

**COMPORTEMENT CYCLIQUE
DES SOLS ET DES
GRAVES NON TRAITEES**

**APPLICATION A LA
MODELISATION DES CHAUSSEES**

P.HORNYCH
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,
Nantes

1

- Introduction – Objectifs des recherches sur les sols et graves non traitées
- Essais triaxiaux cycliques pour les graves non traitées et les sols supports de chaussées
- Etude et modélisation du comportement élastique
- Etude et modélisation des déformations permanentes
- Application à la modélisation des chaussées

2

Introduction

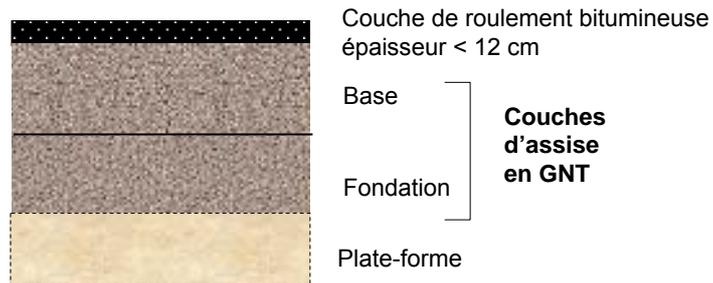
Objectifs des recherches réalisées au LCPC sur les graves non traitées (GNT) et les sols supports de chaussées :

- Etude du comportement cyclique des sols et GNT sous sollicitations routières.
- Classification des matériaux suivant leurs performances mécaniques
- Développement de modèles de comportement
- Application à la modélisation et au dimensionnement des chaussées

3

Chaussées étudiées

Principalement chaussées à faible trafic, à assise non traitée



Épaisseurs des couches d'assise en GNT :

base : 15 à 20 cm

fondation : 0 à 60 cm

4

Besoins pour le dimensionnement des chaussées

Méthode de dimensionnement actuelle :

- Calculs de structures de chaussées en élasticité linéaire
- Détermination des modules des GNT à partir de critères empiriques (dureté des granulats, qualité des fines..)
- Critère de dimensionnement à l'orniérage, basé sur le niveau des déformations élastiques verticales :

$$\varepsilon_z < A \cdot N^{-B} \quad N \text{ nombre de cycles, } A, B \text{ paramètres}$$

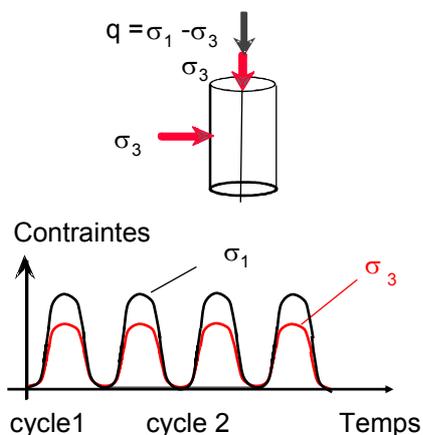
Besoins d'amélioration :

- Détermination en des caractéristiques mécaniques des matériaux **par des essais de laboratoire (ou in situ)**.
- Utilisation de modèles de comportement plus réalistes, non linéaires
- Prédiction des déformations permanentes (orniérage)

5

Essais triaxiaux cycliques pour les GNT et sols supports de chaussées

Principe des essais



- Simulation des chargements routiers
- Variation cyclique des contraintes σ_1 et σ_3
- Mesure des déformations axiales et radiales
- Chargement sinusoidal - fréquence ≈ 2 Hz

6

Appareil triaxial pour les sols



Éprouvettes : diamètre 76 mm
Système de chargement
servo-pneumatique



Mesure des déformations
axiales et radiales par
capteurs à effet Hall

7

Appareil triaxial pour les GNT



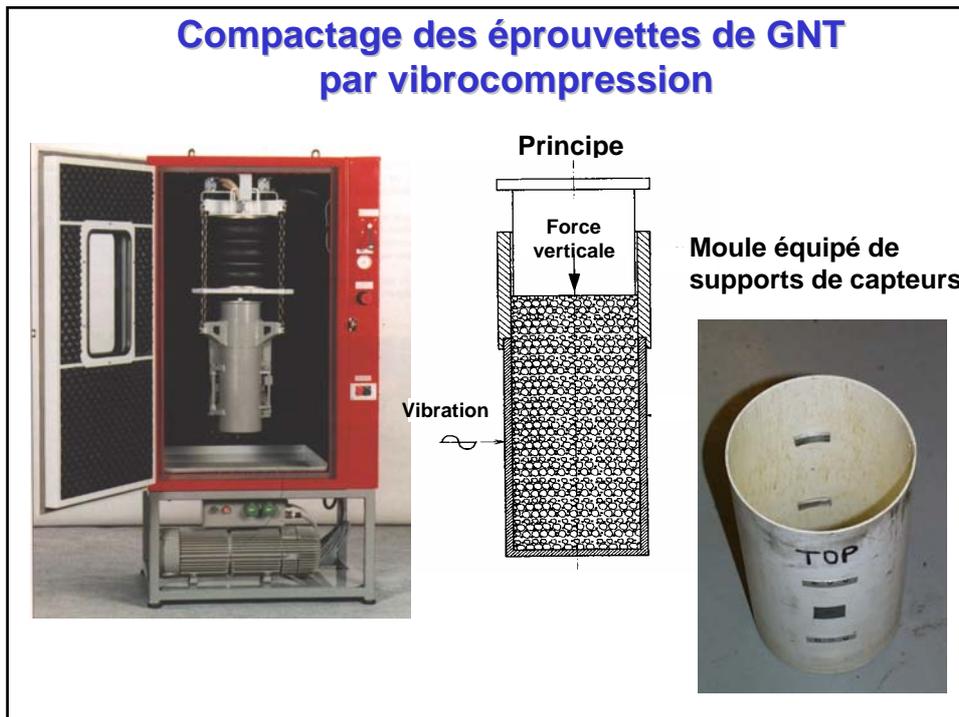
Éprouvettes : diamètre 160 mm
Système de chargement
force axiale : servo-hydraulique
pression : servo-pneumatique



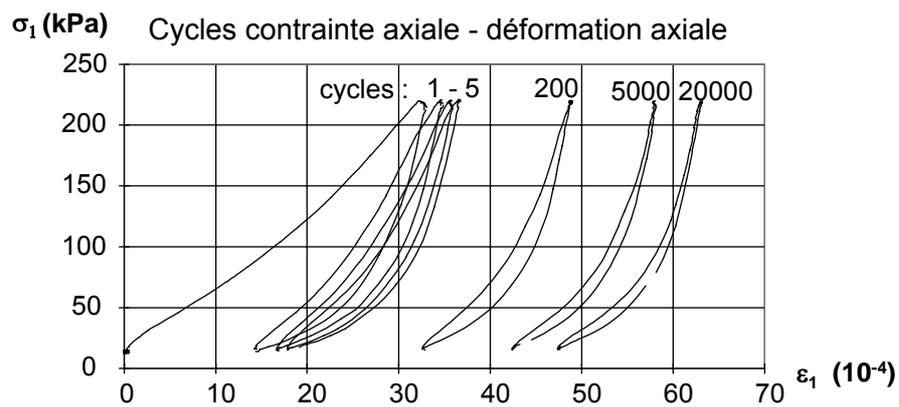
Mesure des déformations
axiales et radiales par capteurs
à effet Hall

8

Compactage des éprouvettes de GNT par vibrocompression



Comportement cyclique d'une grave non traitée Sous chargement routier



- Comportement élasto-plastique
- Cycles charge – décharge non linéaires
- Accumulation de déformations permanentes – généralement accomodation après un grand nombre de cycles

10

Procédures d'essai pour les GNT et les sols

Essais sur matériaux compactés, non saturés

Densité et teneur en eau proches de l'optimum Proctor

Trois types d'essais :

Essais triaxiaux monotones

Détermination de la droite de rupture

Étude du comportement réversible (élastique)

Phase de conditionnement : 20000 cycles de chargement

Chargements courts (100 cycles) suivant différents chemins de contraintes q/p

Étude des déformations permanentes

Procédure d'essai par paliers [Gidel, 2002]: chaque éprouvette est soumise à plusieurs chargements successifs, à grand nombre de cycles, avec des niveaux de contraintes croissants (à q/p constant).

Etude du comportement réversible (GNT)

Chargements

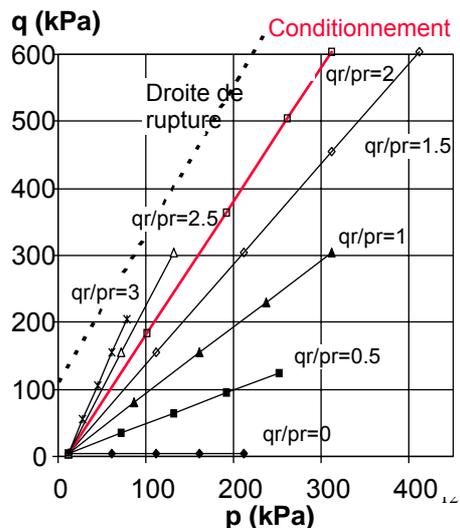
Conditionnement : 20000 cycles à $q/p = 2$

Chargements courts (100 cycles) suivant des chemins de contraintes avec $0 \leq q/p \leq 3$

fréquence ≈ 2 Hz

Conditions drainées

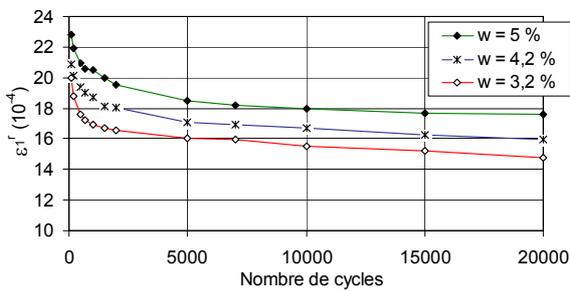
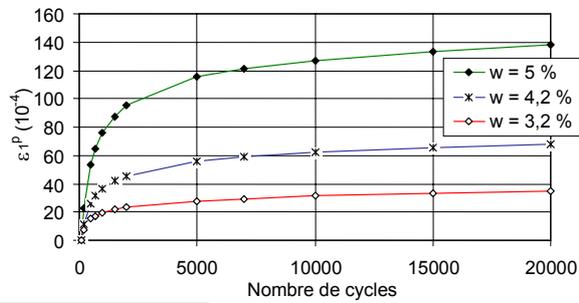
Chemins de contraintes (GNT)



Phase de conditionnement

Essais réversibles sur une GNT (gneiss) à 3 teneurs en eau

Evolution des déformations permanentes axiales

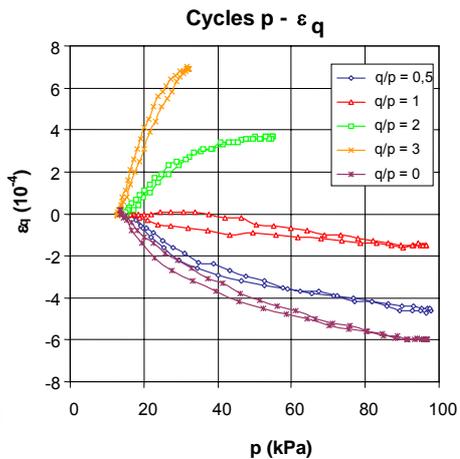
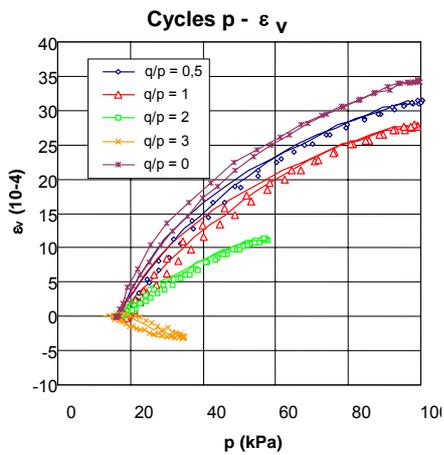


Evolution des déformations réversibles axiales

13

Comportement réversible (GNT)

Exemples de cycles contraintes – déformations pour différents chemins de contraintes



14

Modélisation du comportement réversible

Modèle élastique non linéaire anisotrope pour les GNT et sols granulaires

Modèle de Boyce :

$$\varepsilon_V = \frac{1}{K_a} \frac{p^n}{p_a^{n-1}} \left[1 + \frac{(n-1)K_a}{6G_a} \left(\frac{q}{p} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_q = \frac{1}{3G_a} \frac{p^n}{p_a^{n-1}} \frac{q}{p}$$

3 paramètres : K_a , G_a , n

Prise en compte de l'**anisotropie** : paramètre γ $\sigma_1 \longrightarrow \gamma\sigma_1$

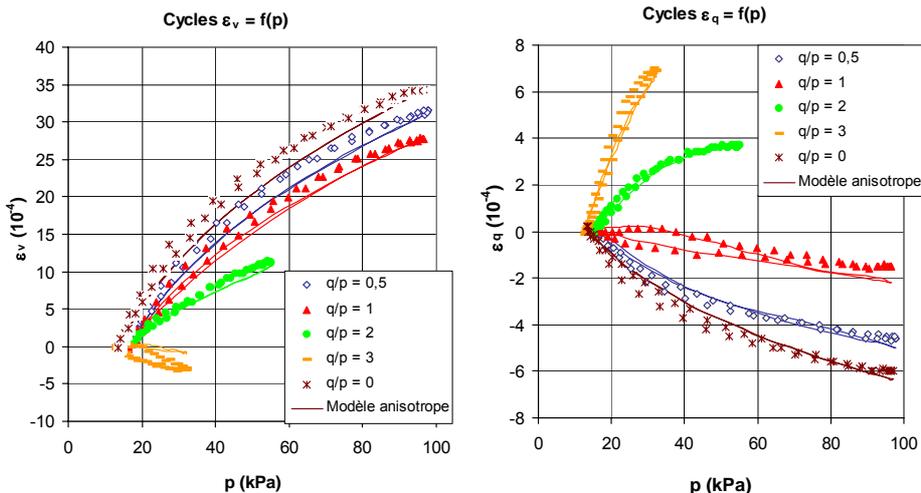
$$\varepsilon_V^* = \frac{1}{K_a} \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \left[1 + \frac{(n-1)K_a}{6G_a} \left(\frac{q^*}{p^*} \right)^2 \right] \quad \varepsilon_q^* = \frac{1}{3G_a} \frac{p^{*n}}{p_a^{n-1}} \frac{q^*}{p^*}$$

Avec : $p^* = (\gamma\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, $q^* = \gamma\sigma_1 - \sigma_3$,

$$\varepsilon_V^* = \varepsilon_1/\gamma + 2\varepsilon_3, \quad \varepsilon_q^* = 2/3 (\varepsilon_1/\gamma - \varepsilon_3)$$

15

Exemple de modélisation du comportement réversible (GNT)



16

Classement des GNT suivant leurs performances mécaniques

Module caractéristique :

E_c = module sécant pour $p=250$ kPa et $q=500$ kPa

Déformation permanente caractéristique A_{1c} :

= paramètre A_1 de la loi

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

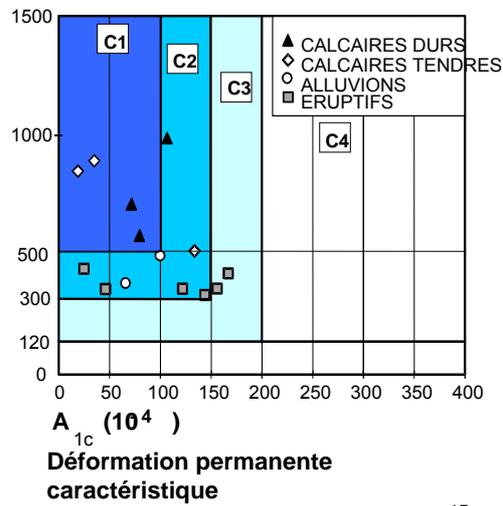
lors du conditionnement

Paramètres déterminés à

$$w = w_{OPM} - 2 \%$$

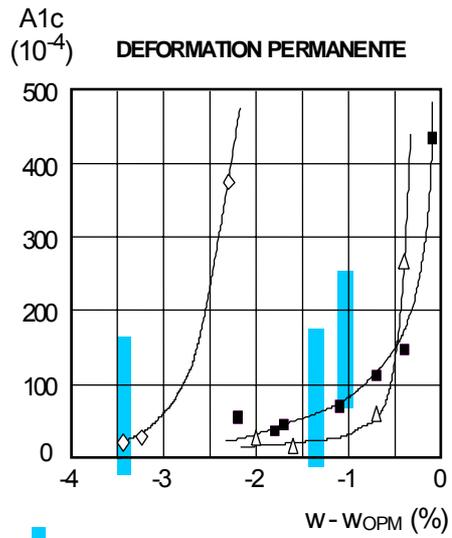
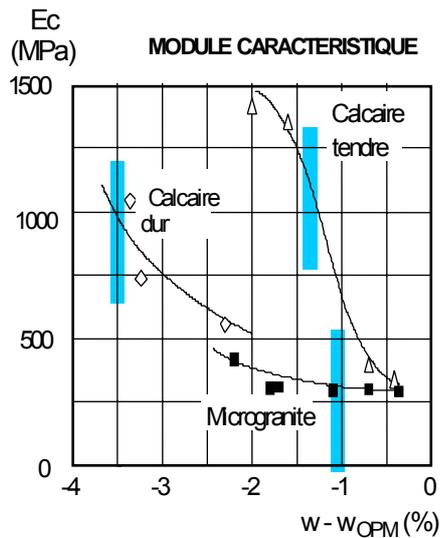
$$\rho_d = 0,97 \cdot \rho_{dOPM}$$

E_c (MPa) Module caractéristique



17

Influence de la teneur en eau sur le comportement des GNT

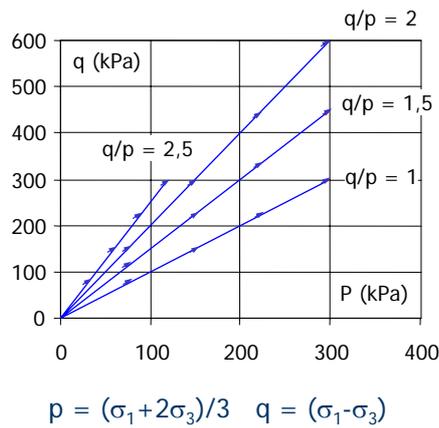


■ teneur en eau résiduelle sur chaussée

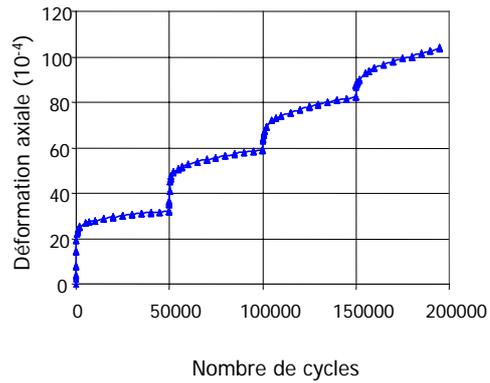
Etude des déformations permanentes des GNT

Procédure d'essai : Application de plusieurs paliers de chargement, à q/p constant

Chargements appliqués



Déformations permanentes
(essai à $q/p = 2$)

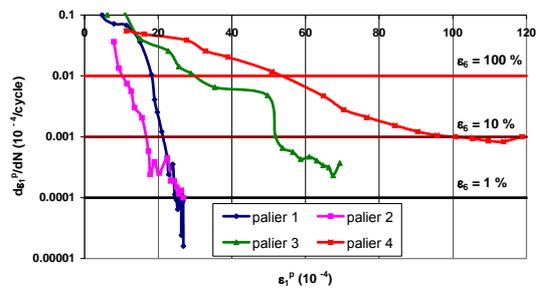
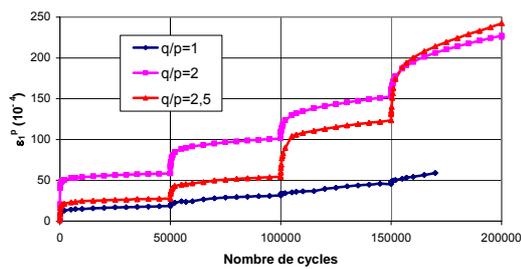


19

Déformations permanentes – résultats expérimentaux

Essais sur la GNT des maraichères (gneiss) – $w = 5\%$

Evolution des déformations permanentes axiales



Essai à $q/p = 2,5$
taux d'accroissement
 $d\varepsilon_1^p / dN$

20

Modélisation des déformations permanentes des GNT

2 Approches :

- **Modèle simplifié**

Loi empirique d'évolution des déformations axiales :

$$\varepsilon_1^p(N) = f(N) \cdot g(p_{\max}, q_{\max}) \quad \text{Gidel (2001)}$$

N nombre de cycles, p_{\max} , q_{\max} contraintes maximales

- **Modèle élastoplastique cyclique**

Modèle de Chazallon (2000)

Approche issue de la mécanique des sols

21

Loi empirique d'évolution des déformations permanentes

Hypothèse : $\varepsilon_1^p(N) = f(N) \cdot g(p_{\max}, q_{\max})$

- Variation en fonction des contraintes [Gidel, 2001] :

$$g(p_{\max}, q_{\max}) = \varepsilon_1^{p_0} \cdot \left(\frac{l}{p_a} \right)^n \left(\frac{1}{m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}}} \right)$$

$$\text{avec : } l = \sqrt{p_{\max}^2 + q_{\max}^2}$$

$\varepsilon_1^{p_0}$, n, m et s paramètres du modèle.

- Variation en fonction du nombre de cycles [Hornych, 1993] :

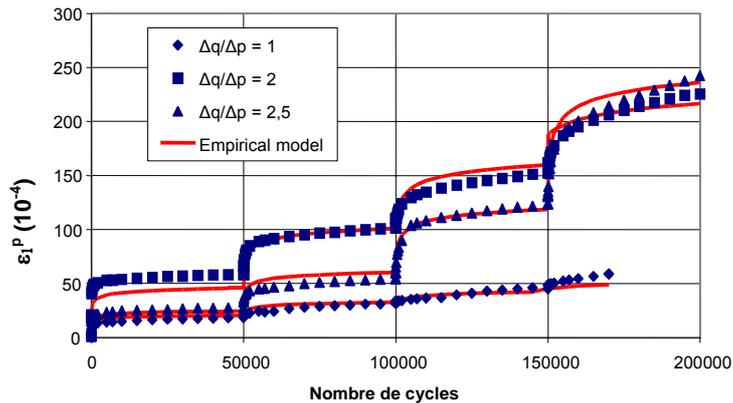
$$f(N) = A \left[1 - \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-B} \right]$$

22

Exemple d'application de la loi empirique

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_1^p_0 \cdot [1 - N^{-B}] \cdot \left[\frac{L}{p_a} \right]^n \cdot \frac{1}{\left(m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}} \right)} \quad \text{Gidel (2001)}$$

GNT des Maraichères (gneiss) - w = 5 %



23

Modèle élastoplastique [Chazallon, 2000]

- Modèle non associé avec écrouissage cinématique et isotrope
- Partie élastique = modèle de Boyce anisotrope
- Surface de charge et potentiel plastique basés sur le modèle de Hujieux [1985]

Surface de charge

$$f = \sqrt{\frac{27}{2}} \frac{S_{II}(\underline{\sigma} - \underline{X})}{M I_I (\underline{\sigma} - \underline{X})} + r \ln \left(\frac{I_I(\underline{\sigma} - \underline{X})}{3p_c} \right)$$

Potentiel plastique

$$g = \sqrt{\frac{27}{2}} \frac{S_{II}(\underline{\sigma} - \underline{X})}{M I_I (\underline{\sigma} - \underline{X})} + \ln \left(\frac{I_I(\underline{\sigma} - \underline{X})}{3p_c} \right)$$

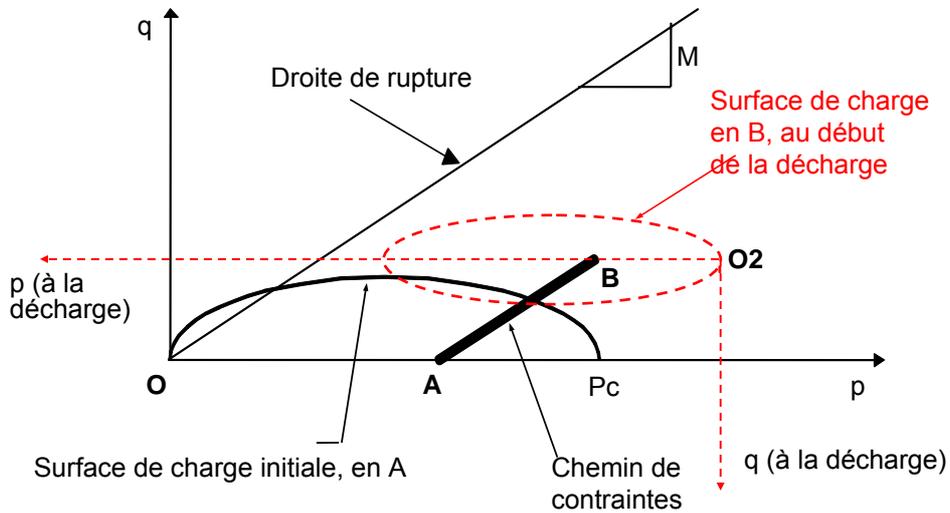
3 variables d'écrouissage

- $p_c = p_{c0} \cdot \exp(\beta \varepsilon_v^p)$
- $r = r_0 + \varepsilon_d^p / (a + \varepsilon_d^p)$

$$\begin{cases} \underline{X} = \underline{\sigma} + P_{uc} p_c \underline{1} & \text{à la décharge} \\ \underline{X} = \underline{\sigma} + P_{lc} p_c \underline{1} & \text{à la recharge} \end{cases}$$

24

Modèle élastoplastique [Chazallon, 2000]



25

Modèle élastoplastique [Chazallon, 2000]

Paramètres du modèle

Paramètres élastiques non linéaires

- $K_a - G_a - n - \gamma$

Détermination par un essai de comportement réversible au triaxial cyclique

Paramètres monotones

- $a_m - b - r_m^{el} - \beta$
- $M - C_0$

Détermination par au moins 3 essais triaxiaux monotones

Paramètres cycliques

- $a_c - r_c^{el} - P_{uc} - P_{lc}$
- $\mu - P_{C0}$ (constantes)

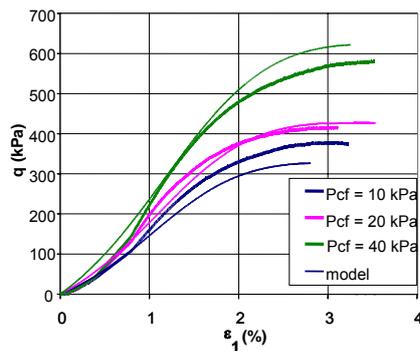
Détermination par au moins 2 essais de déformations permanentes au triaxial cyclique

26

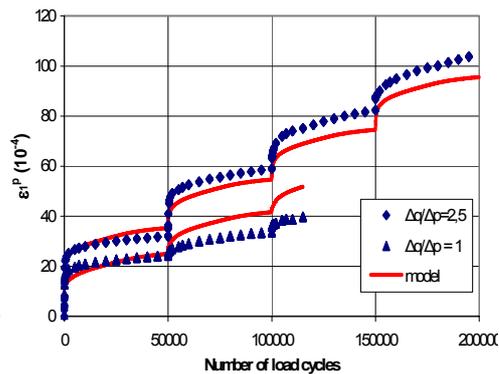
Exemple d'application du modèle de Chazallon

GNT des Maraichères (gneiss) - $w = 4\%$

Essais triaxiaux Monotones



Essais de déformations permanentes



27

PROGRAMME ORNI POUR LA PREDICTION DE L'ORNIERAGE

Méthode de calcul choisie : éléments finis (module de CESAR-LCPC)

Avantages : simulation réaliste de la géométrie de la chaussée et des charge (2D ou 3D)

Possibilité d'utiliser différents modèles de comportement

Complexité du problème : nécessité de simuler toute l'histoire de chargement de la chaussée :

- Grand nombre de cycles.
- Charges, températures, teneurs en eau, caractéristiques des matériaux variables....

28

PRINCIPE DU MODULE ORNI :

Principale hypothèse : pour un cycle $\delta \underline{\underline{\varepsilon}}^p \ll \underline{\underline{\varepsilon}}^e$

→ Simplification : Modélisation séparée du comportement élastique et des déformations permanentes

Calcul en 3 étapes

- (1) Calcul des contraintes dans la chaussée, en 3 D, pour les différentes conditions de chargement, en considérant uniquement le comportement réversible (élastique ou visco-élastique)
Utilisation du module CVCR de CESAR-LCPC
- (2) Utilisation des champs de contraintes pour calculer les déformations permanentes en différents points de la chaussée, en 2D
- (3) Calcul structural des déplacements (orniérage)

Actuellement, seul l'orniérage des GNT est modélisé

29

PRINCIPE DU MODULE ORNI :

CALCUL A PLUSIEURS ECHELLES DE TEMPS

La durée de vie de la chaussée est découpée en **saisons**, où les caractéristiques des matériaux sont constantes.

Chaque saison est divisée en **jours**.

Chaque jour est divisé en **périodes**, à température constante.

Pour une période, on calcule un incrément moyen de déformation permanente en considérant une **distribution statistique des charges** (types de charges, vitesses, positions latérales).

→ Gain en temps de calcul, en évitant un calcul cycle par cycle

30

ORNI – Exemple d'application

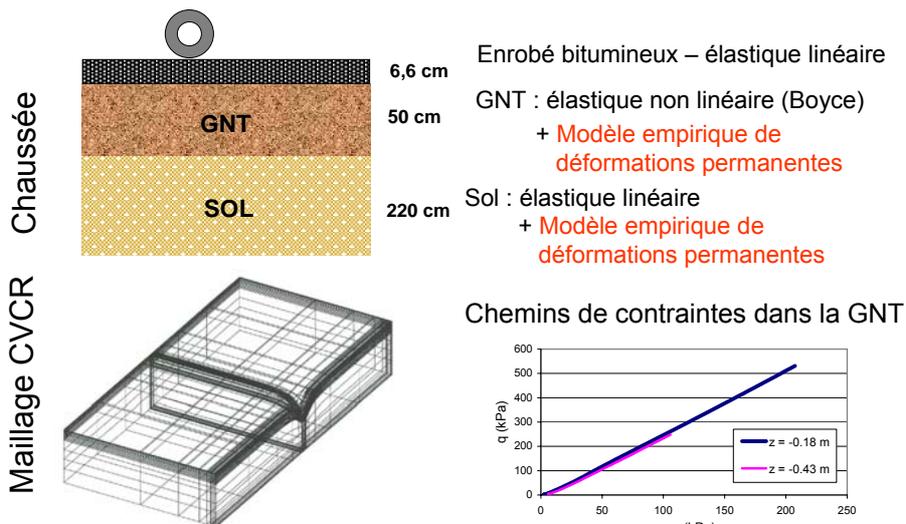
Essai en vraie grandeur sur chaussées à faible trafic réalisé en 2003 sur le manège de fatigue



5 structures de chaussées (longueur 25 m)
Charges : demi-essieux à roues jumelées (65 kN), vitesse 72 km/h
1.5 million de chargements

31

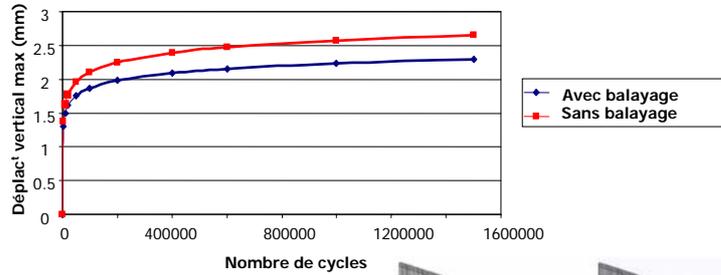
ORNI - EXEMPLE D'APPLICATION



32

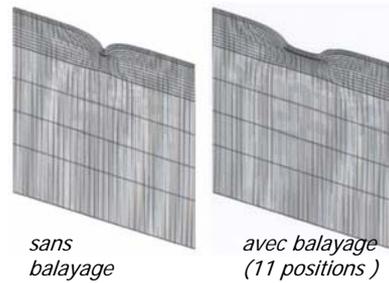
Effet du balayage latéral des charges

Profondeur d'ornièrè maximale



Profils d'ornièrè après 1,5 million de chargements (roue simple) :

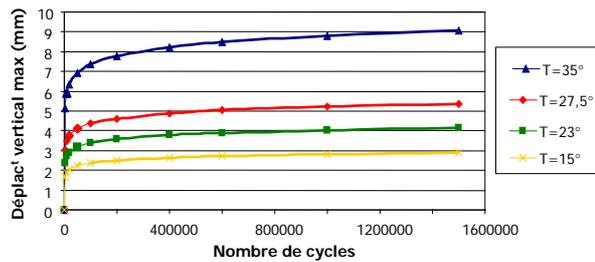
⇒ Faible influence du balayage



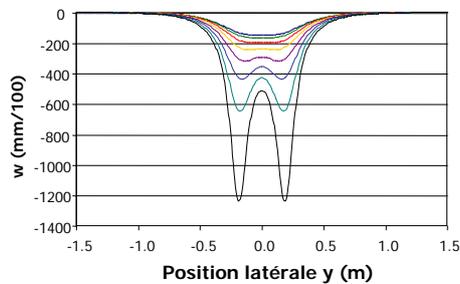
33

Effet de la température de la couche bitumineuse

Profondeur d'ornièrè maxi pour différentes températures



Profils transversaux pour différentes températures (8.5 to 42.5°C)

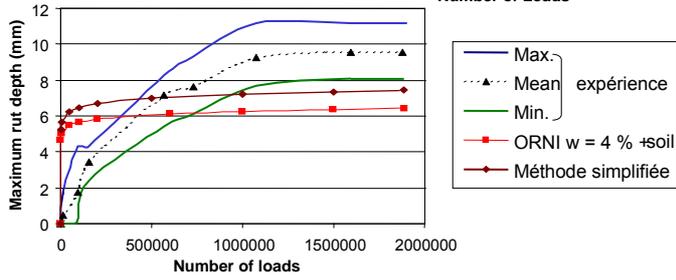
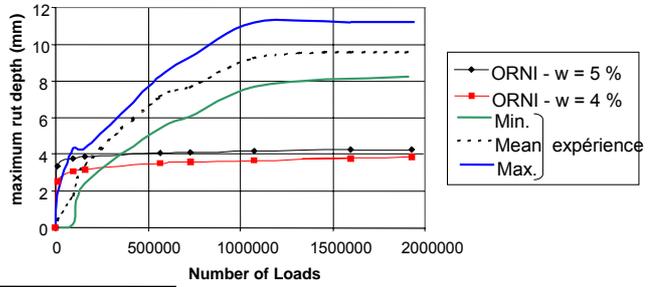


⇒ Forte influence de la température

34

Comparaison modèle - expérience

Orniérage de la GNT seule



Orniérage de la GNT et du sol