultats

expérimentaux du deuxième mode. L'amplitude des déformations ainsi que la forme des courbes sont proches des observations expérimentales (compte tenu de la dispersion). Ceci tend à montrer que les deux modes de chargement sont bien « équivalents », c'est-à-dire que, dans l'essai par paliers, les déformations au palier de contraintes i évoluent de la même façon que si le matériau n'avait été sollicité qu'à ce seul niveau de contraintes.

Étude de l'influence de niveaux décroissants de contraintes

L'évaluation de la procédure d'essai a été complétée en réalisant deux essais de deux paliers avec des niveaux de contraintes décroissants, et la même approche que précédemment a été utilisée pour modéliser l'effet des paliers de chargement

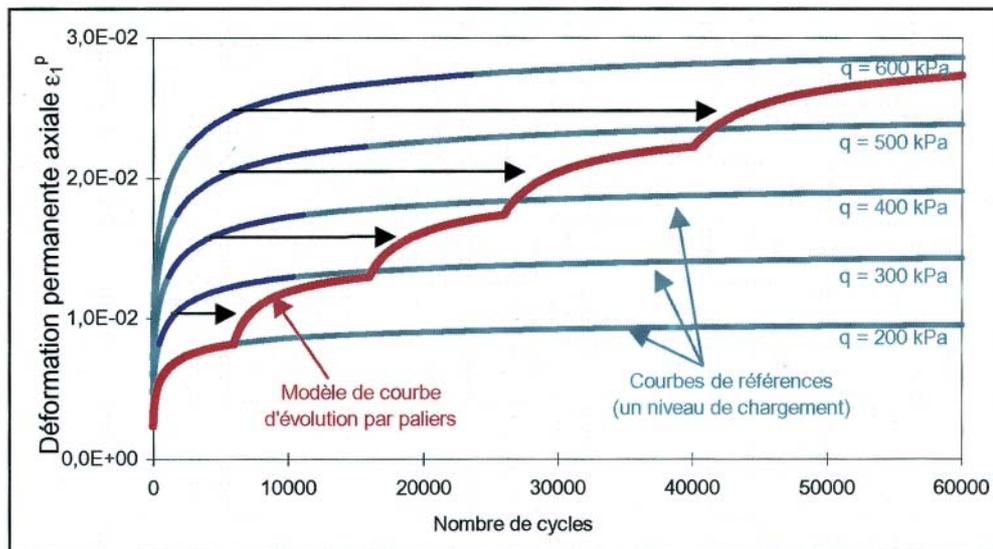
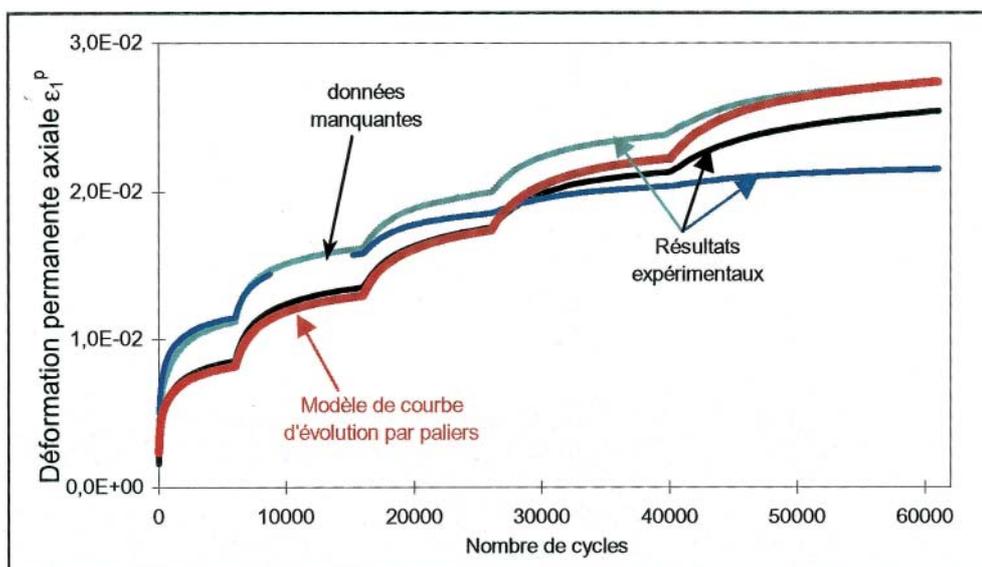


Fig. 9 - Principe de construction de la courbe d'essai par paliers.

a. Construction de la courbe.



b. Comparaison avec les résultats expérimentaux.

successifs. Deux cas ont été envisagés et sont illustrés sur la figure 10 (les courbes de référence ont été recalées de manière à tenir compte de l'état initial de ces nouvelles éprouvettes).

■ **Procédure (A)** Dans le premier cas, on a réalisé peu de cycles (500) au niveau le plus agressif de manière à ne pas dépasser le niveau de déformation maximal que peut produire le second niveau de contraintes, moins agressif, sur une éprouvette vierge. Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure 11a et montrent bien que la déformation évolue encore lors du second palier et que la déformation finale est très proche de celle prédite par le modèle.

■ **Procédure (B)** On effectue un grand nombre de cycles (20 000 cycles) au niveau le plus agressif de manière à dépasser le niveau de déformation maximal que peut produire le second niveau de contraintes, moins agressif, sur une éprouvette vierge. Les résultats présentés sur la figure 11b montrent que dans ce cas la déformation n'évolue plus lors du second palier.

En conclusion, les résultats de cette première étude semblent montrer que la procédure de chargements par paliers donne bien des résultats équivalents à des essais à un seul niveau de chargement. En effet, la comparaison des deux modes de chargement a montré que :

- dans un essai par paliers, l'évolution des déformations permanentes lors du palier de chargement i est la même que si le matériau n'avait été sollicité qu'à ce niveau de contraintes, et l'effet des $(i-1)$ paliers de chargement précédents est identique à un nombre « équivalent » de cycles du palier i produisant les mêmes déformations. Tout se passe donc comme si le matériau ne gardait en mémoire que le niveau de déformation atteint. (Ceci n'est toutefois vrai qu'avec des paliers réalisés suivant le même chemin de contraintes q/p) ;
- pour des paliers décroissants, le résultat précédent reste vrai tant que la déformation déjà accumulée lors des paliers précédents ne dépasse pas la déformation maximale pouvant être atteinte au

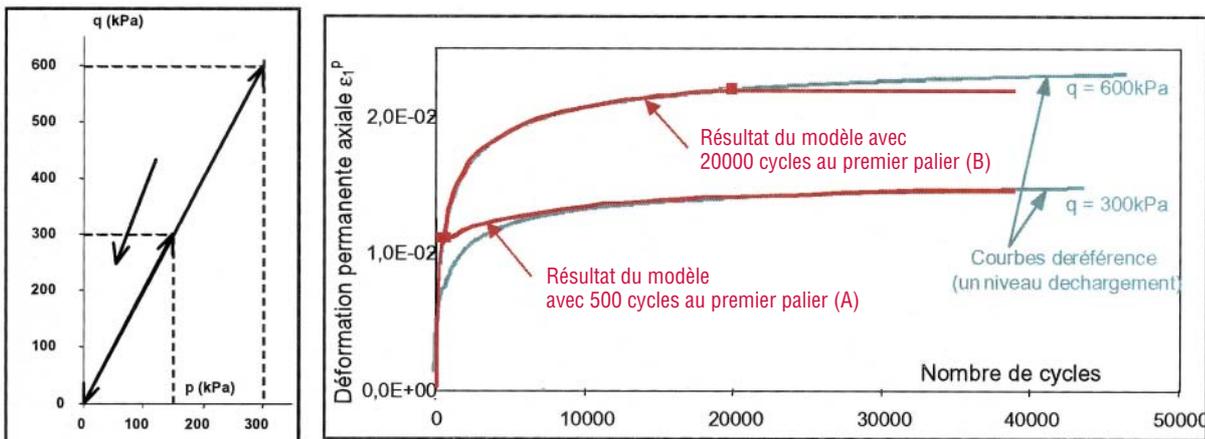
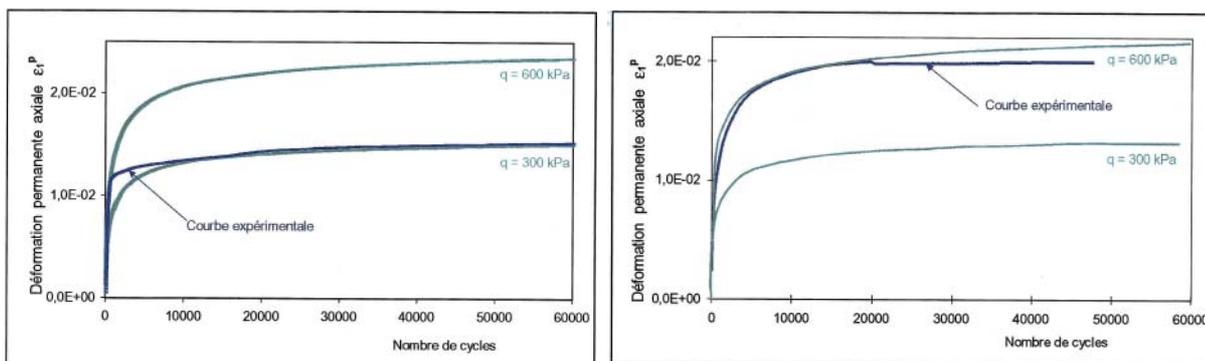


Fig. 10 - Essai à niveaux de contraintes décroissants : modes de chargements et prédiction de l'évolution des déformations par le modèle.

Fig. 11 - Essai à niveaux de contraintes décroissants. Déformations permanentes obtenues.



a. Procédure (A) : 500 cycles au premier palier.

b. Procédure (B) : 20 000 cycles au premier palier.

palier i sur une éprouvette vierge (sinon, la déformation n'évolue plus au palier i).

La procédure d'essais par paliers semble donc être une bonne alternative pour étudier le comportement des GNT en fonction du nombre de cycles de chargement et des contraintes appliquées. En effet, elle permet, avec un minimum d'essais, de caractériser l'évolution des déformations permanentes pour différents niveaux de contraintes, en réduisant les biais dus à la dispersion expérimentale.

Dans cette première étude, on s'est intéressé uniquement à l'évolution des déformations permanentes axiales, mais il faudrait également évaluer les résultats obtenus avec la nouvelle procédure pour les déformations radiales.

Étude de l'influence des contraintes sur l'évolution des déformations permanentes

Objectifs et programme d'essais

Les essais réalisés au LRPC de Bordeaux ayant montré l'intérêt de la procédure d'essai par paliers, une seconde étude a été lancée pour appliquer cette procédure à l'étude de deux graves non traitées, en vue de définir des lois d'évolution des déformations permanentes en fonction des contraintes.

Matériaux étudiés

Deux séries d'essais ont été réalisées, sur une GNT 0/20 mm calcaire (GNT de Sorèze) et sur une GNT 0/10 mm issue d'un microgranite (GNT de Poulmarch). Les principales caractéristiques de ces deux matériaux, ainsi que les valeurs de teneur en eau et de masse volumique utilisées pour les essais, sont résumées dans le tableau I.

Programme d'essais

Les essais sur la GNT de Sorèze ont été réalisés au LRPC de Toulouse, avec l'appareil triaxial LPC

TABLEAU I
Principales caractéristiques
des graves non traitées (GNT) utilisées

| GNT | LA | MDE | Fines (%) | ρ_{dOPM} (kg/m ³) | w_{OPM} (%) |
|----------------|----|-----|-----------|------------------------------------|---------------|
| Sorèze 0/20 | 22 | 15 | 10 | 2 450 | 4,4 |
| Poulmarch 0/10 | 20 | 13 | 7,8 | 2 200 | 6,3 |

LA : coefficient Los Angeles.
MDE : coefficient micro-Deval en présence d'eau.

décrit au début de cet article. Les essais sur la GNT de Poulmarch 0/10 mm ont été réalisés au LRPC, avec un appareil triaxial conçu pour les sols (diamètre des éprouvettes 76,2 mm). Pour cette raison, les procédures d'essais utilisées pour les deux matériaux sont légèrement différentes. Tous les essais ont été réalisés avec des matériaux compactés à une masse volumique égale à $0,97 \rho_{dOPM}$ et une teneur en eau égale à $w_{OPM} - 2 \%$.

Pour la GNT de Sorèze, le programme d'essais comprenait cinq essais par paliers, avec des rapports de contraintes q/p de 0,5, 1, 1,5, 2 et 2,5 respectivement. Pour la GNT de Poulmarch, on a également réalisé cinq essais, mais avec des rapports q/p de 0, 1, 2, 2,5 et 3. Tous ces essais comportaient quatre paliers de chargement de 20 000 cycles. Les chargements appliqués sont résumés dans le tableau II. L'intérêt de la procédure d'essais par paliers est ici évident, puisque les cinq essais par paliers permettent de remplacer vingt essais sous un seul niveau de contraintes.

Résultats expérimentaux

Sur les figures 12a et 12b, on a représenté, pour les deux GNT, l'évolution des déformations permanentes axiales et radiales en fonction du nombre de cycles. Pour les deux matériaux, les résultats sont similaires, avec une stabilisation des déformations permanentes à la fin de chaque palier. L'évolution des déformations dépend aussi fortement du chemin de contraintes q/p suivi : à p fixé, les déformations axiales augmentent lorsque q/p augmente ; les déformations radiales, elles, diminuent lorsque q/p augmente et deviennent négatives pour $q/p \geq 2$ environ.

Étude et modélisation de l'évolution des déformations permanentes axiales

Approche adoptée

L'objectif est de proposer des lois simplifiées d'évolution des déformations permanentes en fonction du nombre de cycles et des contraintes appliquées, mais ayant une portée plus générale que celles trouvées dans la bibliographie. Dans un premier temps, l'analyse est limitée aux déformations permanentes axiales, qui sont les plus importantes pour l'estimation de l'ornièrage.

Pour essayer de définir de telles relations, on a fait les hypothèses suivantes :

➤ l'évolution des déformations permanentes axiales en fonction du nombre de cycles peut s'écrire

TABLEAU II
Valeurs de contraintes appliquées dans les essais par paliers sur les deux graves non traitées (GNT)

| GNT de Sorèze | | | | | GNT de Poulmarch | | | | |
|---------------|------------|------------------|------------------|-----|------------------|------------|------------------|------------------|-----|
| Essai | Chargement | p_{\max} (kPa) | q_{\max} (kPa) | q/p | Essai | Chargement | p_{\max} (kPa) | q_{\max} (kPa) | q/p |
| 1 | 1 | 60 | 150 | 2,5 | 1 | 1 | 20 | 60 | 3 |
| | 2 | 120 | 300 | 2,5 | | 2 | 40 | 120 | 3 |
| | 3 | 180 | 450 | 2,5 | | 3 | 60 | 180 | 3 |
| | 4 | 240 | 600 | 2,5 | | 4 | 80 | 240 | 3 |
| 2 | 1 | 75 | 150 | 2 | 2 | 1 | 32 | 80 | 2,5 |
| | 2 | 150 | 300 | 2 | | 2 | 64 | 160 | 2,5 |
| | 3 | 225 | 450 | 2 | | 3 | 96 | 240 | 2,5 |
| | 4 | 300 | 600 | 2 | | 4 | 128 | 320 | 2,5 |
| 3 | 1 | 100 | 150 | 1,5 | 3 | 1 | 75 | 150 | 2 |
| | 2 | 200 | 300 | 1,5 | | 2 | 150 | 300 | 2 |
| | 3 | 300 | 450 | 1,5 | | 3 | 225 | 450 | 2 |
| | 4 | 400 | 600 | 1,5 | | 4 | 300 | 600 | 2 |
| 4 | 1 | 100 | 100 | 1 | 4 | 1 | 75 | 75 | 1 |
| | 2 | 200 | 200 | 1 | | 2 | 150 | 150 | 1 |
| | 3 | 300 | 300 | 1 | | 3 | 225 | 225 | 1 |
| | 4 | 450 | 450 | 1 | | 4 | 300 | 300 | 1 |
| 5 | 1 | 100 | 50 | 0,5 | 5 | 1 | 50 | 0 | 0 |
| | 2 | 200 | 100 | 0,5 | | 2 | 100 | 0 | 0 |
| | 3 | 300 | 150 | 0,5 | | 3 | 150 | 0 | 0 |
| | 4 | 450 | 225 | 0,5 | | 4 | 200 | 0 | 0 |

sous la forme : $\varepsilon_1^p(N) = f(N) \cdot g(p_{\max}, q_{\max})$, c'est-à-dire comme produit d'une fonction du nombre de cycles N, et d'une fonction des contraintes maximales appliquées, p_{\max} et q_{\max} . Ce découplage simplifie la détermination des fonctions f et g ;

➤ pour la fonction f(N), on va utiliser la relation proposée dans [12] et reprise dans la norme de l'essai triaxial à chargements répétés, qui a déjà été validée sur un nombre important de résultats expérimentaux :

$$\varepsilon_1^{p*}(N) = \varepsilon_1^p(N) - \varepsilon_1^p(100) = A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right]$$

(pour $N > 100$ cycles)

Rappelons que cette relation suppose que ε_1^p tend vers une limite finie pour N infini. Elle ne peut donc s'appliquer que pour des niveaux de contraintes où il y a effectivement stabilisation des déformations permanentes (contraintes nettement inférieures aux contraintes de rupture). De plus, cette relation s'applique uniquement pour $N > 100$ cycles car, dans la méthode d'étude des déformations permanentes, les cent premiers cycles de chargement

(qui correspondent à une mise en place du matériau) sont généralement éliminés.

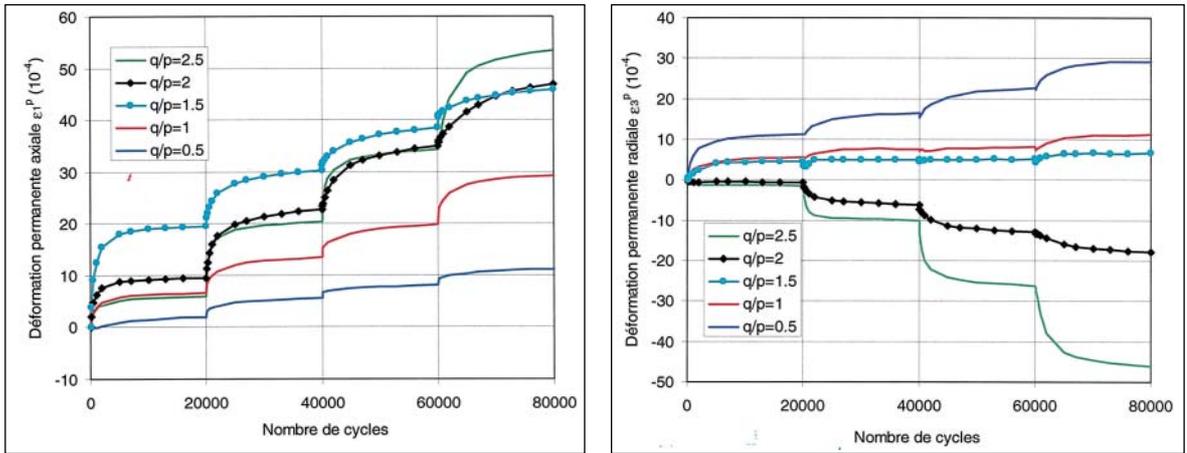
Évolution de ε_1^p en fonction des contraintes

Dans un premier temps, on s'est intéressé à l'évolution de ε_1^p en fonction des contraintes, afin de déterminer la fonction $g(p_{\max}, q_{\max})$. Pour cela, on a représenté les valeurs de ε_1^p obtenues dans les essais par paliers (à la fin de chaque palier) en fonction de la contrainte moyenne p, pour chaque rapport de contraintes q/p. Les courbes ainsi obtenues pour les deux GNT sont représentées sur les figures 13a et 13b. L'évolution de ε_1^p est assez régulière, et on voit que :

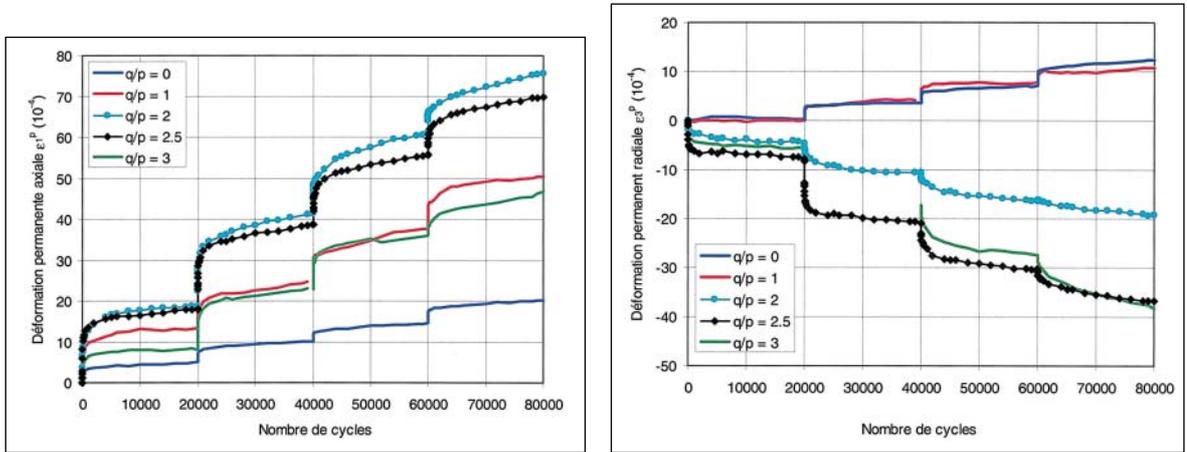
- ε_1^p augmente lorsque la contrainte moyenne p augmente ;
- ε_1^p dépend fortement du chemin q/p et augmente lorsque q/p augmente.

Pour déterminer la fonction g, on a fait l'hypothèse que les valeurs de ε_1^p obtenues à la fin des paliers, après 20 000 cycles, sont identiques à celles qui seraient obtenues sur une éprouvette vierge ; avec cette hypothèse, on peut déterminer directement la fonction g à partir des valeurs mesurées en fin de

Fig. 12 - Évolution des déformations permanentes axiales et radiales en fonction du nombre de cycles.

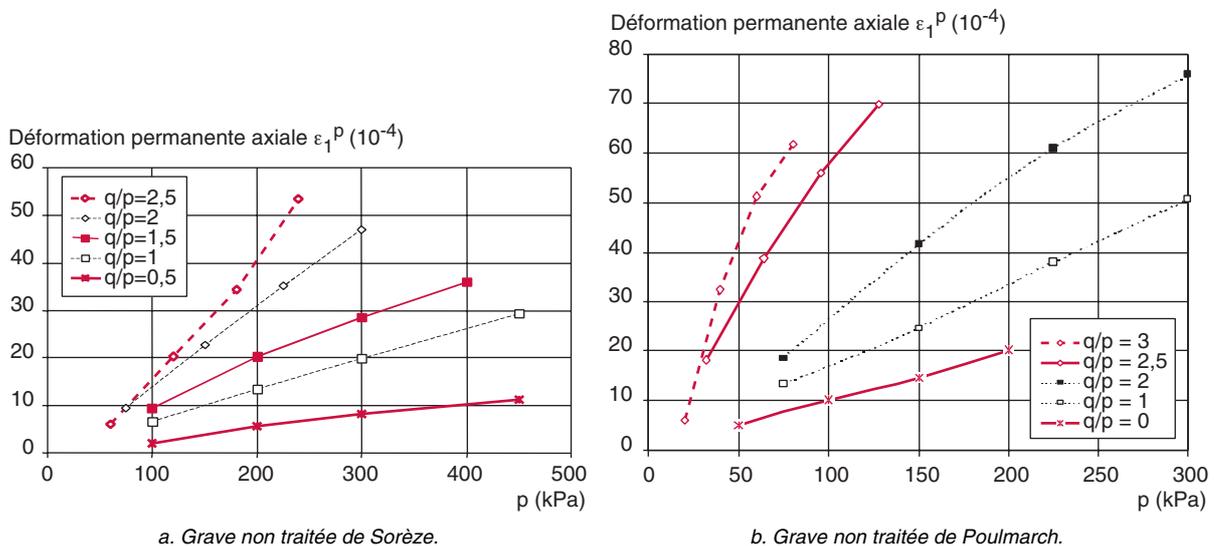


a. Grave non traitée de Sorèze.



b. Grave non traitée de Poulmarch.

Fig. 13 - Évolution des déformations permanentes axiales à 20 000 cycles en fonction des contraintes.



a. Grave non traitée de Sorèze.

b. Grave non traitée de Poulmarch.

palier. Deux formes différentes de la fonction g ont été testées :

$$(g_1) : \varepsilon_1^p = g_1(p_{\max}, q_{\max}) \\ = \varepsilon_1^{p0} \left(\frac{l_{\max}}{p_a} \right)^n \left(\frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)^m$$

avec : ε_1^{p0} , m , n paramètres.

$$(g_2) : \varepsilon_1^p = g_2(p_{\max}, q_{\max}) \\ = \varepsilon_1^{p0} \left(\frac{l_{\max}}{p_a} \right)^n \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)}$$

avec : ε_1^{p0} , m , n , s paramètres.

pour les deux fonctions, $l_{\max} = \sqrt{p_{\max}^2 + q_{\max}^2}$ et $p_a = 100$ kPa.

Ces deux relations diffèrent par la prise en compte du rapport q_{\max}/p_{\max} : dans la relation (g_1), ε_1^p augmente avec q_{\max}/p_{\max} suivant une loi puissance ; dans la relation (g_2), ε_1^p augmente avec q_{\max}/p_{\max} suivant une loi hyperbolique.

Le tableau III résume les résultats des ajustements effectués avec les deux relations, par une méthode de moindres carrés. On voit que la fonction (g_1) conduit à un bon ajustement pour la GNT de Sorèze, mais pas pour la GNT de Poulmarch, pour laquelle les chargements appliqués sont différents. La fonction (g_2) conduit à des résultats globalement plus satisfaisants pour les deux matériaux. Les ajustements obtenus avec la fonction (g_2) sont présentés sur les figures 14a et 14b.

Évolution de ε_1^p en fonction du nombre de cycles pour la grave non traitée de Sorèze

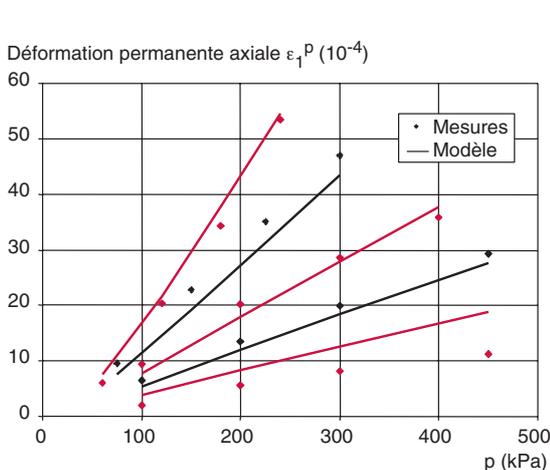
Dans un second temps, on s'est intéressé à la fonction $f(N)$ décrivant l'effet du nombre de cycles N .

TABLEAU III
Valeurs des paramètres des deux lois d'évolution de ε_1^p en fonction des contraintes

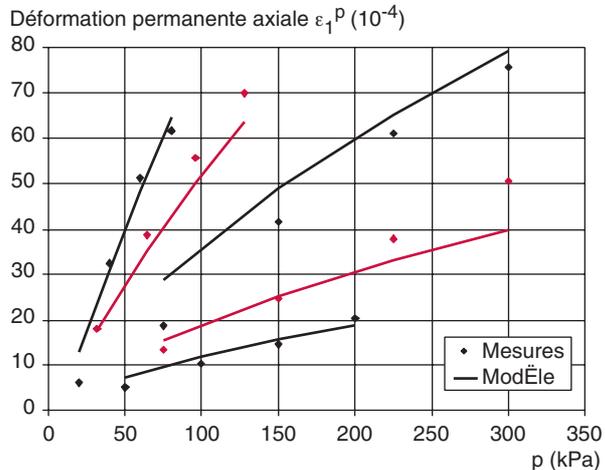
| Matériau | Relation g_1 | | | | Relation g_2 | | | | |
|-----------|--------------------------------|-------|-------|------------|--------------------------------|-------|------|-----------|------------|
| | $\varepsilon_1^{p0} (10^{-4})$ | n | m | $\rho (1)$ | $\varepsilon_1^{p0} (10^{-4})$ | n | m | s (kPa) | $\rho (1)$ |
| Sorèze | 3,35 | 1,14 | 0,65 | 0,839 | 14,0 | 0,89 | 3,35 | 119 | 0,796 |
| Poulmarch | 14,55 | 0,698 | 0,595 | 0,566 | 50,3 | 0,588 | 3,80 | 42,8 | 0,771 |

ρ : coefficient de corrélation de l'ajustement.

Fig. 14 - Ajustement des valeurs ε_1^p obtenues à la fin des paliers de chargement avec la relation (g_2).



a. Grave non traitée de Sorèze.



b. Grave non traitée de Poulmarch.

La fonction cherchée est de la forme :

$$f(N) = A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right]$$

pour $N > 100$ cycles.

On a d'abord cherché à déterminer cette fonction pour la GNT de Sorèze, en utilisant la méthode suivante :

➤ on a considéré, pour chaque essai, la courbe d'évolution des déformations permanentes au cours du premier palier de chargement ;

➤ l'expression complète de la loi d'évolution de ε_1^p étant supposée de la forme $\varepsilon_1^p(N) = f(N) \cdot g_2(p_{\max}, q_{\max})$, on a déterminé, pour chacun de ces

paliers, les valeurs de $\frac{\varepsilon_1^p(N)}{g_2(p_{\max}, q_{\max})}$, où g_2 est la

fonction déterminée précédemment. On a ainsi obtenu cinq courbes variant entre 0 et 1 ;

➤ on a utilisé une méthode de moindres carrés pour ajuster la fonction $f(N)$ sur ces courbes.

On a ainsi obtenu les paramètres suivants pour la fonction $f(N)$: $A_1 = 1,32$ et $B = 0,27$ (corrélation $\rho = 0,830$).

Pour la GNT de Sorèze, on obtient donc finalement une loi d'évolution de ε_1^p à cinq paramètres, dont l'expression est :

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1^{p0} \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right] \left(\frac{l_{\max}}{p_a} \right)^n \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)}$$

avec

$$\varepsilon_1^{p0} = 18,48 ; B = 0,27 ; n = 0,89 ; m = 3,35 ; s = 119 \text{ kPa.}$$

Sur la figure 15a, on a présenté les prédictions obtenues avec cette loi pour plusieurs essais par paliers, avec des rapports $q/p = 0,5, 1, 1,5$ et $2,5$. On voit que la loi proposée décrit assez bien l'évolution de ε_1^p , tant en ce qui concerne les déformations finales à chaque palier que l'évolution en fonction du nombre de cycles. Dans les essais à $q/p = 1, 1,5$ et $2,5$, l'écart entre les déformations mesurées et calculées est inférieur à $4 \cdot 10^{-4}$, pour tous les paliers. Dans l'essai à $q/p = 0,5$, où les déformations sont faibles, l'écart est un peu plus grand, et atteint au plus $8 \cdot 10^{-4}$. Ces résultats montrent que l'hypothèse de découplage, qui consiste à écrire la loi d'évolution de ε_1^p comme produit d'une fonction du nombre de cycles et d'une fonction des contraintes, donne d'assez bons résultats.

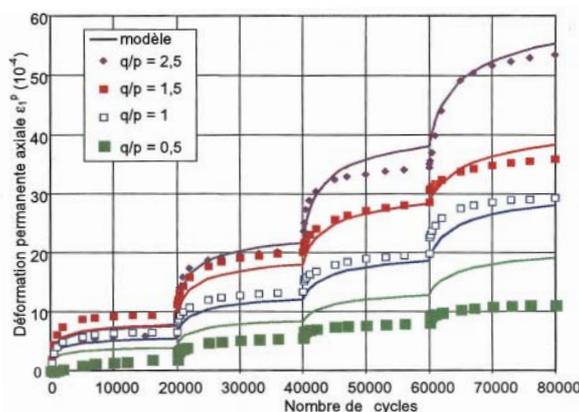
Évolution de ε_1^p en fonction du nombre de cycles pour la grave non traitée de Poulmarch

La même approche a ensuite été utilisée pour déterminer la fonction $f(N)$ pour la GNT de Poulmarch. La seule différence est que lors de la réalisation des essais sur la GNT de Poulmarch, on n'a pas éliminé les cent premiers cycles de chargement, mais seulement le premier cycle. Pour cette raison, on a modifié l'expression de $f(N)$ en :

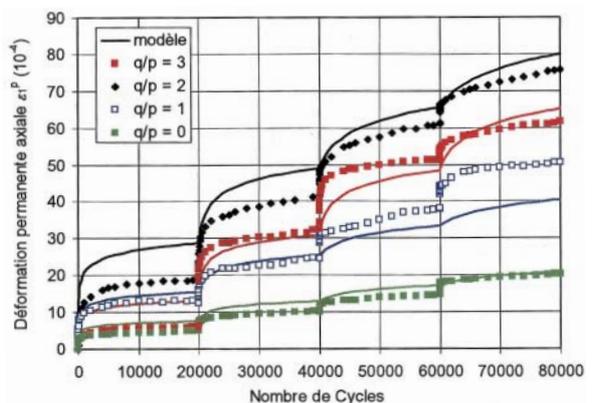
$$f(N) = A_1 [1 - (N)^{-B}] \text{ pour } N > 1$$

Comme pour la GNT de Sorèze, on a utilisé les résultats obtenus au cours du premier palier de chargement de chaque essai pour déterminer les paramètres de la fonction $f(N)$ et on a trouvé : $A_1 = 3,88$ et $B = 0,030$ (corrélation $\rho = 0,830$).

Fig. 15 - Comparaison de la loi d'évolution de ε_1^p avec les résultats expérimentaux.



a. Grave non traitée de Sorèze.



b. Grave non traitée de Poulmarch.

Pour la GNT de Poulmarch, la loi d'évolution de ε_1^p en fonction du nombre de cycles N et des contraintes finalement obtenue est donc :

$$\varepsilon_1^p = \varepsilon_1^{p0} [1 - (N)^{-B}] \left(\frac{1_{\max}}{P_a} \right)^n$$

$$\frac{1}{\left(m + \frac{s}{P_{\max}} - \frac{q_{\max}}{P_{\max}} \right)}$$

avec

$$\varepsilon_1^{p0} = 195,2 ; B = 0,030 ; n = 0,588 ; m = 3,80 ; s = 42,8 \text{ kPa.}$$

Sur la figure 15b, on a présenté les prédictions obtenues avec cette loi pour les essais par paliers à $q/p = 0, 1, 2$ et 3 . On voit que, dans l'ensemble, le modèle prédit également assez bien les résultats expérimentaux pour la GNT de Poulmarch. L'écart maximal entre les déformations mesurées et le modèle est ici de 8.10^{-4} .

Remarques concernant la loi d'évolution des déformations permanentes

Tout d'abord, il faut souligner que la loi d'évolution des déformations permanentes que l'on vient de présenter s'applique uniquement aux déformations axiales. Des tentatives ont également été faites pour exploiter les déformations radiales (ou également les déformations volumiques), mais il n'a pas été possible, pour les essais réalisés, de trouver des relations satisfaisantes. Cela peut être dû à deux raisons :

- le fait que les déformations radiales peuvent changer de signe (elles sont positives pour q/p faible et négatives pour q/p élevé) ;
- le caractère plus dispersé des mesures de déformations radiales, par rapport aux déformations axiales.

D'autres études expérimentales devront donc être réalisées pour mieux caractériser l'évolution des déformations radiales.

On sait également, d'après de nombreuses études en laboratoire, que les déformations permanentes des graves non traitées dépendent fortement de la teneur en eau. Pour obtenir des résultats représentatifs du comportement des matériaux sur chaussées, il est donc important de déterminer la loi d'évolution des déformations permanentes pour une valeur de teneur en eau proche des conditions *in situ*. Il peut également être intéressant d'établir de telles relations pour plusieurs teneurs en eau différentes, afin de pouvoir évaluer l'influence

des variations saisonnières de ce paramètre sur l'orniérage.

Enfin, cette recherche devra être poursuivie, pour mettre au point une méthode de calcul permettant, à partir de la loi proposée, de réaliser des prédictions d'orniérage de chaussées.

Conclusions

Un premier programme de recherche avait déjà été conduit, il y a quelques années, dans le réseau des LPC [12], pour étudier les déformations permanentes des graves non traitées sous chargements cycliques. Dans ces premières études, on s'était principalement intéressé à l'évolution des déformations permanentes en fonction du nombre de cycles de chargement (pour quelques niveaux de contraintes représentatifs) et l'effet des contraintes appliquées avait été peu analysé. Une première loi d'évolution des déformations permanentes axiales en fonction du nombre de cycles avait été proposée :

$$\varepsilon_1^{p*}(N) = \varepsilon_1^p(N) - \varepsilon_1^p(100)$$

$$= A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right]$$

Dans ce travail, on a cherché à caractériser l'évolution des déformations permanentes en fonction des contraintes cycliques appliquées. Pour cela, une nouvelle procédure d'essai a été mise au point. Elle consiste à réaliser, sur une même éprouvette, plusieurs paliers de chargement successifs, suivant le même chemin de contraintes q/p .

Une première étude a montré que cette procédure permettait de réduire le nombre d'essais à réaliser pour étudier l'influence des contraintes, sans changer significativement les résultats. Ensuite, la procédure a été appliquée à la caractérisation des déformations permanentes de deux graves non traitées (GNT 0/20 calcaire et GNT 0/10 issue d'un microgranite) pour différents chemins de contraintes, avec des rapports q/p compris entre 0 et 3. Les résultats ont permis de proposer une relation décrivant l'évolution des déformations permanentes axiales en fonction des contraintes cycliques maximales appliquées et du nombre de cycles.

Les recherches présentées dans cet article seront poursuivies, avec les mêmes partenaires (LRPC de Bordeaux, université de Bordeaux, LCPC) dans deux directions :

- la réalisation d'essais pour compléter les résultats obtenus et, en particulier, mieux caractériser l'évolution des déformations permanentes radiales. Le passage à une écriture incrémentale

des lois proposées, se prêtant mieux à la prise en compte de différents cas de chargement dans le calcul de l'ornièrage, est également envisagé ;

➤ l'implantation de la loi d'évolution des déformations permanentes dans une méthode de calcul

de la profondeur d'ornièrage d'une chaussée et la validation de cette méthode de calcul, par comparaison avec des résultats d'expériences en vraie grandeur sur des chaussées à faible trafic, à assises en graves non traitées.

ANNEXE

Lois d'évolution de la déformation permanente en fonction du nombre de cycles

| Référence | Loi d'évolution | Paramètres |
|------------------|--|-----------------------------------|
| Barksdale (1972) | $\epsilon_1^p(N) = a + b \log(N)$ | a, b |
| Paute (1988) | $\epsilon_1^p(N) = A_0 \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{N} + D} + \epsilon_1^p(100)$ | A_0, D , et $\epsilon_1^p(100)$ |
| Sweere (1990) | $\log(\epsilon_1^p(N)) = a + b \log(N)$ | a, b |
| Hornych (1993) | $\epsilon_1^p(N) = A \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right] + \epsilon_1^p(100)$ | A, B, et $\epsilon_1^p(100)$ |

Lois d'évolution de la déformation permanente axiale en fonction des contraintes

| Référence | Loi d'évolution | Paramètres |
|----------------|--|--|
| Hyde (1974) | $\epsilon_1^p = a \frac{q}{\sigma_3}$ | a |
| Shenton (1974) | $\epsilon_1^p = K \cdot \left(\frac{q_{max}}{\sigma_3} \right)^\alpha$ | K et α |
| Lekarp (1997) | $\frac{\epsilon_1^p(N_{ref})}{(L/p_0)} = a \cdot \left(\frac{q}{p} \right)_{max}^b$ | a, b, et N_{ref} $L = \sqrt{q^2 + p^2}$, $p_0 = 100$ kPa |

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, Guide technique SETRA-LCPC, décembre 1994.
- [2] PAUTE J.-L., MARIGNIER J., VIDAL B. (1994), Le triaxial à chargements répétés LPC pour l'étude des graves non traitées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **190**, mars-avril, pp. 19-26.
- [3] BALAY J., GOMES CORREIA A., JOUVE P., HORNYCH P., PAUTE J.-L. (1998), Étude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées – Dernières avancées, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **216**, juillet-août, pp. 3-18.
- [4] BROWN S.F., HYDE A.F.L. (1975), Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material, *Transportation Research Record*, **537**, pp. 49-58.
- [5] MONISMITH C.L., OGAWA N., FREEME C.R. (1975), Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading, *Transportation Research Record*, **537**, pp. 1-17.

- [6] HYDE A.F.L. (1974), *Repeated load triaxial testing of soils*, Thèse de doctorat, Université de Nottingham.
- [7] SHENTON M.J. (1974), *Deformation of railway ballast under repeated loading (triaxial test)*, Rapport RP 5, British Railways Research Department.
- [8] LEKARP F. (1997), *Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials*, Licentiate Thesis, TRITA IP FR 97-20 Royal Institute of Technology, Stockholm, 84 pages.
- [9] BARKSDALE R.D. (1972), *Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials*, Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, **Vol. 3**, pp. 161-174.
- [10] PAUTE J.-L., JOUVE P., MARTINEZ J., RAGNEAU E. (1988), Modèle de calcul pour le dimensionnement des chaussées souples, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **156**, juillet-août, pp. 21-36.
- [11] SWEERE G.T.H. (1990), *Unbound granular bases for roads*, Thèse de doctorat, Université de Delft, 431 pages.
- [12] HORNYCH P., CORTE J.-F., PAUTE J.-L. (1993), Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **184**, mars-avril, pp. 77-84.
- [13] GIDEL G. (1997), *Étude des déformations permanentes des graves non traitées sous chargements répétés*, DEA, École centrale de Paris, 23 pages.
- [14] MARTINEZ J. (1980), *Contribution au dimensionnement des chaussées souples. Comportement des matériaux et méthode de calcul*, Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 171 pages.
- [15] HORNYCH P., HAMEURY O., PAUTE J.-L. (1998), *Influence de l'eau sur le comportement mécanique des graves non traitées et sols supports de chaussées*, Simposio International Sobre Drenaje interno de Firmes y Explanadas, Granada, Espagne, novembre, pp. 249-257.

ABSTRACT

A new approach for investigating the permanent deformation behaviour of unbound granular material using the repeated loading triaxial apparatus

G. GIDEL, P. HORNYCH, J.-J. CHAUVIN, D. BREYSSE, A. DENIS

Rutting caused by the permanent deformation of unbound materials (unbound granular material (UGM) road foundation and subgrades), is one of the principal damage modes for low traffic flexible pavements. In spite of this, there is currently no truly satisfactory method of characterizing the permanent deformation behaviour of these materials in the laboratory and predicting rutting in pavements.

For a number of years, the network of Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) has been conducting research into the mechanical behaviour of unbound granular material using repeated loading triaxial tests. However, until now the studies that investigate permanent deformation aimed mainly to compare the performance of different materials, by means of cyclic tests conducted under a single level of loading. This paper describes a new test procedure, which provides a means of studying permanent deformation under a large range of stresses, with a small number of tests. The results have been used to develop relationships that link permanent deformation with stress.

The new procedure has been applied to two untreated granular materials. On the basis of the results we propose an empirical relationship which describes permanent axial deformation in relation to the maximum applied stress and the number of loading cycles. The application of this model to the prediction of in-pavement rutting is then discussed.