

PAOLA ANDREA CARDENAS GOMEZ

# **CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DE MATÉRIAUX GRANITIQUES CONCASSÉS**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2007

## Résumé

La présente étude a consisté à analyser les caractéristiques hydrauliques de matériaux concassés d'origine granitique. La conductivité hydraulique et la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) ont été déterminées pour neuf matériaux granulaires reconstitués. Les matériaux ont été reconstitués à partir du matériau MG-20 de la carrière PEB de Lac-Saint-Charles et à l'aide du fuseau granulométrique pour des matériaux de fondations routières MG-20 recommandé par le ministère des Transports du Québec (MTQ).

Les granulométries des matériaux reconstitués ont été divisées en deux groupes caractérisés, d'une part, par la variation du coefficient d'uniformité et, d'autre part, par la variation du pourcentage des particules fines. À partir de la définition des paramètres hydriques des matériaux - la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) -, on a établi des relations empiriques entre la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) et les paramètres hydrauliques.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent l'influence des conditions initiales de compactage sur les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires. L'énergie de compactage ainsi que la teneur en eau à laquelle les matériaux ont été compactés jouent un rôle important sur la structure de la fraction fine des matériaux granulaires reconstitués, ce qui a un impact important sur les paramètres hydrauliques de ces matériaux. Lorsque les matériaux granulaires MG-20 sont compactés à une teneur en eau inférieure à la teneur en eau optimale, ces matériaux présentent une macroporosité qui rend la valeur de la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) plus faible et la valeur de la conductivité hydraulique saturées ( $k_{sat}$ ) plus élevée.

Cette étude, basée sur le modèle de porosité des matériaux granulaires avec fines de Côté et Konrad (2003), a permis d'établir que la valeur de  $n_f$  est une caractéristique qui définit bien le comportement d'un matériau MG-20. Les relations empiriques obtenues dans le cadre de ce travail  $\psi_a - n_f$  et  $k_{sat} - n_f$  ont été établies à partir des paramètres hydrauliques et des propriétés de structure du matériau. Ces relations permettent de caractériser d'une manière satisfaisante les matériaux MG-20 et permettent d'obtenir les caractéristiques hydriques du matériau à partir des propriétés de sa structure.

*Je remercie vivement mon directeur et codirecteur de recherche, M. Jean-Marie Konrad et M. Jean Côté, pour leur disponibilité, leurs conseils pertinents et leur intérêt continu à me faire évoluer au niveau personnel et professionnel.*

*Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce travail, M. François Gilbert, pour son appui et la mise en place du dispositif expérimental, à Karine Desbiens pour ses précieux conseils et son aide dans la rédaction de ce mémoire, aux stagiaires pour l'aide apportée au cours des différentes étapes de mon travail et aux partenaires de la Chaire industrielle de recherche sur les infrastructures soumises au gel – CREIG, pour le support financier.*

*Mes remerciements vont aussi à ma mère et à ma sœur qui avec leur amour et soutien ont largement contribué à l'aboutissement de ce projet. Merci à mes amis pour ne pas avoir cessé de m'encourager tout au long de ce travail.*

# Table des matières

INTRODUCTION.....	1
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	6
2.1 Analyses de la variation de l'état hydrique dans les fondations de chaussées .....	6
2.2 Caractéristiques de drainage de matériaux de fondations de chaussées. ....	9
2.3 Écoulement en milieu saturé.....	11
2.3.1 Loi de Darcy sur l'écoulement en milieux poreux .....	12
2.4 L'écoulement en milieu partiellement saturé.....	14
2.4.1 Propriétés hydrauliques des sols partiellement saturés.....	19
2.4.1.1 La courbe caractéristique de rétention d'eau .....	20
2.4.1.2 La relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau volumique .....	23
2.4.2 Modèles de conductivité hydraulique en sols partiellement saturés.....	26
2.4.3 Modèle de porosité pour des matériaux bien gradé avec fines .....	28
2.4.3.1 Porosité de la fraction fine .....	30
2.4.4 Relations empiriques entre la conductivité hydraulique et les propriétés granulométriques des matériaux granulaires .....	33
2.4.4 Méthodes de mesure des paramètres hydrauliques en milieu partiellement saturés. ....	34
2.4.3.1 Méthodes à charge constante .....	37
Méthode de la longue colonne .....	37
2.4.3.2 Méthodes à charge variable .....	37
Méthode utilisant le débit d'extraction .....	38
3. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX.....	40
3.1 Échantillonnage et classification du matériau granitique .....	41
3.2 Granulométries reconstituées.....	41
3.3 Caractérisation des matériaux .....	44
3.3.1 Proctor modifié .....	46
4. DESCRIPTION DES ESSAIS.....	55
4.1 Détermination de la conductivité hydraulique à charge constante .....	56
4.2 Détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) .....	59
5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	64
5.1 Conductivité hydraulique à charge constante .....	64
5.2 Courbe caractéristique de rétention d'eau .....	67
5.3 Effet du compactage sur la granulométrie .....	75
6. DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	79

6.1 L'énergie de compactage lors des essais pour la détermination des paramètres hydriques des matériaux. ....	79
6.2 Influence des caractéristiques de compactage sur la structure des matériaux granulaires.....	88
6.3 Influence des conditions de compactage sur les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires.....	91
6.4 Détermination des relations empiriques entre les paramètres hydrauliques et la structure des matériaux. ....	97
6.4.1 Relation entre la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ). ....	98
6.4.2 Relation entre la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ). ....	101
Conclusion .....	106
Annexe A Courbes granulométriques.....	114
Annexe B Résultats conductivité hydraulique .....	125
Annexe C Résultats courbe caractéristique de rétention d'eau .....	139

## Liste des tableaux

Tableau 1. Relation entre l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité, les caractéristiques de drainage et le type de sol. (Holtz et Kovacs 1991) .....	14
Tableau 2. Méthodes de mesure de la conductivité hydraulique non saturée en laboratoire (modifié de Chossat, 2005).....	36
Tableau 3 : Caractéristiques granulométriques des matériaux .....	44
Tableau 4 : Synthèse des propriétés physiques des matériaux reconstitués .....	45
Tableau 5 : Synthèse des propriétés physiques de base des matériaux granulaires MG-20 (Grenier 2006).....	46
Tableau 6. Synthèse des caractéristiques de compactage des matériaux reconstitués.....	54
Tableau 7. Synthèse des résultats obtenus aux essais de conductivité hydraulique pour les matériaux reconstitués. ....	66
Tableau 8. Synthèse des résultats obtenus à partir de la détermination de la CCRE pour les matériaux reconstitués .....	74
Tableau 9 : Caractéristiques granulométriques des matériaux avant et après compactage. .	77
Tableau 10. Conditions initiales de compactage pour les matériaux granulaires reconstitués pour la détermination de la conductivité.....	96
Tableau 11 . Conditions initiales de compactage pour les échantillons supplémentaires reconstitués pour déterminer des conductivités hydrauliques du côté sec de l'optimum. ....	97
Tableau 12 Calcul de la conductivité hydraulique saturée pour les matériaux granulaires reconstitués .....	103
Tableau 13 Caractéristiques de la granulométrie du matériau MG-20 carrière PEB .....	115
Tableau 14 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G2B .....	116
Tableau 15 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G1 .....	117
Tableau 16 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G3 .....	118
Tableau 17 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G4.....	119
Tableau 18 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G5.....	120
Tableau 19 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GA.....	121
Tableau 20 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GC .....	122
Tableau 21 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GD.....	123
Tableau 22 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GE .....	124
Tableau 23 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G2B.....	126
Tableau 24 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G2B côté sec. ....	127
Tableau 25 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G1. ....	128
Tableau 26 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G1 côté sec...	129
Tableau 27 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G3. ....	130
Table 28 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G3 côté sec. ....	131
Tableau 29 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G4. ....	132
Tableau 30 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G4 côté sec...	133
Tableau 31 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G5. ....	134
Tableau 32 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GA. ....	135
Tableau 33 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GC.....	136
Tableau 34 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GD. ....	137
Tableau 35 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GE.....	138

Tableau 36 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G2B.....	140
Tableau 37 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G1.....	141
Tableau 38 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G3.....	142
Tableau 39 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G4.....	143
Tableau 40 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G5.....	144
Tableau 41 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GA.....	145
Tableau 42 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GC.....	146
Tableau 43 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GD.....	147
Tableau 44 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GE.....	148

## Liste des figures

Figure 1. Structure typique d'une chaussée <i>Source</i> : ( <a href="http://www.mtq.gouv.qc.ca">http://www.mtq.gouv.qc.ca</a> ) .....	1
Figure 2. Effet du gel et du dégel sur une route <i>Source</i> : ( <a href="http://www.mtq.gouv.qc.ca">http://www.mtq.gouv.qc.ca</a> ) .....	4
Figure 3. Évolution de la teneur en eau sous les pavés (adapté d'Alonso 1998).....	8
Figure 4. Fuseau granulométrique spécifié par le MTQ pour les matériaux de fondation ...	10
Figure 5. Écoulement d'eau dans un milieu saturé à charge constante .....	13
Figure 6. Tension superficielle à l'intérieur d'un tube capillaire .....	16
Figure 7. Phénomène de capillarité <i>Source</i> : ( <a href="http://www2.mcdaniel.edu">http://www2.mcdaniel.edu</a> ).....	17
Figure 8. Courbe caractéristique de rétention d'eau (Côte 1997).....	21
Figure 9. Prédiction de la conductivité hydraulique grâce à la CCRE (adapté de Fredlund et Rahardjo 1993). .....	25
Figure 10 : Dispersion de particules fines dans les pores d'un matériau granulaire : a) et b) dispersion non uniforme; c) dispersion uniforme (Côté et Konrad, 2003).....	29
Figure 11 : Volume des vides dans un squelette grossier lié à la teneur en particules fines (modifié de Côte et Konrad, 2003) .....	30
Figure 12 : Diagramme de phases pour a) sol bien gradué, b) le même sol avec particules grossières seulement et c) le même sol avec particules grossières et particules fines. .	31
Figure 13. Localisation du site de prélèvement du matériau MG-20. Entreprise P.E.B. Ltée., dans la municipalité de Lac-Saint-Charles au nord de la ville de Québec <i>Source</i> : google maps septembre 2006) .....	40
Figure 14. Courbes granulométriques des matériaux reconstitués avec un pourcentage des fines constant égal à 7% et un coefficient d'uniformité variant entre 88 et 7.5 .....	42
Figure 15. Courbes granulométriques des matériaux reconstitués avec un coefficient d'uniformité constant égal à 47 et un pourcentage variable de fines situé entre 2% et 35% .....	43
Figure 16. Moule Proctor.....	47
Figure 17. Courbe de compactage d'échantillons compactés en laboratoire suivant l'essai Proctor modifié à différentes énergies de compactage. (Holtz et Kovacs 1991).....	49
Figure 18. Courbes de compactage des matériaux reconstitués avec un pourcentage de particules fines constant égal à 7% et avec une variation du coefficient d'uniformité.	52
Figure 19. Courbes de compactage des matériaux reconstitués avec un coefficient d'uniformité constant égal à 47% et avec une variation du pourcentage des particules fines.....	53
Figure 20. Détermination de la courbe de compactage sur des échantillons des matériaux présentant un coefficient d'uniformité élevé, entre 12 et 88. ....	54
Figure 21. Montage du perméamètre Proctor à charge constante.....	57
Figure 22. Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G2B. Granitique MG-20 carrière PEB .....	59
Figure 23. Montage d'essai de la plaque de pression pour la détermination de la CCRE....	61
Figure 24. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau granitique MG-20 carrière PEB .....	63
Figure 25. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G2B .....	69
Figure 26. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G1 .....	70
Figure 27. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G3 .....	70

Figure 28. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G4 .....	71
Figure 29. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G5 .....	71
Figure 30. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GA .....	72
Figure 31. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GC .....	72
Figure 32. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GD .....	73
Figure 33. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GE.....	73
Figure 34. Granulométrie du matériau G2B avant et après compactage.....	76
Figure 35. Comparaison du coefficient de courbure avant et après le compactage.....	77
Figure 36. Comparaison du coefficient d'uniformité avant et après le compactage. ....	78
Figure 37. Hypothèse du placement des courbes de compactage pour essais effectués à différentes énergies de compactage. ....	81
Figure 38. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G2B. ....	82
Figure 39. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G1. ....	82
Figure 40. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G3. ....	83
Figure 41. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G4. ....	83
Figure 42. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G5. ....	84
Figure 43. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GA. ....	84
Figure 44. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GC. ....	85
Figure 45. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GD. ....	85
Figure 46. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GE.....	86
Figure 47. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G2B. ....	86
Figure 48. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G1. ....	87
Figure 49. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G3 .....	87
Figure 50. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G4. ....	88

Figure 51. Schème de la structure obtenue pour des matériaux granulaires compactés selon l'influence des conditions de compactage. ....	90
Figure 52 Courbe de compactage et conditions initiales de compactage pour les essais de conductivité hydraulique horizontal (modifié de Watabe Y. <i>et al</i> 2000). ....	92
Figure 53. Conductivité hydraulique horizontale en fonction du degré de saturation et de l'indice des vides de 0.25 (modifié de Watabe Y. <i>et al</i> 2000). ....	93
Figure 54. Conditions de compactage initiales pour les essais de succion (CCRE) (modifié de Watabe Y. <i>et al</i> 2000). ....	93
Figure 55. Courbes de rétention d'eau (modifié de Watabe Y. <i>et al</i> 2000). ....	94
Figure 56. Valeurs de pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) en fonction de la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).....	99
Figure 57. Relation entre la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) .....	100
Figure 58. Relation entre la conductivité hydraulique en conditions saturées ( $k_{sat}$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).....	104

# 1. Introduction

La chaussée est une structure linéaire de grande envergure composée de plusieurs couches de différents matériaux. Cette structure, présentée dans la figure 1, est typiquement formée de trois couches. La première couche – le revêtement – peut être en béton bitumineux ou en béton de ciment. La deuxième couche, appelée la fondation, est composée de matériaux granulaires. Au Québec la fondation est généralement constituée de matériau MG-20. Finalement, la sous-fondation, troisième couche de la chaussée, est elle aussi composée de matériaux granulaires. Au Québec, le matériau MG-120 est généralement utilisé pour la sous-fondation.

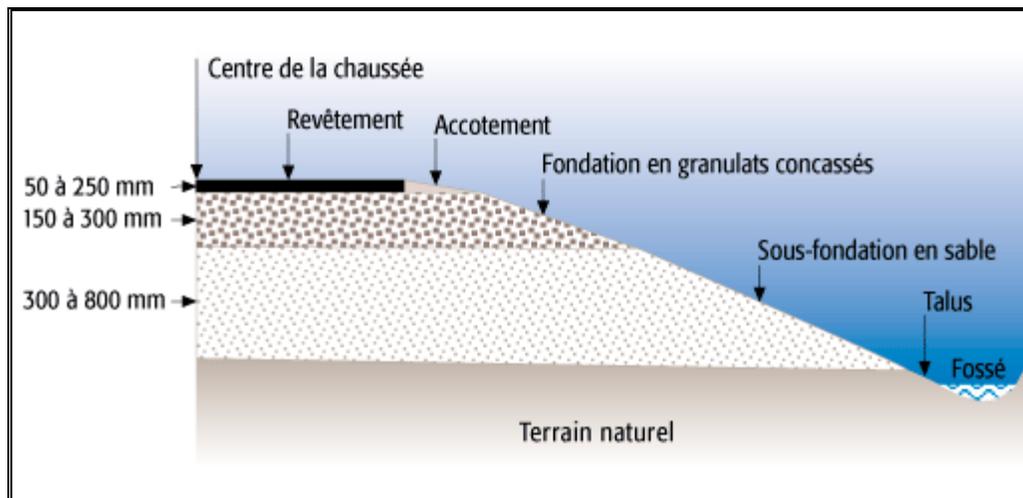


Figure 1. Structure typique d'une chaussée *Source* : (<http://www.mtq.gouv.qc.ca>)

Malgré sa structure simple, la chaussée a un comportement complexe qui est influencé par plusieurs facteurs dont les plus importants sont l'action du trafic et du climat. Pour que la chaussée se comporte bien, il faut donc s'assurer de la doter d'une bonne capacité portante en tenant compte des charges répétitives et des variations climatiques qu'elle subit.

L'excellence de la capacité portante dépend du choix des matériaux granulaires ainsi que de la distribution des charges entre les couches. Les matériaux granulaires doivent être choisis de manière à favoriser la rigidité, la durabilité et la stabilité de la structure. C'est pourquoi,

en vue d'une bonne distribution des charges, on choisit une granulométrie étalée à densité élevée qui permet un bon arrangement des particules du squelette granulaire. Une densité élevée est obtenue quand les macropores de l'arrangement des particules sont remplis par des particules fines, ce qui permet un confinement du matériau et un meilleur contact entre les particules grossières. Cependant, il a été démontré que l'écoulement de l'eau s'effectue par les macropores et que l'augmentation des particules fines peut réduire la conductivité hydraulique et augmenter la sensibilité au gel du matériau.

Il est important de rappeler que le bon comportement d'une chaussée est fortement influencé par la variation de l'état hydrique de la chaussée au long de l'année. Cet état hydrique est lié au mouvement interne de l'eau dans les macropores de l'arrangement des particules. Il peut modifier considérablement le comportement mécanique de la chaussée en affectant de manière défavorable la déformabilité et la rigidité de la structure sous l'action du trafic. La présence d'eau emprisonnée dans la fondation ou sous le pavage est la principale cause de diminution de la durée de vie des chaussées (Cedergren 1988; Bieth et Bertrand 1991).

Les taux de dommages de chaussées non drainées et drainées ont été comparés par Cedergren (1988) qui affirme que le taux de dommages de la charge des véhicules est 10 fois plus grand pour une chaussée non drainée lorsqu'on la compare avec une chaussée drainée. Ceci revient à dire que chaque action d'un véhicule raccourcit la vie d'une chaussée non drainée 10 fois plus rapidement que si elle était drainée.

Dans le contexte climatique québécois, l'état hydrique de la chaussée varie en fonction des saisons, ce qui affecte considérablement la capacité portante. À l'arrivée de la saison froide, l'eau présente dans la structure gèle et de la glace se forme entre les particules. Cette progression du gel peut atteindre une profondeur variant entre 1,2 et 3,0 m selon les régions, ce qui est nettement supérieur à l'épaisseur des structures de chaussées qui est de l'ordre de 90 cm.

La pénétration du gel s'effectue graduellement dans les sols en partant du haut vers le bas. Dans certaines conditions défavorables, l'eau contenue dans les sols non gelés peut être aspirée vers la zone de gel. Ce pompage de l'eau de la nappe phréatique engendre alors la

formation de lentilles de glace qui se traduit par un soulèvement de la chaussée et, dans certains cas, par la décompaction des matériaux.

Pour sa part, le dégel printanier progresse principalement du haut vers le bas. Au cours de cette période, la structure de la chaussée présente un excès de pression interstitielle à cause de l'augmentation du degré de saturation des matériaux. Ce surplus d'eau est dû, d'une part, à l'infiltration en surface de l'eau provenant de la fonte des neiges et, d'autre part, à la fonte des lentilles de glace formées à l'intérieur de la structure pendant l'hiver. L'eau en surplus génère une perte significative de la capacité portante de la structure menant à la formation graduelle d'ornières, de fissures de fatigue dans les pistes de roues et parfois de nid-de-poule.

Pour toutes ces considérations, des restrictions de charges sont imposées aux véhicules lourds afin de limiter les dommages en période de dégel. Ces dommages sont représentés à la figure 2. De plus, afin de préserver une capacité portante adéquate, de réduire le potentiel de gélivité et d'assurer un bon drainage de la structure, le ministère des Transports du Québec a limité le pourcentage de particules fines des matériaux de fondation de chaussée à 7%. Pourtant, certains sites du réseau routier québécois présentent un bon comportement au printemps avec un pourcentage de particules fines supérieur à 7%. Le comportement de ces sites est d'autant plus intéressant qu'il a déjà été démontré que l'état hydrique peut modifier considérablement le comportement mécanique de la chaussée. Ces données rendent nécessaire la vérification des propriétés drainantes des matériaux de fondation en fonction des propriétés de structure de l'arrangement. Connaître les propriétés de drainage des matériaux de fondation permettra d'adapter la structure de la chaussée aux conditions en place.

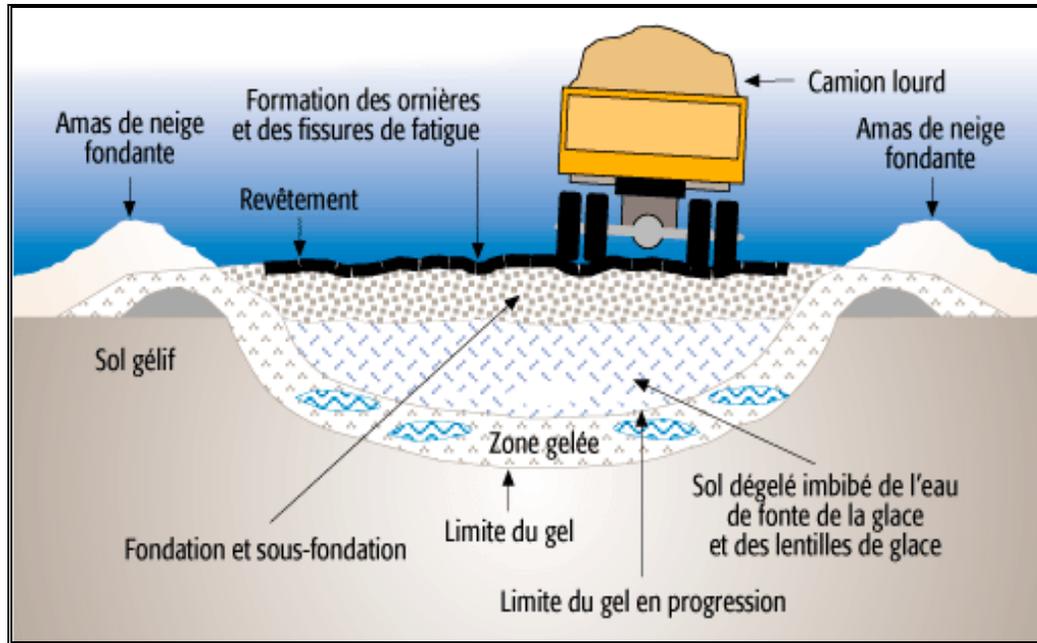


Figure 2. Effet du gel et du dégel sur une route *Source* : (<http://www.mtq.gouv.qc.ca>)

La présente étude vise deux objectifs. Le premier consiste à établir l'effet de structure des matériaux granulaires d'origine granitique sur les paramètres hydriques. Le deuxième objectif consiste à analyser l'influence du pourcentage des particules fines sur ces mêmes paramètres.

Comme cela a été mentionné précédemment, au Québec, la fondation de la chaussée est constituée de matériau MG-20. Du granite concassé MG-20 prélevé de la carrière PEB Ltée a donc été utilisé dans le cadre de cette étude. Ces prélèvements de matériau MG-20 ont servi à reconstituer huit granulométries. Ces granulométries ont ensuite été comparées avec la granulométrie établie par le ministère des Transports du Québec pour du matériau de fondation. Les propriétés physiques et les caractéristiques hydrauliques des granulométries ont été établies en déterminant la courbe caractéristique de rétention d'eau et la conductivité hydraulique.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis d'analyser l'influence qu'ont les conditions de compactage – l'énergie de compactage et le degré de saturation - et les caractéristiques granulométriques – le coefficient d'uniformité et le pourcentage de particules fines - sur les

paramètres hydrauliques des matériaux granulaires. Des corrélations empiriques entre les paramètres hydrauliques et les propriétés de structure ont ensuite été établies.

L'ensemble de ce mémoire se présente comme suit : Le chapitre 1 présente une revue de la littérature disponible sur l'analyse de l'état hydrique dans les fondations de chaussées, sur les caractéristiques de drainage des matériaux de fondation ainsi que sur le comportement des matériaux granulaires en conditions saturées et partiellement saturées.

Au chapitre 2, suit la description des matériaux utilisés, de la technique d'échantillonnage et de la caractérisation physique des matériaux. Ce chapitre comprend aussi la description des granulométries reconstituées de même que la caractérisation des particules fines du matériau.

Le troisième chapitre expose la méthodologie utilisée pendant l'étude ainsi que les essais employés pour le compactage et la détermination des paramètres hydrauliques tels que la courbe caractéristique de rétention d'eau et la conductivité hydraulique à charge constante.

Le chapitre suivant présente les résultats expérimentaux obtenus, c'est-à-dire les courbes caractéristiques de rétention d'eau et la conductivité hydraulique à charge constante.

Le cinquième chapitre est consacré à la discussion des résultats. Il y est notamment question de l'importance des conditions de compactage et de l'influence que peut avoir le degré de saturation de l'échantillon lors du compactage sur les paramètres hydrauliques. L'influence et la relation qui existe entre le pourcentage de particules fines, le coefficient d'uniformité, la conductivité hydraulique et les paramètres de la courbe caractéristique de rétention d'eau sont ensuite présentées.

Finalement, le dernier chapitre présente les conclusions de l'étude et identifie les points à poursuivre pour faire avancer les connaissances sur la détermination des paramètres hydrauliques des matériaux granulaires.

## **2. REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Cette revue de littérature fait le point sur les connaissances actuelles en matière d'analyses d'état hydrique dans les fondations de chaussées et des caractéristiques de drainage des matériaux de fondation. Par la suite, elle présente le comportement des matériaux granulaires en conditions saturées et partiellement saturées.

### **2.1 Analyses de la variation de l'état hydrique dans les fondations de chaussées**

La fondation est une couche conformée par des matériaux granulaires, naturels ou concassés, qui sont mis en place en conditions partiellement saturées à une densité maximale. Cette couche est conçue afin d'assurer une bonne distribution des charges et une évacuation rapide du surplus d'eau pour empêcher les dommages occasionnés par l'augmentation de la pression d'eau interstitielle.

Selon Paute (1998), les causes à l'origine des dégradations de chaussées en relation avec l'eau peuvent être classées en deux grandes catégories. La première comprend les causes externes liées aux volumes d'eau qui peuvent potentiellement alimenter les chaussées, causes externes parmi lesquelles le climat est le principal facteur de dégradation. La deuxième catégorie implique les causes internes provenant des propriétés et des performances des matériaux de chaussées, dans la mesure où ces performances sont affectées par l'eau.

Quand l'eau est présente en excès dans les chaussées elle devient un élément décisif de l'accélération des dégradations de chaussées. De plus, elle a un effet aggravant au moment du dégel. L'infiltration d'eau et le gel de la structure sont les phénomènes qui contribuent le plus à la dégradation de la chaussée dans le contexte québécois. Il est donc essentiel d'évaluer les risques de dommages par la présence d'eau *a priori* afin d'éviter une dégradation prématurée de la chaussée.

Les périodes de l'année où la dégradation de la chaussée est la plus élevée sont l'hiver et le printemps. D'après Lafleur *et al.* (1994), pendant la période hivernale la dégradation des revêtements peut être accélérée par la formation des lentilles de glace dans la zone de pénétration du gel immédiatement sous la chaussée. Ces lentilles qui sont formées par la présence d'eau dans la fondation et dans les sols d'infrastructure peuvent déformer la route en surface. Cette déformation peut entraîner une dégradation plus importante si l'infrastructure est constituée de sols gélifs car il peut arriver que la répartition de ces lentilles soit inégale à cause de l'hétérogénéité des sols d'infrastructure. Si les efforts de soulèvement sont tels que la résistance à la traction du revêtement est dépassée, des fissures apparaissent et le processus de soulèvement différentiel s'accélère parce que les fissures facilitent l'infiltration d'eau.

Il est généralement admis que le printemps est la période pendant laquelle les problèmes de dégradation de chaussées sont les plus critiques. Selon St-Laurent *et al.* (1995), « les fondations peuvent devenir saturées par l'infiltration d'eau de fonte de la neige et, dans le pire des cas, de la fonte des lentilles de glace. Ainsi, la capacité structurale de la fondation et de l'infrastructure est sensiblement réduite par l'excès de pression interstitielle généré par le passage de véhicules lourds ». De son côté, Raimbault (1986) mentionne que l'évacuation de l'eau des zones saturées se fait par l'intermédiaire des zones non saturées, ce qui rend plus difficile le drainage des fondations comportant des zones de teneur en eau excessive.

Les changements environnementaux dans les couches de la chaussée ne se réduisent pas seulement aux changements de la teneur en eau, mais aussi aux changements de température. En contexte nordique, les changements de températures influencent de manière importante l'écoulement d'eau, car ils affectent directement la viscosité de l'eau et génèrent des zones imperméables par la présence de sols gelés.

Ces considérations permettent de constater que la variation de l'état hydrique dans un sol partiellement saturé est complexe et contrôlée par plusieurs facteurs lesquels sont fortement influencés par la variation de la teneur en eau au cours de l'année. Selon Alonso (1998), la teneur en eau change de manière temporelle et spatiale en réponse aux facteurs environnementaux. Ce changement s'effectue en deux étapes, illustrées par la figure 3. La

première est une étape transitoire d'équilibrage jusqu'au temps  $t_{eq}$  au cours de laquelle la teneur en eau de la chaussée augmente ou diminue d'une manière irréversible par rapport à sa valeur initiale ( $w_i$ ) jusqu'à une valeur finale d'équilibre ( $w_{eq}$ ). La deuxième étape est cyclique. Elle débute au temps  $t_{eq}$  et marque le début d'une période de changements cycliques contrôlés par le climat, l'action directe sur la chaussée, les conditions de drainage, l'infiltration latérale et les modifications de la nappe phréatique.

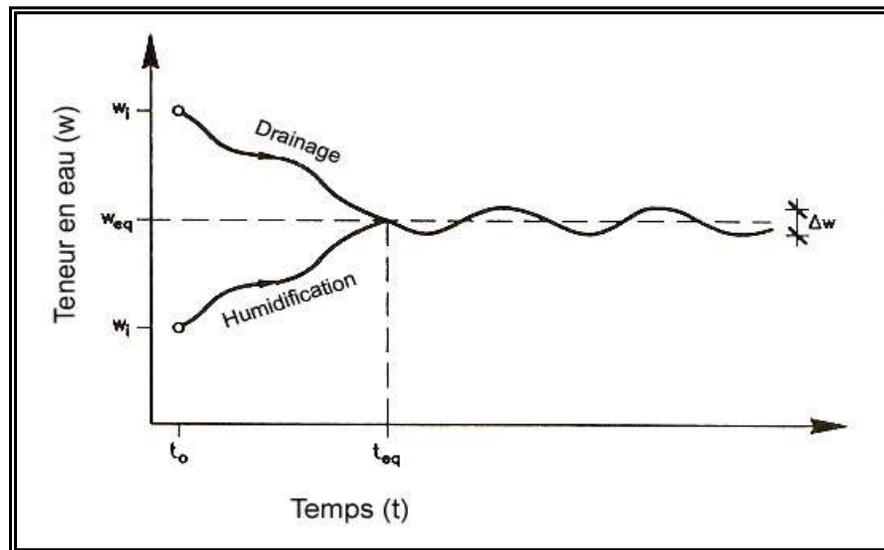


Figure 3. Évolution de la teneur en eau sous la surface de roulement (adapté d'Alonso 1998)

Comme la condition limite de saturation n'est généralement pas atteinte (Alonso 1998), la prédiction du mouvement de l'eau dans la chaussée est basée sur la théorie d'écoulement en milieu partiellement saturé. Les quelques modèles existants permettent d'évaluer l'effet de l'infiltration et l'état de saturation de la portion non saturée. C'est le cas notamment du modèle de Wallace (1977) qui a évalué le phénomène de l'infiltration latérale à travers des accotements non pavés, de même que l'influence de différents facteurs géométriques, la perméabilité relative des couches ainsi que la valeur d'entrée d'air de la courbe de rétention d'eau de la fondation et de la sous-fondation. La modélisation adéquate des ces phénomènes nécessite une très bonne connaissance des propriétés hydriques des matériaux de fondation en conditions partiellement saturées. (Wallace 1977)

Grâce à ces réflexions sur l'état hydrique d'une fondation, on peut affirmer que la porosité de la couche est la clé pour éliminer les effets d'entreposage de l'eau. Ces derniers causent des dommages prématurés et sévères à la chaussée. L'érosion, le pompage, la désintégration de la base, le décollement de l'asphalte et la surcontrainte des fondations sont quelques-uns des dommages que ces effets peuvent entraîner (Mlynarek et al. 1995).

## **2.2 Caractéristiques de drainage de matériaux de fondations de chaussées.**

Généralement, la fondation d'une chaussée est conçue en fonction du trafic et du climat auxquels la route sera soumise. Ces conditions qui influencent directement le bon comportement et la durée de vie de la chaussée sont identifiées par le concepteur en fonction des conditions de la route. Pour assurer le comportement et la durée de vie de la chaussée, le concepteur doit choisir, entre la capacité de support et la capacité d'évacuation d'eau, la caractéristique la plus importante à considérer pour la conception. Ces deux capacités sont obtenues à partir d'arrangements des particules qui possèdent des propriétés physiques opposées. Le concepteur choisit les caractéristiques granulométriques qui conviennent le mieux à son évaluation de la capacité à obtenir en priorité. Une bonne capacité portante est généralement obtenue pour des matériaux ayant de faibles indices de vides. Ces matériaux possèdent une granulométrie étalée et une certaine teneur en fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ ) et se caractérisent par une faible perméabilité et donc par une faible capacité de drainage. Une bonne capacité de drainage est obtenue avec une granulométrie uniforme à faible teneur en fines qui confère un comportement peu stable sous l'action de charges répétitives. Il est donc admis que la hausse de la quantité de fines du matériau de fondation contribue à l'augmentation de la portance d'une chaussée (Flon et Poulin 1987), mais peut affecter de manière importante la capacité d'évacuation d'eau.

Ces considérations ont menées le ministère des Transports du Québec à recommander un fuseau granulométrique pour les matériaux de fondation MG-20, et ce, afin d'assurer le bon comportement de la fondation considérant le drainage et la capacité portante. Ce fuseau granulométrique est illustré par la figure 4. La granulométrie recommandée pour les

matériaux de fondation a un coefficient d'uniformité moyen de 47, une teneur en particules fines comprise entre 2% et 7% et un diamètre des particules entre 31.5mm et 0mm.

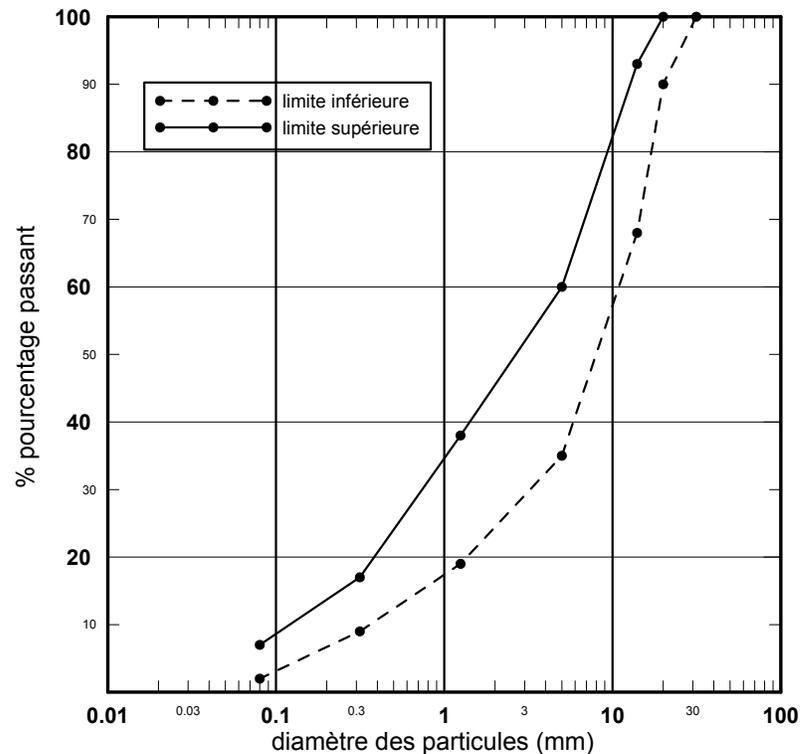


Figure 4. Fuseau granulométrique spécifié par le MTQ pour les matériaux de fondation

La limite supérieure de 7% de particules fines a pour objectif de préserver une capacité portante adéquate, de réduire le potentiel de gélivité et d'assurer un bon drainage de la structure. Cependant, du point de vue du drainage, la limite supérieure de 7% pour la portion des fines peut être très élevée dans le cas de certains types de matériaux, alors que pour d'autres elle pourrait être dépassée sans pour autant nuire à la conductivité hydraulique (Côté 1997).

L'analyse des caractéristiques de drainage des matériaux granulaires est basée sur les conditions initiales dans lesquelles ces matériaux sont mis en place. D'après Alonso (1998), l'état initial d'un matériau granulaire compacté est contrôlé par ses conditions de compactage. Cet état peut être caractérisé par la masse volumique, la teneur en eau atteinte et par l'état initial de pressions. Les conditions de mise en place influencent les propriétés

initiales de la fondation : la conductivité hydraulique,  $k$ , la déformabilité et les conditions de rupture.

Parmi ces propriétés, la conductivité hydraulique est la propriété qui rend compte du drainage des fondations. Elle mesure la capacité du sol d'acheminer l'eau et exprime ou définit comment l'eau circule à travers le sol. La circulation de l'eau se fait dans les canaux formés par le réseau des pores de l'arrangement des particules solides. Ces canaux présentent des formes irrégulières et sont interreliés entre eux, ce qui rend l'analyse du micro-écoulement complexe et difficilement modélisable. L'analyse de l'écoulement en milieu poreux est donc généralement réalisée de manière macroscopique. La conductivité hydraulique est influencée par plusieurs propriétés du matériau granulaire. Ces propriétés ont été regroupées en quatre catégories par Murray (1995):

1. Les propriétés des particules :
  - Les dimensions et la classe des particules;
  - La forme des particules (arrondie, anguleuse, etc.) ;
  - La texture des particules (rugosité) ;
2. L'arrangement des particules :
  - La densité du compactage;
  - La configuration des particules (orientation, alignement, ségrégation) ;
3. Les caractéristiques des pores :
  - La forme et la distribution du volume des pores;
  - La sinuosité (longueur du chemin d'écoulement) ;
4. Les propriétés du perméat
  - La viscosité et la densité du perméat ;

### **2.3 Écoulement en milieu saturé**

Dans cette section, il est question de la présence de l'eau dans un milieu saturé, c'est-à-dire un milieu dans lequel les pores sont remplis d'eau. Ce type de milieu peut être représenté par deux phases : la phase solide et la phase liquide.

L'eau, qui est considérée comme un fluide non compressible, peut être présente dans une masse de sol en deux états : à l'état statique, c'est-à-dire sans écoulement, et à l'état dynamique, ce qui signifie avec écoulement d'eau (Holtz et Kovacs 1991).

L'écoulement d'eau dans les pores d'une matrice solide se fait d'une zone de fort potentiel vers une zone de faible potentiel. En général, les analyses hydriques simplifiées considèrent cet écoulement dans les chaussées comme étant unidimensionnel, c'est-à-dire que la pression, la vitesse et la température sont constantes dans n'importe quelle direction perpendiculaire à l'écoulement. L'écoulement est aussi considéré comme laminaire, car dans la plupart des sols les diamètres des pores sont petits, ce qui entraîne de faibles vitesses d'écoulement. Ainsi, l'écoulement d'eau dans une masse de sol quelconque se produit de manière organisée et en couches dont chaque particule d'eau suit une trajectoire qui ne se mélange pas avec la trajectoire d'autres particules.

### 2.3.1 Loi de Darcy sur l'écoulement en milieux poreux

L'écoulement en milieux poreux a été étudié par l'ingénieur français Henry Darcy (1803-1858) dans ses recherches pour améliorer la qualité de l'eau distribuée aux fontaines de la ville de Dijon. Ces expériences ont permis de déterminer l'écoulement dans un milieu saturé à charge constante comme celui illustré par la figure 5. Elles ont consisté à faire varier la charge hydraulique ( $\Delta h$ ), appliquée sur un filtre de sable propre et à mesurer le volume d'eau écoulé pendant un temps donné afin de calculer le débit moyen,  $Q$ . Darcy a conclu que le débit est directement proportionnel à la section transversale  $A$  et à la différence de charge hydraulique, et qu'il est inversement proportionnel à la longueur de l'échantillon,  $L$ . La relation entre la charge hydraulique, la géométrie de l'échantillon et le débit a permis de formuler la loi de Darcy (voir équation 1).

$$[ 1] \quad Q = kA \frac{\Delta h}{L}$$

Dans cette équation,  $k$  représente le coefficient de perméabilité ou la constante de proportionnalité qui est aussi souvent appelée conductivité hydraulique.  $A$  représente la section transversale de l'échantillon et  $\Delta h$  la charge hydraulique qui est la différence de

charge mesurée sur la longueur de l'échantillon  $L$ , alors que  $q$  représente le débit qui traverse la masse de sol. Le rapport entre  $\Delta h$  et la longueur de l'échantillon  $L$  est appelé gradient hydraulique, d'où  $i = \Delta h / L$ .

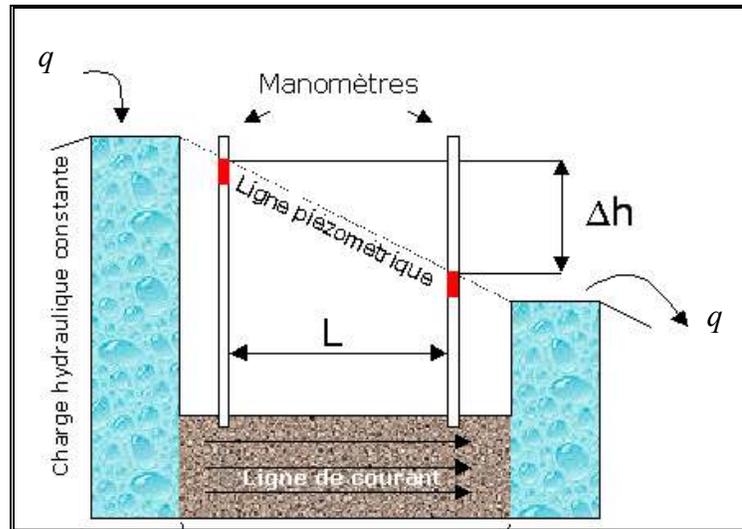


Figure 5. Écoulement d'eau dans un milieu saturé à charge constante

Source : (<http://www.clis-bure.com>)

Cette formulation permet de voir que la vitesse et le débit sont fortement liés. Si la vitesse d'écoulement est  $v = q/A$ , la loi de Darcy peut être exprimée de la manière suivante:

$$[2] \quad v = k i$$

La loi de Darcy est valide pour les écoulements laminaires.

Comme on l'a déjà vu, la conductivité hydraulique est influencée par la dimension des grains, leur forme, leur arrangement ainsi que par l'indice des vides ou la porosité, la forme des vides et la tortuosité des cheminements d'écoulement. Cette influence se reflète dans l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité. Le tableau 1 illustre ces ordres de grandeurs en fonction des caractéristiques de drainage et du type de sol.

Tableau 1. Relation entre l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité, les caractéristiques de drainage et le type de sol. (Holtz et Kovacs 1991)

	Coefficient de perméabilité m/s (échelle logarithmique)											
	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Propriétés relatives au drainage			Bon drainage				Faible drainage		Presque imperméable			
Types de sol	Graviers propres		Sables propres, mélanges de sables et de graviers propres			Sables très fins, silts organiques et inorganiques, mélanges de sables, de silt et d'argile, tills glaciaires dépôts d'argile stratifiés, etc.			Sols « imperméables » comme les argiles homogènes sous la zone d'altération			

## 2.4 L'écoulement en milieu partiellement saturé

Les matériaux granulaires sont mis en place sur le terrain par compactage. Celui-ci est réalisé en ajoutant une quantité d'eau inférieure à la teneur en eau optimale du matériau. Ceci entraîne une condition partiellement saturée où les matériaux sont composés de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. La phase solide est constituée par l'ensemble des grains de l'arrangement qui laissent entre eux des vides. Ces vides sont appelés *pores*. Ces espaces sont représentés par la porosité de la masse du sol,  $n$ , qui est définie grâce à l'équation 3.

$$[ 3 ] \quad n = \frac{V_v}{V_t}$$

Dans cette équation,  $n$  correspond à la porosité exprimée en pourcentage,  $V_v$  représente le volume de vides et  $V_t$  le volume total de la masse de sol. La proportion de vides contenue dans le sol est aussi définie par l'indice des vides ( $e$ ) qui exprime la relation entre le volume de vides et le volume de solides ( $V_s$ ).

$$[ 4 ] \quad e = \frac{V_v}{V_s}$$

La porosité peut être exprimée en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) du matériau comme suit :

$$[ 5 ] \quad n = \frac{e}{1+e}.$$

Ces pores sont composés de la phase liquide et de la phase gazeuse, lesquels correspondent respectivement à l'eau et à l'air présents dans les pores. L'analyse du milieu partiellement saturé est fondamentale pour la caractérisation de la structure de la masse du sol. À cet égard, la structure, caractérisée grâce à l'étude des trois phases du sol, est bien définie avec les rapports de l'indice des vides,  $e$ , de la porosité,  $n$ , et du degré de saturation  $S_r$  qui indique le pourcentage du volume des vides occupé par l'eau et s'exprime par la relation présentée dans l'équation 6 où  $V_w$  représente le volume d'eau et  $V_v$  le volume de vides présent dans la masse du sol.

$$[ 6 ] \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100(\%)$$

Dans un milieu poreux partiellement saturés, l'eau, l'air et les grains entrent en contact et produisent un phénomène de tension superficielle. Essentiellement, ce phénomène peut être visualisé en comparant les forces d'adhésion qui s'exercent entre les parois d'un tube capillaire de très faible diamètre quand celui-ci est plongé dans l'eau. Ces forces d'adhésion, présentées dans la figure 6, transfèrent le poids de la colonne d'eau à la paroi du tube en attirant l'eau jusqu'à un point d'équilibre à une hauteur  $h$ . À ce niveau, la composante verticale de ces forces de réaction produit des tensions compressives sur la paroi du tube en formant une surface libre appelée ménisque (Bear 1972a).

La remontée capillaire,  $h$ , est inversement proportionnelle au diamètre du tube capillaire et peut être établie à partir de l'équation 7. Ce phénomène, montré dans la figure 7, est aussi associé avec la succion matricielle,  $\psi$ . Celle-ci est présente dans les zones capillaires et affecte les paramètres hydrauliques des sols partiellement saturés. La succion matricielle est représentée par l'équation 8 en utilisant la modèle de capillarité.

$$[ 7 ] \quad h = \frac{2\sigma_{aw}}{r}$$

Dans l'équation 7,  $h$  correspond à la remontée capillaire,  $\sigma_{aw}$  à la tension de surface air-eau laquelle a la capacité de soutenir une colonne d'eau dans un tube capillaire, et  $r$  au rayon de courbure du ménisque air-eau.

$$[ 8 ] \quad \psi = u_a - u_w = \frac{2\sigma_{aw}}{r}$$

Dans cette équation,  $\psi$  représente la succion matricielle,  $u_a$  la pression dans l'air,  $u_w$  la pression dans l'eau,  $u_a - u_w$  la pression capillaire,  $\sigma_{aw}$  la tension de surface air-eau et  $r$  le rayon de courbure du ménisque air-eau.

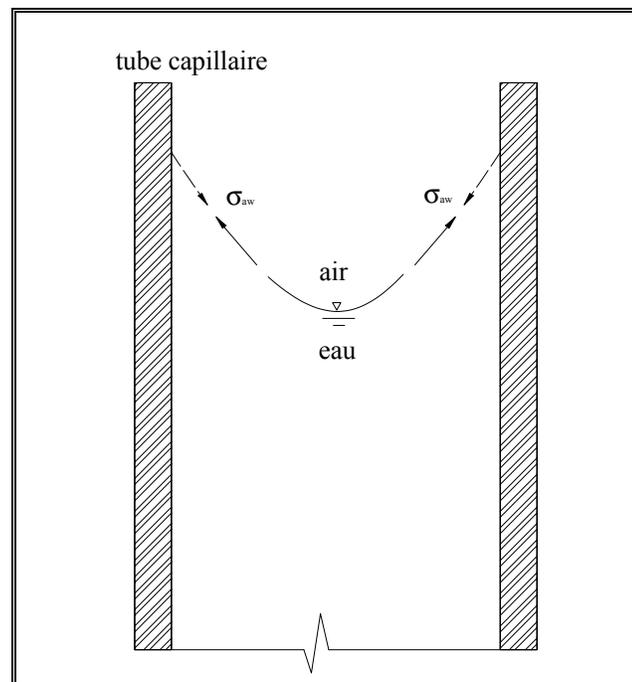


Figure 6. Tension superficielle à l'intérieur d'un tube capillaire

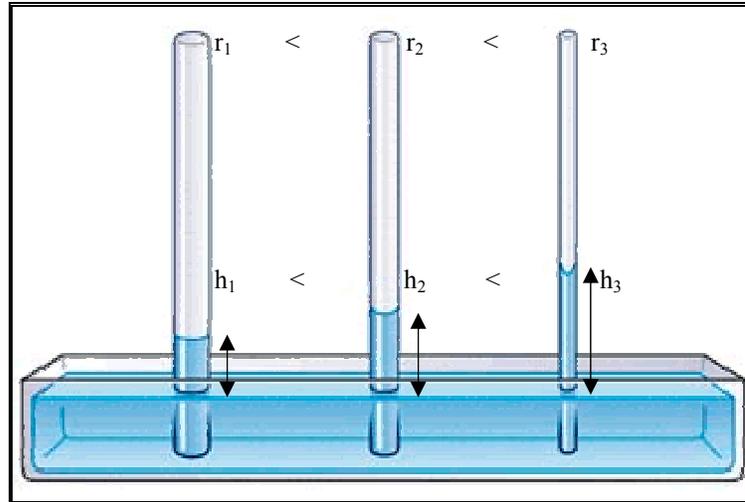


Figure 7. Phénomène de capillarité *Source* : (<http://www2.mcdaniel.edu>)

Un des paramètres influencé par la remontée capillaire est la conductivité hydraulique. Celle-ci est aussi réduite par l'augmentation de la sinuosité des canaux d'écoulement et par la présence d'air, ce qui réduit l'espace disponible pour l'écoulement d'eau (Fredlund et Rahardjo 1993). Cet écoulement est régi par la teneur en eau ( $w$ ) ou degré de saturation ( $S_r$ ) et par l'indice des vides ( $e$ ). Il est donc possible d'exprimer la conductivité hydraulique en fonction de n'importe quelle paire des paramètres suivants :

$e$  = indice des vides

$w$  = teneur en eau massique

$S_r$  = degré de saturation

$$k = k(S_r, e)$$

$$k = k(e, w)$$

$$k = k(S_r, w)$$

La conductivité hydraulique exprimée en fonction de  $e$  et  $w$  peut facilement être représentée par la teneur en eau volumique ( $\theta_w$ ) qui est fonction de ces deux paramètres :

[ 9 ] 
$$k = k(\theta_w)$$

Dans cette équation,  $\theta$  correspond à la teneur en eau volumique qui est la relation entre le volume d'eau et le volume total du sol. Cette relation s'exprime par l'équation suivante :

$$[ 10 ] \quad \theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{w\rho_d}{\rho_w}$$

Dans l'équation 10,  $\rho_w$  représente la masse volumique d'eau,  $\rho_w \approx 1g/cm^3$ ,  $w$  la teneur en eau massique,  $\rho_d$  la masse volumique du sol et  $V_t$  le volume total.

La valeur de la teneur en eau volumique d'un matériau est un pourcentage de la porosité et peut être exprimée comme une portion de l'espace poral  $n$  à l'aide de l'équation 11, où une fraction de la porosité représente le degré de saturation. Le degré de saturation est exprimé par l'équation 12.

$$[ 11 ] \quad \theta = \frac{V_w}{V_t}; n = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{si } V_w = V_v \Rightarrow \theta = n$$

$$\text{si } V_w = xV_v \Rightarrow \theta = xn$$

Dans cette équation,  $V_w$  correspond au volume d'eau,  $V_v$  au volume des vides,  $V_t$  au volume total,  $n$  à la porosité et  $x$  à la fraction de la porosité qui représente en fait le degré de saturation.

$$[ 12 ] \quad S_r = \frac{V_w}{V_w + V_a} = \frac{\theta}{n}$$

Dans l'équation 12,  $S_r$  représente le degré de saturation,  $V_w$  le volume d'eau,  $V_a$  le volume d'air et  $n$  la porosité.

Pour établir la conductivité hydraulique des sols partiellement saturés, les chercheurs ont développé des modèles qui permettent d'utiliser l'équation de Darcy. Richards (1931) a été le premier à essayer de généraliser la loi de Darcy aux milieux poreux non saturés. Il a proposé d'exprimer l'équation de l'écoulement en élargissant le concept de gradient de charge à celui de gradient potentiel de la façon suivante :

$$[ 13 ] \quad q = -k(\psi)\nabla\phi$$

Dans cette équation,  $\nabla\phi$  est le gradient de potentiel,  $k(\psi)$  représente la conductivité en fonction du potentiel matriciel et  $q$  correspond au flux d'écoulement.

À cette généralisation de la loi de Darcy s'ajoutent plusieurs méthodes de prédiction basées sur la distribution des pores et sur la détermination de relations empiriques entre les différents paramètres hydrauliques et les propriétés de structure des matériaux. La détermination de ces paramètres hydrauliques sous conditions partiellement saturées est effectuée au laboratoire afin de contrôler les conditions d'essai. Dans le cas de la conception de chaussée, cette détermination est réalisée avec des échantillons de matériaux compactés au laboratoire à une énergie et à une teneur en eau données.

Les paramètres hydrauliques utilisés pour des relations empiriques sont obtenus à partir de la détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau et de la conductivité hydraulique en laboratoire. Ces paramètres sont identifiés dans *propriétés hydrauliques de sols partiellement saturés*.

#### **2.4.1 Propriétés hydrauliques des sols partiellement saturés.**

D'après Haverkamp et al. (1999), les propriétés qui affectent l'écoulement d'eau en milieu partiellement saturé peuvent être regroupées en deux caractéristiques fondamentales du sol. La première est la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) qui décrit la relation entre la teneur en eau volumique et la pression d'eau dans le sol. La deuxième est la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau volumique.

Parmi les éléments qui permettent d'observer l'influence de la succion sur les paramètres hydriques, la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) est le plus important. Cette courbe, définie dans les paragraphes suivants, met en rapport la succion matricielle et la teneur en eau volumique d'un matériau. Elle permet d'observer que la succion matricielle croît en fonction de la diminution de la teneur en eau volumique présente dans le sol. Cet accroissement est dû au poids de la remontée d'eau et au rayon de courbure qui ont une implication directe sur cette courbe (Fredlund et Rahardjo 1993).

#### 2.4.1.1 La courbe caractéristique de rétention d'eau

« La variation de la teneur en eau dans un sol peut être provoquée par une augmentation de la succion en séchage ou une diminution de la succion en mouillage. Ces variations de succion en fonction de la teneur en eau (pondérale ou volumique), ou du degré de saturation sont présentées par une courbe appelée courbe caractéristique de rétention d'eau ou courbe de succion » (Ghorbel 2006).

Cette courbe décrit la capacité du sol à retenir ou relâcher l'eau contenue dans ses pores. Elle est tracée, en échelle logarithmique, grâce à la mesure de la teneur en eau volumique, ou degré de saturation, à différentes valeurs de succion.

L'autre composant de la CCRE est la succion ou potentiel matriciel, connue aussi comme le potentiel capillaire ou la succion matricielle  $\psi$ . Cette succion correspond à la mesure de l'état d'énergie de l'eau retenue dans un sol par les actions d'attraction entre les particules. Son accroissement se reflète par la diminution de la teneur en eau du matériau. D'après Ghorbel (2006), dans un sol granulaire cette attraction est due à la capillarité, alors que pour les sols fins en conditions partiellement saturés, elle serait due à la capillarité et à l'absorption, cette dernière étant produite par des actions physico-chimiques.

Le schéma d'une CCRE est illustré à la figure 8. Ce schéma représente la relation entre la teneur en eau et la succion obtenue à partir d'une phase de drainage et une phase d'imbibition. On peut observer que la CCRE déterminée par une phase d'imbibition présente une hystérésis par rapport à celle obtenue par drainage.

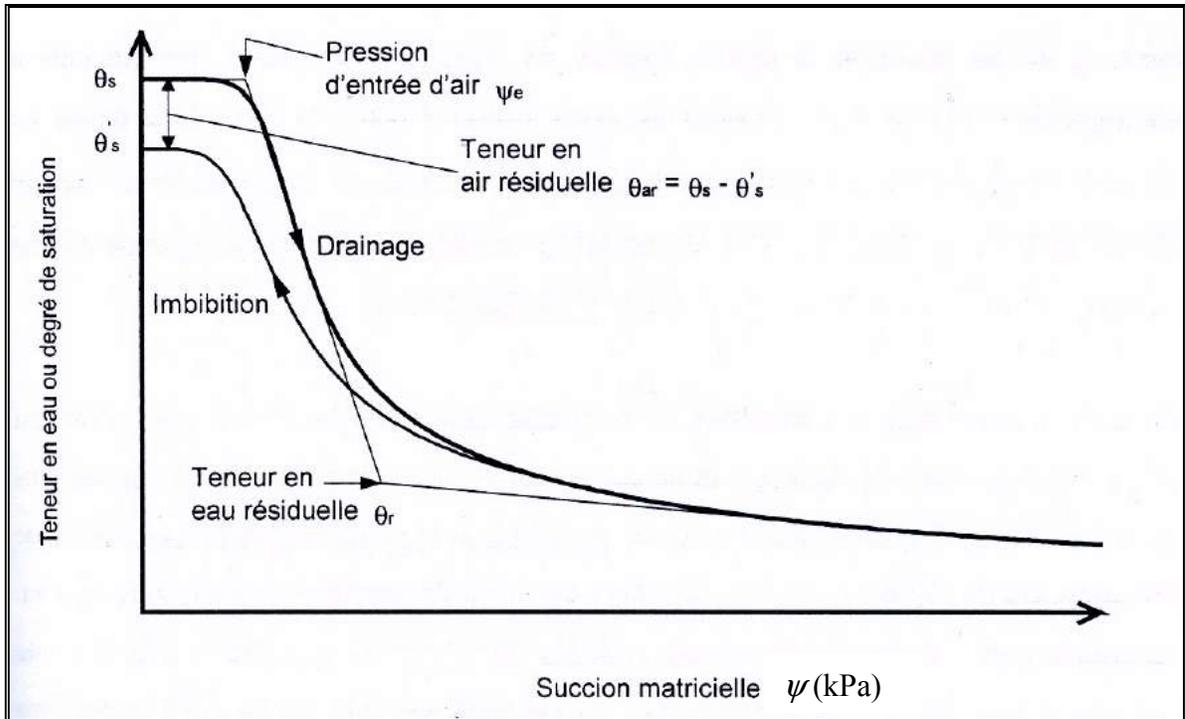


Figure 8. Courbe caractéristique de rétention d'eau (Côte 1997)

Dans une phase de drainage, un sol saturé est soumis à une augmentation graduelle de la succion matricielle qui résulte en une diminution de sa teneur en eau. Initialement, lorsque la pression appliquée s'accroît, le sol reste saturé jusqu'à une valeur de succion égale à la pression capillaire produite par l'effet des forces d'attraction entre les solides et l'eau du matériau. À partir du moment où une succion légèrement supérieure à la pression capillaire présente dans le matériau est appliquée, le sol commence à se drainer. La succion atteinte lorsque la phase gazeuse investit peu à peu le milieu poreux est nommée « pression d'entrée d'air » et est représentée par le symbole  $\psi_a$ . Cette pression est définie par l'intersection de la droite de saturation et de l'asymptote à grandes succions (Haverkamp *et al.* 1999).

Une fois la pression d'entrée d'air atteinte, la teneur en eau du matériau diminue très rapidement. Pendant cette phase de forte désaturation, la variation de la teneur en eau est sensiblement proportionnelle à celle de la succion. La pente de cette relation linéaire est appelée « indice de distribution de la dimension des pores ». Elle indique la grosseur et le volume des pores. Gardner (1958) ainsi que Brooks et Corey (1966) ont constaté que, dans

les matériaux avec une granulométrie très uniforme, les pentes de la portion linéaire de la CCRE sont abruptes tandis que les matériaux étalés présentent des pentes plus douces (Côté 1997).

La teneur en eau résiduelle ( $\theta_r$ ) est atteinte quand la pente de la portion de drainage de la CCRE change en devenant parallèle à l'axe de succion. À partir de cette valeur, il faut augmenter la succion considérablement pour faire varier légèrement la teneur en eau. Selon Fredlund et Xing (1994), la valeur de la teneur en eau résiduelle peut être déterminée par l'intersection de la projection de la portion de drainage avec la tangente de l'asymptote à grandes succions. D'après Côté (1997), à des teneurs inférieures à  $\theta_r$ , l'eau de drainage est principalement soumise aux forces capillaires d'attraction physico chimique (osmotique), alors qu'à des teneurs en eau supérieures à  $\theta_r$ , les forces de gravité sont dominantes et l'eau peut donc être drainée par de faibles gradients.

Il est important de souligner que les changements de volume dans les matériaux granulaires, qui sont soumis à des variations de teneur en eau, sont négligeables. Donc, l'indice des vides présent dans le matériau reste constant lors la variation de la teneur en eau due à l'application des différents paliers de succion.

Durant la phase d'imbibition, appelée aussi humidification, on retrouve les mêmes paramètres que dans la phase de drainage. Cependant, on observe une hystérésis importante de la teneur en eau par rapport à la phase de drainage. Puisque les vides présents dans un arrangement de particules grossières peuvent être considérés comme un réseau de tubes capillaires, le phénomène s'explique à l'aide de l'équation de Laplace (voir équation 15). Cette équation affirme que la succion matricielle est inversement proportionnelle au rayon du ménisque air-eau entre deux grains. Lorsque le sol se draine, l'eau, un liquide non mouillant, est expulsée du matériau et le rayon de courbure du ménisque se révèle faible, ce qui indique que la pression capillaire  $\psi$  est plus élevée. Par contre, dans la phase d'imbibition, l'eau est un liquide mouillant qui tente de pénétrer dans le matériau, ce qui fait augmenter le rayon du ménisque et faiblir la pression capillaire (Bear 1972).

$$[ 14 ] \quad \psi = \frac{2\sigma_{aw} \cos(\omega)}{rg\rho_w}$$

Dans cette équation  $\sigma_{aw}$  correspond à la tension d'eau de la surface liquide-vapeur et  $\omega$  à l'angle de contact entre le liquide et le solide. À 20°C, avec  $\rho_w$  égal à 1g/cm<sup>3</sup> et  $\omega$  égal à zéro, l'équation est réduite comme suit :

$$[ 15 ] \quad \psi = \frac{0.149}{r}$$

Dans l'équation 16,  $\psi$  représente la succion d'eau du sol (ou pression capillaire) et  $r$  le rayon de pore en cm.

Ce phénomène a été aussi décrit par Haverkamp *et al.* (1999) à l'aide de l'équation de Laplace. Cet auteur montre que, lorsque le sol est drainé, les pores restent saturés jusqu'à ce que la succion dans les pores dépasse 0.149/r. Par contre, durant l'imbibition, l'eau commence à remplir les pores quand  $\psi$  atteint une valeur inférieure à 0.149/R, où R représente le rayon de courbure des pores dont la valeur est supérieure au rayon de courbure du ménisque. Donc, pour une succion égale, la teneur en eau dans le chemin de drainage dépasse la valeur de la teneur en eau du chemin d'imbibition en causant une hystérésis.

#### **2.4.1.2 La relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau volumique**

La relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau des matériaux partiellement saturés est normalement effectuée à partir de fonctions basées sur la distribution des pores en considérant que la structure du sol est incompressible. Cependant, cette relation peut être faite à partir de la détermination de la conductivité hydraulique et de la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurées en laboratoire.

Une des fonctions qui met en rapport ces deux paramètres est la fonction proposée par (Buckingham 1907 et Richards 1931) et décrite par Haverkamp *et al.* (1999). Cette fonction est exprimée théoriquement par l'équation 17.

$$[ 16 ] \quad k(\theta) = \frac{K \rho_w g}{\mu_w} k_{rw}(\theta)$$

Dans cette équation,  $K$  correspond à la perméabilité intrinsèque,  $k_{rw}(\theta)$  à la perméabilité relative (normalement le rapport de la perméabilité non saturée et la perméabilité saturée), laquelle prend la valeur de 0 quand le sol est complètement drainé et 1 quand le sol est 100% saturé, et  $\mu_w$  est la viscosité de l'eau.

Quand la conductivité hydraulique est exprimée en fonction de la teneur en eau volumique, la fonction  $k(\theta)$  est fortement non linéaire et se comporte comme une fonction puissance. L'équation 17 montre que la conductivité hydraulique ( $k$ ) est influencée par la perméabilité intrinsèque, par la densité et la viscosité du fluide, ainsi que par la quantité de fluide dans le sol ( $k_{rw}(\theta)$ ). L'analyse du comportement de  $k(\theta)$  permet d'affirmer que, lorsque la teneur en eau diminue, la conductivité hydraulique décroît rapidement.

Dans la littérature, on trouve d'autres fonctions qui mettent en relation la conductivité hydraulique et la teneur en eau. C'est le cas de la fonction proposée par Kunze *et al.* (1968), qui utilise la configuration de l'espace de pores remplis d'eau. Cette fonction, présentée à l'équation 18, calcule le coefficient de perméabilité en divisant la CCRE en intervalles égaux au long de l'axe de la teneur en eau volumique. Celui-ci est illustré par la figure 9. Ainsi, le calcul du coefficient est fait avec la succion matricielle correspondante au centre de chaque intervalle (Fredlund et Rahardjo 1993).

$$[ 17 ] \quad k_w(\theta)_i = \frac{k_{sat}}{k_{sc}} \frac{T_s^2 \rho_w g}{2\mu_w} \frac{\theta_s^p}{N^2} \sum_{j=i}^m \left\{ (2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \right\}$$

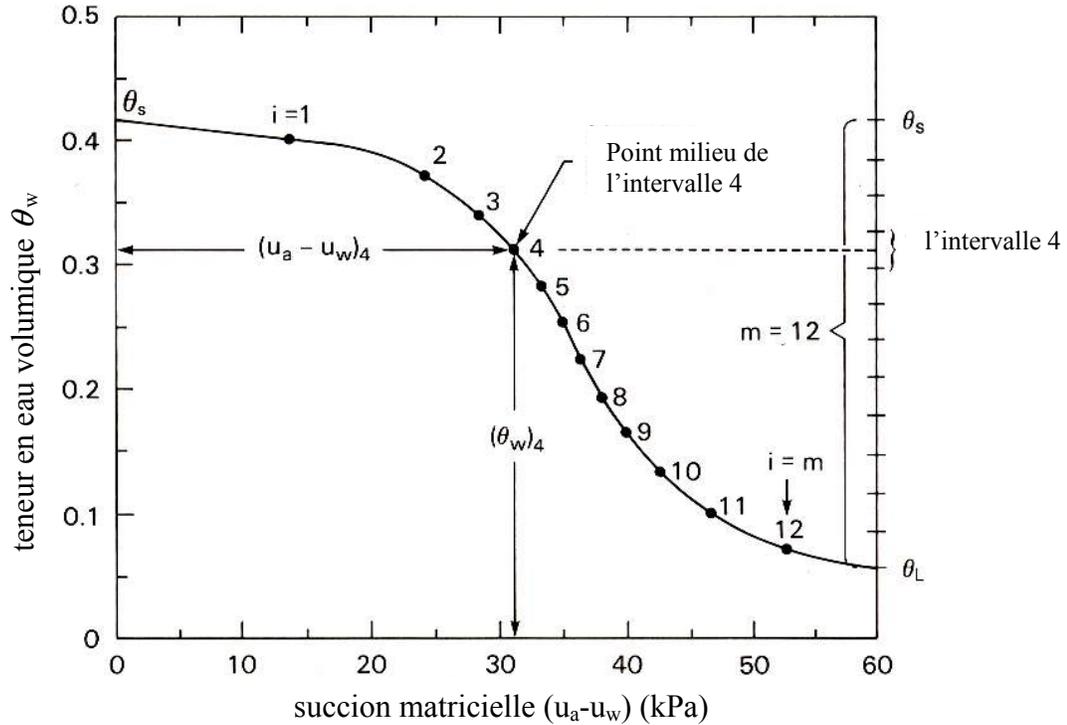


Figure 9. Prédiction de la conductivité hydraulique grâce à la CCRE (adapté de Fredlund et Rahardjo 1993)

À l'équation 18,  $k_w(\theta_w)_i$  est le coefficient de perméabilité (m/s) calculé pour un  $(\theta_w)_i$  correspondant à l'intervalle  $i$  qui augmente avec la diminution de la teneur en eau volumique. Le symbole  $k_{sat}$  représente le coefficient de perméabilité saturée mesurée,  $k_{sc}$  le facteur de correction pour la perméabilité à saturation,  $T_s$  la tension de la surface de l'eau,  $\rho_w$  la densité d'eau,  $\mu_w$  la viscosité de l'eau,  $\theta_s$  la teneur en eau volumique en saturation et  $m$  le nombre total d'intervalles.  $N = m \left( \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_L} \right)$  correspond au nombre total d'intervalles calculés entre la teneur en eau volumique en saturation,  $\theta_s$  à la teneur en eau volumique à zéro,  $\theta_w$  et  $(u_a - u_w)_j$  à la suction matricielle correspondant au mi-point de l'intervalle  $j$ .

### 2.4.2 Modèles de conductivité hydraulique en sols partiellement saturés

Selon Côté et Konrad (2003), au cours des dernières décennies, de nombreux modèles ont été proposés pour prédire la conductivité hydraulique des sols en conditions partiellement saturées. Parmi ces modèles se trouvent ceux proposés par Kunze *et al* (1968), par Mualem (1976), par Van Genuchten (1980) et par Fredlund *et al* (1994), lesquels sont basés sur la distribution et la taille des pores ainsi que sur la courbe caractéristique de rétention d'eau. De la même manière, des relations empiriques entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau du sol ont été développées par Gardner (1958) et Brooks et Corey (1964). Ces modèles ont été testés sur plusieurs matériaux et ont été approuvés grâce à la détermination de leur courbe caractéristique de rétention d'eau et de leur conductivité hydraulique.

Cependant, les études effectuées sur les caractéristiques hydrauliques des matériaux granulaires sont limitées, car les paramètres hydrauliques de ces matériaux sont difficilement mesurables. Cette difficulté de mesure due au manque d'appareillage, se reflète dans le peu de modèles disponibles pour ce type de matériau.

Pour l'analyse de la conductivité hydraulique des matériaux des fondations de chaussées, il n'est pas nécessaire d'utiliser des modèles complexes permettant d'établir la CCRE à très grandes pressions puisque, selon Raimbault (1986), en conditions routières les matériaux de fondations présentent une valeur de succion matricielle assez faible comprise entre 0 et 75 kPa.

D'après Côté et Konrad (2003), le modèle qui convient particulièrement pour l'analyse de la conductivité hydraulique de ces matériaux est le modèle de Brooks et Corey (1964). Ce modèle, présenté ci-dessous par les équations 19 et 20, permet d'évaluer la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) et de la succion matricielle ( $\psi_a$ ) en considérant que la succion résiduelle ( $\theta_r$ ) est égale à zéro.

$$[ 18 ] \quad k_{\theta} = k_{sat} \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\delta}$$

$$k_{\psi} = k_{sat} \quad \psi \leq \psi_a$$

$$[ 19 ] \quad k_{\psi} = k_{sat} \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\eta} \quad \psi > \psi_a$$

Dans ce modèle,  $k_{sat}$  représente la conductivité hydraulique en conditions saturées (m/s),  $k_{\theta}$  la fonction de conductivité hydraulique non saturée de  $\theta$  (m/s),  $k_{\psi}$  la fonction de conductivité hydraulique non saturée de  $\psi$  (m/s),  $\theta$  la teneur en eau volumique,  $\theta_s$  la teneur en eau volumique saturée,  $\psi$  la succion matricielle (kPa),  $\psi_a$  la pression d'entrée d'air (kPa) et  $\eta$  et  $\delta$  des constantes empiriques.

Les constantes  $\eta$  et  $\delta$  sont déterminées à partir des paramètres de la courbe caractéristique de rétention d'eau comme l'illustrent les équations suivantes où  $\lambda$  correspond à l'indice de distribution de la dimension des pores, c'est-à-dire à la pente de la CCRE en échelle logarithmique.

$$[ 20 ] \quad \theta = \theta_s \quad \psi < \psi_a \quad (\theta_r = 0)$$

$$\theta = \theta_s \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda} \quad \psi \geq \psi_a$$

$$[ 21 ] \quad \lambda = \frac{\Delta \log \theta}{\Delta \log \psi} \quad (\theta_r = 0)$$

Les constantes empiriques  $\eta$  et  $\delta$  sont fonction de  $\lambda$

$$[ 22 ] \quad \delta = \frac{2 + 3\lambda}{\lambda}$$

$$[ 23 ] \quad \eta = 2 + 3\lambda$$

Les caractéristiques hydrauliques des matériaux granulaires peuvent aussi être modélisées avec des paramètres tels que la conductivité hydraulique en conditions saturés ( $k_{sat}$ ), la

pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ), l'indice de distribution de la dimension des pores ( $\lambda$ ), ainsi que la teneur en eau volumique à saturation ( $\theta_s$ ) qui est égale à la porosité des sols  $n$ .

### 2.4.3 Modèle de porosité pour des matériaux bien gradés avec fines

On a déjà parlé de l'influence qu'a la longueur du chemin d'écoulement et la forme des pores sur la conductivité hydraulique. Ces caractéristiques qui varient par le degré de compactage, la distribution des particules, ainsi que par la teneur en fines affectent la porosité des arrangements des matériaux granulaires. C'est pourquoi l'analyse de l'écoulement dans des matériaux granulaires en conditions partiellement saturées est effectuée grâce à des modèles qui représentent ces différents facteurs.

Dans la littérature, un des modèles de porosité décrit par Côté et Konrad (2003) se base principalement sur l'influence des particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ ) sur la conductivité hydraulique. Ce modèle propose que le squelette grossier de l'arrangement de particules soit constitué par les particules de taille supérieure à  $80\mu\text{m}$ . Ainsi, les macropores de l'arrangement par lesquels l'écoulement s'effectue seront formés grâce aux espaces générés par le contact entre ces particules. L'espace total disponible pour l'écoulement d'eau sera réduit par l'addition de particules fines à l'intérieur des macropores, ce qui nuira à la conductivité hydraulique.

La dispersion de particules fines influencera aussi la conductivité hydraulique. Cette dispersion est représentée par les trois cas illustrés à la figure 10. Les deux premiers cas, 10a et 10b, montrent la dispersion non uniforme des particules fines à l'intérieur du squelette grossier. Cette dispersion est due à l'agglomération de ces particules dans des zones spécifiques et peut être le produit de la densification du matériau par compactage. Dans ce cas, la teneur en fines n'influence pas de manière marquée la conductivité hydraulique, car les macropores sont presque vides et l'eau peut s'écouler facilement. Contrairement au cas illustré par l'image 10c, laquelle montre un arrangement plus uniforme de particules fines à l'intérieur du squelette grossier, cette dispersion permet d'apprécier l'importante influence que la teneur en particules fines peut avoir sur la conductivité hydraulique. Cette influence est due au fait que la teneur en particules fines contrôle le diamètre des pores ce qui affecte de manière directe l'écoulement d'eau.

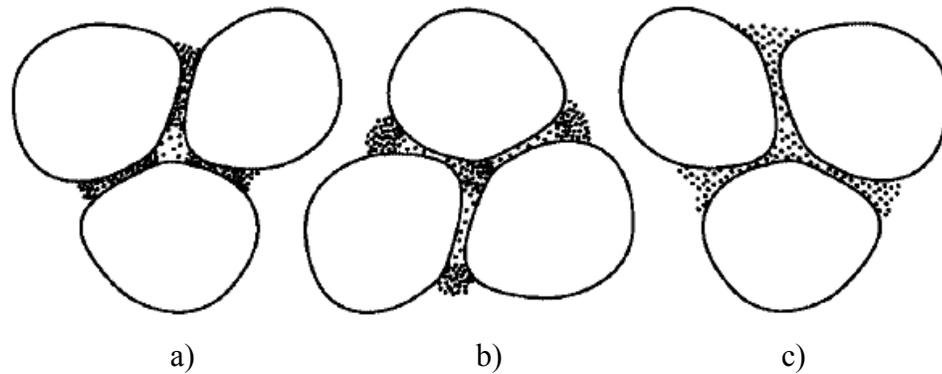


Figure 10 : Dispersion de particules fines dans les pores d'un matériau granulaire : a) et b) dispersion non uniforme; c) dispersion uniforme (Côté et Konrad, 2003)

Ce modèle est fondé sur l'effet de l'accroissement de la teneur des particules fines dans un arrangement qui a une dispersion uniforme de particules. Cet accroissement est illustré à la figure 11 où quatre cas présentent l'effet que la teneur en particules fines a sur le volume des vides ( $V_{vc}$ ) dans le squelette grossier. Le premier cas montre un arrangement de particules compacté à une densité maximale, mais sans la présence de particules fines. Ainsi, les particules grossières sont en contact direct ce qui entraîne le plus petit volume possible de vides dans le squelette grossier. Dans le deuxième cas, l'arrangement a une faible teneur en particules fines qui contribue à une augmentation du volume des vides ( $V_{vc}$ ) et affecte légèrement le degré de compactage du squelette grossier. Le troisième cas illustre la teneur en particules fines critique ( $\%F_v$ ), c'est-à-dire la quantité de particules fines qui peut être ajoutée au matériau sans causer un changement important dans le volume de vides du squelette grossier. Ce pourcentage de particules fines est la valeur minimale à ajouter au matériau. L'addition de plus de fines aboutirait à une augmentation significative du volume total du sol avec des particules grossières flottant dans la fraction fine. C'est ce qu'illustre le quatrième cas. Ces quatre cas mènent à la définition de la porosité de la fraction fine. Cette notion fait l'objet des paragraphes suivants.

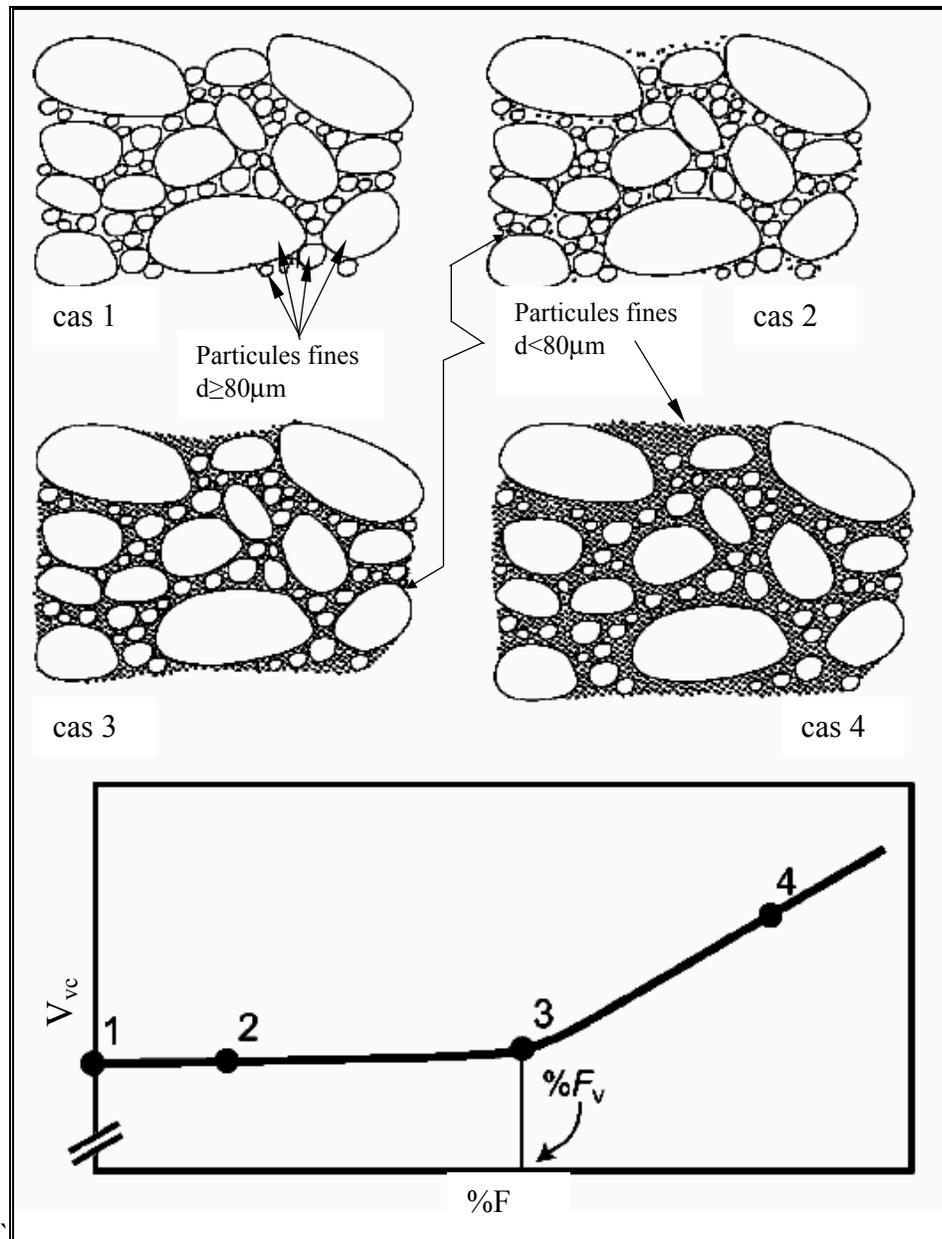


Figure 11 : Volume des vides dans un squelette grossier lié à la teneur en particules fines (modifié de Côté et Konrad, 2003)

#### 2.4.3.1 Porosité de la fraction fine

Le concept de porosité de la fraction fine est exposé par Côté et Konrad (2003) et a été établi pour des matériaux granulaires où peuvent être distinguées les particules grossières ( $d > 80 \mu\text{m}$ ) et les particules fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ ). Cette porosité ainsi que la porosité du squelette grossier sont déterminées à l'aide du diagramme de phases présenté à la figure 12.

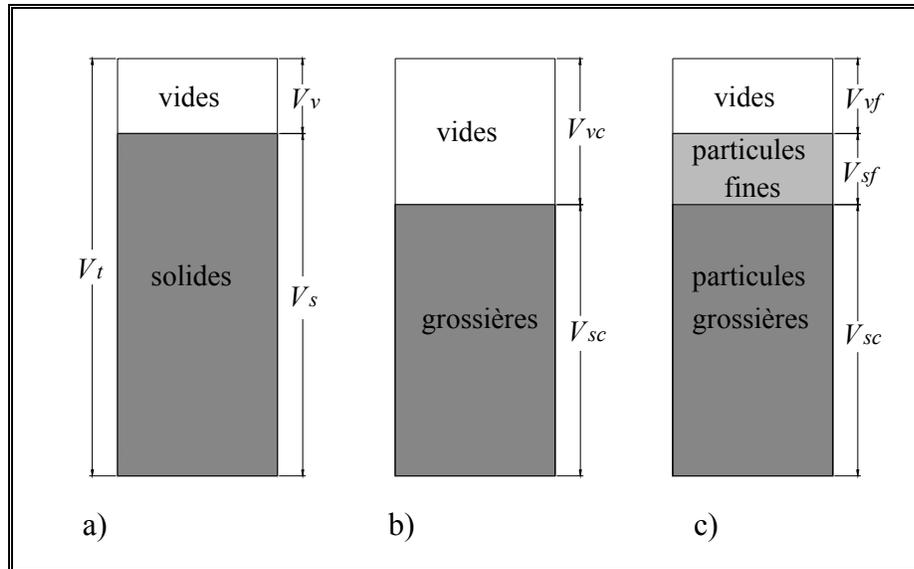


Figure 12 : Diagramme de phases pour a) sol bien gradué, b) le même sol avec particules grossières seulement et c) le même sol avec particules grossières et particules fines

Pour un sol bien gradué (image 12a), le volume de solides est  $V_s$  et le volume de vides est égal à  $V_v$ . Pour le même sol, mais sans particules fines (illustré par l'image 12b) le volume des solides ( $V_{sc}$ ) ne sera être établi que par les particules grossières. Le volume des vides correspondant à la valeur  $V_{vc}$  est l'espace disponible pour les particules fines. Cet espace est illustré par l'image 12c où le volume de particules fines est identifié par le symbole  $V_{sf}$ . Dans un arrangement des particules fines, le volume de vides  $V_{vf}$  est égal au volume total de vides  $V_v$ . La porosité du squelette grossier ( $n_c$ ) peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$[ 24 ] \quad n_c = \frac{V_{vc}}{V_t} = \frac{V_t - V_{sc}}{V_t}$$

Dans cette équation,  $V_t$  correspond au volume total occupé par le sol et  $V_{sc}$  au volume des solides du squelette grossier. Cette dernière valeur peut être calculée grâce à l'équation 26.

$$[ 25 ] \quad V_{sc} = \frac{m_s}{\rho_{sc}}(1 - F)$$

Dans l'équation 26,  $m_s$  représente la masse du sol (kg),  $F$  représente la fraction des particules fines et  $\rho_{sc}$  la densité des particules grossières (kg/m<sup>3</sup>).

L'analyse de l'image 12c a permis d'établir que la porosité de la fraction fine peut être obtenue à partir de l'équation 27.

$$[ 26 ] \quad n_f = \frac{V_{vf}}{V_{vc}} = \frac{V_t - (V_{sc} + V_{sf})}{V_t - V_{sc}}$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$[ 27 ] \quad n_f = \left( \frac{V_t - V_s}{V_t} \right) \left( \frac{V_t}{V_t - V_{sc}} \right) = \frac{n}{n_c}$$

Les valeurs les plus faibles de porosité des fines ( $n_f$ ) sont obtenues à partir des valeurs de porosité faibles et une valeur élevée de teneur en particules fines. Par contre, les valeurs les plus élevées de porosité des fines correspondent au produit des valeurs de porosité élevée et des valeurs de faible teneur en particules fines. Avec l'hypothèse que la densité des particules fines ( $\rho_{sf}$ ) est la même que celle des particules grossières ( $\rho_{sc}$ ) la porosité du squelette grossier peut être déterminée grâce à l'équation suivante :

$$[ 28 ] \quad n_f = n + (1 - n)F$$

Côte et Konrad (2003) considèrent la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) comme un paramètre important dans le contrôle de la conductivité hydraulique et de la CCRE des matériaux granulaires. Ils soutiennent cette proposition par le fait que  $n_f$  représente la distribution de la dimension des pores et de l'espace disponible pour l'écoulement de l'eau beaucoup mieux que la porosité de la masse du sol ou le pourcentage des fines. De plus, la porosité de la fraction fine est le résultat d'un rapport entre la porosité de la masse du sol et de la

porosité du squelette grossier, ce qui fait qu'elle peut être utilisée pour caractériser la tortuosité d'écoulement entre les particules grossières.

#### **2.4.4 Relations empiriques entre la conductivité hydraulique et les propriétés granulométriques des matériaux granulaires**

La plupart des relations empiriques développées pour déterminer les différents paramètres hydrauliques des matériaux sont basées sur l'hypothèse que la conductivité hydraulique d'un milieu poreux dépend des propriétés granulométriques, de la porosité et de la taille des pores des particules du matériau (Usace 1953, Vaughan et Soares 1992).

La relation entre la conductivité hydraulique ( $k$ ) et le diamètre des pores correspondant à 5% ( $D_5$ ) est l'une des relations empiriques développées pour des matériaux granulaires. Cette relation, représentée par l'équation 30, a été établie par Kenney *et al.* (1984) à partir de groupes de matériaux possédant des propriétés granulométriques similaires, c'est-à-dire la même gradation, la même forme des particules, la même porosité et, hypothétiquement, la même forme et la même distribution des pores.

$$[ 29 ] \quad k(mm^2) = C \times 10^{-3} D_5^2$$

Dans cette équation  $D_5$  est mesuré en millimètres et  $C$  est une constante comprise entre 0.5 et 1

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, sont des sables et des graviers composés de particules de forme subangulaire ayant un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) entre 1.04 et 12. Les auteurs ont démontré que la conductivité hydraulique des matériaux granulaires dépend de la taille des particules de la fraction fine et qu'elle est indépendante de la courbure de la courbe granulométrique.

D'autres relations empiriques pour déterminer les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires ont été développées par Côté et Konrad (2003). Ces relations ont été établies à l'aide de trois matériaux granulaires concassés d'origine granitique, calcaire et schisteuse.

Ces matériaux à granulométrie étalée ont présenté une variation du pourcentage de particules fines entre 3.5% et 13% et un coefficient d'uniformité de 19.2 à 62.5.

Les relations empiriques établies par Côté et Konrad (2003), représentées par les équations 31, 32 et 33, montrent que les paramètres hydrauliques – la conductivité hydraulique ( $k$ ), la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et l'indice de distribution des pores ( $\lambda$ ) - sont fonction de la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).

$$[ 30 ] \quad \log \psi_a = 3.92 - 5.19 n_f$$

Dans l'équation 31,  $\psi_a$  représente la pression d'entrée d'air et  $n_f$  la porosité de la fraction fine ( $d < 80 \mu\text{m}$ ).

$$[ 31 ] \quad \lambda = 0.385 - 0.021 n_f^{0.65} S_{s_f}$$

Dans cette équation  $\lambda$  est l'indice de distribution des pores et  $S_{s_f}$  est la surface spécifique des particules fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ ).

$$[ 32 ] \quad \log(k_{sat} S_{s_f}) = 9.94 n_f - 12.64$$

Dans l'équation 33,  $K_{sat}$  correspond à la conductivité hydraulique saturée.

Les auteurs ont aussi conclu que les particules fines influencent les caractéristiques hydrauliques des matériaux granulaires de fondations de chaussées.

#### **2.4.4 Méthodes de mesure des paramètres hydrauliques en milieu partiellement saturés.**

En raison des difficultés identifiées précédemment, plusieurs chercheurs ont essayé de déterminer les paramètres hydrauliques de matériaux en conditions partiellement saturées de manière directe. C'est ainsi que les avancées technologiques ont permis la mesure de la conductivité hydraulique ( $k$ ) et de la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) avec des méthodes plus précises.

Chossat (2005) a classifié les méthodes de mesure des paramètres hydrauliques en deux groupes. Le premier regroupe les méthodes réalisées à charge constante pour lesquelles le gradient hydraulique reste constant au cours de l'essai. Le deuxième regroupe les méthodes à charge variable pour lesquelles les conditions de teneur en eau (ou succion matricielle)

sont imposées. Cette classification est montrée au tableau 2 selon leurs caractéristiques et leurs applications aux différents types de sols.

Présentement, la plupart de ces méthodes sont à l'étude afin de connaître leurs limites en les comparant aux méthodes éprouvées. Il est important de souligner que la mesure de la conductivité hydraulique est directement liée à la méthode utilisée pour sa détermination, car la variabilité et les changements des conditions d'essai peuvent affecter de manière directe les résultats obtenus.

Le calcul de la conductivité hydraulique est alors révisé à partir des données transitoires en utilisant des solutions analytiques ou numériques et en appliquant l'équation généralisée de Darcy pour la période pendant laquelle les conditions imposées sont approximativement stables.

Méthodes	À charge constante					À charge variable				
	Longue Colonne	De l'air piégé	Des aiguilles	Par centrifugation	De la sorpivité	Du débit d'extraction	Par évaporation	Thermique		
<b>Grandeur mesurée</b>	$h, k(\theta)$	$\theta, h$	$Q, h$	$Q, \omega$	$w$	$Q, \theta$	$\theta, h$	$\theta, t^{\circ}$		
	h=charge hydraulique k=conductivité hydraulique $\theta$ = teneur en eau volumique	$\theta$ = teneur en eau volumique k=conductivité hydraulique	Q= flux volumique h=charge hydraulique	Q= flux volumique $\omega$ = vitesse de rotation en radians	w= teneur en eau massique	Q= flux volumique $\theta$ = teneur en eau volumique	$\theta$ = teneur en eau volumique k=conductivité hydraulique	$\theta$ = teneur en eau volumique $t^{\circ}$ = température		
Paramètres déterminés	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> <li>Relation <math>k(\theta)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> <li>Relation <math>k(\theta)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> <li>Relation <math>k(\theta)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> <li>Relation <math>k(\theta)</math></li> <li>Relation <math>k(h)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductivité hydraulique (<math>k</math>)</li> </ul>			
Simplicité	Simple	Simple	Complexe	Complexe	Simple	De simple à complexe	Simple	Simple		
Temps de mesure et budget	Très long, peu onéreux	Suivant les sols, de rapide à très long	Temps long, matériel important	Temps court, matériel onéreux	Mesure rapide, matériel complexe	Court, matériel simple, essai peu onéreux	Temps court à long, peu onéreux	Temps long, matériel peu onéreux		
Nature des sols	Sables fins à grossiers	Sables, de fin à grossier	Sols fins	Très argileux	Tout type de sol	Tout type de sol	Tout type de sol	Sols grossiers à fins secs		
Sols perturbés	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		
Sols non perturbés	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui		
Équation de base	Corey (1985)	Watson (1967b)	Dirksen (1991)	Nimmo <i>et al.</i> (1987)	Talsma (1969) Dirksen (1979)	Doering (1965) Passioura (1976) Valiantzas (1988)	Wind (1966) Arya <i>et al.</i> (1975)	Globus <i>et al.</i> (1995)		

Tableau 2. Méthodes de mesure de la conductivité hydraulique non saturée en laboratoire (modifié de Chossat, 2005)

### **2.4.3.1 Méthodes à charge constante**

La méthode utilisée dans le cadre de cette étude pour déterminer la conductivité hydraulique des matériaux reconstitués est décrite dans le chapitre quatre : *description des essais*. Cette méthode à charge constante est semblable dans sa procédure à la méthode de la longue colonne, laquelle est décrite ci-après. Il est important de souligner qu'il est nécessaire d'utiliser des échantillons d'un diamètre supérieur à ceux utilisés pour des sols fins pour déterminer la conductivité hydraulique de matériaux granulaires.

#### *Méthode de la longue colonne*

La méthode de la longue colonne est basée sur les démonstrations théoriques de Childs et Collis (1950) qui montrent que la teneur en eau dans une colonne de sol de longueur importante est uniforme sur sa plus grande partie quand un flux hydrique progresse en descendant vers une nappe.

Cette méthode, aussi appelée « méthode du flux permanent contrôlé », consiste à immerger la base d'une colonne de sol dans une lame d'eau en maintenant un débit constant qui doit être moins élevé que celui nécessaire pour arriver à la saturation. Les mesures du débit et de la teneur en eau sont prises lorsque le régime permanent est atteint. Ces mesures sont faites à différents débits afin de déterminer la conductivité hydraulique.

Les principaux inconvénients de cette méthode sont que le délai pour atteindre le régime permanent est très long et que la variation de la température dans la salle peut affecter la pression dans la bouteille de Mariotte ce qui peut faire perdre le contrôle de la pression imposée dans le tube capillaire (Klute et Dirksen 1986).

### **2.4.3.2 Méthodes à charge variable**

Les méthodes à charge variable permettent de déterminer la CCRE en imposant la succion matricielle à l'échantillon de sol. La méthode utilisant le débit d'extraction est celle qui se compare le mieux à la méthode utilisée dans cette étude pour déterminer la CCRE des matériaux reconstitués (la détermination de la CCRE est décrite au chapitre quatre :

*description des essais*). Cette méthode, qui peut être utilisée dans tous les types de sol, est décrite dans les paragraphes suivants.

#### *Méthode utilisant le débit d'extraction*

Cette méthode permet de déterminer la conductivité hydraulique à partir de la mesure du débit d'extraction. Celui-ci est mesuré lorsque le potentiel matriciel varie durant une période fixe, laquelle peut être plus ou moins longue.

Des valeurs de conductivité hydraulique sont obtenues dans un éventail de valeurs de teneur en eau. Ces valeurs de teneur en eau correspondent à des teneurs en eau volumiques de la courbe caractéristique de rétention d'eau. La détermination de la conductivité hydraulique commence à des teneurs en eau élevées jusqu'à de faibles teneurs en eau. La procédure utilisée par ces méthodes varie selon l'intervalle de mesure qui peut être long ou court. Ces méthodes sont les suivantes :

- *One –step outflow method*

Cette méthode, proposée par Garder (1962), est basée sur l'hypothèse que la variation de la teneur en eau dans une colonne de sol est uniforme et constante dans un intervalle de temps considéré. Cette hypothèse permet de donner une solution à l'équation de diffusion plus simple.

La méthode consiste à placer une colonne de sol dans une cellule de pression avec une pierre poreuse saturée à sa base et à appliquer une variation du potentiel matriciel à une extrémité de la colonne de sol tout en contrôlant le débit d'extraction durant cette variation (Gardner, 1962). Les données de débit sont ensuite analysées pour obtenir la fonction de diffusion pour une large gamme de valeurs de teneur en eau.

Cette méthode nécessite de courtes durées de mesure en laboratoire. D'après Van Dam *et al.* (1992, 1994), l'inconvénient le plus important de l'essai est la variation rapide de la condition limite imposée, ce qui n'est pas observé en conditions naturelles et peut éventuellement mener au déséquilibre de l'échantillon. De plus, il est nécessaire d'acquérir indépendamment des données de la courbe caractéristique de rétention d'eau (Chossat, 2005).

- *Multi-step outflow method*

La méthode, mise au point par Gardner (1956), est une méthode rapide, basée sur l'hypothèse que la teneur en eau volumique dans l'échantillon ne varie significativement qu'aux environs de l'interface « sol-plaque de céramique ». Cette méthode consiste à dessécher un échantillon successivement en mesurant les variations de débit et de potentiel matriciel. Ainsi, elle permet de calculer la conductivité hydraulique à partir de la diffusivité et de déterminer la courbe caractéristique de rétention d'eau à partir de valeurs de pression matricielle et de teneurs en eau pris dans chacune des périodes.

### 3. DESCRIPTION DES MATÉRIAUX

Les matériaux granulaires qui ont servi de support à cette étude sont des matériaux de fondations routières à granulométrie reconstituées. Ces derniers ont été produits à partir d'un matériau concassé d'origine granitique MG-20 provenant de la carrière PEB. Comme le montre la figure 13, cette carrière est située au nord de la ville de Québec, dans la municipalité de Lac-Saint-Charles. On y produit des matériaux granulaires concassés pour les fondations routières ainsi que des granulats utilisés pour l'élaboration des enrobés bitumineux et du béton ciment.

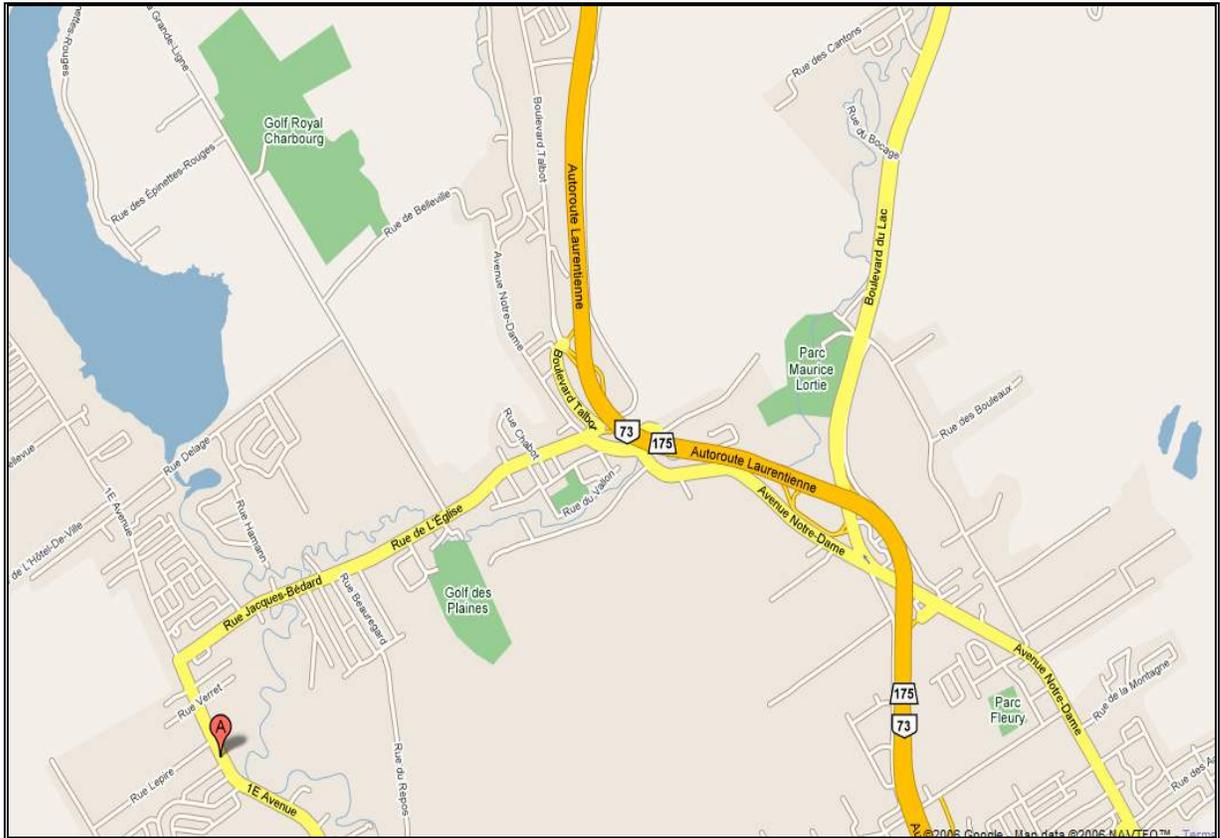


Figure 13. Localisation du site de prélèvement du matériau MG-20. Entreprise P.E.B. Ltée., dans la municipalité de Lac-Saint-Charles au nord de la ville de Québec *Source* : google maps septembre 2006)

### **3.1 Échantillonnage et classification du matériau granitique**

La méthode d'échantillonnage utilisée a consisté à faire un prélèvement du matériau MG-20 à l'aide d'une pelle mécanique. Le matériau prélevé a ensuite été bien mélangé afin d'éliminer le phénomène de ségrégation des particules les plus fines. La quantité de matériau à échantillonner - environ 300 kg - a été déterminée en tenant compte du nombre total d'essais à réaliser et en considérant que les matériaux pouvaient être utilisés plusieurs fois dans la cadre de l'étude. Le matériau prélevé a été mis dans des sacs de 25 kg de manière à ce que tous les échantillons aient la même constitution. Chaque sac d'échantillon a ensuite été dûment séché à une température de 100 °C avec une variation de  $\pm 10$  degrés.

Avant de reconstituer les matériaux à étudier, la granulométrie naturelle du matériau granitique a été déterminée et un essai de sédimentation a été exécuté pour déterminer la granulométrie de la fraction fine ( $d < 80 \mu\text{m}$ ). Cette granulométrie, dont les résultats sont présentés à l'annexe A, a été réalisée en suivant la procédure BNQ 2501-025 du Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ 1987). Elle a montré que le matériau est constitué de 57 % de granulats grossiers, de 39 % de sable et de 4% de particules fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ ). Elle indique également que l'échantillon présente une valeur du coefficient de courbure ( $C_c$ ) de 0.4 et un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) de 65. À partir de la distribution de la taille des grains, le matériau a été classifié comme un gravier uniforme (GP) selon la classification unifiée des sols (USCS).

Par la suite, le matériau a été lavé et séparé aux tamis standards, soit : 20 mm, 14 mm, 10 mm, 5 mm, 2.5 mm, 1.25 mm, 0.630 mm, 0.315 mm, 0.160 mm et 0.080 mm. Ces procédures ont été réalisées afin de reconstituer les granulométries d'une manière plus précise et de contrôler la quantité des fines présente dans les échantillons à analyser.

### **3.2 Granulométries reconstituées**

Les granulométries reconstituées ont été établies sur la base du fuseau granulométrique recommandé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour des matériaux de fondations routières MG-20, voir fig. 14. Ces granulométries ont été déterminées à partir

des caractéristiques physiques de la courbe granulométrique du haut du fuseau MG-20, appelée dans cette étude G2B. Cette courbe granulométrique se caractérise par un pourcentage de fines de 7% et un coefficient d'uniformité d'environ 47. Par la suite, ces matériaux ont été divisés en deux groupes caractérisés, d'une part, par la variation du coefficient d'uniformité et, d'autre part, par la variation du pourcentage des fines. Les variations ont été réalisées afin d'analyser l'effet sur les propriétés hydrauliques des matériaux. Le premier groupe, pour lequel le coefficient d'uniformité varie et le pourcentage des particules fines reste constant, regroupe quatre granulométries qui se caractérisent par une teneur en particules fines de 7% et par un coefficient d'uniformité qui varie entre 88 et 7.5. Ces granulométries, distribuées en fonction de la granulométrie G2B présentées à la figure 14, ont été nommées respectivement G1, G3, G4 et G5.

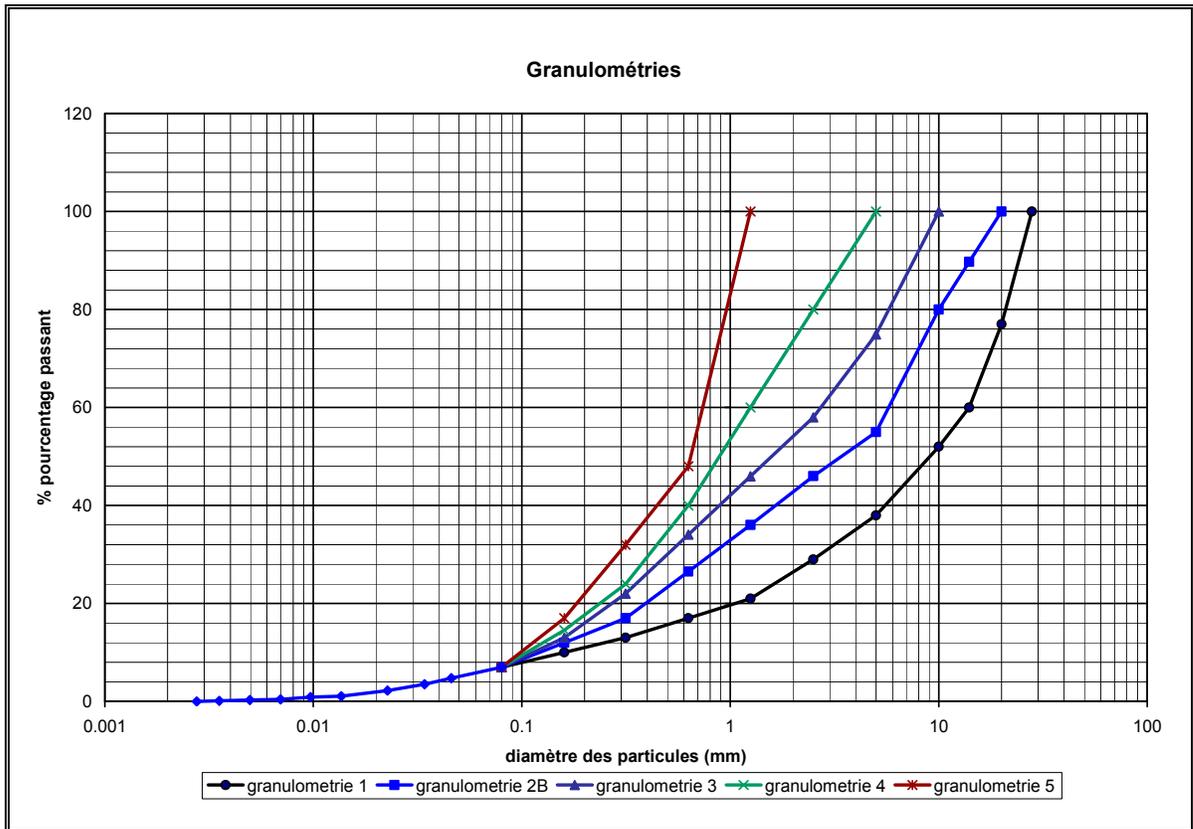


Figure 14. Courbes granulométriques des matériaux reconstitués avec un pourcentage des fines constant égal à 7% et un coefficient d'uniformité variant entre 88 et 7.5

Le deuxième groupe comprend quatre granulométries qui se caractérisent par un pourcentage variable de particules fines et par un coefficient constant d'uniformité des matériaux. Ces granulométries, nommées GA, GC, GD et GE, présentent un coefficient d'uniformité de 47 et un pourcentage des particules fines qui varie entre 2% et 35%. Ces granulométries ont été étalées en fonction de la granulométrie G2B. Leur distribution est présentée à la figure 15.

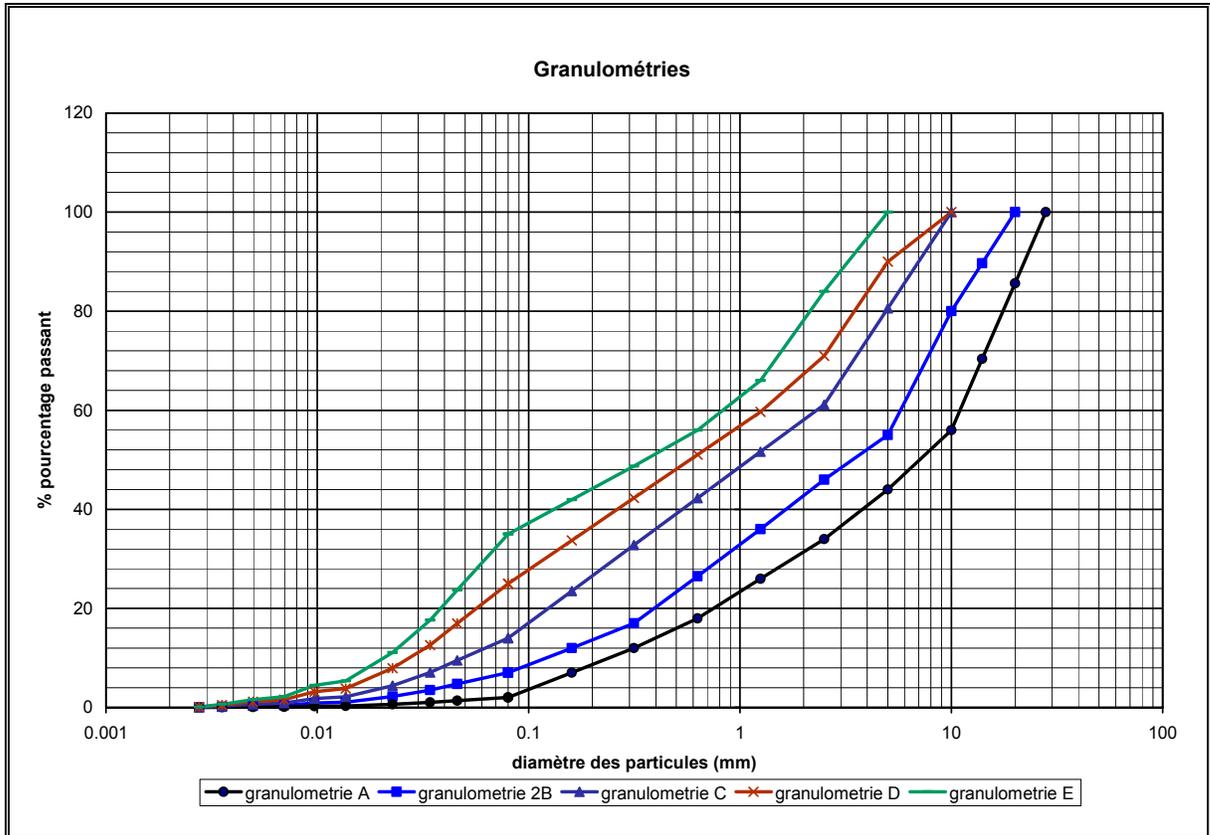


Figure 15. Courbes granulométriques des matériaux reconstitués avec un coefficient d'uniformité constant égal à 47 et un pourcentage variable de fines situé entre 2% et 35%

Les caractéristiques des matériaux reconstitués qui ont servi à la réalisation de cette étude et dont il a été question précédemment sont présentées au tableau 3. Ce tableau montre la grande étendue des valeurs de la teneur en particules fines et du coefficient d'uniformité des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude.

Tableau 3 : Caractéristiques granulométriques des matériaux

Matériau	Cu	Cc	% granulats fin	% granulats grossier	% particules fines
G2B	47.37	0.945	38	62	7
G1	88.19	3.3	55	45	7
G3	23.99	0.8	75	25	7
G4	11.88	1.3	100	0	7
G5	7.49	1.1	100	0	7
GA	45.71	1.2	44	56	2
GC	47	0.6	81	19	14
GD	46.74	0.41	90	10	25
GE	40.18	0.2	100	0	35

### 3.3 Caractérisation des matériaux

La caractérisation des matériaux a d'abord consisté à déterminer le pourcentage de la fraction grossière, c'est-à-dire les particules de grosseur supérieure à 5 mm, et de la fraction fine, c'est-à-dire les particules dont la taille est inférieure à 5mm. Par la suite, les densités spécifiques ( $G_s$ ) de la fraction grossière et de la fraction fine du matériau ont été déterminées. La densité de la fraction grossière a été déterminée en utilisant la norme BNQ 2560-067-M-83 du Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ 1983) alors que la mesure de la densité spécifique de la fraction fine a été effectuée à l'aide du pycnomètre en respectant la norme d'essai BNQ 2560-065-M-89 du Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ 1989). La valeur d'absorption de chaque matériau a été calculée grâce aux différentes masses obtenues lors des essais de densité.

Par la suite, la valeur de surface spécifique des fines a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre afin de voir l'influence qu'a la surface spécifique sur la tortuosité de l'écoulement d'eau. La méthode utilisée est décrite au chapitre 3. Les valeurs de surface spécifique obtenues de même que les autres résultats de la caractérisation physique pour chacun des matériaux sont présentés au tableau 4.

Tableau 4 : Synthèse des propriétés physiques des matériaux reconstitués

		Caractéristiques physiques		
		G <sub>s</sub>	Absorption	Surface spécifique de la fraction fine (m <sup>2</sup> /g)
<b>Granulométrie</b>	<b>G1</b>	2.68	0.41	1.85
	<b>G2B</b>	2.68	0.33	1.85
	<b>G3</b>	2.68	0.23	1.85
	<b>G4</b>	2.67	0.10	1.85
	<b>G5</b>	2.67	0.10	1.85
	<b>GA</b>	2.68	0.38	1.85
	<b>GC</b>	2.67	0.20	1.85
	<b>GD</b>	2.67	0.15	1.85
	<b>GE</b>	2.67	0.10	1.85

À ces valeurs s'ajoutent des valeurs de caractérisations obtenues à partir d'études réalisées précédemment. Les caractéristiques identifiées par Grenier (2006) sont regroupées dans le tableau 5. Ce tableau indique la texture, la forme et la résistance à l'usure que présente le matériau granitique de la carrière PEB. Ces valeurs permettent de classer les granulats selon le cahier de normes du MTQ établi pour évaluer la rigidité et la durabilité des matériaux granulaires utilisés pour la conception des chaussées.

Selon cette classification, basée sur les caractéristiques intrinsèques et de fabrication des matériaux, il a été possible de classer le matériau granitique dans la classe 1A. Cette classe se caractérise par une limite supérieure des caractéristiques intrinsèques de 15% de perte de particules et de 35% pour l'essai Los Angeles, et par des caractéristiques de fabrication dont la valeur est inférieure ou égale à 25% de particules plates et à 40% de particules allongées. Par conséquent, le matériau possède une excellente résistance mécanique et démontre une faible teneur en particules plates et allongées ce qui indique que la résistance et la rigidité de la chaussée ne seront pas affectées de manière importante par les caractéristiques de fabrication du matériau.

Tableau 5 : Synthèse des propriétés physiques de base des matériaux granulaires MG-20 de la carrière PEB (Grenier 2006).

Propriété physique	Matériau granulaire MG-20
Classification unifiée	GP-GM
% passant 80 $\mu\text{m}$	5.5 %
Valeur au bleu et surface spécifique des fines	0.11 et 2.31 $\text{m}^2/\text{g}$
Masse volumique du sol sec $\rho_{d \text{ opt.}}$	2 212 $\text{kg}/\text{m}^3$
$W_{d \text{ opt}}$	4.7 %
Densité brute des grains (>5 mm)	2.639
Densité brute des grains (<5 mm, non lavée)	2.663
Micro Deval (Grade B)	13 %
Los Angeles (Grade B)	46%
% particules plates	14 %
% particules allongées	33 %
% de particules fracturées	78 %
Coefficient d'écoulement	80
Nombre pétrographique	104
% de matière organique (par oxydation)	0.3 %

Notons que la dureté du matériau est une caractéristique qui, selon Dore (2004), est une propriété importante pour assurer le maintien de l'intégrité des caractéristiques des granulats soumis aux activités de construction, à l'attrition causée par le passage des véhicules lourds et à l'usure causée par l'action des pneus en surface.

### 3.3.1 Proctor modifié

L'étape suivante a consisté à déterminer les courbes de compactage des matériaux reconstitués. Ces courbes ont été déterminées à l'aide de l'essai Proctor modifié, qui est décrit dans la norme CAN/BNQ 2501-255-M-86 du Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ 1986).

La courbe de compactage montre la relation entre la masse volumique et la teneur en eau d'un matériau donné. L'intérêt particulier de cette courbe réside, d'une part, dans le fait que chaque matériau a sa propre courbe pour une énergie de compactage donnée et, d'autre part, dans son sommet qui permet d'établir la teneur en eau à laquelle est atteinte la masse

volumique maximale sèche. Cette masse volumique est calculée grâce à l'équation 34, où  $w$  est la teneur en eau massique,  $\rho_h = \left(\frac{m_h}{V}\right)$  la masse volumique humide,  $m_h$  la masse du sol humide et  $V$  le volume du moule. Notons que la teneur en eau massique établit la relation entre la masse d'eau présente dans l'échantillon et la masse du matériau sec.

$$[ 33 ] \quad \rho_d = \left(\frac{\rho_h}{w + 100}\right) \times 100$$

La courbe de compactage est obtenue à partir de la détermination de la masse volumique maximale des échantillons à des teneurs en eau différentes. Ces essais ont été faits à l'aide de l'essai Proctor modifié en utilisant la méthode C ou D de la norme CAN/BNQ 2501-255-M-86. L'essai consiste à compacter un échantillon de matériau passant au tamis 20mm et ayant une teneur en eau donnée dans un moule cylindrique de 152.4 mm de diamètre et de 116.4 mm de hauteur (voir fig. 16). Le compactage est fait en cinq couches uniformes avec une énergie de compactage dynamique créée par l'impact d'un marteau métallique de 4.5 kg que l'on fait tomber en chute libre d'une hauteur de 457 mm 56 fois par couche.

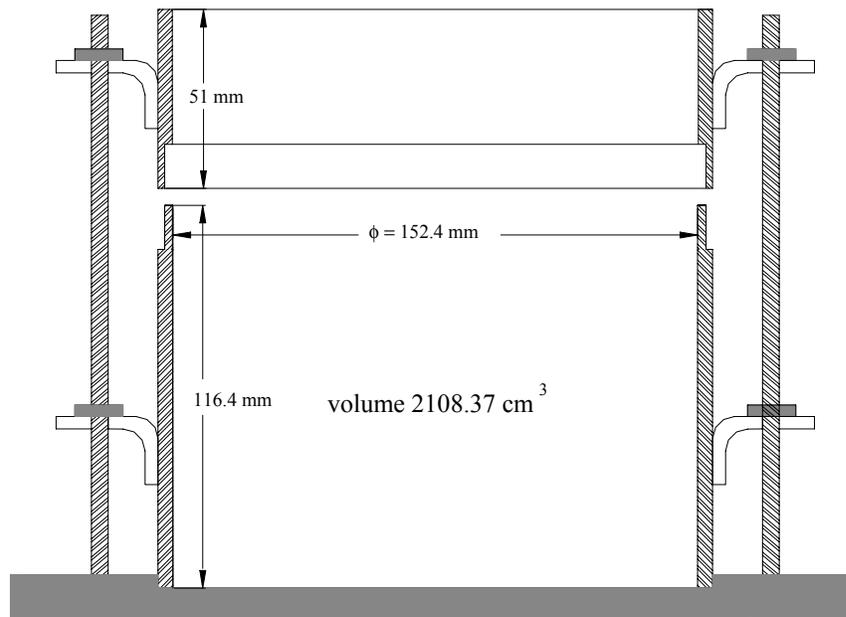
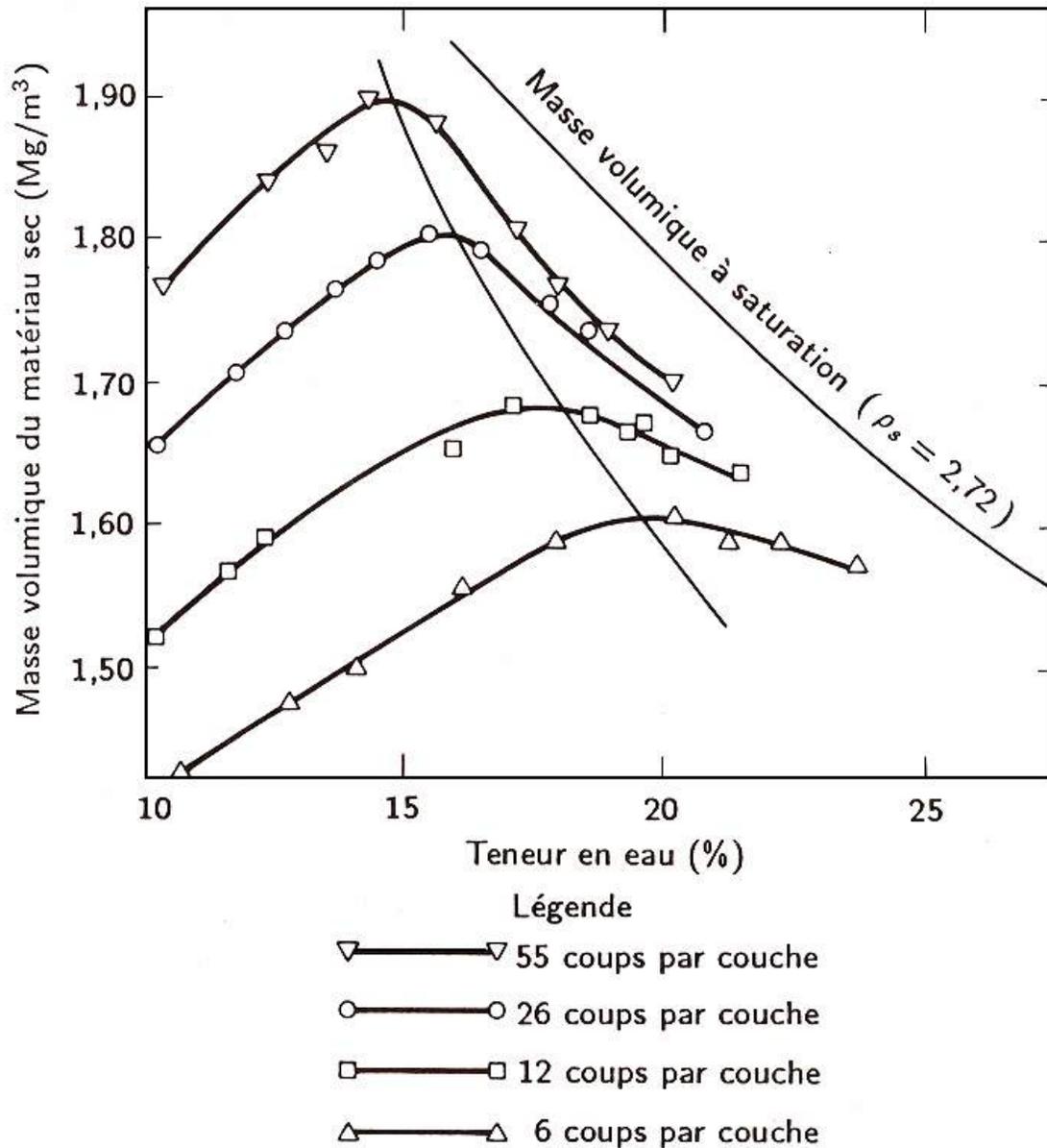


Figure 16. Moule Proctor

L'énergie de compactage (E) est une mesure de l'énergie mécanique appliquée à la masse du matériau. Pour l'essai Proctor, cette énergie est égale à 2679.2 kJ/m<sup>3</sup> et est calculée à l'aide de l'équation 35. Cette équation prend en considération la masse du marteau, la hauteur de chute, le nombre de couches et le nombre de coups par couche.

$$[ 34 ] \quad E = \frac{(4.5kg) * (9.81m/s^2) * (0.457m) * (5couches) * (56coups / couche)}{2108.37 \times 10^{-3} m^3}$$

Proctor a démontré que le compactage est fonction de quatre variables : la masse volumique du sol sec, sa teneur en eau, l'énergie de compactage et le type de sol. Selon Holtz et Kovacs (1991), pour un même type de sol, l'augmentation de l'énergie de compactage se traduit, d'une part, par une augmentation de la masse volumique maximale du sol sec et, d'autre part, par une baisse de la teneur en eau optimale. Ce phénomène est illustré par la figure 17, où l'on remarque que le tracé de la ligne d'optimum, c'est-à-dire la ligne qui relie les valeurs optimales obtenues pour un même matériau avec différentes énergies de compactage, suit une courbe de saturation apparemment constante.



Note : marteau de 4,5 kg; chute de 457 mm (essai Proctor modifié).

Figure 17. Courbe de compactage d'échantillons compactés en laboratoire suivant l'essai Proctor modifié à différentes énergies de compactage. (Holtz et Kovacs 1991)

Les courbes de compactage de ces matériaux ont été partagées en deux groupes. Dans le premier groupe, illustré par la figure 18, se trouvent les matériaux reconstitués qui présentent un pourcentage de fines égal à 7% et une variation du coefficient d'uniformité. Le deuxième groupe, montré à la figure 19, présente la courbe de compactage des

matériaux qui possèdent un pourcentage de fines différent de 7% et un coefficient d'uniformité d'environ 47.

Il est généralement admis que la masse volumique maximale d'un matériau est fortement influencée par la granulométrie du matériau. Cette influence peut être observée dans les courbes présentées à la figure 18, où l'on observe que la valeur de masse volumique croît avec le coefficient d'uniformité du matériau. De la même manière, on peut constater que la masse volumique optimale de ces matériaux s'accroît à mesure que la teneur en eau optimale descend. Ainsi, la valeur la plus élevée de  $\rho_{\max}$  est obtenue avec un coefficient d'uniformité de 88 à une teneur en eau optimale de 5.2%.

Sur la figure 18, on peut remarquer que les points expérimentaux obtenus pour la détermination de la courbe de compactage, pour certains des matériaux reconstitués, sont situés du côté sec de la courbe Proctor. Le phénomène est observable sur la figure 20 et s'explique par le fait que pour les échantillons compactés à haute teneur en eau, il y a l'expulsion d'eau excédentaire à la valeur optimale. Il en résulte qu'un point qui serait à une teneur en eau telle que l'étoile avant compactage se trouve, après compactage, à une teneur en eau plus faible et proche de l'optimum. L'analyse de la figure 18 permet aussi de constater que la valeur de teneur en eau ajoutée au matériau affecte de manière plus importante la valeur de masse volumique lorsque le coefficient d'uniformité augmente; cela est reflété par la forme moins allongée des courbes de compactage.

La figure 19 permet d'observer l'effet de l'accroissement du pourcentage de particules fines sur la masse volumique des matériaux possédant un coefficient d'uniformité d'environ 47. Il est déjà admis que la densité maximale des matériaux granulaires est obtenue lorsque les pores sont remplis de particules fines. Le pourcentage adéquat de particules fines pour remplir les pores permet le contact direct entre les particules grossières sans occasionner des changements importants dans le volume de vides du squelette grossier. L'addition de plus de fines entraînera la perte des contacts entre les particules grossières, ce qui se traduit par une diminution de la masse volumique maximale du matériau. L'effet de l'excès de particules fines sur la masse volumique est constaté dans le cas des matériaux GD,

présentant une porosité  $n=0.195$ , et GE, présentant une porosité  $n=0.202$ , où la masse volumique maximale obtenue diminue avec l'accroissement du pourcentage des fines.

La figure 19 montre l'effet des particules fines et du coefficient d'uniformité sur la masse volumique maximale des matériaux MG-20. Quand on compare le matériau G2B, présentant une porosité  $n= 0.172$  et un  $C_u=47$ , avec le matériau GA, possédant la même porosité et un  $C_u=45.7$ , on peut constater qu'ils présentent la même masse volumique maximale malgré le fait qu'ils possèdent un pourcentage de particules fines différent ( $\%F=7\%$  et  $\%F=2\%$  respectivement). Cependant, la valeur de masse volumique maximale du matériau G2B a été obtenue avec une teneur en eau plus faible, ce qui montre l'effet de l'accroissement du coefficient d'uniformité sur la masse volumique des matériaux. D'autre part, on peut remarquer que la différence du pourcentage des particules fines n'affecte pas de manière significative le résultat de masse volumique.

Les caractéristiques des matériaux reconstitués obtenues à partir de l'essai Proctor sont regroupées dans le tableau 6. Pour la masse volumique maximale ( $\rho_{d \max}$ ) les valeurs varient entre  $2.2\text{g/cm}^3$  et  $1.89\text{g/cm}^3$ . Le matériau G1 donne la valeur la plus élevée, avec une teneur en eau optimale ( $w_{\text{opt}}$ ) égale à  $5.12\%$ . Le matériau G5 présente la valeur la plus faible de masse volumique avec une teneur en eau optimale de  $10\%$ . À partir de ces valeurs et en utilisant les valeurs de densité apparente du matériau ( $\rho_s$ ) la porosité ( $n$ ) et le degré de saturation ( $S_r$ ) sont calculés pour les conditions optimales de compactage. De la même manière, la teneur en eau volumique à l'optimum a été calculée. Finalement, il est possible de conclure que les matériaux reconstitués après le compactage peuvent avoir idéalement une porosité entre  $0.146$  et  $0.292$  et un degré de saturation maximale entre  $56.9\%$  et  $81.8\%$ , ce qui confirme que les matériaux compactés sont en condition de saturation partielle.

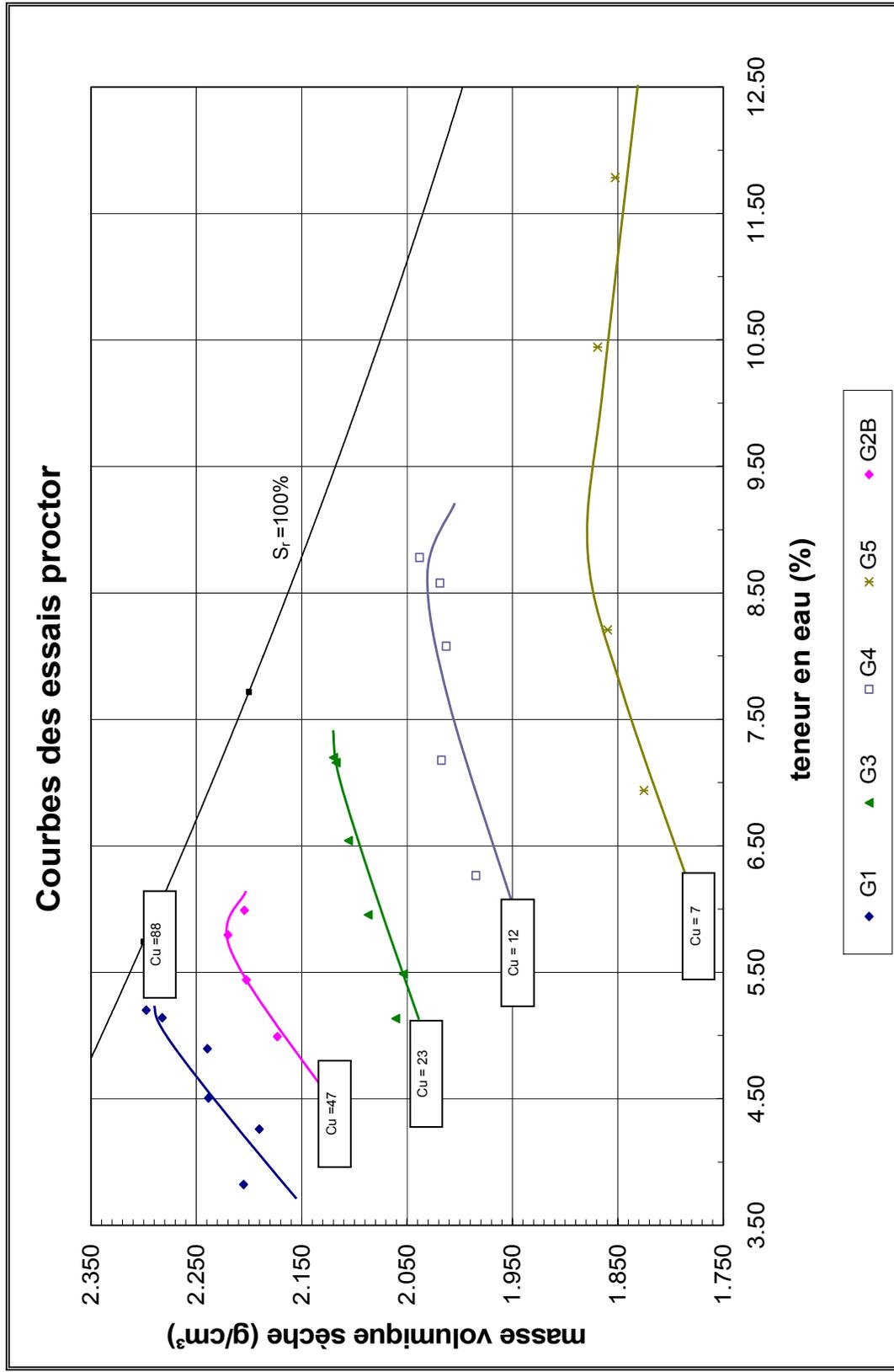


Figure 18. Courbes de compactage des matériaux reconstitués avec un pourcentage de particules fines constant égal à 7% et avec une variation du coefficient d'uniformité

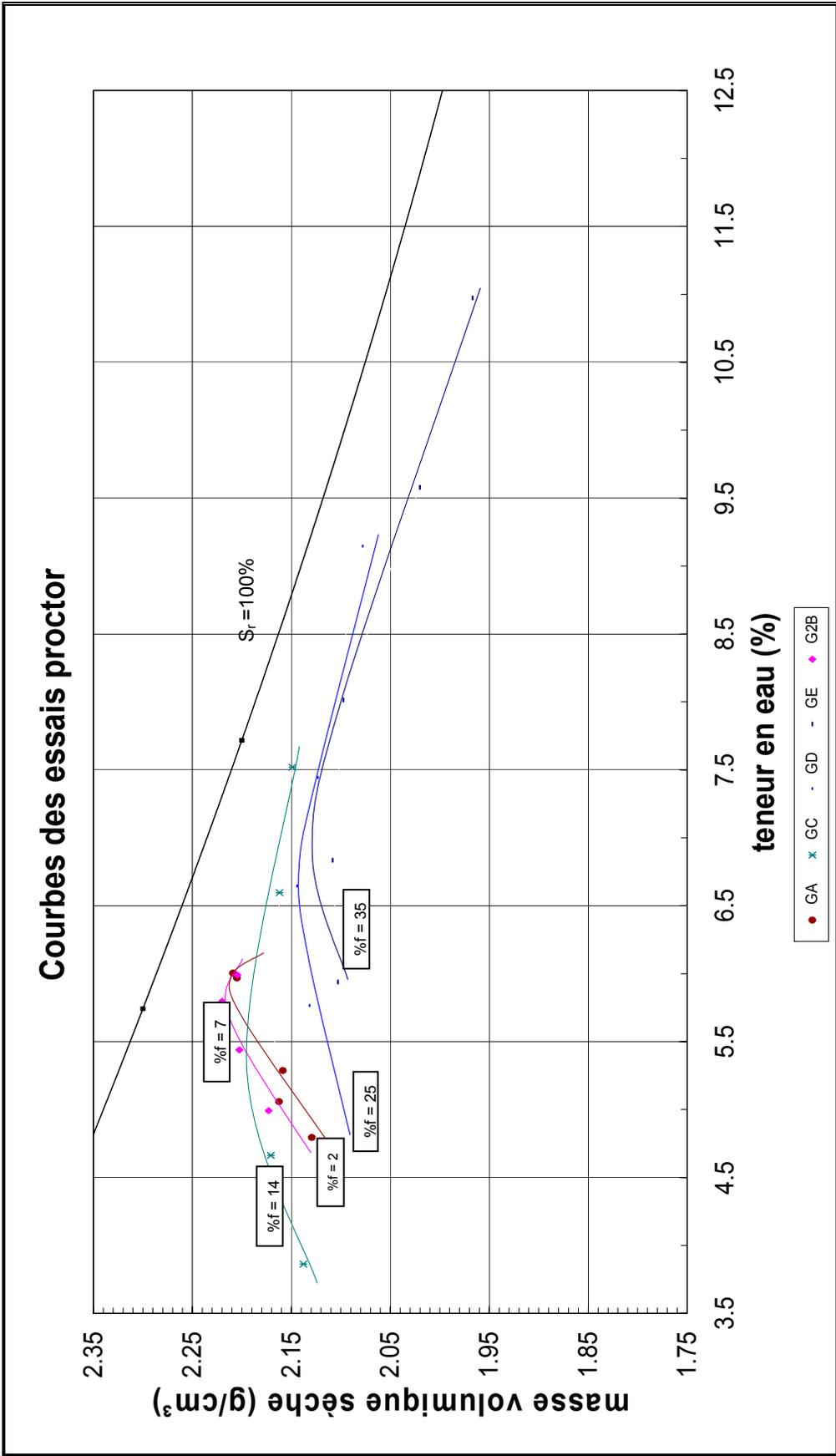


Figure 19. Courbes de compactage des matériaux reconstitués avec un coefficient d'uniformité constant égal à 47% et avec une variation du pourcentage des particules fines

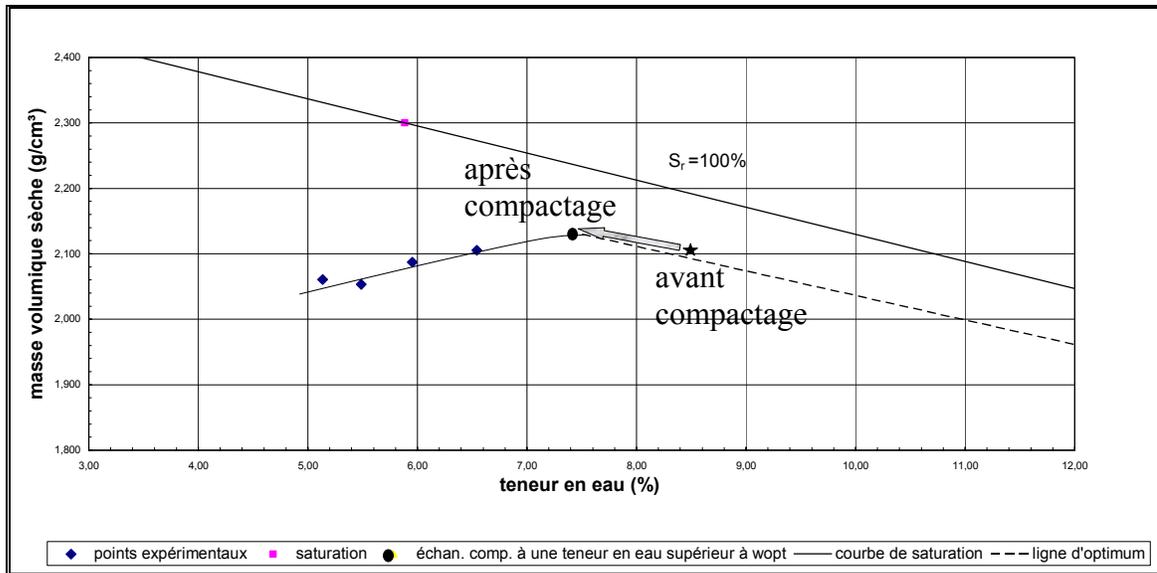


Figure 20. Détermination de la courbe de compactage sur des échantillons des matériaux présentant un coefficient d'uniformité élevé, entre 12 et 88

Tableau 6. Synthèse des caractéristiques de compactage des matériaux reconstituées.

Granulométrie	%F	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ max (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	$n$	$\theta_{opt}$	$S_{ropt}$
G2B	7	2.68	2.22	5.8	0.172	0.129	0.750
G1	7	2.68	2.29	5.2	0.146	0.119	0.818
G3	7	2.68	2.13	7.5	0.205	0.160	0.778
G4	7	2.67	2.031	8.4	0.239	0.171	0.713
G5	7	2.67	1.89	8.8	0.292	0.166	0.569
GA	2	2.68	2.22	5.9	0.172	0.131	0.763
GC	14	2.67	2.175	5.8	0.185	0.126	0.680
GD	25	2.67	2.15	7	0.195	0.151	0.773
GE	35	2.67	2.13	7	0.202	0.149	0.737

## 4. DESCRIPTION DES ESSAIS

Un programme d'essais a été développé afin de caractériser physiquement chacun des matériaux étudiés et de déterminer leurs paramètres hydrauliques en conditions partiellement saturées.

D'abord, une caractérisation physique a été faite. Celle-ci a consisté à déterminer la densité spécifique et l'adsorption des matériaux en utilisant la norme CAN/BNQ 2560-065 du Bureau de normalisation du Québec (CAN/BNQ 1989). Par la suite, la surface spécifique a été déterminée à l'aide du spectrophotomètre. Cette méthode n'est pas encore normalisée, mais donne des valeurs fiables parce qu'elle élimine les risques d'erreur humaine qu'entraînent l'interprétation de l'apparition de l'auréole sur le papier filtre. Cette dernière méthode donne quelques problèmes de précision sur la valeur obtenue. La méthode utilisée ici a recours aux mêmes instruments que la méthode du papier, mais implique en plus l'usage d'un spectrophotomètre (Gilbert, 2004). Par la suite, la masse volumique maximale a été établie selon l'essai Proctor modifié.

Postérieurement à la caractérisation physique, les paramètres hydrauliques, la conductivité hydraulique et la courbe caractéristique de rétention d'eau des matériaux étudiés ont été mesurés en conditions partiellement saturées. Le manque d'appareillage fait en sorte que seulement quelques méthodes permettent de déterminer les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires. Il est important de souligner que pour ces déterminations, il est nécessaire d'utiliser des échantillons d'un diamètre supérieur à ceux utilisés dans des sols fins. Cette particularité a mené à choisir de mesurer la conductivité hydraulique avec un moule Proctor de 152.4 mm de diamètre et à déterminer la courbe de rétention d'eau à l'aide d'une plaque de pression. De ces méthodes, celles qui s'accordaient le mieux avec les conditions de notre étude ont été retenues.

Finalement, l'analyse des résultats expérimentaux, des propriétés physiques et des paramètres hydrauliques, a permis le développement de relations empiriques en fonction des propriétés de la structure.

#### 4.1 Détermination de la conductivité hydraulique à charge constante

Après la caractérisation des matériaux, la conductivité hydraulique ( $k$ ) de chaque matériau en conditions près de la saturation a été déterminée à l'aide du perméamètre Proctor à charge constante. Cette mesure a été faite en utilisant la procédure d'essai LC-22-322 (ministère des Transports 1997a) en vigueur à la Direction de laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec. Cette procédure est utilisée pour la mesure du coefficient de perméabilité des matériaux granulaires et des sols graveleux ou sableux.

« L'essai est en principe limité aux sols contenant moins de 10% de particules fines de façon à ce que la saturation se fasse dans un temps raisonnable, et que l'influence de la consolidation de l'échantillon soit limitée en cours d'essai » (ministère des Transports 1997a). Cependant, pour les besoins de l'étude, cette méthode a été appliquée sur des échantillons dont le pourcentage des fines variait entre 2% et 25% et dont les valeurs de saturation approchaient 100%.

L'essai consiste à placer un échantillon de matériau granulaire préalablement mélangé en ajoutant une quantité d'eau équivalente à la teneur en eau optimale, plus ou moins 0.25%, dans un moule cylindrique et à le compacter avec la même énergie de compactage Proctor, c'est-à-dire 5 couches d'épaisseur uniforme et 56 coups par couche. Suite au compactage, l'échantillon est soumis à une charge hydraulique constante.

Après la densification du matériau, le moule est placé sur une base métallique où ont été préalablement installés une pierre poreuse de grande perméabilité et un papier filtre saturés. Par la suite, un autre filtre et une seconde pierre poreuse saturés sont posés par dessus l'échantillon qui est confiné grâce à un ressort installé sur la pierre poreuse au dessous de l'échantillon. Ce système est fermé hermétiquement et est connecté à un tube de Mariotte qui permet d'assurer une charge hydraulique constante. Le montage de ce système est illustré à la figure 21.

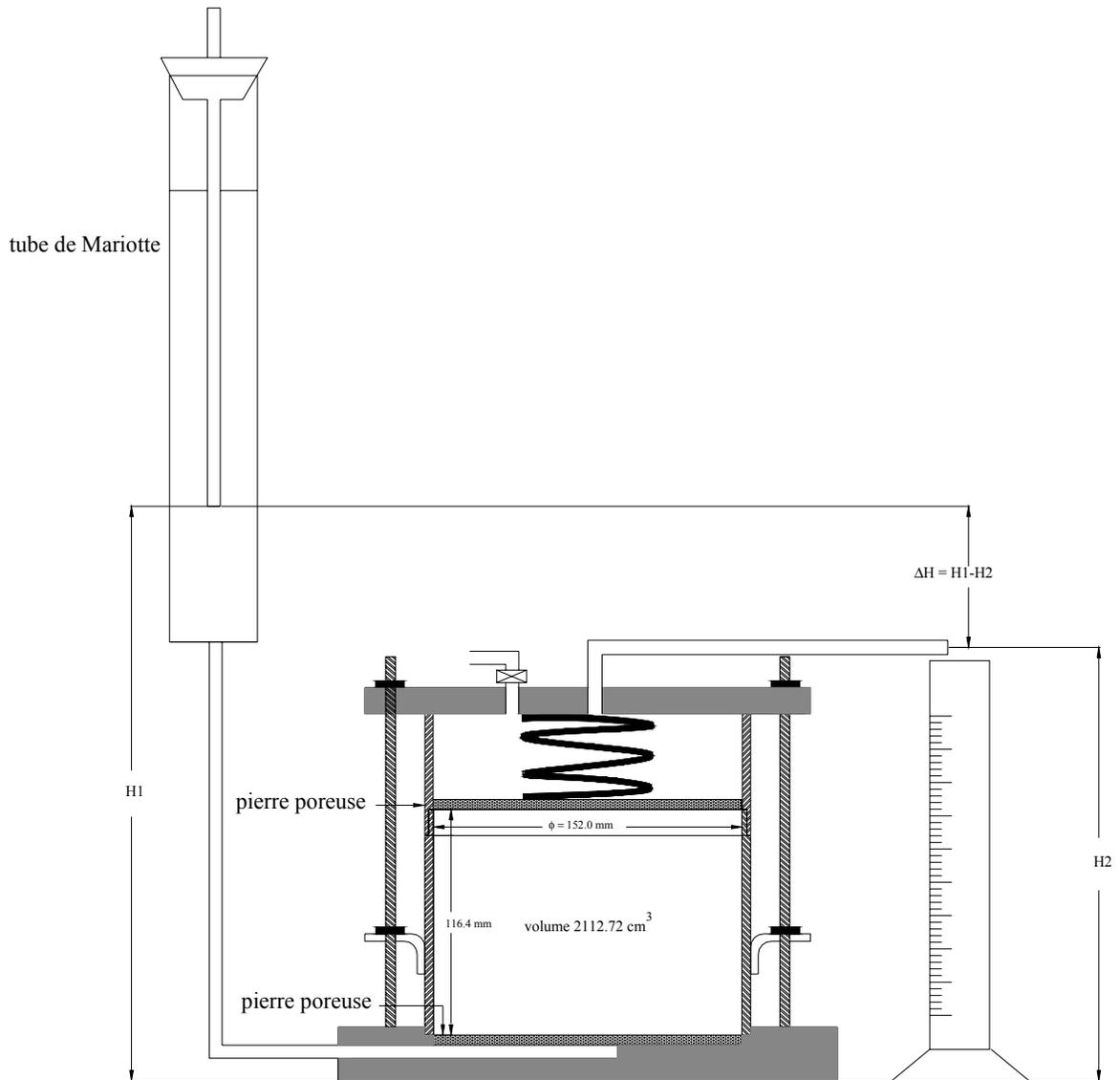


Figure 21. Montage du perméamètre Proctor à charge constante

Afin de réaliser la saturation de l'échantillon, une charge hydraulique constante est imposée à la base de l'échantillon. L'écoulement de l'eau à travers la masse de sol est permis pendant quatre jours. Cet écoulement s'effectue du bas vers le haut. La charge constante, assurée par une Mariotte, doit être établie en fonction de la perméabilité que peut avoir le matériau, car l'application d'une charge trop élevée peut engendrer des chemins d'écoulement le long de la paroi du moule ou peut entraîner les particules fines contenues dans l'échantillon.

Après la face d'imbibition des échantillons et lorsque le régime permanent a été atteint à une température constante, le volume d'eau à la sortie du système a été mesuré à un intervalle de temps donnée. Ces mesures ont été faites par paliers en variant la hauteur de la sortie d'eau du système et à différents gradients hydrauliques ( $i = \Delta H/L$  voir fig. 22) pour lesquels la conductivité hydraulique a été calculée selon l'équation 36, où  $Q$  représente le débit,  $A$  la surface du moule,  $L$  la hauteur du moule,  $H_1 - H_2$  la charge hydraulique mesurée selon la figure 21 et  $(t_1 - t_2)$  l'intervalle de temps au cours duquel la mesure a été faite :

$$[ 35 ] \quad k = -\frac{Q}{A (H_1 - H_2)(t_1 - t_2)} L$$

La figure 22, qui montre le volume d'eau écoulée en fonction du temps, présente les valeurs d'écoulement obtenues à chaque palier de charge en fonction du temps pour le matériau G2B. Les gradients hydrauliques appliqués à l'échantillon G2B, gradients situés entre 1.71 et 1.97, n'ont pas entraîné de particules fines à la sortie du système. Sur la figure 22, on peut aussi constater que les valeurs du volume d'eau écoulée obtenues lors de l'essai sont semblables, ce qui indique que le régime n'est pas turbulent lors la prise des données. Le coefficient de perméabilité vertical (aussi conductivité hydraulique) pour ce matériau est de  $8.18 \times 10^{-7}$  et est calculé à partir de la moyenne des coefficients des différents gradients hydrauliques. Ces coefficients, situés entre  $8.37 \times 10^{-7}$  m/s et  $7.91 \times 10^{-7}$  m/s, présentent le même ordre de grandeur, ce qui indique une faible variation des résultats.

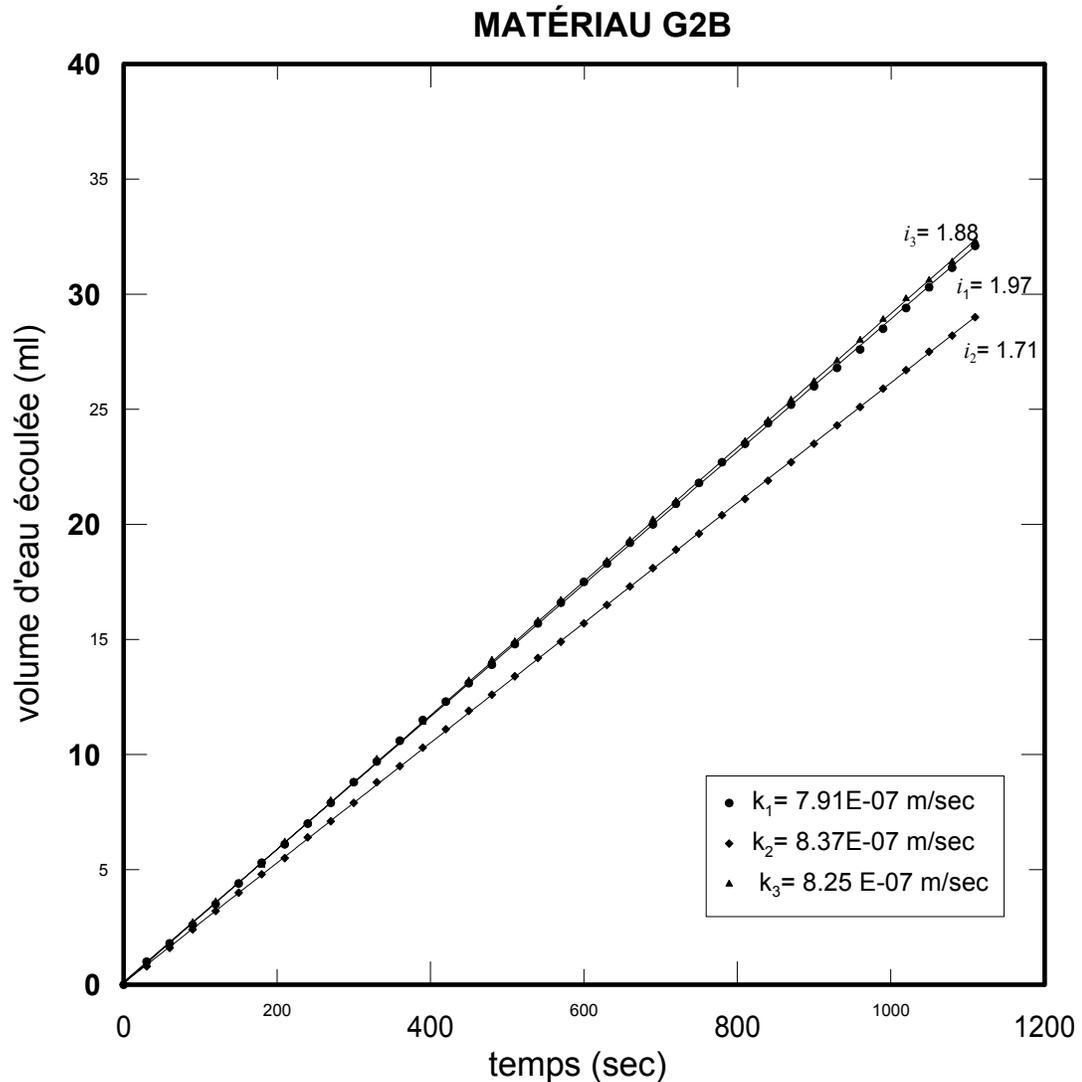


Figure 22. Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G2B. Granitique MG-20 carrière PEB

Les autres matériaux ont été étudiés de la même manière. Les graphiques d'écoulement en fonction du temps de chacun de ces matériaux sont présentés dans l'annexe B.

#### 4.2 Détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE)

La courbe caractéristique de rétention d'eau qui décrit la capacité du matériau à retenir ou à expulser l'eau à une pression donnée a été déterminée à l'aide de l'essai de plaque de pression. Cet essai est aussi appelé « potentiel de succion » par la Direction de laboratoire de chaussées du ministère des Transports du Québec et est décrit dans la procédure de

laboratoire LC-22-330 (ministère des Transports du Québec 1997b). Cet essai peut être utilisé pour déterminer la CCRE d'un sol ou d'un matériau granulaire.

Les échantillons testés ont été préalablement préparés en ajoutant une quantité d'eau équivalente à la teneur en eau optimale plus 0.25%. Par la suite, ces échantillons ont été placés et compactés dans un moule cylindrique fait en plastique dont les dimensions sont de 152.4 mm de diamètre et de 92.4 mm de hauteur. Les matériaux ont été compactés sur 4 couches d'épaisseur uniforme à 52 coups par couche. L'énergie de compactage appliquée sur ces échantillons est de 2481 kJ/m<sup>3</sup>. Celle-ci est plus basse que pour le Proctor modifié (2679.2 kJ/m<sup>3</sup>). Ce qui entraîne une diminution de la densification des matériaux, pour une même granulométrie et une même teneur en eau.

Après le compactage, l'échantillon est déposé dans un contenant plein d'eau pendant quatre jours afin d'élever sa teneur en eau à une valeur proche de la saturation. L'échantillon est ensuite pesé puis un coton à fromage est installé à sa base pour éviter la perte de particules fines lors de sa manipulation. La plaque poreuse est elle aussi saturée. Pour ce faire, on place la plaque poreuse dans la cellule de pression et on ajoute de l'eau désaérée jusqu'à ce que l'eau la recouvre complètement. Une pression d'air est ensuite appliquée sur la plaque. Cette pression est équivalente à la pression maximale que peut supporter la plaque sans se désaturer.

Après saturation, l'échantillon est placé dans la cellule de pression au-dessus de la plaque poreuse (fig. 23) et le système est fermé hermétiquement. Par la suite, on applique différents paliers de pression dans la chambre de pression en commençant avec une pression faible et en terminant avec une pression à laquelle la teneur en eau de l'échantillon présente une faible variation par rapport à la teneur en eau avant le changement de palier, ce qui se traduit par des teneurs en eau proches à la teneur en eau résiduelle. Ces valeurs de pressions sont mesurées à l'aide d'un manomètre ou d'une colonne de mercure et sont contrôlées tout au long de l'essai.

L'application d'une pression d'air dans la cellule crée une succion matricielle dans l'échantillon. Cette succion matricielle est définie par l'équation  $\psi = u_a - u_w$ , où  $u_a$  correspond à la pression d'air et  $u_w$  à la pression d'eau. Au début de chaque palier, la

pression de l'eau augmente en fonction de la pression d'air appliquée et diminue à mesure que l'eau est évacuée au travers de la plaque poreuse. Lorsque la pression est appliquée, le changement du volume d'eau est observé grâce à une burette graduée. De cette manière, on peut déterminer le moment où l'équilibre entre la pression d'air et la suction matricielle est atteint. Cet équilibre se présente lorsque le drainage de l'échantillon a cessé et que la pression d'eau est nulle dans tout l'échantillon. (Côte, 1997)

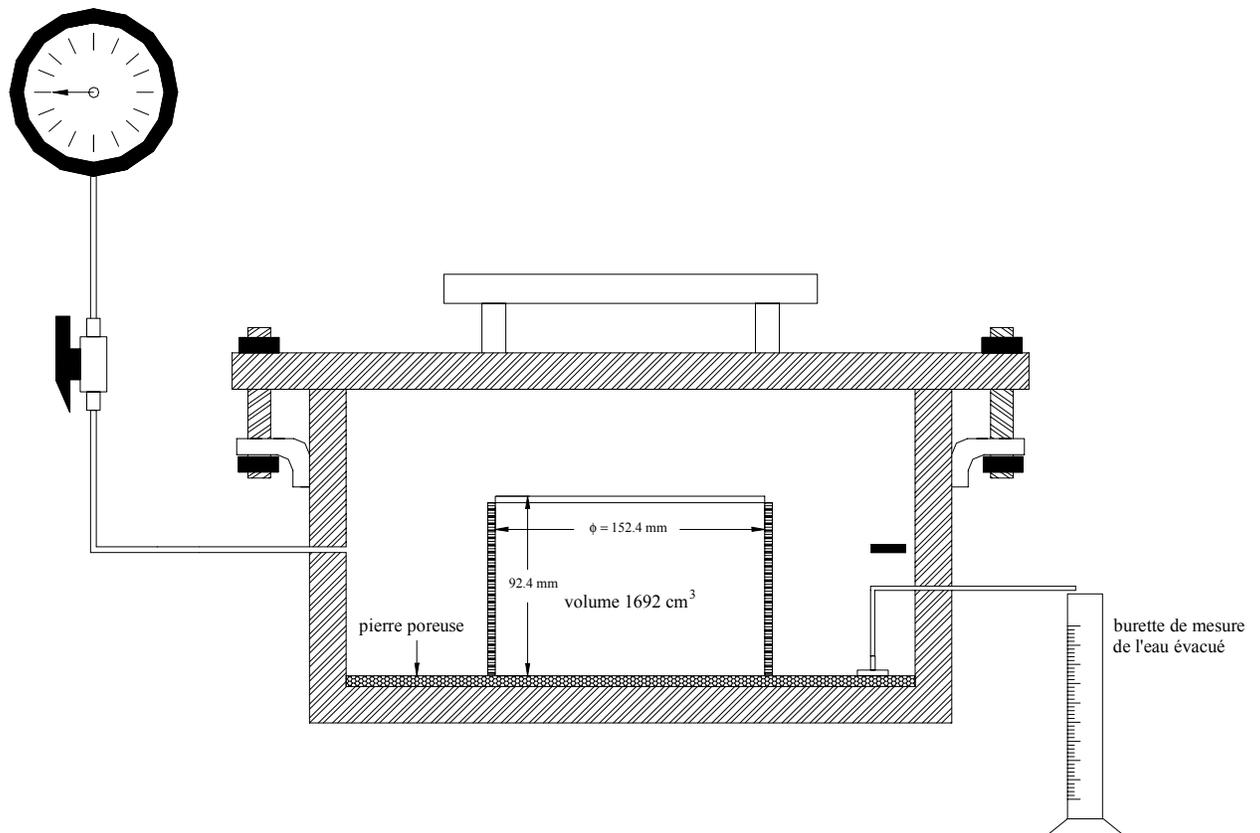
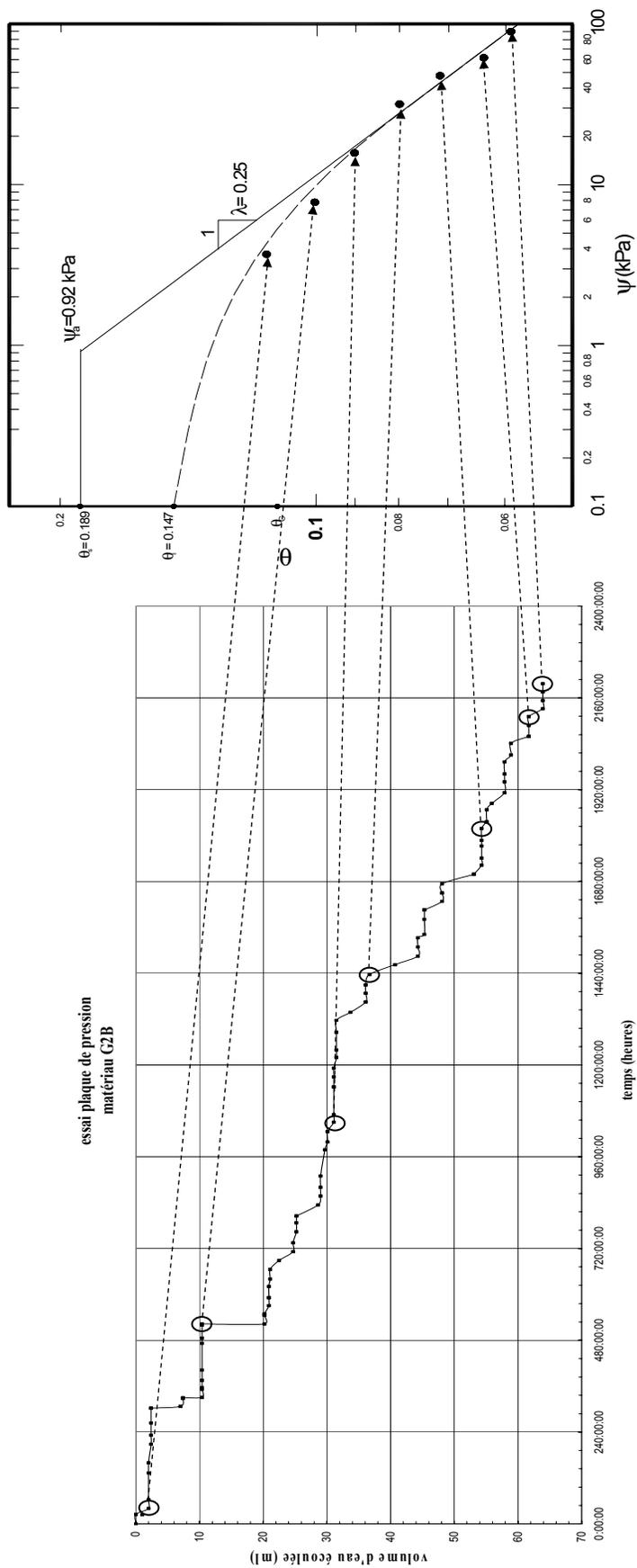


Figure 23. Montage d'essai de la plaque de pression pour la détermination de la CCRE

Lorsque l'équilibre est atteint, la pression est relâchée et l'échantillon est retiré de la cellule de pression pour déterminer la teneur en eau volumique liée au palier de pression. L'échantillon est ensuite remis dans la cellule de pression et est soumis à un palier de pression plus élevé. Cette procédure est répétée jusqu'au dernier palier. Finalement, la mesure de la masse sèche de l'échantillon est prise et les résultats sont compilés dans une échelle semi-logarithmique.

La figure 24 présente l'interprétation des résultats de l'essai de plaque de pression pour la détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G2B. Ce matériau, compacté à une teneur en eau volumique ( $\theta_c$ ) égale à 0.111, a atteint une valeur de teneur en eau volumique égale à 0.147 après la face d'imbibition. À partir de cette valeur de teneur en eau volumique, appelée teneur en eau volumique initiale ( $\theta_i$ ), le matériau a été soumis à différents paliers de pressions situés entre 0 et 90 kPa. Le volume d'eau écoulée lors de l'essai a été dessiné en fonction du temps dans la figure 24a. Cette figure permet d'observer que, lorsque la pression appliquée augmente, la variation du volume d'eau écoulée en fonction du temps est plus faible, ce qui indique que le matériau s'approche de la teneur en eau volumique résiduelle ( $\theta_r$ ). Grâce à la figure 24a, on peut aussi déterminer le moment où l'équilibre entre la pression appliquée et la pression interstitielle dans l'échantillon est atteinte. Dans cette même figure, des cercles ont été utilisés pour identifier la fin de chaque palier, moment où la valeur de teneur en eau volumique du matériau a été mesurée. Ces valeurs sont présentées à la figure 24b.

La valeur de l'indice de distribution des dimensions des pores ( $\lambda=0.25$ ) a été déterminée grâce à une interpolation linéaire des résultats expérimentaux obtenus dans la portion de drainage de la CCRE. La valeur de la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) du matériau G2B ainsi que celles des autres matériaux étudiés qui n'ont pas été complètement saturés, a été extrapolée grâce à une régression linéaire de la portion du drainage aux conditions complètement saturées ( $\theta_s=0.189$ ).



b)

a)

Figure 24. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau granitique MG-20 carrière PEB

## 5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de la détermination des paramètres hydriques en conditions partiellement saturées pour chacun des matériaux étudiés. Les paramètres considérés sont la conductivité hydraulique du matériau ( $k$ ), la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et l'indice de distribution de la dimension des pores ( $\lambda$ ) qui indique la grosseur, le volume et la distribution des pores. Ces deux derniers paramètres sont déterminés à l'aide de la courbe caractéristique de rétention d'eau.

### 5.1 Conductivité hydraulique à charge constante

Les essais de perméabilité ont été effectués sur des échantillons préparés dans un moule Proctor en suivant les caractéristiques de la granulométrie des matériaux reconstitués et en ajoutant une quantité d'eau égale à la teneur en eau optimale, plus ou moins 0.25%. Avec cette variation, on a obtenu des conductivités hydrauliques avec des échantillons compactés situés à l'optimum et du côté sec de l'optimum de la courbe de compactage, ce qui a permis d'analyser l'influence du degré de saturation de compactage sur la conductivité hydraulique.

Les résultats de cet essai et les caractéristiques des matériaux reconstitués utilisés lors de l'essai sont regroupés dans le tableau 7. Ces caractéristiques permettent de constater que la perméabilité la plus élevée est obtenue pour le matériau G5, matériau qui possède également la porosité la plus élevée et le coefficient d'uniformité le plus faible de tous les matériaux étudiés.

Le tableau 7 permet aussi d'observer l'effet du pourcentage des particules fines et du coefficient d'uniformité sur la conductivité hydraulique des matériaux étudiés. Lorsqu'on compare des matériaux ayant un coefficient d'uniformité semblable, comme c'est le cas du matériau GA ayant un  $C_u = 49.564$ , et du matériau GE, ayant un  $C_u = 37.260$ , on peut remarquer que la valeur de conductivité hydraulique est influencée par l'accroissement du pourcentage des particules fines. Pour le matériau GA, qui présente un pourcentage de

particules fines (%F) égal à 4.30, la conductivité hydraulique ( $k$ ) est égale à  $1,960E-05$  tandis que pour le matériau GE, possédant un pourcentage de particules fines (%F) égal à 36.56, la valeur  $k$  est égale à  $4,030E-08$ . Cette différence indique qu'une augmentation des particules fines peut faire diminuer la conductivité hydraulique d'une manière significative.

Le tableau 7 permet aussi de constater que l'influence du coefficient d'uniformité est moins marquée dans les matériaux possédant un %F semblable. Dans le cas des matériaux G2B et G1, qui présentent un %F d'environ 9.7% ainsi qu'un Cu de respectivement 50.560 et 94.160, on peut remarquer que les valeurs de  $k$ , égales respectivement à  $8,180E-07$  et à  $1,230E-06$ , n'ont présenté qu'une différence d'un demi ordre de grandeur.

Tableau 7. Synthèse des résultats obtenus aux essais de conductivité hydraulique pour les matériaux reconstitués.

Matériau	% particules fines	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité		Cu	Cc	W <sub>i</sub> (%)	$\theta_i$	Sr	k (m/sec)
			n	n <sub>f</sub>						
G2B	10,290	2,198	0,180	0,691	50,560	0,903	6,850	0,151	0,837	8,180E-07
G1	9,690	2,291	0,145	0,637	94,160	2,385	6,000	0,137	0,947	1,230E-06
G3	9,580	2,118	0,210	0,735	23,809	0,768	10,400	0,220	1,000	1,640E-05
G4	8,260	2,028	0,240	0,793	12,680	1,041	11,400	0,231	0,961	4,550E-06
G5	7,200	1,859	0,304	0,858	7,517	1,028	16,110	0,299	0,986	2,960E-05
GA	4,630	2,222	0,171	0,817	49,564	0,896	7,830	0,174	1,000	1,960E-05
GC	15,950	2,155	0,193	0,600	45,770	0,648	9,480	0,204	1,000	5,300E-07
GD	26,130	2,137	0,200	0,488	43,066	0,381	8,50	0,182	0,910	6,570E-08
GE	36,560	2,112	0,209	0,420	37,260	0,235	9,680	0,204	0,978	4,030E-08

## 5.2 Courbe caractéristique de rétention d'eau

L'essai de plaque de pression a permis d'établir la courbe de rétention d'eau à des valeurs de succion allant de 0 kPa à 100 kPa. Les échantillons étudiés ont été compactés en quatre couches uniformes, à raison de 52 coups de marteau par couche, dans des moules de plastique qui semblent avoir absorbé une partie de l'énergie appliquée. D'ailleurs, le volume des moules utilisés était plus petit que le volume des moules Proctor, dont le volume est de 1692 cm<sup>3</sup> et de 2112.72 cm<sup>3</sup> respectivement. Donc, l'énergie de compactage appliquée est plus faible que l'énergie de compactage Proctor équivalente à cinq couches à raison de 56 coups de marteau par couche. Ces variations ont entraîné des masses volumiques plus faibles que pour les essais Proctor. Les masses volumiques atteintes lors du compactage des échantillons ont été comparées avec les valeurs de masse maximale de la courbe Proctor de chacun des matériaux. Les résultats de ces comparaisons peuvent être consultés dans le chapitre 6 de *discussion des résultats*.

Les courbes caractéristiques de rétention d'eau, présentées aux figures 25 à 33, ont été déterminées pour chacun des matériaux reconstitués. Ces courbes, représentées selon une échelle logarithmique, ont comme abscisse la succion matricielle en kPa et comme ordonnée la teneur en eau volumique. Dans tous les cas, la courbe a été définie par des points expérimentaux bien alignés qui ont permis d'établir sa tendance durant le drainage de l'échantillon. Cette détermination a permis de connaître la valeur de pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) ainsi que l'indice de distribution de la dimension des pores ( $\lambda$ ) en conditions saturées pour chacun des matériaux reconstitués.

Ces paramètres hydriques, ainsi que les propriétés des matériaux lors de l'essai, sont présentés dans le tableau 8. Ce tableau permet de constater que les deux paramètres hydrauliques sont influencés par la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).

Grâce au tableau 8, on peut constater que le pourcentage des particules fines et le coefficient d'uniformité influencent tant la conductivité hydraulique que les paramètres de la CCRE. Si on compare la valeur de  $\psi_a$  obtenue par les matériaux GA et GE, qui possèdent un coefficient d'uniformité semblable respectivement de  $C_u=49.6$  et de  $C_u=37.3$ , on peut observer que la valeur de la  $\psi_a$  est fortement influencée par l'accroissement du pourcentage

des particules fines. La valeur de  $\psi_a$  obtenue pour le matériau GA, possédant un %F= 4.30, a été de 0.23 kPa tandis que pour le matériau GE, possédant un %F=36.560, la valeur  $\psi_a$  obtenue a été de 6.32 kPa.

L'influence du coefficient d'uniformité sur la  $\psi_a$  peut être observée sur des matériaux possédant le même %F et différents coefficients d'uniformité. Dans le cas des matériaux G2B et G1, qui présentent un %F d'environ 9.7% ainsi qu'un Cu respectivement de 50.560 et de 94.160, les valeurs de  $\psi_a$  ont été de 0.92 kPa pour le matériau G2B et de 1.15 kPa pour le matériau G1. Ces valeurs montrent que la variation de  $\psi_a$  dans des matériaux avec un Cu différent n'est pas marquée par rapport à l'influence du pourcentage des particules fines. Par contre, si on analyse les valeurs de  $\lambda$  obtenues par les matériaux étudiés, on peut constater que les matériaux possédant un coefficient d'uniformité faible, notamment les matériaux G4 et G5, présentent la valeur de  $\lambda$  la plus faible.

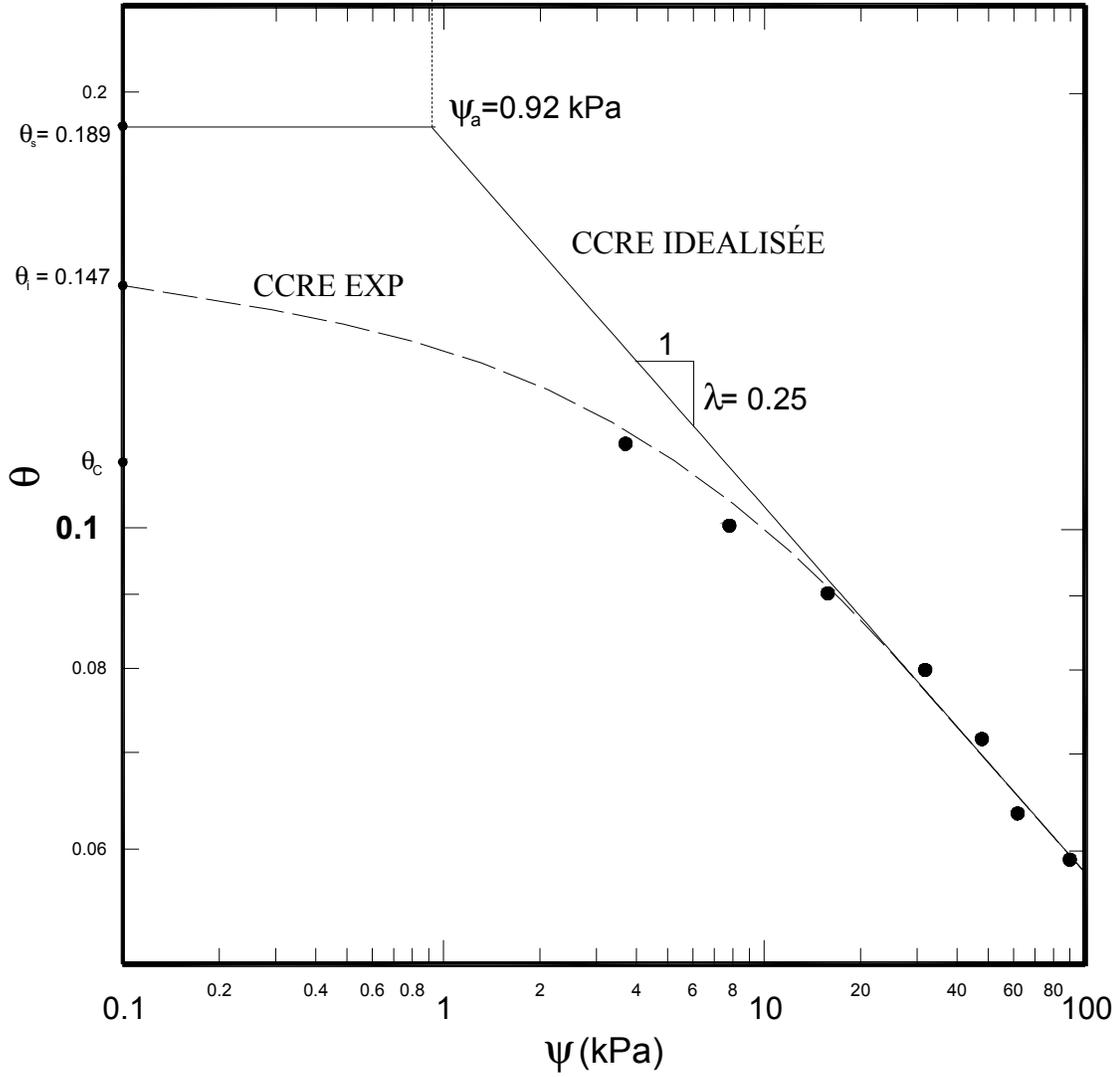


Figure 25. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G2B

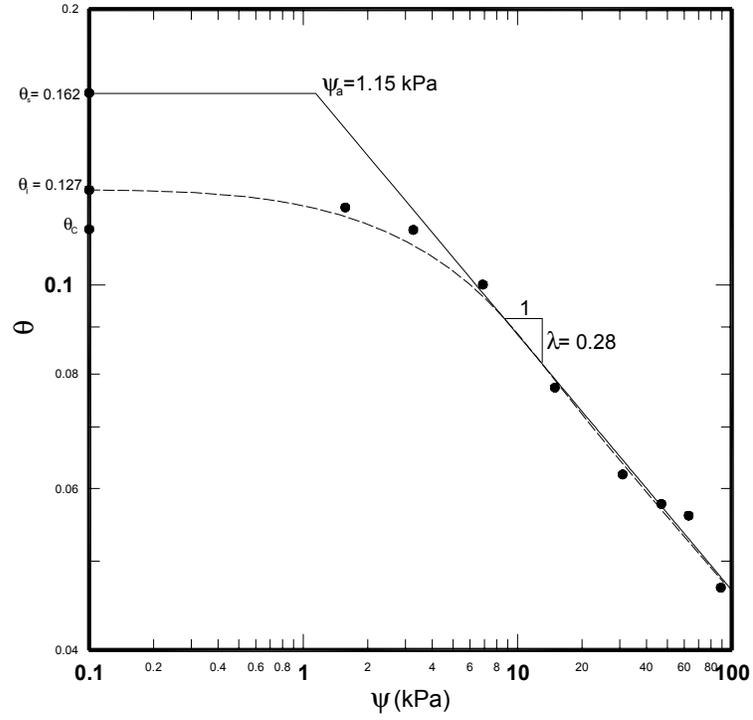


Figure 26. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G1

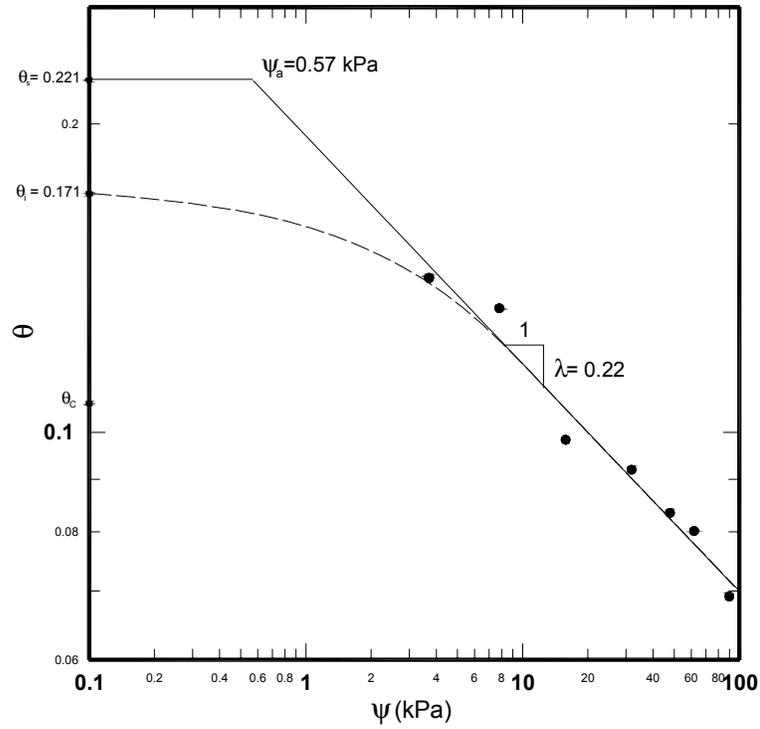


Figure 27. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G3

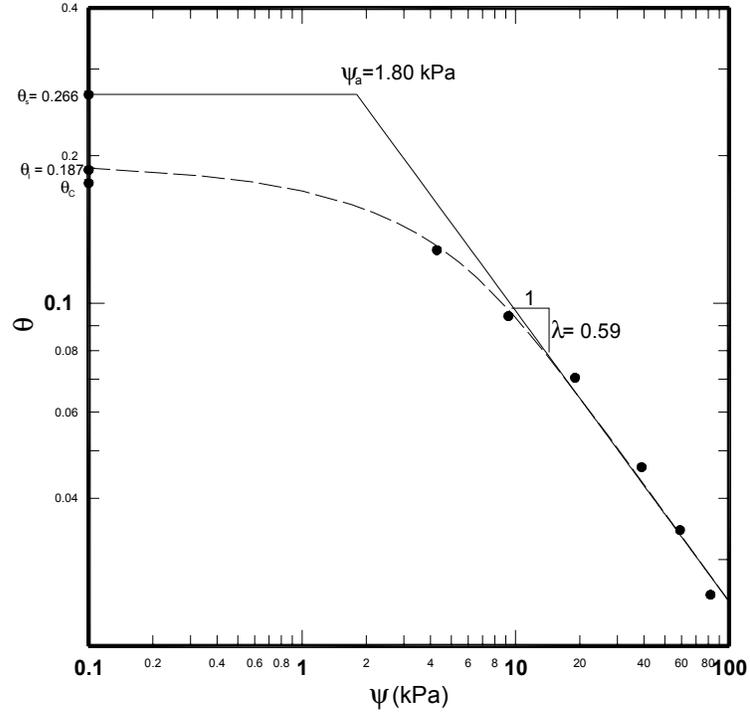


Figure 28. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G4

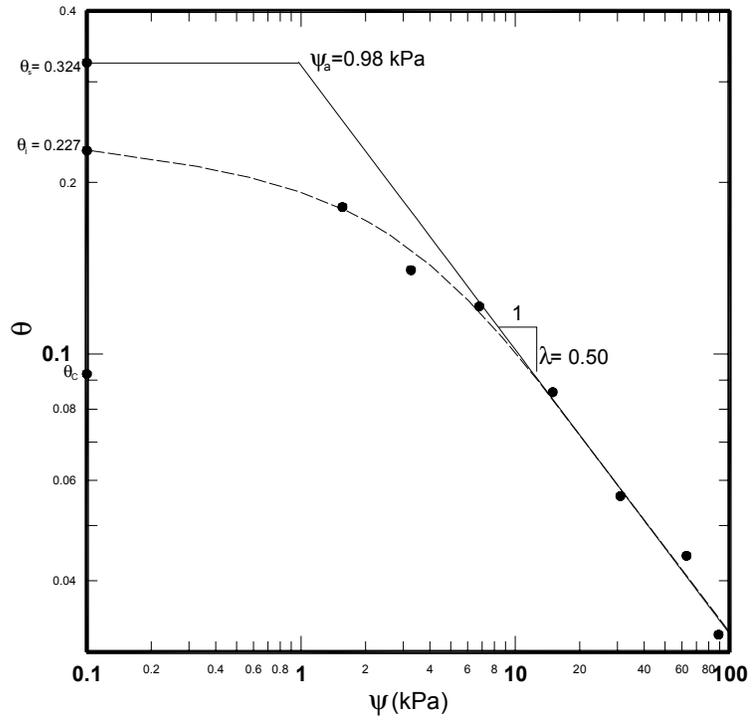


Figure 29. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau G5

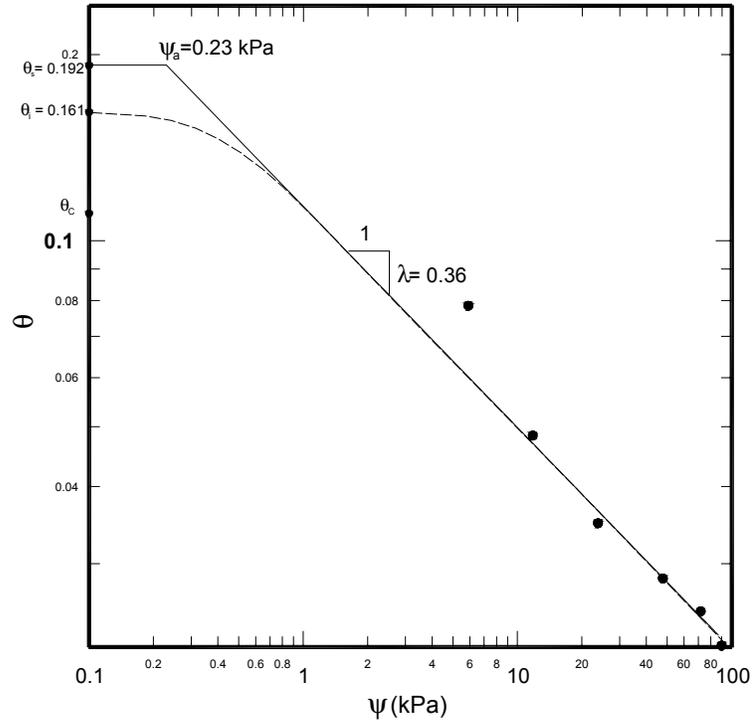


Figure 30. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GA

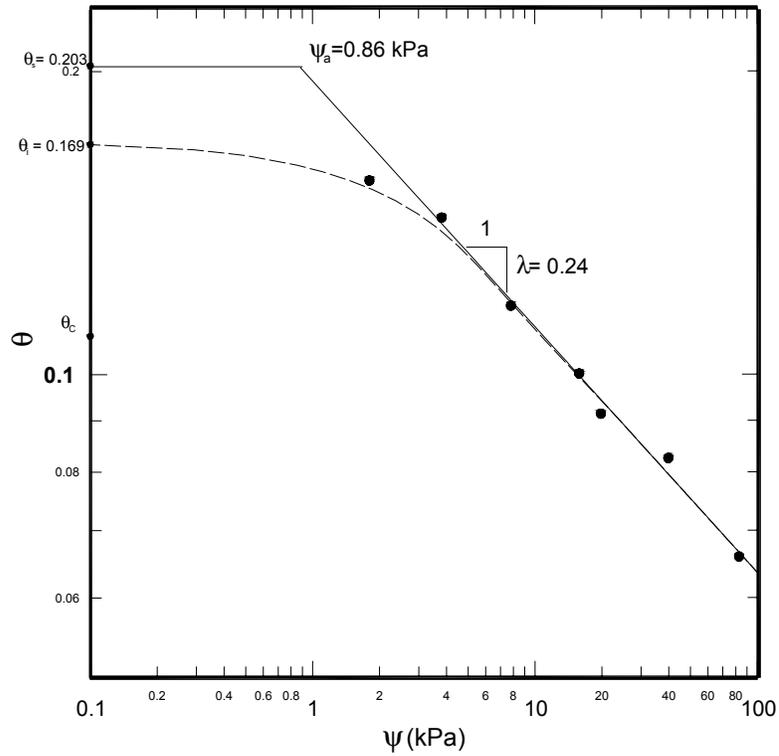


Figure 31. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GC

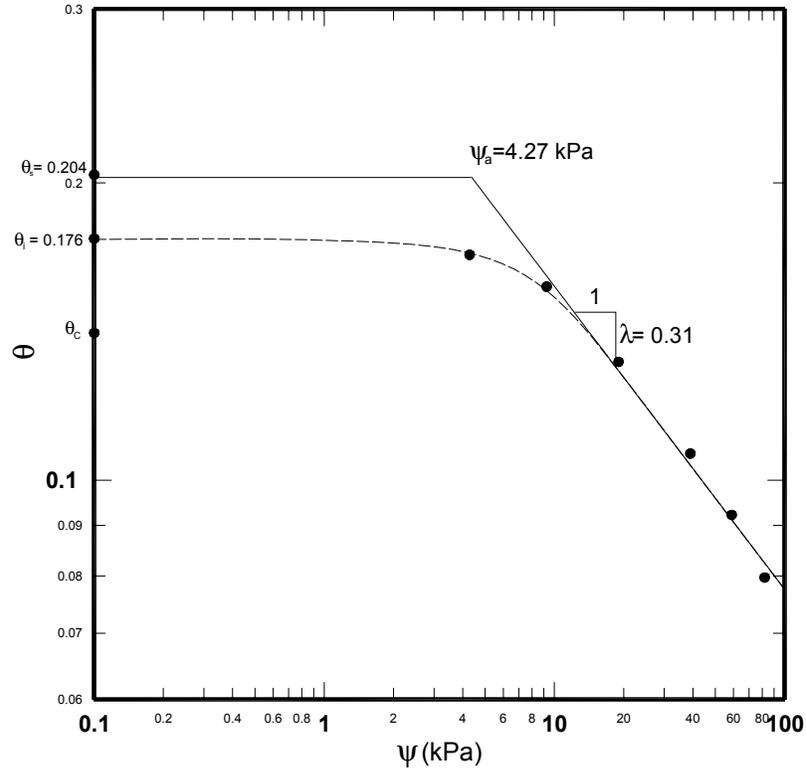


Figure 32. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GD

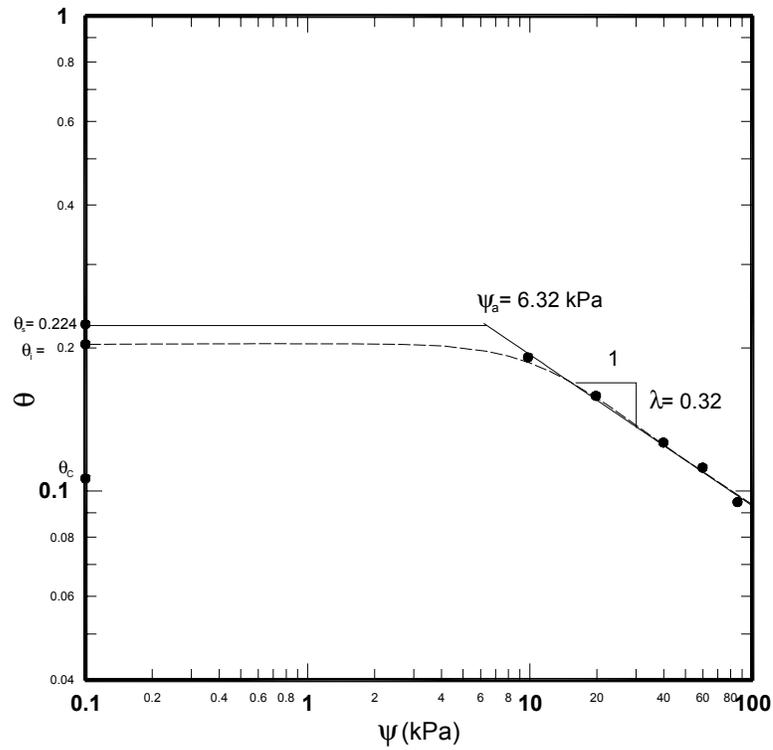


Figure 33. Courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau GE

Tableau 8. Synthèse des résultats obtenus à partir de la détermination de la CCRE pour les matériaux reconstitués

matériau	% particules fines	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité		Cu	Cc	W <sub>i</sub> (%)	$\theta_i$	S <sub>r</sub>	$\Psi_a$ (kPa)	$\lambda$
			n	n <sub>f</sub>							
G2B	10,290	2,174	0,189	0,693	49,758	0,961	6,630	0,144	0,763	0,918	0,25
G1	9,690	2,245	0,162	0,667	94,160	2,385	5,655	0,127	0,782	1,145	0,28
G3	9,580	2,090	0,220	0,747	23,809	0,768	8,230	0,172	0,781	0,565	0,22
G4	8,260	1,978	0,259	0,809	12,680	1,041	9,610	0,190	0,733	1,800	0,59
G5	7,200	1,821	0,318	0,866	7,517	1,028	12,596	0,229	0,721	0,980	0,50
GA	4,630	2,165	0,192	0,837	49,564	0,896	7,450	0,161	0,839	0,231	0,36
GC	15,950	2,130	0,202	0,614	45,770	0,648	7,950	0,169	0,837	0,860	0,23
GD	26,130	2,126	0,204	0,495	43,066	0,381	8,261	0,176	0,862	4,270	0,31
GE	36,560	2,071	0,224	0,442	37,260	0,235	9,920	0,205	0,916	6,320	0,32

### 5.3 Effet du compactage sur la granulométrie

Il est généralement admis que le compactage entraîne la production des particules fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ ). Celles-ci sont créées par l'attrition ou par le concassage des particules durant leur mise en place. En considérant cela, la granulométrie des matériaux étudiés après les essais a été déterminée afin de connaître les effets du compactage sur le pourcentage de particules fines (%F), sur le coefficient d'uniformité (Cu) et sur le coefficient de courbure (Cc).

Les courbes granulométriques obtenues après le compactage pour la détermination de la CCRE et de la conductivité hydraulique du matériau G2B sont illustrées dans la figure 34. Dans cette figure, on remarque que ces courbes sont décalées vers le haut par rapport aux granulométries du matériau avant compactage. On peut aussi y constater que les deux essais ont eu le même effet sur la granulométrie des matériaux. Par conséquent, la détermination des autres granulométries après compactage a été réalisée uniquement pour l'essai de conductivité hydraulique. Ces granulométries sont présentées à l'annexe A.

Les résultats obtenus après compactage sont présentés dans le tableau 9. Ces résultats montrent que la plus importante variation de particules fines est observée pour les matériaux dont le pourcentage des particules grossières ( $d > 5\text{mm}$ ) est élevé. Par exemple, pour le matériau reconstitué G2B, tenant avant compactage un pourcentage de particules fines de 7%, a augmenté ses particules fines à 10%, c'est-à-dire le matériau a présenté un taux d'augmentation de particules fines de 47%. Cas contraire pour le matériau reconstitué GA, tenant un pourcentage des particules grossières ( $d > 5\text{mm}$ ) égal à 0, où le pourcentage de particules fines a varié de 35%, avant compactage, à 36%, après compactage. C'est-à-dire le matériau a présenté après compactage un taux d'augmentation de particules fines de 3%.

Les figures 35 et 36 présentent la variation des coefficients avant et après compactage. En général, le coefficient de courbure des matériaux est plus faible après compactage. Toutefois, on observe une différence plus marquée pour le matériau G1 qui possède le pourcentage de particules grossières le plus élevé (62%).

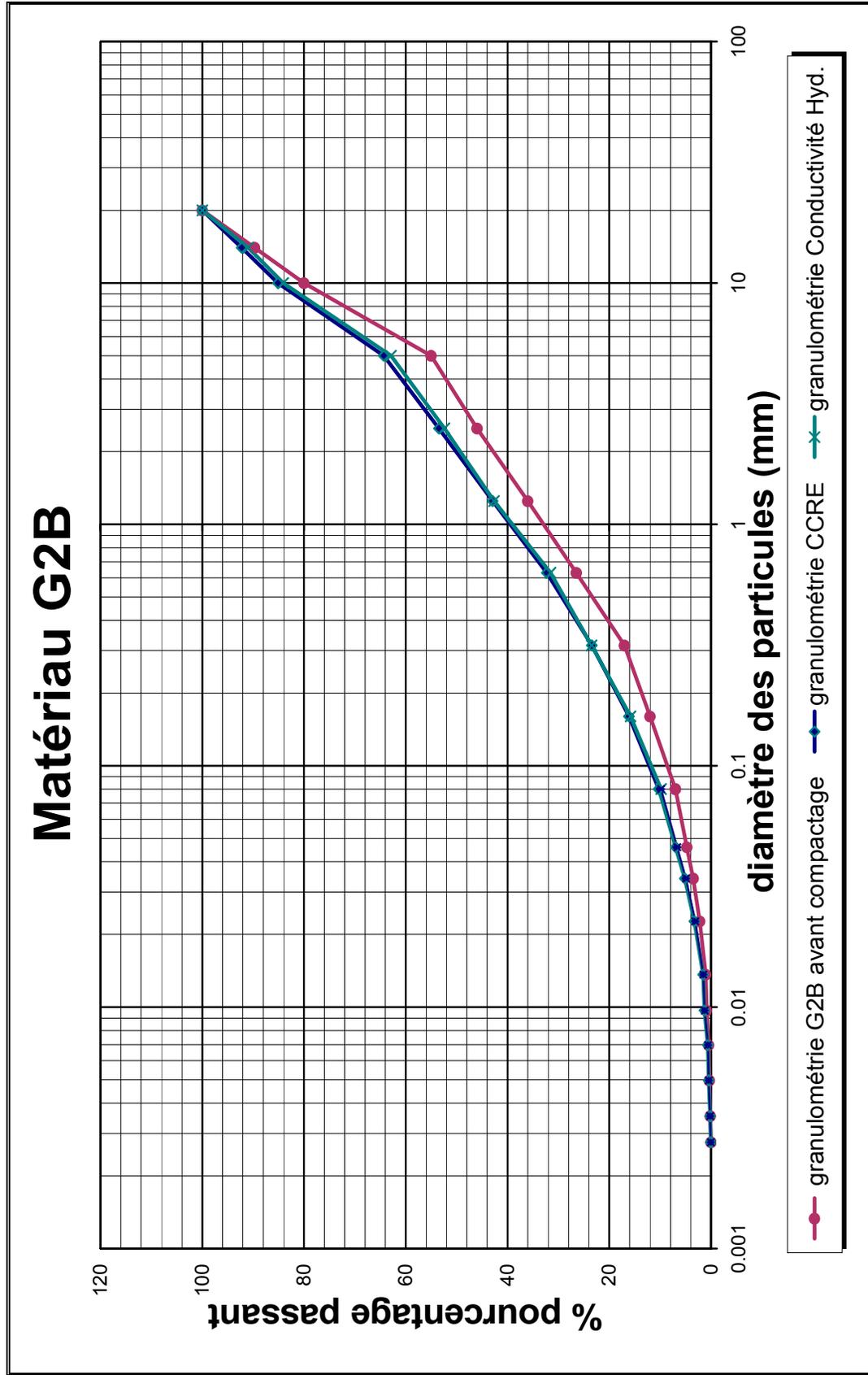


Figure 34. Granulométrie du matériau G2B avant et après compactage

Tableau 9 : Caractéristiques granulométriques des matériaux avant et après compactage.

		avant compactage					après compactage		
		%F	% granulats fins	% granulats grossier	Cu	Cc	%F	Cu	Cc
Granulométrie	G2B	7	38	62	47	0.9	10	50	1.0
	G1	7	55	45	88	3.3	10	94	2.4
	G3	7	75	25	24	0.8	10	24	0.8
	G4	7	100	0	12	1.3	8	13	1.0
	G5	7	100	0	7	1.1	7	8	1.0
	GA	2	44	56	46	1.2	5	50	0.9
	GC	14	81	19	47	0.6	16	46	0.6
	GD	25	90	10	47	0.4	26	43	0.4
	GE	35	100	0	40	0.2	37	37	0.2

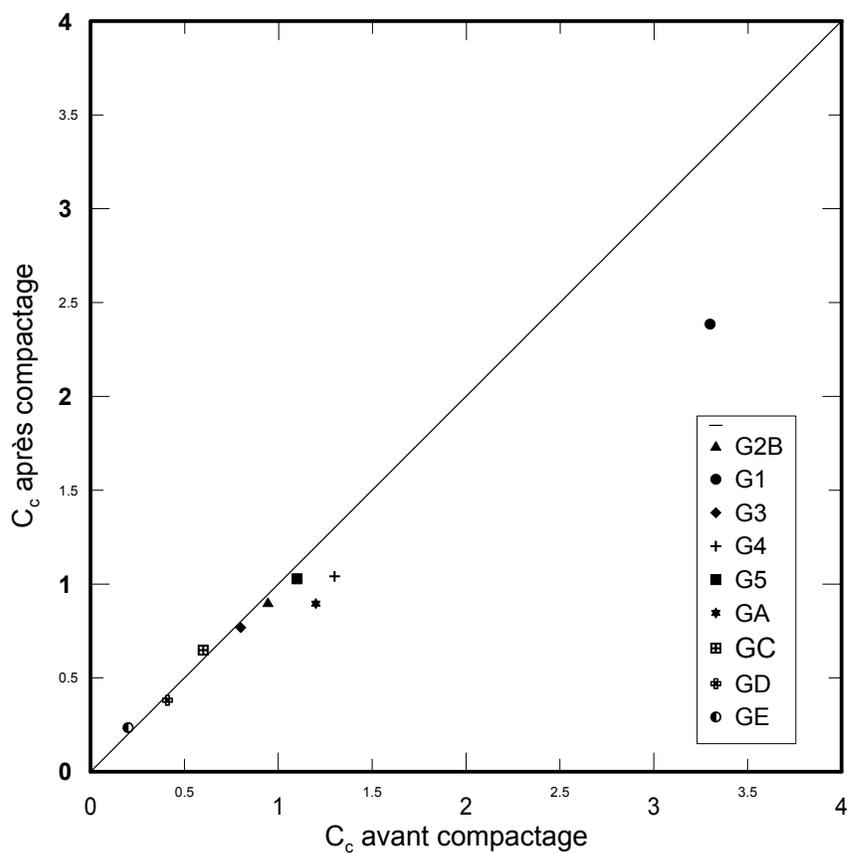


Figure 35. Comparaison du coefficient de courbure avant et après le compactage

Dans le cas du coefficient d'uniformité, on peut constater que le coefficient est plus élevé après compactage dans les matériaux dont le pourcentage de particules grossières se situe entre 45% et 62%. Ces matériaux sont le matériau G1, avec un pourcentage de particules grossières de 62%, le GA, avec un pourcentage de 56%, et le G2B, avec un pourcentage de 45%. Dans le cas des matériaux qui présentent un pourcentage de particules grossières inférieur à 20%, le coefficient est plus faible après compactage. C'est le cas notamment du matériau GC, avec 19% de particules grossières, du matériau GD avec 10% et du matériau GE qui contient 0% de particules grossières.

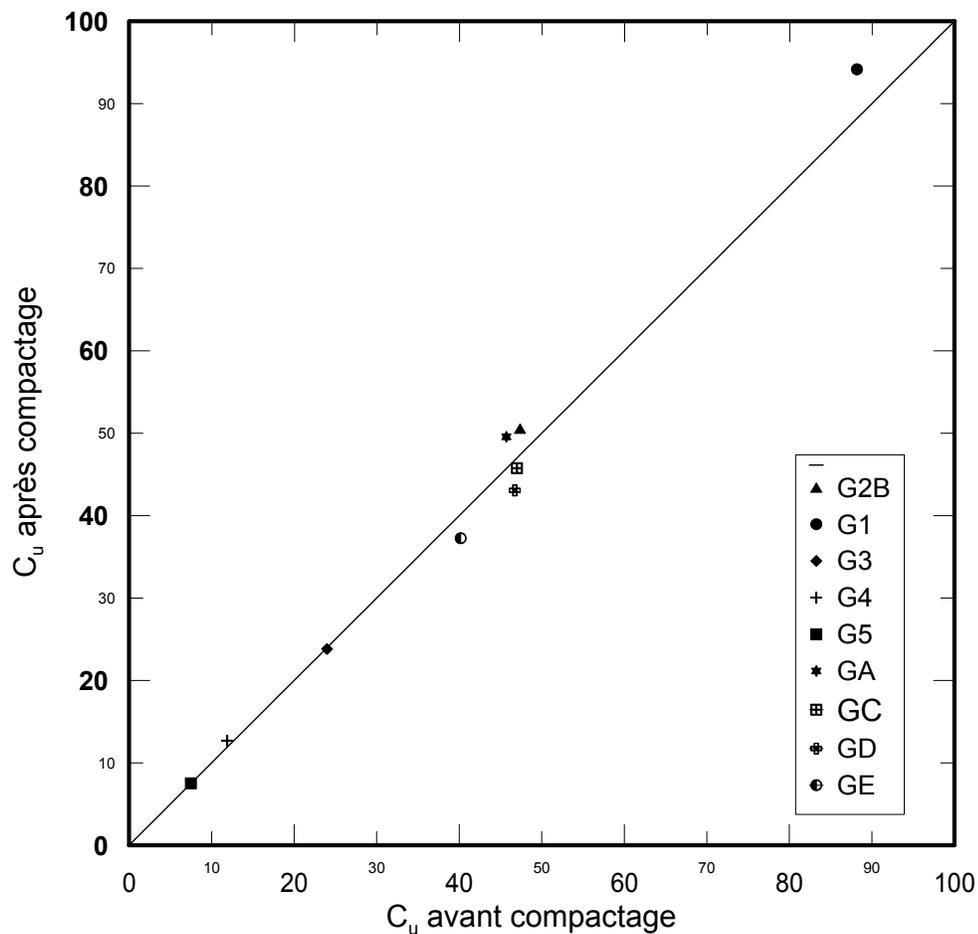


Figure 36. Comparaison du coefficient d'uniformité avant et après le compactage

## 6. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats présentés au précédent chapitre ont été analysés en se basant sur l'influence qu'ont les conditions de compactage et les caractéristiques granulométriques des échantillons sur les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires. Il a été démontré par Watabe Y. *et al.* (2000), dans le cadre de leur recherche sur un till non plastique du Nord du Québec, que les conditions de compactage ont une influence marquée sur les propriétés hydriques. Ces auteurs ont également affirmé que « les changements de la conductivité hydraulique sont reliés à la structure des spécimens compactés et à la macroporosité qui se développe lorsque le sol est compacté à des degrés de saturation plus faibles que la valeur à l'optimum ». Il est important de souligner que, dans le cas des matériaux granulaires, les caractéristiques granulométriques peuvent aussi avoir une importante influence sur le comportement hydrique. Cette influence sera discutée dans les paragraphes suivants.

### 6.1 L'énergie de compactage lors des essais pour la détermination des paramètres hydriques des matériaux.

Comme les conditions de compactage influencent les propriétés hydriques des matériaux, il était nécessaire de connaître l'énergie de compactage appliquée aux échantillons lors des essais de conductivité hydraulique et de mesure de la CCRE.

L'essai de conductivité hydraulique a été réalisé avec un moule Proctor, en acier et de consistance rigide, dont les dimensions diffèrent légèrement du moule utilisé pour l'essai Proctor modifié. Les volumes de ces moules étant respectivement de 2112.72 cm<sup>3</sup> pour la présente étude, et de 2108.37 cm<sup>3</sup> pour l'essai Proctor modifié. L'énergie de compactage appliquée lors de l'essai de conductivité hydraulique a été la même que pour l'essai Proctor modifié, soit 2679.2 kJ/m<sup>3</sup>. Néanmoins, dans le cas de la détermination de la CCRE, l'énergie de compactage appliquée aux échantillons a été de 2481 kJ/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une valeur plus faible que dans l'essai de conductivité hydraulique. Il est important de

noter qu'un moule en plastique de  $1691 \text{ cm}^3$  a été utilisé pour cet essai, et que ce moule peut avoir absorbé une partie de l'énergie appliquée en raison de sa rigidité plus faible.

L'influence de l'énergie de compactage se reflète dans les valeurs de masses volumiques obtenues. Comme l'illustrent les figures 38 à 46, le positionnement de ces valeurs dans les courbes de compactage permet de constater que les masses volumiques atteintes par les échantillons utilisés pour déterminer la CCRE sont décalées vers le bas de la courbe de compactage Proctor. Ces masses volumiques ne font pas partie de la courbe de compactage Proctor. Ces masses volumiques ne font pas partie de la courbe de compactage Proctor puisque l'énergie transmise lors du compactage des échantillons dans le moule en plastique a été plus faible que l'énergie transmise aux échantillons dans le moule Proctor. Par conséquent, une courbe de compactage décalée vers le bas a été dessinée afin de représenter la courbe qui aurait été obtenue pour le matériau en appliquant l'énergie de compactage transmise durant l'élaboration des échantillons. Par la suite, cette courbe de compactage a été tracée en suivant la ligne de saturation à l'optimum, c'est-à-dire la ligne reliant les valeurs optimales obtenues pour un même matériau avec différentes énergies de compactage. Cette ligne a été obtenue à partir du sommet de la courbe de compactage Proctor, en émettant l'hypothèse que la ligne de saturation à l'optimum est plus ou moins parallèle à la courbe de saturation à 100% (Holtz et Kovacs 1991). Les hypothèses posées pour le positionnement des courbes sont présentées à la figure 37 où sont illustrées les courbes de compactage obtenues pour un même matériau à des énergies de compactage distinctes.

La courbe de compactage hypothétique inclut la masse volumique obtenue lors du compactage de l'échantillon pour la détermination de la CCRE. Celle-ci est semblable à la courbe de compactage Proctor. Cette hypothèse est fondée sur le fait que l'écart entre l'énergie Proctor et l'énergie appliquée lors du essai CCRE est seulement de 7%.

L'analyse des figures 38 à 46 permet aussi de constater que les valeurs de masse volumique et de teneur en eau obtenues après compactage des échantillons pour la détermination de la conductivité hydraulique se positionnent, pour la plupart, du côté humide de la courbe Proctor, ce qui est un accord avec le fait que les matériaux reconstitués ont été préparés en ajoutant une quantité d'eau égale à la teneur en eau optimale Proctor plus 0.25%. Afin d'analyser le comportement hydrique du côté sec de la courbe, des échantillons dont la

teneur en eau est inférieure à la teneur en eau optimale ont aussi été reconstitués. Ce sont les matériaux G2B, G1, G3 et G4 qui ont été compactés dans ces conditions. La position des masses volumiques obtenues est illustrée par les figures 47 à 50.

Dans le cas des échantillons reconstitués pour déterminer la CCRE, le sommet de la courbe de compactage a été établi à l'aide de la ligne d'optimum du matériau. À partir de ce point, les caractéristiques de compactage des échantillons sont positionnées du côté sec de la courbe de compactage.

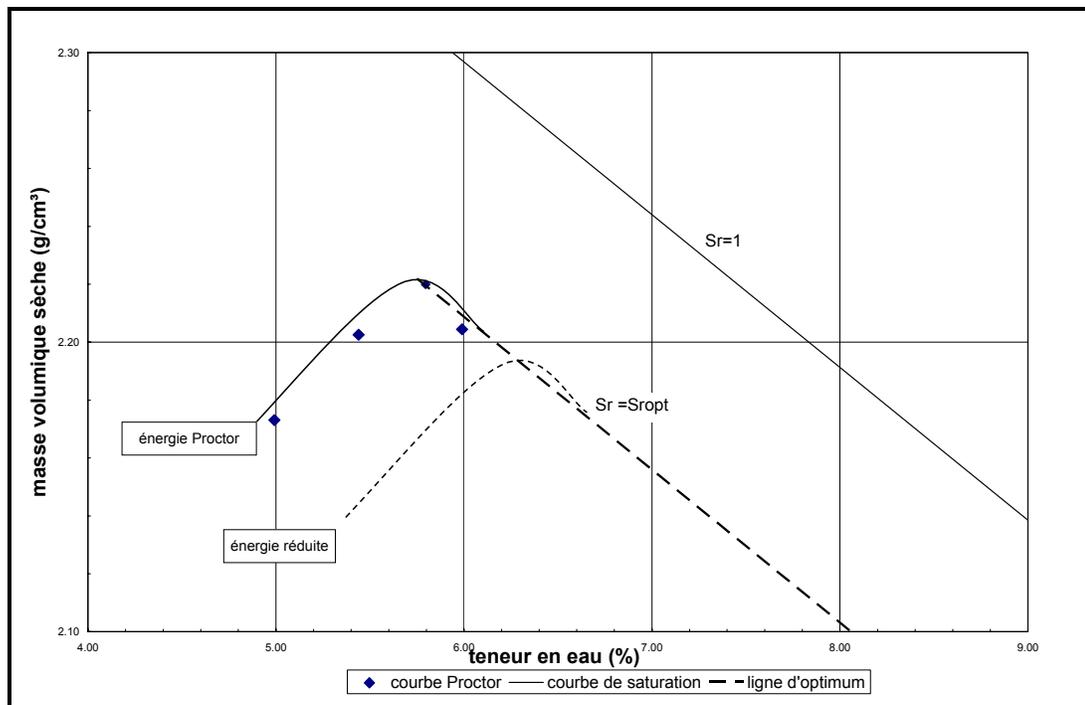


Figure 37. Hypothèse du placement des courbes de compactage pour essais effectués à différentes énergies de compactage

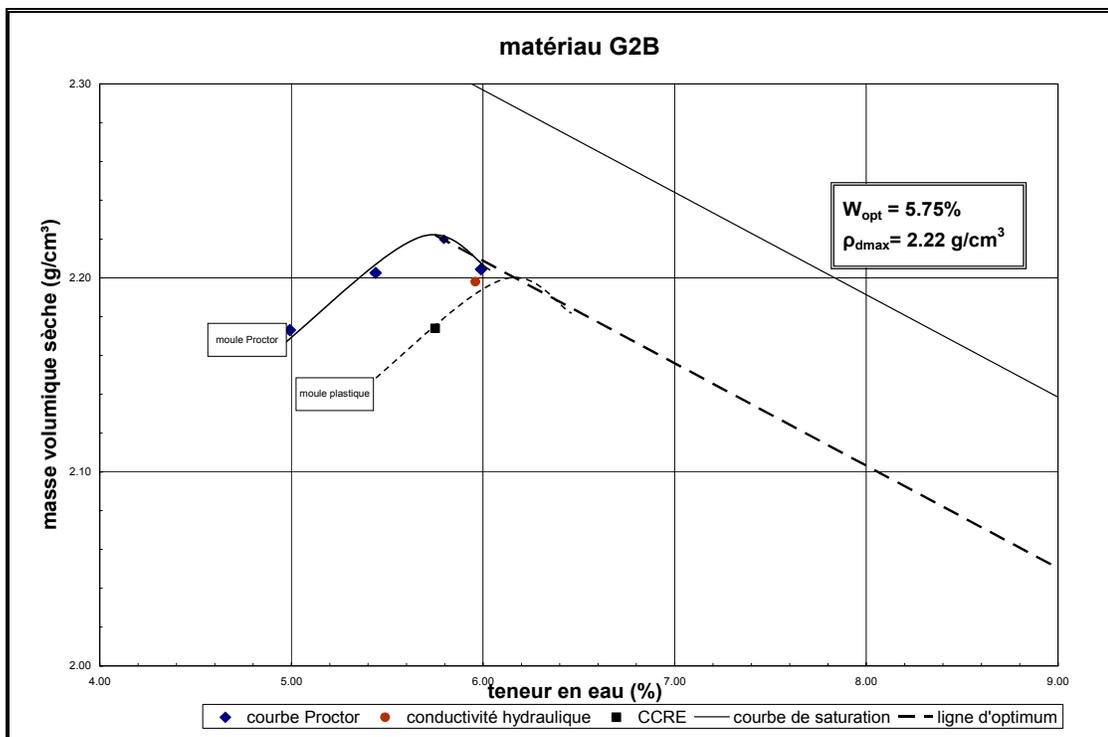


Figure 38. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G2B

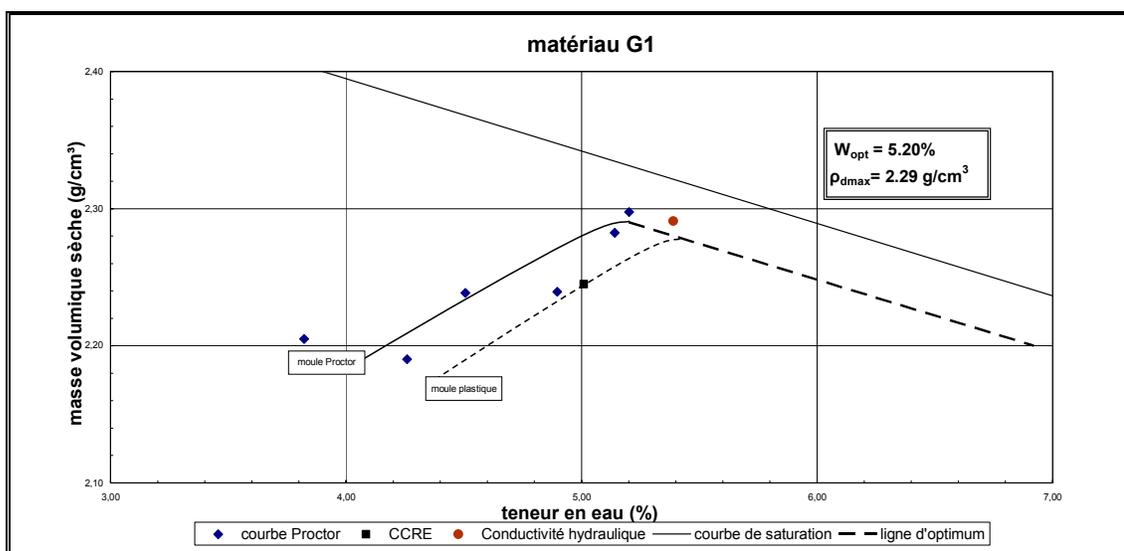


Figure 39. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G1



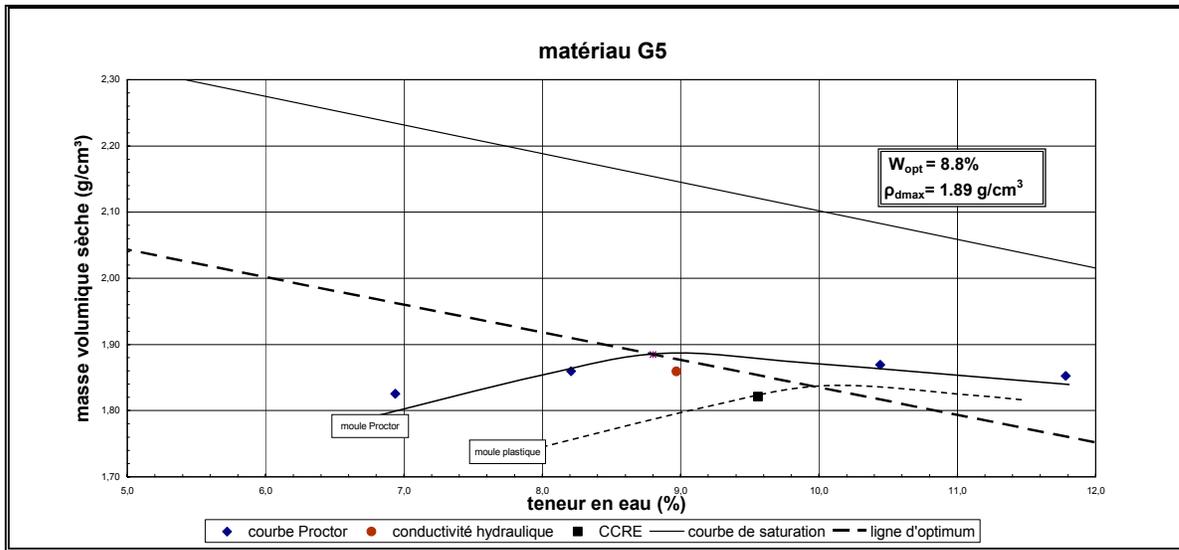


Figure 42. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau G5

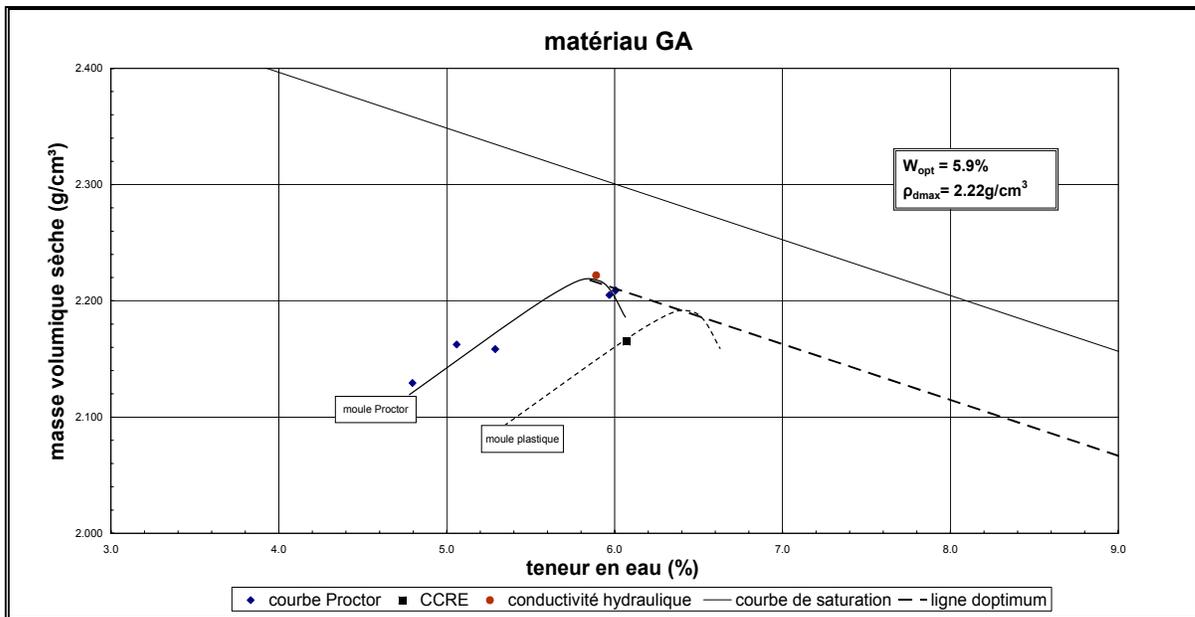


Figure 43. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GA

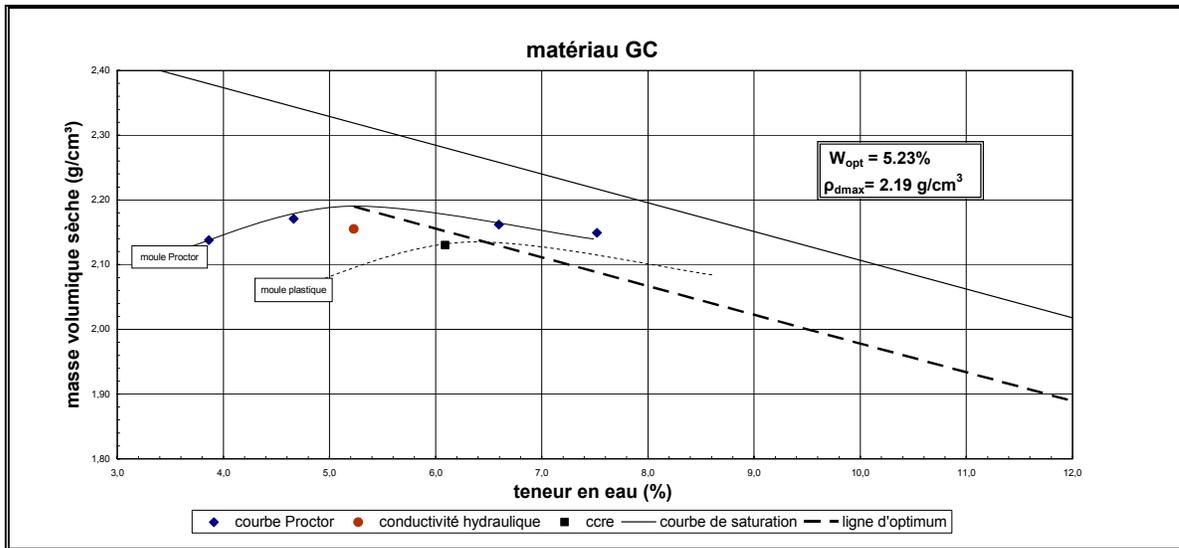


Figure 44. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GC

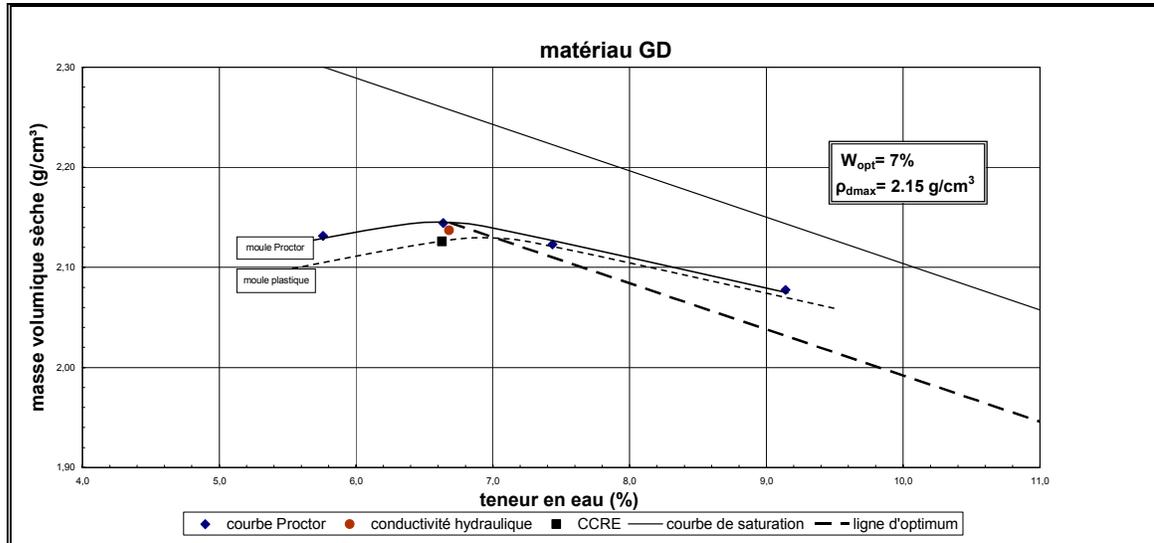


Figure 45. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GD

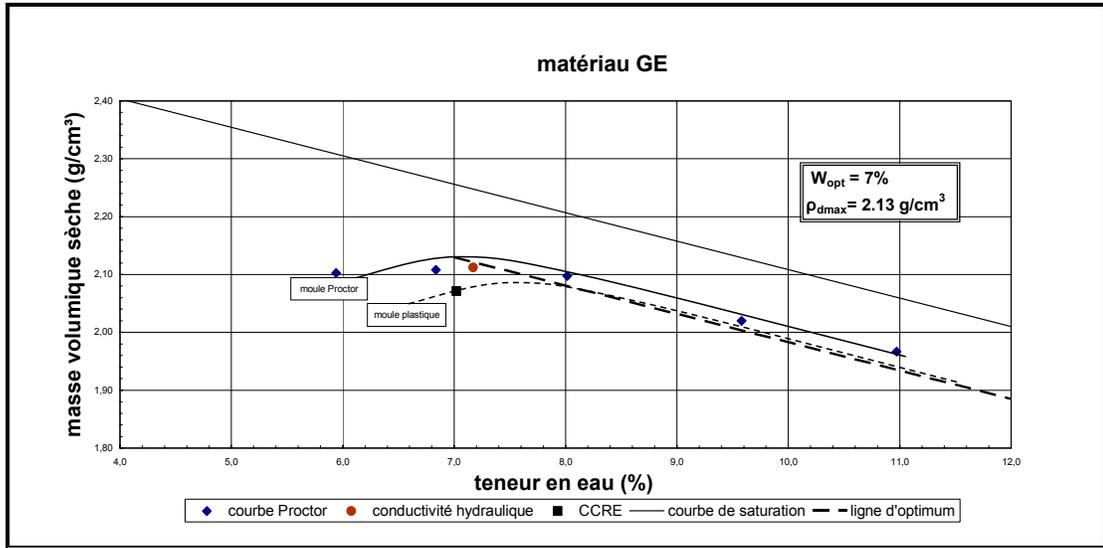


Figure 46. Positionnement des masses volumiques obtenues pour les essais de conductivité hydraulique et de plaque de pression dans la courbe de compactage du matériau. Matériau GE

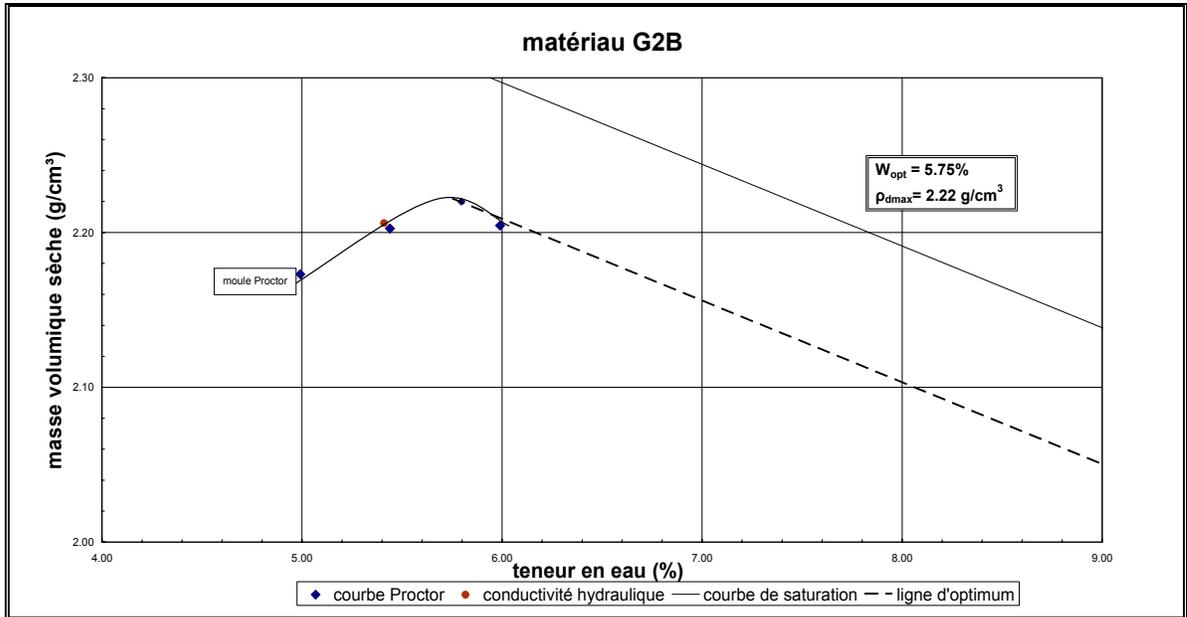


Figure 47. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G2B

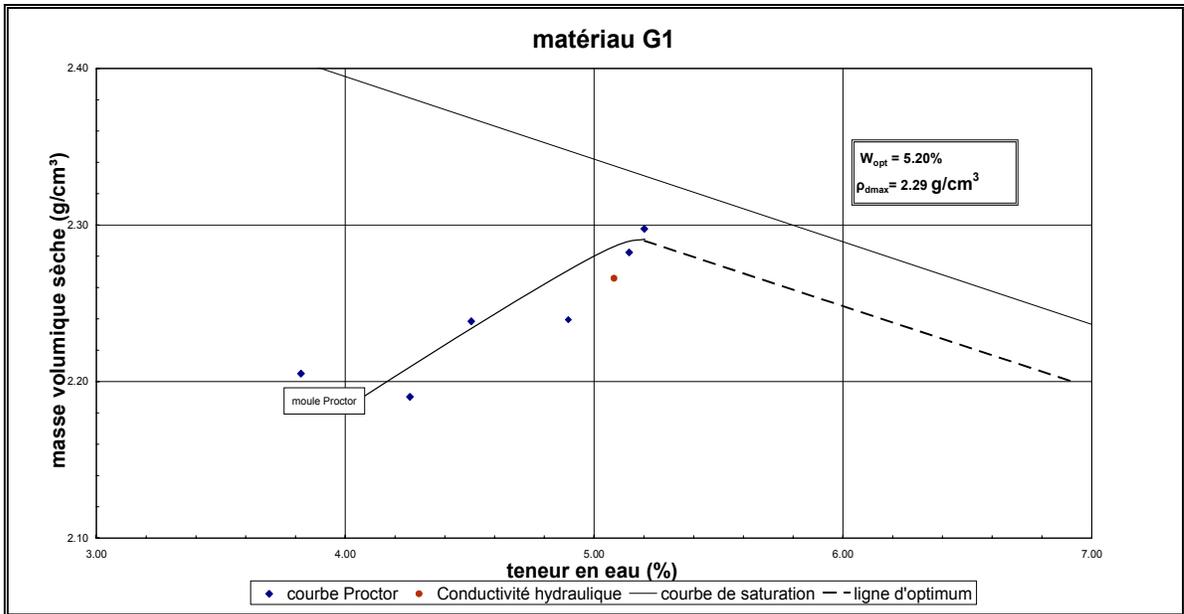


Figure 48. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G1

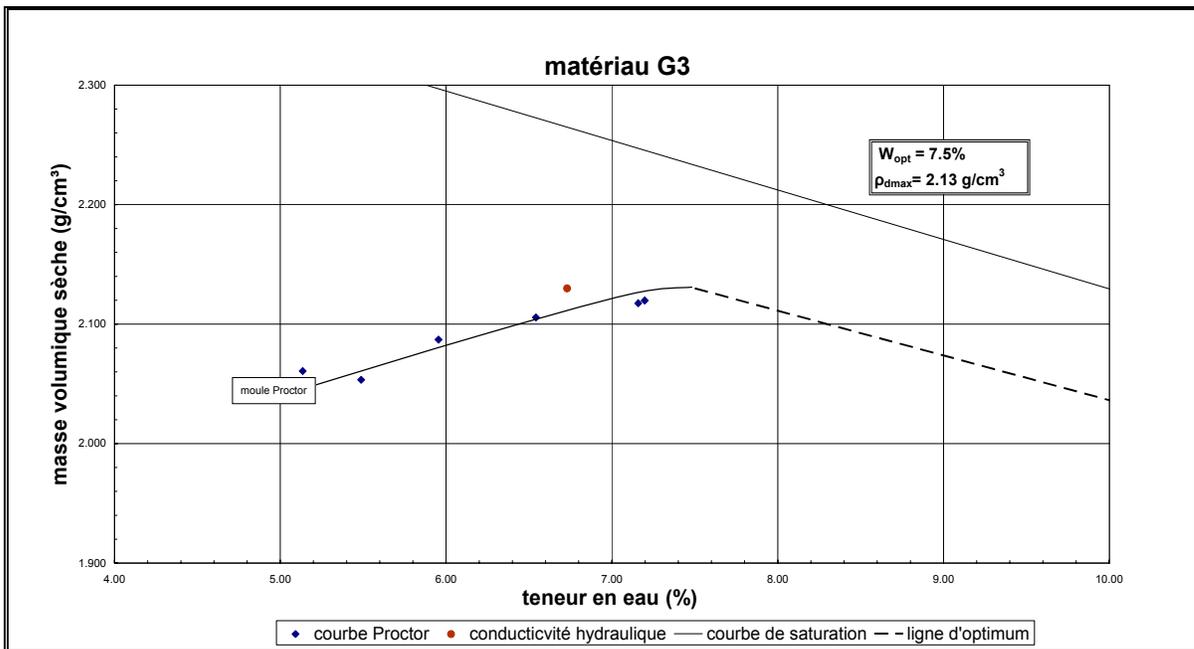


Figure 49. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G3

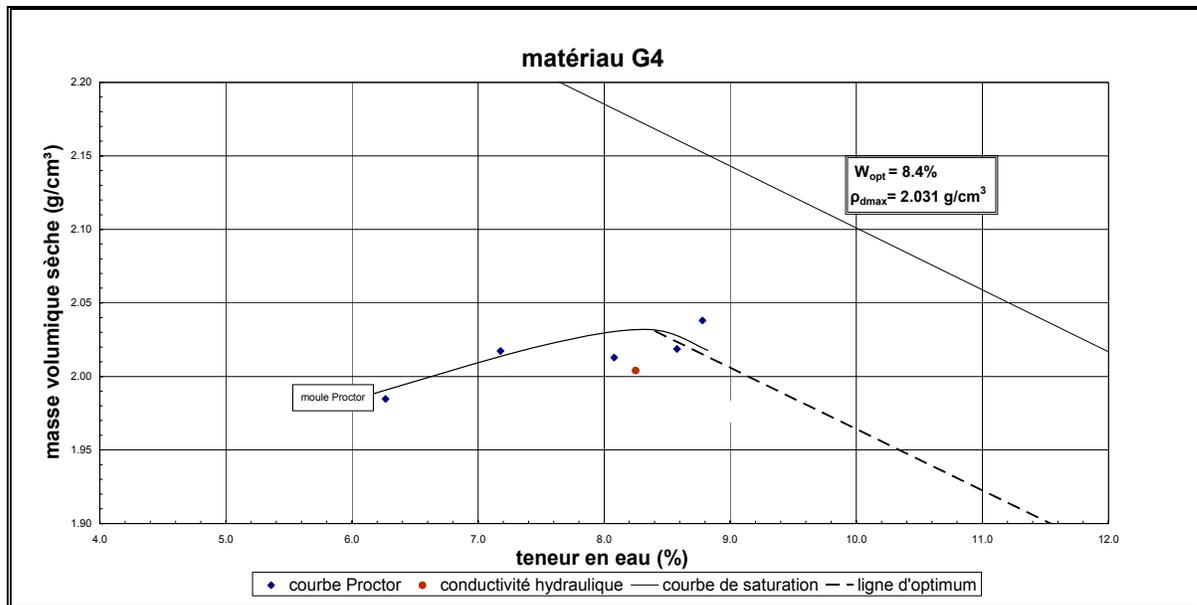


Figure 50. Positionnement des masses volumiques obtenues pour l'essai de conductivité hydraulique à une teneur en eau inférieure à la teneur optimale. Matériau G4

## 6.2 Influence des caractéristiques de compactage sur la structure des matériaux granulaires.

Il est généralement admis que la structure engendrée par le compactage des sols dépend de l'énergie de compactage, de la méthode de compactage, de la nature du sol ainsi que de sa teneur en eau. Dans le cas de sols cohérent, des études ont démontré que les principaux éléments qui influencent la structure du sol sont la teneur en eau et l'énergie de compactage. Une augmentation de la teneur en eau du sol ainsi qu'une plus grande énergie de compactage entraînent une orientation des particules plus accentuée. L'influence de ces facteurs sur l'orientation des particules est visible lorsque l'on met en rapport la teneur en eau du sol compacté et la teneur en eau optimale.

Ce rapport permet de situer les échantillons compactés à une même énergie de compactage du côté sec de l'optimum, du côté humide de l'optimum, près de l'optimum ou à l'optimum de la courbe de compactage. Du côté sec de l'optimum, les échantillons présentent une structure moins homogène que celle des échantillons situés du côté humide de l'optimum, où l'orientation des particules est plus marquée. Cette structuration sera aussi affectée par l'énergie de compactage; lorsqu'un sol, compacté à une teneur en eau constante, est soumis

à différentes énergies de compactage, ses particules auront une plus forte tendance à présenter une orientation plus accentuée à mesure que cette énergie sera plus élevée (Holtz et Kovacs 1991).

Ce phénomène de structuration a aussi été observé dans le cadre de l'étude sur un till du Nord du Québec réalisée par Watabe Y. *et al.* (2000). Cette étude a montré que les conditions de compactage ont une influence significative sur la distribution de la taille des pores qui se reflète dans les paramètres hydrauliques du sol. Les auteurs ont également démontré que cette distribution est directement liée au degré de saturation au moment du compactage. Lorsque les échantillons sont compactés à un degré de saturation inférieur au degré de saturation à l'optimum, les sols compactés présentent une macroporosité. Lorsque le degré de saturation est supérieur au degré de saturation à l'optimum, la structure de l'échantillon est plus homogène et ses pores sont plus petits. Grâce à leurs observations, ces mêmes auteurs ont conclu qu'« il existe une relation simple entre la distribution de la taille des grains et la distribution de la taille des pores quand le sol a une structure homogène et que les particules sont distribuées de manière aléatoire ». Cependant, cette relation simple n'existerait pas lorsque la structure présente une certaine macroporosité.

On peut donc s'attendre à ce que la structure des matériaux granulaires compactés dépende des conditions de compactage. Il est généralement admis que l'énergie de compactage appliquée influence la valeur de la masse volumique du matériau compacté. Cette masse volumique, ainsi que la teneur en eau à laquelle les matériaux ont été compactés, jouent donc un rôle important dans la structure des matériaux granulaires reconstitués. Si l'on considère que dans ces matériaux, il existe la même relation simple entre la distribution des diamètres des pores et la distribution du diamètre des grains que dans le cas de tills, on peut affirmer que, du côté humide de la courbe de compactage, le matériau présentera une structure plus homogène dans laquelle la dimension des pores sera plus petite. Par contre, lorsque les conditions de compactage se situeront du côté sec de l'optimum, le matériau présentera une macroporosité. La figure 51 présente le schéma d'une structure que peut posséder un matériau granulaire, lorsqu'il est compacté du côté humide ou du côté sec de la courbe de compactage. La structure du matériau compacté à une énergie de compactage plus élevée y est aussi illustrée.

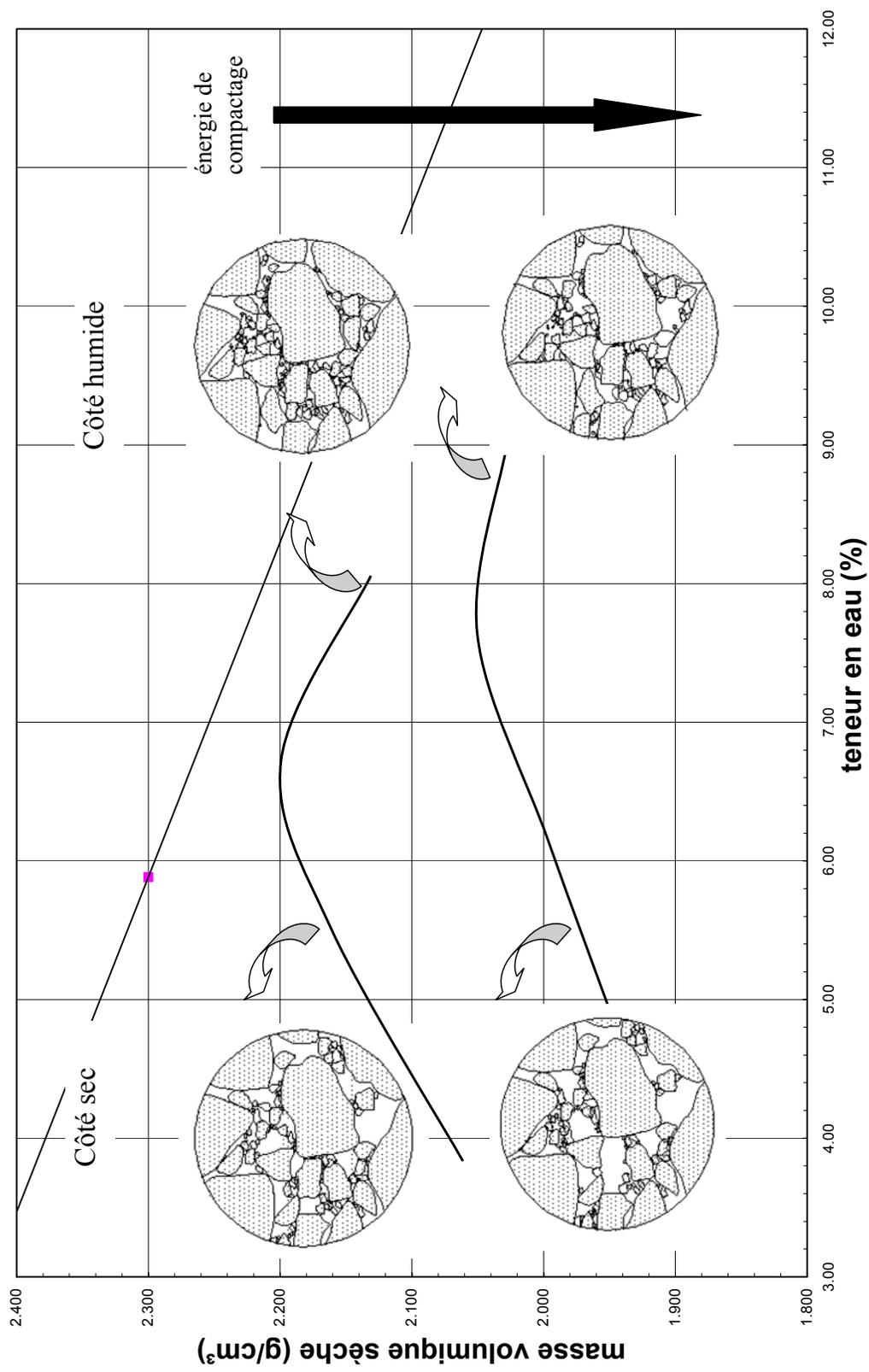


Figure 51. Schéma de la structure obtenue pour des matériaux granulaires compactés selon l'influence des conditions de compactage

### **6.3 Influence des conditions de compactage sur les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires.**

Il est généralement admis que la structure de l'arrangement des particules influence les paramètres hydrauliques d'un matériau et que cela est influencé par les conditions de compactage. Comme mentionné précédemment, le rapport entre la teneur en eau lors du compactage et la teneur en eau optimale permet d'apprécier la variation de la structure des matériaux granulaires compactés. Cette variation entraîne une distribution de la taille des pores différente selon le côté de l'optimum de la courbe de compactage qui se reflète dans les paramètres hydrauliques du matériau.

Les tills sont constitués d'argile, de sable et de gravier, ce qui en fait l'un des sols qui se rapprochent le plus des matériaux granulaires. L'influence des conditions de compactage sur les paramètres hydriques devrait donc être semblable pour les deux types de sols. Dans leur étude sur un till du Nord du Québec, Watabe Y. *et al.* (2000) ont établi l'influence de ces conditions sur la conductivité hydraulique et sur la CCRE en faisant varier les conditions de compactage sur un matériau similaire possédant la même granulométrie. Dans le cas de la conductivité hydraulique, cette influence est illustrée par les figures 52 et 53. La figure 53, qui présente les différentes conductivités hydrauliques en fonction du degré de saturation, permet de constater que la conductivité hydraulique décroît d'environ deux ordres de grandeur lorsque le degré de compactage est supérieur au degré de saturation à l'optimum. Les échantillons H-04 et H-10, montrés comme étant du côté sec de l'optimum par la figure 52, ont été compactés à un degré de saturation différent. Ces échantillons présentent une valeur de conductivité hydraulique différente, comme le montre la figure 53. Cette différence de conductivité hydraulique est due à une variation dans la macroporosité des échantillons. Du côté sec de la courbe de compactage Proctor, la conductivité hydraulique varie significativement avec les variations du degré de saturation dues au changement dans les diamètres des pores. Cette variation est moins importante à mesure que le degré de saturation approche du degré de saturation à l'optimum (voir fig. 53). Dans le cas des paramètres de la CCRE, ce phénomène a aussi été observé. La figure 54 illustre les conditions initiales de compactage des échantillons utilisés pour la détermination des CCRE, alors que les CCRE sont illustrées à la figure 55. Grâce à ces

figures, on peut observer que la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et l'indice de distribution de la dimension des pores ( $\lambda$ ) sont affectés par les conditions de compactage. Ainsi, la valeur de  $\psi_a$  est plus élevée pour les échantillons qui se situent sur le côté humide de la courbe de compactage, tandis que les échantillons situés du côté sec de l'optimum ont une valeur  $\psi_a$  plus faible. On peut aussi remarquer que la valeur de  $\lambda$  présente une variation reflétant un changement dans la distribution des pores.

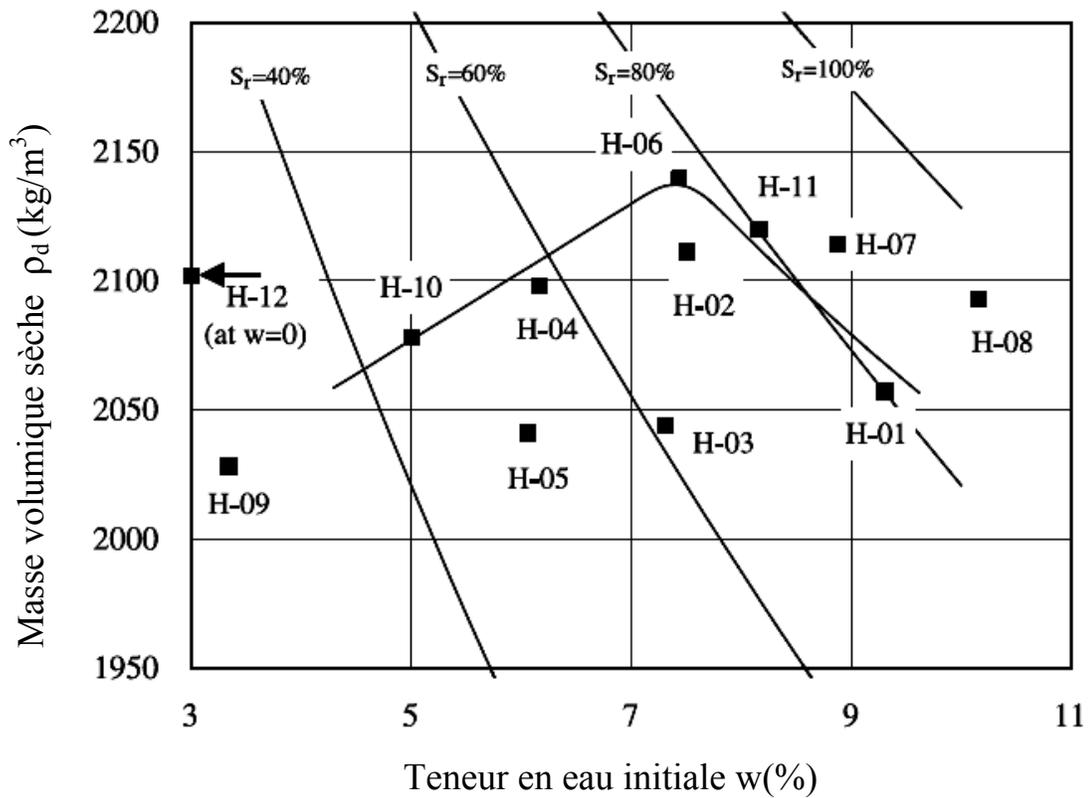


Figure 52 Courbe de compactage et conditions initiales de compactage pour les essais de conductivité hydraulique horizontale (modifié de Watabe Y. *et al* 2000)

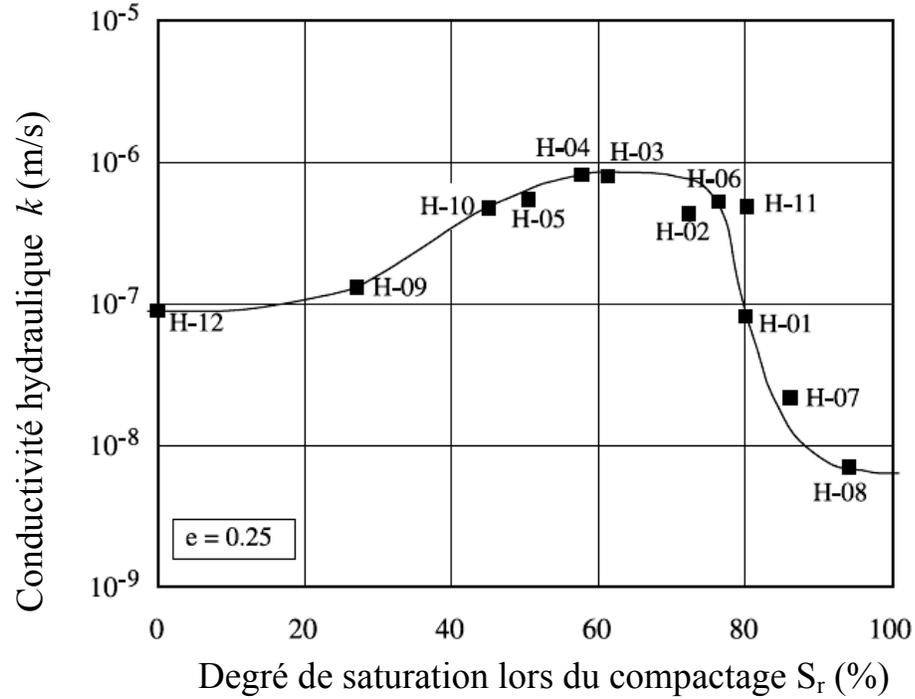


Figure 53. Conductivité hydraulique horizontale en fonction du degré de saturation et de l'indice des vides de 0.25 (modifié de Watabe Y. *et al* 2000)

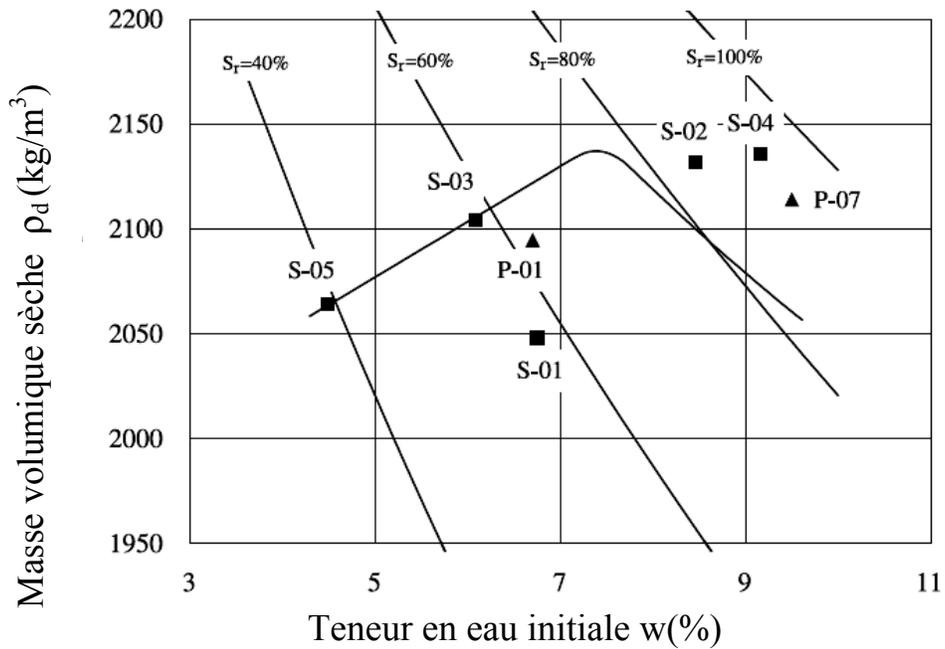


Figure 54. Conditions de compactage initiales pour les essais de succion (CCRE) (modifié de Watabe Y. *et al* 2000)

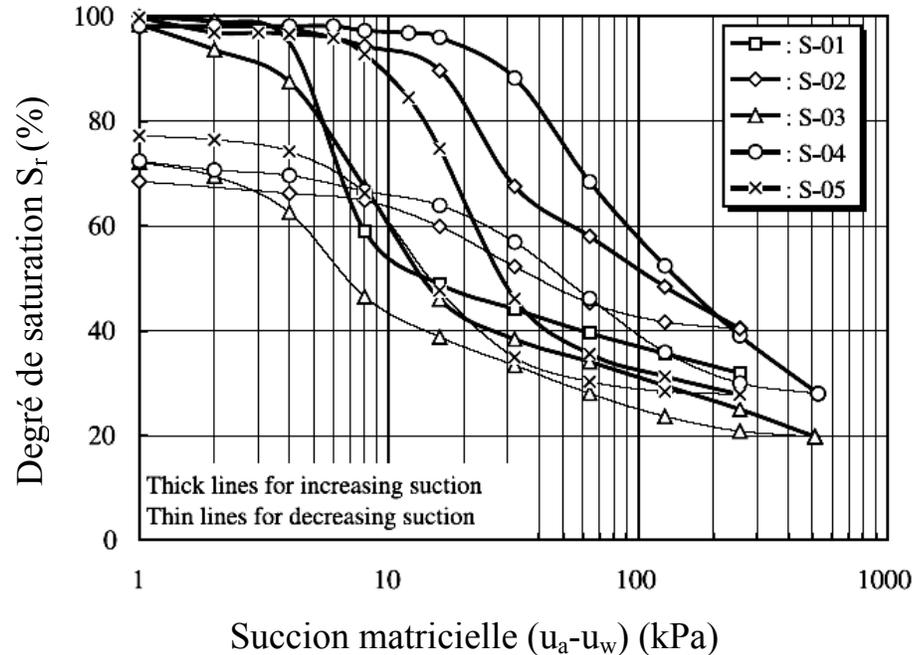


Figure 55. Courbes de rétention d'eau (modifié de Watabe Y. *et al* 2000)

Le phénomène remarqué dans le till du Nord du Québec peut aussi être observé dans les matériaux granulaires MG-20. Par conséquent, on peut penser que les conditions de compactage vont aussi influencer les valeurs de la conductivité hydraulique, de la pression d'entrée d'air et de l'indice de distribution de la dimension des pores pour ces matériaux. Donc, on peut s'attendre à ce que les échantillons situés du côté sec de la courbe, présentant une macroporosité, auront des valeurs de conductivité hydraulique plus élevées et une pression d'entrée d'air plus faible que les échantillons situés du côté humide.

Afin d'évaluer l'influence des conditions de compactage sur les paramètres hydrauliques des matériaux granulaires, on a déterminé le rapport entre la teneur en eau de compactage et la teneur en eau optimale à la même énergie de compactage ( $w/w_{opt}$ ) des échantillons utilisés pour la détermination de la conductivité hydraulique et de la CCRE. Ce rapport, ainsi que les valeurs de conditions initiales et optimales des essais, sont présentés dans le tableau 10. Au tableau 11, sont montrées les conditions de compactage initiales des échantillons supplémentaires qui ont été reconstitués afin de déterminer la conductivité hydraulique du côté sec de l'optimum. Ces matériaux sont le G2B, le G1, le G3 et le G4. Pour faciliter l'interprétation des résultats, ils ont été identifiés comme étant du côté sec.

Les tableaux 10 et 11 montrent que les échantillons pour la détermination de la conductivité hydraulique des matériaux reconstitués G2B, G1, G4, G5, GA, GC, GD, GE présentent un rapport  $w/w_{opt}$  environ égal à 1, ce qui signifie que ces matériaux se trouvent proche de l'optimum de la courbe Proctor. Dans le cas du matériau G3, voir tableau 10, et des matériaux G2B, G1 et G4 reconstitués du côté sec, voir tableau 11, le rapport  $w/w_{opt}$  a une valeur d'environ 0.95. Pour le matériau G3 côté sec, voir tableau 11, le rapport est d'environ 0.90. Ce rapport permet d'analyser les effets de la macroporosité, due au compactage, sur la conductivité hydraulique. Ainsi, en comparant les deux échantillons du matériau G3 on peut remarquer que l'échantillon avec un rapport  $w/w_{opt}$  d'environ 0.90 présente une conductivité hydraulique plus élevée de  $1.02^E-05$  (m/s). Si on distingue de la même manière les conditions initiales des échantillons utilisés pour la détermination de la CCRE, on peut remarquer que le rapport d'environ 0.90 est atteint par les échantillons des matériaux G1, G3, GC, GD et GE alors que le rapport d'environ 0.95 est atteint par les échantillons G4, G5 et GA. Dans le cas du matériau G2B, le rapport est d'environ 0.93. Finalement, on peut remarquer que lorsqu'on est du côté sec de l'optimum, la conductivité hydraulique est plus élevée.

Tableau 10. Conditions initiales de compactage pour les matériaux granulaires reconstitués pour la détermination de la conductivité hydraulique

		Granulométrie									
		G2B	G1	G3	G4	G5	GA	GC	GD	GE	
conditions à l'optimum	$w_{opt}$ (%)	5.800	5.200	7.500	8.400	8.800	5.900	5.230	6.680	7.000	
	$\rho_d$ max (g/cm <sup>3</sup> )	2.220	2.290	2.130	2.031	1.890	2.220	2.190	2.145	2.130	
	$S_{opt}$	0.750	0.818	0.778	0.713	0.569	0.763	0.637	0.729	0.737	
	$w_{opt}$ (%)	6.200	5.500	8.130	9.530	10.080	6.460	6.780	7.250	7.810	
	$\rho_d$ max (g/cm <sup>3</sup> )	2.198	2.280	2.110	1.990	1.835	2.185	2.130	2.140	2.090	
	$S_{opt}$	0.758	0.840	0.807	0.745	0.591	0.764	0.714	0.782	0.751	
conditions de compactage des échantillons	$w$ (%)	5.960	5.390	7.240	8.450	8.970	5.890	5.230	6.680	7.170	
	$pd$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.198	2.291	2.118	2.028	1.859	2.222	2.155	2.137	2.112	
	$S_r$	0.728	0.851	0.731	0.713	0.549	0.766	0.584	0.715	0.725	
	$w/w_{opt}$	1.028	1.037	0.965	1.006	1.019	0.998	1.000	1.000	1.024	
	$w$ (%)	5.750	5.010	7.440	8.960	9.560	6.070	6.090	6.630	7.020	
	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.174	2.245	2.090	1.978	1.821	2.165	2.130	2.126	2.071	
CCRE	$S_r$	0.662	0.693	0.706	0.684	0.547	0.684	0.641	0.692	0.648	
	$w/w_{opt}$	0.927	0.911	0.915	0.940	0.948	0.940	0.898	0.914	0.899	

Tableau 11 . Conditions initiales de compactage pour les échantillons supplémentaires reconstitués pour déterminer des conductivités hydrauliques du côté sec de l'optimum.

			Granulométrie côté sec			
			G2B	G1	G3	G4
conditions de compactage	<i>k</i>	w(%)	5.410	5.080	6.730	8.250
		$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.206	2.266	2.129	2.004
		S <sub>r</sub>	0.674	0.746	0.698	0.663
		w/w <sub>opt</sub>	0.933	0.977	0.897	0.982

Il est important de souligner que même si le rapport  $w/w_{opt}$  des échantillons utilisés pour la détermination de la conductivité hydraulique a la même valeur que pour les échantillons utilisés pour déterminer la CCRE, les échantillons ne sont pas sur la même courbe de compactage puisqu'ils ont été compactés à des énergies de compactage différentes. Par conséquent, les corrélations entre la conductivité hydraulique et les paramètres qui caractérisent la CCRE - la pression d'entrée d'air et l'indice de la distribution des pores - ne peuvent pas s'évaluer. Par contre, il a été possible d'évaluer les relations entre les paramètres précédents et la structure des échantillons, car la même énergie de compactage a été conservée lors des essais.

#### 6.4 Détermination des relations empiriques entre les paramètres hydrauliques et la structure des matériaux.

Les relations empiriques entre les paramètres hydrauliques et la structure des matériaux granulaires ont été établies en tenant compte du concept de porosité de la fraction fine ( $n_f$ ), défini par Côté et Konrad (2003) dans leur modèle de porosité pour les matériaux bien gradés avec fines. Ce modèle a été décrit au chapitre 2. Il identifie les particules grossières comme étant les particules de diamètre supérieur à 80 $\mu$ m ( $d > 80\mu$ m) et les particules fines comme celles de diamètre inférieur à 80 $\mu$ m ( $d < 80\mu$ m). Les auteurs de ce modèle affirment que l'espace disponible pour l'écoulement d'eau est réduit par l'addition de

particules fines à l'intérieur des macropores. Ces derniers se définissent comme l'espace compris entre les particules grossières. Comme nous avons établi précédemment, ces espaces, permettant de définir la structure des matériaux, sont fortement influencés par les conditions de compactage. La porosité de la fraction de fines a aussi été utile pour l'analyse de l'influence des particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ ) sur les paramètres hydrauliques. Par conséquent, les paramètres obtenus lors des essais de conductivité hydraulique et de CCRE ont été dessinés en fonction de la valeur  $n_f$  des échantillons.

#### **6.4.1 Relation entre la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).**

D'après les équations 15 et 29, on peut établir des relations entre la pression d'entrée d'air et la porosité de la fraction fine.

La figure 56 illustre les valeurs de pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et de porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) obtenues pour les matériaux granitiques reconstitués. Ces données permettent d'observer trois corrélations linéaires entre les résultats de  $\psi_a$  et de  $n_f$ . La première corrélation linéaire concerne les matériaux dont le pourcentage de fines se situe entre 16% et 36% et le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) entre 43 et 50. La deuxième corrélation s'observe dans les matériaux ayant un pourcentage de fines entre 5% et 10% et un  $C_u$  entre 24 et 94, alors que la dernière est présente dans les matériaux dont le pourcentage de fines se situe entre 7% et 8% et le  $C_u$  entre 7 et 13.

Ces corrélations montrent une diminution de  $\psi_a$  lorsque le paramètre  $n_f$  est augmenté. Ce comportement s'explique par le fait que le paramètre  $n_f$ , déterminé à l'aide des paramètres  $n$  et %F, reflète l'effet du pourcentage des particules fines sur la valeur  $\psi_a$ . De la même manière, les corrélations établies permettent aussi d'observer l'influence des caractéristiques granulométriques sur  $\psi_a$  dans des matériaux placés du côté sec de l'optimum. Dans le cas des matériaux qui possèdent un  $C_u$  entre 7 et 13, on peut remarquer qu'ils présentent la valeur  $\psi_a$  la plus élevée pour une valeur  $n_f$  donnée. Ces matériaux, qui sont les plus uniformes, ont un diamètre de pores plus petit que celui des matériaux moins uniformes, possédant le même pourcentage de particules fines. Ce phénomène est visible avec le diamètre des particules correspondant à 50% de passant ( $D_{50}$ ) et est attribuable à

une granulométrie peu étalée. Ces matériaux, moins influencés par les particules fines, présentent donc une microporosité qui rend la valeur de  $\psi_a$  plus élevée. Grâce à la figure 56, on peut aussi constater que les matériaux qui possèdent entre 16% et 36% de particules fines et un  $C_u$  entre 43 et 50 présentent une valeur de  $\psi_a$  plus faible, ce qui signifie une macroporosité plus élevée. Cette augmentation de la macroporosité s'explique par le fait que les échantillons ont été compactés à des teneurs en eau plus faibles que la teneur en eau optimale. De plus, le compactage du côté sec de l'optimum combiné à un pourcentage élevé de particules fines a provoqué l'agrégation des particules fines. Ce phénomène a entraîné des macropores plus grands ce qui a engendré une plus faible valeur de  $\psi_a$  pour une valeur  $n_f$  donnée.

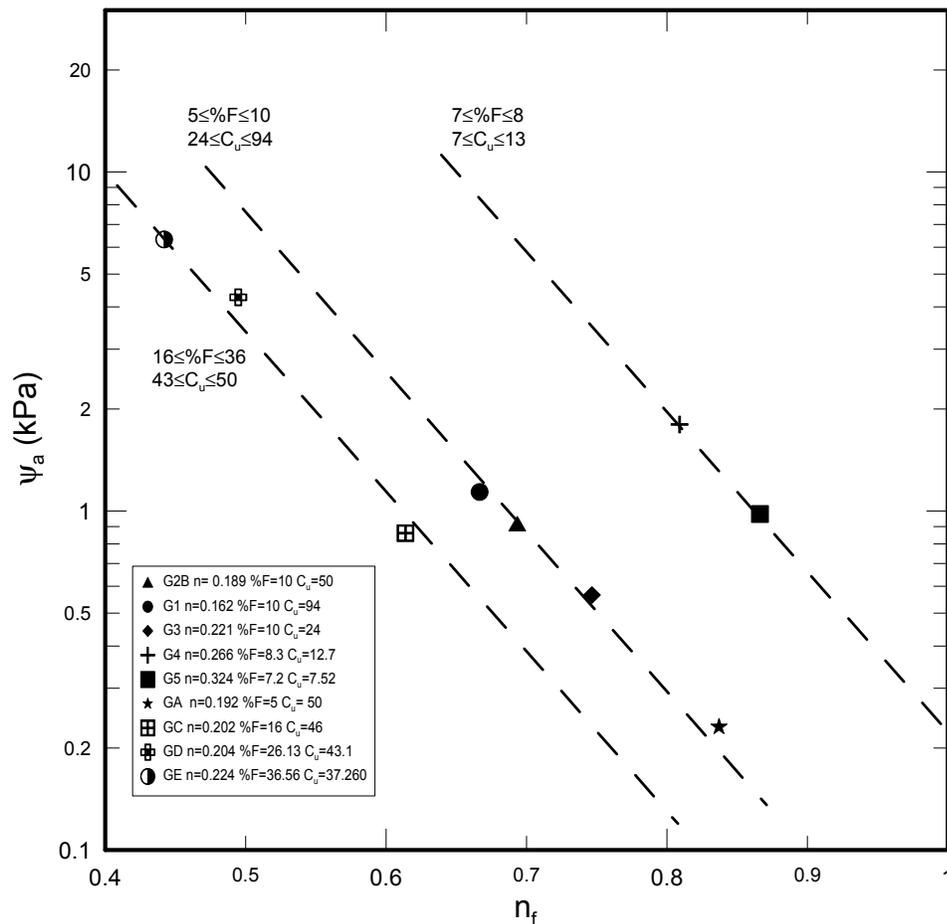


Figure 56. Valeurs de pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) en fonction de la porosité de la fraction fine ( $n_f$ )

Une relation entre la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) et la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) des matériaux granulaires MG-20 a déjà été proposée par Côté et Konrad (2003). Cette relation a été établie pour des matériaux MG-20 compactés à la teneur en eau optimale du Proctor modifié. Pour leurs recherches, ces auteurs ont utilisés des matériaux granitiques dont le  $C_u$  varie entre 19.2 et 62.5 et dont le pourcentage de particules fines varie entre 3.8% et 13%. Les matériaux reconstitués G2B, G1, G3 et GA, qui font parti du réseau MG-20, présentent des caractéristiques granulométriques similaires aux matériaux utilisés par Côté et Konrad (2003). À partir des résultats obtenus dans le cadre de cette étude, on a établi une relation entre la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ) et la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) des matériaux MG-20. Cette relation est présentée à la figure 57 avec la relation Côté et Konrad (2003).

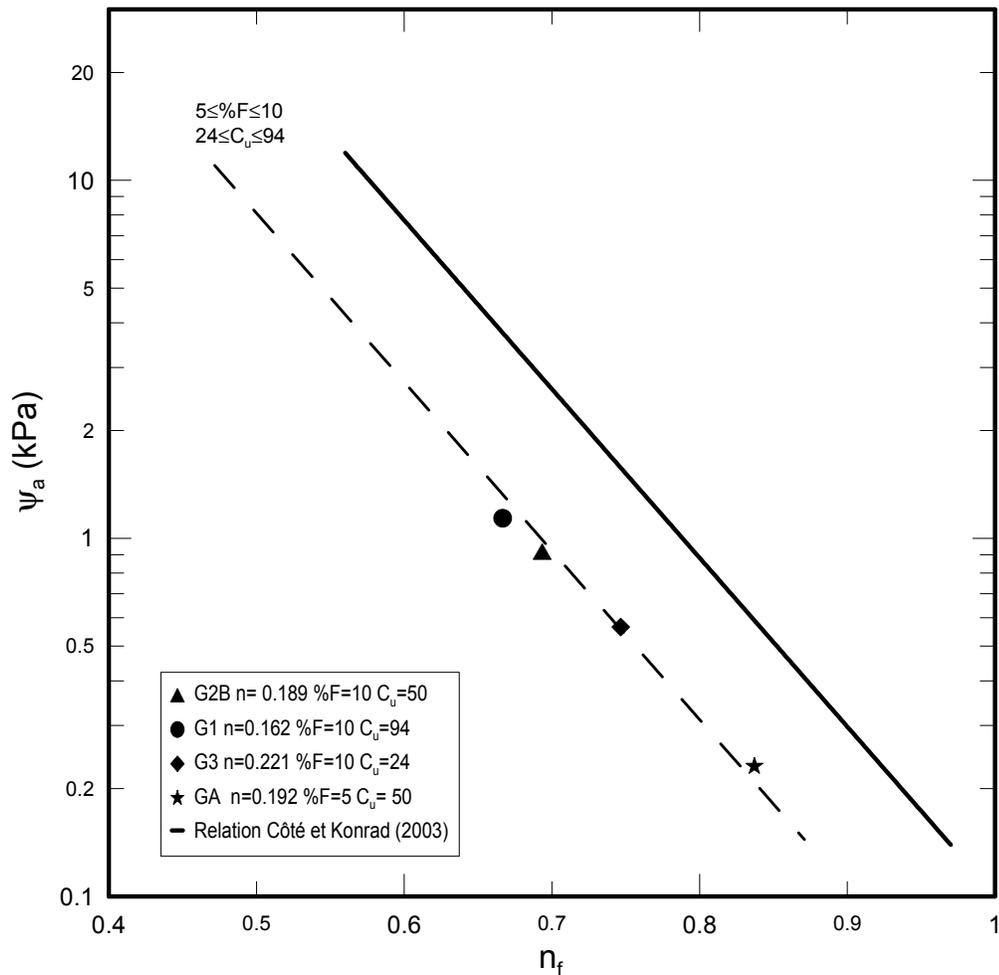


Figure 57. Relation entre la pression d'entrée d'air ( $\psi_a$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ )

La figure 57 permet d'observer que les deux relations présentent la même tendance. Toutefois, celle obtenue dans le cadre de la présente étude est située en dessous de la relation de Côté et Konrad (2003). Ce positionnement est dû à la diminution de  $\psi_a$  causée par les conditions de compactage des échantillons. En effet, les matériaux reconstitués ont été compactés dans le côté sec de l'optimum avec une énergie de compactage plus faible que l'énergie Proctor utilisée par Côté et Konrad (2003) lors du compactage de leurs matériaux. Ces conditions ont probablement causé le développement de macropores dans l'arrangement de particules, ce qui a produit le décalage vers le bas de la relation  $\psi_a-n_f$ . On peut constater que l'effet des conditions initiales de compactage sur le paramètre  $\psi_a$  de matériaux granulaires est en accord avec le comportement du till du Nord du Québec décrit par Watabe *et al.* (2000).

#### **6.4.2 Relation entre la conductivité hydraulique saturée ( $k_{sat}$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ).**

Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues lors de cette étude, ont été déterminées à partir de matériaux reconstitués qui présentaient différents rapport  $w/w_{opt}$  ainsi que différents degré de saturation de compactage ( $S_r= 50$  à  $100$ ). En conséquent, les pores de ces matériaux présentaient une variation de la quantité d'eau, ce qui rend l'établissement d'une relation directe entre les résultats de la conductivité hydraulique et de la porosité de la fraction fine difficile. Ce constat et la volonté de mettre en relation les différentes conductivités hydrauliques, ont rendu nécessaire la normalisation des résultats à une conductivité hydraulique déterminée avec le même pourcentage de saturation. Le modèle Brooks et Corey (1964) a été utilisé à cette fin. Ce modèle est représenté par les équations 19 et 20. Il permet d'établir la conductivité hydraulique de matériaux en conditions saturées. Ce modèle, utilisé pour l'analyse de la conductivité hydraulique des matériaux en conditions partiellement saturées, est celui qui convient le mieux pour des matériaux de fondations de chaussées (Côté et Konrad 2003). Il permet d'évaluer la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau volumique( $\theta$ ) ou de la succion matricielle ( $\psi$ ).

Les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation ainsi calculées ( $k_{sat}$ ) sont montrées au tableau 12. Pour faire le calcul de  $k_{sat}$ , il est nécessaire de connaître la valeur de l'indice

de distribution de la dimension des pores en conditions saturées ( $\lambda$ ). Cette valeur a été déterminée à partir des caractéristiques granulométriques des matériaux ainsi que des conditions initiales de saturation identifiées lors de la détermination de la CCRE. Dans le cas des matériaux qui présentaient des caractéristiques similaires aux matériaux évalués par Côté et Konrad (2003), - c'est-à-dire les matériaux G2B, G1, G1 côté sec et G3 côté sec -  $\lambda$  en conditions saturées a été calculée à l'aide de la relation établie par ces mêmes auteurs. Cette relation est :  $\lambda = 0.385 - 0.021 n_f^{0.65} S_{sf}$ , où  $S_{sf}$  est la surface spécifique des fines. Pour les autres matériaux, G4, G4 côté sec, G5, GD et GE, qui présentaient un degré de saturation ( $S_r$ ) inférieur à  $S_{ropt}$  et des caractéristiques granulométriques différentes des matériaux évalués par Côté et Konrad (2003), le calcul de  $k_{sat}$  a été effectué en utilisant la valeur de  $\lambda$  obtenue lors la détermination de la CCRE. Cette valeur de  $\lambda$  a été utilisée, car ces matériaux présentent un degré de saturation proche à  $S_{ropt}$ , ce qui indique que la variation de  $\lambda$  est faible.

Tableau 12 Calcul de la conductivité hydraulique saturée pour les matériaux granulaires reconstitués

	$k$ (m/sec)	$S_r$	$\lambda$	$\theta = V_w/V_t$	$\theta_s = V_v/V_t$	$\lambda$ utilisé pour le calcul	$\delta=(2+3\lambda)/\lambda$	$k_{sat}=k/(\theta/\theta_s)^\delta$ (m/sec)
<b>G2B</b>	8.18E-07	0.84	0.252	0.151	0.180	0.354	8.642	3.80E-06
<b>G2B sec</b>	5.12E-06	1.00	0.252	0.181	0.177	0.252	10.937	5.12E-06
<b>G1</b>	1.23E-06	0.95	0.279	0.137	0.145	0.356	8.617	1.97E-06
<b>G1 sec</b>	1.07E-06	0.82	0.279	0.127	0.154	0.356	8.625	5.81E-06
<b>G3</b>	1.64E-05	1.00	0.222	0.220	0.210	0.222	12.009	1.64E-05
<b>G3 sec</b>	1.02E-05	0.85	0.222	0.174	0.205	0.353	8.660	4.26E-05
<b>G4</b>	4.55E-06	0.96	0.590	0.231	0.240	0.590	6.390	5.85E-06
<b>G4 sec</b>	6.55E-06	0.77	0.590	0.192	0.249	0.590	6.390	3.49E-05
<b>G5</b>	2.96E-05	0.99	0.500	0.299	0.304	0.350	8.717	3.35E-05
<b>GA</b>	1.96E-05	1.00	0.360	0.174	0.171	0.360	8.556	1.96E-05
<b>GC</b>	5.30E-07	1.00	0.234	0.204	0.193	0.234	11.547	5.30E-07
<b>GD</b>	6.57E-08	0.91	0.310	0.182	0.200	0.310	9.452	1.61E-07
<b>GE</b>	4.03E-08	0.98	0.320	0.204	0.209	0.320	9.250	4.94E-08

Granulométrie

À partir des valeurs de  $k_{sat}$  et de la porosité de la fraction fine  $n_f$ , on a établi trois relations empiriques pour les matériaux granulaires reconstitués d'origine granitique. Celles-ci présentent un rapport de  $w/w_{opt}$  de 0.90 à 1 et sont montrées à la figure 58. Sur cette figure, on peut constater que la valeur de  $k_{sat}$  est fonction de  $n_f$  et est influencée par les conditions initiales de compactage. L'influence de ces dernières est reflétée par le décalage observé entre les relations obtenues par les résultats qui présentaient une valeur de rapport  $w/w_{opt}$  différent.

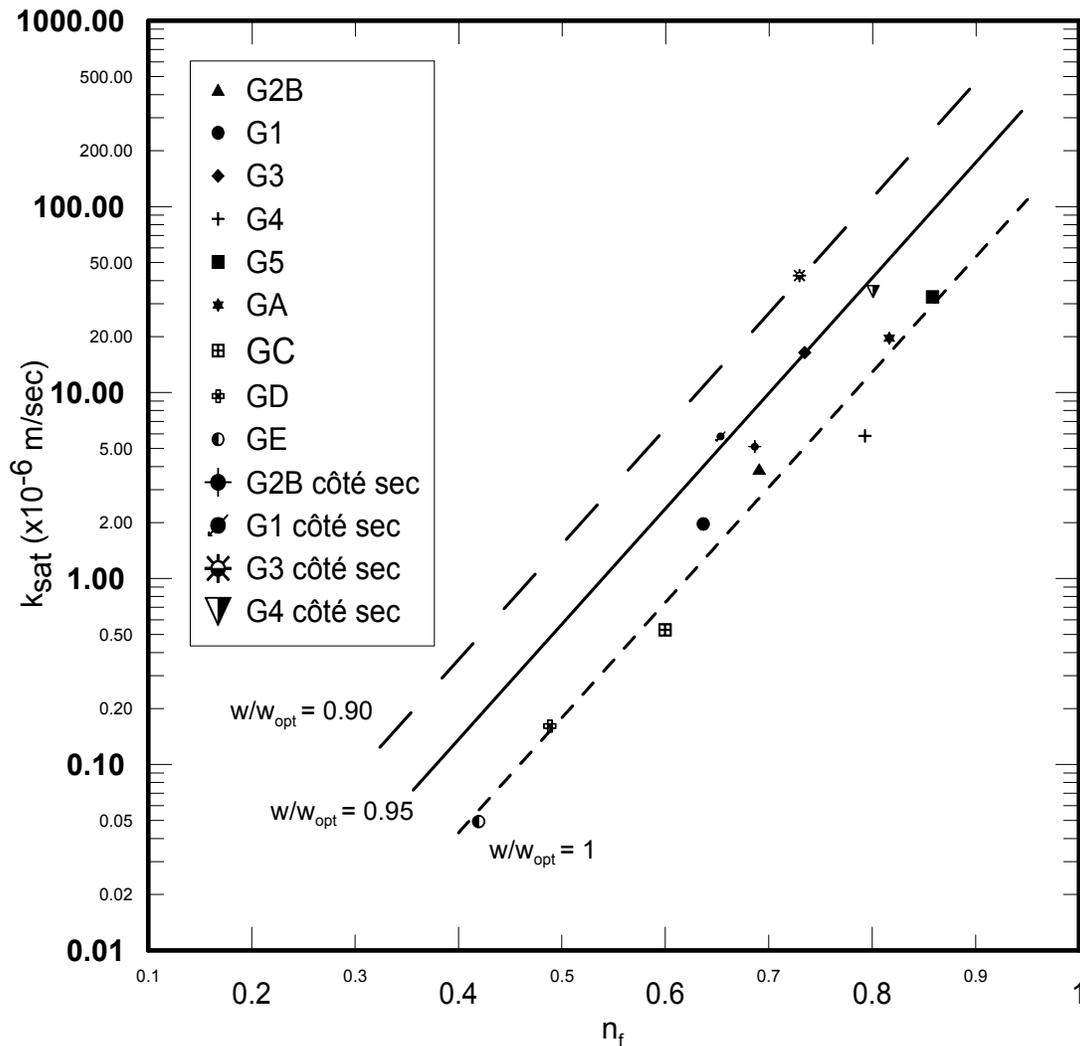


Figure 58. Relation entre la conductivité hydraulique en conditions saturées ( $k_{sat}$ ) et la porosité de la fraction fine ( $n_f$ )

Les matériaux reconstitués qui présentent un rapport  $w/w_{opt}$  égal à un, c'est-à-dire qui ont été compactés à la teneur en eau optimale, obtiennent la valeur de  $k_{sat}$  la plus faible pour une valeur de  $n_f$  donnée. Pour les matériaux avec un rapport de 0.95, on remarque que la valeur de conductivité hydraulique en conditions saturées commence à augmenter. Cette augmentation est due au fait que ces matériaux ont été compactés dans le côté sec de l'optimum et présentent donc une macroporosité qui permet à l'eau de s'écouler plus facilement, ce qui rend la valeur de la conductivité hydraulique saturée plus élevée. La même situation est observable pour le matériau compacté G3 côté sec qui présente un rapport  $w/w_{opt}$  d'environ 0.90. Ce matériau possède une plus grande macroporosité que les matériaux avec un rapport  $w/w_{opt}$  d'environ 0.95. L'effet de cette plus grande macroporosité peut être observé lorsque l'on compare la valeur de la conductivité hydraulique saturée obtenue pour cet échantillon avec la valeur obtenue pour le même matériau (G3) compacté à une teneur en eau plus élevée.

La figure 58 montre que les relations  $k_{sat} - n_f$  obtenues pour les trois rapports ( $w/w_{opt}$ ) ont la même tendance. Cependant, le décalage entre celles-ci montre que lorsqu'on compacte à différentes teneur en eau, et ce, même si le compactage est effectué dans le côté sec de l'optimum, la macroporosité peut changer en faisant varier par la même occasion la conductivité hydraulique saturée. On peut donc affirmer que les conditions de compactage reflétées dans le rapport  $w/w_{opt}$  acquièrent une grande importance pour la détermination de la conductivité hydraulique saturée des matériaux granulaires. Ce rapport ( $w/w_{opt}$ ) peut faire varier la valeur de  $k_{sat}$  d'un demi à un ordre de grandeur si on le compare avec le rapport à l'optimum,  $w/w_{opt} = 1$ . Il est important de souligner que les résultats de conductivité hydraulique du till du Nord du Québec, décrit par Watabe *et al.* (2000), montrent une diminution de deux ordres de grandeur pour un  $w/w_{opt} > 1$ . Cependant, pour un rapport  $w/w_{opt} < 1$ , la conductivité hydraulique diminue d'un ordre de grandeur.

## Conclusion

La présente étude a porté sur l'effet des caractéristiques granulométriques et des conditions de compactage sur les propriétés hydriques des matériaux granulaires d'origine granitique. La conductivité hydraulique ainsi que la courbe caractéristique de rétention d'eau (CCRE) ont été déterminées pour neuf granulométries reconstituées à l'aide du fuseau granulométrique pour des matériaux de fondations routières MG-20 recommandé par le ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces granulométries, établies à partir de la courbe granulométrique du haut du fuseau MG-20, ont été divisées en deux groupes. Ces derniers ont été caractérisés, d'une part, par la variation du coefficient d'uniformité et d'autre part, par la variation de la teneur en particules fines.

La conductivité hydraulique des matériaux a été déterminée à l'aide du perméamètre Proctor à charge constante. La CCRE a été déterminée grâce à l'essai de plaque de pression. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont été analysés en fonction de la porosité de la fraction fine ( $n_f$ ). À la suite de l'analyse, des relations empiriques ont été développées entre les différents paramètres hydrauliques et les caractéristiques de structure des matériaux.

La relation  $\psi_a - n_f$  établie dans la présente étude permet de caractériser les matériaux MG-20 de manière satisfaisante. Cette relation basée sur le modèle de porosité des matériaux granulaires avec fines montre que  $n_f$  est une caractéristique qui définit bien le comportement d'un matériau MG-20 en conditions partiellement saturées. La relation établie permet d'obtenir la valeur de la pression d'entrée d'air des matériaux granulaires MG-20 reconstitués avec différentes caractéristiques granulométriques à l'aide d'un calcul simple basé sur les volumes obtenus à partir du diagramme de phases du matériau. Cette relation constitue un apport important dans la caractérisation des propriétés hydrauliques des matériaux granulaires, car elle évite l'élaboration des essais de CCRE pour chaque changement de granulométrie, ce qui permet de sauver beaucoup de temps d'exécution.

Les relations  $k_{\text{sat}} - n_f$  peuvent s'appliquer à l'ensemble des courbes granulométriques étudiées en autant que le rapport  $w/w_{\text{opt}}$  soit déterminé, ce qui permet de caractériser les matériaux par leur conditions initiales de compactage.

Comme la relation précédente, le paramètre  $n_f$  présente une bonne corrélation avec la conductivité hydraulique saturée des matériaux. La conductivité hydraulique saturée est fortement influencée par les conditions initiales de compactage. Celle-ci peut diminuer d'un demi à un ordre de grandeur pour des rapports  $w/w_{\text{opt}}$  entre 0.90 et 1 par rapport à la conductivité hydraulique saturée déterminée avec des conditions de compactage à l'optimum.

Les relations établies considèrent l'influence des conditions initiales de compactage sur les paramètres hydriques des matériaux granulaires, car ces conditions influencent la structure de l'arrangement des particules. Cette influence est montrée par les relations  $k_{\text{sat}} - n_f$  obtenues à partir des échantillons compactés à l'optimum et du côté sec de la courbe de compactage du matériau. Il est donc important d'établir dans quelles conditions a été reconstitué le matériau afin de bien définir la relation à utiliser.

Les matériaux MG-20 sont mis en place sur le terrain à des conditions de compactage qui varient en fonction du rapport  $\rho_d/\rho_{\text{dmax}}$ . Conformément aux caractéristiques du matériau en place, l'entrepreneur compacte du côté humide d'optimum ou du côté sec d'optimum de la courbe de compactage. Dans les deux cas, il doit appliquer une énergie de compactage un peu plus importante afin d'obtenir un rapport  $\rho_d/\rho_{\text{dmax}} = 0.97$ . Cette augmentation dans l'énergie se traduit dans le dessin d'une nouvelle courbe de compactage, décalée vers le haut. Toutefois, le rapport  $w/w_{\text{opt}}$  est le même par les deux courbes de compactage car la variation de l'énergie n'est pas très importante et donc on peut affirmer que les courbes de compactage présentent une forme semblable. Comme on l'avait déjà vu, la variation de l'énergie de compactage va influencer les paramètres hydrauliques des matériaux. Si la teneur en eau du matériau lors du compactage a été plus faible que la teneur en eau optimale, la conductivité hydraulique de ce matériau va augmenter. Dans le cas contraire, la valeur de conductivité hydraulique va être plus faible. Donc, les relations établies, dans le

cadre de cette étude, pourront être utilisées car le rapport  $w/w_{opt}$  reflète les conditions de compactage.

Il est important de considérer l'énergie de compactage appliquée aux matériaux afin de normaliser les résultats provenant d'essais différents. Une variation de l'énergie de compactage peut entraîner un décalage de la courbe de compactage du matériau. Conséquemment, les échantillons utilisés pour la caractérisation des paramètres hydrauliques présenteront une structure différente qui affectera de manière importante les résultats des paramètres hydrauliques. Il devient alors primordial que des corrélations soient établies en se basant sur des résultats obtenus à partir d'échantillons compactés avec la même énergie de compactage.

Finalement, afin de poursuivre l'avancement des connaissances sur les relations déjà établies, il serait important de déterminer des CCRE des matériaux compactés du côté sec de l'optimum à une énergie de compactage Proctor, ainsi que du côté humide de l'optimum à l'énergie appliquée lors des essais de plaque de pression. Cela doit être fait dans l'objectif d'analyser l'influence de l'énergie de compactage sur la relation  $\psi_a - n_f$ .

## Bibliographie

- Alonso, E.E., 1998. *Suction and moisture in roadway bases and subgrades*, Granada : International Symposium on subdrainage in roadway pavements and subgrades, 1998, p. 57-104
- Bear, J., 1972a. *Dynamics of fluids in porous media*, New York: Dover Publication.
- Bear, J., 1972b. *Two-liquid flows in porous media*, advances in hydroscience, vol.6, p.142-252
- Berry, P.L. & Reid, D., traduit par Caicedo, B., 1993. *Mecánica de suelos*, Santafé de Bogotá : McGraw-Hill, 1993, 415p.
- Bieth, J.L. & Bertrand, L., 1991. *L'eau dans les chaussées et les plates-formes des routes secondaires*, Bulletin de liaison, n° 173, p.15-25.
- Bolt, G.H., 1976. *Soil physics terminology*, International Society of Soil Science, Bull.49, p. 16-22
- Brooks, R.H. & Corey, A.T., 1966. *Properties of porous media affecting fluid flow*, Journal of the irrigation and drainage division, vol. 92, n° IR2, p. 61-88
- Brooks, R.H. & Corey, A.T., 1964. *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology paper 3, Colorado State University, Fort Collins, Colo.
- Buckingham, E., 1907. *Studies on the movement of soil moisture*, U.S. Dept. Agr. Bur. Soils, Bull: 38.
- CAN/BNQ, 1983. *Granulats - Détermination de la densité et de l'absorptivité du gros granulats*, Canadian Standards Association (Ottawa, Ont.) and Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.). CAN/BNQ 2560-067-M-83
- CAN/BNQ, 1986. *Sols - Détermination de la relation teneur en eau – masse volumique – essai Proctor modifié*, Canadian Standards Association (Ottawa, Ont.) and Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.). CAN/BNQ 2501-255
- CAN/BNQ, 1987. *Sols- Analyse granulométrique des sols inorganiques*, Canadian Standards Association (Ottawa, Ont.) and Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.). CAN/BNQ 2501-025
- CAN/BNQ, 1989. *Granulats- Détermination de la densité et de l'absorptivité du granulats fin*, Canadian Standards Association (Ottawa, Ont.) and Bureau de normalisation du Québec (Québec, Que.). CAN/BNQ 2560-065-M-89

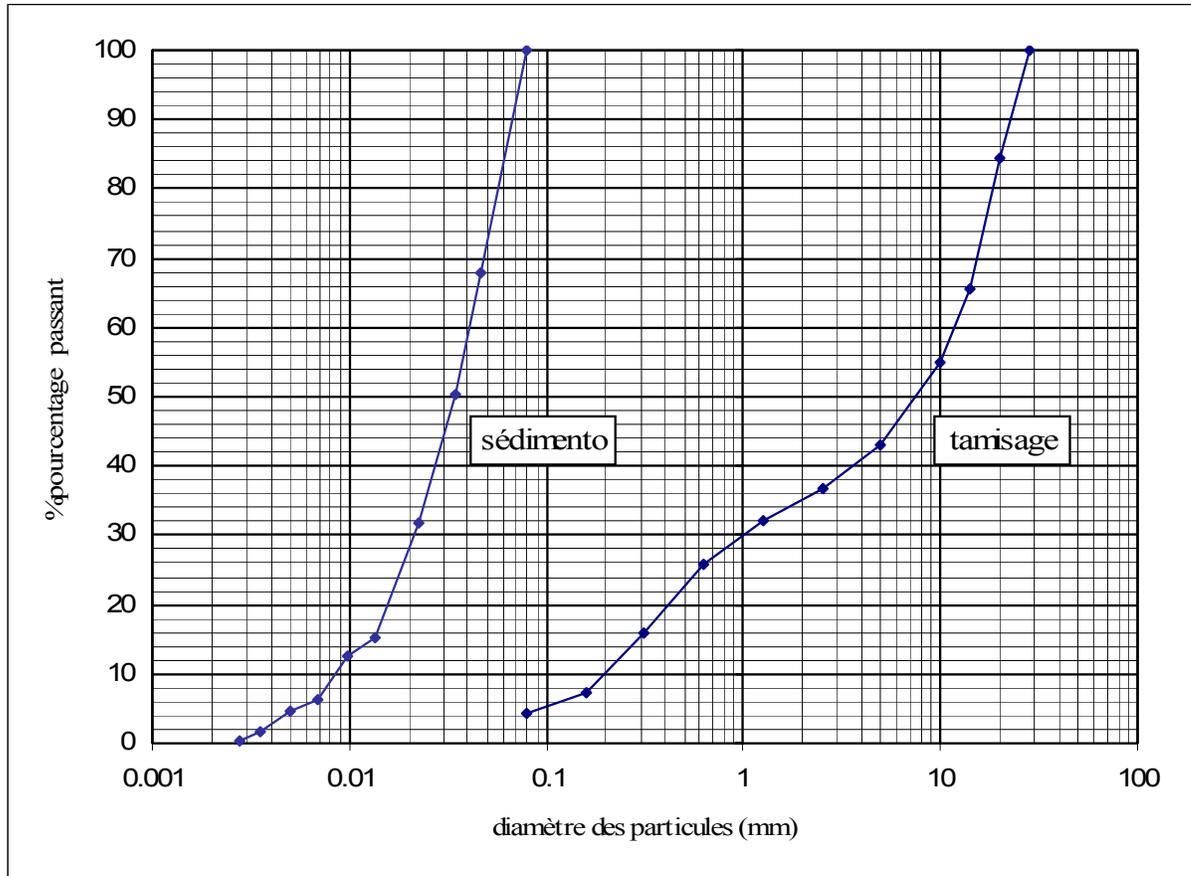
- Childs E.C. & Collis-Georges N., 1950. *The permeability of porous material*, Proc. Royal Soc. Series, A, 201, pp. 392-405.
- Chossat, J-C., 2005. *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols*, Paris : Éditions Tec & Doc, 2005, 720p.
- Cedergren, H.R., 1988. *Why all Important pavements should be well drained*, Transportations Research Record 1188, p. 56-62
- Comite local d'information et de suivi du laboratoire de Bure, Clis, *Loi de Darcy, Fondement de l'hydrogéologie des milieux poreux et fissurés continus*, Site internet visité le 10septembre 2006, disponible à : <http://www.clis-bure.com/pages/page-darcy.html>
- Côté, J., 1997. *Conductivité hydraulique de matériaux de fondations de chaussées partiellement saturés*, mémoire de maîtrise, Québec: Université Laval, 1997, 123p.
- Côté, J. & Konrad, J.-M., 2003. *Assessment of the hydraulic characteristics of unsaturated base-course materials : a practical method for pavement engineers*, Canadian Geotechnical Journal, volume 40, n° 1, February 2003, p. 121-136
- Corey, A.T., 1957. *Measurement of water and air permeability in unsaturated soil*, Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 2, p.7-10
- Coussy, O. & Fleureau, J-M., 2002. *Mécanique des sols non saturés*, Paris : Hermès Sciences PublicationsÉditions, 2002, 390p.
- Doré, G., 2004. *Géotechnique routière*, Notes de cours GCI-20482, septembre 2004.
- Flon, P. & Poulin, J.-F., 1987. *L'influence du pourcentage de particules fines sur la portance d'une chaussée à partir d'essais en laboratoire*, Ministère des Transports du Québec, études et recherches en transports, rapport No. RTQ-87-03, Mai 1987, p. 46
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*, New York : Wiley, 1993, p. 517
- Fredlund, D.G. & A. Xing., 1994. *Equations for the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, p.521-532
- Fredlund, D.G., Xing, A. & Huang, S., 1994. *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 5, p. 533-546
- Gardner, W.R., 1956. *Calculation of capillarity conductivity from pressure plate outflow data*, Soil Sci. of Am. Proc., 20, p.317-320

- Gardner, W.R., 1958. *Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table*, Journal of Soils Science, vol. 85, p. 228-232
- Gardner, W.R., 1962. *Note on the separation and solution of diffusion equations*, Soil Sci. Soc. of Am. Proc., 26, p. 404
- Ghorbel, S., 2006. *Modèle de comportement à l'état limite des sols saturés et non saturés*, thèse de doctorat, Québec: Université Laval, 2006, 285p.
- Gilbert, F.D., 2004. *Méthode utilisée pour la détermination de la surface spécifique d'un sol, Utilisation d'un spectrophotomètre*, Québec : Université Laval, 2004, 7p.
- Grenier, S., 2006. *Analyse dynamique du réflectomètre à masse tombante, Utilisation d'un spectrophotomètre*, thèse de doctorat, Québec: Université Laval, 2006, 721p. (en évaluation)
- Haverkamp, R., Bouraoui, F., Zammit, C. & Jaramillo, R.A., 1999. *Soils properties and moisture movements in the unsaturated zone*, Grenoble : Laboratoire d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement, 1999, 51p.
- Holtz, R.D. & Kovacs. W.D, traduit par Lafleur, J. 1991, *Introduction à la géotechnique*, Montréal : Éditions de l'École polytechnique de Montréal, 2005, 808p.
- Kenney, T. C., Lau, D., & Ofoegbu, G. I., 1984. *Permeability of compacted granular materials*, Canadian Geotechnical Journal, volume 21, p. 726-729
- Klute, A., 1965. *Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil*, ed. In C.A. Black, Methods of soils analysis, part 1, agronomy 9, Madison, Wisconsin
- Klute, A. & Dirksen, C., 1986. *Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods*, Methods of soils analysis, part 1, physical and mineralogical methods, Soil. Am. Soc. of agronomy, Madison, Wisconsin
- Kunze, R.-J., Uehara, G., & Graham, K., 1968. *Factors important in the calculation of hydraulic conductivity*, In proceedings of the soil science society of America, vol. 32, p. 760-765
- Lafleur J., Mlynarek, J. & Savard, Y., 1994. *Efficacité du drainage latéral pour empêcher le soulèvement différentiel dû au gel*, compte rendu de 29<sup>e</sup> Congrès annuel de l'AQTR sur les infrastructures de transport au service de l'intermodalité, avril 1994, Salaberry-de-Valleyfield
- Mc. Daniel College. *Given the basics of water potential, we can now explore the dynamics of water flow*, Site internet visité le 16 septembre 2006, disponible à : <http://www2.mcdaniel.edu/Biology/botf99/xylemweb/xyflow2.html>

- Ministère des Transports du Québec, 1997a. *Mesure du coefficient de perméabilité d'un sol ou d'un matériau granulaire à l'aide d'un perméamètre Proctor ou CBR*. LC- 22-322. Procédure du laboratoire des chaussées, Québec.
- Ministère des Transports du Québec, 1997b. *Essai du potentiel de succion des sols et des matériaux granulaires*. LC- 22-330. Procédure du laboratoire des chaussées, Québec.
- Ministère des Transports du Québec. *Les chaussées et le climat québécois*, Site internet visité le 16 septembre 2006, disponible à : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/en/reseau/chaussees/chaussees.asp>
- Mualem, Y., 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of saturated porous media*, Water resources research, vol. 12, p. 593-622
- Murray, E.J., 1995. *Prediction of permeability of granular materials, unbound aggregates in roads 4*, University of Nottingham, p. 61-70
- Mlynarek, J., Marcil, R.J., Lombard, G. & Vermeersch, O. E.E., 1995. *Optimisation technique et économique dans la réhabilitation et la construction des routes-drainage routier*, Québec : Association Québécoise du Transport et des Routes, Inc, vol 25 n°3, 1995, 9p.
- Nielsen, D.R. & Biggar, J.W., 1961. *Measuring capillary conductivity*, Soil. Sci. 92, p.192-193
- Paute, J.L., 1998. *Un guide technique sur le drainage des chaussées et des plates-formes routières-limites et enjeux*, Granada : International Symposium on subdrainage in roadway pavements and subgrades, 1998, p.321-341.
- Raimbault, G., 1986. *Cycles annuels d'humidité dans une chaussée souple et son support*, Bulletin de liaison, n° 145, p.79-84.
- Richards, L.A., 1931. *Capillary conduction of liquids in porous mediums*, Physics, vol.1, p. 318-333
- St-Laurent, D., Roy, M. & Bergeron, G., 1995. *Variations saisonnières de la portance des chaussées souples: une étude avec le FWD*, Québec : Ministère des Transports du Québec et Université Laval, 1995, 25p.
- Usace, 1953. *Filter experiments and design criteria*, Technical Memorandum No. 3-360, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. & Verhoef A., 1992. *An evaluation of the one-step out-flow method*, Proc. Inter. Workshop "Indirect method for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils", University of Cal., Riverside, p. 633-644

- Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M. & Droogers, P., 1994. *Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments*, Soil Sci. Am. J., 58, p 647-652
- Van Genuchten, M.T., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, In Proceedings of the soils science society of America, vol. 30, p. 156-162
- Vaughan, P.R. & Soares, H. F., 1982. *Design of filters for clay-cores of dams*, ASCE Journal of the geotechnical Engineering Division, 108 (GT1), p 17-31
- Wallace, K.B., 1977. *Moisture transients at the pavements edge: Analytical studies of the influence of materials and cross-section Design*, Géotechnique, vol.27, n° 4, p. 497-516
- Watabe, Y., Leroueil, S., Le Bihan, J.-P., 2000. *Influence of compaction conditions on pore-size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till*, Canadian Geotechnical Journal, volume 37, p. 1184-1194

## **ANNEXE A. COURBES GRANULOMÉTRIQUES**

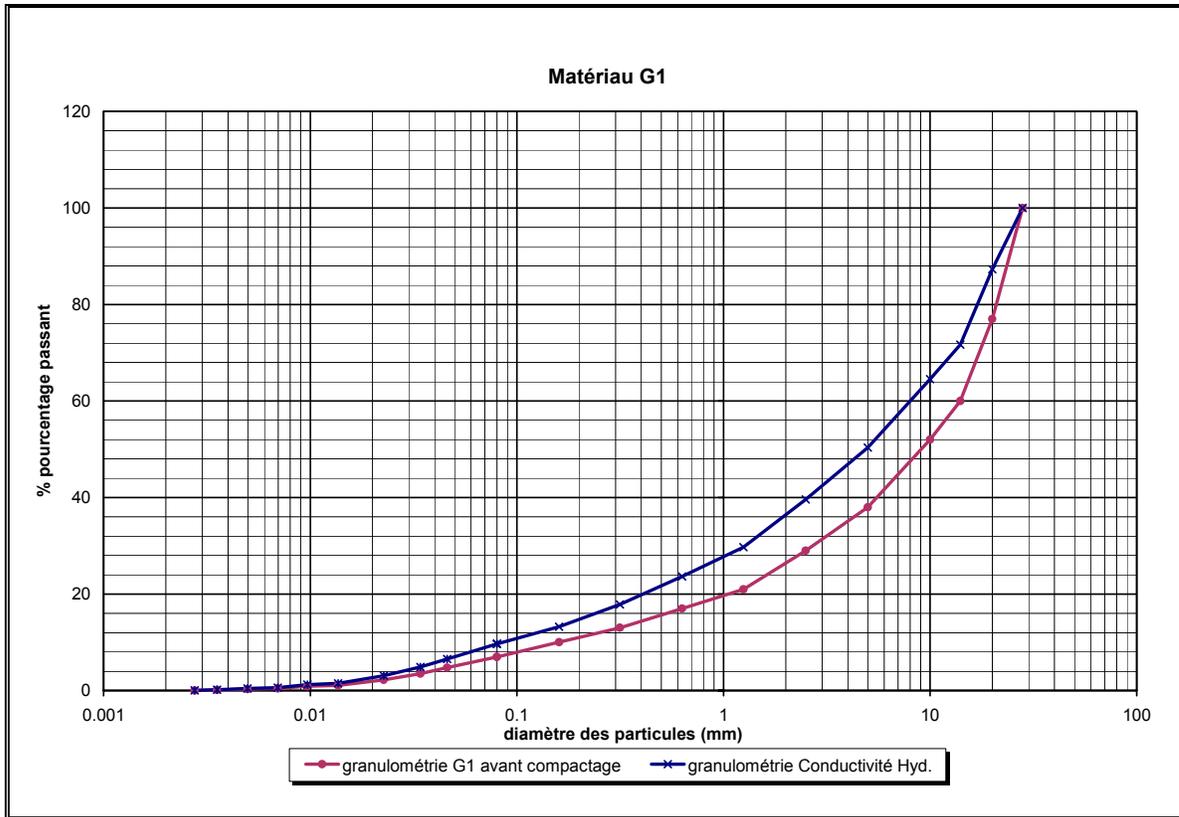


A 1 Courbe granulométrique matériau granitique MG-20 carrière PEB

Tableau 13 Caractéristiques de la granulométrie du matériau MG-20 carrière PEB

GRANULOMETRIE	CARRIÈRE PEB
% particules fines ( $d < 80 \mu\text{m}$ )	4.34
% granulats grossiers	57.11
% granulats fines	42.89
$C_u$	65
$C_c$	0.4

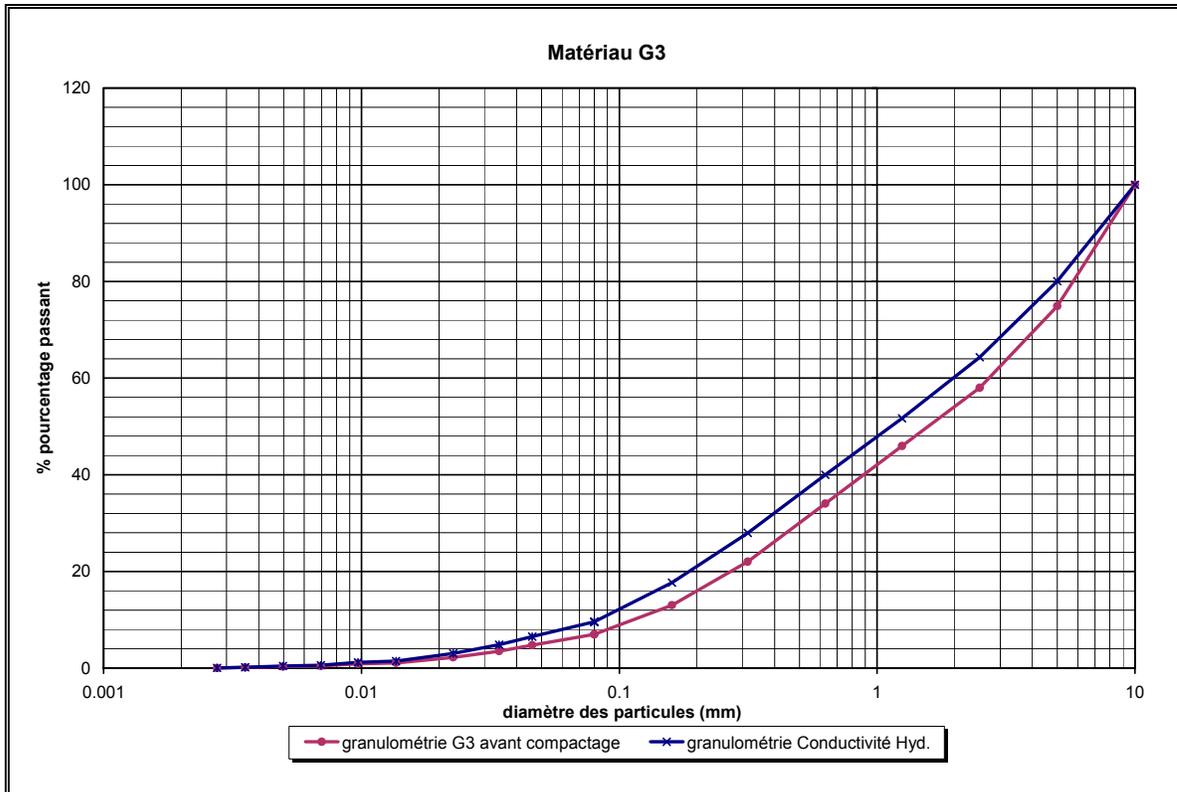




A 3 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau G1, granitique PEB.

Tableau 15 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G1

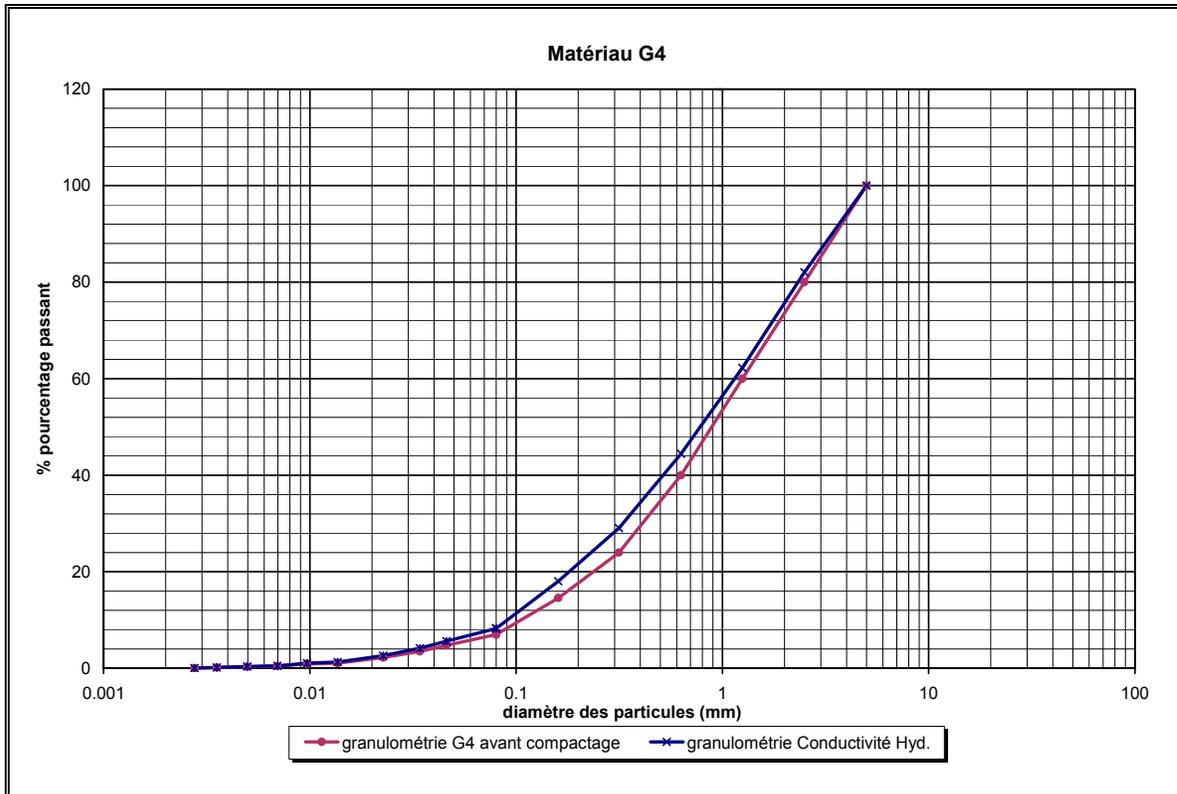
MATÉRIAU G1		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	7	9.69
% granulats grossiers	62	49.64
% granulats fines	38	50.36
Cu	88.2	94.16
Cc	3.3	2.39



A 4 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau G3, granitique PEB.

Tableau 16 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G3

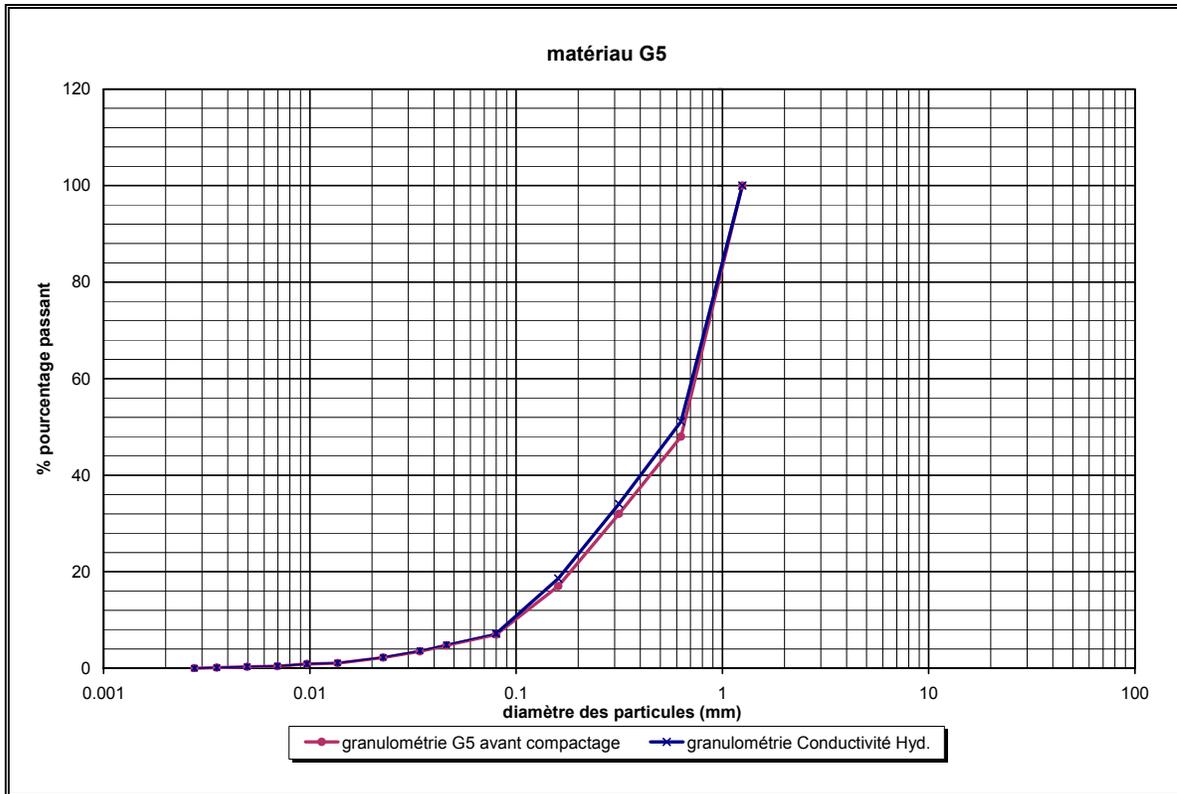
MATÉRIAU G3		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	7	9.58
% granulats grossiers	25	19.98
% granulats fines	75	80.02
Cu	24	23.81
Cc	0.8	0.77



A 5 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau G4, granitique PEB.

Tableau 17 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G4

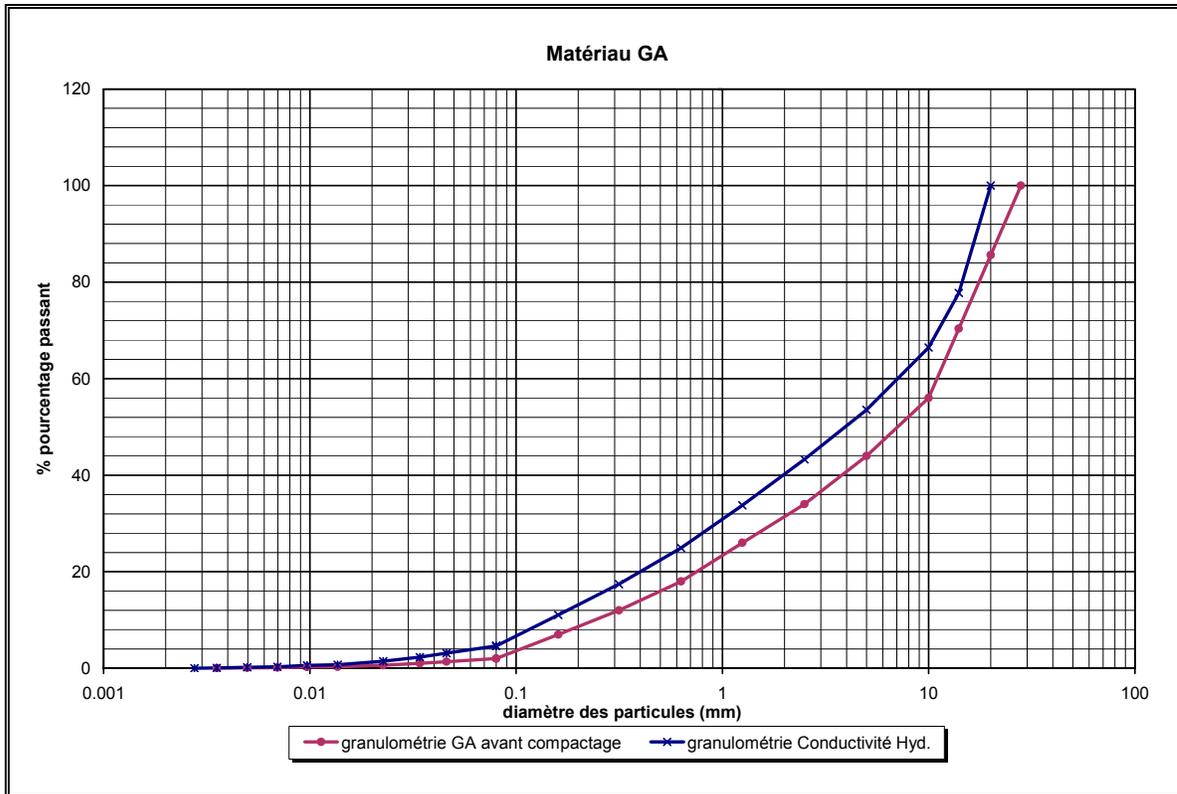
MATÉRIAU G4		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	7	8.26
% granulats grossiers	0	0
% granulats fines	100	100
Cu	11.9	12.68
Cc	1.3	1.04



A 6 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau G5, granitique PEB.

Tableau 18 Caractéristiques de la granulométrie du matériau G5

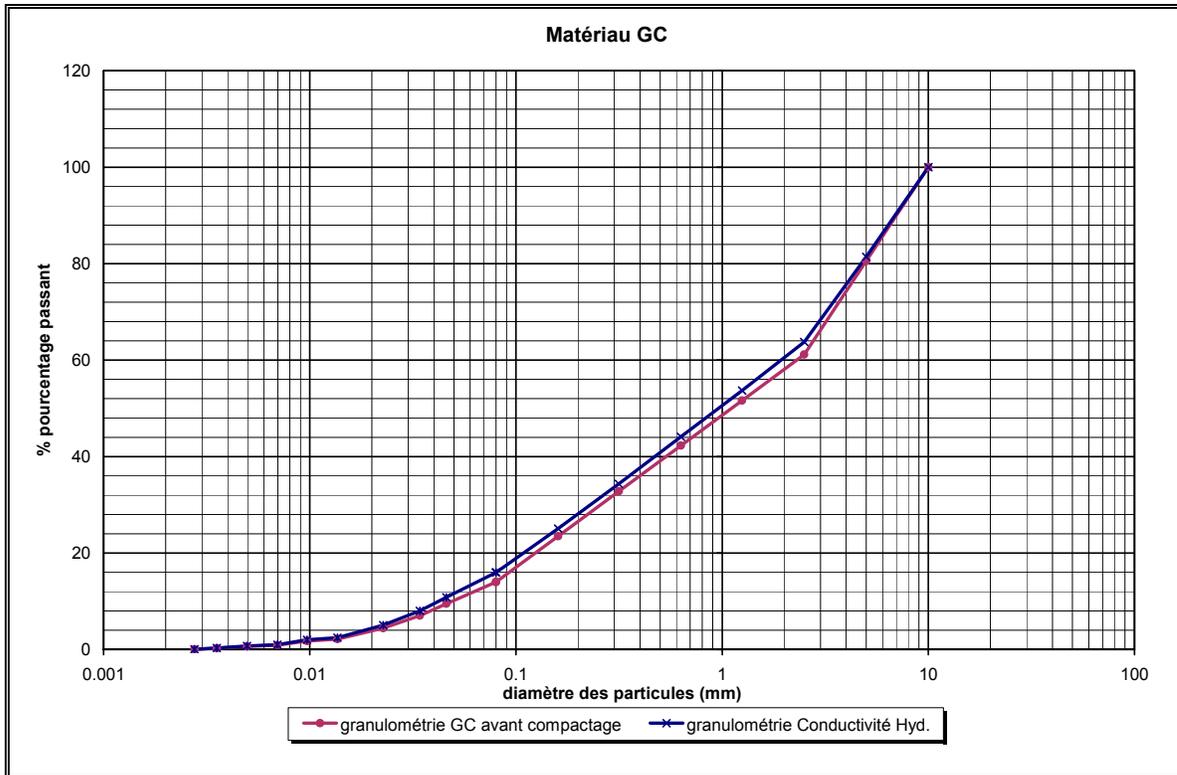
MATÉRIAU G5		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	7	7.2
% granulats grossiers	0	0
% granulats fines	100	100
Cu	7.5	7.52
Cc	1.1	1.03



A 7 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau GA, granitique PEB.

Tableau 19 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GA

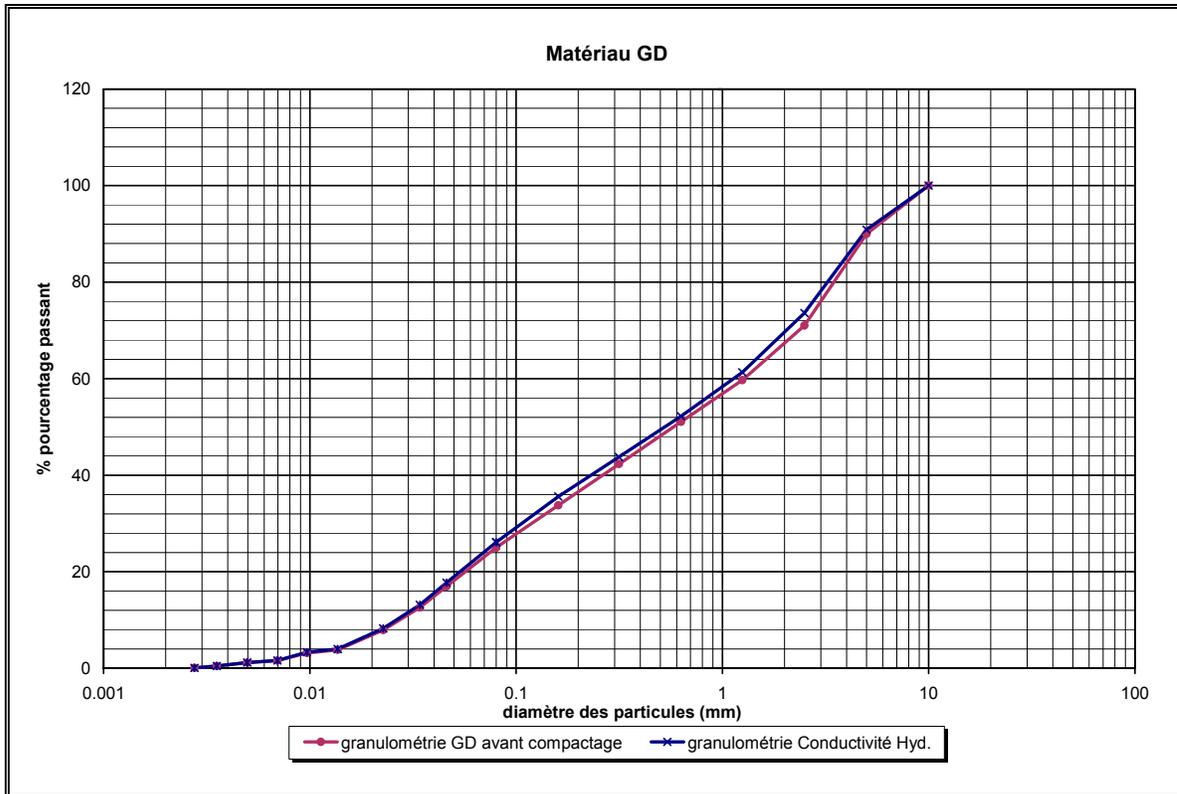
MATÉRIAU GA		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	2	4.63
% granulats grossiers	56	46.48
% granulats fines	44	53.52
Cu	45.7	49.6
Cc	1.2	0.9



A 8 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau GC, granitique PEB.

Tableau 20 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GC

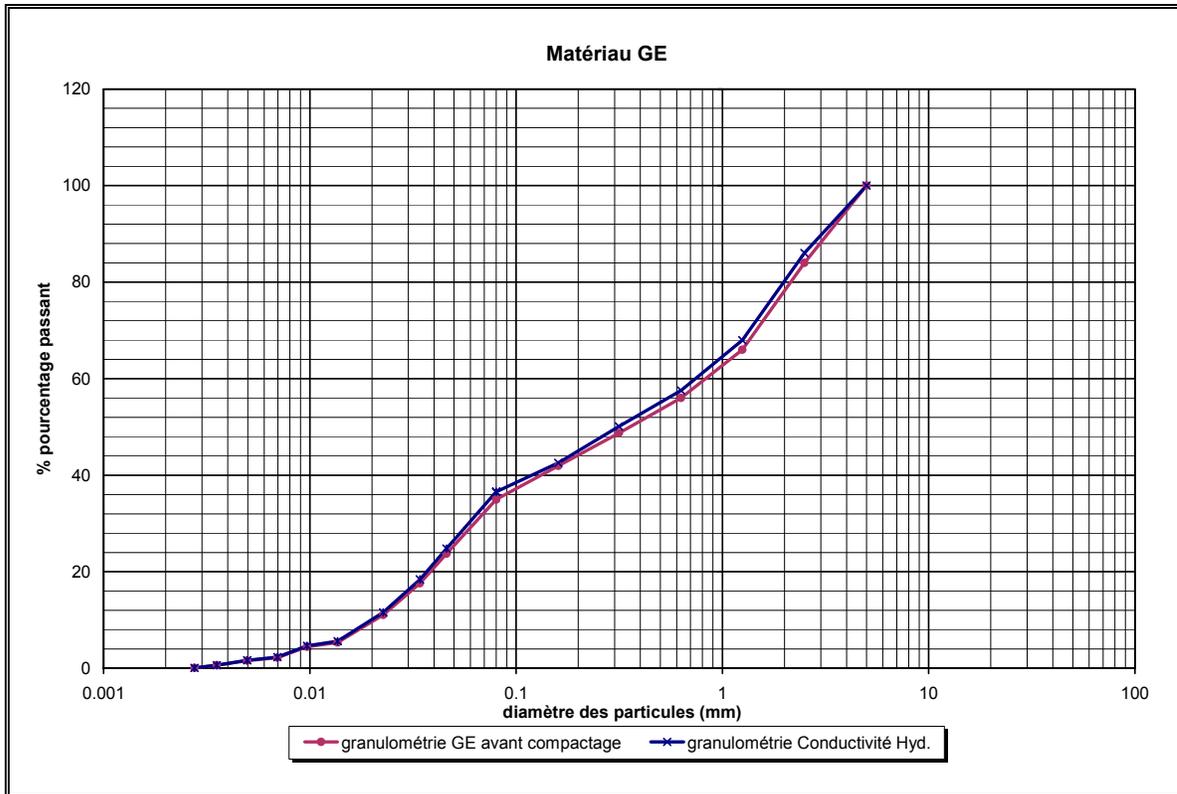
MATÉRIAU GC		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	14	16
% granulats grossiers	19	18.59
% granulats fines	81	81.41
Cu	47	45.8
Cc	0.6	0.65



A 9 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau GD, granitique PEB.

Tableau 21 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GD

MATÉRIAU GD		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	25	26.13
% granulats grossiers	10	9.13
% granulats fines	90	90.87
Cu	46.7	43.08
Cc	0.4	0.39



A 10 Courbes granulométriques avant et après compactage, matériau GE, granitique PEB.

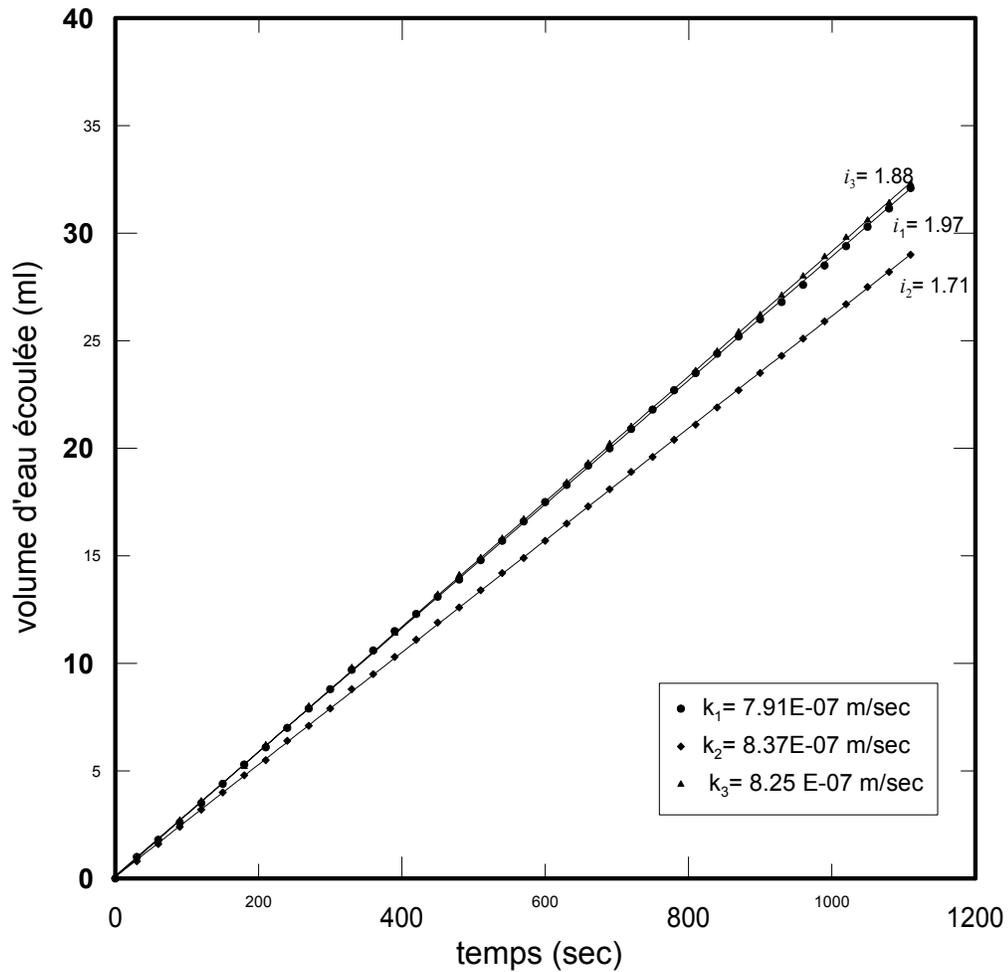
Tableau 22 Caractéristiques de la granulométrie du matériau GE

MATÉRIAU GE		
	avant compactage	après compactage
% particules fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	35	36.6
% granulats grossiers	0	0
% granulats fines	100	100
Cu	40.2	37.3
Cc	0.2	0.24

## **ANNEXE B. RÉSULTATS CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE**

## CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

### MATÉRIAU G2B



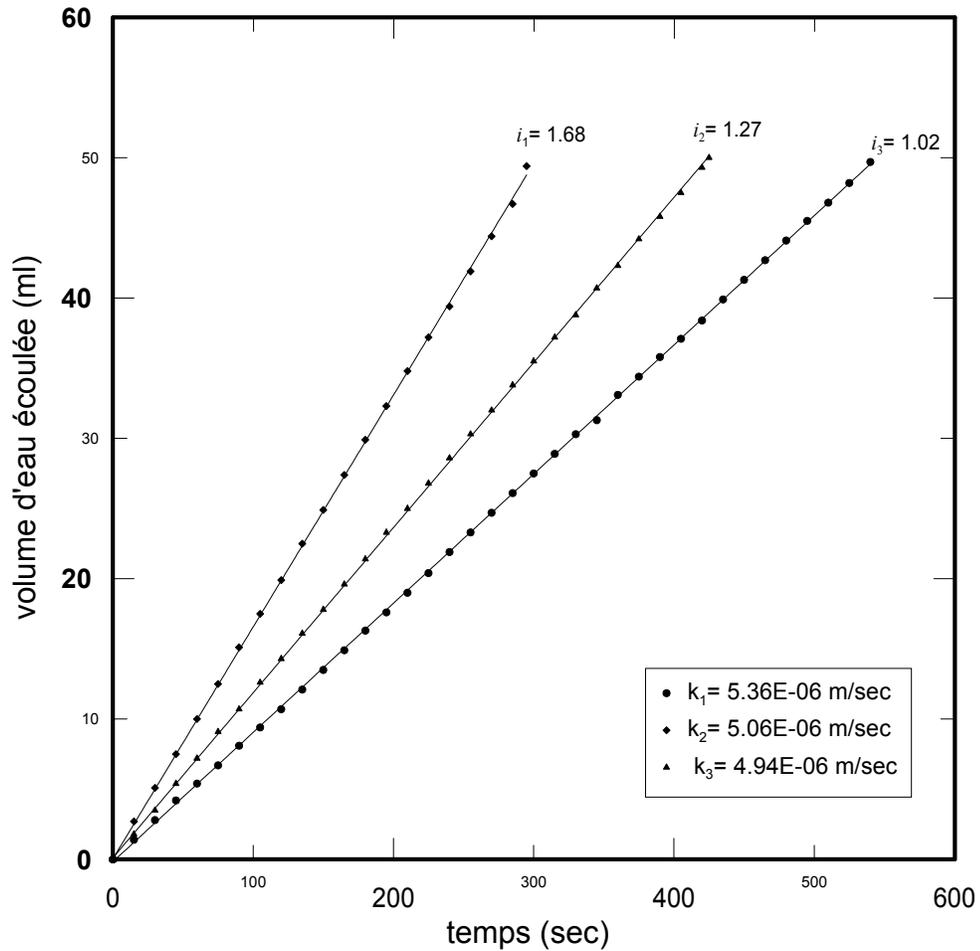
B 1 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G2B. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 23 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G2B.

<b>matériau G2B</b>	
Date: 28 juillet 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.96
Teneur en eau finale (%)	6.85
masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.198
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>8.18E-07</b>

## CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

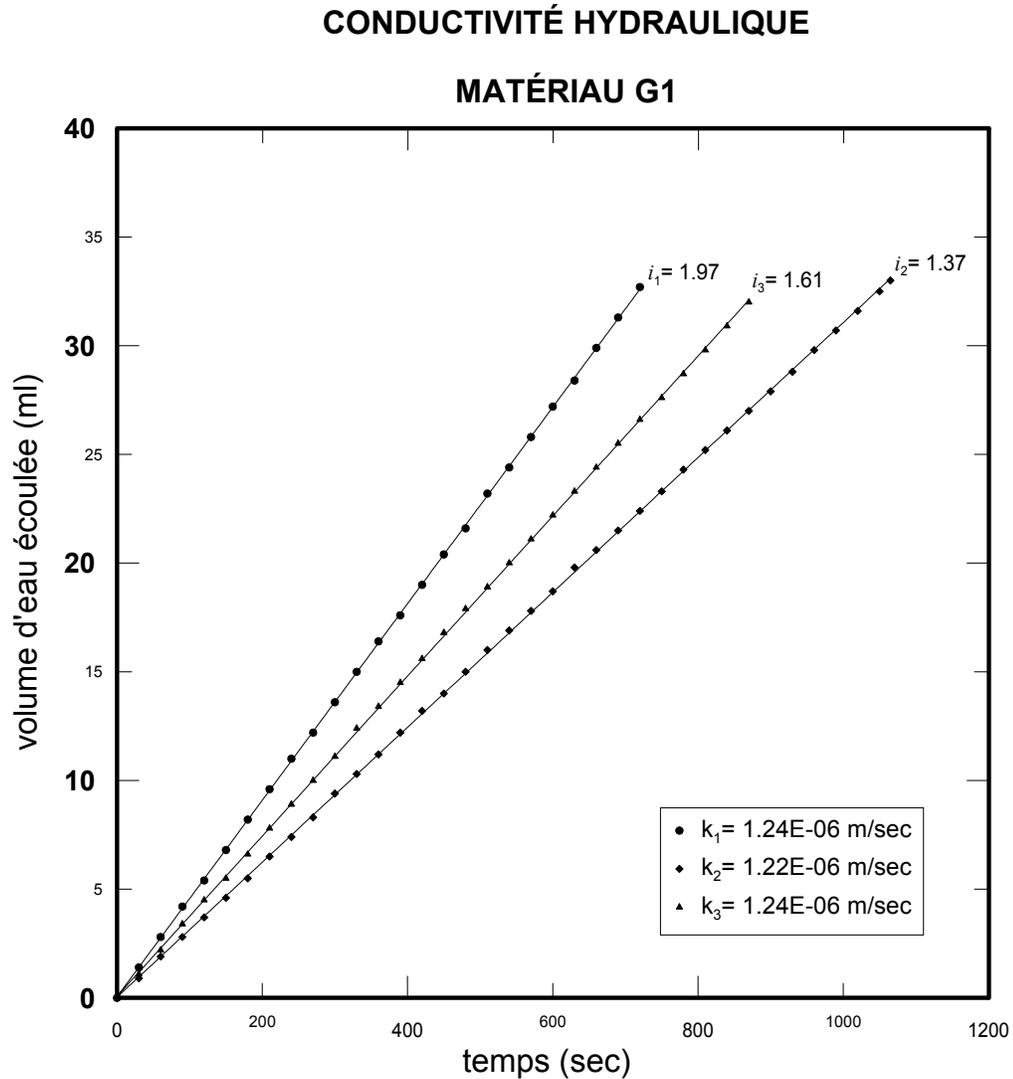
### MATÉRIAU G2B côté sec



B 2 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G2B côté sec. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 24 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G2B côté sec.

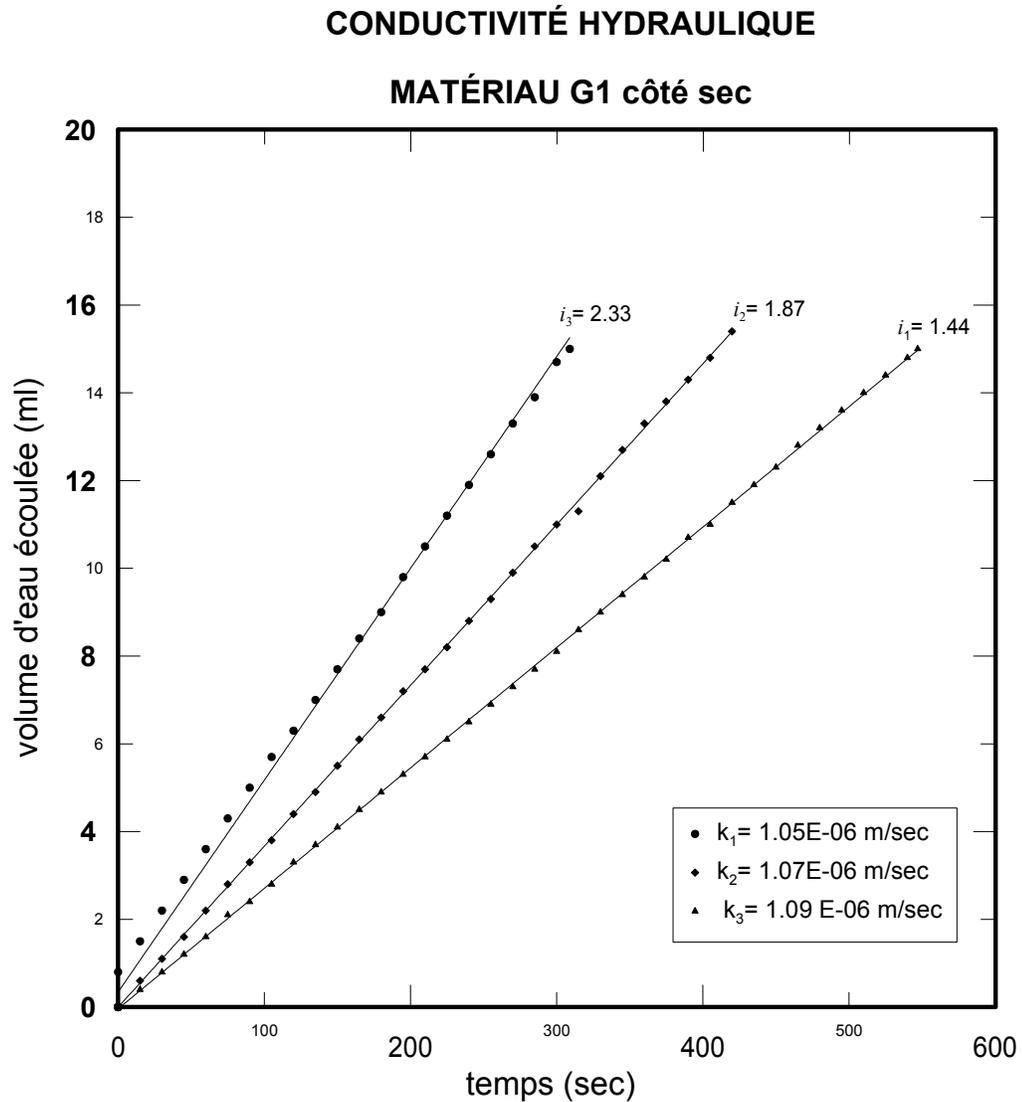
<b>matériau G2B côté sec</b>	
Date: 23 juin 2006	
Teneur en eau optimale (%) - 0.25%	5.5
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.41
Teneur en eau finale (%)	8.20
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.206
<b>Conductivité hydraulique K (m/sec)</b>	<b>5.12E-06</b>



B 3 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G1. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 25 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G1.

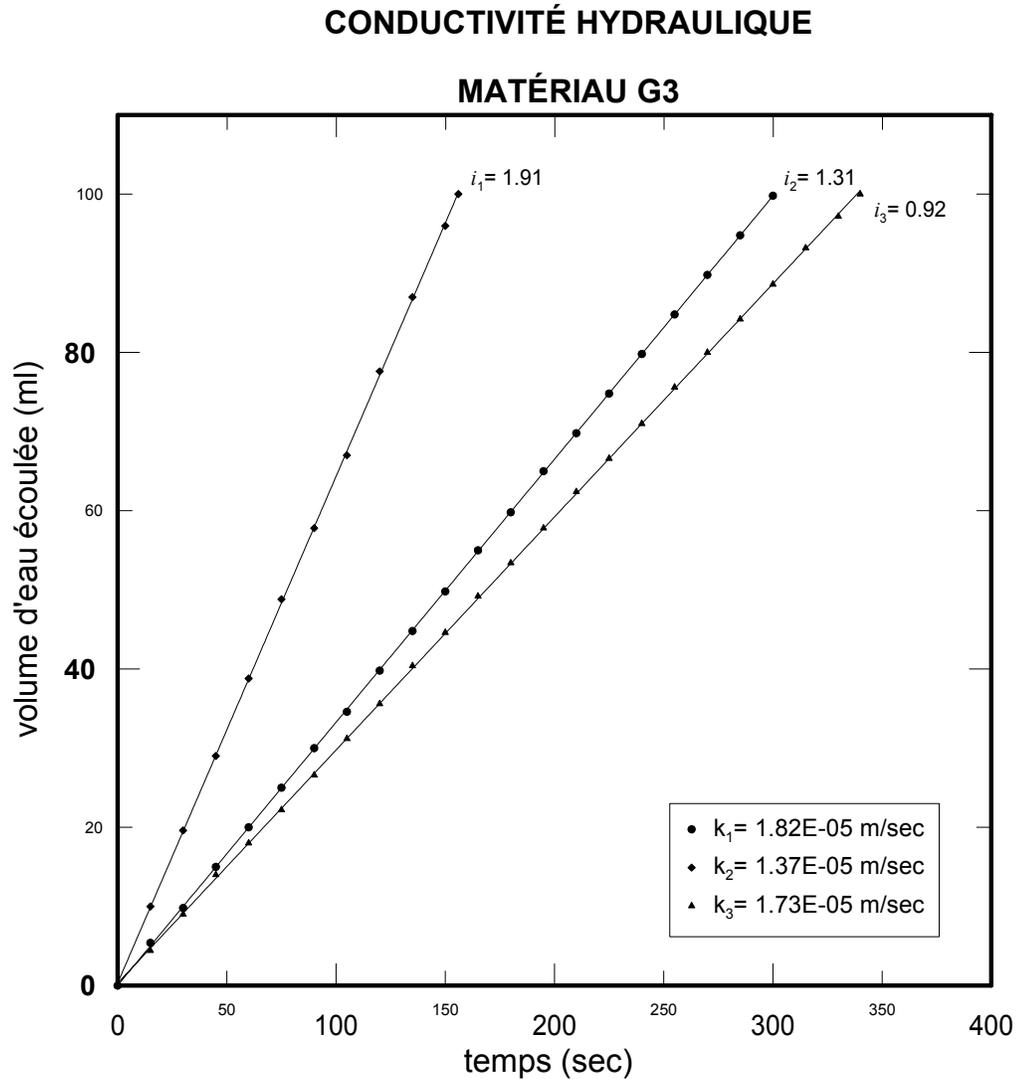
<b>matériau G1</b>	
Date: 3 juillet 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	5.4
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.39
Teneur en eau finale (%)	6.00
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.291
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>1.23E-06</b>



B 4 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G1 côté sec. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 26 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G1 côté sec.

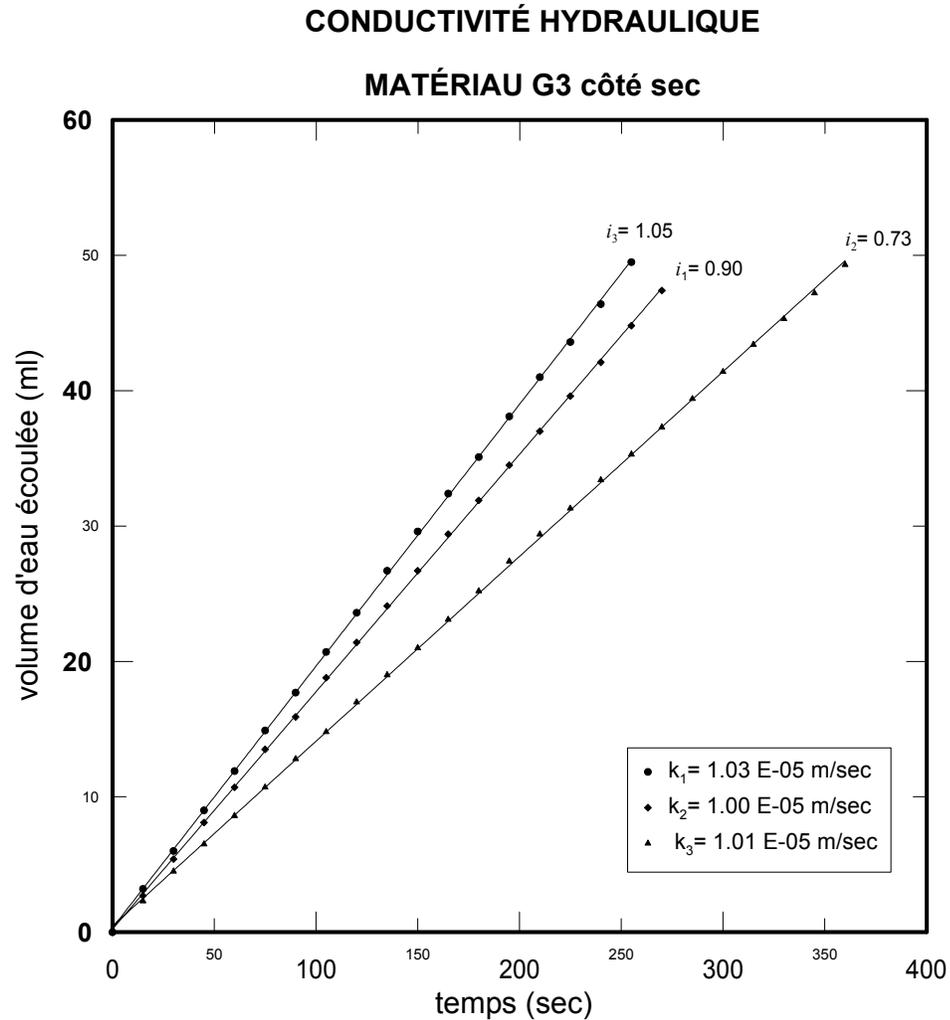
<b>matériau G1 côté sec</b>	
Date: 24 juin 205	
Teneur en eau optimale (%) - 0.25%	4.95
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.08
Teneur en eau finale (%)	5.60
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.266
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>1.07E-06</b>



B 5 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G3. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 27 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G3.

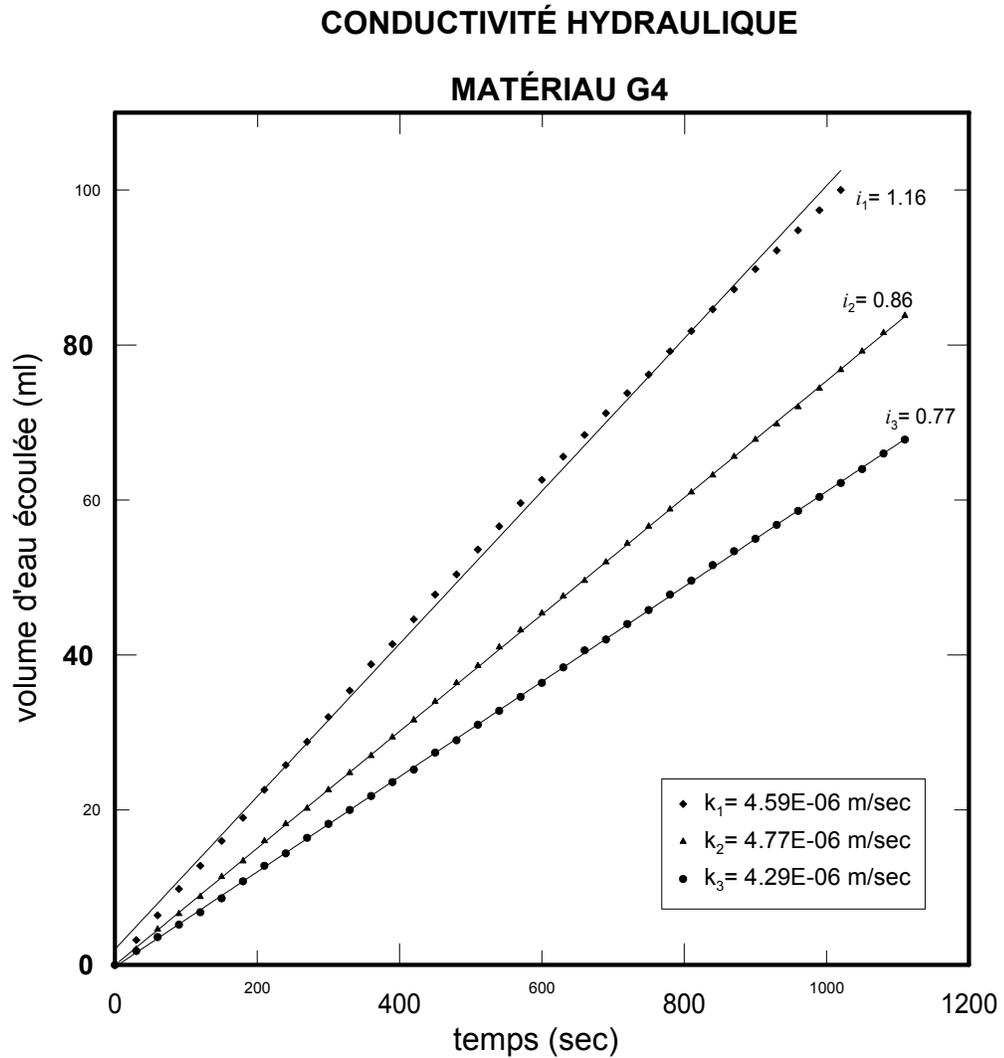
<b>matériau G3</b>	
Date: 8 septembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	7.45
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	7.24
Teneur en eau finale (%)	10.62
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.118
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>1.64E-05</b>



B 6 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G3 côté sec. Granitique MG-20 carrière PEB.

Table 28 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G3 côté sec.

<b>matériau G3 côté sec</b>	
Date: 3 juillet 2006	
Teneur en eau optimale (%) - 0.25%	6.95
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	6.73
Teneur en eau finale (%)	8.18
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.129
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>1.02E-05</b>



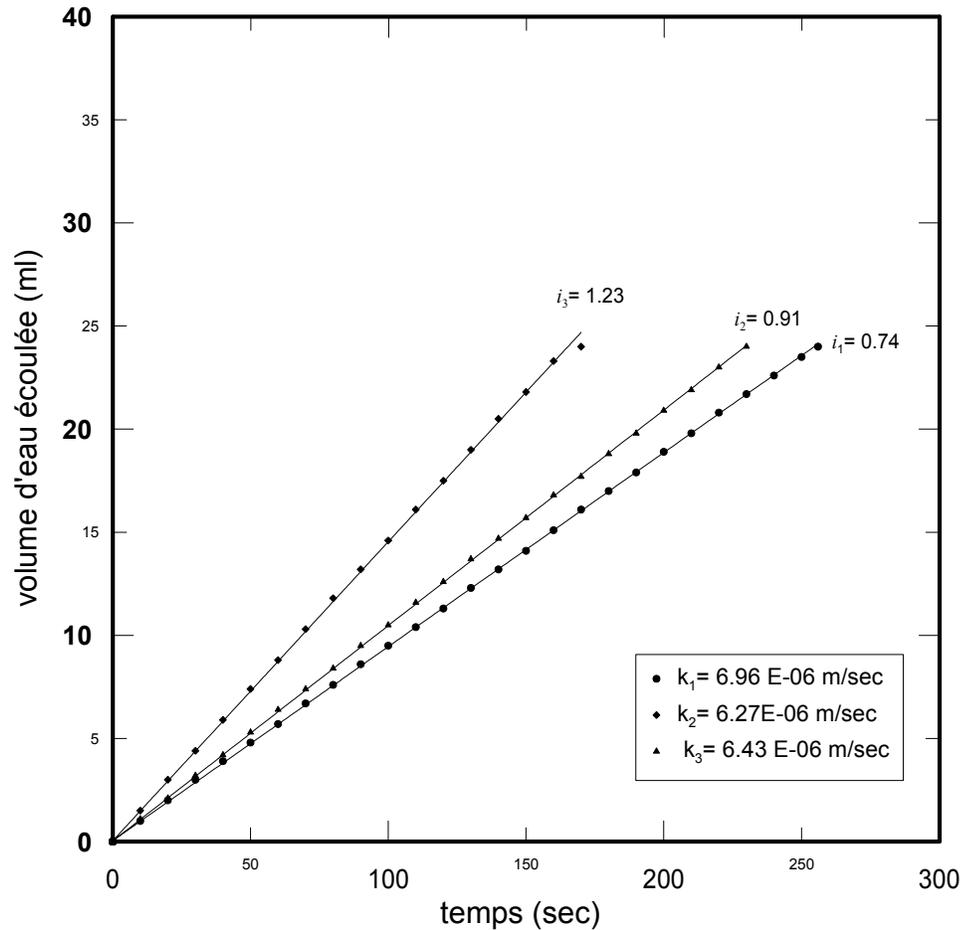
B 7 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G4. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 29 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G4.

<b>matériau G4</b>	
Date: 16 octobre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	8.85
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	8.45
Teneur en eau finale (%)	11.40
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.028
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>4.55E-06</b>

## CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

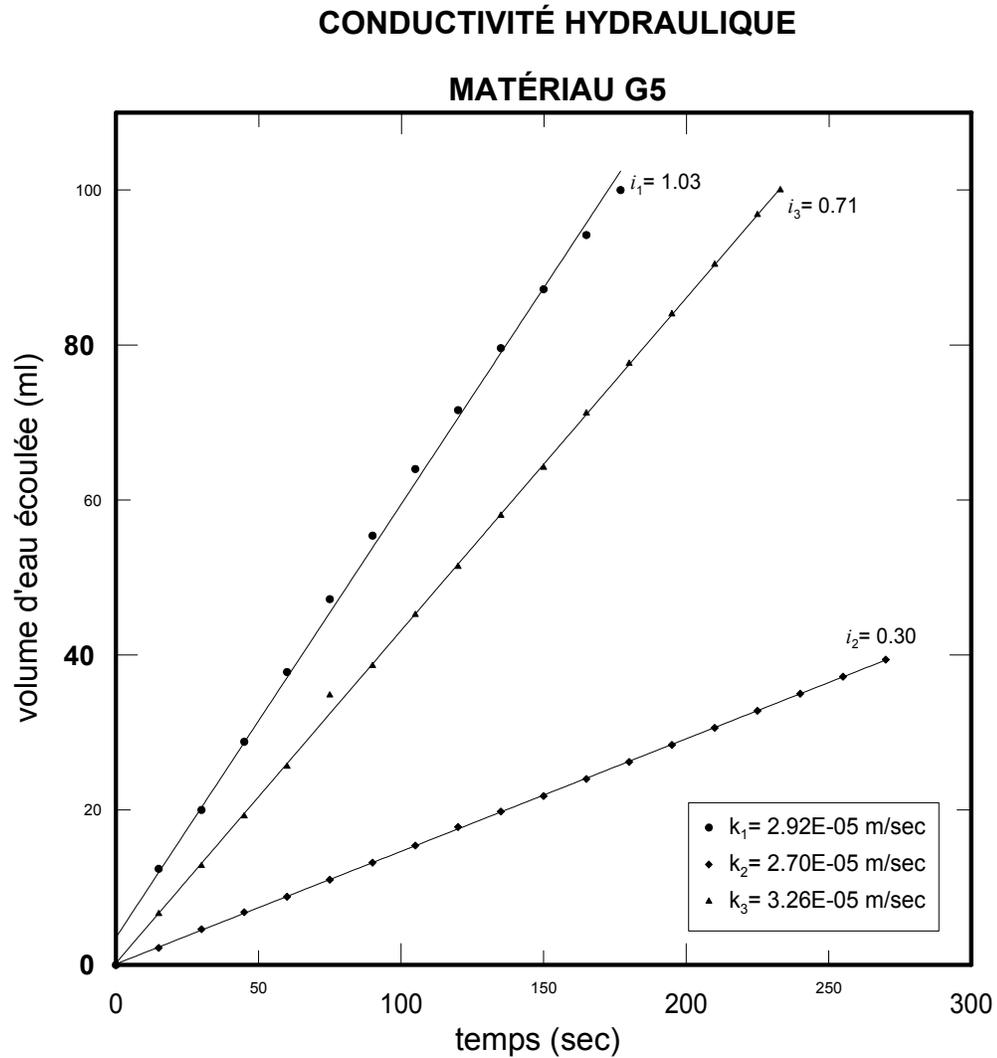
### MATÉRIAU G4 côté sec



B 8 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G4 côté sec. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 30 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G4 côté sec.

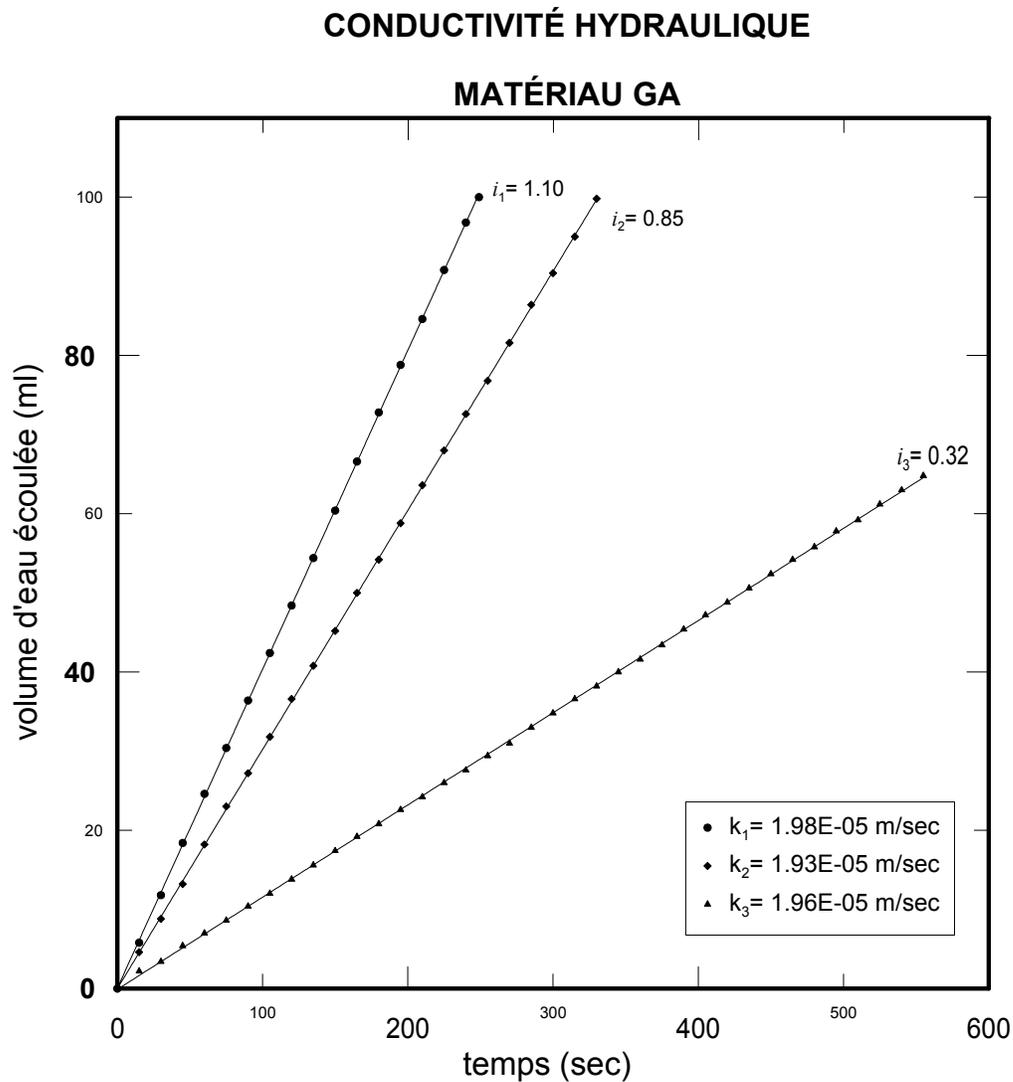
<b>matériau G4 côté sec</b>	
Date: 16 octobre 2005	
Teneur en eau optimale (%) - 0.25%	8.35
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	8.25
Teneur en eau finale (%)	9.58
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.004
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>6.55E-06</b>



B 9 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué G5. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 31 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué G5.

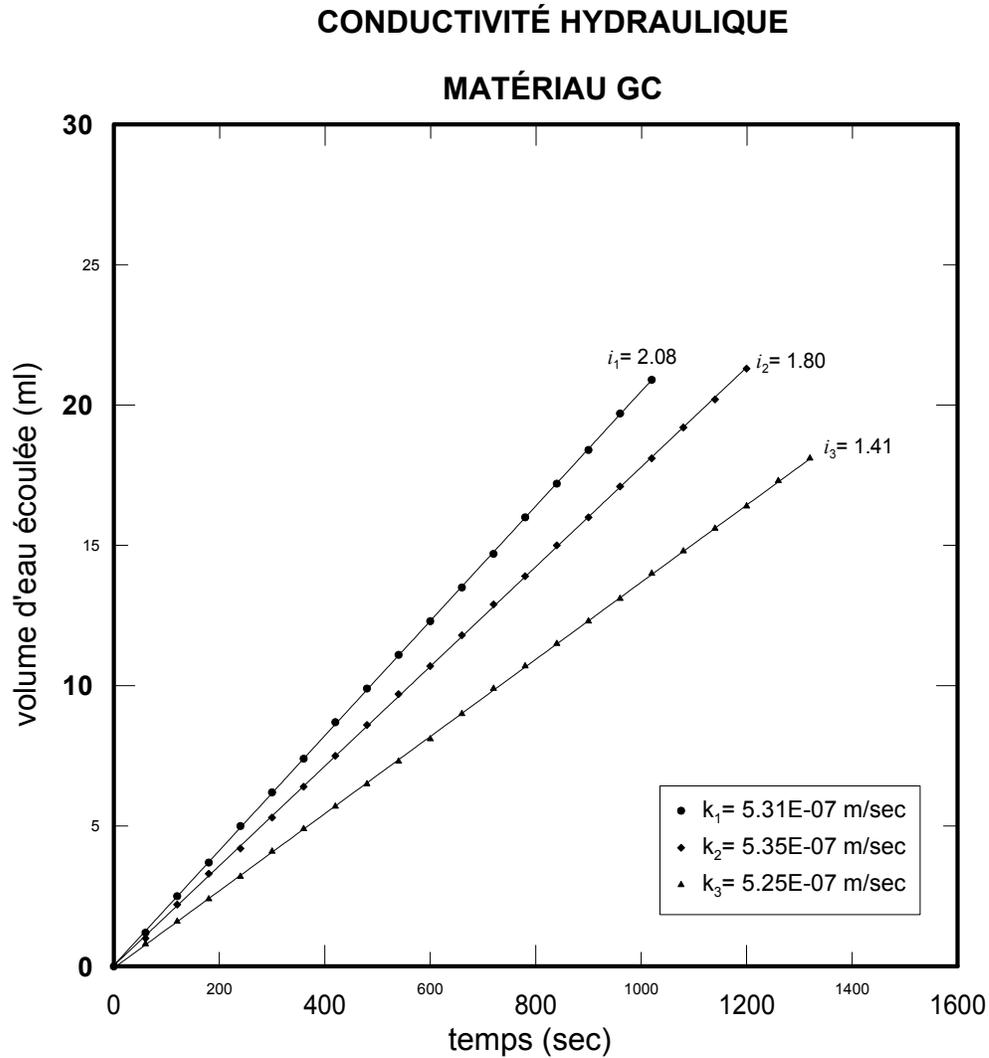
<b>matériau G5</b>	
Date: 7 novembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	9.45
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	8.97
Teneur en eau finale (%)	16.11
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	1.859
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>2.96E-05</b>



B 10 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué GA.  
Granitique MG-20 carrière PEB

Tableau 32 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GA.

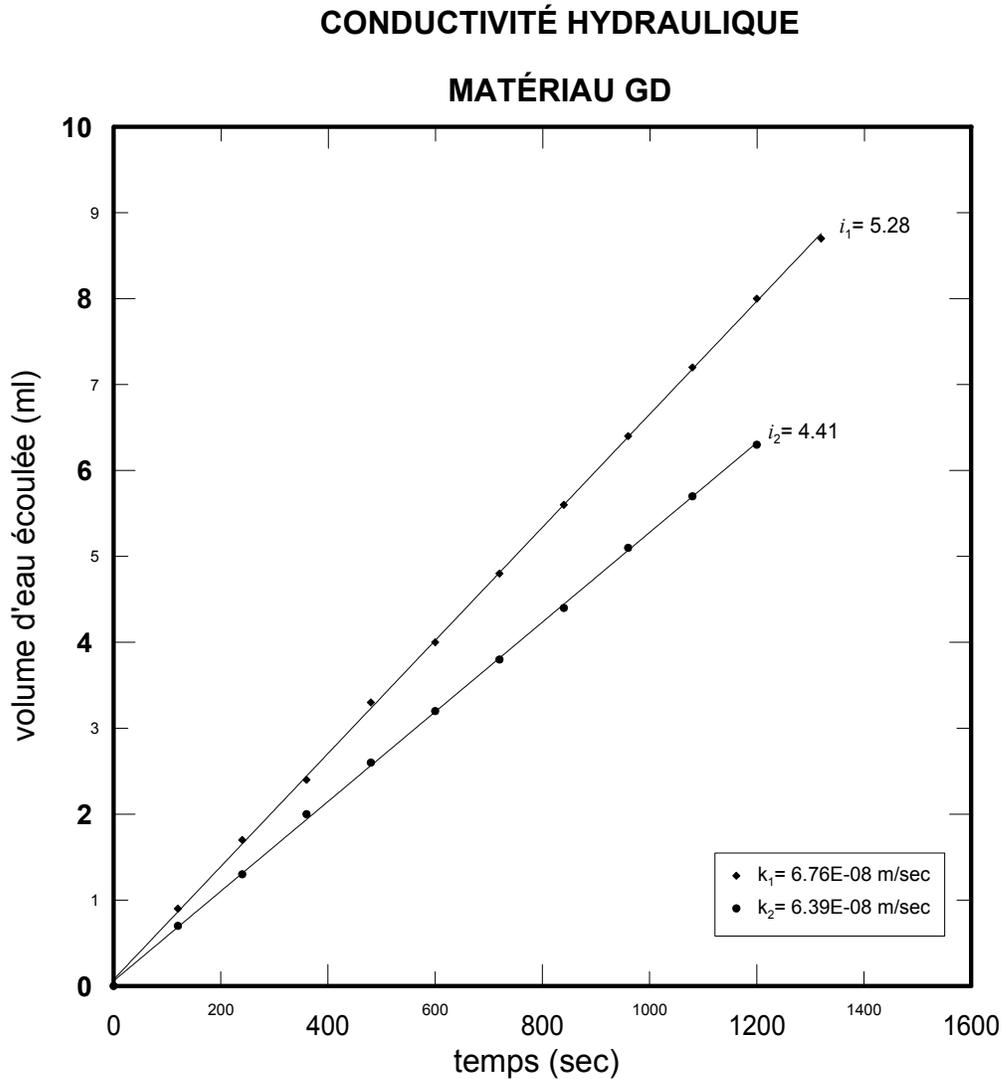
<b>matériau GA</b>	
Date: 1 octobre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6.25
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.89
Teneur en eau finale (%)	7.83
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.222
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>1.96E-05</b>



B 11 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué GC. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 33 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GC.

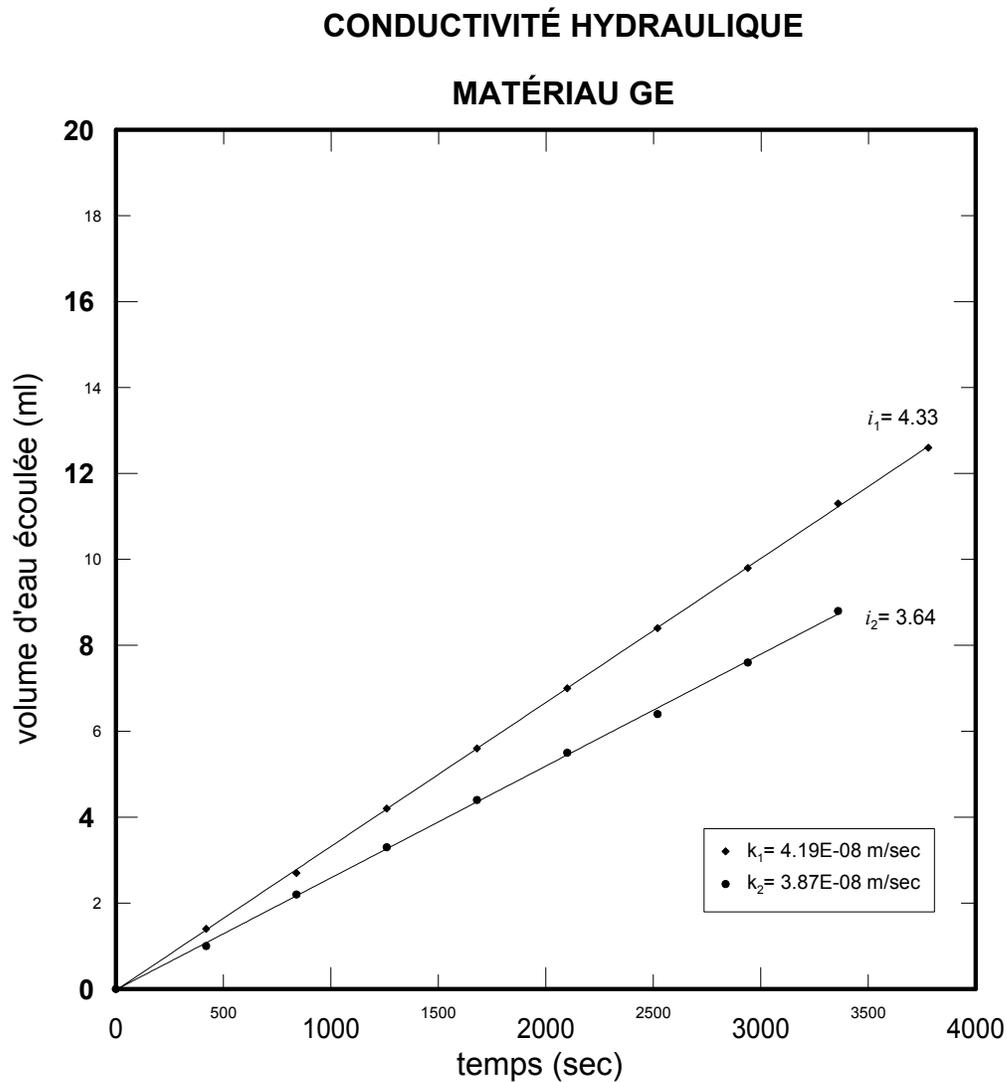
<b>matériau GC</b>	
Date: 1 novembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6.05
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	5.23
Teneur en eau finale (%)	9.48
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.155
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>5.30E-07</b>



B 12 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué GD. Granitique MG-20 carrière PEB.

Tableau 34 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GD.

<b>matériau GD</b>	
Date: 13 novembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6.85
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	6.68
Teneur en eau finale (%)	8.50
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.137
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>6.57E-08</b>

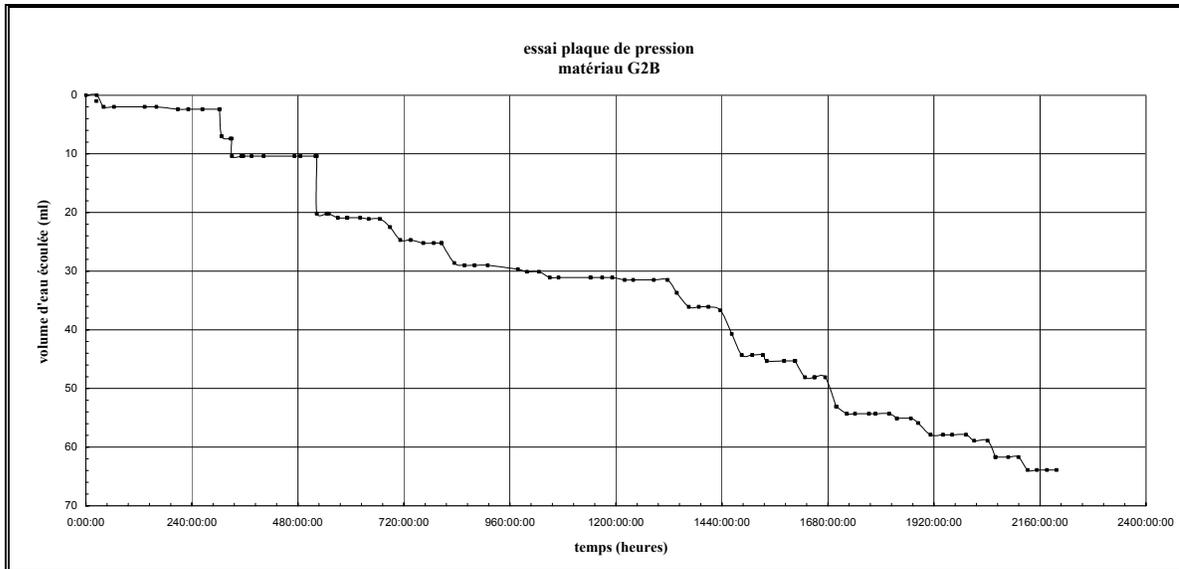


B 13 Résultat de l'essai de conductivité hydraulique du matériau reconstitué GE.  
Granitique MG-20 carrière PEB

Tableau 35 Résultats essai conductivité hydraulique. Matériau reconstitué GE.

<b>matériau GE</b>	
Date:24 octobre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	7.08
Teneur en eau initiale (%) (après saturation)	7.17
Teneur en eau finale (%)	9.68
Masse vol. sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.112
<b>Conductivité hydraulique k (m/sec)</b>	<b>4.03E-08</b>

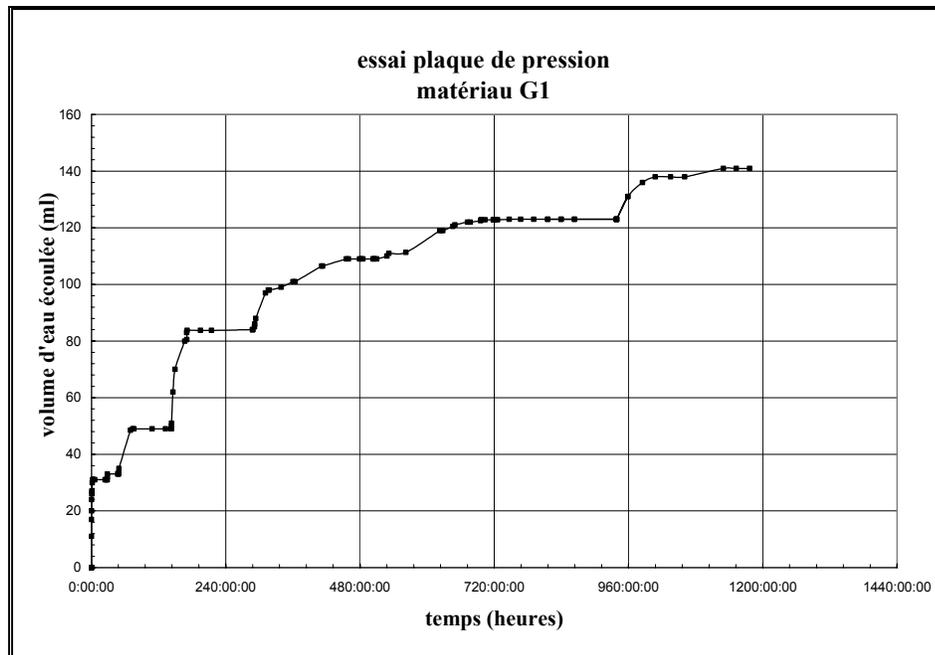
**ANNEXE C. RÉSULTATS POUR LA  
DÉTERMINATION DE LA COURBE  
CARACTÉRISTIQUE DE RÉTENTION D'EAU**



C 1 Valeurs de volume d'eau écoulee en fonction du temps du matériau reconstitué G2B. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Tableau 36 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G2B.

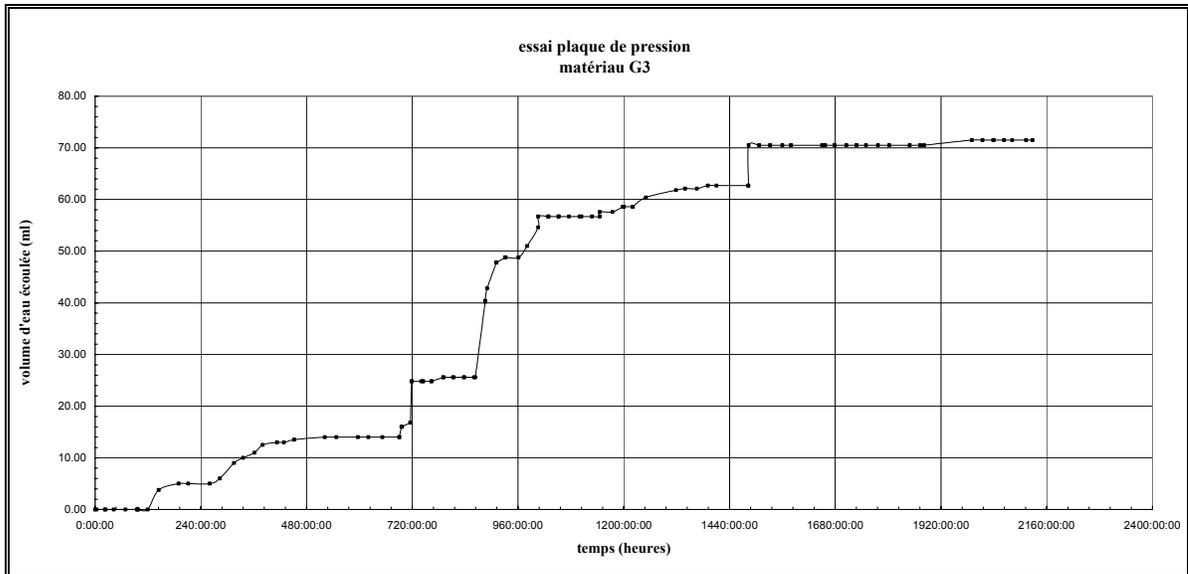
<b>matériau G2B</b>	
Date: 16 septembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	5.75
Teneur en eau initiale (%)	6.63
Teneur en eau finale (%)	2.54
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.17
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	4.63
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.835
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G * W / (1 + e)$	0.147
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G * W / (1 + e)$	0.147
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.189
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>0.918</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.25</b>



C 2 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué G1. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Tableau 37 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G1.

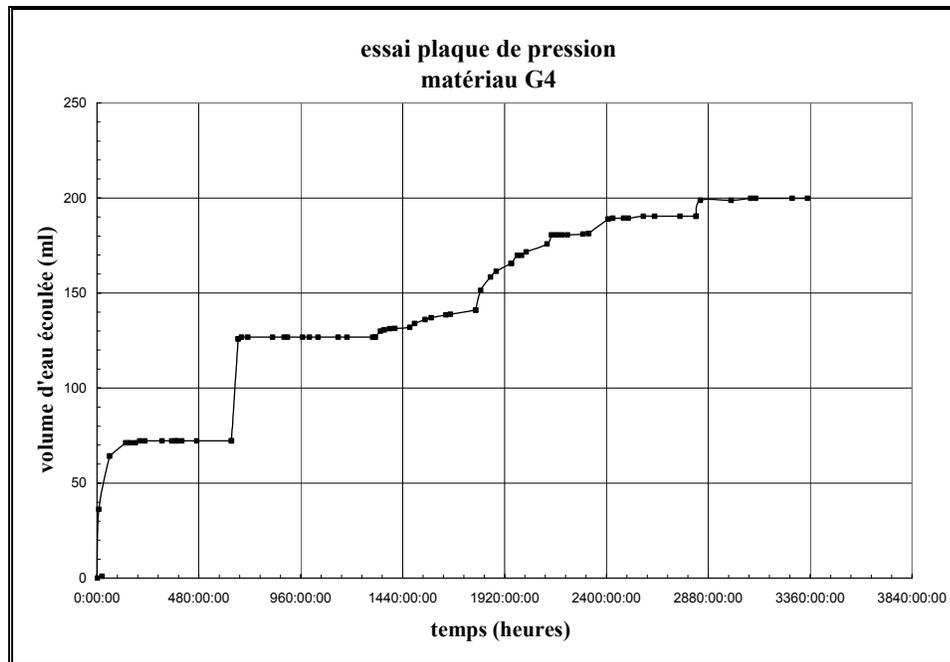
<b>matériau G1</b>	
Date: 10 juillet 2005	
Teneur en eau optimale (%)	5.15
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	5.01
Teneur en eau initiale (%)	5.65
Teneur en eau finale (%)	1.92
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.25
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	9.69
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.666
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G \cdot W / (1 + e)$	0.127
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G \cdot W / (1 + e)$	0.115
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.162
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>1.145</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.28</b>



C 3 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué G3. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 38 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G3.

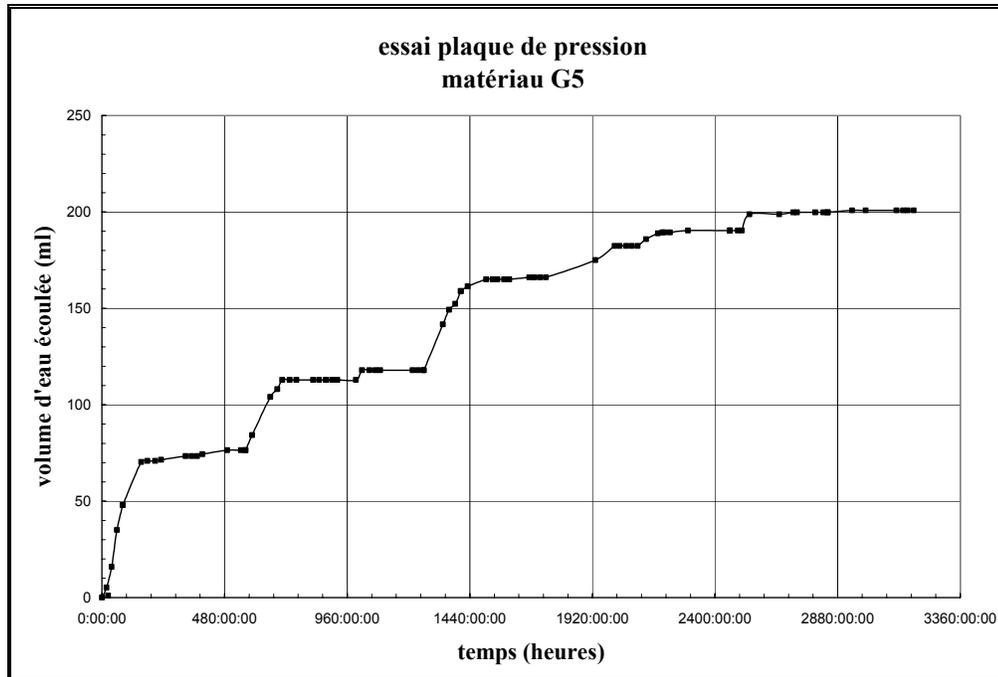
<b>matériau G3</b>	
Date: 29 août 2005	
Teneur en eau optimale + 0.25 (%)	7.45
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	7.44
Teneur en eau initiale (%)	8.23
Teneur en eau finale (%)	0.53
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.09
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	9.69
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.745
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G * W / (1 + e)$	0.171
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G * W / (1 + e)$	0.107
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.221
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>0.565</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.22</b>



C 4 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué G4. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 39 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G4.

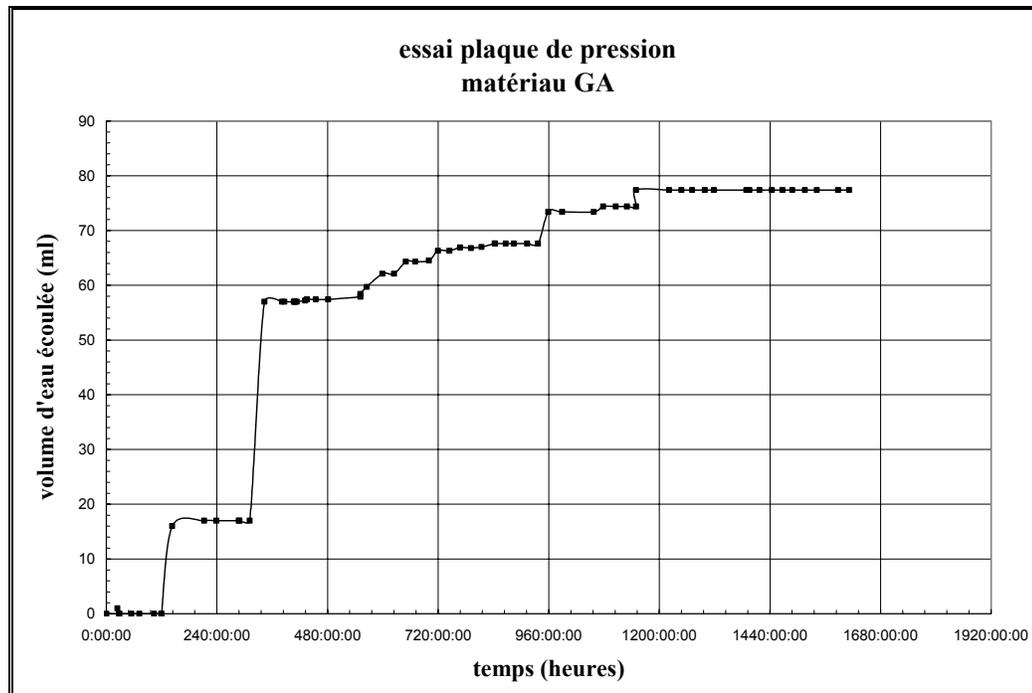
<b>matériau G4</b>	
Date: 8 avril 2006	
Teneur en eau optimale (%) +0.25	8.85
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	8.96
Teneur en eau initiale (%)	9.61
Teneur en eau finale (%)	1.46
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	1.98
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	8.26
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.809
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G \cdot W / (1 + e)$	0.189
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G \cdot W / (1 + e)$	0.177
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.259
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>1.800</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.59</b>



C 5 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué G5. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 40 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué G5.

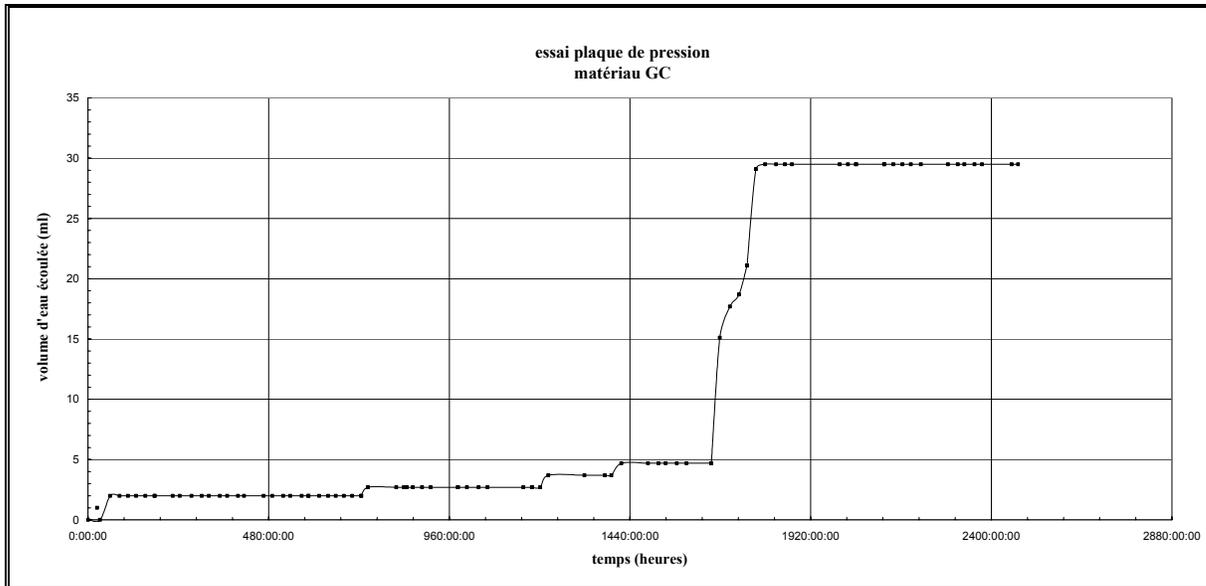
<b>matériau G5</b>	
Date: 27 janvier 2006	
Teneur en eau optimale (%) +0.25	9.45
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	9.56
Teneur en eau initiale (%)	12.60
Teneur en eau finale (%)	1.83
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	1.82
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	7.2
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1-n)F)$	0.869
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G \cdot W / (1+e)$	0.227
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G \cdot W / (1+e)$	0.092
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.324
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>0.98</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.50</b>



C 6 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué GA. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 41 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GA.

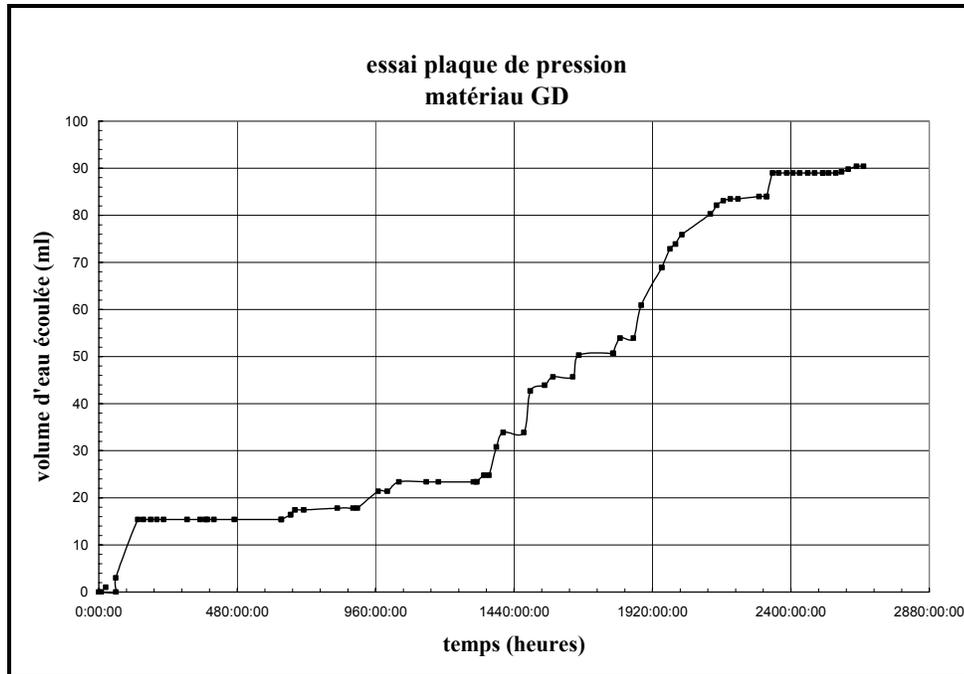
<b>matériau GA</b>	
Date: 10 septembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6.25
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	6.07
Teneur en eau initiale (%)	7.45
Teneur en eau finale (%)	0.79
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.17
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	4.63
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1-n)F)$	0.837
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G \cdot W / (1+e)$	0.161
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G \cdot W / (1+e)$	0.111
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.192
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>0.231</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.36</b>



C 7 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué GC. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 42 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GC.

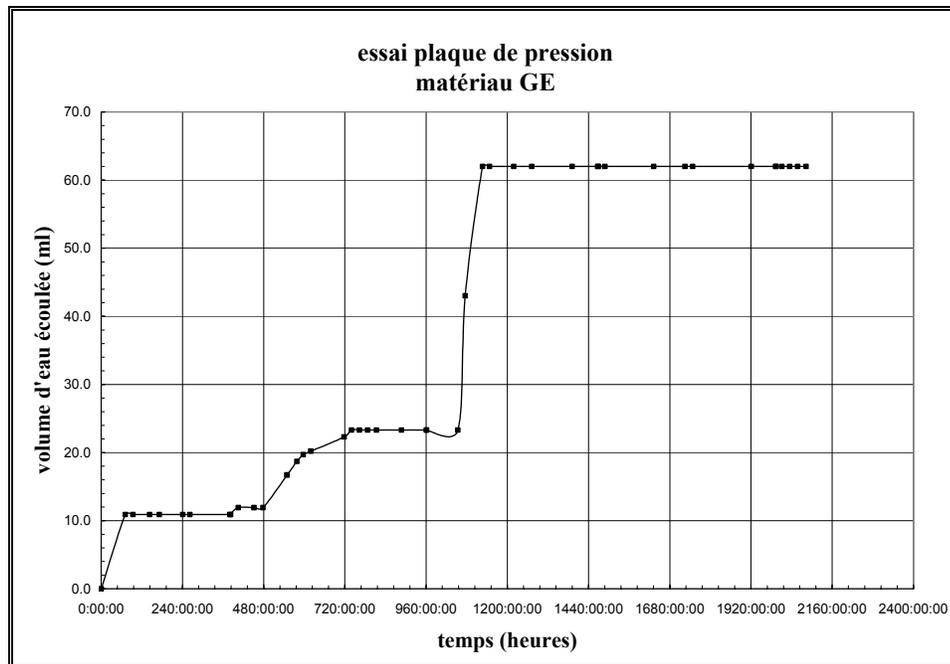
<b>matériau GC</b>	
Date: 19 novembre 2005	
Teneur en eau optimale (%) + 0.25%	6.05
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	6.09
Teneur en eau initiale (%)	7.95
Teneur en eau finale (%)	3.40
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.13
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	15.95
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1-n)F)$	0.614
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G \cdot W / (1+e)$	0.169
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G \cdot W / (1+e)$	0.109
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.203
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>0.860</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.23</b>



C 8 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué GD. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 43 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GD.

<b>matériau GD</b>	
Date: 8 avril 2006	
Teneur en eau optimale (%) +0.25	6.85
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	6.63
Teneur en eau initiale (%)	8.26
Teneur en eau finale (%)	3.85
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.13
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	26.13
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.495
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G * W / (1 + e)$	0.176
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G * W / (1 + e)$	0.141
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.204
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>4.270</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.31</b>



C 9 Valeurs de volume d'eau écoulée en fonction du temps du matériau reconstitué GE. Granitique MG-20 carrière PEB. (Détermination CCRE).

Table 44 Résultats essai plaque de pression (détermination CCRE). Matériau reconstitué GE.

<b>matériau GE</b>	
Date: 12 juin 2005	
Teneur en eau optimale (%)	7.08
Teneur en eau de compactage (%) (après saturation)	7.02
Teneur en eau initiale (%)	9.92
Teneur en eau finale (%)	4.79
Masse vol. du sol sèche (g/cm <sup>3</sup> )	2.07
Pourcentage de particules fines après compactage (%)	36.56
Porosité fraction fine $n_f = n / (n + (1 - n)F)$	0.442
Teneur en eau volumique initiale $\theta_i = G * W / (1 + e)$	0.204
Teneur en eau volumique de compactage $\theta_c = G * W / (1 + e)$	0.106
Teneur en eau volumique saturation $\theta_s = V_w / V_t$	0.224
<b>Pression d'entrée d'air <math>\psi_a</math> (kPa)</b>	<b>6.320</b>
<b>Indice de distribution de la dimension des pores <math>\lambda</math></b>	<b>0.32</b>

