

## MODULE RÉVERSIBLE ET COEFFICIENT DE POISSON RÉVERSIBLE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES C-LTPP

Félix Doucet, ing., M.Sc.A., chargé de projet, Ministère des Transports du Québec, Québec, Canada  
Guy Doré, ing., Ph.D., professeur, Université Laval, Québec, Canada

### RÉSUMÉ

Le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste-empirique requiert les caractéristiques mécaniques des matériaux de chaussée. Le module réversible et le coefficient de Poisson réversible de 22 matériaux granulaires échantillonnés sur 11 sites C-LTPP ont été caractérisés à différents états de contraintes et teneurs en eau à l'aide d'un équipement triaxial à chargement déviatorique répété. Le comportement non-linéaire des matériaux granulaires est modélisé en fonction de la contrainte totale pour le module réversible et en fonction de la déformation axiale réversible pour le coefficient de Poisson réversible. Un modèle général de module réversible fonction de la succion matricielle et un modèle général de coefficient de Poisson réversible indépendant de la teneur en eau sont développés à partir de la moyenne des modèles obtenus pour chaque matériau granulaire.

### ABSTRACT

Pavement design based on a mechanistic-empirical method requires the mechanical properties of pavement materials. The resilient modulus and resilient Poisson ratio of 22 granular materials sampled at 11 C-LTPP sites were characterized at different stress states and water contents with a repeated deviatoric load triaxial equipment. The non-linear behavior of the granular materials is modeled as a function total stress for the resilient modulus and as a function of resilient axial strain for the resilient Poisson ratio. A general resilient modulus model function of matrix suction and a general resilient Poisson ratio model independent of water content are developed based on the average of the models obtained for each granular material.

### 1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste-empirique requiert la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux de chaussée. L'approche mécaniste-empirique permet de dimensionner l'épaisseur des différents matériaux de chaussée en fonction de la distribution des contraintes et des déformations dans la chaussée selon le trafic et le climat (approche mécaniste) et en fonction des modèles d'endommagement des matériaux corrigés pour tenir compte des conditions *in situ* (approche empirique). Ce type d'approche permet d'évaluer la performance d'une chaussée avant sa construction en fonction des matériaux utilisés et des sollicitations prévues.

Le module réversible et le coefficient de Poisson réversible de 22 matériaux granulaires échantillonnés sur 11 sites du projet *Canadian Long Term Pavement Performance* C-LTPP ont été caractérisés afin de développer une banque de données sur les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires. La caractérisation a été effectuée à différents états de contrainte et teneurs en eau à l'aide d'une cellule triaxiale à chargement déviatorique répété afin de déterminer la relation non-linéaire de module réversible et de coefficient de Poisson réversible. Un modèle général de module réversible et de coefficient de Poisson réversible ont été développés à partir des modèles obtenus pour chaque matériau granulaire. Une relation entre le module réversible et la succion matricielle a également été développée.

### 2. CONTEXTE

#### 2.1 Mandat

Le *Canadian Strategic Highway Research Program* C-SHRP a mandaté l'Université Laval en 1999 pour effectuer la caractérisation du module dynamique et réversible des matériaux de chaussée des sites C-LTPP (Doucet & al 2004, Doucet & Doré 2004). Dans le cadre du même projet, le Ministère des Transports du Québec MTQ a mandaté l'Université Laval pour développer les méthodes d'essai pour la caractérisation du module dynamique des enrobés bitumineux et du module réversible des matériaux granulaires. Cette entente a permis de collaborer avec le personnel du MTQ et d'utiliser leurs équipements pour caractériser les matériaux C-LTPP.

Les sites C-LTPP sont des sections de suivi de performance de chaussée constituées d'une fondation granulaire non-liée revêtue d'un enrobé recouvert en 1989 ou 1990 par un nouvel enrobé. La figure 1 et le tableau 1 décrivent l'emplacement des 11 sites C-LTPP échantillonnés ainsi que leur année de construction, de réhabilitation et d'échantillonnage. L'échantillonnage a été effectué dans la zone d'approche des sites C-LTPP entre les traces de roue dans un secteur sans fissuration apparente. Les zones d'approche ont subi une réhabilitation similaire aux sections de suivi de performance.

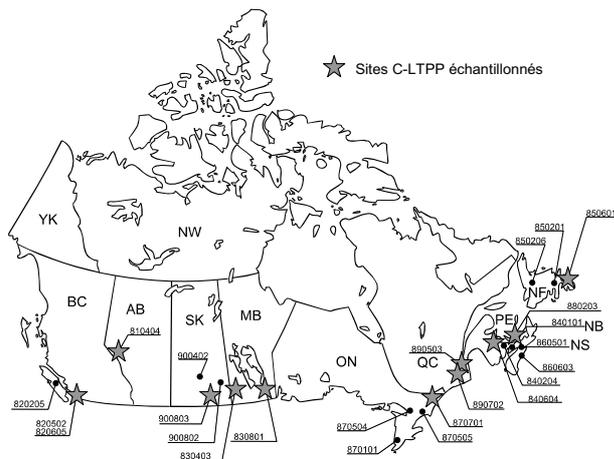


Figure 1. Carte des sites C-LTPP échantillonnés.

Tableau 1. Description des sites C-LTPP échantillonnés.

C-LTPP	Province	Const.	Rehab.	Échant.
810404	Alberta	1977	Oct. 90	Oct. 99
820605	C.-Britannique	1962	Juill. 90	Oct. 99
830403	Manitoba	1962	Juill. 90	Août 99
830801	Manitoba	1971	Sept. 89	Août 99
840604	N.-Brunswick	1966	Août 89	Juill. 99
850601	Terre-Neuve	1960	Sept. 89	Sept. 99
870701	Ontario	1967	Août 90	Août 99
880203	I. P. Édouard	1978	Sept. 89	Août 99
890503	Québec	1977	Sept. 89	Août 99
890702	Québec	1978	Août 91	Août 99
900803	Saskatchewan	1984	Juill. 89	Août 99

## 2.2 Théorie

Le comportement mécanique des matériaux granulaires est généralement reconnu comme élasto-plastique non-linéaire (Lekarp et al. 2000). La figure 2 montre une contrainte déviatorique  $\sigma_d$  de la forme de la moitié d'un sinus verse  $(1 - \cos \phi)$  appliquée sur un matériau granulaire et la déformation axiale réversible  $\varepsilon_{1r}$  et radiale réversible  $\varepsilon_{3r}$  mesurées lors d'une sollicitation triaxiale à chargement déviatorique répété avec une contrainte de confinement  $\sigma_3$  statique. La déformation réversible est la déformation récupérée à la suite du chargement (élastique) sans considérer la déformation accumulée (plastique).

Afin de se différencier de la théorie de l'élasticité, le comportement mécanique des matériaux granulaires est décrit par le module réversible  $M_r$  et le coefficient de Poisson réversible  $\nu_r$ . Le  $M_r$  est le rapport entre  $\sigma_d$  et  $\varepsilon_{1r}$  tel que présenté à l'équation 1 et le  $\nu_r$  est le rapport entre  $\varepsilon_{3r}$  et  $\varepsilon_{1r}$  tel que présenté à l'équation 2. Puisque  $\sigma_d$  est généralement faible comparativement à la résistance du matériau granulaire et qu'il est répété un certain nombre de fois, la déformation est généralement complètement récupérée et  $M_r$  et  $\nu_r$  sont utilisés comme caractéristiques

élastiques pour le dimensionnement de chaussée (Huang 1993).

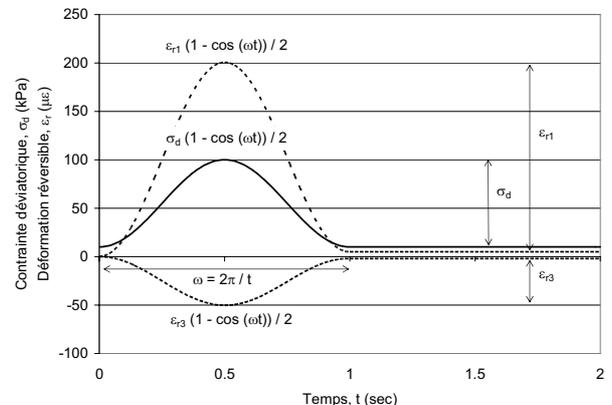


Figure 2. Contrainte déviatorique de la forme de la moitié d'un sinus verse sur un matériau granulaire avec la déformation axiale réversible et la déformation radiale réversible mesurées.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{1r}} \quad [1]$$

$$\nu_r = -\frac{\varepsilon_{3r}}{\varepsilon_{1r}} \quad [2]$$

où  $M_r$  est le module réversible [kPa];  $\nu_r$  est le coefficient de Poisson réversible;  $\sigma_d$  est la contrainte déviatorique  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  [kPa];  $\varepsilon_{1r}$  est la déformation axiale réversible [m/m];  $\varepsilon_{3r}$  est la déformation radiale réversible [m/m].

Le comportement non-linéaire de  $M_r$  est généralement modélisé en fonction de la contrainte totale  $\theta$  (premier invariant de contrainte) selon la fonction de puissance présentée à la figure 3 et l'équation 3. Le  $\nu_r$  est généralement considéré constant pour le dimensionnement de chaussée (Lekarp et al. 2000). Dans le cadre de ce projet, il est suggéré de modéliser  $M_r$  en fonction de  $\theta$  selon la relation du premier degré présentée à l'équation 4 et de modéliser  $\nu_r$  en fonction de  $\varepsilon_{1r}$  selon la relation présentée à l'équation 5.

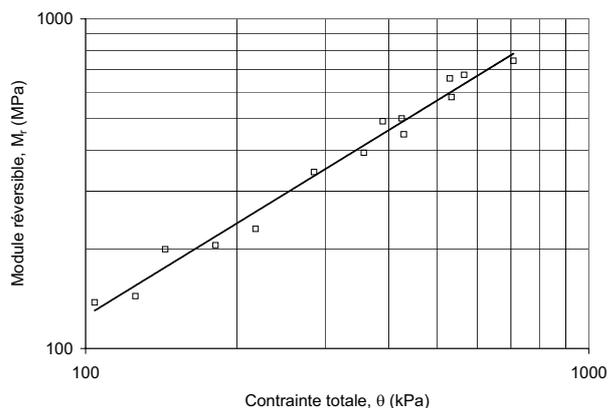


Figure 3. Modèle non-linéaire de module réversible en fonction de la contrainte totale.

$$M_r = 10^b \theta^a \quad [3]$$

$$M_r = a \theta + b \quad [4]$$

$$\nu_r = a \varepsilon_{1r} + b \quad [5]$$

où  $M_r$  est le module réversible [kPa];  $\theta$  est la contrainte totale ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) [kPa];  $\nu_r$  est le coefficient de Poisson réversible;  $\varepsilon_{1r}$  est la déformation axiale réversible [m/m]; a et b sont des paramètres de régression.

### 3. MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Équipements

L'équipement triaxial à chargement déviatorique répété asservi du MTQ conforme à la norme AASHTO T307 a été utilisé pour caractériser les matériaux granulaires C-LTPP. La figure 4 montre l'équipement constitué d'une cellule triaxiale permettant d'appliquer un  $\sigma_3$  statique avec de l'air et d'une presse hydraulique permettant d'appliquer un  $\sigma_d$  de forme de la moitié d'un sinus verse.

L'échantillon a une hauteur de 300 mm et un diamètre de 150 mm. Le  $\varepsilon_{1r}$  est mesuré par deux capteurs de déplacement installés à 180° sur le 150 mm central de l'échantillon. Le  $\varepsilon_{3r}$  est mesuré par un capteur de déplacement installé sur un câble ceinturant le centre de l'échantillon. Un capteur de succion matricielle est installé au centre de l'échantillon lors du compactage.

La figure 5 montre l'installation du capteur de déplacement radial, des capteurs de déplacements axiaux et du capteur de succion matricielle. Le capteur de succion matricielle est composé d'un capteur de pression

à fibre optique miniature monté à l'intérieur d'une tige en acier. La tige est insérée à l'intérieur d'une bougie poreuse saturée de 100 kPa d'entrée d'air, scellée sur la tige avec une colle époxy tel que montré à la figure 6.



Figure 4. Équipement triaxial à chargement déviatorique répété asservi du MTQ.



Figure 5. Installation des capteurs de déplacement et du capteur de succion matricielle.

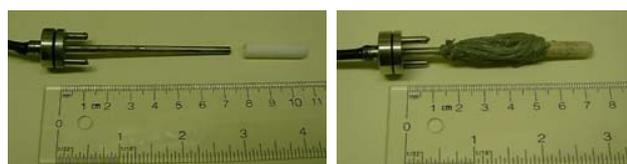


Figure 6. Montage du capteur de succion matricielle.

Le  $M_r$  et  $\nu_r$  sont caractérisés aux 15 états de contrainte prescrits par la norme AASHTO T307 présentés au tableau 2 avec le  $\theta$  correspondant. Le  $\sigma_3$  est statique alors que  $\sigma_d$  est 10% statique pour assurer un bon contact et 90% cyclique. Le temps de chargement est de 1 sec suivi d'un temps de repos de 1 sec. Avant de caractériser  $M_r$  et  $\nu_r$ , l'échantillon est conditionné par 10 000 cycles de chargement avec un  $\sigma_3$  de 105 kPa et un  $\sigma_d$  de 105 kPa et un temps de chargement de 0,1 sec et un temps de repos de 0,9 sec.

Tableau 2. États de contrainte pour la caractérisation du module réversible et du coefficient de Poisson réversible.

Contrainte confinement, $\sigma_3$ (kPa)	Contrainte déviatorique, $\sigma_d$ (kPa)	Contrainte totale, $\theta$ (kPa)
20	20	80
20	40	100
20	60	120
35	35	140
35	70	175
35	105	210
70	70	280
70	140	350
70	210	420
105	70	385
105	105	420
105	210	525
140	105	525
140	140	560
140	280	700

Le  $M_r$  et  $v_r$  des matériaux granulaires sont caractérisés à une teneur en eau initiale, saturée et drainée. La teneur en eau initiale est la teneur en eau de compactage déterminée à partir du matériau humidifié qui n'a pas été utilisé pour le compactage de l'échantillon.

La teneur en eau saturée est obtenue en saturant l'échantillon par le bas en prenant soin de faire le vide d'air à l'intérieur de l'échantillon avant la saturation. Le bas de l'échantillon saturé est branché à un niveau d'eau égal au centre de l'échantillon pour que la succion matricielle soit de 0 kPa. Le tuyau de drainage du haut est exempt d'eau et le tuyau de drainage du bas est exempt d'air. La cellule triaxiale est pesée avant et après la saturation afin de connaître la teneur en eau saturée.

La teneur en eau drainée est obtenue par drainage naturel de l'échantillon. Le tuyau de drainage du haut et du bas de l'échantillon sont exempts d'eau. La teneur en eau drainée est déterminée lors du démontage de l'échantillon.

### 3.2 Matériaux

Les matériaux granulaires sont définis par moins de 20% passant le tamis 80  $\mu$ m lorsque écrété au tamis 31,5 mm avec plus de 20% retenu sur le tamis 5mm et un indice de plasticité inférieur à 10. Tous les matériaux de fondation (B), pratiquement tous les matériaux de sous-fondation (SB) et quelques matériaux d'infrastructure (SG) se sont qualifiés comme matériaux granulaires. La figure 7 présente la granulométrie des 22 matériaux granulaires caractérisés.

Les échantillons sont compactés à une teneur en eau environ 2% supérieure à la valeur d'absorption Abs avec un marteau vibrant en sept couches, 30 sec de vibration par couche. Le tableau 3 présente la moyenne et l'écart type de la densité brute et de l'absorption des matériaux granulaires ainsi que de leur teneur en eau et masse

volumique sèche au compactage. Le ratio avec la masse volumique sèche optimale déterminée à l'essai Proctor modifié, la porosité ainsi que le degré de saturation sont également indiqués.

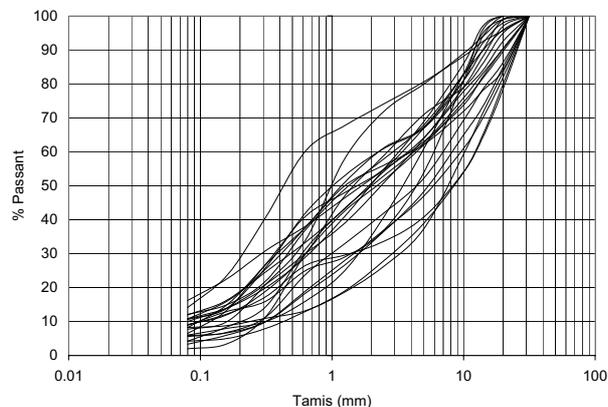


Figure 7. Granulométrie des matériaux granulaires C-LTPP.

Tableau 3. Caractéristiques des échantillons de matériaux granulaires C-LTPP.

Caractéristiques des échantillons	Moyenne	Écart type
Densité brute	2,58	0,04
Absorption (%)	1,8	0,5
Teneur en eau (%)	3,9	0,8
Masse volumique sèche (kg/m <sup>3</sup> )	2143	63
Ratio m. vol. sèche optimale (%)	97,2	3,3
Porosité (%)	17,0	2,6
Degré de saturation (%)	27,3	8,3

Un capteur de succion matricielle est installé lors du compactage de la quatrième couche en s'assurant qu'aucun granulat de plus de 10 mm ne touche au capteur. Le capteur n'a pas été installé dans les trois matériaux granulaires incluant plus de 55% de retenu sur le tamis 5 mm.

La figure 8 présente le degré de saturation de l'échantillon à la teneur en eau initiale, saturée et drainée ainsi que la succion matricielle. Ces données permettent de tracer approximativement une courbe caractéristique de rétention d'eau CCRE générale en négligeant le phénomène d'hystérésis. En moyenne, le degré de saturation et la succion matricielle initial sont de 28% et -10 kPa, saturé sont de 88% et 0 kPa, drainé sont de 52% et -2 kPa.

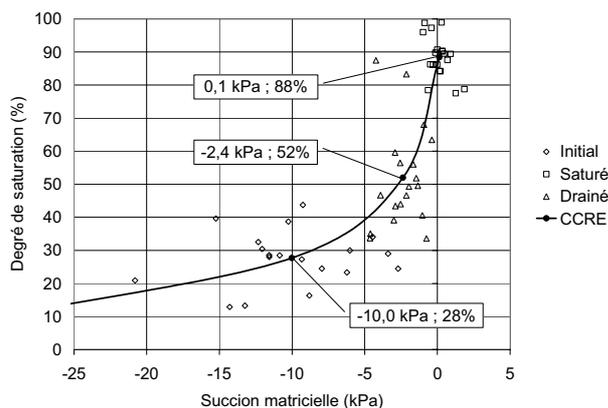


Figure 8. Courbe caractéristique de rétention d'eau générale des matériaux granulaires C-LTPP.

#### 4. MODÈLES INDIVIDUELS

##### 4.1 Module réversible

Le comportement non-linéaire de  $M_r$  est modélisé en fonction de  $\theta$  à la figure 9 pour un matériau granulaire à une teneur en eau initiale, saturée et drainée. Les  $M_r$  obtenus à la teneur en eau saturée et drainée sont toujours similaires alors que les  $M_r$  à la teneur en eau initiale sont généralement plus élevés. La pente des modèles est généralement similaire en fonction de la teneur en eau pour les modèles du premier degré alors qu'elle tend légèrement à augmenter à la teneur en eau saturée et drainée pour les modèles de puissance.

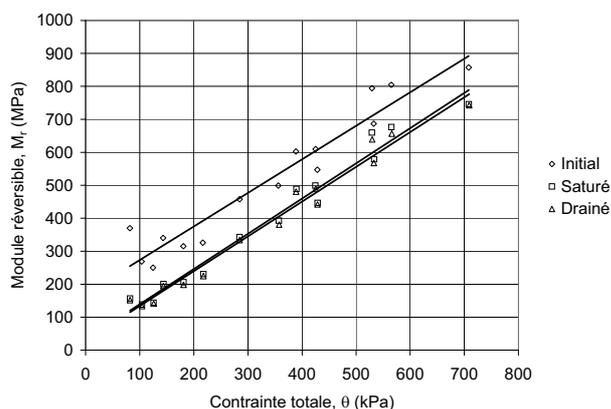


Figure 9. Influence de la contrainte totale et de la teneur en eau sur le module réversible.

Les figures 10 et 11 présentent l'écart de  $M_r$  entre la teneur en eau initiale et drainée et la teneur en eau saturée  $\Delta M_{r, \text{sat}}$  en fonction du degré de saturation et de la succion matricielle. L'écart a été déterminé pour un  $\theta$  de

400 kPa qui correspond au centre de la plage de  $\theta$  caractérisée et limite l'influence de la pente du modèle en fonction de la teneur en eau sur l'analyse.

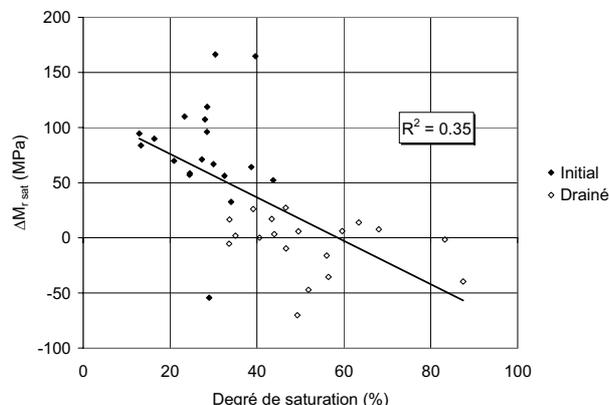


Figure 10. Écart de module réversible avec le module réversible à la teneur en eau saturée pour une contrainte totale de 400 kPa en fonction du degré de saturation.

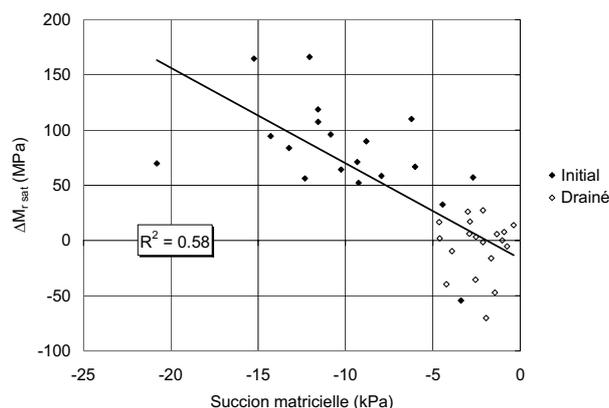


Figure 11. Écart de module réversible avec le module réversible à la teneur en eau saturée pour une contrainte totale de 400 kPa en fonction de la succion matricielle.

Le  $\Delta M_{r, \text{sat}}$  semble mieux s'expliquer par l'influence de la succion matricielle ( $R^2 = 0,58$ ) que celle du degré de saturation ( $R^2 = 0,35$ ). Un gain de  $M_r$  est observable lorsque la succion matricielle est supérieure à  $-5$  kPa. Cette limite n'est pas atteinte avec une teneur en eau drainée, ce qui explique la similitude des résultats avec la teneur en eau saturée. Il semble que le degré de saturation doit être inférieur à 40% en ce qui concerne les matériaux granulaires pour observer un gain significatif de  $M_r$ .

Les tableaux 4 et 5 présentent la moyenne et l'écart type des modèles individuels de puissance selon l'équation 3

et du premier degré selon l'équation 4 pour les 22 matériaux granulaires à la teneur en eau saturée. La teneur en eau saturée est sélectionnée comme teneur en eau de référence puisque la succion matricielle est de 0 kPa pour tous les matériaux granulaires, ce qui signifie que leur état de contrainte est similaire. En ce qui concerne la teneur en eau initiale et drainée, les écarts de succion matricielle entre les matériaux ne permettent pas de les comparer adéquatement.

Tableau 4. Paramètres moyens des modèles de module réversible de puissance à une teneur en eau saturée.

$M_r = 10^b \theta^a$	Moyenne	Écart type
a	0,77	0,05
b	3,68	0,16
R <sup>2</sup>	0,961	0,027
RMSE	0,046	0,013

Tableau 5. Paramètres moyens des modèles de module réversible du premier degré à une teneur en eau saturée.

$M_r = a \theta + b$	Moyenne	Écart type
a	1060	240
b	74 000	26 000
R <sup>2</sup>	0,976	0,015
RMSE	33 000	15 000

Les modèles présentent en moyenne une précision similaire, le modèle du premier degré proposé ( $R^2_{\text{moy}} = 0,98$ ) étant légèrement plus précis que le modèle de puissance ( $R^2_{\text{moy}} = 0,96$ ). La précision obtenue avec les modèles ne commande pas que des variables d'état de contrainte soient ajoutées pour décrire la non-linéarité.

#### 4.2 Coefficient de Poisson réversible

Les résultats de  $v_r$  sont modélisés en fonction de  $\varepsilon_{1r}$  tel que présenté à la figure 12 pour un matériau granulaire à une teneur en eau initiale, saturée et drainée. La teneur en eau ne semble pas avoir d'influence sur  $v_r$ . Le tableau 6 présente la moyenne et l'écart type des modèles individuels de  $v_r$  selon l'équation 5 en combinant les résultats obtenus pour les trois teneurs en eau. La précision des modèles est bonne en moyenne ( $R^2_{\text{moy}} = 0,84$ ).

Tableau 6. Paramètres moyens des modèles de coefficient de Poisson réversible.

$v_r = a \varepsilon_{1r} + b$	Moyenne	Écart type
a	340	117
b	0,14	0,02
R <sup>2</sup>	0,835	0,085
RMSE	0,014	0,004

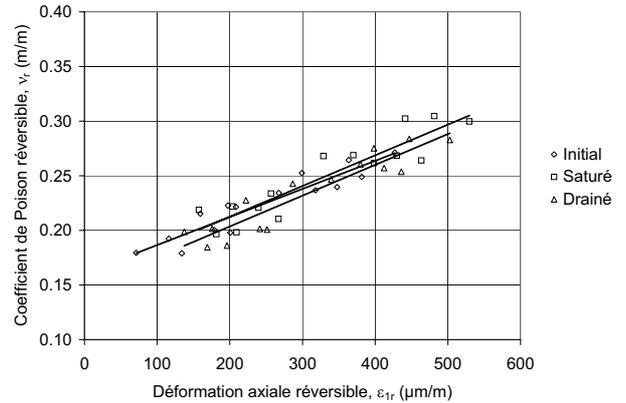


Figure 12. Influence de la déformation axiale réversible et de la teneur en eau sur le coefficient de Poisson réversible.

## 5. MODÈLES GÉNÉRAUX

### 5.1 Module réversible

Un modèle général de  $M_r$  à l'état saturé est développé pour les matériaux granulaires C-LTPP. Aucune relation n'a pu être établie entre le  $M_r$  et les caractéristiques physiques des granulats telles que la granulométrie, la densité, l'absorption, l'indice de plasticité, la porosité, la masse volumique ainsi que la quantité de particules fracturées, plates et allongées. Il semble plutôt que les matériaux granulaires de fondation, sous-fondation et parfois d'infrastructure d'un site proviennent de la même source d'emprunt, ce qui donne des  $M_r$  semblables bien que les caractéristiques physiques des granulats varient.

Le modèle général de  $M_r$  est développé à partir de la moyenne des modèles individuels présentée aux tableaux 4 et 5 en considérant l'écart type des paramètres comme la plage de variation possible du modèle tel que présenté aux équations 6 et 7. La plage de variation du modèle de puissance est déterminée en variant l'ordonnée à l'origine tout en conservant la pente constante puisque les deux paramètres de régression sont dépendants.

$$\begin{aligned}
 M_r &= 10^{3,68} \theta^{0,77} \\
 \cdot M_{r \min} &= 10^{3,52} \theta^{0,77} \\
 \cdot M_{r \max} &= 10^{3,84} \theta^{0,77}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 M_r &= 1060 \theta + 74\,000 \\
 \cdot M_{r \min} &= 820 \theta + 48\,000 \\
 \cdot M_{r \max} &= 1300 \theta + 100\,000
 \end{aligned} \tag{7}$$

où  $M_r$  est le module réversible [kPa];  $\theta$  est la contrainte totale [kPa].

Les figures 13 et 14 présentent le modèle général de  $M_r$  de puissance et du premier degré avec leur plage de variation superposée aux modèles individuels. Les figures permettent de visualiser l'étendue des valeurs de  $M_r$  caractérisée qui varie d'environ 100 MPa à 1000 MPa. La plage de variation définie pour les modèles généraux semble couvrir la majorité des matériaux granulaires en excluant les cas extrêmes.

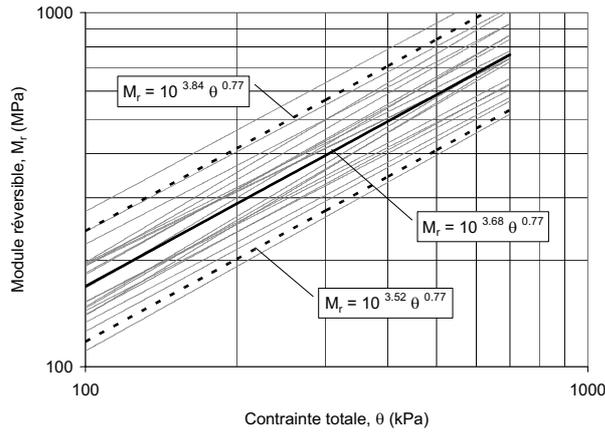


Figure 13. Modèle général de module réversible à l'état saturé de puissance avec plage de variation superposée aux modèles individuels.

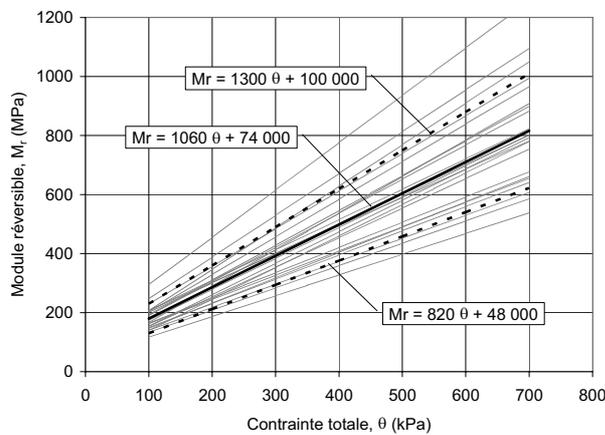


Figure 14. Modèle général de module réversible à l'état saturé du premier degré avec plage de variation superposée aux modèles individuels.

L'influence de la teneur en eau sur  $M_r$  est considérée par l'influence de la succion matricielle ( $u_a - u_w$ ) sur  $\Delta M_{r \text{ sat}}$  tel que présenté à la figure 8 et à l'équation 8. Ainsi, la description de l'état de contrainte est complétée par ( $u_a - u_w$ ) à l'équation 9 en combinant les équations 7 et 8 pour développer un modèle général de  $M_r$  incluant l'influence

de la teneur en eau tel que présenté à la figure 15. Le modèle de  $M_r$  du premier degré (équation 7) a été utilisé puisque la pente du modèle semble plus indépendante de ( $u_a - u_w$ ). L'influence de ( $u_a - u_w$ ) sur  $M_r$  est proportionnellement plus importante lorsque  $\theta$  est faible.

$$\Delta M_{r \text{ sat}} = -8700 (u_a - u_w) - 17 000 \quad [8]$$

$$M_r = 1060 \theta - 8700 (u_a - u_w) + 57 000 \quad [9]$$

où  $\Delta M_{r \text{ sat}}$  est l'écart de module réversible avec l'état saturé [kPa]; ( $u_a - u_w$ ) est la succion matricielle [kPa];  $M_r$  est le module réversible [kPa];  $\theta$  est la contrainte totale [kPa].

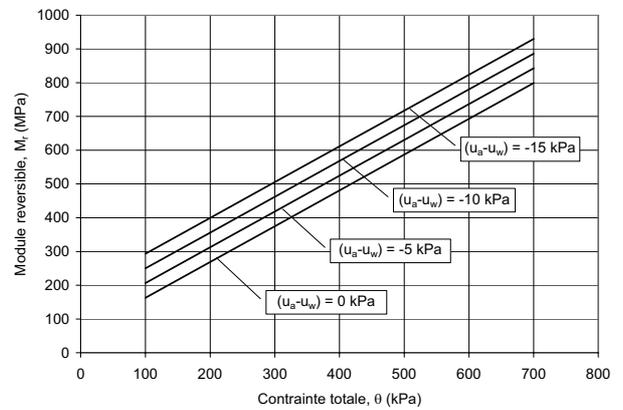


Figure 15. Modèle général de module réversible en fonction de la contrainte totale et de la succion matricielle.

## 5.2 Coefficient de Poisson réversible

Un modèle général de  $\nu_r$  indépendant de la teneur en eau est développé pour les matériaux granulaires C-LTTP. Aucune relation n'a pu être établie entre le  $\nu_r$  et les caractéristiques physiques des matériaux granulaires. Une similitude a été observée pour les matériaux granulaires provenant d'une même source d'emprunt.

Le modèle général de  $\nu_r$  est développé à partir de la moyenne des modèles individuels présentée au tableau 6 en considérant l'écart type entre les modèles comme la plage de variation possible du modèle tel que présenté à l'équation 10.

$$\begin{aligned} \nu_r &= 340 \varepsilon_{1r} + 0,14 \\ \nu_{r \text{ min}} &= 220 \varepsilon_{1r} + 0,12 \\ \nu_{r \text{ max}} &= 460 \varepsilon_{1r} + 0,16 \end{aligned} \quad [10]$$

où  $\nu_r$  est le coefficient de Poisson réversible;  $\epsilon_{1r}$  est la déformation axiale réversible [m/m].

La figure 16 présente le modèle général de  $\nu_r$  avec sa plage de variation superposée aux modèles individuels. La figure permet de visualiser l'étendue des valeurs de  $\nu_r$  caractérisée qui varie d'environ 0,15 à 0,40. La plage de variation définie pour le modèle général semble couvrir la majorité des matériaux granulaires en excluant les cas extrêmes.

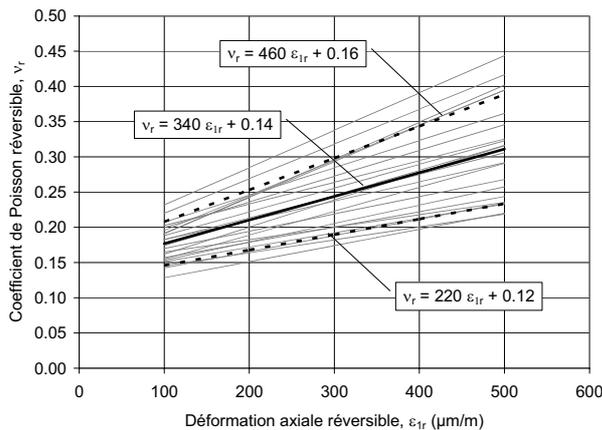


Figure 16. Modèle général de coefficient de Poisson réversible avec plage de variation superposée aux modèles individuels.

## 6. CONCLUSION

Un modèle général de  $M_r$  incluant l'influence de l'état de contrainte et de la succion matricielle et un modèle général de  $\nu_r$  incluant l'influence de l'état de déformation et indépendant de la teneur en eau ont été développés à partir de 22 matériaux granulaires C-LTPP caractérisés à l'aide d'une cellule triaxiale à chargement déviatorique répété. Ces modèles ont été développés pour effectuer des études de dimensionnement de chaussée selon une approche mécaniste-empirique. Ce type de modèles est actuellement rare dans la littérature.

Aucune relation n'a pu être déterminée entre  $M_r$  et les caractéristiques physiques des matériaux granulaires, ce qui rend la caractérisation de  $M_r$  nécessaire lorsqu'une valeur moyenne ne suffit pas à l'étude de dimensionnement. Un  $\nu_r$  moyen peut convenir pour la plupart des études de dimensionnement, mais la non-linéarité devrait être considérée afin d'associer  $\nu_r$  avec  $M_r$ . Il est recommandé d'utiliser l'état saturé comme état de référence pour comparer des matériaux granulaires en fonction de  $M_r$  puisque  $(u_a - u_w)$  est de 0 kPa pour tous les matériaux.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier pour leur soutien technique ou financier M<sup>me</sup> Sarah Wells et le personnel du Canadian Strategic Highway Research Program; M<sup>me</sup> Anne-Marie Leclerc, MM. Claude Robert, Bruno Auger et le personnel du Ministère des Transports du Québec; M. Matthew Witczak et son équipe de l'Arizona State University; le personnel des provinces participantes au projet.

## RÉFÉRENCES

AASHTO T307. Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, Provisional Standards.

Doucet F., Doré G., Auger B. et Proteau D. 2004. Dynamic and Resilient Modulus Characterization of C-LTPP Pavement Materials. Canadian Long Term Pavement Performance Project, Canadian Strategic Highway Research Program, internal report.

Doucet F. et Doré G. 2004. Module dynamique et angle de phase des enrobés C-LTPP. 49<sup>e</sup> congrès annuel du Canadian Technical Asphalt Association, Montréal.

Huang Y. 1993. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey, 805 p.

Lekarp F., Isacsson U. and Dawson A. 2000. State of the Art I: Resilient Response of Unbound Aggregates. Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 66-75.