

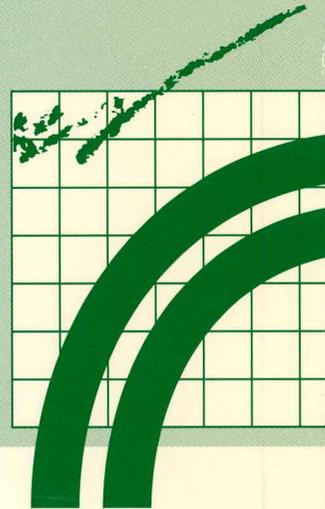
ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE DE MATÉRIAUX DE FONDATIONS DE CHAUSSÉES PARTIELLEMENT SATURÉS

JEAN CÔTÉ
MARIUS ROY

ESSAIS
ET MATÉRIAUX



CANQ
TR
PT
IT
199

Québec 

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
DIRECTION DE L'OBSERVATOIRE EN TRANSPORT
SERVICE DE L'INNOVATION ET DE LA DOCUMENTATION
700, Boul. René-Lévesque Est, 21e étage
Québec (Québec) G1R 5H1

**CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE
DE MATÉRIAUX DE FONDATIONS DE CHAUSSÉES
PARTIELLEMENT SATURÉS**

La présente étude a été préparée par le Groupe de recherche en géotechnique routière du Département de génie civil de l'Université Laval et la Direction du laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec.

Auteurs

Jean Côté
Marius Roy

Collaboration

Denis Ouellet, ministère des Transports du Québec
François Gilbert, Département de génie civil, Université Laval
Anne-Marie Leclerc, ministère des Transports du Québec
Claude Robert, ministère des Transports du Québec
Guy Tremblay, ministère des Transports du Québec
Carrière Bédard, Valcartier
Carrière Saint-Marc, Saint-Marc-des-Carières
Gravière de Beauce, Vallée-Jonction

Dépôt légal - 1998
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN-2-550-32915-5

493824



Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

FICHE ANALYTIQUE
DE RAPPORT

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
DIRECTION DE L'OBSERVATOIRE EN TRANSPORT
SERVICE DE L'INNOVATION ET DE LA DOCUMENTATION
700, Boul. René-Lévesque Est, 21e étage
Québec (Québec) G1R 5H1

Titre et sous-titre du rapport CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE DE MATÉRIAUX DE FONDATIONS DE CHAUSSÉES PARTIELLEMENT SATURÉS		N° du rapport Transports Québec RTQ-98-01	
Auteur(s) du rapport Jean Côté ; Marius Roy		Rapp. d'étape <input type="checkbox"/> An Mois Jour Rapp. final <input type="checkbox"/>	
Chargé de projet Claude Robert		N° du contrat (RRDD-AA-CCXX)	
Date du début d'étude		Date de fin d'étude	
Coût de l'étude			

Etude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Département de génie civil Faculté des sciences et de génie Université Laval Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4	REÇU CENTRE DE DOCUMENTATION 02 JUIL 1998 TRANSPORTS QUÉBEC	Etude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Ministère des Transports du Québec Service des chaussées 2700, rue Einstein Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
---	---	--

But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires
L'étude a pour but de mieux comprendre le rôle des particules fines (<0,080mm) dans le processus de drainage des matériaux granulaires de fondations routières. Considérant que les matériaux de fondation sont généralement non saturés, l'étude de la conductivité hydraulique des matériaux en fonction du degré de saturation est essentielle afin de caractériser leur capacité de drainage.

Résumé du rapport
Le présent rapport présente les travaux réalisés en collaboration avec le Groupe de recherche en géotechnique routière de l'Université Laval et la Direction du laboratoire des chaussées du ministère des Transports du Québec et porte sur l'étude de la conductivité hydraulique des matériaux de fondations de chaussées en condition non saturée. Des essais de laboratoire ont été réalisés sur des matériaux de nature différente (granite, calcaire, gravier schisteux), et ce, à différents pourcentages de particules fines (2, 7 et 12 %). Les échantillons ont été compactés dans des conditions optimales Proctor dans un moule de 305 mm de diamètre et, pendant la préparation, des sondes de mesure d'humidité (TDR) et de succion (tensiomètre) ont été installées à trois niveaux différents. Par la suite, les échantillons ont été soumis à un cycle de drainage et d'imbibition pour définir la courbe caractéristique de rétention d'eau (succion vs teneur en eau).
Un modèle mathématique, basé sur la théorie de la distribution du volume des pores, a été retenu pour le calcul de la conductivité hydraulique des matériaux, à différents degrés de saturation, à partir des données expérimentales de la courbe caractéristique de rétention d'eau. L'évolution des courbes de conductivité hydraulique et des courbes de rétention d'eau montre l'influence de la quantité et de la nature des particules fines. Pour un même matériau, l'augmentation du pourcentage de particules fines entraîne une diminution de la capacité de drainage et une augmentation de la remontée capillaire. Pour un pourcentage de fines élevé, les matériaux granitiques sont les plus drainants, viennent ensuite les matériaux schisteux, alors que les matériaux calcaires sont les moins drainants. Ces résultats s'accordent bien avec les résultats de l'essai de la valeur au bleu des matériaux. Le matériau calcaire à 7 % de fines s'est montré moins drainant que les matériaux granitiques et schisteux à 12 % de fines.
Afin de vérifier l'influence de différents paramètres contrôlant les propriétés hydrauliques des matériaux étudiés, une série de simulations numériques a été réalisée à l'aide du logiciel SEEP/W. Les paramètres étudiés sont la conductivité hydraulique à l'état saturé, la pression d'entrée d'air, qui influence la remontée capillaire, et la teneur en eau résiduelle, qui détermine la quantité d'eau disponible pour le drainage du matériau. Les résultats de l'étude paramétrique coïncident avec les résultats de laboratoire.

Nbre de pages 177	Nbre de photos	Nbre de figures 43	Nbre de tableaux 15	Nbre de références bibliographiques	Langue du document <input checked="" type="checkbox"/> Français <input type="checkbox"/> Anglais	Autre (spécifier)
Mots-clés Chaussées ; Conductivité hydraulique ; Courbes caractéristiques ; Granulats ; Matériaux de fondations ; Partiellement saturés ; Succion ; TDR ; Teneur en fines ; Tensiomètre.				Autorisation de diffusion <input checked="" type="checkbox"/> Diffusion autorisée <input type="checkbox"/> Diffusion interdite Signature du directeur général: <i>AH Declerc</i> Date: 28-05-98		

ANQ
FR
T
T
99

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES SYMBOLES	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
INTRODUCTION	1
REVUE DE LITTÉRATURE	5
Conductivité hydraulique en milieu poreux saturé	5
Conductivité hydraulique en milieu poreux partiellement saturé	6
Courbes caractéristiques de rétention d'eau	7
Mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau.....	13
Plaque de pression.....	13
Mesure de la teneur en eau et de la succion de façon ponctuelle.....	14
Méthodes directes de mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée.....	17
Méthode basée sur un régime permanent.....	17
Méthode du profil instantané	19
Méthodes indirectes de calcul de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée	20
Équations empiriques.....	20
Modèles statistiques.....	21
Évaluation des méthodes indirectes	24
Analyse des variations d'état hydrique dans les fondations des chaussées	26
Caractéristiques de drainage des matériaux de fondations des chaussées.	28
DESCRIPTION DES MATÉRIAUX	31
Généralités	31
Échantillonnage.....	33
Caractérisation des matériaux	33
Granulométries reconstituées.....	35
Caractérisation des fines des matériaux	39
DESCRIPTION DES ESSAIS	41
Essai Proctor	41
Perméamètre de 152,4 mm de diamètre.....	43
Moule de 305 mm de diamètre	44
Mesure de la teneur en eau.....	44
Sonde TDR.....	45

Étalonnage des sondes TDR	47
Mesure de la succion matricielle.....	48
Tensiomètres	49
Étalonnage des tensiomètres	50
Montage	51
Installation des capteurs	51
Phase de saturation.....	54
Phase de drainage.....	54
Phase d'imbibition	55
Prise des mesures	56
Essai à la plaque de pression.....	57
Calcul de la courbe de conductivité hydraulique	59
Simulations numériques du drainage d'une fondation de chaussée.....	62
Équations d'écoulements utilisées par le logiciel SEEP/W	62
Hypothèses pour la modélisation du drainage d'une fondation.....	64
Paramètres étudiés	65
Étude du drainage avec les matériaux de laboratoire.....	68
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	69
Données de compactage et de perméabilité	69
Caractéristiques du compactage.....	69
Changement de granulométrie à cause du compactage.....	71
Échantillons SM.....	73
Perméabilité mesurée par l'essai Proctor.....	74
Courbes caractéristiques de rétention d'eau.....	75
Paramètres de l'équation de la courbe caractéristique	77
Évolution de la teneur en eau en fonction de la succion.....	83
Effet de la granulométrie sur la courbe caractéristique.....	85
Effet d'hystérésis sur la courbe caractéristique de la phase d'imbibition	86
Mesure de la courbe caractéristique à la plaque de pression	87
Courbes de conductivité hydraulique partiellement saturée	87
Prolongement des courbes caractéristiques mesurées.....	87
Courbes de conductivité hydraulique.....	89
Effet d'hystérésis sur la conductivité hydraulique	91
Simulation du drainage d'une chaussée	94
Étude paramétrique	94
Drainage d'une fondation avec les matériaux étudiés.....	98
DISCUSSION.....	101
Appareillage.....	101
Perméamètre de 152,4 mm	101
Moule de compactage de 305 mm	101
Tensiomètres	102
Sondes TDR.....	102

Courbes caractéristiques de rétention d'eau.....	103
Effets des propriétés des matériaux sur la courbe caractéristique.....	104
Effets du compactage sur la courbe caractéristique	106
Conductivité hydraulique	107
Conductivité hydraulique de la pierre calcaire (SM2 %)	108
Influence de la variation de la conductivité hydraulique sur l'état hydrique d'une fondation de chaussée.....	109
CONCLUSION.....	115
BIBLIOGRAPHIE.....	119
ANNEXE A COURBES GRANULOMÉTRIQUES AVANT ET APRÈS LE COMPACTAGE DES MATÉRIAUX	
ANNEXE B COURBES D'ÉTALONNAGE DES SONDÉS TDR	
ANNEXE C ÉTUDE PARAMÉTRIQUE	
ANNEXE D VARIATIONS DE L'ÉTAT HYDRIQUE DANS LA FONDATION	

LISTE DES SYMBOLES

a	aire d'un tube capillaire ou paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau
A	aire d'un échantillon
b	paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau
C	vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace
e	indice des vides ou nombre naturel = 2,718
g	accélération gravitationnelle
G	densité des particules
H	charge hydraulique
ΔH	différence de charge hydraulique
k	conductivité hydraulique
k_s	conductivité hydraulique saturée
k_{sc}	conductivité hydraulique saturée calculée
k_w	conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau
Ka	constante diélectrique
L	longueur d'échantillon ou longueur des tiges de la sonde TDR
L_e	longueur électromagnétique équivalente
m	paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau ou hauteur de mercure
m_h	masse de sol humide
m_w	rétention d'eau
n	porosité ou paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau
q	flux d'écoulement ou facteur de sinuosité
Q	débit d'écoulement
r	rayon du ménisque air-eau
R	rapport de volume
S	degré de saturation ou quantité d'eau à l'intérieur d'un échantillon
t	temps
u_a	pression d'air
u_w	pression d'eau
V	volume d'eau contenue dans un pore
V_p	facteur de correction sur la longueur électromagnétique
V_t	volume total
V_v	volume de vides
V_w	volume d'eau
w	teneur en eau massique
w_{opt}	teneur en eau optimale
α	facteur de correction ou paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau
β	facteur de correction
$\nabla\phi$	gradient de potentiel hydraulique
λ	paramètre de la courbe caractéristique de rétention d'eau
ρ_d	masse volumique de sol sec
ρ_h	masse volumique de sol humide
ρ_m	masse volumique du mercure

ρ_w	masse volumique de l'eau
σ_{aw}	tension superficielle de l'eau
θ	teneur en eau volumique ou angle de contact entre le ménisque air-eau et une particule de sol
θ_{ar}	teneur en air résiduelle
θ_e	teneur en eau à la pression d'entrée d'air
θ_L	teneur en eau volumique minimale sur la courbe caractéristique de rétention d'eau
θ_r	teneur en eau résiduelle
θ_r^*	teneur en eau résiduelle à 100 kPa
θ_s	teneur en eau saturée
θ'_s	teneur en eau à saturation
θ_w	teneur en eau volumique
Θ	teneur en eau pondérée
ψ	succion matricielle
ψ_e	pression d'entrée d'air

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Montage pour la mesure de la perméabilité.....	6
Figure 2	Forme du ménisque air-eau.....	8
Figure 3	Schéma de la courbe caractéristique de rétention d'eau.....	9
Figure 4	Volume d'eau contenue entre le ménisque et les grains lorsque le liquide est mouillant ou non.....	11
Figure 5	Cellule de pression.....	14
Figure 6	Appareillage pour la mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée.....	18
Figure 7	Comparaison de différents modèles avec les mesures de conductivité hydraulique pour une grave 0-20 reconstituée et humidifiée.....	25
Figure 8	Localisation des trois sources.....	33
Figure 9	Fuseau exigé par le MTQ pour un gravier MG-20.....	35
Figure 10	Courbes granulométriques de chaque matériau avant compactage.....	38
Figure 11	Granulométrie des fines des matériaux.....	40
Figure 12	Moule cylindrique de 152,4 mm de diamètre.....	42
Figure 13	Perméamètre cylindrique de 152,4 mm de diamètre.....	43
Figure 14	Schéma de la sonde TDR.....	45
Figure 15	Forme du tracé provoqué par la sonde TDR.....	47
Figure 16	Schéma des tensiomètres.....	49
Figure 17	Exemple de mesure de la succion matricielle.....	50
Figure 18	Schéma du moule et des niveaux de mesure.....	52
Figure 19	Disposition des tensiomètres et des sondes TDR à l'intérieur du moule en fonction de la zone d'influence de la sonde TDR.....	53
Figure 20	Insertion du tensiomètre par la paroi du moule dans l'échantillon.....	54

Figure 21	Dispositif de Mariotte	56
Figure 22	Cellule de pression de la Direction du laboratoire des chaussées.....	58
Figure 23	Subdivision de la courbe caractéristique de rétention d'eau.....	60
Figure 24	Schéma du modèle de chaussée utilisé pour la simulation avec le logiciel SEEP/W	66
Figure 25	Courbes caractéristiques de rétention d'eau fictives avec différentes pressions d'entrée d'air	67
Figure 26	Courbes caractéristiques de rétention d'eau fictives avec différentes teneurs en eau résiduelle à 100 kPa (θ^*).....	68
Figure 27	Courbes granulométriques avant et après compactage du matériau VJ2 %.....	72
Figure 28	Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux calcaires	78
Figure 29	Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux schisteux comprenant 2 % de fines.....	79
Figure 30	Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux schisteux comprenant 7 et 12 % de fines.....	80
Figure 31	Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux granitiques.....	81
Figure 32	Courbes caractéristiques de rétention d'eau du matériau granitique avec ajout de fines argileuses.....	82
Figure 33	Exemple de prolongement à une valeur de saturation de 90 % pour une courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée en laboratoire	88
Figure 34	Conductivité hydraulique des matériaux calcaires.....	90
Figure 35	Conductivité hydraulique des matériaux schisteux.....	90
Figure 36	Conductivité hydraulique des matériaux granitiques.....	91
Figure 37	Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ7 %.....	92
Figure 38	Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ7 %M	93

Figure 39	Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ12 %.....	93
Figure 40	Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VC12 %.....	94
Figure 41	Variation de l'état hydrique dans une fondation.....	95
Figure 42	Courbes granulométriques des matériaux VC12 %, VJ12 % et SM7 %	106
Figure 43	Courbes caractéristiques de rétention d'eau et de conductivité hydraulique des matériaux VC12 %, VJ12 % et SM7 %.....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Équations de la courbe caractéristique de rétention d'eau.....	12
Tableau 2	Relations empiriques permettant d'estimer la conductivité hydraulique.....	20
Tableau 3	Composition minéralogique des matériaux des trois sources.....	32
Tableau 4	Résultats des essais de caractérisation.....	34
Tableau 5	Coefficients de courbure et d'uniformité et valeur au bleu pour chaque granulométrie.....	37
Tableau 6	Analyse chimique des fines des matériaux.....	39
Tableau 7	Analyse des fines par diffraction des rayons X.....	40
Tableau 8	Teneurs en eau moyennes et succions associées pour la figure 23.....	61
Tableau 9	Caractéristiques de compactage des matériaux.....	71
Tableau 10	Conductivité hydraulique dans le moule de 152,4 mm.....	74
Tableau 11	Paramètres de l'équation de la courbe caractéristique de chaque matériau.....	82
Tableau 12	Influence de θ_r^* sur les variations hydriques lorsque $\psi_e = 1$ kPa et $k_s = 10^{-5}$ cm/s.....	96
Tableau 13	Influence de la pression d'entrée d'air sur les variations hydriques lorsque $\theta_r^* = 5,3$ % et $k_s = 10^{-5}$ cm/s.....	97
Tableau 14	Influence de la conductivité hydraulique saturée sur les variations hydriques lorsque $\theta_r^* = 5,3$ % et $\psi_e = 1$ kPa.....	97
Tableau 15	Variation de l'état hydrique dans une fondation avec les matériaux étudiés en laboratoire.....	98

INTRODUCTION

La capacité portante des fondations des routes est fonction de plusieurs facteurs comme le choix des matériaux ainsi que les conditions de mise en place et d'exploitation après qu'elles sont construites. En général, la densité élevée des matériaux de fondations des routes conduit à une capacité portante excellente. Toutefois, lorsque la teneur en fines est élevée, la capacité de drainage est diminuée et la glace de ségrégation potentiellement plus élevée. Il en résulte qu'au printemps, pendant la période de dégel, l'eau de fonte se draine difficilement dans les fondations et contribue à diminuer la capacité de support.

Les matériaux de fondations des chaussées québécoises sont contrôlés par des spécifications établies par le ministère des Transports et, selon l'une d'elles, la quantité des fines ($< 0,080$ mm) ne doit pas excéder 7 %. L'objectif quant au pourcentage de fines est de réduire le potentiel de gélivité tout en assurant un support structural approprié et une bonne qualité de drainage. Or, certains sites où les fines dépassent 8 % se comportent bien, alors que d'autres démontrent des faiblesses conduisant à une dégradation prématurée des chaussées. Il importe donc de vérifier les propriétés drainantes des matériaux de fondations en fonction du type de fines présentes dans certaines carrières et gravières.

Les praticiens sont unanimes à reconnaître que la capacité structurale de la chaussée est généralement excellente dans les conditions qui existent au moment de sa construction et, par la suite, à certaines périodes de l'année au cours de sa durée de vie. Tous affirment que la période de dégel amène une diminution de la capacité portante de la chaussée qui oblige le ministère des Transports à réduire les charges sur les routes pour préserver leur durée de vie en limitant l'endommagement de leur structure de chaussée et, principalement, de la couche de surface.

Étant donné que les matériaux de fondations sont mis en place dans la chaussée à une densité maximale où la teneur en eau se rapproche de l'optimum Proctor, les matériaux dans la chaussée ont un degré de saturation qui avoisine des valeurs comprises entre 75 et 85 %, soit dans des conditions de saturation partielle. Afin de caractériser la capacité de drainage de matériaux de

fondations pour les différentes conditions hydriques possibles, l'étude de la conductivité hydraulique en fonction du degré de saturation est de mise.

L'eau dans un matériau partiellement saturé est soumise à une succion qui nuit à la perméabilité ; en fait, plus le matériau est asséché, plus la succion est élevée et plus la perméabilité est réduite. La relation qui existe entre la teneur en eau et la succion dans un matériau est communément appelée « courbe caractéristique de rétention d'eau ». Cette dernière, qui permet, entre autres, d'évaluer la remontée capillaire et la teneur en eau résiduelle, est variable et fonction de la nature des matériaux, de la forme et de la dimension des particules ainsi que de la teneur en fines qui les constituent. À partir de la courbe caractéristique de rétention d'eau et à l'aide de relations mathématiques, il est possible d'évaluer la conductivité hydraulique des matériaux à différents degrés de saturation.

La présente étude vise à déterminer l'influence de la nature et de la teneur en fines sur la variation de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau. Pour ce faire, la courbe caractéristique de rétention d'eau de matériaux de fondations est déterminée en laboratoire et, à partir de ce résultat, la courbe de conductivité hydraulique est établie. La mise en évidence des caractéristiques des matériaux étudiés en fonction des résultats de la courbe caractéristique de rétention d'eau et de la courbe de conductivité hydraulique permet ensuite de déterminer les facteurs influant sur la capacité de drainage des matériaux.

Le deuxième chapitre de la présente étude comporte une revue de la littérature sur les propriétés hydrauliques des matériaux partiellement saturés où l'on met l'accent sur la relation existant entre la teneur en eau et la succion matricielle ainsi que sur les modèles de prédiction de la conductivité hydraulique à partir de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Dans ce chapitre, l'état des connaissances sur les propriétés drainantes des fondations routières est aussi exposé.

Le chapitre *Description des matériaux* porte sur l'origine des matériaux et la technique d'échantillonnage. Il comprend une description détaillée de la nature minéralogique et des

caractéristiques de chacun des matériaux étudiés. Les courbes granulométriques utilisées pour la reconstitution des matériaux y sont aussi présentées.

Au chapitre *Description des essais*, on expose la méthodologie expérimentale ainsi que l'instrumentation employée pour déterminer la relation teneur en eau-succion matricielle. Le calcul de la conductivité hydraulique et les hypothèses de base émises pour l'étude du drainage d'une fondation de chaussée en période de dégel y sont aussi expliqués.

Le chapitre *Présentation des résultats* a pour objet les courbes caractéristiques de rétention d'eau mesurées, le calcul de la conductivité hydraulique de même que les résultats de l'étude de simulation numérique du drainage d'une fondation type.

Quant au chapitre *Discussion*, on y relate l'influence des caractéristiques et de la nature des matériaux étudiés sur leur capacité de drainage. À la lumière des résultats expérimentaux et de l'étude du drainage d'une fondation, l'importance d'une capacité de drainage satisfaisante des matériaux de fondation est discutée en fonction des variations de l'état hydrique des chaussées.

Enfin, le dernier chapitre est consacré aux conclusions tirées de l'étude et aux démarches à poursuivre pour l'avancement des connaissances sur le drainage des matériaux utilisés dans la construction des chaussées.

REVUE DE LITTÉRATURE

Les propriétés hydrauliques des sols partiellement saturés ont fait l'objet de nombreuses études. En effet, plusieurs auteurs se sont penchés sur le sujet et ont proposé différentes façons de mesurer et de prédire la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau et de la succion. Par contre, dans très peu de publications, on fait le point sur l'état général des connaissances. Toutefois, Ayad (1992), dans son étude bibliographique, regroupe les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de détermination et de prédiction de la conductivité élaborées au fil des années et en discute.

La notion de conductivité hydraulique des sols partiellement saturés s'applique aux matériaux de fondations des chaussées puisque ces matériaux sont mis en place par compactage, ce qui implique qu'ils sont à des teneurs en eau inférieures à la teneur en eau saturée. L'étude du drainage et des propriétés hydrauliques des matériaux de fondations a également fait l'objet de vastes recherches, mais très peu de connaissances ont été acquises sur leur comportement en condition partiellement saturée. Une étude bibliographique sur le drainage des chaussées par le Groupe de géotechnique de l'Université Laval (1992) permet d'analyser la situation en ce qui concerne le drainage routier.

Le présent chapitre porte sur les méthodes de détermination de la conductivité hydraulique, et sur les méthodes de prédiction basées sur la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée en laboratoire pour différents matériaux granulaires de fondations des chaussées.

Conductivité hydraulique en milieu poreux saturé

Selon la loi de Darcy (1856), l'écoulement dans un milieu poreux saturé peut s'exprimer comme suit :

Équation 1
$$q = k \frac{\Delta H}{L}$$

où q est le flux d'écoulement, k , la conductivité hydraulique du matériau et ΔH , la différence de charge mesurée sur la longueur de l'échantillon L .

La figure 1 (Hillel, 1980) montre le montage nécessaire au calcul de la conductivité dans les cas d'une charge constante et d'une charge variable.

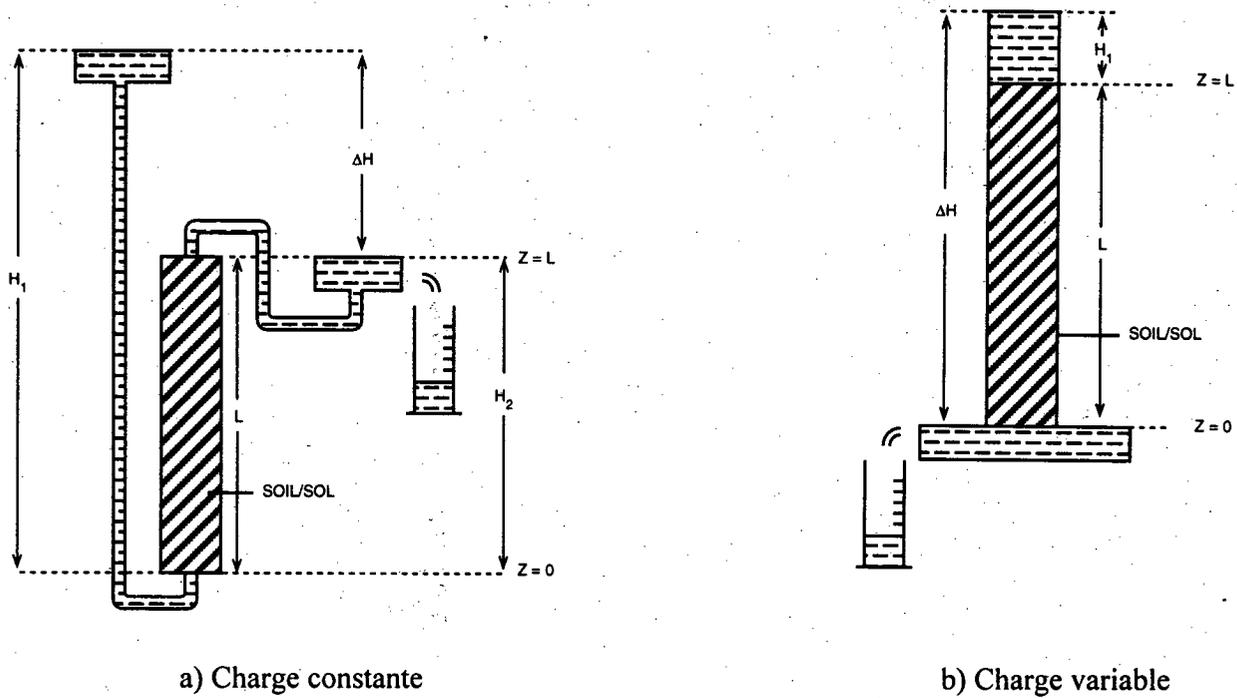


Figure 1 Montage pour la mesure de la perméabilité

L'équation 2 sert pour le calcul de la conductivité à l'aide du montage à charge constante, alors que l'équation 3 est utile pour le montage à charge variable.

Équation 2
$$k = \frac{Q \cdot L}{A (H_1 - H_2) \times (t_1 - t_2)}$$

Équation 3
$$k = \frac{aL \ln(H_2/H_1)}{A (t_2 - t_1)}$$

où k est la conductivité hydraulique ; Q , le volume d'eau écoulé ; A , l'aire du cylindre de sol et ; L , la longueur de l'échantillon. Pour l'équation 2, H_1 et H_2 sont les charges à l'entrée et à la sortie, alors que pour l'équation 3 cela signifie la charge au temps 1 et au temps 2. Par ailleurs, t_1 et t_2 sont les temps du début et de la fin de l'essai et a représente l'aire du tube d'entrée d'eau du montage à charge variable.

Conductivité hydraulique en milieu poreux partiellement saturé

Dans un matériau saturé, la conductivité hydraulique est essentiellement fonction de l'indice des vides puisque l'écoulement de l'eau s'effectue partout à l'intérieur des pores. Par contre, dans un

matériau partiellement saturé, l'air contenu dans les pores réduit l'espace disponible pour l'écoulement de l'eau et la sinuosité des canaux d'écoulement augmente, ce qui fait diminuer la conductivité hydraulique. La teneur en eau ou le degré de saturation s'ajoute donc à l'indice des vides pour régir l'écoulement de l'eau dans un matériau partiellement saturé. On peut dès lors exprimer la conductivité hydraulique en fonction de n'importe quelle paire des paramètres suivants (Fredlund et Rahardjo, 1993) :

e = indice des vides	k _w = k _w (S,e)
w = teneur en eau massique	k _w = k _w (e,w)
S = degré de saturation	k _w = k _w (S,w)

Puisque la teneur en eau volumique θ_w est fonction de e et de w, on peut aussi présenter la conductivité hydraulique k_w en fonction de la teneur en eau volumique :

Équation 4 $k_w = k_w(\theta_w)$

Courbes caractéristiques de rétention d'eau

Lorsqu'un sol humide se draine, la notion de succion s'ajoute aux paramètres de prédiction du comportement, tant mécanique qu'hydraulique. La courbe caractéristique de rétention laisse voir la relation entre la teneur en eau et la succion matricielle pour les sols partiellement saturés. À l'aide de modèles statistiques, il est possible de calculer la conductivité hydraulique en se basant sur les données de la courbe caractéristique de rétention d'un sol.

Lorsqu'un sol saturé commence à se drainer, l'espace libéré par la phase liquide est investi par une phase gazeuse. Les forces d'attraction entre les solides et les liquides ainsi que les effets de tension de surface qui agissent aux interfaces gaz-liquide produisent, dans l'eau, des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Or, les vides à l'intérieur d'un sol peuvent être considérés comme un réseau de tubes capillaires (Childs et Collis-George, 1950), où chaque tube est capable de produire des pressions, dans l'eau, inversement proportionnelles à sa dimension. La pression capillaire à l'intérieur d'un tube capillaire est décrite par l'équation suivante :

Équation 5 $u_a - u_w = \frac{2\sigma_{aw}}{r}$

où u_a est la pression dans l'air, u_w , la pression dans l'eau, $u_a - u_w$, la pression capillaire, σ_{aw} , la tension de surface air-eau et r , le rayon de courbure du ménisque air-eau.

Ainsi, dans une matrice poreuse, à l'intérieur d'un pore, la pression capillaire est inversement proportionnelle au rayon formé par le ménisque air-eau (Bear, 1972). La figure 2 montre deux possibilités de rayons de courbure en fonction du volume d'eau contenue dans un pore et de l'angle de contact (θ) entre le ménisque air-eau et les grains.

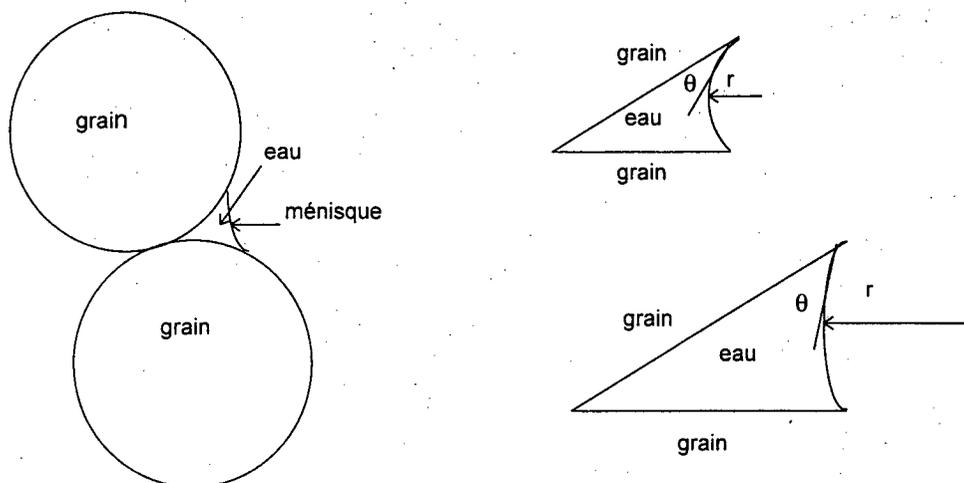


Figure 2 Forme du ménisque air-eau

Une relation schématique entre la pression capillaire et la teneur en eau pour un sol est donnée à la figure 3. Cette relation est appelée la « courbe caractéristique de rétention d'eau ». Les notions de teneur en eau résiduelle, de pression d'entrée d'air et d'effet d'hystérésis sont discutées dans les paragraphes suivants.

Généralement, lorsqu'un sol saturé commence à se drainer par l'entremise d'un gradient négatif quelconque (gravité, évaporation), la succion augmente dans la phase liquide sans occasionner de grandes variations de la teneur en eau. À un certain point, la succion ne peut s'accroître sans faire varier la teneur en eau. La succion atteinte lorsque la phase gazeuse investit peu à peu le milieu poreux est nommée, à juste titre, la « pression d'entrée d'air » et elle aura ici le symbole ψ_e .

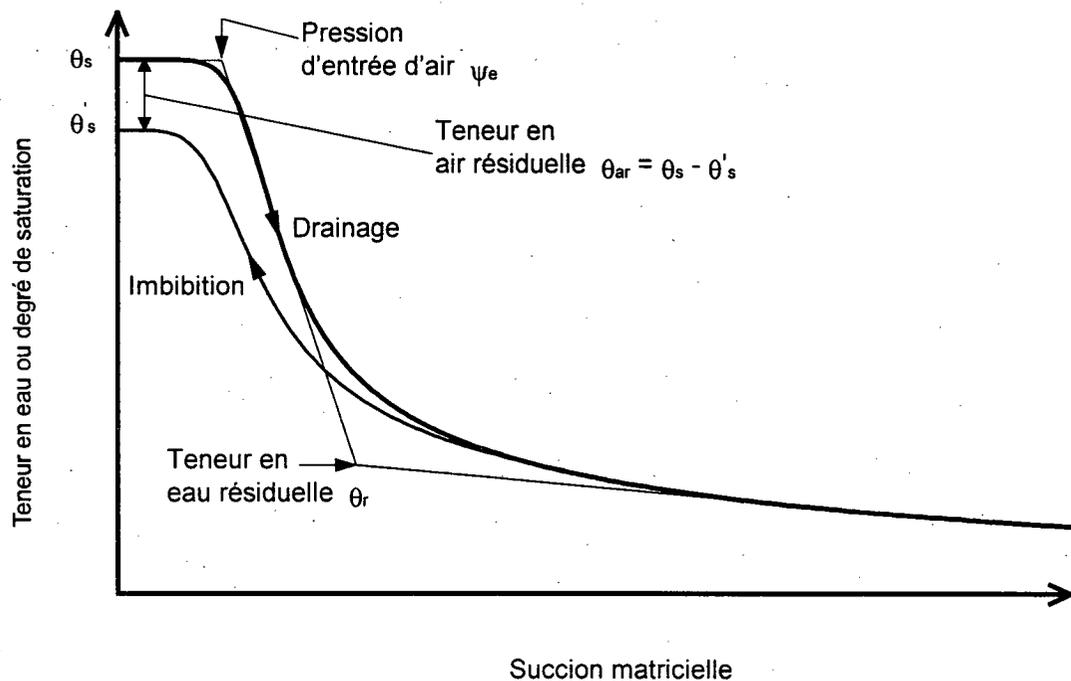


Figure 3 Schéma de la courbe caractéristique de rétention d'eau

Une fois que la pression d'entrée d'air est atteinte, le drainage du matériau débute de façon rapide. À ce stade, de grandes variations de teneur en eau occasionnent de faibles augmentations de succion. Lorsque la courbe caractéristique est tracée avec une échelle logarithmique de la succion, la pente de la portion linéaire du drainage est appelée « indice de distribution de la dimension des pores ». Une discussion sur la notion de distribution du volume des pores sera faite un peu plus loin dans la présente section. L'extrapolation de cette ligne droite jusqu'à une saturation de 100 % donne la valeur de la pression d'entrée d'air (Brooks et Corey, 1966). Cette dernière peut aussi être déterminée à une teneur en eau inférieure à la teneur en eau saturée θ_s . Selon Rogowski (1971 et 1972), la valeur de la teneur en eau θ_e correspondant à la pression d'entrée d'air ψ_e peut être comprise entre $0,8\theta_s$ et θ_s . Pour des raisons pratiques, une valeur de θ_e égale à $0,9\theta_s$ est généralement utilisée pour établir ψ_e .

Lorsque le drainage est très avancé, la pente de la courbe caractéristique de rétention commence à changer et devient pratiquement parallèle à l'axe de la succion. L'asymptote est atteinte à la teneur en eau résiduelle θ_r . Celle-ci correspond au point où la phase liquide est désormais discontinue (Brooks et Corey, 1966). Pour soutirer plus d'eau, un effort important doit donc être fourni, et c'est pourquoi la succion augmente considérablement. Selon Fredlund et Xing (1994), une façon simple

de déterminer θ_r , est de prolonger la portion linéaire du drainage et de tracer une tangente à l'asymptote à grandes succions. Le croisement des deux droites, projeté sur l'axe de la teneur en eau, correspond à θ_r . À des teneurs inférieures à θ_r , l'eau de drainage est principalement soumise aux forces capillaires d'attraction, alors qu'à des teneurs en eau supérieures à θ_r , les forces de gravité sont dominantes et l'eau peut donc être drainée par de faibles gradients.

Durant une phase d'imbibition, une hystérésis de la courbe caractéristique de rétention d'eau est visible par rapport à la phase de drainage. Pour une teneur en eau constante, la succion est plus faible au moment de l'imbibition qu'au cours du drainage. Cela s'explique par la forme du ménisque air-eau entre deux grains (figure 2), plus précisément du rayon de courbure du ménisque air-eau. Lorsque le sol se draine, l'eau est un liquide non mouillant qui est chassé du matériau et le rayon de courbure du ménisque se révèle faible, donc la pression capillaire est plus élevée. À l'inverse, dans le cas d'une phase d'imbibition, l'eau devient un liquide mouillant qui tente de pénétrer dans le matériau, ce qui fait augmenter le rayon du ménisque et la pression capillaire est plus faible (Bear, 1970). Or, pour deux rayons de courbure différents, tels ceux obtenus durant une phase d'imbibition et durant une phase de drainage, une même teneur en eau est possible. La figure 4 montre que, pour une même teneur en eau, on peut obtenir des formes différentes du ménisque air-eau et, ainsi, des pressions capillaires distinctes correspondant à des rayons de courbure r_1 et r_2 .

Une phase d'imbibition ne permettra pas de recouvrir la saturation complète du sol à cause de l'air emprisonné à l'intérieur des pores. La teneur en air restante θ_{ar} (voir figure 3) à la fin du cycle d'imbibition correspond à la teneur en air résiduelle du sol, tout comme il existe une teneur en eau résiduelle pour ce même sol. En vue d'atteindre la saturation complète, il faudra appliquer une charge d'eau positive sur l'échantillon pour que les particules de gaz soient expulsées ou dissoutes dans l'eau.

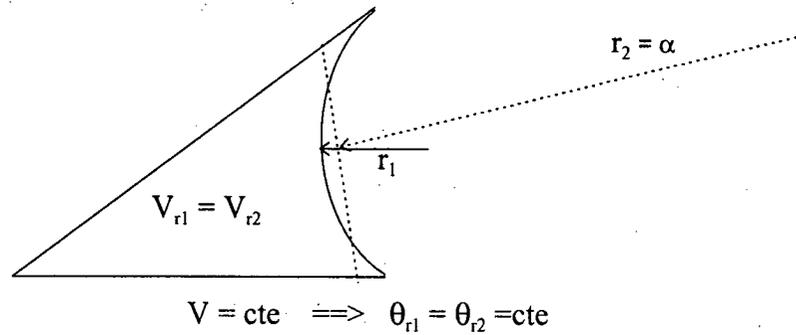


Figure 4 Volume d'eau contenue entre le ménisque et les grains lorsque le liquide est mouillant ou non

La pente de la portion linéaire de la courbe caractéristique de rétention d'eau est une indication du volume et de la grosseur des pores dans le sol. Gardner (1958) ainsi que Brooks et Corey (1966) ont constaté que des pentes abruptes ont été mesurées pour des matériaux ayant des courbes granulométriques très uniformes, alors que des pentes plus douces apparaissent pour des matériaux mieux étalés. Ils ont donc utilisé la pente de cette portion de la courbe caractéristique de rétention d'eau comme caractéristique de la distribution du volume des pores. Sachant que ce dernier est le paramètre principal d'un matériau contrôlant la pression capillaire, sa distribution peut donc être déduite de la courbe caractéristique de rétention d'eau. La teneur en eau est un pourcentage de la porosité :

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

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

où θ est la teneur en eau volumique, n , la porosité, V_v , le volume des vides, V_w , le volume d'eau, V_t , le volume total et x , une fraction de la porosité qui représente en fait le degré de saturation.

Pour leur part, Childs et Collis-George (1950) ont établi la théorie de la distribution du volume des pores pour un sable non cimenté en se basant sur l'hypothèse que l'espace poreux est continu. Les pores sont des volumes variables dispersés de façon aléatoire dans le matériau. En subdivisant la courbe caractéristique de rétention d'eau par intervalles réguliers de teneur en eau, on obtient donc une classification de volumes de pores auxquels sont associées des succions matricielles.

Sur la base de cette théorie, Fredlund et Xing (1994) ont démontré que la formule représentée ici par l'équation 6 est une bonne façon d'exprimer mathématiquement la courbe caractéristique de rétention d'eau pour tous les matériaux.

Équation 6

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + (\psi/a)^n \right]} \right]^m$$

où e est le nombre naturel = 2,718282 et m, n et a, des paramètres décrivant la forme de la courbe caractéristique de rétention d'eau.

D'autres auteurs ont formulé des équations pour la courbe caractéristique de rétention d'eau. Certaines sont limitées par leur faible domaine d'application, alors que d'autres se rapprochent de la forme donnée par l'équation 6. Le tableau 1 regroupe les principales équations (équations 7 à 11) proposées dans la littérature.

Tableau 1		
Équations de la courbe caractéristique de rétention d'eau		
Auteur	Formule	Équation
Gardner (1958)	$\Theta = \frac{1}{1 + \alpha \psi^n}$	7
Brooks et Corey (1966)	$\Theta = \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^\lambda$	8
Rogowski (1971)	$\theta = \theta_e + \alpha \ln(\psi - \psi_e + 1) \quad \psi \geq \psi_e$ $\theta = \theta_e + \beta \ln(\psi_e - \psi + 1) \quad \psi \leq \psi_e$	9
Campbell (1974)	$\Psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b}$	10
Van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right]^m$	11

Dans le tableau 1, le symbole Θ représente la teneur en eau normalisée qui s'exprime comme suit :

Équation 12

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Les équations proposées par Brooks et Corey (1964) et par Campbell (1974) s'appliquent à vrai dire à un domaine limité de la courbe caractéristique de rétention d'eau. En effet, elles permettent de

décrire la courbe à des succions supérieures à la pression d'entrée d'air seulement. La portion de la courbe caractéristique à des succions inférieures à cette valeur doit être considérée comme linéaire. Cette limitation implique que l'application de modèles de calcul de la conductivité hydraulique, qui seront discutés dans la section *Méthodes directes de mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée*, est purement empirique et fondée sur un seul paramètre de caractérisation de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Par ailleurs, les équations de Gardner (1958), Van Genuchten (1980) et, particulièrement, celle de Fredlund et Xing (1994) permettent de mieux définir la forme de la courbe caractéristique de rétention d'eau sur toute la plage de suction. Une équation unique permet donc d'appliquer les modèles par intégration du calcul de la conductivité hydraulique qui seront vus à la section *Modèles statistiques*.

Mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau

Plaque de pression

Pour déterminer la courbe caractéristique de rétention d'eau, l'essai à la plaque de pression est probablement le plus répandu et le plus simple à exploiter. La figure 5 tirée de Klute (1965b) montre un exemple de montage de cellule de pression.

L'échantillon à tester est placé à l'intérieur de la cellule de pression sur une plaque poreuse à grande pression d'entrée d'air. La suction matricielle maximale mesurable à l'intérieur de l'échantillon est limitée par la pression d'entrée d'air de la plaque. Cet essai consiste à créer une suction matricielle dans l'échantillon en appliquant une pression d'air dans la cellule. La suction matricielle est définie par l'équation $\psi = u_a - u_w$, où u_a est égal à la pression d'air et u_w , à la pression d'eau. L'essai est fait par paliers de pression d'air. Au début de chaque palier, la pression dans l'eau augmente en fonction de la pression d'air appliquée dans la cellule et, à mesure que l'eau est évacuée, la pression d'eau diminue. On dit que l'équilibre est atteint dans tout l'échantillon lorsque l'évacuation d'eau cesse et que la pression d'eau est nulle partout. Alors, dans cet état d'équilibre, la suction matricielle est égale à la pression d'air. Un contrôle de la masse de l'échantillon donne la valeur de la teneur en eau associée à cet état de pression. La teneur en eau est donc mesurée par une méthode gravimétrique qui s'applique à la totalité de l'échantillon. L'essai a fait l'objet d'une étude réalisée

par la Direction du laboratoire des chaussées du ministère des Transports où il est appelé « potentiel de succion » (ministère des Transports, LC-22-330, 1993).

Traduction des termes :

- Cemented joint (Joint de graisse à vide)
- Clamping screw (Vis de serrage)
- Gum rubber tubing (Tube de caoutchouc)
- 1/4" Gum rubber tubing (Tube de caoutchouc de 5 mm)
- Heater terminals (Bornes pour chauffer le moule)
- Membrane (Membrane perméable)
- Outflow tube (Sortie d'eau)
- Porous plate (Plaque poreuse)
- Resistance wire heater (Fils chauffants)
- "O" ring (Joint d'étanchéité)
- Sample (Échantillon)
- Sample retainer (Moule)
- Saran screen (Écrou papillon)
- To air pressure (Vers l'approvisionnement en air sous pression)

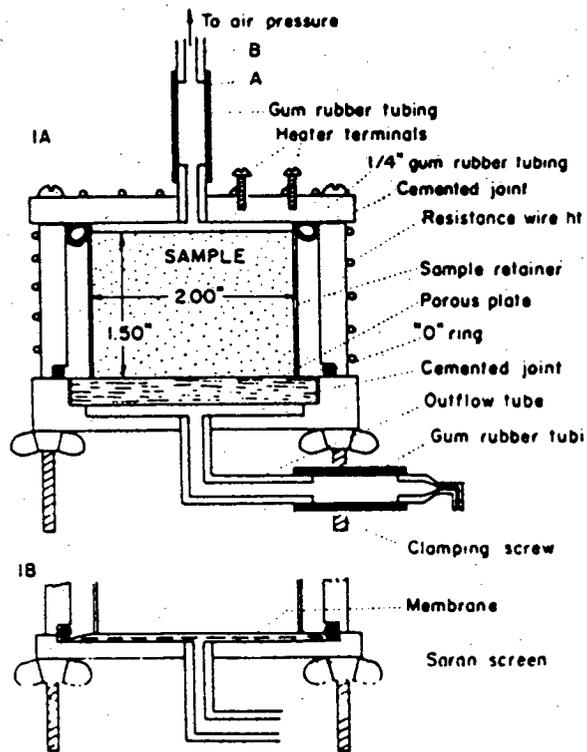


Figure 5 Cellule de pression (Klute, 1965 b)

Mesure de la teneur en eau et de la succion de façon ponctuelle

Une autre façon de déterminer la courbe caractéristique de rétention d'eau est de mesurer la succion matricielle et la teneur en eau à un instant t à un endroit x dans un sol. Cela a l'avantage de ne pas nécessiter l'établissement d'un équilibre de la pression à l'intérieur de tout l'échantillon. On doit alors avoir recours à des appareils capables d'effectuer les mesures de façon ponctuelle et continue, ce qui implique que les méthodes utilisées doivent être non destructives.

Mesure de la succion matricielle

La pression négative à l'intérieur de l'eau contenue dans un échantillon de sol peut être mesurée à l'aide d'un tensiomètre fabriqué avec une bougie poreuse. Cette dernière, en forme de coupe, est remplie d'eau. La pression de l'eau à l'intérieur de la bougie tend à s'équilibrer avec la pression de l'eau à l'extérieur.

La bougie poreuse, reliée à un système de mesure de pression, permet de mesurer les pressions négatives à l'intérieur d'un fluide. Lorsque la pression de l'air à l'intérieur du sol est égale à la pression atmosphérique, la succion matricielle correspond exactement à la succion dans l'eau.

$$\psi = u_a - u_w \quad \text{si } u_a = 0$$

donc:

$$\psi = -u_w$$

La bougie poreuse doit avoir une pression d'entrée d'air assez élevée pour permettre la mesure de la succion sur un domaine suffisamment grand en vue d'établir la courbe caractéristique de rétention d'eau jusqu'à la teneur en eau résiduelle. Un tensiomètre en contact avec des succions plus élevées que sa pression d'entrée d'air cesse de fonctionner (Childs, 1969) à cause des bulles d'air qui s'infiltrèrent à l'intérieur du système de mesure. À la suite de l'entrée de l'air dans les pores de la bougie, la tension mesurée tend progressivement vers zéro, ce qui n'est vraisemblablement pas le cas dans le sol environnant. Pour des matériaux tels que ceux étudiés ici, une pression d'entrée d'air de 100 kPa est suffisante. Comme la perméabilité de la bougie poreuse influe sur le temps de réponse, il est primordial de choisir une perméabilité suffisamment grande pour que le tensiomètre ait le temps de s'équilibrer avec les changements de pression de l'eau environnante (Fredlund et Rahardjo, 1993).

Une des premières utilisations des tensiomètres sur un chantier a été faite par Skempton et Henkel (1960) à l'occasion de l'auscultation d'un dévers situé dans l'argile de Londres. Depuis, les tensiomètres sont utilisés dans plusieurs champs d'application, dont l'analyse des variations hydriques des chaussées (Raimbault, 1986a ; Raimbault et Sylvestre, 1990 ; Paute, 1990) et la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau de matériaux granulaires de fondations routières (Raimbault, 1986b). Ils peuvent aussi servir à la mesure de la conductivité hydraulique (voir la section *Méthodes directes de mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée* où l'on traite des méthodes de mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée).

Mesure de la teneur en eau

En vue de suivre l'évolution de la teneur en eau de façon continue dans les chaussées et sur des échantillons de sol testés en laboratoire, diverses méthodes non destructives ont été mises au point,

dont la mesure de la résistivité électrique, les méthodes à rayons gamma et les méthodes de capacité électrostatique.

La méthode capacitive permet de mesurer la constante diélectrique qui a la particularité d'être pratiquement invariable pour tous les types de sol à l'état sec. Par contre, elle subit fortement l'influence de la teneur en eau. La constante diélectrique de l'eau à 20 °C est égale à 80, alors que, pour les sols secs, elle est de 2 à 4. Selon Ballard (1973), cette méthode est une des plus simples, des plus rapides et des moins coûteuses parmi toutes les méthodes non destructives disponibles pour la détermination de la teneur en eau.

La relation entre la teneur en eau et la constante diélectrique d'un sol peut être déterminée par la méthode appelée *time domain reflectometry* (TDR). Celle-ci consiste à faire passer une onde électromagnétique à travers la matrice poreuse et à mesurer la vitesse de propagation de l'onde.

Selon Topp, Davis et Aman (1980), la constante diélectrique d'un sol peut être établie de façon approximative :

Équation 13

$$K_a = \left[\frac{C \times t}{L} \right]^2$$

où K_a est la constante diélectrique de la ligne de transmission, C , la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans l'espace, t , le temps de transmission et L , la longueur de la sonde.

En procédant à des calibrations avec plusieurs types de sols, Topp, Davis et Aman (1980) ont trouvé une relation empirique reliant la constante diélectrique à la teneur en eau volumique :

Équation 14

$$\theta = 4,3E^{-6}K_a^3 - 5,5E^{-4}K_a^2 + 2,92E^{-2}K_a - 5,3E^{-2}$$

Cette relation peut toutefois varier en fonction de la nature du matériau, de sa densité et de sa texture (Topp, Davis et Aman, 1980 et 1982).

De leur côté, Dupas et Raimbault (1980) ont tenté de jumeler une sonde TDR et un tensiomètre sans trop de succès puisque l'eau contenue dans la cavité de la bougie poreuse du tensiomètre influe sur la lecture de la constante diélectrique faite par la sonde TDR. Il faut donc placer le tensiomètre suffisamment loin de la sonde TDR.

Les sondes TDR ont été utilisées avec succès pour l'analyse des cycles d'humidité dans les fondations des chaussées (Raimbault, 1986a ; Pooh, 1992), pour des essais en laboratoire sur des matériaux granulaires de fondations routières (Raimbault, 1986b), ainsi que pour diverses expériences, notamment le suivi de l'évolution de fronts d'imbibition avec un gradient de teneur en eau élevé (Topp, Davis et Aman, 1982) et l'évolution des teneurs en eau dans les terres agricoles (Topp et Davis, 1985).

Méthodes directes de mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée

Essentiellement, deux méthodes de laboratoire sont utilisées pour déterminer la conductivité hydraulique des matériaux partiellement saturés. Il s'agit de la méthode basée sur un régime permanent et la méthode du profil instantané.

Méthode basée sur un régime permanent

La méthode basée sur un régime permanent consiste à faire passer l'eau à travers le matériau poreux avec un gradient constant. Appliquée aux sols non saturés, cette méthode nécessite un appareillage spécial par rapport à celui utilisé pour les sols saturés. La figure 6 (Klute, 1965a) montre ce qui en est.

L'échantillon de sol est placé entre deux plaques poreuses ayant une pression d'entrée d'air élevée, P1 et P2. Deux tensiomètres, T1 et T2, sont installés à des élévations différentes le long de l'échantillon pour mesurer la pression dans l'eau des pores. Une pression d'air constante est appliquée à l'intérieur de l'échantillon et est mesurée par le manomètre M. L'écoulement de l'eau à charge constante est fourni par une bouteille de Mariotte au-dessus de la plaque P1. Les valves S1 et S2 servent pour évacuer les bulles d'air du système.

Le calcul de la conductivité hydraulique se fait à l'aide de l'équation suivante :

Équation 15

$$k_w = \left[\frac{Q}{At} \right] \left[\frac{L}{H_3 - H_4} \right]$$

où Q est le volume d'eau écoulée, A , la surface de l'échantillon, t , le temps de l'écoulement, L , la distance entre les tensiomètres et H_3 et H_4 , les charges hydrauliques mesurées par les tensiomètres T_1 et T_2 . La succion matricielle moyenne à l'intérieur du sol est donnée par l'équation suivante :

Équation 16
$$\bar{\Psi} = \rho_m g m - \frac{h_3 - h_4}{2} - \rho_w g$$

où $\bar{\Psi}$ est la succion matricielle moyenne, ρ_w et ρ_m , les densités de l'eau et du fluide du manomètre, g , l'accélération gravitationnelle (9,81 m/s) et où h_3 , h_4 et m sont respectivement la hauteur d'eau des tensiomètres T_1 et T_2 et du fluide du manomètre.

Traduction des termes

- Bubble tube (Tube d'air)
- Constant head water supply system (Système d'alimentation en eau pour charge constante)
- Drip point (Point d'égouttement)
- Hydraulic head reference (Niveau de référence pour la charge hydraulique)
- Soil (Sol)
- To constant gas pressure source (Vers l'approvisionnement en air à pression constante)

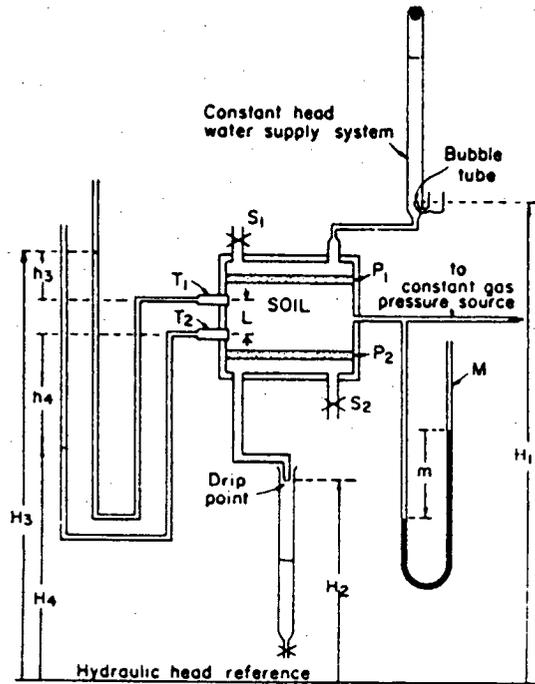


Figure 6 Appareillage pour la mesure de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée (Klute, 1965 b)

Donc, dans différents états de succion matricielle, contrôlés par la pression d'air appliquée, une mesure de la conductivité hydraulique est prise. À chaque palier de succion, le régime permanent doit être atteint avant de faire la mesure de la conductivité hydraulique. Pour associer la conductivité hydraulique avec la teneur en eau, on peut mesurer cette dernière en pesant tout l'appareillage à chaque palier de succion matricielle. On peut aussi utiliser la courbe caractéristique de rétention d'eau du matériau étudié pour déduire la teneur en eau associée à l'état de succion matricielle.

Méthode du profil instantané

La méthode du profil instantané est une méthode basée sur un régime transitoire qui peut être utilisée *in situ* et au laboratoire. Applicable à des phases de drainage ou d'imbibition, elle consiste à suivre l'évolution d'un volume d'eau dans le temps. Vachaud (1969), en appliquant la loi de Darcy étendue aux écoulements en milieu partiellement saturé telle qu'elle a été énoncée par Richards (1931), montre que la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

Équation 17
$$k(\overline{\theta_{x,t}}) = -\frac{q_{x,t}}{\nabla\phi_{x,t}}$$

où $\overline{\theta_{x,t}}$ est la teneur en eau à la section x et au temps t , k , la conductivité hydraulique, q , le flux et $\nabla\phi$, le gradient de potentiel hydraulique.

Le flux q est calculé à partir du stock d'eau au temps t donné par l'équation suivante :

Équation 18
$$q = \frac{dS}{dt}$$

où $S(t) = \int_0^L \theta(x,t) dx$ est la quantité d'eau dans tout l'échantillon de longueur L à l'instant t .

Selon Klute (1972), cette méthode est la meilleure pour la détermination de la conductivité hydraulique des sols non saturés *in situ* puisqu'elle ne nécessite pas l'imposition d'un régime permanent, lequel risque de mettre beaucoup de temps à s'établir dans le milieu (méthode décrite à la section *Méthode basée sur un régime permanent*). La méthode du profil instantané a été utilisée par Rimbault (1986b) pour mesurer la conductivité hydraulique d'un matériau granulaire de fondations routières.

Méthodes indirectes de calcul de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée

Pour déterminer la conductivité hydraulique des matériaux partiellement saturés par des méthodes indirectes, deux approches sont utilisées (Fredlund et Xing, 1994) : les équations empiriques et les modèles statistiques. Les premières peuvent être employées seulement lorsque des valeurs de

conductivité hydraulique mesurées sont disponibles, alors que l'utilisation des seconds nécessite la connaissance de la courbe caractéristique de rétention du matériau.

Équations empiriques

Beaucoup d'efforts ont été déployés pour déterminer la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée par des équations simples utilisant le minimum de paramètres. Ces équations sont basées sur la conductivité hydraulique saturée, la pression d'entrée d'air ou la teneur en eau résiduelle avec des paramètres empiriques déterminés à l'aide de quelques données de conductivité hydraulique. Le nombre de données nécessaire est égal au nombre de paramètres de l'équation permettant d'estimer la conductivité hydraulique à différents degrés de saturation ou niveaux de succion. Par contre, lorsque le nombre de valeurs mesurées disponible excède celui des paramètres, une régression peut être effectuée pour déterminer ces derniers tout en augmentant la précision.

Certains auteurs expriment la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau volumique, alors que d'autres donnent des relations de la conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle. Le tableau 2 montre quelques relations empiriques (équations 19 à 24) proposées dans la littérature.

Tableau 2		
Relations empiriques permettant d'estimer la conductivité hydraulique		
Auteur	Relation	Équation
Richards (1931)	$k = a\psi + b$	19
Irmay (1954)	$k_r = \Theta^n ; n = 3$	20
Gardner (1958)	$k = k_s / (\alpha\psi^n + 1)$	21
Brooks et Corey (1966)	$k = k_s ; \psi < \psi_e$ $k = k_s(\psi_e/\psi)^{2+3\lambda} ; \psi > \psi_e$	22
Davidson et al. (1969)	$k = k_s \exp[\alpha(\theta - \theta_s)]$	23
Campbell (1974)	$k = k_s(\theta/\theta_s)^{2b+3}$	24

Les équations de la conductivité hydraulique peuvent donc être utilisées pour relier des données de conductivité hydraulique, mais elles peuvent être basées sur la courbe caractéristique de rétention d'eau puisque les paramètres, tels que a , b , n , α et λ , sont aussi employés pour décrire cette dernière, alors que k_s représente la conductivité hydraulique saturée et k_r la conductivité hydraulique relative.

Modèles statistiques

Les modèles statistiques de calcul de la conductivité hydraulique sont fondés sur les théories de la distribution du volume des pores élaborées par Childs et Collis-George (1950) ainsi que par Burdine (1953). Ces théories permettent d'établir la distribution de la dimension des pores en fonction de la succion qu'ils peuvent créer.

Le modèle de Childs et Collis-George (1950) a été modifié par Marshall (1958) et ensuite amélioré par Kunze, Uehara et Graham (1968). À partir des données de la courbe caractéristique de rétention séparée en intervalles égaux de la teneur en eau, la conductivité hydraulique s'exprime selon l'équation suivante :

Équation 25
$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \sum_{j=i}^m \left[\frac{2j+1-2i}{\psi_j^2} \right]$$

où $i = 1, 2, 3, \dots m$

Dans l'équation, i représente le numéro de l'intervalle. Pour chaque intervalle, la teneur en eau moyenne et la succion correspondante sont déterminées et utilisées dans l'équation en tant que θ_i et ψ_i . Les paramètres de l'équation sont les suivants :

$k_w(\theta_w)_i$	conductivité hydraulique pour une teneur en eau volumique $(\theta_w)_i$ correspondant au i^{e} intervalle (m/s) ;
$(\theta_w)_i$	teneur en eau moyenne de l'intervalle i ;
ψ_i	succion correspondant à la teneur en eau moyenne de l'intervalle i ;
i	numéro d'intervalle qui s'accroît lorsque la teneur en eau décroît ;
j	compteur de i à m ;
m	nombre d'intervalles entre la teneur en eau volumique saturée θ_s et la teneur en eau la plus faible des données disponibles θ_1 ;
k_s	conductivité hydraulique saturée ;
k_{sc}	facteur de correction sur la conductivité hydraulique.

Le paramètre k_{sc} a été utilisé par les différents auteurs comme un facteur de correction pour recalculer la conductivité hydraulique calculée sur la valeur de la conductivité hydraulique saturée mesurée en laboratoire en condition saturée. Pour sa part, Jackson (1972) a proposé une méthode de calcul pour le coefficient k_{sc} , soit :

Équation 26
$$k_{sc} = \sum_{j=1}^m \left[\frac{2j-1}{\psi_j^2} \right]$$

L'équation 25 devient donc :

Équation 27

$$k_r(\theta_i) = \frac{\sum_{j=i}^m \left[\frac{2j+1-2i}{\psi_j^2} \right]}{\sum_{j=1}^m \left[\frac{2j-1}{\psi_j^2} \right]}$$

Cette équation a été l'outil de travail principal de la présente étude puisque le logiciel SEEP/W utilisé pour la simulation numérique du drainage d'une chaussée est basé sur cette équation. Elle peut toutefois être exprimée, comme Fredlund, Xing et Huang (1994) l'ont démontré, sous la forme d'une intégrale de la courbe caractéristique de rétention d'eau :

Équation 28

$$k_r(\theta) = \frac{\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\theta-x}{\psi^2(x)} dx}{\int_{\theta_L}^{\theta_s} \frac{\theta_s-x}{\psi^2(x)} dx}$$

où θ_L est la teneur en eau volumique la plus faible mesurée sur la courbe caractéristique.

Lorsque la teneur en eau résiduelle du sol est connue, on peut reformuler l'équation 28 de la façon suivante :

Équation 29

$$k_r(\theta) = \frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{\theta-x}{\psi^2(x)} dx}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta_s-x}{\psi^2(x)} dx}$$

Afin d'obtenir de meilleurs résultats avec ces équations, certains auteurs proposent un facteur de correction supplémentaire, Θ^q , qui permet de tenir compte de la sinuosité du matériau. Θ est calculé à l'aide de l'équation 12. Millington et Quirk (1961) proposent une valeur de q égale à $4/3$, alors que Marshall (1958) suggère une valeur de q égale à 0, ce qui ramène le facteur de correction à l'unité : $\Theta^0 = 1$. De leur côté, Kunze, Uehara et Graham (1968) ainsi que Green et Corey (1971) et Jackson (1972) ont toutefois précisé une valeur de q égale à 1.

Par ailleurs, Burdine (1953) a soumis une équation similaire à l'équation 29 qui s'exprime de la façon suivante :

Équation 30

$$k_r(\theta) = \frac{k(\theta)}{k_s} = \Theta^q \frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{dx}{\psi^2(x)}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{dx}{\psi^2(x)}}$$

Cette équation a été modifiée à son tour par Mualem (1976) :

$$\text{Équation 31} \quad k_r(\theta) = \Theta^q \left(\frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{dx}{\psi^2(x)}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{dx}{\psi^2(x)}} \right)^2$$

Notons que Mualem (1976) utilise une valeur de q égale à 0,5, alors que, dans l'équation de Burdine (1953), la valeur de q est égale à 2.

Avec son équation de la courbe caractéristique de rétention d'eau (équation 11), à laquelle la condition $m = 1 - 1/n$ est imposée, Van Genuchten (1980) a intégré les équations de Burdine (1953) et de Mualem (1976) pour arriver à deux équations simples de la conductivité hydraulique en fonction des paramètres α , n et m . Les équations 32 et 33 sont la solution de Van Genuchten au modèle de Burdine, tandis que les équations 34 et 35 représentent sa solution au modèle de Mualem :

$$\text{Équation 32} \quad k_r(\Theta) = \Theta^2 \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]$$

$$\text{Équation 33} \quad k_r(\psi) = \frac{1 - (\alpha\psi)^{n-2} \left[1 + (\alpha\psi)^n \right]^{-m}}{\left[1 + (\alpha\psi)^n \right]^{2m}}$$

$$\text{Équation 34} \quad k_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2$$

$$\text{Équation 35} \quad k_r(\psi) = \frac{\left[1 - (\alpha\psi)^{n-1} \left[1 + (\alpha\psi)^n \right]^{-m} \right]^2}{\left[1 + (\alpha\psi)^n \right]^{m/2}}$$

Évaluation des méthodes indirectes

Étant donné la simplicité d'utilisation des modèles de prédiction de la conductivité hydraulique proposés par Kunze, Uehara et Graham (1968) et par Van Genuchten (1980) ainsi que leurs possibilités d'application aux modèles d'écoulement en milieu partiellement saturé, plusieurs auteurs ont procédé à l'évaluation des différents modèles présentés dans la littérature.

Nombre d'auteurs ont évalué les équations de Van Genuchten (1980) dérivées des modèles de Burdine et de Mualem. En ce qui les concerne, Stephens et Rehfeldt (1985) concluent que les équations proposées sont très versatiles et donnent des résultats comparables aux valeurs mesurées pour un sable fin, lorsque la teneur en eau résiduelle est bien définie, c'est-à-dire en mesurant la courbe caractéristique de rétention d'eau à des valeurs de succion matricielle très élevées. Par contre, Setiawan et Nakano (1993) ont montré que la prédiction de la conductivité hydraulique, pour un sable uniforme et pour l'argile de Kanto qui possède une granulométrie très étalée, est fiable seulement pour des teneurs en eau faibles. Si ces dernières sont élevées, les équations sous-estiment la conductivité hydraulique.

L'effet de la température sur la précision des équations de prédiction de Van Genuchten a aussi été étudié. Hopmans et Overmars (1986) ont prouvé que les équations de prédiction sont valables pour l'évaluation de la conductivité hydraulique à des températures différentes. Pour un sol donné, ils ont déterminé les courbes caractéristiques de rétention d'eau à 20 et à 44,5 °C. Ils ont aussi mesuré les courbes de conductivité hydraulique aux mêmes températures. En utilisant les équations de Van Genuchten, ces chercheurs ont pu constater que les prédictions s'harmonisaient bien avec les courbes de conductivité mesurées. La conductivité hydraulique relative, mesurée et prédite à 44,5 °C, est légèrement supérieure à celle à 20 °C.

Les modèles dérivant du concept de Childs et Collis-George (1950) proposés par Marshall (1958) Millington et Quirk (1961) ainsi que par Kunze, Uehara et Graham (1968) ont été mis à l'épreuve par Green et Corey (1971). L'évaluation des résultats de prédiction a permis d'observer que les modèles soumis par ces derniers étaient appropriés pour la plupart des sols répertoriés dans la littérature.

Le modèle de Kunze, Uehara et Graham (1968) a aussi été évalué par Fredlund, Xing et Huang (1994). En utilisant l'équation proposée par Fredlund et Xing (1994), soit l'équation 6 de la courbe caractéristique, Fredlund, Xing et Huang ont démontré que ce modèle était tout à fait adapté pour une très grande variété de sols présentés dans la littérature. Par contre, pour obtenir des prédictions satisfaisantes de la conductivité hydraulique, la courbe caractéristique de rétention doit être définie en laboratoire de façon très rigoureuse et sur une plage de succion assez grande afin d'être en mesure de bien circonscrire la teneur en eau résiduelle.

Pour vérifier la validité des équations de conductivité hydraulique dans le cas des matériaux granulaires de fondations des chaussées, les données de Raimbault (1986b) ont été utilisées. Ainsi, l'équation 24 (Campbell, 1974), l'équation 27 (Jackson, 1972) et les équations 32 et 34 (Van Genuchten, 1980) ont été employées pour prédire la conductivité hydraulique à partir de la courbe caractéristique d'une grave 0-20 reconstituée et humidifiée ayant une densité de 2,14. La figure 7 montre les résultats des prédictions par rapport aux mesures directes de conductivité hydraulique établies avec la méthode du profil instantané.

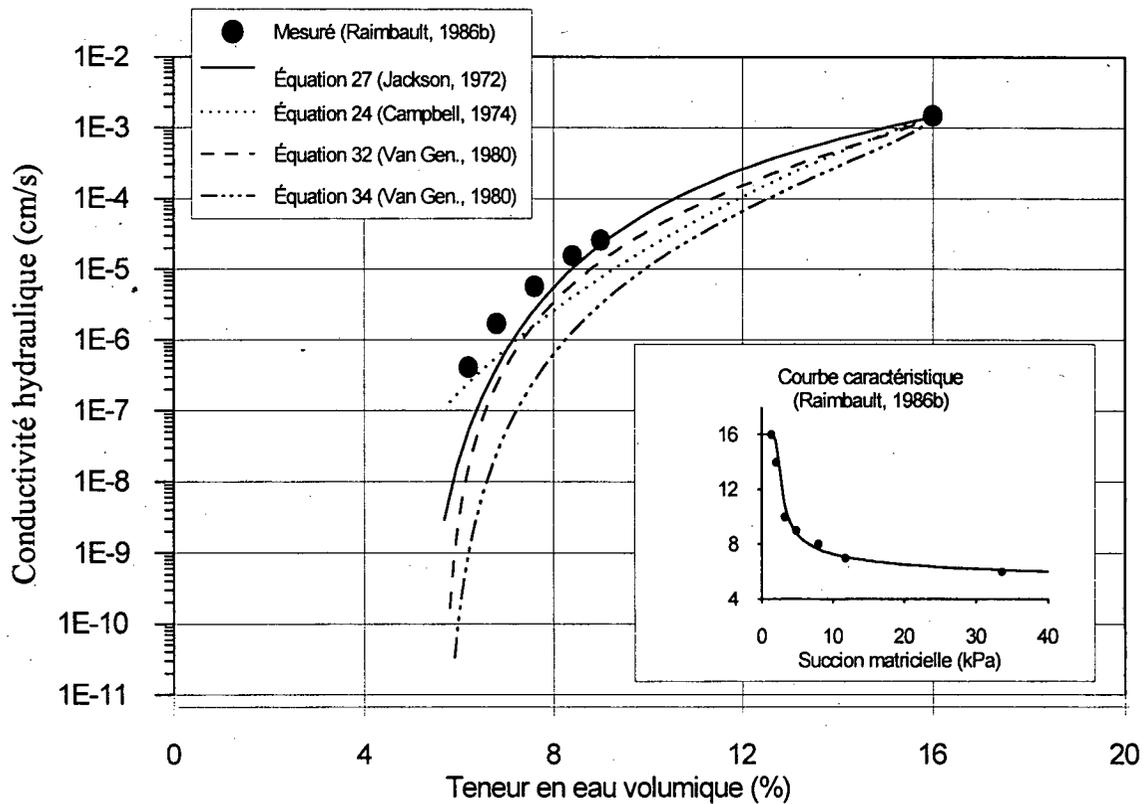


Figure 7 Comparaison de différents modèles avec les mesures de conductivité hydraulique pour une grave 0-20 reconstituée et humidifiée

L'équation de Jackson qui dérive du modèle de Childs et Collis-George avec l'équation de la courbe caractéristique de Fredlund semble mieux prédire la conductivité hydraulique que les équations de Van Genuchten, qui sont les solutions aux modèles de Burdine et de Mualem, et que l'équation empirique de Campbell. Bien qu'elles soient très simples à calculer, les prédictions des modèles de Van Genuchten sont probablement limitées par l'imposition de $m = 1 - 1/n$ pour l'équation 11 de la courbe caractéristique de rétention. Cette condition restreint la flexibilité de l'équation 11 qui ne

relie pas les points expérimentaux aussi bien que lorsque m et n sont déterminés de façon indépendante.

Le choix de l'équation 27 pour la présente étude est donc logique puisqu'elle donne des résultats satisfaisants et qu'elle est utilisée par le logiciel de modélisation SEEP/W qui servira à la simulation du drainage d'une fondation de chaussée.

Analyse des variations d'état hydrique dans les fondations des chaussées

L'analyse des variations d'état hydrique permet de bien comprendre le comportement mécanique des chaussées (Raimbault, 1986a ; Raimbault et Sylvestre, 1990). L'instrumentation des chaussées a permis de mettre au point des modèles de prédiction de l'état d'humidité utilisant des caractéristiques propres aux matériaux servant à la construction des chaussées.

La présence d'eau emprisonnée dans la fondation ou sous le pavage est la principale cause de la diminution de la durée de vie des chaussées (Cedergren, 1988 ; Bieth et Bertrand, 1991). La sursaturation de la fondation, qui est soumise aux contraintes engendrées par le passage des véhicules, occasionne des pertes de résistance au cisaillement par l'augmentation de la pression interstitielle. Par ailleurs, puisque les infiltrations par le pavage sont pratiquement toujours présentes par les fissures, les joints, les accotements et les pavages poreux, et que l'intensité de la plupart des pluies en Amérique du Nord est parfois importante au regard de la perméabilité des matériaux de fondations, le problème de formation de zones sursaturées sous le pavage est omniprésent pour la majorité des chaussées (Cedergren, 1987).

Selon Raimbault (1986a), l'évacuation de l'eau des zones sursaturées se fait par l'intermédiaire des zones non saturées qui n'ont pas été inondées. L'analyse de la variation de l'état hydrique d'une chaussée sur une période de trois ans lui a permis de faire cette constatation, puisque la teneur en eau de la fondation a varié de 2 à 7 % et la pression interstitielle de -3 à -30 kPa, pouvant atteindre des pointes de -75 kPa, sans jamais devenir positive sur toute la période. Selon une étude de Raimbault et Sylvestre (1990) portant sur la même planche d'essais, la quantité d'eau maximale annuelle contenue dans la fondation de la chaussée est atteinte autour du 1^{er} janvier. Or, dans leur étude sur la portance de routes, Saint-Laurent, Roy et Bergeron (1995) ont déterminé que la

portance est au minimum au moment de la période du dégel qui coïncide avec la période où les fondations sont gorgées d'eau. Cela nous permet donc de croire que la route est à son état le plus humide à la période du dégel.

Jusqu'à présent, dans très peu de modèles de prédiction du mouvement de l'eau dans les chaussées, on a fait intervenir les théories d'écoulement en milieu partiellement saturé. Les modèles proposés par Jeapaloan, Liu et Lytton (1983) et Markow (1982) permettent de déterminer la portion saturée de la section étudiée. Par contre, il n'est pas possible de connaître l'état de saturation de la portion non saturée, car les seules caractéristiques des matériaux utilisées par ces modèles sont la conductivité hydraulique saturée et la porosité.

À l'aide d'un modèle similaire, Cedergren (1988) a été en mesure d'estimer que la plupart des routes et autoroutes américaines restent essentiellement à l'état de saturation de cinq à vingt jours suivant une précipitation saturante. Pour leur part, Jones et Jones (1989) ont estimé que, pour une route moyenne de 9 à 14 m de demi-largeur ayant une fondation de 150 à 300 mm d'épaisseur, la perméabilité de ladite fondation devait être de $0,8E-5$ à $3,9E-5$ cm/s pour pouvoir évacuer une pluie moyenne d'une intensité de 17 mm/h avec infiltration de 36 % par le pavage.

Wallace (1977) a mis au point un modèle de prédiction des mouvements d'eau à l'intérieur des chaussées sur une base théorique d'écoulement en milieu partiellement saturé. Par contre, vu le manque de données sur les propriétés hydrauliques des matériaux granulaires de fondations en condition partiellement saturée, son modèle n'a pu être utilisé que pour des suppositions et des hypothèses. Ainsi, pour évaluer la teneur en eau résiduelle, Wallace a soustrait 5 % à la teneur en eau saturée et, pour caractériser la pente de la courbe caractéristique de rétention, il a retenu une valeur de n (indice de distribution du volume des pores de Brooks et Corey (1966) variant de 5 à 11. À la suite de travaux et du calage de son modèle sur des matériaux connus, il a conclu qu'une caractérisation adéquate des propriétés hydrauliques des matériaux de fondations permettrait d'utiliser son modèle avec plus de succès.

Caractéristiques de drainage des matériaux de fondations des chaussées

L'étude des caractéristiques de drainage en fonction de la capacité portante amène souvent le concepteur à opter entre la capacité portante et la capacité de drainage du matériau de fondation. En choisissant en fonction de la première, il sacrifie le drainage, puisque la diminution de l'indice des vides qui fait augmenter la portance entraîne, par contre, une baisse de la perméabilité (Flon, 1988). Dans son étude sur les couches drainantes, Paquet (1994) arrive à la même conclusion.

On admet en général que la hausse de la quantité de fines ($< 80 \mu\text{m}$) du matériau de fondation contribue à l'augmentation de la portance d'une chaussée (Flon, 1988). En revanche, du point de vue du drainage, la limite supérieure de 7 % pour la portion des fines peut se révéler trop élevée dans le cas de certains types de matériaux, alors que pour d'autres elle pourrait être dépassée sans pour autant trop nuire à la perméabilité. Avec l'étude de la remontée capillaire ou de la courbe caractéristique des matériaux de fondation, on est déjà en mesure de caractériser le drainage de façon qualitative. Savard (1995) montre que, pour des matériaux de fondation ayant des particules fines argileuses, la remontée capillaire ou la pression d'entrée d'air est de 10 kPa, alors que, dans le cas des matériaux à granulométries similaires sans fines argileuses, la remontée capillaire se chiffre à 5 kPa. La présente étude permettra de montrer qu'une augmentation de la remontée capillaire occasionne une chute de la conductivité hydraulique.

Murray (1995) a regroupé en quatre classes les propriétés des matériaux granulaires qui ont une influence sur la conductivité hydraulique :

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.

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX

Généralités

Les matériaux examinés dans la présente étude sont des matériaux granulaires de fondations routières à granulométries reconstituées. Ces dernières qui satisfont aux critères du fuseau de spécification pour un matériau MG-20, exigé par le ministère des Transports du Québec, seront discutées à la section *Granulométries reconstituées*.

Pour obtenir un éventail représentatif des matériaux de fondations routières utilisés dans le réseau québécois, trois sources de matériaux ont été retenues : une pierre granitique, un gravier schisteux et une pierre de nature calcaire.

La source de la pierre granitique est la Carrière Bédard à Valcartier. Celle-ci est en exploitation depuis 1989. Située dans la province géologique de Grenville et d'âge précambrien, la roche de cette carrière est principalement un gneiss composé de feldspath, de quartz et de biotite. Elle s'avère homogène et massive ; par contre, elle est inapte à l'exploitation de la pierre de taille. Les principaux produits de cette carrière sont la pierre concassée et la pierre d'enrochement utilisées pour les fondations routières et aussi comme granulats pour l'enrobé bitumineux et le béton de ciment.

La pierre calcaire provient de la Carrière Saint-Marc située à Saint-Marc-des-Carières. Appartenant à la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent et d'âge ordovicien moyen, ce calcaire de Trenton fait partie de la formation de Deschambault. Cette dernière est constituée, majoritairement, de calcaire cristallin gris médium à gris pâle. La partie supérieure de la carrière est composée, sur 3 à 4 m d'épaisseur, de couches de calcaire d'épaisseur variant de 30 à 120 cm. Il n'existe aucun « entre-lit » séparant ces couches épaisses. En profondeur, elles font place à des couches minces de 10 à 30 cm d'épaisseur entrecoupées de lits de shale. Cette carrière fournit une excellente pierre de taille et pourrait être considérée comme une source possible de calcaire à haute teneur en calcium.

Quant à la source de gravier schisteux, il s'agit de la Gravière de Beauce, située à Vallée-Jonction. Étant près de la rivière Chaudière, les sédiments d'origine fluvio-glaciaire sont composés de galets et de sable. Les sédiments se sont déposés dans un lac glaciaire pour former un vaste delta. Le dépôt comporte des zones graveleuses et caillouteuses avec des particules de 15 à 20 cm de diamètre. La présence de lits silteux fait que certains endroits du dépôt peuvent comporter jusqu'à 10 % de silt. L'épaisseur moyenne d'exploitation varie de 20 à 30 m et peut atteindre 40 m en certains endroits. La composition minéralogique de ces matériaux est très variée en raison de la diversité des lithologies présentes dans ce secteur des Appalaches. Les principaux constituants du dépôt sont le grès dur, le schiste métamorphique, le schiste à quartzite-chlorite, le quartzite à gros grains. Il comporte aussi quelques autres constituants mineurs.

Le tableau 3 montre la composition minéralogique en pourcentage de chaque source, alors que la figure 8 indique la situation géographique de chacune des sources.

Tableau 3					
Composition minéralogique des matériaux des trois sources					
Pierre granitique		Pierre calcaire		Gravier schisteux	
Gneiss granitique dur	86 %	Calcaire dur	63 %	Grès dur	36 %
Gneiss à biotite et hornblende	12 %	Calcaire cristallin légèrement métamorphisé	27 %	Schiste métamorphisé dur	14 %
Gneiss granitique légèrement altéré	2 %	Calcaire schisteux	5 %	Gneiss granitique dur	9 %
		Calcaire à veines ou à nodules de calcite	4 %	Grauwacke	8 %
		Gneiss granitique dur	1 %	Quartzite à gros grains	7 %
				Schiste à quartz-feldspath-chlorite dur	6 %
				Quartzite à grains fins	4 %
				Autres constituants	16 %

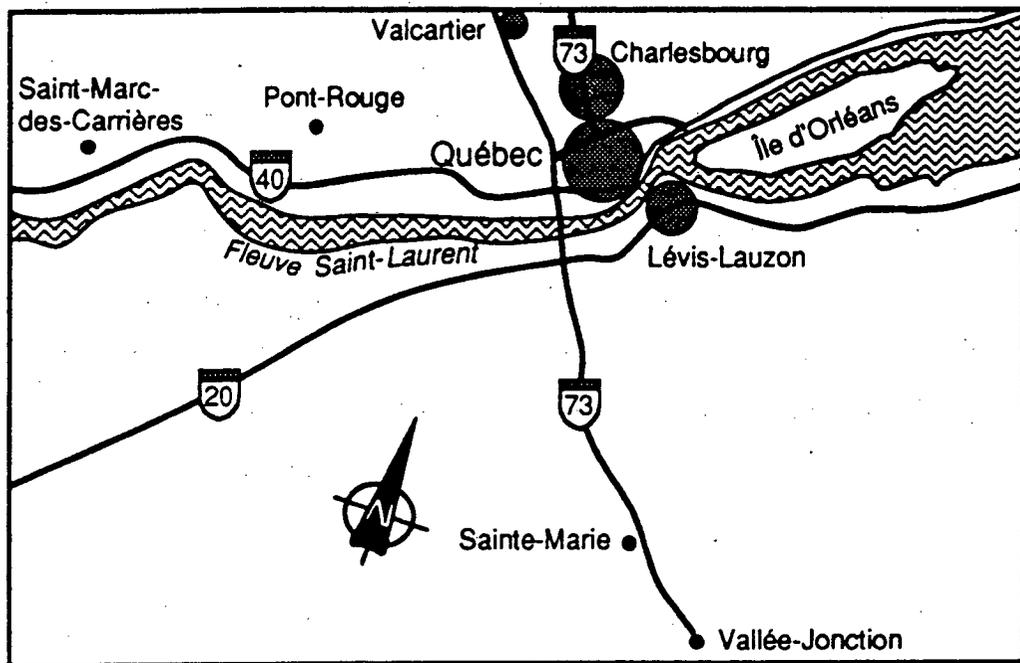


Figure 8 Localisation des trois sources

Échantillonnage

La méthode d'échantillonnage est très simple. Une fois que la réserve de matériaux est choisie, un chargeur vient malaxer une quantité suffisante de matériaux pour éliminer le problème de ségrégation des fines causé par la pluie. Il suffit ensuite de remplir les sacs prévus qui peuvent contenir jusqu'à 35 kg de matériaux. Pour chaque source, un échantillon de 25 sacs a été rassemblé au mois de juillet 1995 et un second de 15 sacs au mois d'octobre 1995. Une quantité totale de 3 600 kg de matériaux a été nécessaire pour la conduite des travaux.

En vue de reconstituer les granulométries voulues, les matériaux ont été séparés aux tamis standards, soit : 28 mm ; 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.

Caractérisation des matériaux

Les trois sources fournissent des matériaux qui possèdent de bonnes caractéristiques intrinsèques, puisque leur nombre pétrographique est de 122 pour le gravier schisteux, de 116 à 126 pour la

Pierre calcaire et de 101 pour la pierre granitique. Cette dernière étant le matériau le plus dense, elle est aussi la plus fragile puisque sa valeur à l'essai Los Angeles est la plus élevée des trois matériaux. Elle se chiffre à 37,3 alors que les deux autres ont une valeur autour de 23. Par contre, l'essai Micro-Deval montre que le matériau calcaire est plus susceptible d'attrition que les matériaux granitique et schisteux. Pour ce qui est de l'absorption en eau des particules de moins de 5 mm, le matériau granitique a une valeur de 0,6 %, alors que les matériaux calcaire et schisteux ont des valeurs respectives de 1,4 % et 1,9 %. Cela permet de prédire que les pierres granitiques devraient être des matériaux bien drainants puisqu'elles ont une rétention d'eau intrinsèque plus faible que les autres. Le tableau 4 regroupe les résultats des essais de caractérisation pour chacun des matériaux.

Tableau 4			
Résultats des essais de caractérisation			
	Pierre granitique	Pierre calcaire	Gravier schisteux
Limite de liquidité	25,6 %	21,1 %	18,9 %
Indice de plasticité	7,9	4,8	3,3
Module de finesse (sable)	2,60	2,66	2,17
Densité > 5mm	2,73	2,64	2,63
Densité < 5mm	2,81	2,70	2,73
Nombre pétrographique	101	116	122
Mg SO4 > 5mm	1,8 %	6,3 %	4,0 %
Essai Los Angeles	37,3	23,9	22,2
Essai Micro-Deval	14,8	18,4	12,0
Absorption en eau < 5mm	0,6 %	1,4 %	1,9 %
Surface spécifique < 0,08 mm	0,1 m ² /g	0,35 m ² /g	0,15 m ² /g

Ces résultats doivent cependant être utilisés avec discernement, puisque si certains essais montrent des faiblesses pour un matériau, il ne faut pas déduire que celui-ci est de qualité inférieure à un autre. Cela est bien illustré par le fait que, même si le granite a une valeur à l'essai Los Angeles plus faible que celle du schiste, il demeure tout de même un matériau de meilleure qualité que le schiste. Les graphiques des courbes granulométriques montrés à l'annexe A indiquent que la pierre granitique est le matériau ayant produit le moins de fines au compactage en dépit du fait qu'il est le matériau le plus fragile selon l'essai Los Angeles. Ces résultats de caractérisation ne doivent pas non plus être appliqués à toute l'exploitation d'où le matériau

provient. On trouve souvent, à l'intérieur d'une exploitation, des hétérogénéités qui peuvent être causées par la présence de lithologies différentes.

Granulométries reconstituées

Comme nous l'avons dit à la section *Échantillonnage*, chaque matériau a été séparé aux tamis standards. Cela a permis de reconstituer les granulométries de façon précise. Ces dernières ont été déterminées à l'aide du fuseau de spécification MG-20 exigé par le ministère des Transports du Québec. La figure 9 montre ledit fuseau.

Le bas du fuseau a été utilisé comme courbe granulométrique pour les matériaux ayant un taux de fines de 2 % et le haut dans le cas d'un taux de fines de 7 et 12 % respectivement. La courbe granulométrique suit donc le haut du fuseau jusqu'à une dimension de particules de 2,5 mm pour ensuite converger vers une teneur en fines de 7 ou de 12 %.

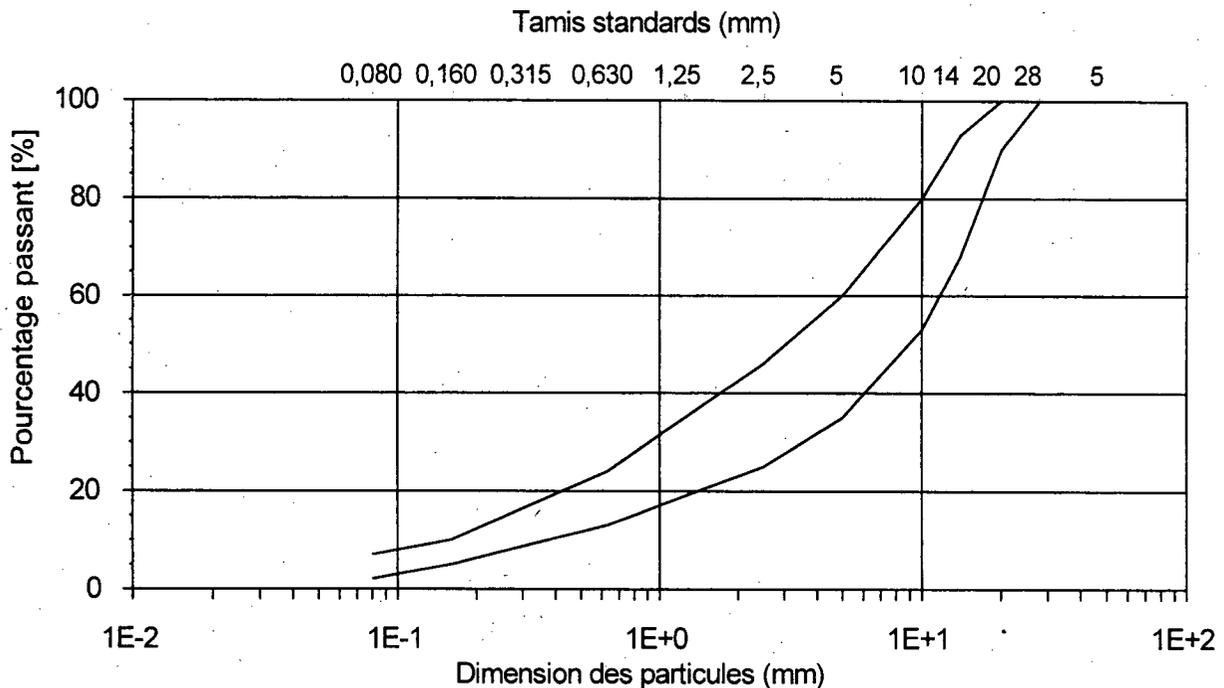


Figure 9 Fuseau exigé par le MTQ pour un gravier MG-20

Toutefois, les courbes granulométriques déterminées pour reconstituer les matériaux ne suivent pas exactement le haut et le bas du fuseau pour donner 2, 7 et 12 % de fines. On sait que le compactage produit des fines et, en abaissant les teneurs à cet égard, on a tenté de réduire l'écart entre les granulométries du fuseau et celles des matériaux obtenues après le compactage. Les courbes granulométriques ainsi déterminées s'écartent légèrement, vers le bas, des courbes du fuseau à partir d'une grosseur de particules de 2,5 mm pour contrer la production de fines au moment du compactage. Cet écart abaisse la teneur en particules fines à 1, 5 et 10 % pour les graviers schisteux et les pierres de nature calcaire, alors que pour les pierres granitiques, les teneurs en fines sont 1, 5, 6 et 11 %. Les graphiques de l'annexe A montrent les courbes granulométriques avant et après le compactage. Les résultats escomptés en ce qui concerne la prédiction de la teneur en fines après compactage n'ont pas été atteints. Par contre, l'appellation des matériaux se fera ici en fonction des teneurs en fines anticipées. Pour la source de pierre granitique de la Carrière Bédard à Valcartier, les trois matériaux sont nommés : VC2 %, VC7 % et VC12 % ; pour le gravier schisteux de la Gravière de Beauce à Vallée-Jonction, les trois matériaux sont : VJ2 %, VJ7 % et VJ12 % ; et, pour la pierre de nature calcaire de la Carrière Saint-Marc à Saint-Marc-des-Carières, on a : SM2 %, SM7 % et SM12 %. Les deux lettres dans le nom de chaque matériau représentent la ville d'où ils proviennent et le nombre en pourcentage représente la teneur en fines escomptée pour le matériau après compactage.

Pour bien comprendre l'effet de la granulométrie sur la conductivité hydraulique, trois nouvelles granulométries ont été déterminées à l'intérieur du fuseau MG-20. Elles ont servi à reconstituer des graviers schisteux de Vallée-Jonction. La première courbe granulométrique croise le fuseau à partir du haut vers le bas et se nomme VJ2 % M. La deuxième suit le haut du fuseau jusqu'à une grosseur de particules de 1,25 mm pour ensuite tendre vers une teneur en fines de 2 %. Ce matériau est désigné VJ2 % H. Enfin, une courbe croise le fuseau à partir du bas vers le haut pour une teneur en fines de 7 % et porte le nom de VJ7 % M. Le M signifie « milieu du fuseau » et le H, « haut du fuseau ».

Les courbes granulométriques de chaque matériau sont montrées à la figure 10, alors que le tableau 5 laisse voir le coefficient de courbure et d'uniformité de chaque courbe granulométrique pour les trois sources. La valeur au bleu a été ajoutée à ce tableau puisque cette caractéristique varie principalement en fonction de la nature des fines contenues dans le matériau.

Tableau 5			
Coefficients de courbure et d'uniformité et valeur au bleu pour chaque granulométrie			
	Coefficient d'uniformité	Coefficient de courbure	Valeur au bleu
VC2 %	32,2	2,9	0,06
VC7 %	27,8	1,0	0,08
VC12 %	62,5	1,7	0,08
SM2 %	24,0	2,2	0,41
SM7 %	25,7	1,9	0,46
SM7 % 2	32,5	0,8	-
SM12 %	62,5	2,0	0,43
VJ2 %	25,8	2,4	0,15
VJ2 % M	21,1	1,2	-
VJ2 % H	19,2	0,7	-
VJ7 % M	45,0	1,2	-
VJ7 %	26,3	1,0	0,16
VJ12 %	62,5	2,0	0,24

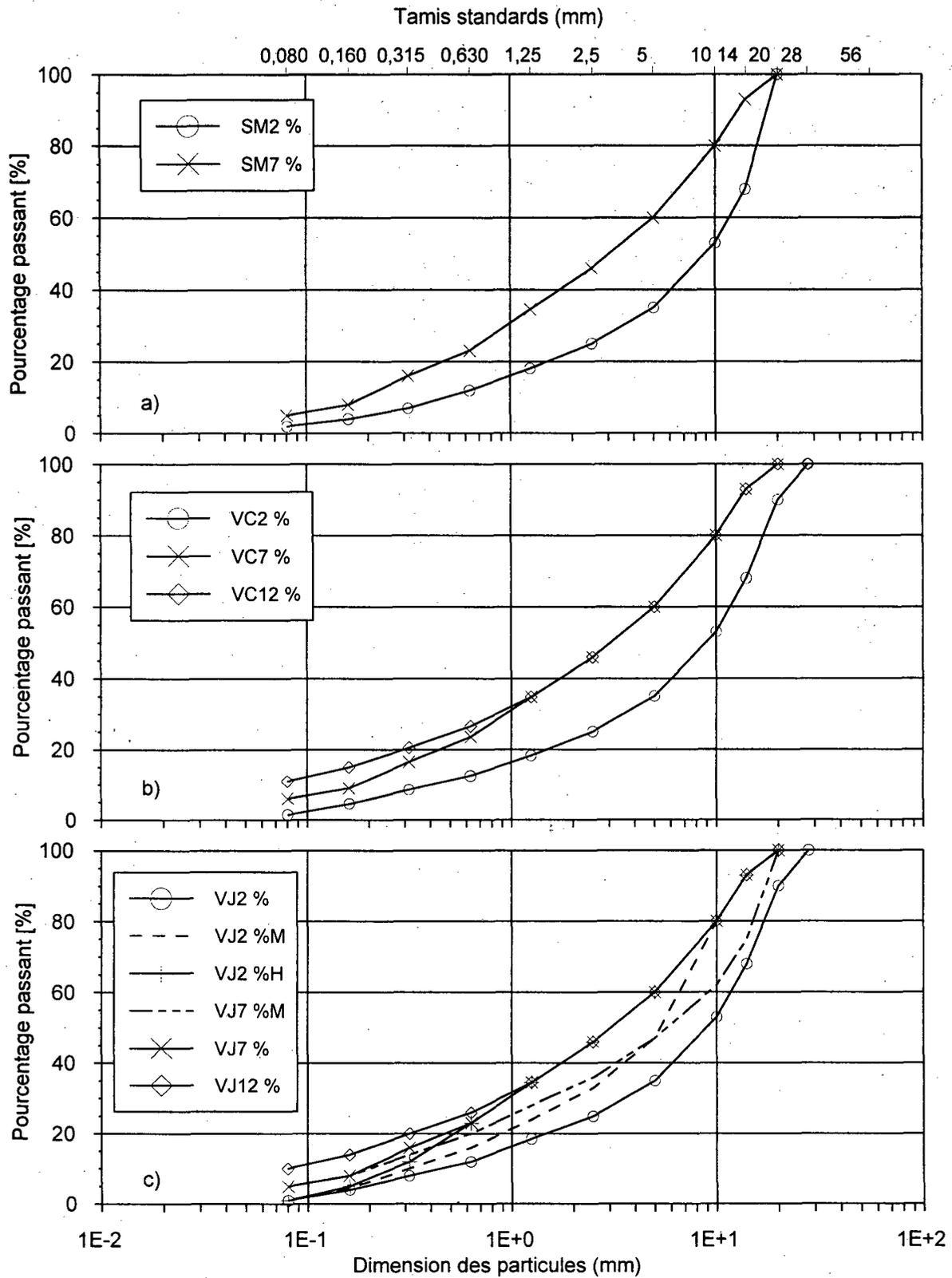


Figure 10 Courbes granulométriques de chaque matériau avant compactage

Caractérisation des fines des matériaux

Une analyse chimique a été faite sur des échantillons représentatifs des fines des matériaux. Le tableau 6 montre les composants majeurs de chacun des matériaux ainsi que la proportion en pourcentage.

	Pierre calcaire	Pierre granitique	Gravier schisteux
Na ₂ O	< 0,5	1,6	2,1
MgO	1,9	1,5	3,1
Al ₂ O ₃	9,1	12,6	14,9
SiO ₂	28,3	64,1	52,7
P ₂ O ₅	0,2	0,3	0,7
SO ₃	1,7	0,9	< 0,5
K ₂ O	2,7	2,3	2,4
CaO	26,2	3,4	5,0
TiO ₂	0,3	1,2	1,1
Fe ₂ O ₃	2,0	7,2	12,4
Volatiles	26,3	3,86	2,5

La plus grande partie des fines du matériau calcaire est donc faite de SiO₂ (28,3 %) et de CaO (26,2 %), tandis que, pour les matériaux granitique et schisteux, les fines sont principalement constituées de SiO₂ : 64,1 % pour le granite et 52,7 % pour le schiste.

De concert avec l'analyse chimique, une analyse des matériaux par diffraction des rayons X a aussi été faite sur les fines. Le tableau 7 regroupe les résultats sous forme quantitative où le symbole M signifie les composants majeurs, m les composants mineurs et t, la trace.

La dimension des fines a également été déterminée à l'aide d'un analyseur de particules au laser (zone de mesure s'échelonnant de 0,1 à 600 µm). Les courbes granulométriques des fines de chaque matériau sont montrées à la figure 11. On y voit bien que le matériau calcaire est plus fin que le matériau schisteux, qui, lui-même, est plus fin que le matériau granitique. L'analyseur de particules, qui calcule le diamètre des particules en fonction de la réfraction du rayon laser sur

celles-ci à l'aide d'un modèle théorique basé sur le volume d'une sphère, permet aussi d'évaluer la surface spécifique moyenne. Les données de surface spécifique (Sp) sont montrées dans la légende de la figure 11.

Tableau 7		
Analyse des fines par diffraction des rayons X		
Pierre calcaire	Pierre granitique	Gravier schisteux
M Calcite	M Quartz	M Mica
M Quartz	M Plagioclases	M Plagioclases
m Plagioclases	m Chlorite	M Amphibole
t Feldspath	m Mica	M Feldspath
t Mica		M Quartz
		t Chlorite

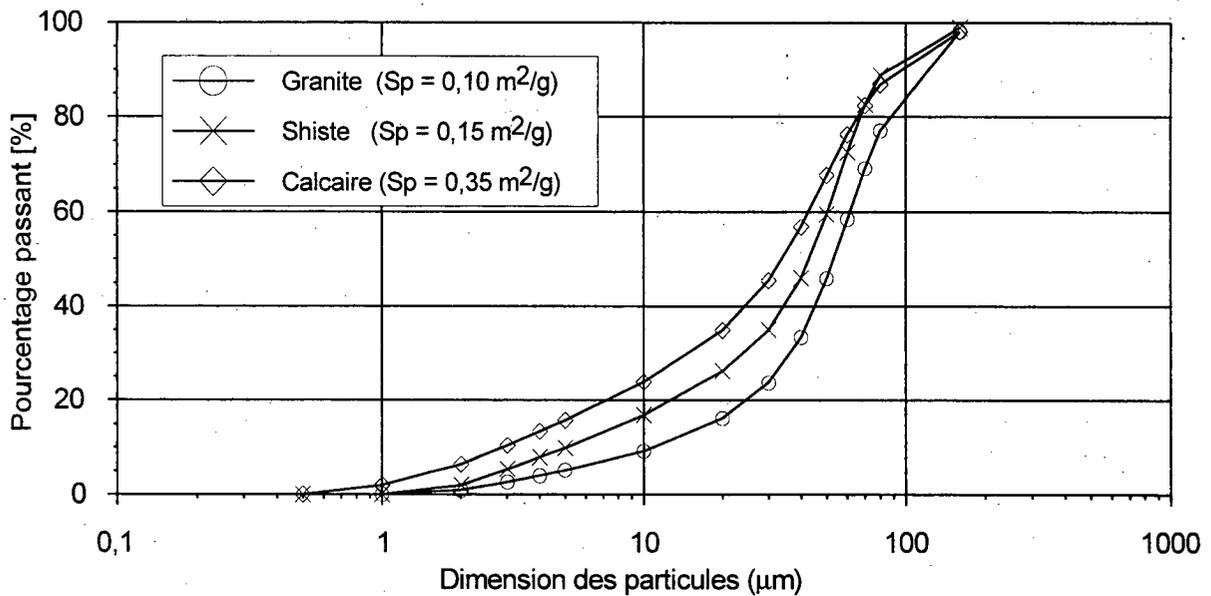


Figure 11 Granulométrie des fines des matériaux

DESCRIPTION DES ESSAIS

Le programme d'essais pour la détermination de la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée, pour chacun des matériaux granulaires de fondations décrits au chapitre *Description des matériaux*, consiste en deux mesures : celle de la conductivité hydraulique en condition saturée avec un moule Proctor de 152,4 mm, et celle de la courbe caractéristique de rétention d'eau à l'aide des sondes TDR et des tensiomètres disposés à l'intérieur d'un moule Proctor de 305 mm. Ensuite, le calcul de la conductivité hydraulique à l'aide du modèle retenu s'effectue à partir de la conductivité saturée et de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Finalement, une série de simulations numériques a été exécutée pour modéliser le drainage d'une chaussée à l'aide du logiciel SEEP/W.

Essai Proctor

Avant de procéder à la mesure de la conductivité hydraulique saturée ou de la courbe caractéristique de rétention d'eau, l'optimum Proctor de chaque matériau a été déterminé. La relation masse volumique-teneur en eau a été établie selon l'essai Proctor modifié en utilisant la méthode C ou D de la norme CAN/BNQ 2501-255-M-86. L'essai est exécuté dans un moule cylindrique de 152,4 mm de diamètre et de 116,4 mm de hauteur avec un matériau passant le tamis de 20 mm et corrigé en remplaçant les particules retenues dans le tamis de 20 mm. Les matériaux sont compactés en cinq couches de 56 coups à l'aide d'un marteau de 4,54 kg ayant une chute de 457 mm. La figure 12 montre un schéma du moule. Rappelons que la masse volumique du sol sec est calculée comme suit :

Équation 36
$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{w + 100} \right) \times 100$$

où w est la teneur en eau massique, $\rho_h = \frac{m_h}{V}$, la masse volumique humide, m_h , la masse de sol humide et V , le volume du moule.

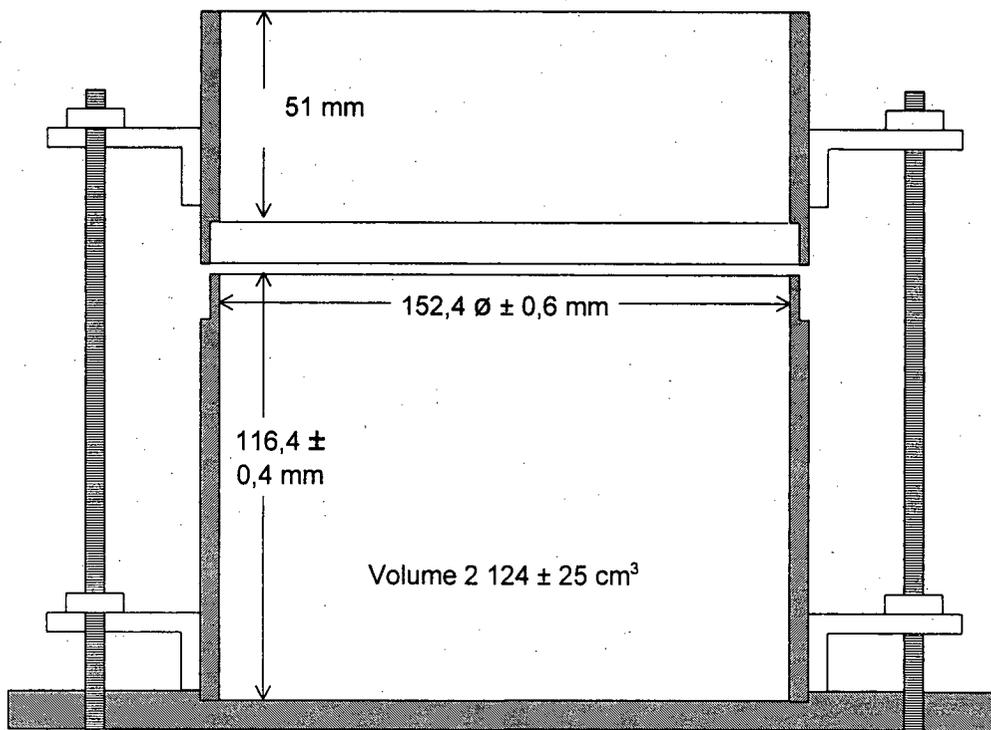


Figure 12 Moule cylindrique de 152,4 mm de diamètre

La teneur en eau massique est déterminée par une méthode gravimétrique qui consiste à peser le sol dans son état humide et à le faire sécher à l'étuve jusqu'à ce que la masse du sol ne varie plus dans le temps. La différence entre la masse du sol humide et du sol sec correspond à la masse d'eau contenue dans le sol humide. La masse d'eau divisée par la masse du sol sec représente alors la teneur en eau massique. Pour connaître la teneur en eau volumique θ , ou le degré de saturation S_r , les équations 37 et 38 sont utilisées :

Équation 37
$$\theta = \frac{wG}{1+e}$$

Équation 38
$$S_r = \frac{wG}{e}$$

où w est la teneur en eau massique, G , la densité des grains et e , l'indice des vides ($e = G \times \rho_w - \rho_d / \rho_d$, où ρ_w et ρ_d sont la masse volumique de l'eau et du sol sec).

Perméamètre de 152,4 mm de diamètre

La conductivité hydraulique en condition saturée a été mesurée dans un moule cylindrique de 152,4 mm similaire à celui utilisé pour la mesure de la relation masse volumique-teneur en eau. Une fois compacté à la teneur en eau optimale, le moule est placé sur une base de perméamètre et, ensuite, un couvercle est installé sur le moule de façon que le matériau soit confiné entre deux plaques poreuses de grande perméabilité. Les essais de perméabilité ont été effectués en conformité avec la procédure d'essai LC-23-322 (1987) en vigueur à la Direction du laboratoire des chaussées qui se sert de la méthode à charge constante et de l'équation 2 :

Rappel de l'équation 2

$$k = -\frac{Q}{A} \frac{L}{(H_1 - H_2) \times (t_1 - t_2)}$$

En général, un gradient de 4 à 6 ($i = \Delta H/L$) est utilisé pour faire l'essai. La figure 13 montre le perméamètre ainsi que le montage permettant l'écoulement de l'eau à l'intérieur de l'échantillon.

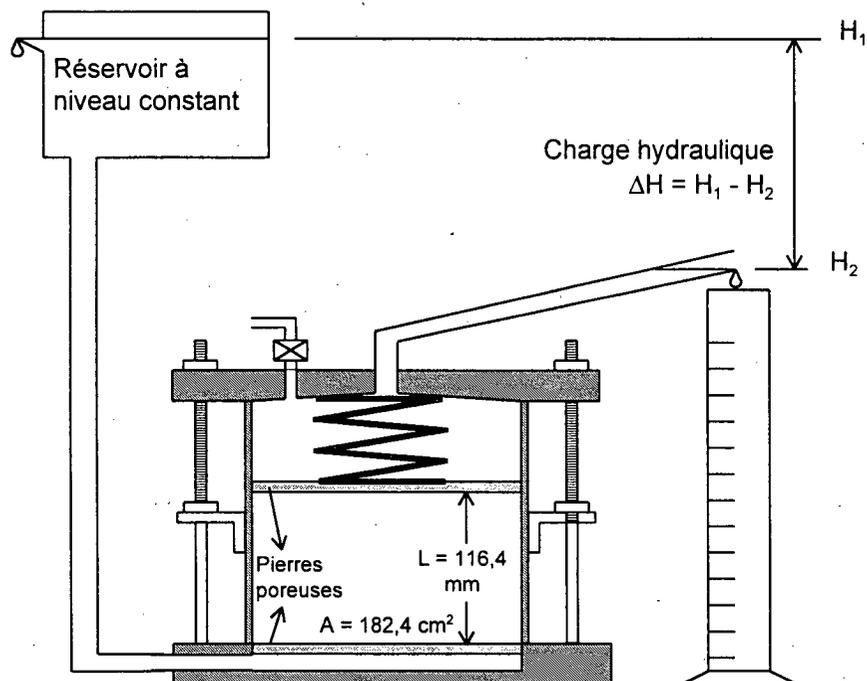


Figure 13 Perméamètre cylindrique de 152,4 mm de diamètre

Moule de 305 mm de diamètre

La mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau des matériaux a été effectuée à l'intérieur d'un moule de compactage de 305 mm. Ce dernier, qui n'a pas encore fait l'objet de normalisation, a tout de même été utilisé en raison de son grand volume qui permet de préparer des échantillons compactés suffisamment considérables pour y insérer les appareils de mesure de la teneur en eau et de la succion, tels les sondes TDR et les tensiomètres, sans que ces appareils n'influent sur l'état de compacité du matériau.

Le compactage à l'intérieur d'un tel moule se fait à l'aide d'un marteau mécanique de 15 kg ayant une chute de 457 mm. Pour conserver l'énergie Proctor modifiée, l'échantillon est compacté en cinq couches de 160 coups pour une hauteur totale du moule de 270 mm. Étant donné la dimension du moule, aucune correction n'a eu lieu sur les matériaux comportant des particules retenues au tamis de 20 mm. Un schéma du moule avec ses dimensions est présenté à la section *Installation des capteurs*, figure 18.

Une fois les matériaux compactés à l'intérieur du moule, une base de perméamètre est installée au sommet et le moule est inversé et déposé sur sa nouvelle base. Celle-ci permet l'écoulement d'eau dans l'échantillon durant la phase de saturation initiale et durant la phase d'imbibition qui suit la phase de drainage pendant laquelle est effectuée la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau.

Mesure de la teneur en eau

La mesure de la teneur en eau pour la détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau doit avoir la qualité d'être non destructive. Cela est essentiel pour suivre l'évolution de la teneur en eau sur une longue période de temps à l'intérieur d'un même échantillon ou encore pour effectuer plusieurs cycles de drainage et d'imbibition. La méthode retenue dans la présente étude est la méthode capacitive, qui consiste en la mesure de la constante diélectrique des matériaux, laquelle est grandement dépendante de la teneur en eau.

Sonde TDR

La mesure de la constante diélectrique a été faite par la méthode TDR. Ainsi, la constante diélectrique est déduite du temps de passage d'une onde électrique à l'intérieur du matériau étudié par l'intermédiaire d'une sonde. Cette dernière doit comporter une tige émettrice pour le départ de l'onde à l'intérieur du matériau, et au moins une tige réceptrice pour la sortie de l'onde du matériau. Le modèle de sonde utilisé dans la présente étude est un modèle à trois tiges disposées dans un plan horizontal. La tige émettrice est placée au centre des deux tiges réceptrices. La figure 14 montre un schéma de la sonde TDR.

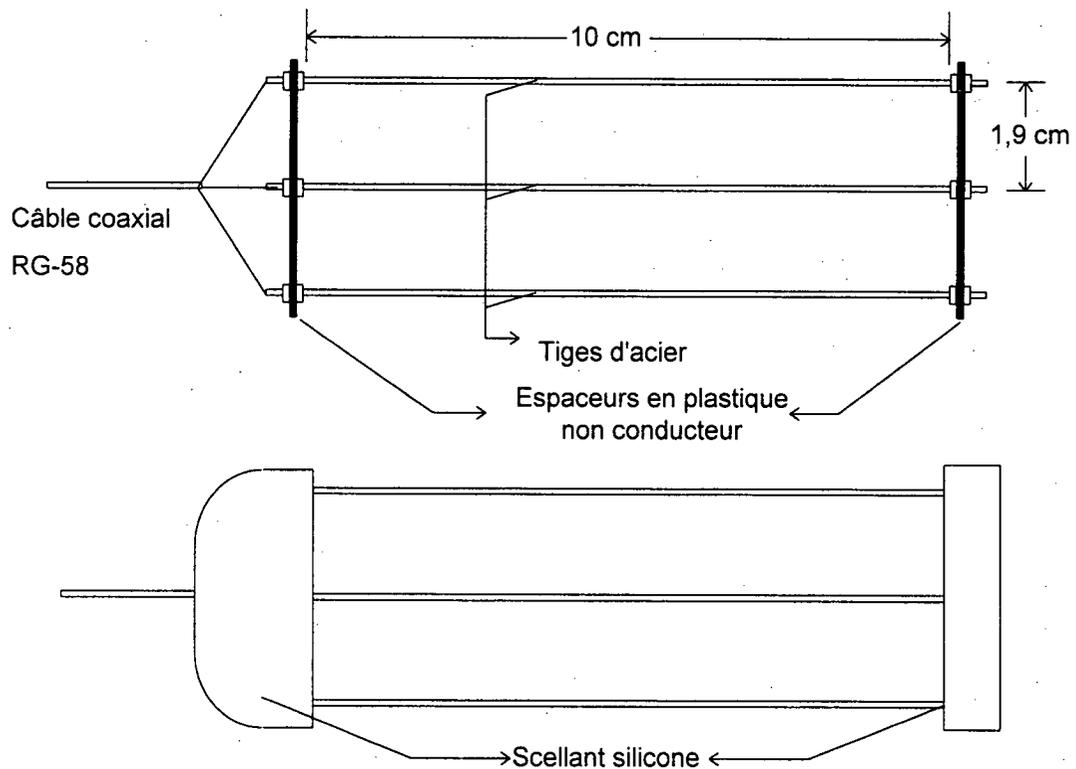


Figure 14 Schéma de la sonde TDR

Les tiges conductrices sont en acier inoxydable pour éviter que la corrosion n'influe sur la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique. Elles sont boulonnées, à leurs extrémités, à deux espaceurs de plastique non conducteur pour empêcher l'onde de se propager directement d'une tige à l'autre sans passer par le matériau. Ces deux plaques assurent en même temps une rigidité

latérale qui permet de garder les branches d'acier équidistantes. La distance qui sépare les tiges d'acier les unes des autres est de 1,9 cm et leur longueur effective atteint 10 cm.

L'onde électromagnétique est transmise à la sonde TDR par un câble du type RG-58. Le fil central qui envoie l'onde est relié à la tige centrale de la sonde. La gaine réceptrice du câble est séparée en deux brins rattachés aux tiges extérieures de la sonde. En vue d'isoler les deux extrémités de la sonde, un scellant au silicone a été utilisé pour enduire les parties susceptibles de transmettre l'onde ailleurs que dans les tiges d'acier qui sont en contact avec le matériau étudié.

L'impulsion électrique qui engendre l'onde électromagnétique est produite par un générateur de voltage et le temps de propagation de l'onde est enregistré sur un écran d'oscilloscope. L'appareil utilisé est le *1502C Metallic Time Domain Reflectometer* de Tektronik (1990).

Par l'intermédiaire de cet appareil, la mesure du temps de propagation de l'onde est convertie en longueur équivalente de câble. Pour le calcul de la constante diélectrique, l'équation 13 devient l'équation suivante :

Équation 39

$$Ka = \left[\frac{L_e}{V_p \times L} \right]^2$$

Dans l'équation 39, Ka est la constante diélectrique, L_e , la longueur équivalente, V_p , un facteur de correction pour le type de fil (0,65 pour le fil RG-58) et L, la longueur de la sonde égale à 10 cm dans le cas des sondes utilisées dans la présente étude.

La longueur équivalente L_e est mesurée sur l'écran de l'oscilloscope ou sur l'imprimé instantané de l'écran. L'oscilloscope donne, pour un fil uniforme, un tracé rectiligne correspondant à la longueur du fil. Lorsqu'un élément hétérogène est combiné au fil, une déviation du tracé est visible à l'endroit précis de l'hétérogénéité. La sonde TDR placée au bout du fil produira donc une déviation importante du tracé. La figure 15 montre la forme du tracé au passage de l'onde électromagnétique à l'intérieur de la sonde.

La façon de déterminer L_e , qui correspond à la longueur équivalente de câble pour la sonde en présence d'un sol humide, se fait selon le schéma de la figure 15. La distance mesurée entre le point B et le point A constitue la longueur équivalente de câble traversée par l'onde électromagnétique. Le point A correspond à l'arrivée de l'onde dans le matériau et le point B, à la sortie du matériau. La mesure en mètre donnée par l'appareil au point A est en fait la longueur exacte du câble de transmission pourvu que le facteur de correction V_p pour ce câble soit exact.

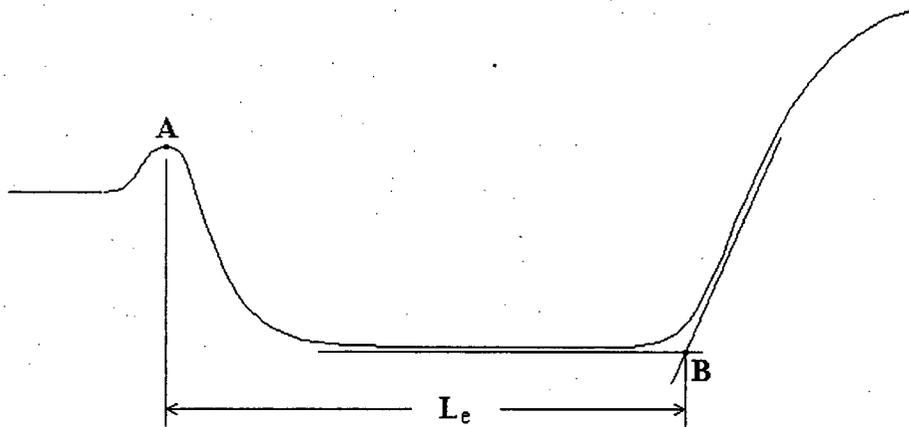


Figure 15 Forme du tracé provoqué par la sonde TDR

Étalonnage des sondes TDR

L'étalonnage des sondes se fait dans un moule de compactage de 152,4 cm tronqué sur la hauteur. Il est fabriqué en matière plastique et a un volume égal à 1 578,7 cm³. La méthode de compactage a été modifiée pour tenir compte du changement de volume du moule. Le compactage a donc été fait sur quatre couches de matériau soumises à 52 coups de marteau chacune plutôt qu'à 56 coups par couche.

Pour quelques teneurs en eau autour de l'optimum Proctor, des échantillons de chaque matériau sont préparés dans le moule en question avec une sonde placée à mi-hauteur. La mesure de L_e ainsi que celle de la masse humide sont prises pour chaque échantillon. Elles constituent la portion humide de la courbe d'étalonnage des sondes. Ensuite, une période de drainage est

imposée à chaque échantillon et, de nouveau, une mesure de L_e et une mesure de la masse semi-sèche sont notées. Les nouvelles mesures représentent la portion sèche de la courbe d'étalonnage. Signalons que la période de drainage est nécessaire puisqu'un compactage à de faibles teneurs en eau donnerait des échantillons très lâches et une distribution de la teneur en eau peu uniforme dans le matériau.

Il est important de calibrer les sondes en fonction de la teneur en eau volumique (θ_w). C'est en effet à ce paramètre que la constante diélectrique est sensible et non à la teneur en eau massique (w). La différence entre les deux est que θ_w permet de tenir compte du degré de compactage ou de l'indice des vides du matériau (voir équation 37). Pour une même masse de matériaux secs et une même masse d'eau, à des degrés de compactage différents, la teneur en eau volumique (θ_w) du matériau plus compacté sera plus élevée que celle du matériau le moins compacté, alors que la teneur en eau massique (w) sera la même dans les deux cas. Il n'est donc pas primordial que le degré de compacité soit exactement identique pour chaque échantillon puisque θ_w permet de prendre en considération l'indice des vides.

Ainsi, pour un matériau ayant une teneur en eau optimale (w_{opt}) de 5 %, des essais sont montés à 4, 5 et 6 % d'eau respectivement et une période de drainage est imposée pour obtenir des valeurs de teneur en eau (w) voisines de 3, 2 et 1 %. Le drainage est fait par ventilation pour éviter les changements de température pouvant influencer sur la constante diélectrique (K_a). Après le démontage et le drainage final à l'étuve, les teneurs en eau volumiques (θ_w) réelles (équation 37) sont associées aux mesures de K_a correspondantes. À noter que comme V_p et L sont constants dans le calcul de K_a , on peut associer directement la teneur en eau volumique (θ_w) à la longueur de l'onde (L_e). Les courbes d'étalonnage sont données à l'annexe B.

Mesure de la succion matricielle

La méthode utilisée pour la mesure de la succion matricielle doit aussi avoir la qualité d'être non destructive pour permettre le suivi de l'évolution de la succion. L'utilisation des tensiomètres satisfait pleinement à cette condition lorsqu'ils sont suffisamment robustes pour encaisser les impacts causés par la chute d'un marteau de 15 kg sur une hauteur de 45 cm.

Tensiomètres

Les tensiomètres sont des instruments qui mesurent les pressions négatives dans l'eau des pores. Ceux qui sont utilisés dans la présente étude (figure 16) sont faits à l'aide de bougies poreuses dans lesquelles sont insérés deux tubes capillaires. Ces derniers forment un circuit d'eau désaérée relié à un manomètre au mercure permettant de lire les pressions et d'effectuer des purges, s'il y a lieu. Le tube capillaire servant aux purges est inséré jusqu'au fond de la bougie, alors que celui qui est rattaché au manomètre est partiellement enfoncé dans la bougie. Cela facilite la circulation de l'eau pour expulser les bulles d'air pouvant provoquer une désaturation de la bougie poreuse. Un tube de protection en plastique est glissé sur les tubes capillaires et sur une assez grande portion de la bougie poreuse. Il sert de corps au tensiomètre et est rempli d'une colle flexible et scellante.

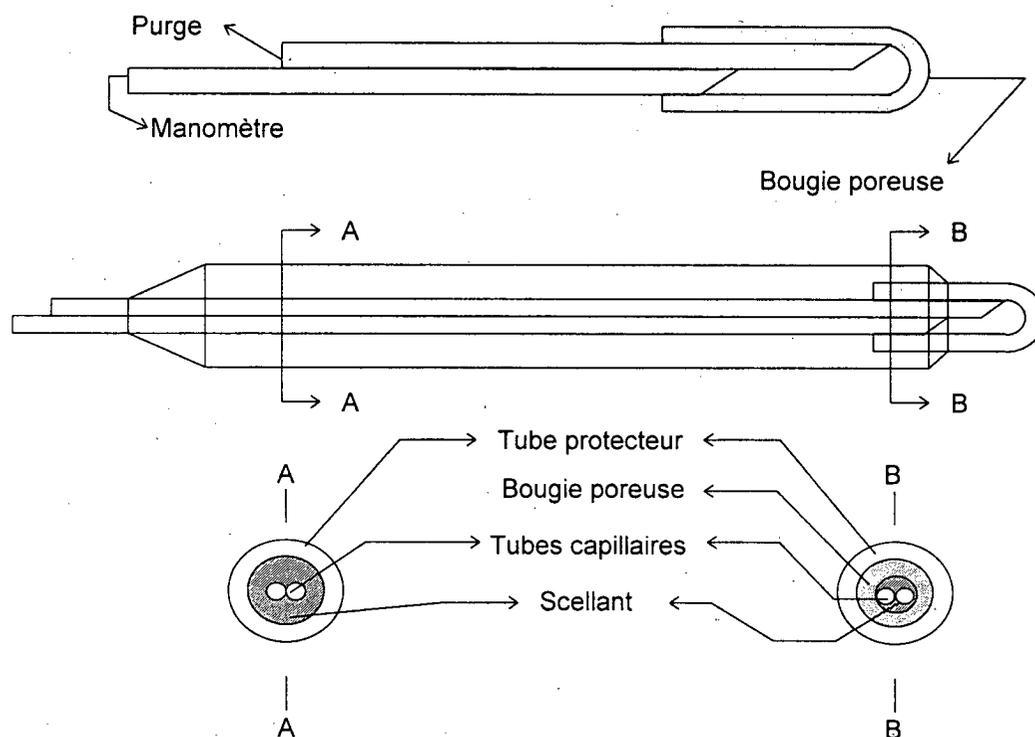


Figure 16 Schéma des tensiomètres

Les bougies poreuses doivent être complètement saturées en tout temps. Une désaturation partielle fausserait en effet la lecture de pression. Par contre, pour des succions matricielles de

moins de 100 kPa, la possibilité de désaturation est limitée puisque la pression d'entrée d'air de ces bougies est, justement, de 100 kPa. Les pressions négatives mesurables à l'aide de ce type d'instrument vont jusqu'à environ 90 kPa. Cette limite est imposée par la possibilité de cavitation de l'eau dans le tensiomètre.

La mesure donnée par le tensiomètre est numériquement égale à la succion dans la matrice lorsque la pression de l'air, toujours à l'intérieur de la matrice, correspond à la pression atmosphérique (c'est-à-dire quand $u_a = 0$; $\psi = u_a - u_w = -u_w$).

Étalonnage des tensiomètres

L'étalonnage des tensiomètres est relativement simple, puisque les lectures de succion ont été faites sur un tableau gradué où chaque tube capillaire est plongé dans une bouteille de mercure. La remontée de mercure dans le tube capillaire permet de mesurer la succion dans l'échantillon. Les corrections sont à faire pour les densités de l'eau et du mercure ainsi que pour l'élévation relative de chacun des tensiomètres dans l'échantillon. Ainsi, si un tensiomètre placé à une élévation de 10 cm produit une remontée de mercure de 10 cm à partir du niveau de mercure libre (pression atmosphérique) qui est à une élévation de 5 cm, tel que cela est illustré à la figure 17, on obtient une succion matricielle de 12,8 kPa.

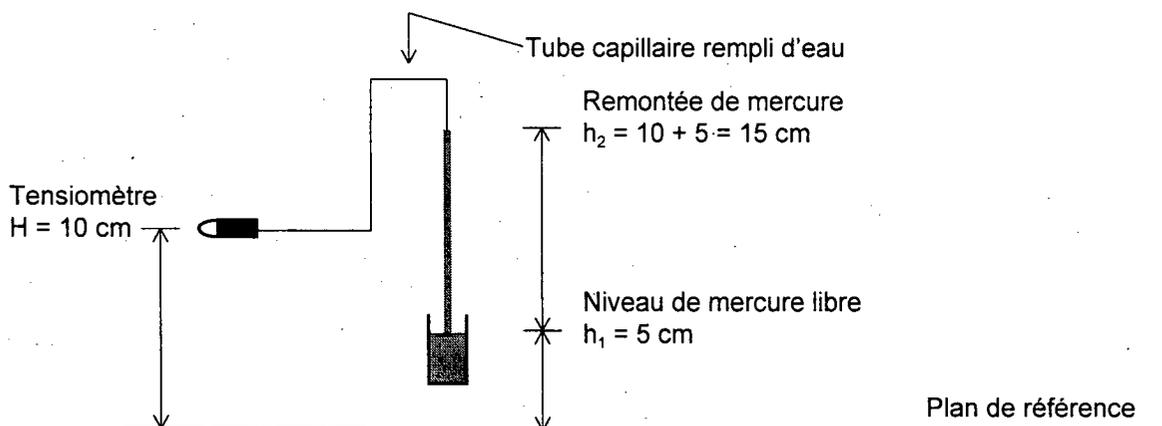


Figure 17 Exemple de mesure de la succion matricielle

La succion matricielle est calculée comme suit :

Équation 40

$$\psi = (h_2 - h_1) \times 1,33 \frac{\text{kPa}}{\text{cm Hg}} - (H - h_2) \times 0,0981 \frac{\text{kPa}}{\text{cm H}_2\text{O}}$$
$$\psi = (15 - 5) \times 1,33 - (10 - 5) \times 0,0981 = 12,8 \text{ kPa}$$

Montage

La mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau des matériaux se fait à l'intérieur du moule Proctor de 305 mm de diamètre dans lequel ont été insérés les tensiomètres et les sondes TDR. Le suivi de l'évolution des mesures de la succion matricielle et de la teneur en eau a été effectué pour une phase initiale de drainage et ensuite pour une phase d'imbibition.

Installation des capteurs

Des sondes TDR et des tensiomètres ont été installés sur trois niveaux à l'intérieur des échantillons compactés dans le moule de 305 mm. Les trois niveaux retenus permettent de bien suivre l'évolution des changements de teneur en eau et de succion matricielle sur la hauteur de l'échantillon. Ils assurent également une représentation appropriée des conditions du sol dans tout l'échantillon et peuvent servir d'indicateur de problèmes de ségrégation de particules au moment du montage de l'échantillon. De plus, les trois niveaux apportent une certaine sécurité en ce qui concerne le bris d'instruments pendant le compactage.

Le premier niveau se situe à une élévation de 63,5 mm par rapport au fond du moule, le deuxième, à 114,3 mm et le troisième, à 165,1 mm. Les tensiomètres et les sondes TDR sont insérés dans l'échantillon pendant le compactage. Comme l'échantillon est compacté dans le moule inversé, le niveau 3 correspond *grosso modo* à l'élévation de l'interface de la deuxième et de la troisième couche de compactage, le niveau 2, à celle de l'interface de la troisième et de la quatrième couche de compactage et le niveau 1, à celle de l'interface de la quatrième et de la cinquième couche de compactage. La figure 18 montre le moule de 305 mm ainsi que la disposition des niveaux de mesure de la succion et de la teneur en eau.

Les tensiomètres et les sondes TDR sont insérés par des orifices dans la paroi du moule, orifices qui sont ensuite scellés pour assurer l'étanchéité.

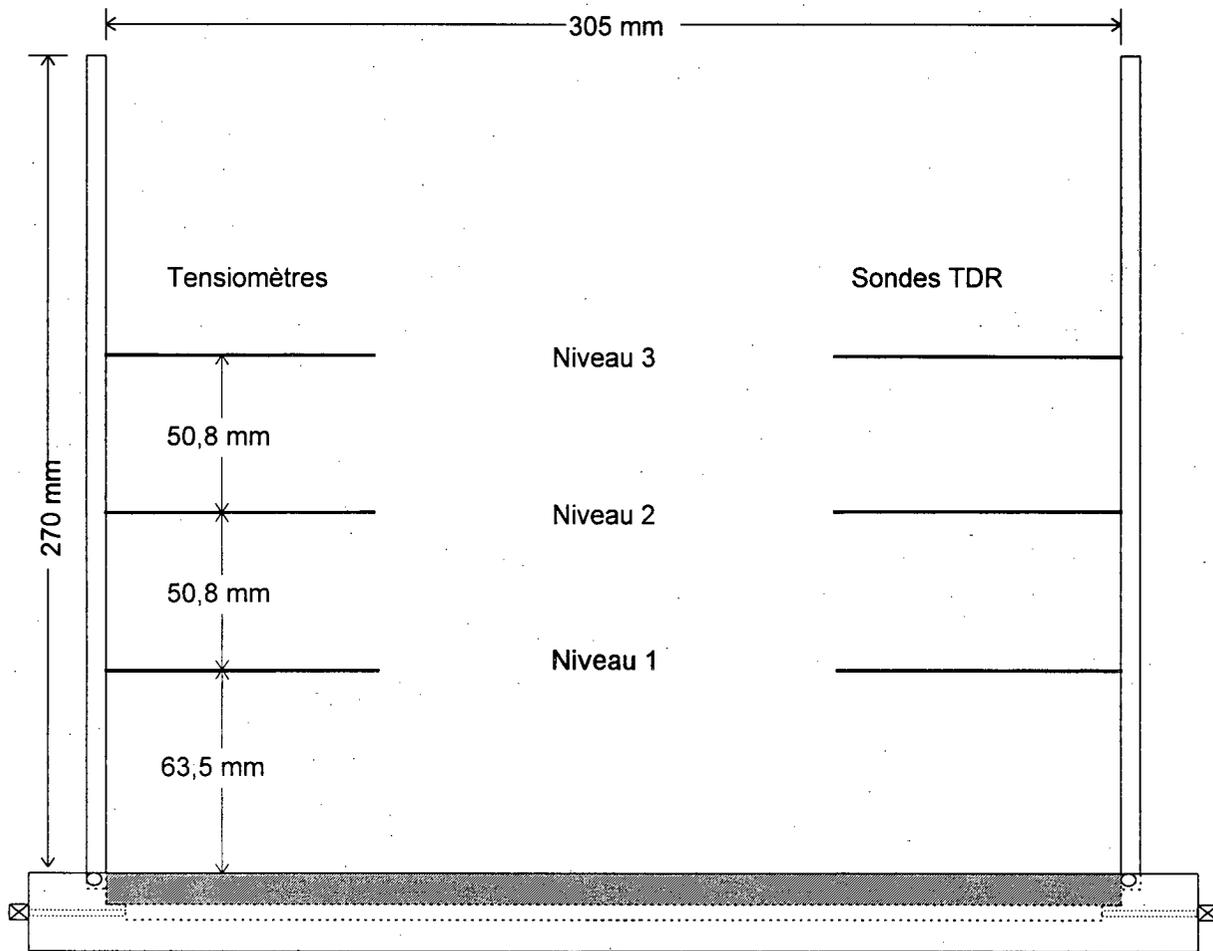


Figure 18 Schéma du moule et des niveaux de mesure

Comme nous l'avons vu à la section *Mesure de la teneur en eau et de la succion de façon ponctuelle*, la mesure de la teneur en eau à l'aide d'une sonde TDR peut subir l'influence de la présence d'un tensiomètre. Il faut donc placer ce dernier à une distance suffisante de la sonde TDR pour que l'eau dans la bougie poreuse du tensiomètre soit hors de la zone d'influence de ladite sonde. La zone d'influence est estimée, dans la présente étude, à un volume correspondant à la dimension de la sonde plus 5 mm sur son pourtour. La figure 19 montre la zone d'influence de la sonde TDR ainsi que la disposition du tensiomètre pour éviter le contact entre celui-ci et la zone d'influence.

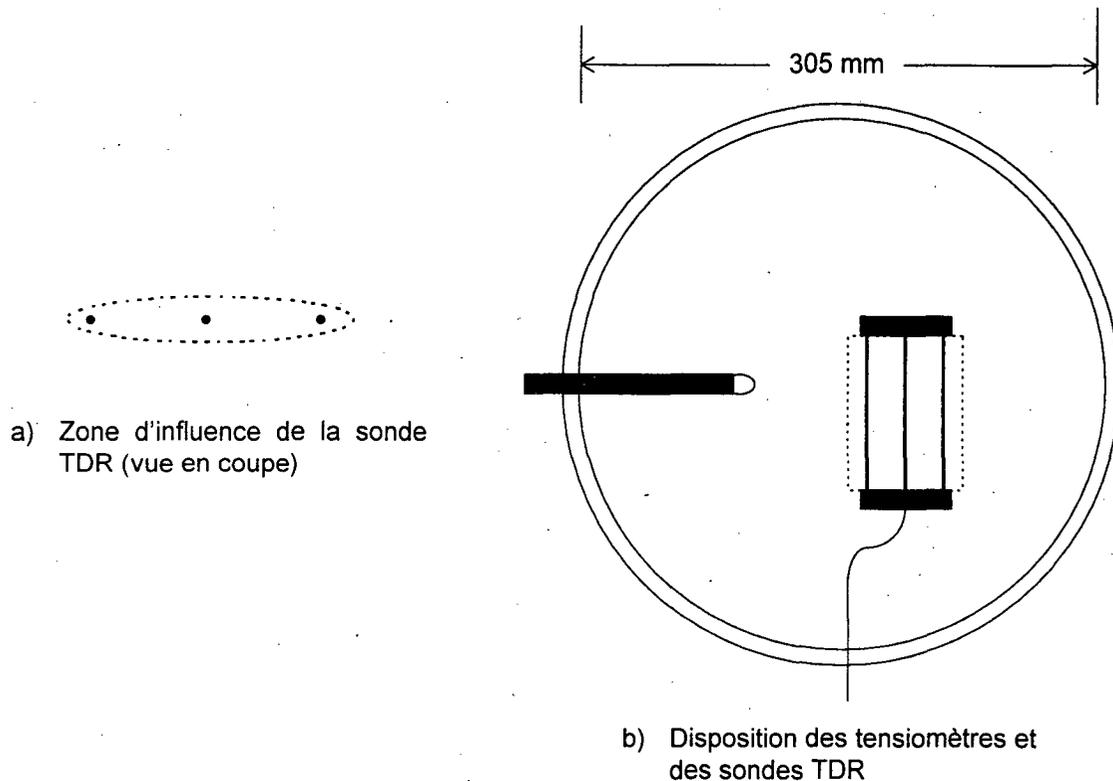


Figure 19 Disposition des tensiomètres et des sondes TDR à l'intérieur du moule en fonction de la zone d'influence de la sonde TDR

Étant donné la force d'impact du marteau de 15 kg du compacteur, on a dû accorder une attention particulière à la mise en place des tensiomètres. En principe, chaque tensiomètre est inséré à l'intérieur du moule et un ajout de matériau sous le tensiomètre est fait lorsque l'élévation de la couche est légèrement inférieure au niveau voulu. Par contre, lorsque la couche a une élévation supérieure au niveau souhaité, on pratique une rainure dans la surface du matériau pour laisser place au tensiomètre. De telles mesures préventives sont nécessaires pour conserver l'intégrité des tensiomètres au moment du compactage. La figure 20 illustre la façon exacte d'installer un tensiomètre dans le moule.

Pour ce qui est de la sonde TDR, un léger tamisage de matériaux passant le tamis 5 mm est exécuté sur la sonde pour éviter la formation de cavité vide autour des tiges d'acier. Le tamisage est aussi effectué autour de la bougie poreuse en vue de prévenir l'apparition du même phénomène et le bris de celle-ci durant le compactage.

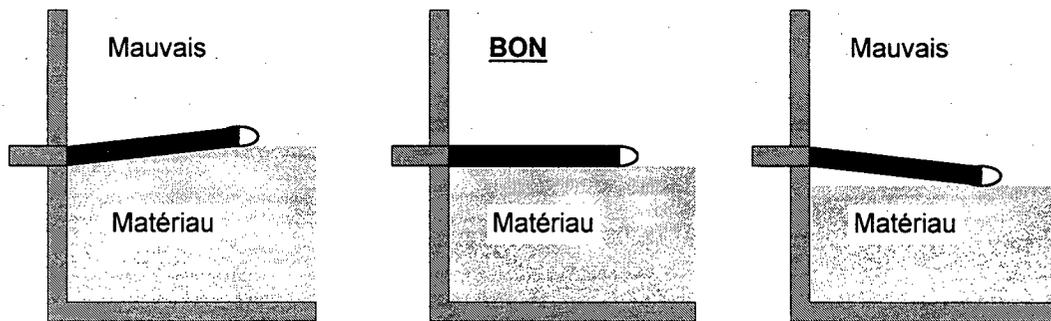


Figure 20 Insertion du tensiomètre par la paroi du moule dans l'échantillon

Phase de saturation

Une fois l'échantillon compacté dans le moule de 305 mm, il est soumis à une phase de saturation. L'eau est fournie par une burette reliée à la base du perméamètre à l'aide d'un gradient maximal de 2. Cette phase est essentielle si l'on veut mesurer la courbe caractéristique de rétention d'eau sur toute la plage de saturation. Cependant, l'appareillage utilisé n'a pas permis d'obtenir des valeurs de saturation complète, puisqu'il a été impossible d'appliquer une contre-pression pour dissoudre et expulser le maximum de bulles d'air. Donc, la phase de drainage subséquente à la phase de saturation est enclenchée lorsque l'eau s'écoule dans l'échantillon selon un régime permanent.

Phase de drainage

Pour mesurer l'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion matricielle de l'échantillon (courbe caractéristique de rétention), ce dernier est soumis à une phase de drainage. L'eau dans le matériau est évacuée par évaporation par l'extrémité supérieure du moule qui est laissée à l'air libre. Un ventilateur électrique assure une circulation de l'air au-dessus du moule et réduit la formation d'une masse d'air très humide au-dessus de l'échantillon.

La phase de drainage prend habituellement fin lorsque la variation de la teneur en eau en fonction de la succion matricielle devient à peu près nulle. Comme la succion matricielle maximale

pouvant être mesurée à l'aide du tensiomètre est de 90 kPa, cette tendance peut ne pas être atteinte à de telles valeurs de succion matricielle. En pratique, on observe que la succion maximale pouvant être mesurée à l'aide de ce type de tensiomètre varie de 75 à 90 kPa. La cavitation dans les tubes capillaires et la possibilité de désaturation de la bougie poreuse sont responsables de la limitation quant à la succion matricielle mesurable.

Donc, avant de procéder à la phase d'imbibition du matériau, il faut s'assurer que les tensiomètres ayant dépassé leur limite ont été resaturés de façon appropriée. Ainsi, pour y arriver, on utilise le tube capillaire de purge et on fait circuler de l'eau désaérée jusqu'à ce que toutes les bulles d'air soient évacuées. Ensuite, en empêchant la circulation de l'eau à l'autre extrémité du circuit de purge, on applique une pression pour chasser les bulles d'air à l'intérieur des pores de la bougie. Évidemment, l'opération implique une injection d'eau dans le matériau. Il faut donc, avant de procéder à la phase d'imbibition, attendre que l'eau injectée soit redistribuée dans le matériau et que la succion se rétablisse à l'intérieur du tensiomètre.

Phase d'imbibition

Pour mesurer l'effet d'hystérésis de la succion en fonction de la teneur en eau, une phase d'imbibition est imposée au matériau quasi sec. Elle débute lorsque la variation de la teneur en eau devient négligeable en fonction des variations de succion matricielle ou lorsque la succion matricielle dans l'échantillon atteint la capacité maximale du tensiomètre.

La phase d'imbibition se réalise à l'aide de la source d'eau qui a servi à la phase de saturation initiale à laquelle on a adapté un dispositif de Mariotte. Celui-ci consiste à mettre un bouchon étanche sur la burette et un tube capillaire permettant la circulation de l'air à l'intérieur de la burette. Le tube est inséré dans la burette et plongé dans l'eau jusqu'au niveau voulu. Ainsi, on peut appliquer une charge constante égale à l'élévation correspondant à l'extrémité submergée du tube capillaire sans avoir à se préoccuper du niveau d'eau dans la burette. La figure 21 montre le schéma du dispositif de Mariotte.

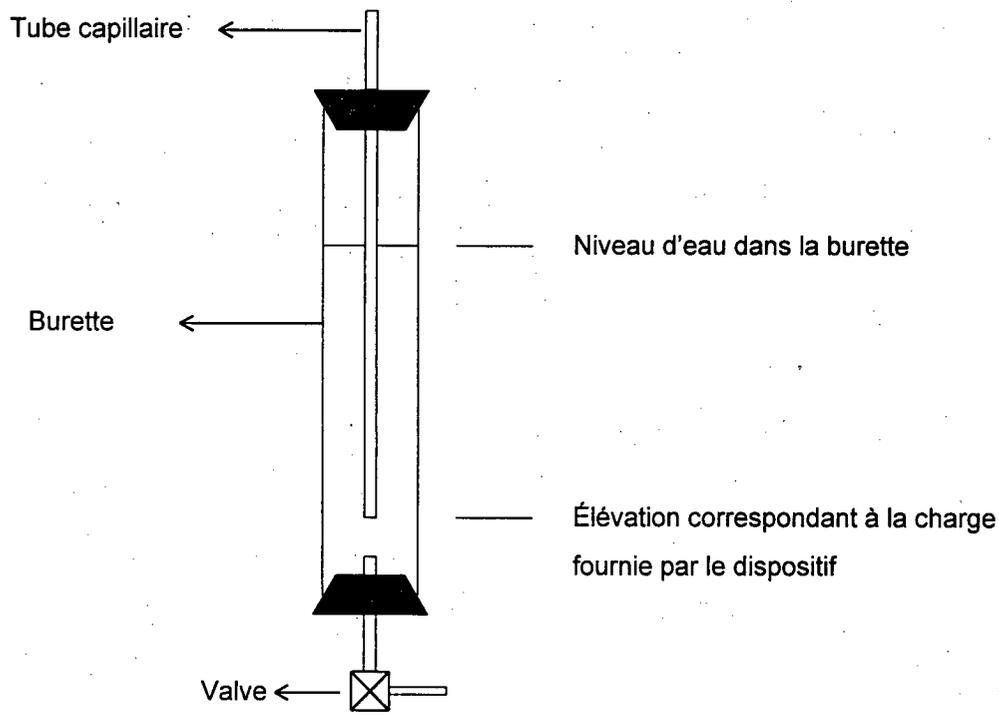


Figure 21 Dispositif de Mariotte

Donc, pour permettre à l'eau de la burette de pénétrer dans l'échantillon par capillarité, le niveau du tube capillaire dans la burette est placé vis-à-vis de la base du perméamètre. Le matériau s'imbibe alors sans changement de pression brusque.

Prise des mesures

En vue d'établir la courbe caractéristique de rétention d'eau qui met la teneur en eau en relation avec la succion matricielle, plusieurs lectures ont été notées en fonction du temps. Pour un niveau de mesure donné, la lecture de la teneur en eau a été prise en même temps que la lecture de la succion matricielle. On a donc une paire de données associée à une heure précise et cette paire de données correspond à un point de la courbe caractéristique. La notation de l'heure à laquelle la lecture est faite permet de bien voir l'évolution de la teneur en eau ou de la succion dans le temps et de prédire la fin d'une phase de drainage ou d'imbibition. Cette information n'est toutefois pas nécessaire à l'établissement de la courbe caractéristique de rétention.

En général, la durée des essais a varié de dix à quatorze jours ; de sept à dix jours pour la phase de drainage et de trois à quatre jours pour la phase d'imbibition. La seule exception à cette règle est survenue pour le matériau SM7 % qui a eu une durée de drainage de moins de 36 heures.

Une fois l'essai terminé, les paires de données des trois niveaux de mesure sont regroupées sur un graphique comportant la variation de la teneur en eau en fonction de la succion matricielle. L'équation 6 de la courbe caractéristique de rétention est utilisée pour décrire la relation $\theta(\psi)$. Les paramètres a , m et n sont déterminés à l'aide d'une régression qui peut être faite grâce à des logiciels de mathématique tels AXUM ou STATISCA. Les relations données par l'équation 6 ont été prolongées jusqu'à une valeur de succion de 100 kPa dans un souci d'uniformité pour l'interprétation des résultats. Une fois les paramètres déterminés, la relation mathématique peut ensuite être intégrée aux modèles de prédiction de la conductivité hydraulique.

Essai à la plaque de pression

En vue de vérifier la validité de la méthode décrite pour déterminer la courbe caractéristique de rétention d'eau, un essai à la plaque de pression a été fait sur un échantillon du matériau VJ7 %. À la Direction du laboratoire des chaussées, cet essai est appelé « potentiel de succion » et est décrit dans la procédure de laboratoire LC-22-330 (1993).

L'échantillon du matériau VJ7 % a été compacté dans un moule Proctor de 152,4 mm de diamètre ayant le même volume que celui utilisé pour l'étalonnage des sondes TDR (1 578,7 cm³). L'énergie de compactage est la même que celle de l'essai Proctor modifié puisque le matériau a été compacté sur quatre couches de 52 coups. L'échantillon à l'intérieur du moule est soumis à une phase de saturation par immersion. Ensuite, il est placé dans la cellule de pression, toujours à l'intérieur du moule.

La figure 22 montre un schéma de la cellule de pression. Celle-ci est en fait une cuve hermétique comportant une plaque poreuse à pression d'entrée d'air de 100 kPa. Un régulateur de pression d'air permet de faire augmenter la pression d'air à l'intérieur de la cellule et l'eau est évacuée par la plaque poreuse. Sous cette dernière, la pression de l'eau est hydrostatique, puisque l'air ne peut

passer au travers de la plaque. Le couvercle de la cellule est retenu en place à l'aide de douze boulons.

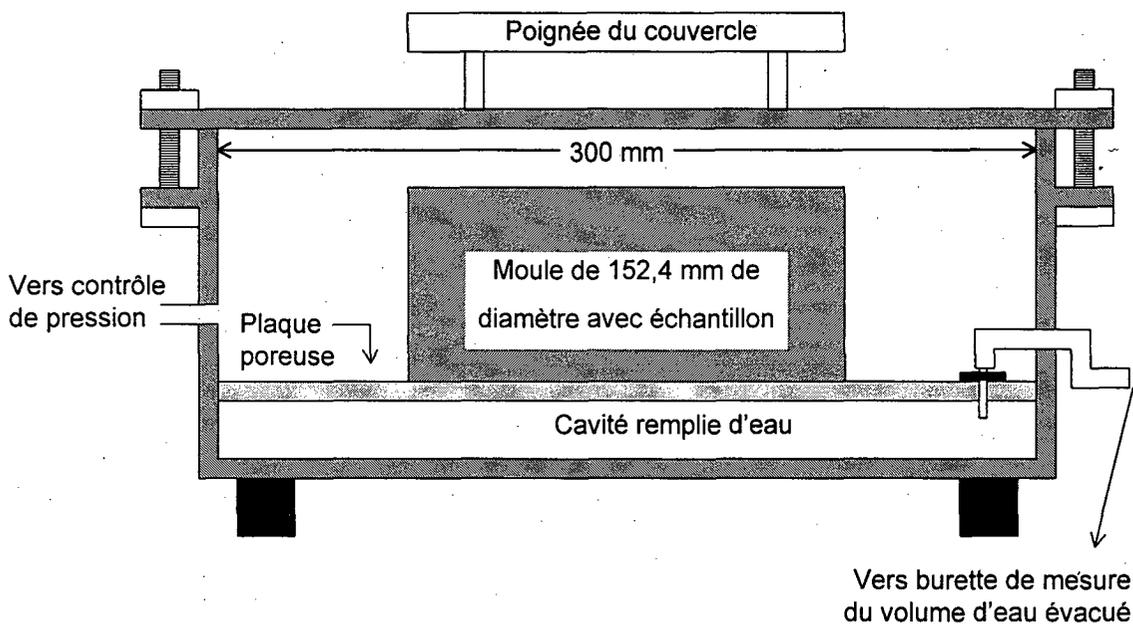


Figure 22 Cellule de pression de la Direction du laboratoire des chaussées

On sait que, lorsque l'état d'équilibre est atteint à un palier de pression d'air, la succion matricielle dans l'échantillon est égale à la pression d'air, puisque la pression d'eau est nulle. Au début de chaque palier de pression, la pression dans l'eau correspond à la pression de l'air. À mesure que l'eau s'échappe par la plaque poreuse, la pression dans l'eau interstitielle se dissipe pour devenir nulle lorsque l'équilibre est atteint. À ce moment, la variation du volume d'eau recueillie à la sortie de la cellule de pression est nulle. On peut donc procéder à la saisie de la teneur en eau par une méthode gravimétrique. La procédure habituelle de la Direction du laboratoire des chaussées consiste à dépressuriser la cellule et à peser l'échantillon seul avec son moule de compactage. Une procédure différente a toutefois été utilisée ici pour la saisie de la teneur en eau. Elle a consisté à peser l'échantillon avec la cellule de pression sans changer l'état de pression à l'intérieur de la cellule. Par contre, il est aussi possible de peser l'échantillon seul en le sortant de la cellule.

Calcul de la courbe de conductivité hydraulique

Comme nous l'avons précisé à la section *Évaluation des méthodes indirectes*, l'équation 27 a été retenue pour le calcul de la conductivité hydraulique relative. Elle s'exprime comme suit :

Rappel de l'équation 27

$$k_r(\theta_i) = \frac{\sum_{j=i}^m \left[\frac{2j+1-2i}{\psi_j^2} \right]}{\sum_{j=1}^m \left[\frac{2j-1}{\psi_j^2} \right]}$$

Pour utiliser cette équation, il faut diviser la courbe caractéristique de rétention d'eau en m intervalles réguliers de la teneur en eau. Chaque intervalle est numéroté de 1 à m en commençant par les teneurs en eau élevées. La succion matricielle correspondant à la teneur en eau moyenne de chaque intervalle est calculée à l'aide de l'équation 6, dont les paramètres α , m et n ont préalablement été déterminés. La figure 23 montre une façon de subdiviser la courbe caractéristique de rétention d'eau sur une courbe fictive, ainsi que la succion matricielle correspondant à la teneur en eau moyenne de l'intervalle i .

Dans le cas de la figure 23, qui représente une courbe caractéristique de rétention d'eau fictive, la plus faible teneur en eau disponible sur la courbe est de 3,1 % et la teneur en eau saturée, de 15 %. La subdivision de la courbe en dix intervalles réguliers de la teneur en eau donne une longueur d'intervalle de $(15-3,1)/10 = 1,19$. La teneur en eau correspondant au point milieu de l'intervalle est donc formulée selon la relation suivante :

$$\theta_i = 15 - (2i - 1) \frac{1,19}{2}$$

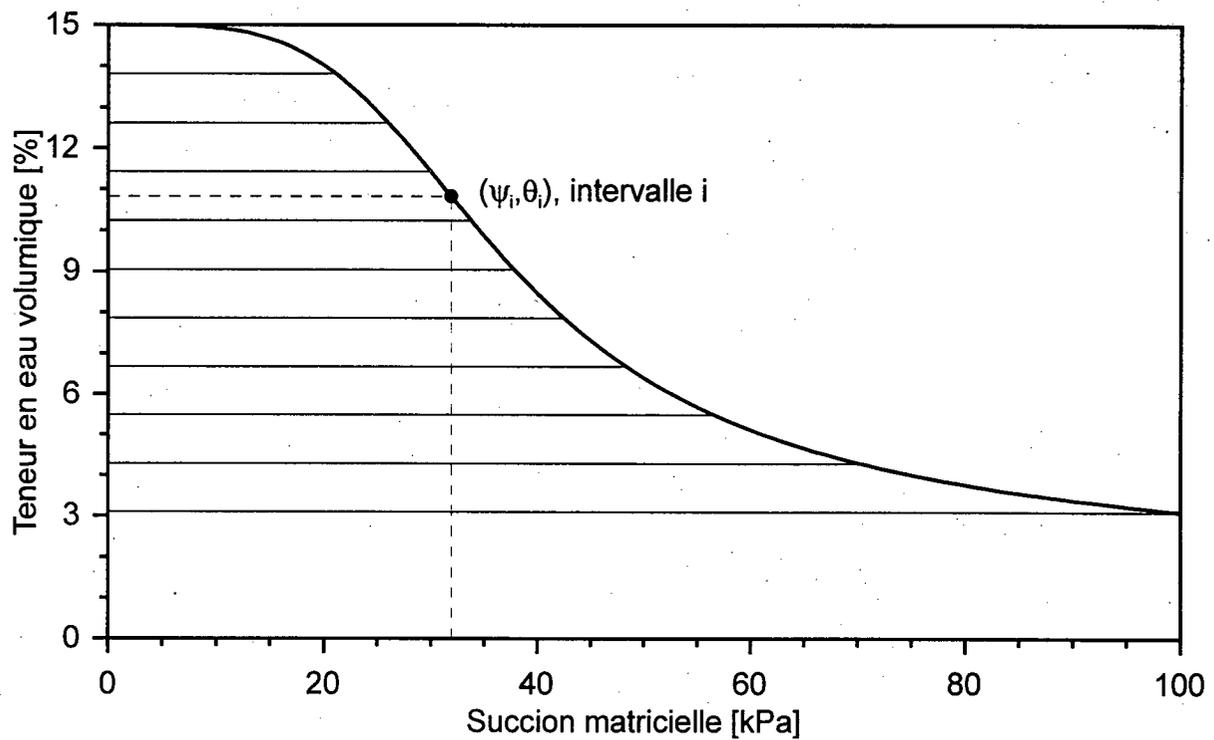


Figure 23 Subdivision de la courbe caractéristique de rétention d'eau

Sous une forme générale, elle s'exprime comme suit :

Équation 41
$$\theta_i = \theta_s - (2i - 1) \frac{\theta_s - \theta_L}{2 \times m}$$

où θ_s et θ_L représentent la teneur en eau saturée et la plus faible teneur en eau de la courbe et i , le numéro de l'intervalle. Les succions matricielles correspondant aux teneurs en eau moyennes peuvent maintenant être calculées. Le tableau 8 montre les teneurs en eau moyennes et les succions matricielles de chacun des intervalles.

L'équation de la courbe caractéristique de rétention d'eau présentée à la figure 23 est celle-ci :

$$\theta = 15 \times \left[\frac{1}{\ln(e + (\psi/30)^4)} \right]^1$$

Tableau 8**Teneurs en eau moyennes et suctions associées pour la figure 23**

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
θ	14,405	13,215	12,025	10,835	9,645	8,455	7,265	6,075	4,885	3,695
ψ	17,46	23,75	28,04	31,87	35,76	40,05	45,23	52,10	62,50	81,78

Par exemple, pour calculer la conductivité hydraulique associée à une teneur en eau de 7,265 % (intervalle n° 7), au numérateur de l'équation 27 on a :

$$\sum_{j=i}^m \left[\frac{2j+1-2i}{\psi_j^2} \right] = \frac{2 \times 7 + 1 - 2 \times 7}{45,23^2} + \frac{2 \times 8 + 1 - 2 \times 7}{52,10^2} + \frac{2 \times 9 + 1 - 2 \times 7}{62,50^2} + \frac{2 \times 10 + 1 - 2 \times 7}{81,78^2} = 3,9 \times 10^{-3}$$

Alors qu'au dénominateur on a la conductivité saturée calculée selon k_{sc} :

$$k_{sc} = \sum_{j=1}^m \left[\frac{2j-1}{\psi_j^2} \right] = \frac{2 \times 1 - 1}{17,46^2} + \frac{2 \times 2 - 1}{23,75^2} + \dots + \frac{2 \times 9 - 1}{62,50^2} + \frac{2 \times 10 - 1}{81,75^2} = 5,5 \times 10^{-2}$$

donc :

$$k_r(\theta_7) = \sum_{j=7}^m \left[\frac{2j+1-2i}{\psi_j^2} \right] / \sum_{j=1}^m \left[\frac{2j-1}{\psi_j^2} \right] = \frac{3,9 \times 10^{-3}}{5,5 \times 10^{-2}} = 7,1 \times 10^{-2}$$

Pour obtenir la conductivité hydraulique absolue, on multiplie la conductivité relative donnée par l'équation 27 par la conductivité saturée du matériau. Ainsi, pour notre exemple, la conductivité hydraulique à une teneur en eau de 7,275 % est quatorze fois plus faible que la conductivité hydraulique saturée.

À noter que le dénominateur de l'équation 27, qui est en fait la conductivité hydraulique saturée calculée, est une constante pour tous les calculs de conductivité hydraulique partiellement saturée d'un même matériau.

L'exemple montre l'importance de bien définir la courbe caractéristique de rétention d'eau, puisque le calcul de la conductivité hydraulique pour un intervalle de la teneur en eau permet de tenir compte de tous les intervalles situés au-delà de celui-ci sur la courbe. De même, avec le coefficient k_{sc} on prend en considération tous les intervalles de la courbe. Il est donc primordial de définir la courbe caractéristique de rétention d'eau sur la plus grande plage de teneur en eau possible pour que les calculs de conductivité hydraulique soient les plus exacts possible. Aussi, il est important d'utiliser un grand nombre d'intervalles qui permet un calcul précis sans toutefois alourdir la charge de calcul. Fredlund et Rahardjo (1993) suggèrent de retenir quarante intervalles, ce qui a été fait dans la présente étude.

Simulations numériques du drainage d'une fondation de chaussée

Pour bien voir l'influence des propriétés hydrauliques des différents matériaux étudiés, une série de simulations numériques a été faite à l'aide du logiciel SEEP/W. Ce dernier permet de simuler, par éléments finis, des écoulements en milieux poreux saturés et non saturés selon un régime permanent ou transitoire. Des simulations d'écoulement en deux dimensions en coordonnées polaires ou cylindriques sont aussi possibles.

Équations d'écoulements utilisées par le logiciel SEEP/W

L'équation fondamentale d'écoulement en milieu poreux en deux dimensions utilisée par le logiciel SEEP/W est représentée par l'équation suivante :

Équation 42

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

L'équation 42 exprime le fait qu'à l'intérieur d'un élément de volume les variations d'écoulements dans la direction x et la direction y, plus un écoulement externe appliqué sur cet élément de volume, correspondent à la variation de la teneur en eau dans le temps.

Lorsque l'écoulement se fait selon un régime permanent, le terme de droite devient nul puisqu'il n'y a pas de changement d'état dans un tel écoulement, et l'équation 42 devient :

Équation 43
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0$$

Le logiciel est programmé de façon que les conditions de contraintes totales soient constantes, aucun chargement sur une masse de sol n'étant permis. Par ailleurs, la pression de l'air à l'intérieur des pores est égale à la pression atmosphérique de sorte que la succion matricielle correspond à la pression capillaire créée dans l'eau des pores ($\psi = -u_w$).

Puisque l'algorithme du logiciel est prévu pour calculer les charges hydrauliques totales en tout point sur le maillage défini pour un problème donné, l'équation 42 a été reformulée pour que les changements de teneur en eau dans le temps soient fonction de la charge hydraulique. On doit alors exprimer les changements de teneur en eau à l'aide de la pente de la courbe caractéristique de rétention d'eau m_w par la relation suivante :

Équation 44
$$m_w = \frac{\partial \theta}{\partial u_w} \Rightarrow \partial \theta = m_w \partial u_w$$

La charge totale en un point est exprimée par la relation suivante :

Équation 45
$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y$$

où γ_w est le poids volumique de l'eau et y , l'élévation du point du maillage des éléments finis auquel la charge est calculée. En isolant u_w dans l'équation 45 et en combinant le résultat avec l'équation 44, on obtient :

Équation 46
$$\partial \theta = m_w \gamma_w \partial (H - y)$$

Puisque la dérivée de y , qui est une constante, est égale à 0, la combinaison de l'équation 46 avec l'équation 42 donne :

Équation 47
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}$$

Le logiciel calcule les charges hydrauliques en tout point du maillage à l'aide de l'équation 47, de la courbe de conductivité hydraulique et de la courbe caractéristique de rétention d'eau préalablement définies. Ensuite, les nouvelles teneurs en eau et la conductivité hydraulique associée à ces charges hydrauliques sont calculées pour être intégrées aux calculs des charges hydrauliques de l'itération suivante.

Hypothèses pour la modélisation du drainage d'une fondation

L'étude paramétrique a été réalisée dans l'optique suivante : c'est dans la période du dégel de la chaussée que l'eau est présente en plus grande quantité. Le gel sous-jacent empêchant le drainage vertical, celui-ci ne peut se faire que de façon horizontale. Le temps nécessaire pour le drainage peut avoir des conséquences sur la capacité portante à un moment plus critique. Les hypothèses de base pour la simulation sont les suivantes :

- 1) le dégel unidimensionnel de la chaussée (à partir du revêtement vers le bas, aucun effet de bord) ;
- 2) la conductivité hydraulique isotrope en x et en y ;
- 3) la charge égale à zéro sur la pente du talus, en ce qui concerne la progression du dégel (c'est-à-dire la simulation de la position du front de dégel) ;
- 4) la fondation saturée à 90 % avant le début du dégel. Ce degré de saturation correspond à une teneur en eau où la pression hydrostatique est mesurable.

Pour ce qui est du dégel, la situation, telle qu'on la conçoit, est la suivante. Le matériau gelé ayant une conductivité hydraulique infiniment petite, l'écoulement ne peut donc se faire dans celui-ci. Une simulation parfaite de la situation de dégel aurait été de mettre une barrière à l'écoulement, à

l'intérieur de la fondation. La barrière aurait une élévation variable selon le taux de progression du dégel. Le logiciel SEEP/W ne permettant pas de simuler une telle barrière mobile, l'artifice de la charge égale à zéro sur la pente du talus a dû être utilisé pour limiter la progression de l'écoulement dans des conditions se rapprochant le plus de la réalité. La position de la charge égale à zéro, quant à elle, est variable et suit une progression linéaire en fonction du taux de progression du dégel.

La simulation faite avec le logiciel SEEP/W comprend les étapes suivantes :

- 1) l'entrée des courbes caractéristiques de rétention ;
- 2) le calcul des courbes de conductivité hydraulique (par le logiciel) ;
- 3) la génération des éléments finis ayant les dimensions de la fondation ;
- 4) le calcul d'un écoulement selon un régime permanent pour situer la nappe au sommet de la fondation (pour simuler la saturation du matériau) ;
- 5) le calcul d'un écoulement selon un régime transitoire sur une période de dégel prédéterminée.

Paramètres étudiés

Pour bien comprendre l'effet de chacun des paramètres de drainage des matériaux de chaussées étudiés, il importe de les isoler et d'en trouver les effets. Les paramètres des matériaux étudiés ici sont la conductivité hydraulique saturée, la pression d'entrée d'air de la courbe caractéristique de rétention d'eau ainsi que la teneur en eau résiduelle. Cette dernière notion étant relativement ambiguë quant à sa définition, un paramètre parallèle est donc employé pour décrire le point de la courbe caractéristique de rétention d'eau où la variation de la teneur en eau devient pratiquement nulle en fonction des variations de la succion matricielle. Le paramètre en question a été considéré comme la teneur en eau résiduelle à une succion de 100 kPa. Donc, le symbole θ^* , sera utilisé dorénavant pour décrire la teneur en eau résiduelle à 100 kPa.

Avant de procéder à la simulation d'écoulements avec les matériaux étudiés en laboratoire, une série d'essais a été faite avec des matériaux fictifs ayant des caractéristiques telles que chacun des paramètres discutés plus haut a pu être isolé pour bien voir son effet sur l'écoulement.

Trois valeurs de conductivité hydraulique, trois teneurs en eau résiduelle à 100 kPa ainsi que six pressions d'entrée d'air ont été retenues. Par exemple, si le paramètre à étudier était la pression d'entrée d'air, des simulations étaient faites en faisant varier la pression d'entrée d'air seulement, alors que tous les autres paramètres restaient constants.

La figure 24 montre la géométrie de la fondation de chaussée utilisée pour la simulation d'une route régionale du type E où la fondation inférieure est faite avec le même matériau que la fondation supérieure.

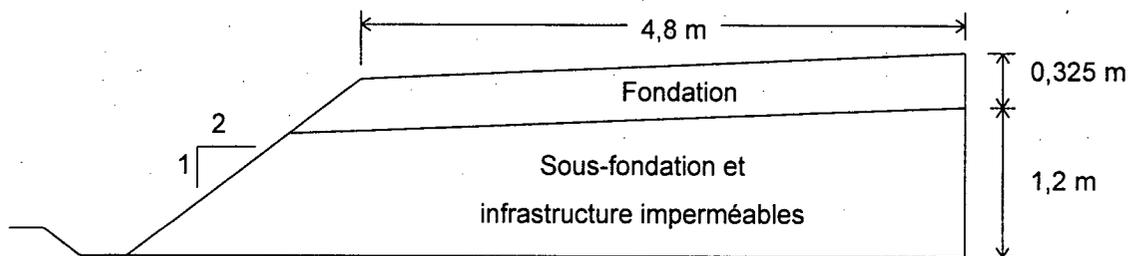


Figure 24 Schéma du modèle de chaussée utilisé pour la simulation avec le logiciel SEEP/W

À noter que l'échelle verticale diffère de l'échelle horizontale et que la pente de la chaussée est de 2 %.

Les paramètres étudiés sont :

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1) la teneur en eau résiduelle | θ_r^* : 3 %, 5,3 %, 7,7 % ; |
| 2) la pression d'entrée d'air | ψ_e : 1 kPa, 3 kPa, 5 kPa, 7 kPa, 10 kPa, 13 kPa ; |
| 3) la perméabilité saturée | k_s : 10^{-4} cm/s, 10^{-5} cm/s, 10^{-6} cm/s. |

La configuration de base est la suivante : $\theta_r^* = 5,3 \%$; $\psi_e = 1 \text{ kPa}$; $k_s = 10^{-5} \text{ cm/s}$, c'est-à-dire une teneur en eau résiduelle à 100 kPa de 5,3 %, une pression d'entrée d'air de 1 kPa et une perméabilité saturée de 10^{-5} cm/s . Donc, lorsqu'un des trois paramètres est étudié, les deux autres ont la configuration de base.

Les figures 25 et 26 montrent les courbes caractéristiques de rétention d'eau fictives ayant servi à l'étude paramétrique.

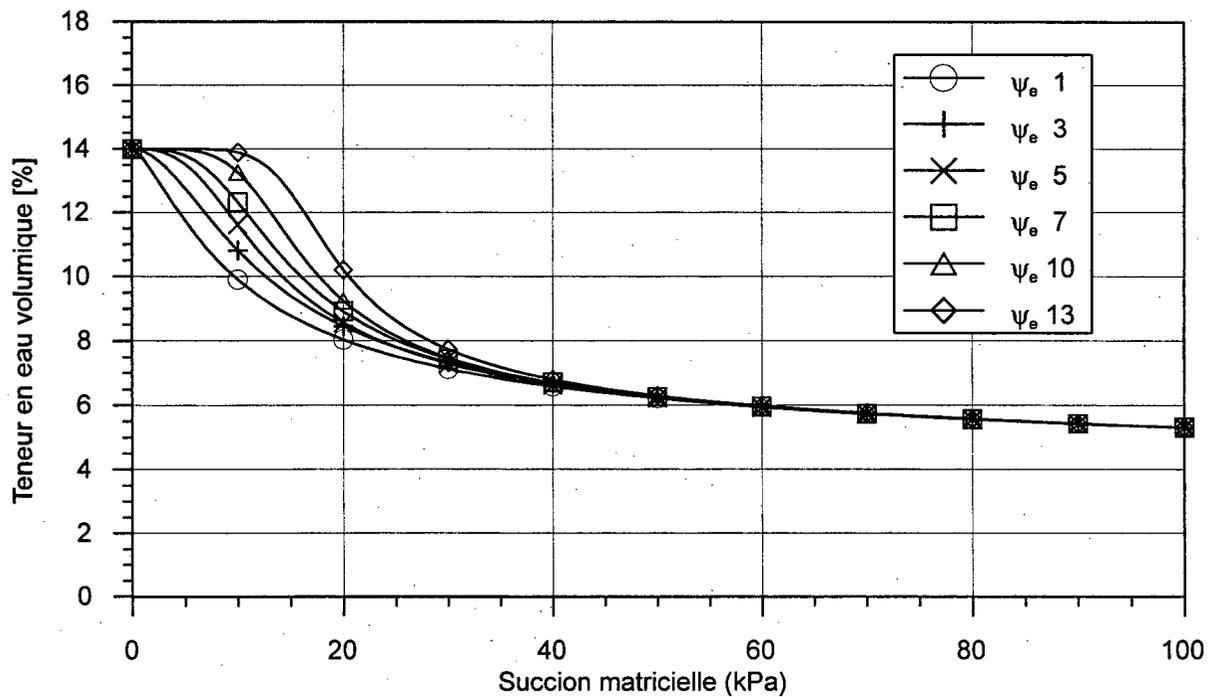


Figure 25 Courbes caractéristiques de rétention d'eau fictives avec différentes pressions d'entrée d'air

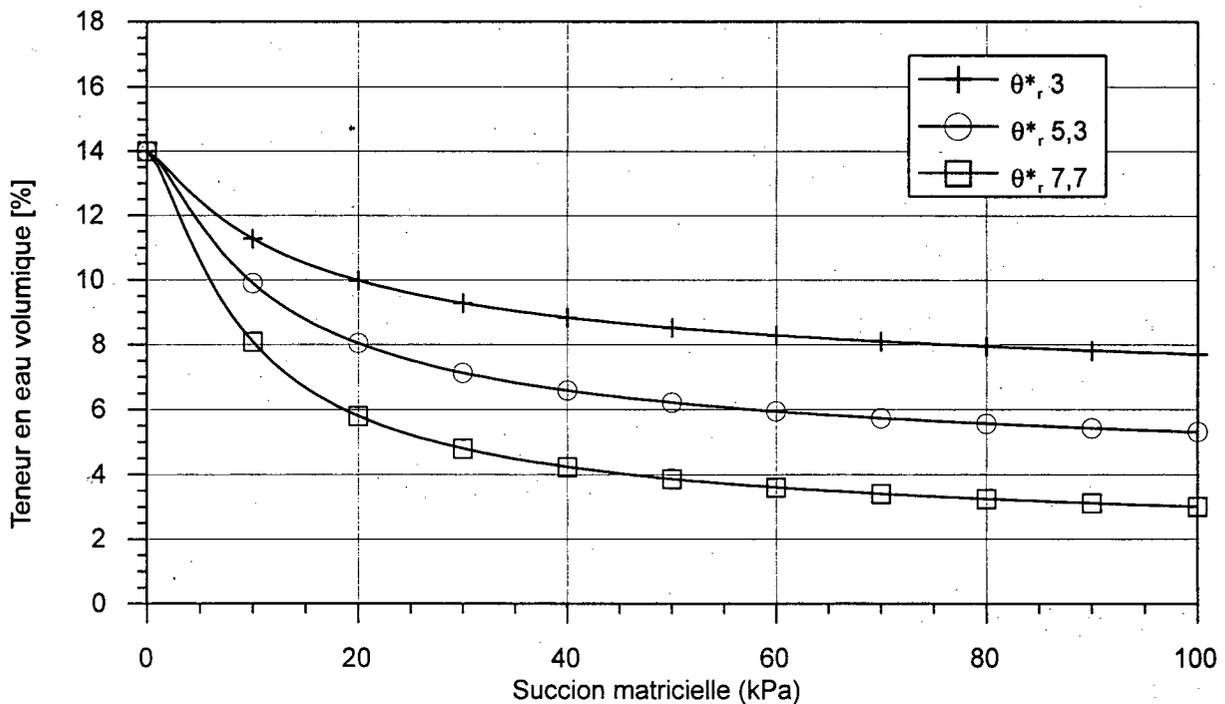


Figure 26 Courbes caractéristiques de rétention d'eau fictives avec différents teneurs en eau résiduelle à 100 kPa (θ_r^*)

Étude du drainage avec les matériaux de laboratoire

Une fois l'étude paramétrique terminée, des simulations de drainage de fondations ont été effectuées pour les matériaux étudiés en laboratoire. Les conditions de drainage sont les mêmes qu'à la section *Hypothèses pour la modélisation du drainage d'une fondation*. On a toutefois ajouté une période de drainage supplémentaire aux dix jours de dégel. Cette période est aussi de dix jours et la sous-fondation est maintenue imperméable de sorte que le drainage se fait horizontalement dans la fondation et l'eau évacuée s'écoule sur la pente du talus.

La période totale de vingt jours peut être considérée comme égale à la période de récurrence d'une pluie saturante de la fondation d'une chaussée (Cedergren, 1987). Les simulations ont permis de prédire la variation des pressions interstitielles, des teneurs en eau et de la conductivité hydraulique au cours de cette période.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Nous exposons ici les résultats des essais Proctor, de la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau et du calcul de la courbe de conductivité hydraulique en condition partiellement saturée de chacun des matériaux étudiés. De plus, les résultats de l'étude du drainage d'une chaussée ainsi que l'étude paramétrique faite par simulations numériques à l'aide du logiciel SEEP/W sont décrits dans le présent chapitre.

Données de compactage et de perméabilité

Caractéristiques du compactage

La teneur en eau optimale déterminée à l'aide de l'essai Proctor sur chacun des matériaux choisis a été utilisée pour compacter l'échantillon dans le moule de 305 mm de diamètre servant à la détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Le tableau 9 comporte les résultats des essais de compactage de tous les matériaux étudiés.

Les caractéristiques compilées dans le tableau 9 sont la densité des particules (G), la masse volumique, l'indice des vides, la teneur en eau optimale, le degré de saturation à l'optimum et la teneur en eau à saturation complète. Pour la masse volumique et l'indice des vides, deux données par matériau sont disponibles, soit celle dans le moule de 152,4 mm, qui a été déterminée par l'essai Proctor, et celle dans le moule de 305 mm. En général, la masse volumique des matériaux compactés dans le moule de 305 mm est plus grande que celle obtenue durant l'essai Proctor dans le moule de 152,4 mm. En effet, les matériaux ont une masse volumique de 0 à 4 % plus grande dans le moule de 305 mm, alors que le matériau SM2 % 0 est plus dense de 2,2 % dans le moule de 152,4 mm. Les masses volumiques de tous les matériaux sont comprises entre 2 179 kg/m³ pour VJ2 % H et 2 326 kg/m³ pour SM2 % 2, alors que l'indice des vides varie de 0,145 pour SM2 % 0 à 0,225 pour VC7 %.

La teneur en eau optimale de chaque matériau, déterminée à l'essai Proctor dans le moule de 152,4 mm, est donnée en valeur massique (w) et en valeur volumique (θ). Associé à la teneur en

eau optimale, le degré de saturation du matériau au moment de sa mise en place dans le moule de 305 mm est indiqué en pourcentage. Le degré de saturation fournit donc le pourcentage de la porosité qui est remplie d'eau. La teneur en eau volumique (θ) saturée qui est égale à la porosité de même que la teneur en eau massique (w) saturée sont aussi précises pour les échantillons compactés dans le moule de 305 mm.

La teneur en eau massique optimale varie en fonction de la granulométrie. En général, elle augmente avec la hausse de la teneur en fines, pour se situer autour de 4,7 % pour les matériaux comportant 2 % de fines et à 5,5 pour les matériaux ayant 7 et 12 % de fines.

Puisque les échantillons sont tous compactés à des densités différentes, la teneur en eau volumique à saturation complète peut être distincte pour deux matériaux ayant une teneur en eau massique saturée semblable. En effet, le matériau VC12 % qui a une teneur en eau massique saturée égale à celle de VJ7 % a, par contre, une teneur en eau volumique saturée plus élevée, soit 16,2 % par rapport à 15,8 %. Cela est facilement compréhensible à l'examen de l'équation 37 qui montre que, lorsque l'indice des vides d'un matériau diminue pour une même teneur en eau massique, la teneur en eau volumique augmente. Les valeurs de teneur en eau volumique saturée varient de 12,5 % à 16,6 %, alors que pour le matériau VJ2 % H, qui possède la granulométrie la plus uniforme, une valeur de 18,3 % indique que ce matériau est beaucoup moins dense.

Tableau 9**Caractéristiques de compactage des matériaux**

Matériaux	Densité des particules	Masse volumique		Indice des vides	
		152,4 mm	305 mm	152,4 mm	305 mm
SM2 % 0	2,663	2 320	2 270	0,145	0,171
SM2 % 1	2,663	2 223	2 283	0,195	0,164
SM2 % 2	2,663	2 223	2 326	0,195	0,143
SM7 % 1 et 2	2,677	2 297	2 312	0,163	0,155
VC2 %	2,757	2 297	2 315	0,198	0,188
VC7 %	2,777	2 262	2 306	0,225	0,202
VC7 % A	2,777	-	2 325	-	0,192
VC12 %	2,777	2 291	2 321	0,209	0,194
VJ2 %	2,668	2 264	2 237	0,176	0,190
VJ2 % M	2,665	2 185	2 218	0,217	0,199
VJ2 % H	2,674	2 179	2 179	0,224	0,224
VJ7 % M	2,665	2 302	2 296	0,155	0,158
VJ7 %	2,692	2 275	2 261	0,181	0,188
VJ12 %	2,692	2 308	2 308	0,164	0,164
	Teneur en eau optimale			A saturation (305 mm)	
	w (%)	θ (%) (305 mm)	S_r	w (%)	θ (%)
SM2 % 0	4,8	10,9	74,9	6,4	14,6
SM2 % 1	4,6	10,5	74,7	6,2	14,1
SM2 % 2	4,6	10,7	85,9	5,4	12,5
SM7 % 1 et 2	5,1	11,8	87,9	5,8	13,4
VC2 %	4,7	10,9	68,8	6,8	15,8
VC7 %	5,6	12,9	77,1	7,3	16,8
VC7 % A	5,6	13,0	81,1	6,9	16,1
VC12 %	5,7	13,3	81,7	7,0	16,2
VJ2 %	4,9	11,0	68,8	7,1	16,0
VJ2 % M	4,8	10,7	64,3	7,5	16,6
VJ2 % H	5,4	11,8	64,3	8,4	18,3
VJ7 % M	4,7	10,8	79,2	5,9	13,7
VJ7 %	5,3	12,0	75,9	7,0	15,8
VJ12 %	5,5	12,7	90,4	6,1	14,1

Changement de granulométrie à cause du compactage

Durant le compactage, l'impact du marteau mécanique dans les moules des compacteurs de 152,4 mm de 305 mm entraîne la production de fines dans les matériaux soit par attrition, soit par

(Voir à la page 84)

écrasement des arêtes des granulats les uns sur les autres. C'est pour cette raison que les courbes granulométriques originales des matériaux avant compactage ont été légèrement décalées vers le bas par rapport aux courbes du fuseau MG-20 du ministère des Transports. En effet, comme nous l'avons dit au chapitre *Description des matériaux*, les matériaux comprenant 2 % de fines ont été préparés à une teneur en fines de 1,5 % pour la source de pierre granitique et de 1 % pour les sources de gravier schisteux et de pierre calcaire. Les matériaux comportant 7 % de fines l'ont été à 6 % pour la pierre granitique et à 5 % pour les deux autres matériaux, tandis que, pour les courbes à 12 %, ils l'ont été à 11 % et 10 % respectivement.

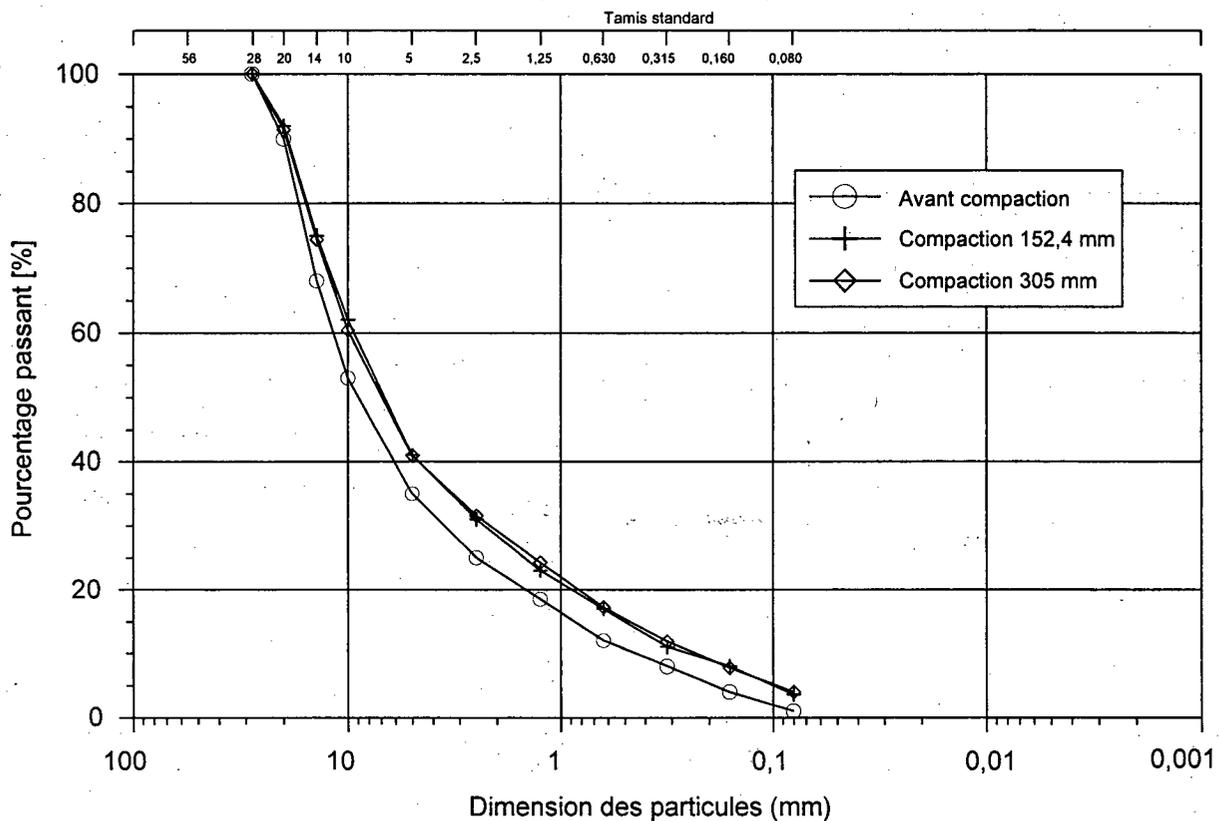


Figure 27 Courbes granulométriques avant et après compactage du matériau VJ2 %

Selon la figure 27, les objectifs quant aux courbes granulométriques escomptées après compactage ont été largement dépassés. En effet, le matériau VJ 2 % n'a pas une teneur en fines de 2 % après compactage, mais bien de 3,6 %. En général, les matériaux granitiques et schisteux ont donné des courbes granulométriques après compactage assez près des courbes escomptées et similaires dans le cas des matériaux à même granulométrie de base. Ainsi, les granulométries de

VC 2 % et de VJ 2 % sont pratiquement semblables, et il en est de même pour les matériaux VC7 % et VJ7 %, ainsi que pour VC12 % et VJ12 %. Par contre, les matériaux calcaires ont eu une production de fines importante et s'éloignent davantage des courbes attendues. En effet, le matériau SM2 % a une teneur en fines de 5,5 % après compactage, le matériau SM7 %, de 12,6 % et le matériau SM12 %, une teneur de 18,1 %.

Les courbes granulométriques obtenues après compactage de tous les matériaux sont montrées à l'annexe A.

Échantillons SM

À remarquer que, pour les matériaux de Saint-Marc-des-Carières, une numérotation a été ajoutée à la nomenclature décrite au chapitre *Description des matériaux*. En effet, pour le matériau SM2 %, trois essais ont été effectués. Le matériau SM2 % 0 est le premier échantillon de cette source qui a été testé. Sa masse volumique à la teneur en eau optimale de 4,8 % est de $2\,320\text{ kg/m}^3$. L'échantillon de ce matériau préparé dans le moule de 305 mm n'a pas permis de mesurer la courbe caractéristique de rétention d'eau à cause du bris de la majorité des capteurs de teneur en eau et de succion matricielle. On a donc dû effectuer un nouvel essai pour cette granulométrie. Or, à cause d'un manque de matériaux, un deuxième échantillonnage a été obligatoire, ce qui nous a amené à refaire également l'essai Proctor. Les deux nouveaux échantillons (SM2 % 1 et SM2 % 2) ont un indice des vides, dans le moule de 152,4 mm, de 0,195 par opposition à 0,145 pour le premier échantillonnage. Toutefois, dans le moule de 305 mm, les indices des vides de SM2 % 1 et SM2 % 2 se rapprochent de SM2 % 0, soit respectivement 0,164 et 0,143 par rapport à 0,171.

On verra que la conductivité hydraulique mesurée dans le moule de 152,4 mm est beaucoup plus grande pour les échantillons SM2 % 1 et SM2 % 2 que pour l'échantillon SM2 % 0, échantillons, pourtant, qui ont tous la même granulométrie. La différence est attribuable aux deux échantillonnages faits à cinq mois d'intervalle, ce qui a pu amener des différences dans la composition minéralogique et dans la forme des grains.

On remarquera que l'essai sur le matériau SM7 % a aussi été effectué deux fois. Par contre, étant donné que les résultats du compactage des deux essais sont tout à fait semblables, ils ont été regroupés en un seul et même essai. Les résultats obtenus dans le cas de la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau pour les deux échantillons sont également similaires. Le deuxième essai sur ce matériau a été rendu obligatoire parce que le premier s'est déroulé trop rapidement pour que la courbe caractéristique de rétention soit mesurée correctement. On a donc reformulé l'échantillon de caractéristique SM12 %, car il ne restait pas suffisamment de matériau provenant du premier échantillon pour permettre de fabriquer un autre SM7 %. C'est aussi pour cette raison que l'on n'a pas de résultats d'essai sur un échantillon du type SM12 %.

Perméabilité mesurée par l'essai Proctor

Les résultats des essais de conductivité hydraulique des matériaux quasi saturés qui ont été faits dans le perméamètre de 152,4 mm (moule Proctor) sont compilés au tableau 10. La masse volumique des échantillons, l'indice des vides, la conductivité hydraulique ainsi que le degré de saturation de chaque essai y figurent.

Tableau 10				
Conductivité hydraulique dans le moule de 152,4 mm				
Matériaux	Masse volumique (kg/m³)	Indice des vides	Perméabilité (cm/s)	S, pour l'essai de perméabilité (%)
SM2 % 0	2 267	0,172	1,70E-06	92,9
SM2 % 1	2 193	0,212	1,10E-03	87,1
SM2 % 2	2 193	0,212	1,10E-03	87,1
SM7 % 1 et 2	2 306	0,158	4,90E-07	95,0
VC2 %	2 235	0,231	2,90E-04	87,0
VC7 %	2 250	0,232	2,90E-05	81,4
* VC7 % A	-	-	-	-
VC12 %	2 298	0,206	6,20E-06	87,6
VJ2 %	2 206	0,207	1,10E-04	86,4
VJ2 % M	2 158	0,232	1,80E-04	89,6
VJ2 % H	2 152	0,240	1,30E-03	80,0
VJ7 % M	2 283	0,165	1,40E-05	95,0
VJ7 %	2 251	0,193	1,30E-05	83,7
VJ12 %	2 273	0,182	1,30E-06	91,7

* (Voir à la page 84)

En général, les masses volumiques des essais de perméabilité sont légèrement plus faibles que celles déterminées à l'optimum Proctor. Ainsi, un indice des vides plus élevé va donner une porosité plus grande. Cela s'explique principalement par le mode de compactage qui est légèrement différent de celui utilisé durant l'essai Proctor. Pour compacter un échantillon dans le perméamètre, on doit placer un faux fond qui, par la suite, est enlevé lorsque le moule est retourné de 180° pour être placé sur sa base. Le faux fond offre une rigidité inférieure au fond du moule Proctor traditionnel. De ce fait, une certaine partie de l'énergie de compactage est perdue et, par conséquent, cela entraîne une moins bonne mise en place de l'échantillon.

La conductivité hydraulique des matériaux diminue généralement d'un ordre de grandeur chaque fois que la teneur en fines augmente de 2 % vers 7 % et 12 %. Ainsi, pour les pierres granitiques, on a une conductivité hydraulique de $2,9E-4$ cm/s pour VC2 %, de $2,9E-5$ cm/s pour VC7 % et de $6,2E-6$ cm/s pour VC12 %. Cette tendance est tout aussi valable pour les graviers schisteux qui ont une conductivité hydraulique de $1,1E-4$ cm/s pour VJ2 %, de $1,8E-4$ cm/s pour VJ2 %M, de $1,4E-5$ cm/s pour VJ7 %M, de $1,3E-5$ cm/s pour VJ7 % et de $1,3E-6$ cm/s pour VJ12 %. Seul le matériau VJ2 % H ne semble pas suivre la tendance. Toutefois, étant donné son indice des vides particulièrement grand ($e = 0,240$), il n'est pas étonnant que sa conductivité hydraulique soit de $1,3E-3$ cm/s, un ordre de grandeur supérieur aux autres matériaux comportant 2 % de fines. La tendance est aussi suivie par les matériaux SM, la conductivité hydraulique de SM2 % 0 étant de $1,7E-6$ cm/s, celle de SM7 % de $4,9E-7$ cm/s et celle de SM12 % de $5,5E-8$ cm/s. Les matériaux SM2 % 1 et SM2 % 2 ont, par contre, une conductivité hydraulique très élevée par rapport aux autres matériaux SM, puisqu'elle est de $1,1E-3$ cm/s, ce qui en fait le matériau le plus perméable de tous les échantillons.

Courbes caractéristiques de rétention d'eau

Les courbes caractéristiques de rétention d'eau de tous les matériaux sont montrées aux figures 28 à 32. Les axes des graphiques sont, en abscisse, la succion matricielle en kPa : deux axes en ordonnée représentent le degré de saturation et la teneur en eau volumique. Dans tous les cas, la ligne pleine avec les points ronds représente la courbe de drainage, alors que le trait pointillé avec les triangles vides illustre la courbe d'imbibition. Cette dernière n'est présentée que pour les

matériaux VC12 %, VJ7 %M, VJ7 % et VJ12 %, puisque sur les autres matériaux l'effet d'hystérésis est très faible et donc difficile à mesurer avec le type d'appareils utilisé.

Si l'on examine la figure 3 au chapitre *Revue de littérature*, on voit que la courbe caractéristique de rétention d'eau peut être, en fait, schématisée par deux courbes : la courbe de drainage, qui débute à la teneur en eau saturée et se termine à la teneur en eau résiduelle, et la courbe d'imbibition qui va dans le sens inverse de la courbe de drainage et commence à la teneur en eau résiduelle pour se rendre à une teneur en eau correspondant à la teneur en eau saturée moins la teneur en air résiduelle. Ces deux courbes sont nommées courbe de drainage primaire et courbe d'imbibition primaire, puisqu'elles débutent à la saturation complète en passant par la teneur en eau résiduelle et se terminent à la teneur en air résiduelle. Toute courbe caractéristique de rétention d'eau en drainage mesurée à partir d'une teneur en eau inférieure à la teneur en eau saturée est considérée comme une courbe secondaire. De même, une courbe d'imbibition mesurée à partir d'une teneur en eau supérieure à la teneur en eau résiduelle est aussi jugée comme une courbe secondaire.

Lorsqu'un matériau a une teneur en eau comprise entre la teneur en eau saturée et la teneur en air résiduelle, des succions matricielles nulles peuvent être mesurées dans ces conditions de saturation partielle. C'est pourquoi toutes les courbes caractéristiques de rétention d'eau mesurées en laboratoire ont des points de départ à des saturations voisines de 80 % et avec des succions nulles. Puisque ces courbes caractéristiques de rétention d'eau débutent à des saturations inférieures à 100 %, elles sont donc considérées comme des courbes secondaires.

En général, un matériau ayant une saturation inférieure à 100 % qui se draine voit sa succion matricielle augmenter rapidement sans variation de la saturation pour rejoindre la courbe de drainage primaire et, ensuite, il se draine en suivant la courbe primaire. Il en est de même pour l'imbibition qui commence à une saturation supérieure à la saturation résiduelle, la succion matricielle chutant rapidement sans variation de saturation pour atteindre la courbe d'imbibition primaire.

Paramètres de l'équation de la courbe caractéristique

Le tableau 11 montre les paramètres de l'équation 6 de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Les paramètres a , m , n et θ_s ont été calculés par une régression utilisant la méthode des moindres carrés, à l'aide du logiciel mathématique AXUM, pour les courbes de drainage et d'imbibition. Ici, θ_s n'est pas nécessairement la teneur en eau saturée du matériau ; il représente plutôt la teneur en eau qu'il a été possible d'obtenir grâce à la phase de saturation initiale. Les courbes d'imbibition ont été reliées à cette teneur en eau pour une succion matricielle nulle. Durant la phase de saturation initiale, en général, très peu d'augmentation de la teneur en eau a été enregistrée. Le volume de l'échantillon et la faible charge hydraulique appliquée ont fait en sorte que la teneur en eau du début de la phase de drainage est très voisine de la teneur en eau optimale.

Dans le tableau 11, on retrouve aussi les paramètres ψ_e et θ_r^* , qui sont la pression d'entrée d'air et la teneur en eau résiduelle à 100 kPa de la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée pour chaque matériau. La pression d'entrée d'air est déterminée, pour la courbe de drainage, de façon graphique en utilisant la méthode discutée à la section *Courbes caractéristiques de rétention d'eau* et reproduite à la figure 3. Par contre, puisque les courbes caractéristiques de rétention d'eau n'ont pu être mesurées sur une plage de succion suffisamment grande, la teneur en eau résiduelle a été estimée selon la teneur en eau à une succion matricielle de 100 kPa et est nommée, comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre *Description des essais*, la teneur en eau résiduelle à 100 kPa, θ_r^* .

Le paramètre a contrôle l'élévation de la pression d'entrée d'air : plus il est grand, plus la pression d'entrée d'air est forte. Le paramètre n influence la pente de la courbe caractéristique de rétention : il est en fait une indication de la distribution du volume des pores. Quant au paramètre m , lequel influence la teneur en eau résiduelle, plus il est grand, plus la teneur en eau résiduelle est faible. Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation du rôle que jouent ces paramètres, puisqu'ils ont tous une influence les uns sur les autres. Pour une valeur de a constante avec deux valeurs de n différentes, on obtient une pression d'entrée d'air supérieure pour la courbe ayant la valeur de n la plus élevée.

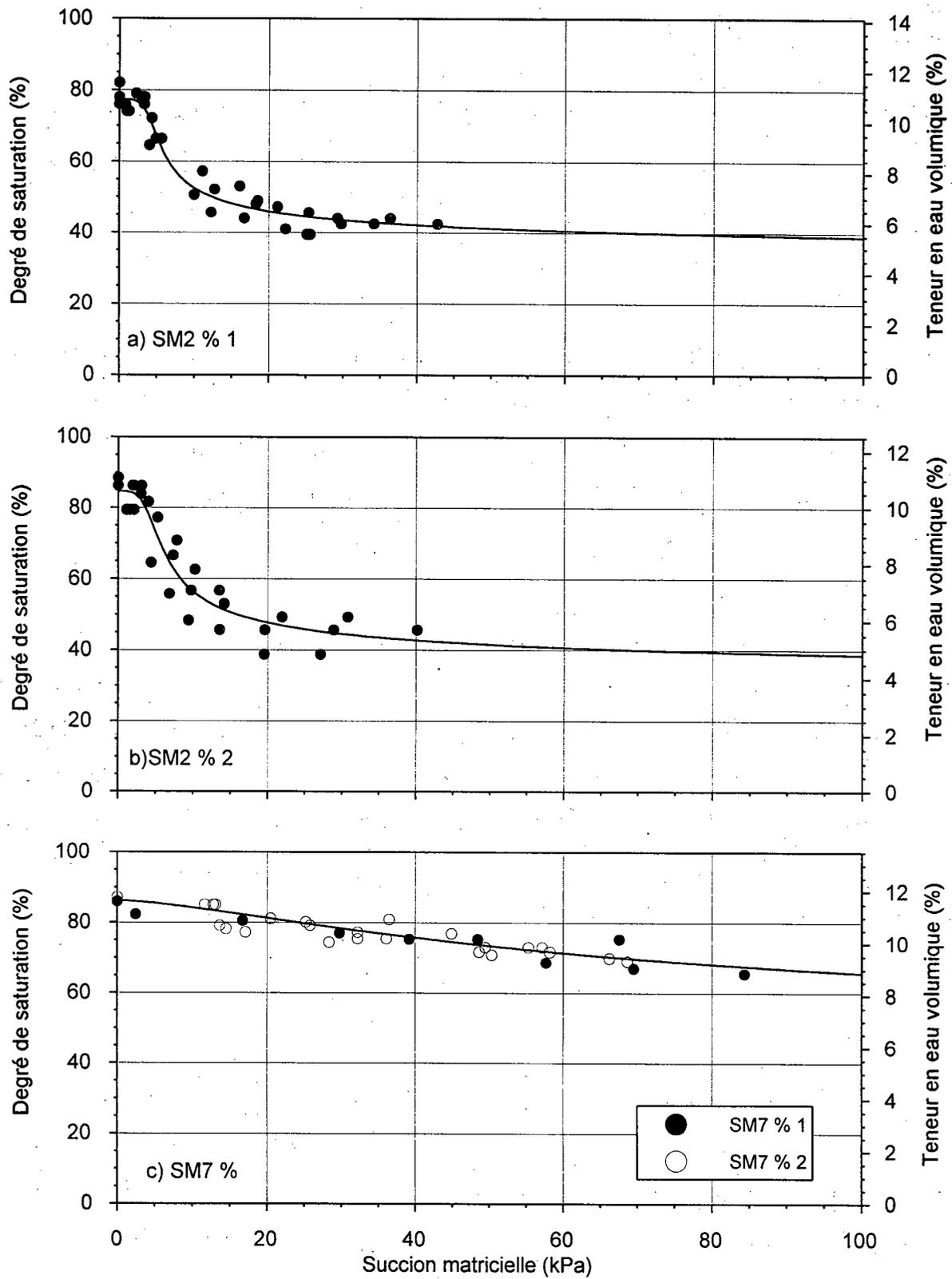


Figure 28 Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux calcaires

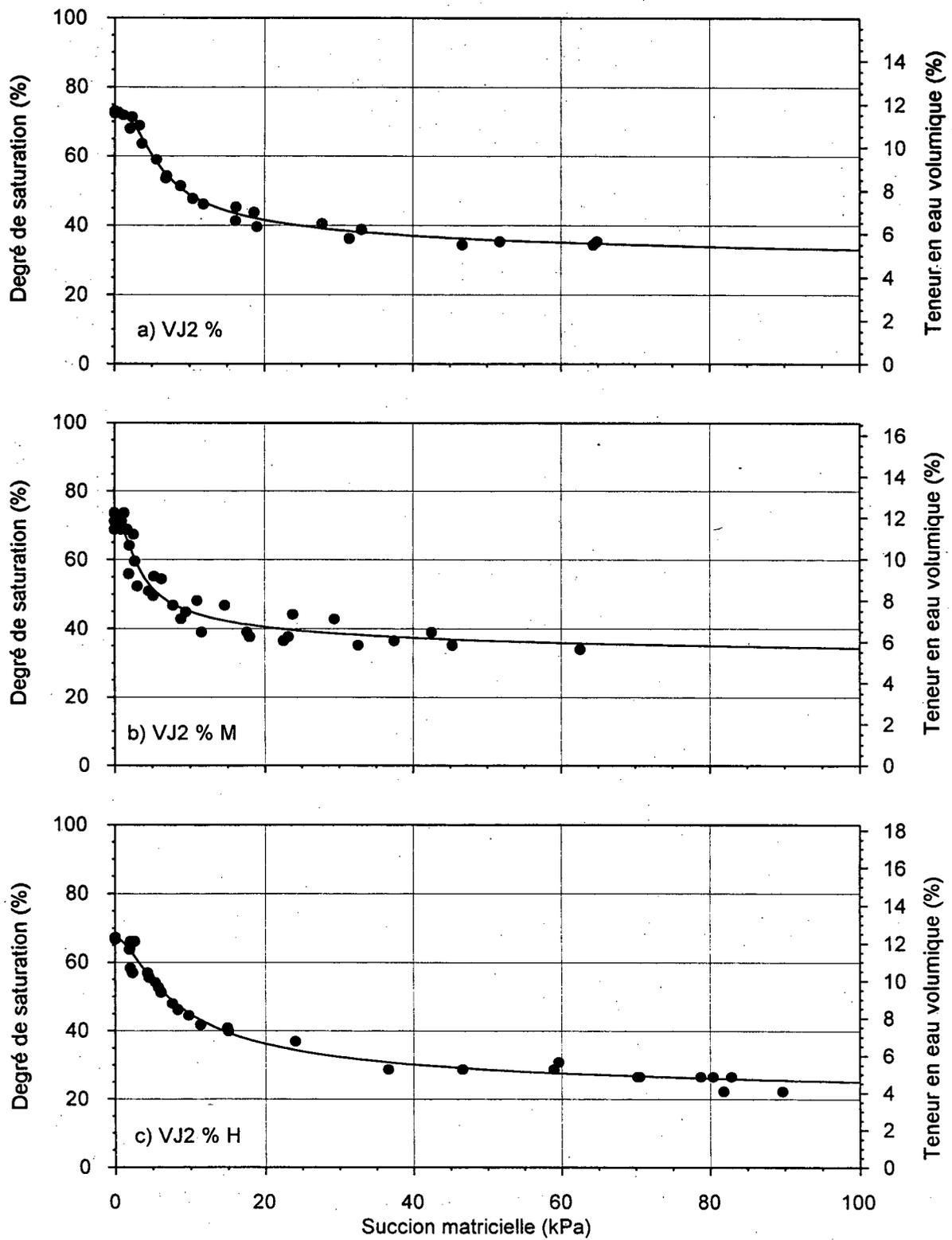


Figure 29 Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux schisteux contenant 2 % de fines

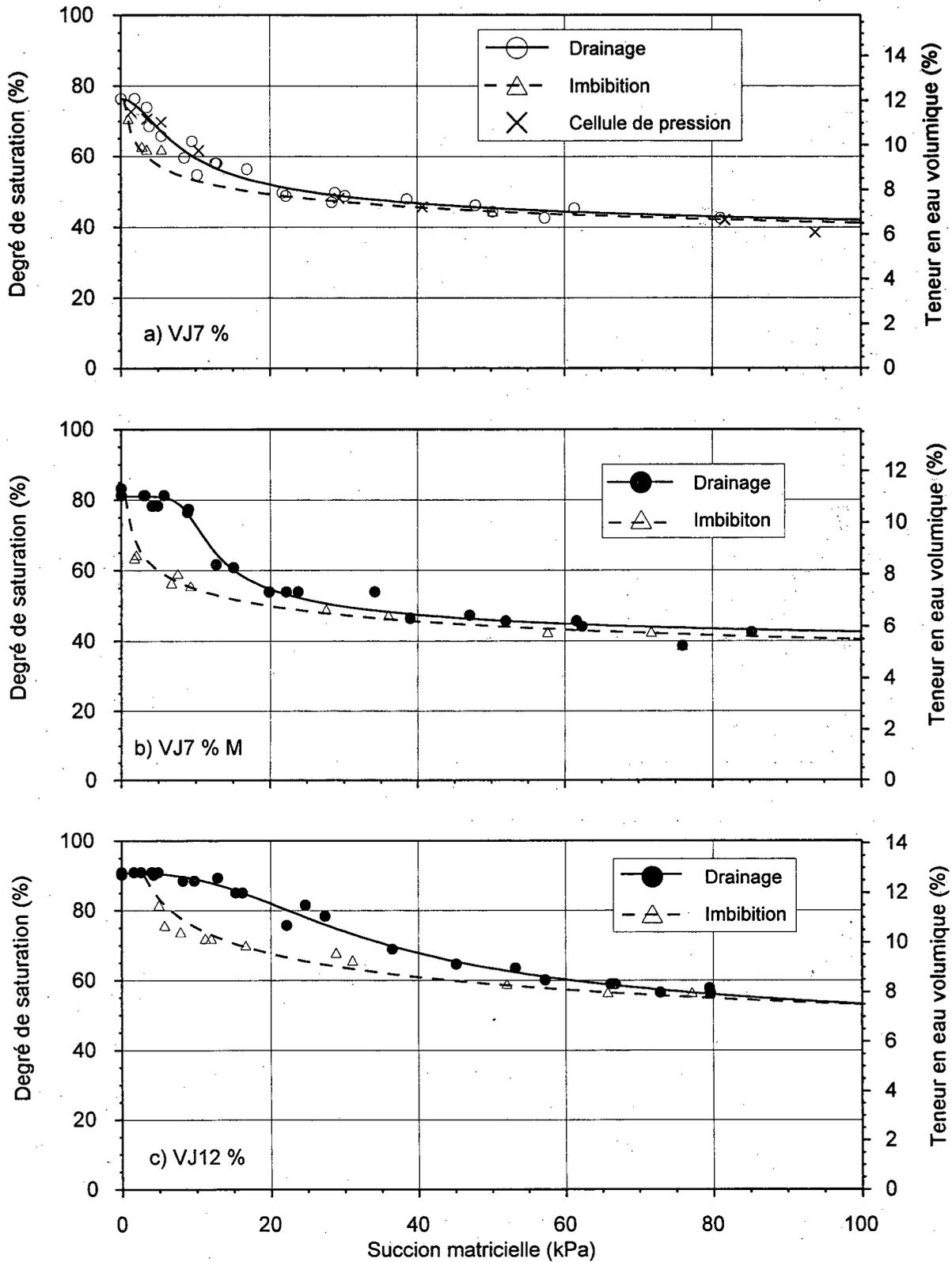


Figure 30 Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux schisteux contenant 7 et 12 % de fines

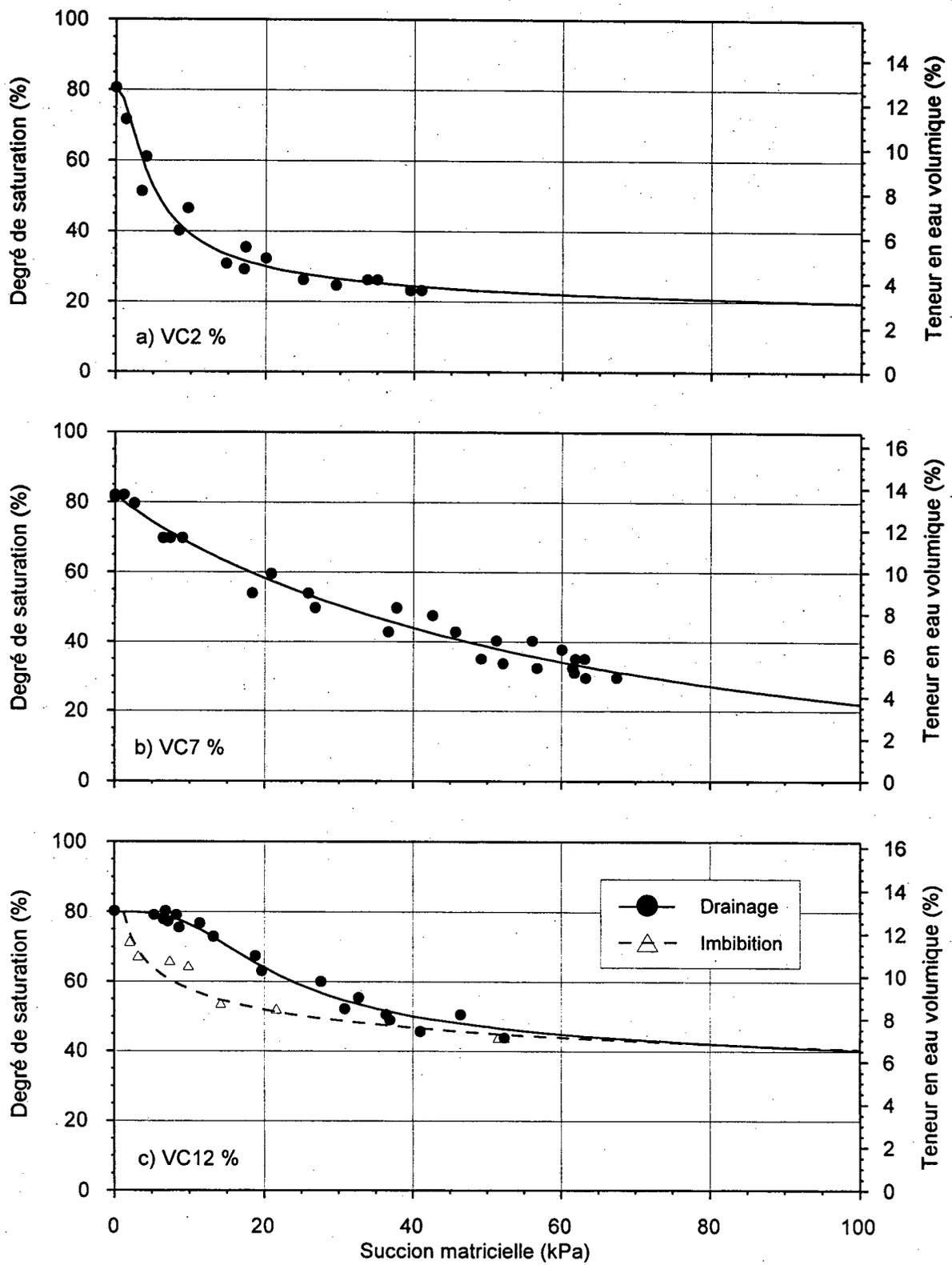


Figure 31 Courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux granitiques

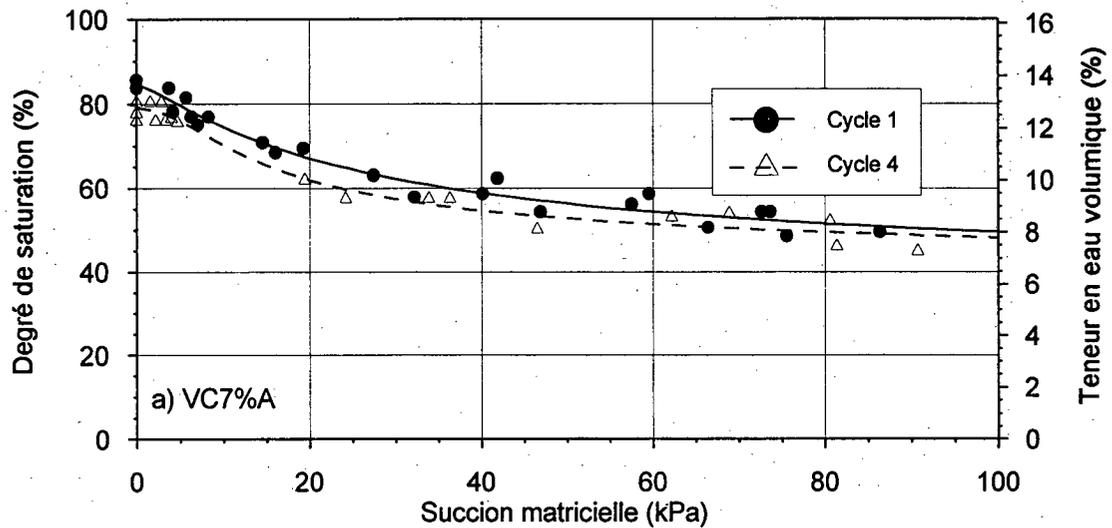


Figure 32 Courbes caractéristiques de rétention d'eau du matériau granitique avec ajout de fines argileuses

Tableau 11
Paramètres de l'équation de la courbe caractéristique de chaque matériau

Matériaux	a (pression d'entrée d'air)	m (teneur en eau résiduelle)	n (pente de la courbe)	θ_s (teneur en eau près de $S_r = 1$)	Pression d'entrée d'air ψ_e	Teneur en eau résiduelle à 100 kPa θ^*_r
SM2 % 1 drainage	3,96	0,24	5,43	10,9	3,3	5,5
SM2 % 2 drainage	4,09	0,3	4,27	10,58	3,2	4,8
SM7 % 1, 2 drainage	30	0,35	1,5	11,64	16,4	8,9
VC2 % drainage	2,65	0,73	1,89	12,75	1,4	3,1
VC7 % drainage	202,22	8,09	0,91	13,72	3	3,7
VC7 % A 1 ^{er} cycle	10,16	0,47	1,31	13,67	7	8
VC7 % A 4 ^e cycle	7,72	0,3	2,03	12,78		
VC12 % drainage	13,5	0,37	3,2	13	8	6,6
VC12 % mouillage	4,41	0,48	1,4	13		
VJ2 % drainage	3,48	0,35	2,8	11,58	2,5	5,3
VJ2 % M drainage	1,68	0,33	2,33	12	1,2	5,7
VJ2 % H drainage	3,96	0,58	1,7	12,32	2	4,6
VJ7 % M drainage	8,9	0,23	6,86	11,03	7,7	5,8
VJ7 % M mouillage	0,75	0,26	3,29	12,31		
VJ7 % drainage	4,06	0,32	2,03	12,1	2,6	6,6
VJ7 % mouillage	1,66	0,36	1,42	12,1		
VJ12 % drainage	19,64	0,36	2,68	12,79	13,2	7,5
VJ12 % mouillage	6,06	0,52	0,89	12,79		

(Voir à la page 84)

Évolution de la teneur en eau en fonction de la succion

En examinant les figures 28 à 32, on voit que la forme des courbes caractéristiques de rétention d'eau évolue en fonction de la teneur en fines. Les courbes se modifient aussi selon le type de matériau.

Pour une même source, lorsque la teneur en fines augmente, on constate toujours une hausse de la pression d'entrée d'air et de la teneur en eau résiduelle à 100 kPa. Donc, un matériau plus fin a une remontée capillaire plus grande et une faible capacité à se départir de l'eau interstitielle. Au tableau 11, on peut observer, pour le gravier schisteux VJ2 % M, que ψ_e est égale à 1,2 kPa et que θ^* , est égale à 5,7 %, alors que pour le gravier VJ7 % la valeur ψ_e est de 2,6 kPa et la valeur θ^* , de 6,6 %. Pour le gravier VJ12 %, ψ_e est égale à 13,2 kPa et θ^* , à 7,5 %. À l'examen de ces paramètres, on peut également dire qu'en règle générale les matériaux granitiques sont les plus drainants, viennent ensuite les matériaux schisteux et, finalement, les matériaux calcaires qui sont les moins drainants avec une pression d'entrée d'air de 16 kPa et une teneur en eau résiduelle à 100 kPa de 8,9 % pour le matériau SM7 %.

Dans les sections a) et b) de la figure 28, pour les deux matériaux de pierres calcaires, c'est-à-dire SM2 %, la teneur en eau chute rapidement sans engendrer une augmentation importante de succion matricielle, soit environ 20 kPa pour des teneurs en eau de 6,5 et 6 %. Par contre, dans la section c) on observe pour le matériau SM7 % que la teneur en eau ne varie pratiquement pas et que la succion matricielle augmente à une grande vitesse, soit environ 80 kPa pour une teneur en eau de 9 %. Comme nous l'avons mentionné à la section *Échantillons SM*, pour ce matériau, la succion durant le premier essai s'est accrue très rapidement. Par ailleurs, très peu de données ont été recueillies pour déterminer la courbe caractéristique de rétention d'eau. Un second essai a donc été mis au programme (point rond vide à la section c) de la figure 28) pour compléter les données du premier essai.

Dans la section a) de la figure 29, le gravier schisteux (VJ2 %) se draine rapidement sans occasionner de variations notables de la succion matricielle : en effet, à une teneur en eau d'environ 6,5 %, la succion est de 20 kPa. Cependant, selon la section b) de la figure 30, le

matériau VJ7 % affiche une succion de 40 kPa pour une teneur en eau de 7 %. Dans la section c) de la figure 30, le matériau VJ12 % présente la même succion à une teneur en eau de 9,5 %. À 100 kPa, VJ12 % a donc une teneur en eau de 7,5 %.

Pour la courbe caractéristique de rétention d'eau de la pierre granitique (VC2 %), qui est montrée à la section a) de la figure 31, la teneur en eau chute rapidement sans occasionner de grandes variations de la succion matricielle : en effet, à une teneur en eau d'environ 4,5 %, la succion est de 20 kPa. Dans le cas du matériau VC7 %, section b), la succion à une teneur en eau de 6,5 % se chiffre à 40 kPa, alors que, pour le matériau VC12 %, section c), elle tend vers une valeur de 100 kPa.

Pour voir l'influence des particules argileuses sur la courbe caractéristique de rétention d'eau, une portion d'argile de la mer de Champlain a été ajoutée au matériau granitique (VC7 %). Ainsi, 45 % des fines de ce matériau ont été remplacées par de l'argile. Selon la figure 32, la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée pour ce matériau (VC7 % A, A pour argile) présente une évolution de la teneur en eau en fonction de la succion très différente de celle obtenue pour VC7 %. En effet, à une succion matricielle de 20 kPa, la teneur en eau atteint environ 11 %, alors qu'à une succion matricielle de 100 kPa elle est de 8 %.

Le même matériau granitique avec ajout d'argile (VC7%A) a été soumis à quatre cycles de drainage-imbibition pour voir l'évolution de la forme de la courbe caractéristique de rétention d'eau dans le temps. Le premier cycle est montré par une ligne pleine comme pour tous les autres matériaux, alors que le quatrième est représenté par une ligne pointillée avec des points en forme de triangle vide. La courbe du quatrième cycle est légèrement décalée vers le bas par rapport au premier. Le déplacement de la courbe vers des teneurs en eau légèrement inférieures est probablement dû à une réorganisation des fines à l'intérieur des pores. En effet, lorsque des succions élevées sont atteintes, il est probable que les particules fines soient comprimées sur les parois des particules plus grandes et qu'ainsi la distribution du volume des pores soit différente après le premier cycle de drainage-imbibition.

Effet de la granulométrie sur la courbe caractéristique

Pour mieux connaître l'effet de la granulométrie sur la forme de la courbe caractéristique de rétention d'eau, trois autres granulométries ont été ajoutées au programme d'essais. Les matériaux de gravier schisteux (VJ2 % M et VJ2 % H) combinés à VJ2 % permettent une observation de l'effet de la granulométrie compte tenu de trois granulométries différentes ayant une même teneur en fines (2 %). On peut aussi faire la même comparaison avec les matériaux VJ7 % M et VJ7 %. De plus, la comparaison des courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux VJ2 % H, VJ7 % et VJ12 % permet de voir l'influence des courbes granulométriques semblables dans leurs parties grossières (courbes superposées jusqu'aux matériaux passant 2,5 mm avec trois teneurs en fines différentes, c'est-à-dire 2, 7 et 12 %).

Ainsi, en comparant les teneurs en eau résiduelle à 100 kPa des matériaux VJ2 %, VJ2 % M et VJ2 % H (tableau 11), on voit qu'elles sont semblables, soit autour de 5 % (de 4,6 à 5,7) et que les pressions d'entrée d'air se révèlent plutôt faibles, entre 1,2 et 2,5 kPa. Pour atteindre une succion de 20 kPa, selon les sections a), b) et c) de la figure 29, les trois matériaux doivent avoir une teneur en eau de 6,5 %. On peut donc dire qu'ils se comportent de façon similaire même si leurs granulométries sont différentes. Toutefois, pour les matériaux VJ7 % M et VJ7 %, d'après les sections a) et b) de la figure 30, les teneurs en eau résiduelle à 100 kPa sont respectivement de 5,8 % et de 6,6 %, alors que leurs pressions d'entrée d'air respectives indiquent 7,7 et 2,6 kPa. Il est possible que le plus grand étalement de la courbe granulométrique de VJ7 % M, responsable de l'excellent compactage (indice des vides de 0,158 selon le tableau 9), soit aussi à l'origine du développement de la grande pression d'entrée d'air de ce matériau.

Si l'on compare les teneurs en eau résiduelle à 100 kPa des matériaux VJ2 % H, VJ7 % M et VJ12 % (tableau 11), on remarque qu'elles sont très éloignées, soit 4,6 % pour VJ2 % H ; 5,8 % pour VJ7 % M ; et, 7,5 % pour VJ12 %. Les pressions d'entrée d'air sont aussi variables, puisqu'elles atteignent 2 kPa pour VJ2 % H, 7,7 kPa pour VJ7 % M et 13,2 kPa pour VJ12 %. Encore dans ce cas, la variation dans l'évolution de la forme de la courbe caractéristique de rétention d'eau est causée par la teneur en fines.

Effet d'hystérésis sur la courbe caractéristique de la phase d'imbibition

Des effets d'hystérésis dans la phase d'imbibition par rapport à la phase de drainage ont été enregistrés pour les matériaux schisteux (VJ7 %, VJ7 % M, VJ12 %) et granitique (VC12 %) et sont montrés dans les trois sections de la figure 30 et dans la section c) de la figure 31.

Pour le matériau VJ7 %, l'effet d'hystérésis se traduit par une perte de succion d'environ 6 kPa pour une teneur en eau de 10 % dans la phase d'imbibition par rapport à la phase de drainage. Le matériau VJ7 % M, pour sa part, assume une perte de 11 kPa à une teneur en eau de 8 %, alors que le matériau VJ12 % montre une perte de succion de 20 kPa pour une teneur en eau de 10 %. Enfin, dans le cas du matériau VC12 %, l'effet d'hystérésis s'exprime par une perte de succion matricielle d'environ 16 kPa pour une même teneur en eau de 10 %.

L'effet d'hystérésis a toujours été mesuré pour des matériaux ayant des pressions d'entrée d'air supérieures à 2,6 kPa. Par contre, pour les matériaux VC7 %, SM2 % 1 et SM2 % 2, malgré des pressions d'entrée d'air supérieures à 3 kPa, l'effet d'hystérésis mesuré a été inférieur à 2 kPa, c'est pourquoi il n'a pas été montré dans les sections a) et b) de la figure 28. De plus, il est fort probable que le matériau SM7 % ait un potentiel élevé d'effet d'hystérésis puisque sa pression d'entrée d'air est de 16,4 kPa ; cependant, nous n'avons pu le mesurer avec l'appareillage utilisé dans la présente étude. En effet, la conductivité hydraulique est tellement faible à la teneur en eau de 9 % que nous n'avons pu procéder à la phase d'imbibition avec une charge hydraulique nulle, comme cela était proposé au chapitre *Description des essais*. Par ailleurs, même avec un gradient hydraulique de 3, aucune entrée d'eau n'a été enregistrée dans l'échantillon dans le temps escompté. L'échantillon a donc été démonté sans avoir été remouillé. Étant donné la rigidité du matériau causée par le drainage, l'utilisation d'une masse et d'un pic pour démonter l'échantillon a entraîné la destruction d'une sonde TDR et de deux tensiomètres. Par la suite, la décision de ne pas faire l'essai sur le matériau SM12 % a été prise et un deuxième échantillon de pierre calcaire (SM7 %) a été reconstitué à partir du matériau prévu pour l'échantillon du matériau SM12 %.

Mesure de la courbe caractéristique à la plaque de pression

Pour valider la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau dans le moule de 305 mm en utilisant des sondes TDR et des tensiomètres, un essai dans la cellule de pression a été fait sur le matériau VJ7 %. Les résultats sont présentés sous la forme d'une croix dans la section a) de la figure 30.

On voit que les points mesurés à l'aide de la cellule de pression sont tout à fait dans le nuage de points indiqué dans le moule de 305 mm. Rappelons que la mesure de la teneur en eau dans la cellule de pression est faite par une méthode gravimétrique par opposition à la méthode TDR dans le moule de 305 mm. Aussi, la mesure de la succion matricielle est prise de façon instantanée par les tensiomètres dans le moule de 305 mm et elle est égale à la pression négative dans l'eau puisque la pression d'air est atmosphérique. La mesure de la succion matricielle dans la cellule de pression a lieu lorsque l'eau a fini d'être évacuée de l'échantillon et, à ce moment, elle correspond à la pression d'air appliquée dans la cellule. Donc, à l'aide de deux méthodes complètement opposées, on a été en mesure de déterminer la même courbe caractéristique de rétention d'eau.

Courbes de conductivité hydraulique partiellement saturée

Le calcul des courbes de conductivité hydraulique à l'aide du modèle retenu au chapitre *Revue de littérature* s'est fait à partir de la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée dans le moule de 305 mm et de la conductivité hydraulique mesurée dans le moule de 152,4 mm.

Prolongement des courbes caractéristiques mesurées

La mesure de la conductivité hydraulique dans le moule de 152,4 mm a été faite à une valeur de saturation plus élevée que la saturation de départ de la courbe caractéristique pour la plupart des matériaux. Puisque les valeurs de saturation des essais de perméabilité tournent autour de 90 % et que, selon Rogowski (1972), la pression d'entrée d'air peut être mesurée à une teneur en eau égale à 0,9 fois la porosité, toutes les courbes caractéristiques de rétention d'eau ont donc été

prolongées jusqu'à une valeur de saturation de 90 %, comme le montrent les résultats obtenus sur la pierre granitique (VC12 %) et présentés à la figure 33.

Le prolongement exécuté a pour but de simuler la courbe caractéristique de rétention d'eau sur une plus grande plage de saturation. Il a alors été effectué en tenant compte de la pente de la partie quasi linéaire (à grande saturation) de la courbe caractéristique mesurée. Ainsi, la tendance de la partie simulée suit celle des points mesurés. On peut croire que cette façon de procéder est juste lorsqu'on observe le comportement d'un matériau qui a une teneur en eau partiellement saturée avec une succion matricielle nulle et qui commence à se drainer. La succion matricielle augmente rapidement sans entraîner de grandes variations de la saturation pour atteindre la courbe de drainage primaire décrite à la section *Courbes caractéristiques de rétention d'eau* et, ensuite, le matériau se draine en suivant la courbe primaire. Donc, avec les matériaux examinés dans la présente étude, on a mesuré une courbe caractéristique de drainage secondaire à partir de laquelle on déduit la courbe primaire.

Compte tenu que la courbe caractéristique prolongée suit la pente de la partie à degré de saturation élevé des courbes mesurées, les pressions d'entrée d'air des nouvelles courbes sont souvent inférieures à celles mesurées en laboratoire.

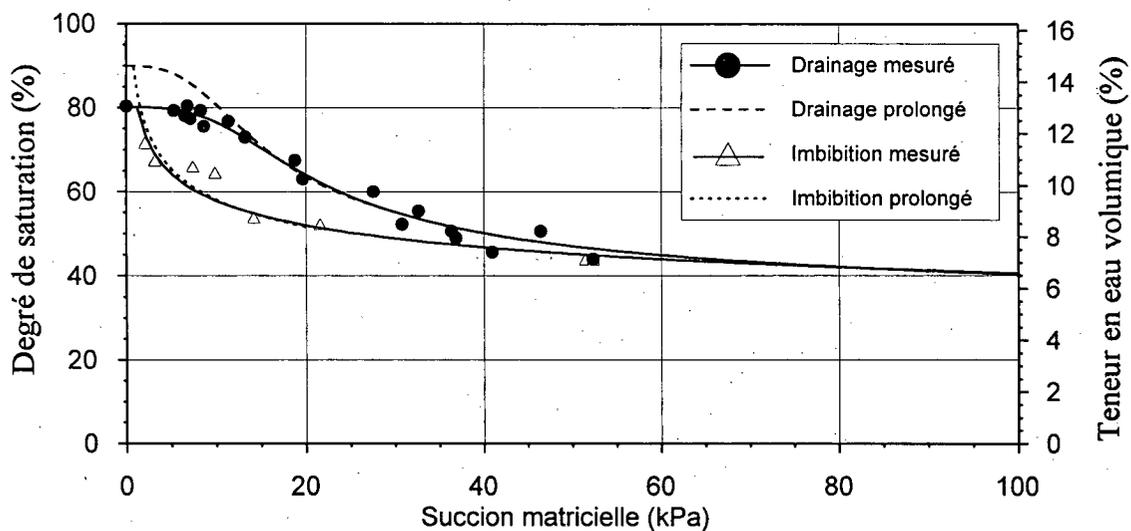


Figure 33 Exemple de prolongement à une valeur de saturation de 90 % pour une courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée en laboratoire (VC12 %)

Un même prolongement a aussi été effectué sur les courbes caractéristiques de rétention d'eau en phase d'imbibition dans le cas des matériaux VC12 %, VJ7 % M, VJ7 % et VJ12 %. Puisque le calcul de la courbe de conductivité hydraulique nécessite une mesure de conductivité hydraulique à la teneur en eau initiale de la courbe caractéristique, toutes ces courbes ont été prolongées à la valeur du degré de saturation de 90 %.

Courbes de conductivité hydraulique

Les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la saturation sont montrées aux figures 34 à 36. Selon la figure 34, la conductivité hydraulique du matériau calcaire (SM2 %) est de $1E-3$ cm/s pour une saturation de 90 % et passe à une conductivité hydraulique de $1E-8$ cm/s à une saturation près de 40 %. La situation est bien différente pour le matériau SM7 % : la conductivité hydraulique est de $5E-7$ cm/s à une saturation de 90 %, et elle augmente à $3E-11$ cm/s pour une saturation relativement élevée de 67 %.

Des résultats similaires pour les matériaux schisteux (VJ) sont présentés à la figure 35. Les coefficients de conductivité hydraulique baissent de $1E-3$ à $1E-6$ cm/s pour une saturation de 90 %, alors que le pourcentage de fines varie de 2 % à 12 %. Pour les matériaux VJ2 % et VJ2 % M, la conductivité hydraulique chute à une valeur de près de $1E-10$ cm/s pour une saturation voisine de 35 %, tandis que le matériau VJ2 % H voit sa conductivité hydraulique baisser à une valeur de $1E-8$ cm/s pour une saturation de 27 %. La conductivité hydraulique des matériaux VJ7 % et VJ7 % M atteint des valeurs respectives de $1E-10$ et $1E-9$ cm/s à une saturation de 43 %, alors que pour le matériau VJ12 % elle tombe à $2E-10$ cm/s pour une saturation voisine de 54 %.

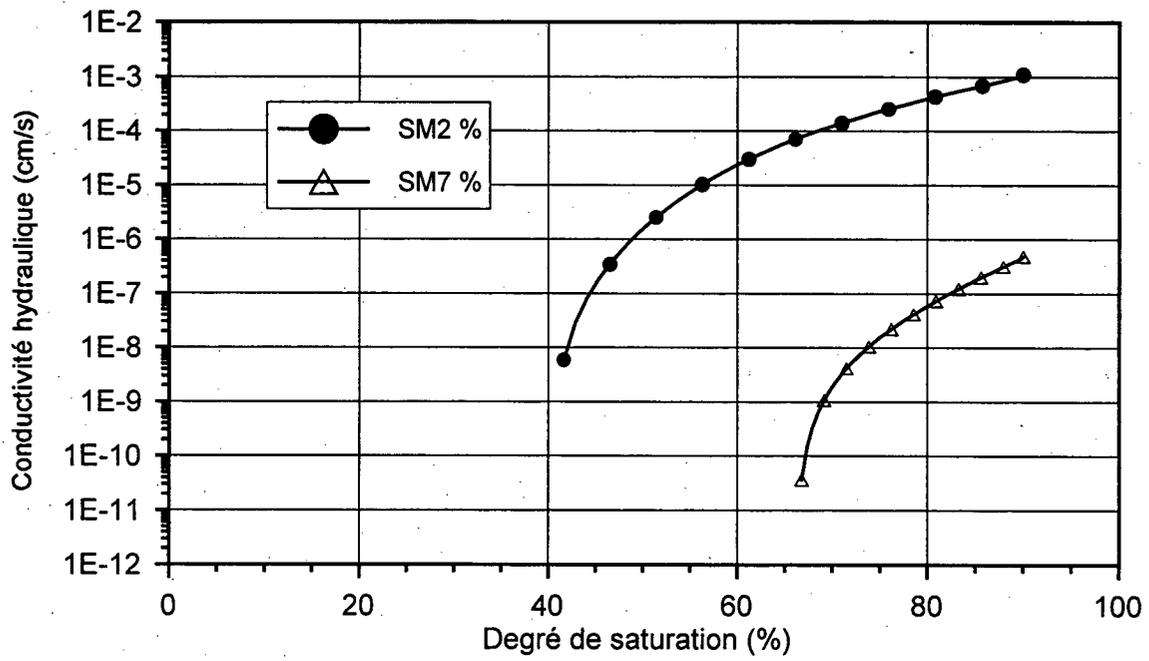


Figure 34 Conductivité hydraulique des matériaux calcaires

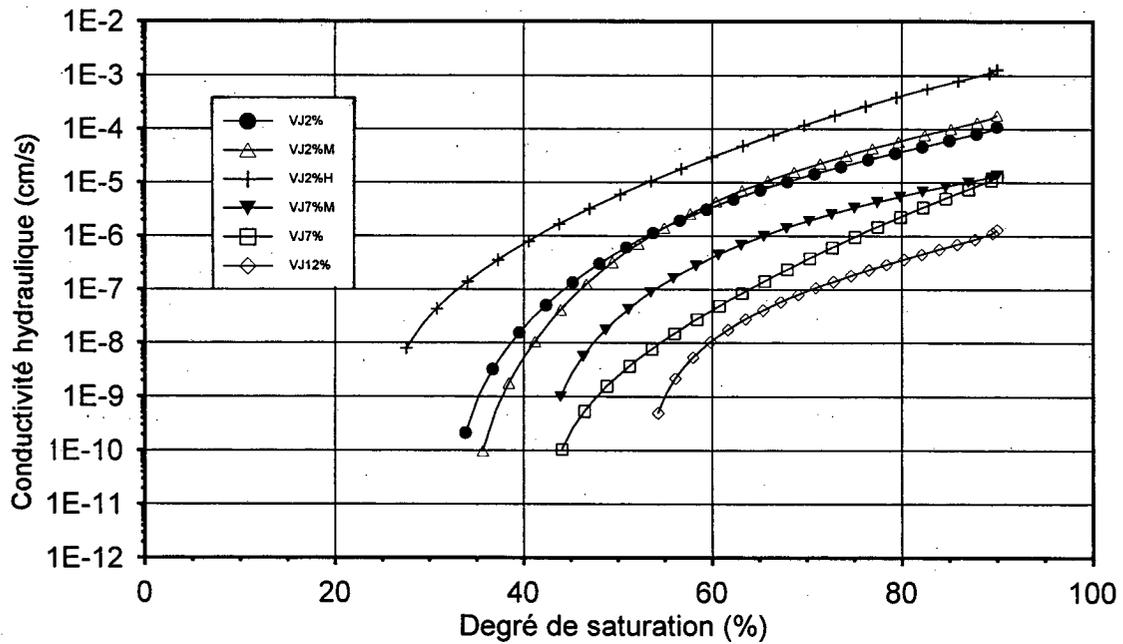


Figure 35 Conductivité hydraulique des matériaux schisteux

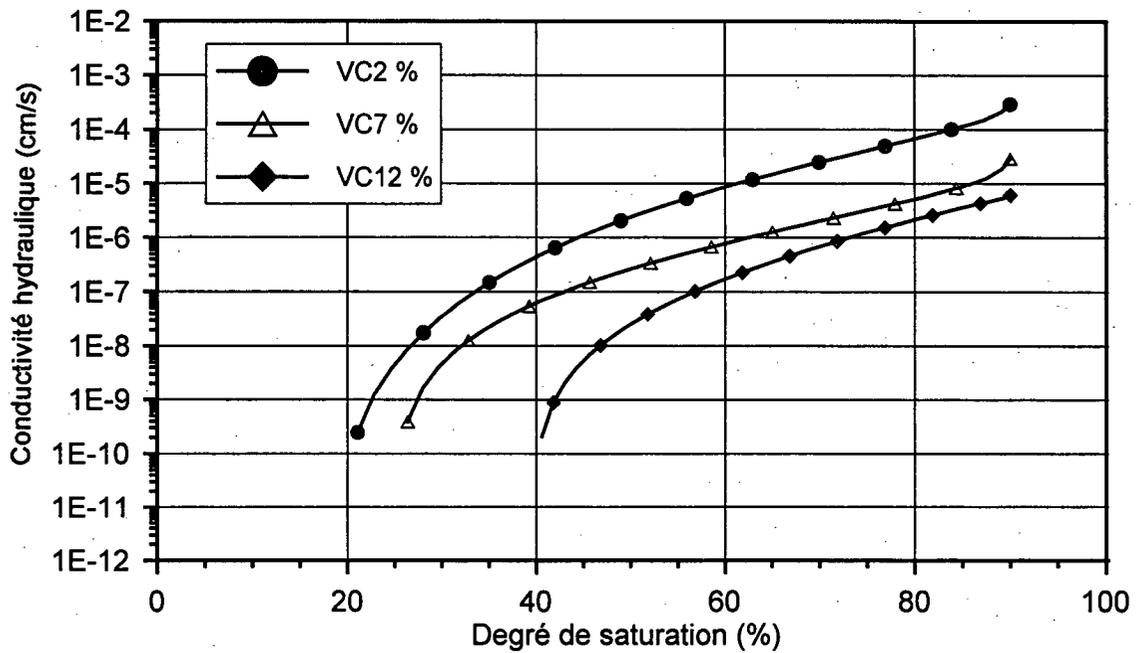


Figure 36 Conductivité hydraulique des matériaux granitiques

La figure 36, illustre les résultats du calcul des courbes de conductivité hydraulique des matériaux granitiques. La conductivité hydraulique de VC2 %, VC7 % et VC12 % à un degré de saturation de 90 % est respectivement de $3E-4$, $3E-5$ et $6E-6$ cm/s. Elle chute à près de $1E-10$ cm/s pour des degrés de saturation de 21 % pour VC2 %, de 27 % pour VC7 % et de 41 % pour VC12 %.

Effet d'hystérésis sur la conductivité hydraulique

Dans le cas des matériaux de pierre granitique (VC12 %) et de gravier schisteux (VJ7 %, VJ7 % M et VJ12 %), pour lesquels un effet d'hystérésis sur la courbe caractéristique de rétention d'eau a été mesuré, on doit s'attendre à avoir un effet d'hystérésis similaire sur les courbes de conductivité hydraulique.

Bien que l'effet appréhendé soit tout à fait visible sur les courbes mettant en relation la conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle, très peu d'hystérésis ou aucune hystérésis n'a été mesurée sur la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau ou de la saturation lorsque le sol est un matériau grossier (Nielsen *et al.* 1972).

Les figures 37 à 40 montrent les courbes de conductivité hydraulique en fait de drainage et d'imbibition des mêmes matériaux en fonction de la succion matricielle. On y voit bien l'effet d'hystérésis qui a la même forme que pour les courbes caractéristiques de rétention d'eau. Puisqu'à une succion donnée la teneur en eau est plus grande dans le cas du drainage que dans celui de l'imbibition, la conductivité hydraulique sera plus élevée durant la première phase que durant la seconde. Pour le gravier schisteux (VJ7 %) ayant une conductivité hydraulique de $6E-6$ cm/s (figure 37), la succion matricielle en matière de drainage est de 2 kPa, alors qu'à la même conductivité hydraulique en matière d'imbibition la succion matricielle est d'environ 0,25 kPa. Quant au matériau VJ7 % M ayant une conductivité hydraulique de $6E-6$ cm/s (figure 38), il affiche une succion en fait de drainage de 7,5 kPa et dans le cas du mouillage, de 0,5 kPa. Pour le matériau VJ12 % ayant une conductivité hydraulique de $7E-7$ cm/s (figure 39), la succion matricielle en matière de drainage est de 16 kPa, alors qu'elle est de 4 kPa pour l'imbibition. Enfin, pour le matériau VC12 %, à une conductivité hydraulique de $3E-6$ cm/s (figure 40), on a une succion matricielle de 8,5 kPa en fait de drainage comparativement à 1,7 kPa en matière d'imbibition.

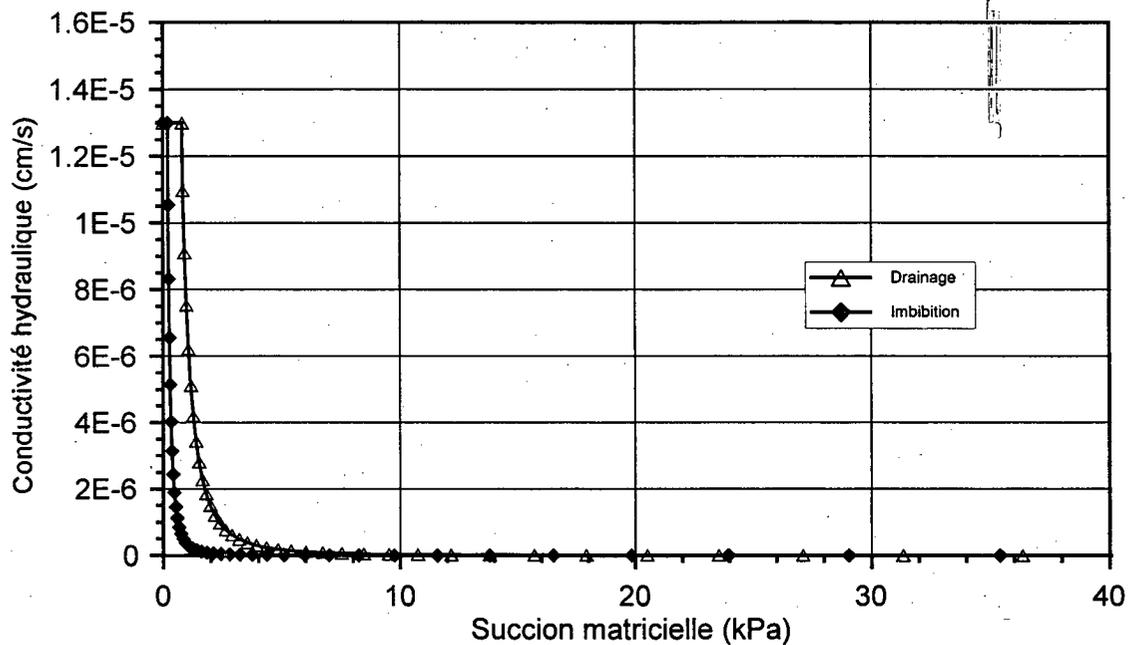


Figure 37 Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ7 %

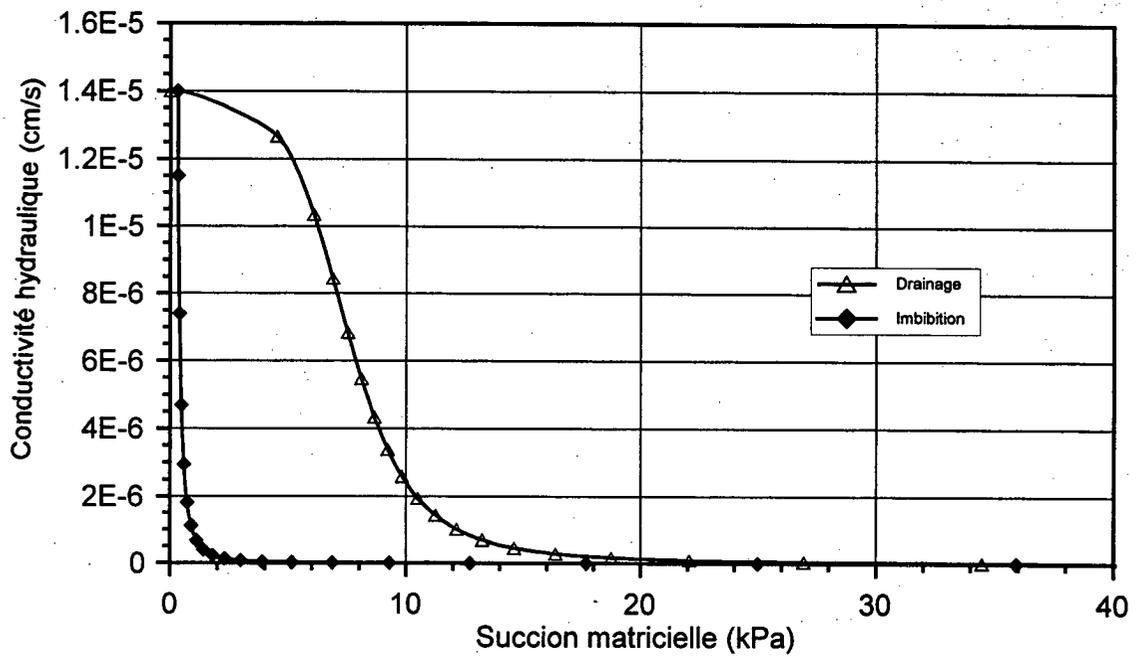


Figure 38 Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ7 % M

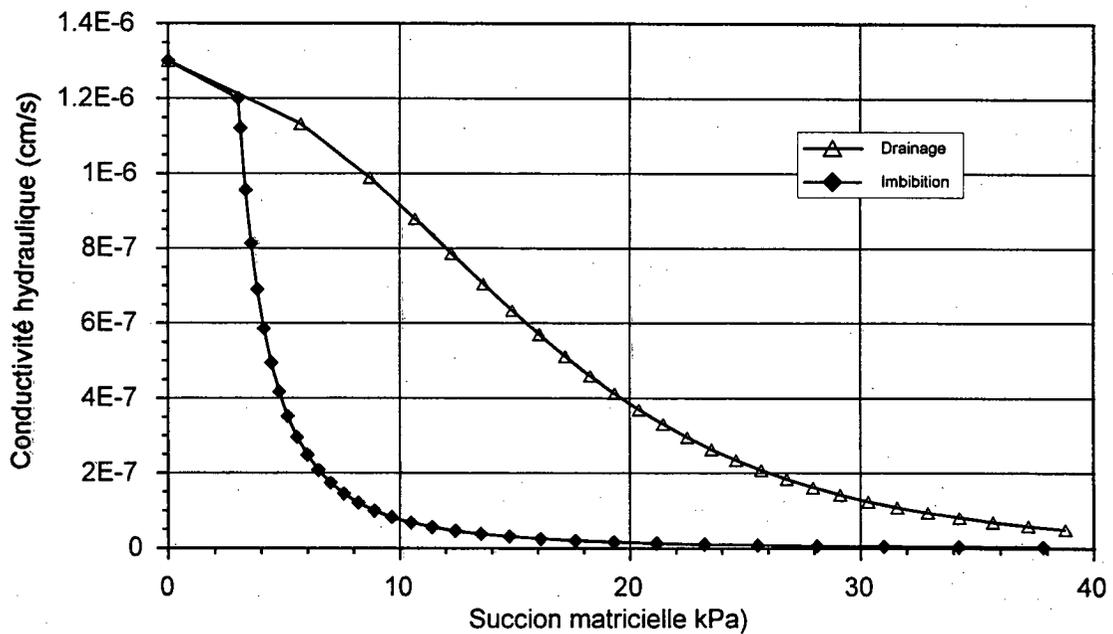


Figure 39 Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VJ12 %

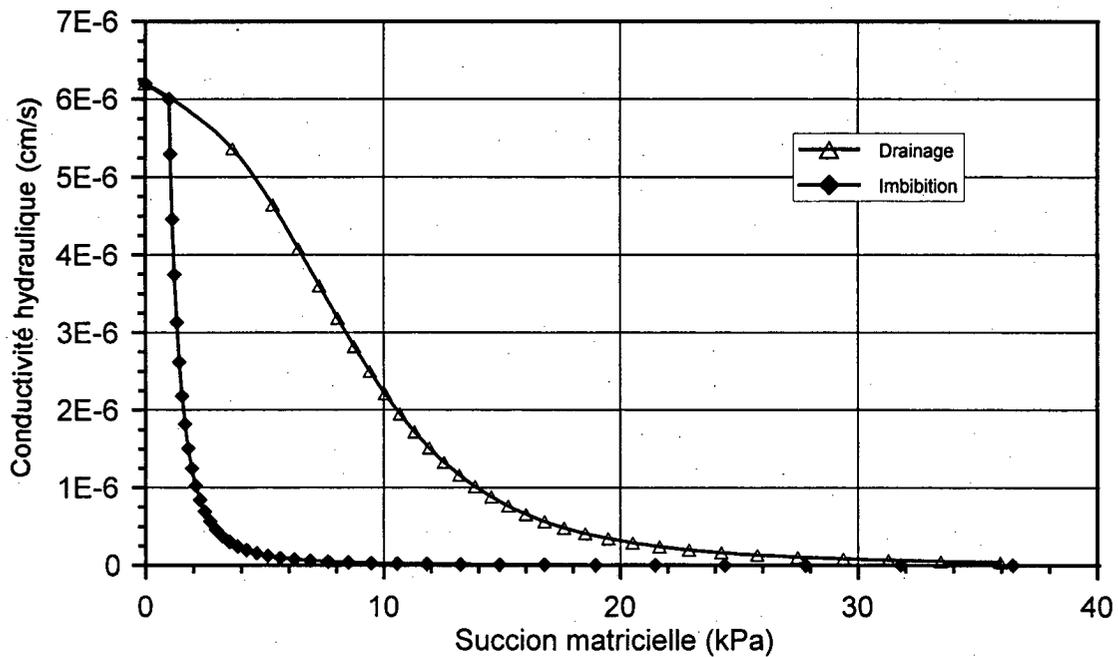


Figure 40 Effet d'hystérésis sur les courbes de conductivité hydraulique en fonction de la succion dans le cas du matériau VC12 %

Cet ensemble de résultats montre bien que la conductivité hydraulique s'accroît avec la diminution de la succion matricielle et que les approches dans la détermination de la courbe caractéristique de rétention d'eau conduisent à des résultats similaires lorsque le degré de saturation tend vers une valeur de 80 %.

Simulation du drainage d'une chaussée

Les simulations de drainage d'une fondation de chaussée ont été effectuées à l'aide du logiciel SEEP/W. Elles ont toutes été faites avec la même section type de chaussée qui est montrée au chapitre *Description des essais* (figure 24). Rappelons que le volume de cette fondation selon les dimensions données est de $1,667 \text{ m}^2 \cdot \text{m}_{\text{linéaire}}$.

Étude paramétrique

Les résultats de l'étude paramétrique décrite au chapitre *Description des essais*, concernant le drainage d'une fondation de chaussée au dégel constituée de matériaux fictifs pour lesquels on a

fait varier la courbe caractéristique de rétention d'eau ainsi que la conductivité hydraulique saturée, sont montrés aux tableaux 12 à 14. Les résultats sont tirés des figures de l'annexe C montrant les variations du degré de saturation, de la succion matricielle et de la conductivité hydraulique dans la fondation étudiées par le logiciel SEEP/W et présentées au chapitre *Description des essais*.

La figure 41 donne un exemple de sortie du logiciel SEEP/W. On trouve en a) la variation de la teneur en eau, en b), la variation de la succion matricielle et en c), la variation de la conductivité hydraulique. Sur les trois figures, le trait en pointillé représente le niveau où le degré de saturation est de 90 %.

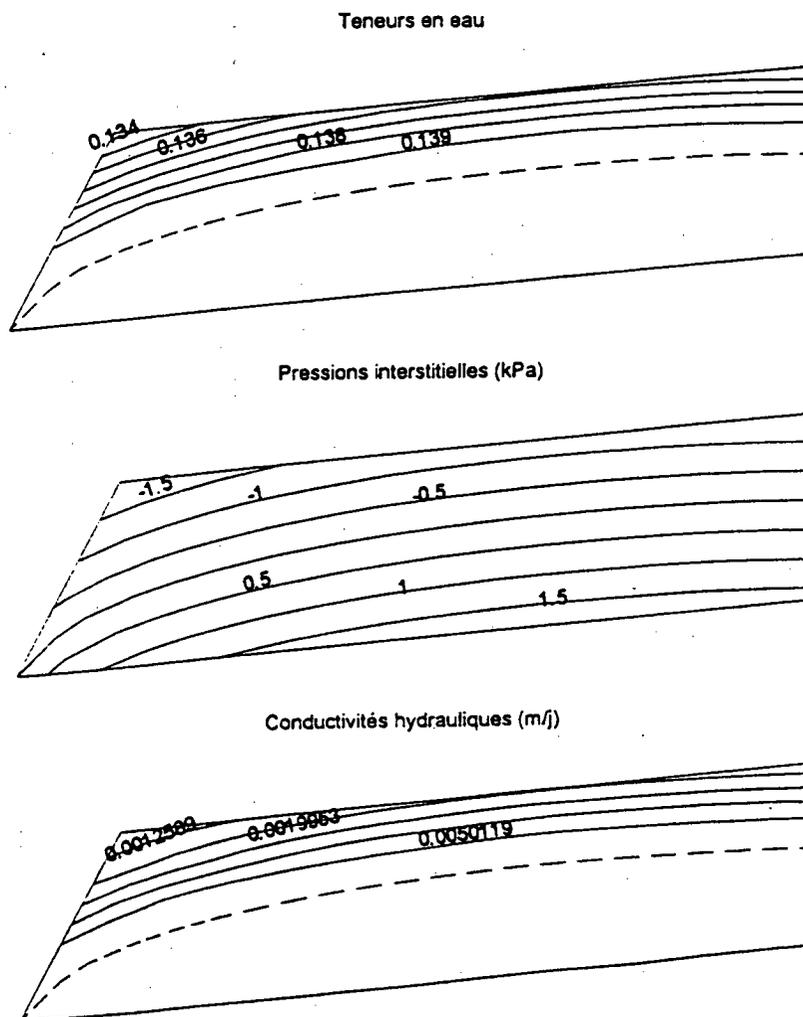


Figure 41 Variation de l'état hydrique dans une fondation

Dans les tableaux 12 à 14, on voit les conditions de drainage de la chaussée. Le rapport R représente le rapport du volume de la fondation sous la ligne de saturation à 90 % sur le volume total de la fondation, le degré de saturation moyen, la succion matricielle moyenne ainsi que la conductivité hydraulique moyenne au-dessus de la ligne de saturation à 90 % à l'intérieur de la fondation. Les volumes d'eau drainée sont aussi donnés pour la période de drainage. Les résultats sont regroupés en différentes catégories qui sont fonction des paramètres étudiés.

Le tableau 12 montre les effets de la teneur en eau résiduelle à 100 kPa (θ_r^*) sur les variations hydriques dans la fondation lorsque la pression d'entrée d'air ψ_e est égale à 1 kPa et que la conductivité hydraulique à 90 % de saturation est de 10^{-5} cm/s. On peut voir que le rabattement de la ligne de saturation de 90 % est sensiblement le même pour les trois teneurs en eau résiduelle à 100 kPa (θ_r^*), et la saturation moyenne à l'intérieur de la fondation de même que la conductivité hydraulique varient très peu. Remarquons tout de même que le volume d'eau drainée décroît avec l'augmentation θ_r^* , mais que les différences sont faibles puisque les volumes d'eau drainée sont du même ordre de grandeur, soit entre $1,77E-3$ et $2,75E-3$ m³.

Tableau 12					
Influence de θ_r^* sur les variations hydriques lorsque $\psi_e = 1$ kPa et $k_s = 10^{-5}$ cm/s					
θ_r^* (%)	R	Saturation (%)	Succion matricielle (kPa)	Conductivité hydraulique (cm/s)	Volume d'eau drainée (m ³)
3,0	0,55	82,9	0	6,63E-6	2,75E-3
5,3	0,49	88,7	0	6,35E-6	1,98E-3
7,7	0,47	88,7	0	6,02E-6	1,77E-3

Le tableau 13 montre les effets de la pression d'entrée d'air (ψ_e) sur les variations hydriques dans la fondation lorsque la teneur en eau résiduelle à 100 kPa est de $\theta_r^* = 5,3$ % et que la conductivité hydraulique à 90 % de saturation correspond à 10^{-5} cm/s. On voit que la nappe est rabattue très rapidement à mesure que la pression d'entrée d'air augmente. La valeur de R est de 0,49 pour une pression d'entrée d'air de 1 kPa et elle chute à 0 lorsque la pression d'entrée d'air devient supérieure à 10 kPa. Toutefois, un rabattement important de la ligne de saturation de 90 % n'est pas nécessairement signe d'un bon drainage puisque le volume d'eau écoulee est de $1,98E-3$ m³.

pour le matériau ayant une pression d'entrée d'air de 1 kPa ; mais il diminue au fur et à mesure que la pression d'entrée d'air augmente pour atteindre une valeur aussi faible que $5,3E-7 \text{ m}^3$ pour une pression d'entrée d'air de 13 kPa. Cela fait que, même si l'on enregistre des valeurs de succion élevées dans la fondation sans qu'il y ait baisse de la saturation, la succion ne peut contribuer à accroître la portance de la fondation puisque de très faibles changements de volume aux passages de camions lourds ou de faibles infiltrations peuvent changer l'état de pression interstitielle de négatif à positif. Il faut donc être prudent dans l'interprétation du rabattement de la ligne de saturation à 90 % et bien suivre les variations de teneurs en eau.

Tableau 13

Influence de la pression d'entrée d'air sur les variations hydriques lorsque $\theta^* = 5,3 \%$ et $k_s = 10^{-5} \text{ cm/s}$

ψ_e (kPa)	R	Saturation (%)	Succion matricielle (kPa)	Conductivité hydraulique (cm/s)	Volume d'eau drainée (m ³)
1	0,49	88,7	0	6,35E-6	1,98E-3
3	0,30	89,4	0,7	9,26E-6	1,17E-3
5	0,08	90,0	1,4	9,84E-6	5,11E-4
7	0,04	90,0	2,2	1,00E-5	3,75E-5
10	0	90,0	2,2	1,00E-5	1,23E-5
13	0	90,0	2,2	1,00E-5	5,30E-7

Le tableau 14 montre les effets de la conductivité hydraulique quasi saturée sur les variations hydriques dans la fondation lorsque la teneur en eau résiduelle à 100 kPa θ^* , est égale à 5,3 % et que la succion matricielle ψ_e correspond à 1 kPa. On voit que lorsque la conductivité hydraulique saturée diminue, la nappe est moins rabattue et que les volumes d'eau évacuée se révèlent moins importants.

Tableau 14

Influence de la conductivité hydraulique saturée sur les variations hydriques lorsque $\theta^* = 5,3 \%$ et $\psi_e = 1 \text{ kPa}$.

K_s (%)	R	Saturation (%)	Succion matricielle (kPa)	Conductivité hydraulique (cm/s)	Volume d'eau drainée (m ³)
1E-4	0,19	87,4	1	1,70E-5	4,95E-3
1E-5	0,49	88,7	0	6,35E-6	1,98E-3
1E-6	0,69	89,4	-0,5	5,78E-7	8,61E-4

On peut donc dire que les matériaux idéaux pour le drainage sont ceux qui ont une très faible pression d'entrée d'air, une faible teneur en eau résiduelle à 100 kPa et une grande conductivité hydraulique.

Drainage d'une fondation avec les matériaux étudiés

Les résultats de l'étude de drainage d'une fondation de chaussée pour les matériaux de laboratoire étudiés sont regroupés en fonction du type de matériau. Le tableau 15 montre la variation du degré de saturation, de la succion matricielle et de la conductivité hydraulique dans la fondation à la fin de la période de drainage de vingt jours qui comprend une période de dégel de dix jours et une période de drainage supplémentaire de dix jours où la sous-fondation et l'infrastructure sont considérées comme imperméables.

Tableau 15					
Variation de l'état hydrique dans une fondation avec les matériaux étudiés en laboratoire					
Matériaux	Degré de saturation moyen (%)	Succion matricielle moyenne (kPa)	Conductivité hydraulique moyenne (cm/s)	Volume d'eau drainée (m³)	Saturation à l'optimum Proctor (%)
SM2 % 2	68	-6,5	1,20E-04	6,70E-2	74,7
SM7 %	89,9	0	4,90E-07	1,60E-4	87,9
VC2 %	76,5	-1,5	4,60E-05	2,81E-2	68,8
VC7 %	88,2	-1,75	2,10E-05	4,99E-3	77,1
VC12 %	89,6	-1,5	6,10E-06	1,08E-3	81,1
VJ2 %	80,9	-1,5	3,66E-05	2,40E-2	81,7
VJ2 % M	75,2	-1	4,30E-05	4,09E-2	68,8
VJ2 % H	71,5	-3	9,90E-05	5,60E-2	64,3
VJ7 % M	89,3	-4	1,30E-05	1,50E-3	64,3
VJ7 %	89,4	-0,6	9,20E-06	1,58E-3	79,2
VJ12 %	89,9	-2,5	1,30E-06	2,13E-4	78,8

Les variations d'état hydrique présentées au tableau 15 confirment les résultats de l'étude paramétrique et laissent voir que l'augmentation de la teneur en fines diminue la capacité de drainage. En effet, en regardant les variations du degré de saturation ainsi que les volumes d'eau écoulée, on remarque que ces derniers baissent avec la hausse des fines. Par exemple, les matériaux VC2 %, VC7 % et VC12 % ont des degrés de saturation de 76,5 %, 88,2 % et 89,6 %. Leur volume d'eau drainée respectif est de 2,81E-2 m³, 4,99E-3 m³ et 1,08E-3 m³.

Comme pour l'étude paramétrique, les évolutions de la saturation, de la succion matricielle et de la conductivité hydraulique sont données à l'annexe D.

L'examen global des variations hydriques calculées par simulation ainsi que des courbes caractéristiques de rétention d'eau et des courbes de conductivité hydraulique nous permet de dire, sans doute possible, que les matériaux granitiques sont les plus drainants, viennent ensuite les matériaux schisteux et, finalement, les matériaux calcaires. En effet, les courbes caractéristiques de rétention d'eau des matériaux granitiques ont une plus faible teneur en eau résiduelle à 100 kPa, une plus faible pression d'entrée d'air et, aussi, une plus grande conductivité hydraulique. Cela est bien mis en évidence lorsqu'on compare (tableau 15), par exemple, les volumes d'eau écoulée pour les matériaux VC7 %, VJ7 % et SM7 % qui sont respectivement de $4,99E-3 \text{ m}^3$, $1,58E-3 \text{ m}^3$ et $1,60E-4 \text{ m}^3$. Ces constatations vont dans le même sens que les résultats d'essais de valeurs au bleu qui expriment le potentiel de rétention d'eau des matériaux par le phénomène d'adsorption : une valeur de 0,07 a été obtenue pour la pierre granitique, de 0,18 pour le gravier schisteux et de 0,44 pour la pierre calcaire.

DISCUSSION

Appareillage

Les appareils utilisés dans la présente étude, à l'exception des tensiomètres et des sondes TDR, sont tous contrôlés par des systèmes d'assurance qualité de la Direction du laboratoire des chaussées. Malgré tout, certains points sont à vérifier ou à discuter à propos de ces appareillages ainsi qu'au sujet des sondes TDR et des tensiomètres fabriqués spécialement pour l'étude.

Perméamètre de 152,4 mm

La mesure de la conductivité hydraulique à l'intérieur d'un moule cylindrique soulève souvent la question de l'effet de paroi dans l'écoulement. Y a-t-il formation de chemins préférentiels à l'interface de la paroi et de l'échantillon ? Les matériaux granulaires de fondations des chaussées testés dans ces moules ayant des granulométries étalées composées de particules dont la grosseur peut aller jusqu'à 28 mm de diamètre, la formation de vides le long de la paroi du moule est possible.

Toutefois, selon les essais effectués dans la présente étude, l'effet de paroi ne serait pas significatif. Nous avons mesuré des perméabilités variant de 10^{-3} cm/s pour un matériau schisteux (VJ2 % H) à 10^{-8} cm/s pour une pierre calcaire (SM12 %). L'examen visuel des échantillons compactés dans le moule translucide d'étalonnage des sondes TDR nous a permis de constater que ceux-ci ont une surface périphérique très uniforme et lisse. À leur démoulage, la texture reste très douce, même pour les échantillons à granulométrie plus grossière. Enfin, un contrôle de la conductivité hydraulique dans une cellule triaxiale permet de confirmer que l'effet de paroi est certainement très faible dans le perméamètre de 152,4 mm de diamètre.

Moule de compactage de 305 mm

Le moule de 305 mm ainsi que le mécanisme automatique de compactage ont été acquis par la Direction du laboratoire de chaussées quelques mois avant le début de la présente étude. Le moule n'avait donc pas fait l'objet de normalisation à ce moment. Malgré tout, il a été très

performant et a donné des matériaux de masses volumiques sèches très près de celles obtenues à l'optimum Proctor mesuré dans le moule de 152,4 mm. Comme nous l'avons dit au chapitre *Présentation des résultats*, de légères hausses de la masse volumique, de 0 à 4 %, ont été enregistrées dans le moule de 305 mm par rapport au moule de 152,4 mm. Malgré l'accroissement de masse volumique, le broyage des matériaux n'a pas augmenté dans le moule de 305 mm par rapport au moule de 152,4 mm (voir annexe A).

Tensiomètres

Les tensiomètres fabriqués pour résister aux chocs provoqués par le compactage ont quelquefois présenté des problèmes quant à la saturation de la bougie poreuse. Fabriqués à l'aide de plastique et de scellant, ils n'ont jamais été saturés dans l'eau bouillante à cause du risque lié au décollement du scellant. La saturation de la bougie poreuse a plutôt été faite par application d'une grande pression d'eau pour chasser les bulles d'air présentes dans les pores.

À l'occasion, cette pratique n'a pas toujours été efficace et a parfois causé la désaturation prématurée des bougies poreuses. En réinjectant de l'eau sous pression dans les tensiomètres défectueux au cours de l'essai, nous avons souvent réussi à maintenir l'utilisation du tensiomètre pour la continuation de l'essai. Toutefois, certains tensiomètres n'ont pas réagi correctement après la resaturation et les mesures prises au niveau où ils avaient été placés ont donc été perdues. C'est pourquoi, sur certaines courbes caractéristiques, il y a peu de mesures disponibles.

Sondes TDR

Les sondes TDR ont été étalonnées pour les trois types de matériaux avec quelques-unes des granulométries. À l'examen des figures présentées à l'annexe B, on voit que l'allure des courbes d'étalonnage est toujours sensiblement la même. Toutefois, certaines sondes TDR, une fois mises en place dans le moule de 305 mm, ont donné des teneurs en eau très à l'écart des mesures prises aux autres niveaux et loin de la teneur en eau de compactage. Une correction au point de départ de la courbe d'étalonnage a donc été effectuée pour ces sondes en fonction de la teneur en eau massique mesurée à la fin du compactage. Ensuite, les mesures ont toutes été corrigées en suivant la pente de la courbe d'étalonnage.

Dans certains cas, les mesures obtenues par une sonde n'ont pas suivi l'évolution fournie par les sondes des autres niveaux. Le problème provient principalement du mode de mise en place de la sonde TDR. En effet, une grosse particule placée en travers des tiges rigides des sondes peut provoquer l'effet de caverne creuse et ainsi changer la porosité du matériau près de la sonde. En général, le fait de tamiser une petite quantité de matériaux de 5 mm au-dessus de la sonde a permis de pallier ce problème. Toutefois, lorsque l'écart entre les mesures de teneurs en eau prises à un niveau donné par rapport aux autres niveaux montrait soit une défectuosité, soit un problème de mise en place de la sonde, les données ont simplement été rejetées.

Puisque l'allure des courbes d'étalonnage de sondes TDR est sensiblement la même pour tous les matériaux, certains d'entre eux (VJ2 % M, VJ2 %H, VJ7 % M et SM7 %) n'ont pas fait l'objet d'étalonnage. La façon de procéder pour la mesure de l'évolution de la teneur en eau consistait alors à prendre la teneur en eau massique après compactage, à l'appliquer à la mesure de la constante diélectrique et à utiliser la pente d'une courbe d'étalonnage déterminée pour un matériau de la même famille.

On a également remarqué que la dispersion des points obtenus durant la mesure de la courbe caractéristique pour les derniers essais était plus large que pour les premiers essais. Tel est le cas pour les matériaux SM2 % 1 et SM2 % 2 qui ont été testés à la fin du programme d'essais. Cela s'explique probablement par la détérioration des sondes au fil des essais.

Courbes caractéristiques de rétention d'eau

L'essai qui consistait à mesurer la courbe caractéristique de rétention d'eau en mesurant l'évolution de la teneur en eau en fonction de la succion matricielle à différents niveaux dans le moule de 305 mm a été comparé à l'essai dans la cellule de pression. Ce dernier a permis de constater que la méthode utilisée, constituée de sondes TDR et de tensiomètres, dans le moule de 305 mm était valable puisque les résultats des deux essais sont semblables. Rappelons que l'essai dans la cellule de pression est utilisé pour déterminer les courbes caractéristiques de rétention d'eau des sols depuis de nombreuses années. La méthode utilisée en laboratoire indique qu'elle

serait sans aucun doute valable sur le terrain pour suivre les conditions hydriques des chaussées en observation.

Effet des propriétés des matériaux sur la courbe caractéristique

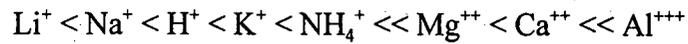
Les courbes caractéristiques de rétention d'eau mesurées pour les différents matériaux reflètent bien leur teneur en fines. En effet, pour les matériaux comprenant moins de fines, les pressions d'entrée d'air ainsi que les teneurs en eau résiduelle à 100 kPa sont plus faibles que pour les matériaux comportant plus de fines. Le drainage des matériaux grossiers (bas du fuseau) ayant de faibles succions matricielles sera donc performant comparativement aux matériaux plus fins (haut du fuseau), lesquels engendrent des succions matricielles plus élevées.

À l'examen général des courbes caractéristiques de rétention d'eau pour les différents matériaux, on constate donc que les matériaux granitiques sont les plus drainants, viennent ensuite les matériaux schisteux et, finalement, les matériaux calcaires. Cela s'accorde bien avec les caractéristiques intrinsèques des matériaux telles la valeur au bleu et la surface spécifique et l'adsorption d'eau des granulats.

Il est admis que, lorsque la valeur au bleu augmente, on a aussi une hausse de la surface spécifique des fines et que celles-ci ont plus de facilité à adsorber de l'eau. En effet, pour la pierre granitique, la valeur au bleu est de 0,07, alors que la surface spécifique moyenne des fines déterminée à l'aide de l'analyseur de particules au laser est de $0,1 \text{ m}^2/\text{g}$. Le gravier schisteux a une valeur au bleu de 0,18 et une surface spécifique de $0,15 \text{ m}^2/\text{g}$, tandis que la pierre calcaire montre une valeur au bleu de 0,44 et une surface spécifique de $0,35 \text{ m}^2/\text{g}$. Le matériau calcaire ayant une valeur au bleu et une surface spécifique plus élevée a donc un potentiel d'adsorption d'eau sur la surface des fines plus élevé. Comme l'eau adsorbée est liée aux particules, elle est difficilement drainable et peut expliquer les grandes pressions d'entrée d'air et de teneurs en eau résiduelle à 100 kPa mesurées sur les matériaux calcaires.

L'épaisseur de la couche d'eau adsorbée est fonction de la capacité d'échange d'ions des particules avec l'eau interstitielle. Plus un matériau possède des ions chargés positivement à la surface des particules, plus la couche d'eau adsorbée sera épaisse. Certains ions ont une capacité

d'échange plus grande que d'autres. Yong et Warkentin (1966) présentent une échelle de capacité d'échange pour quelques ions généralement présents dans la composition des minéraux allant du plus faible au plus fort :



On voit que, avec l'augmentation du nombre d'électrons de valence, le pouvoir d'échange s'accroît considérablement. Pour mettre en évidence la possibilité d'échange de cations des matériaux étudiés, une analyse de la composition chimique de chaque matériau a été effectuée.

La composition chimique explicitée au chapitre *Description des matériaux* donne la quantité des oxydes majeurs dans les minéraux. Parmi ceux-ci, on note, entre autres, la présence de K_2O , de MgO , de CaO et de Al_2O_3 . Si l'on examine la proportion de chacun des oxydes dans la composition des minéraux, il est très difficile d'arriver à la conclusion que tel oxyde est responsable de la faible capacité de drainage des matériaux. Par exemple, ne connaissant pas la quantité de carbone dans les matériaux volatiles, on ne peut déterminer la quantité de CaO entrant dans la composition du minéral calcite.

De plus, l'analyse des minéraux par diffraction des rayons X ne permet pas de donner le pourcentage de calcite dans la composition de la roche. On peut toutefois dire que les ions CaO représentent 26,4 % de la composition de la source calcaire, 5 % de la source schisteuse et 3,4 % de la source granitique et qu'ils peuvent entraîner les échanges d'ions à la surface des fines. Puisque l'ion Ca^{++} est présent en très grande quantité et vu son pouvoir d'échange, la grande concentration d'ions CaO dans le matériau calcaire pourrait expliquer que la couche d'eau adsorbée soit plus épaisse que pour les autres matériaux. De même, les ions de K_2O atteignent 2,7 % dans le calcaire, 2,4 % dans le schiste et 2,3 % dans le granite. D'autres études plus poussées sur le sujet sont donc à prévoir pour arriver à déterminer si les échanges de cations sont vraiment une des causes d'un faible drainage.

Effets du compactage sur la courbe caractéristique

Comme nous l'avons dit au chapitre *Présentation des résultats*, le compactage des matériaux crée de l'attrition et une augmentation des fines. En général, les matériaux granitiques et schisteux ont des courbes granulométriques après compactage semblables. Par contre, les matériaux calcaires ont été fortement dégradés, de sorte que la courbe granulométrique de SM7 % après compactage a donné un pourcentage de fines passant le tamis de $80\ \mu\text{m}$ de 12,6 %. Ce matériau a donc, après compactage, pratiquement la même courbe granulométrique (figure 42) que la pierre granitique (VC12 %) et le gravier schisteux (VJ12 %). On peut donc comparer sa courbe caractéristique de rétention d'eau ainsi que sa courbe de conductivité hydraulique (figure 43) avec celles de VC12 % et de VJ12 %. À la figure 43, la conductivité hydraulique est donnée sur l'axe y de gauche en fonction de la teneur en eau volumique et la courbe caractéristique de rétention d'eau, apparaissant sur le même graphique, montre la succion sur l'axe y de droite en fonction de la teneur en eau volumique. En faisant l'exercice, on voit que la tendance indiquant que les matériaux calcaires sont les moins drainants se maintient.

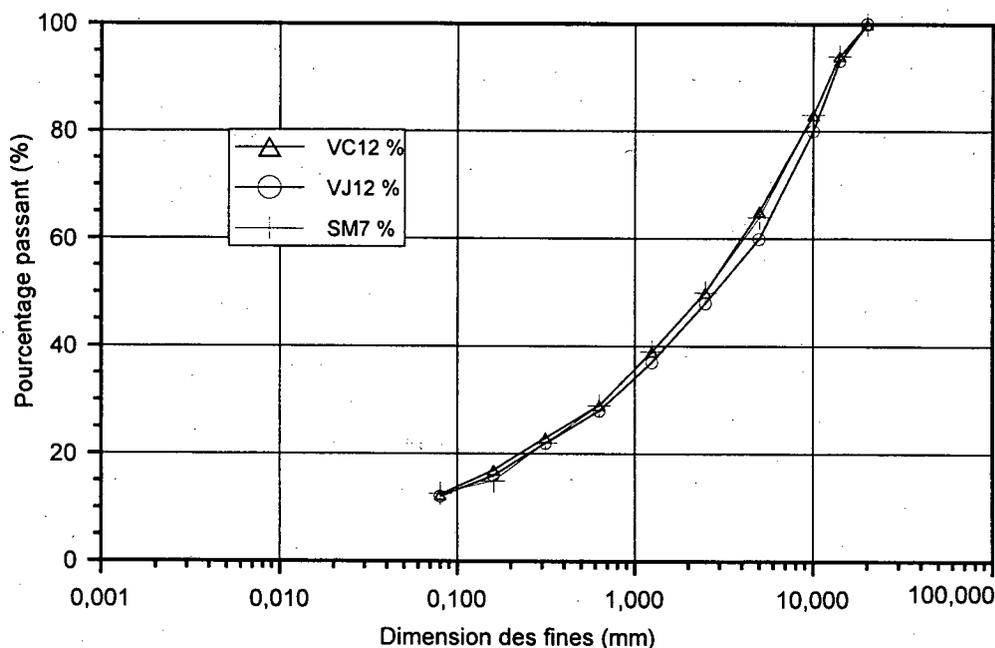


Figure 42 Courbes granulométriques des matériaux VC12 %, VJ12 % et SM7 %

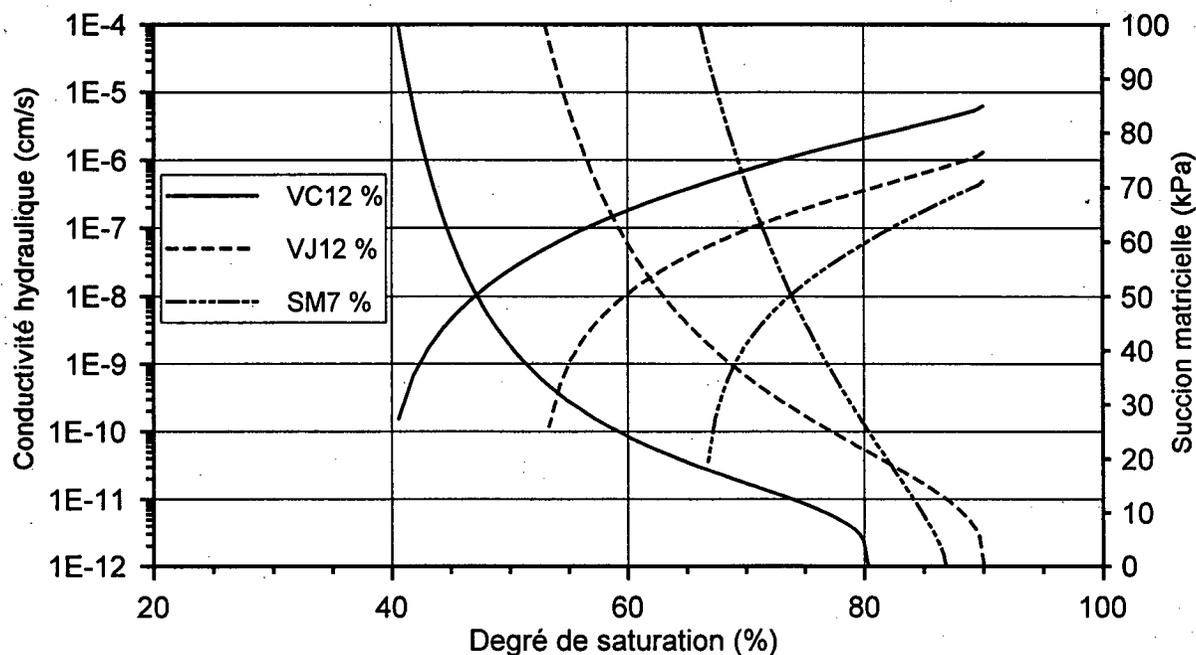


Figure 43 Courbes caractéristiques de rétention d'eau et de conductivité hydraulique des matériaux VC12 %, VJ12 % et SM7 %

La porosité de la matrice du matériau compacté joue aussi un grand rôle sur la rétention d'eau. En effet, pour une même granulométrie, les matériaux les mieux compactés sont ceux qui retiennent le plus d'eau interstitielle. Ainsi, le matériau calcaire (SM7 %), a un indice des vides de 0,155, alors que le matériau schisteux (VJ12 %) a un indice des vides de 0,164 et la pierre granitique (VC12 %) une valeur de 0,194.

Conductivité hydraulique

Le choix du modèle de calcul de la courbe de conductivité hydraulique a été discuté au chapitre *Revue de littérature*. Le modèle retenu ici, qui découle de la théorie de la distribution du volume des pores élaborée par Childs et Collis-George (1950), est reconnu pour son grand domaine d'application. Nous avons démontré, à la section *Évaluation des méthodes indirectes*, que ce modèle permet de bien prédire la conductivité hydraulique pour des matériaux de fondations granulaires sur un domaine de teneur en eau assez grand. En effet, la conductivité hydraulique prédite pour le matériau testé par Raimbault (1986b) commence à diverger à une teneur en eau de 8 %, ce qui correspond à un degré de saturation de 50 %. Sachant que la teneur en eau résiduelle

à 100 kPa de ce matériau est d'environ 6 %, on voit que le domaine d'application du modèle est satisfaisant.

Comme la conductivité hydraulique est calculée à partir des courbes caractéristiques de rétention d'eau, il est clair que les tendances données par celles-ci seront les mêmes sur les courbes de conductivité hydraulique. Par exemple, le fait que le matériau calcaire (SM7 %) a une pression d'entrée d'air et une teneur en eau résiduelle à 100 kPa plus élevées que les matériaux schisteux et granitiques (VJ12 % et VC12 % respectivement) explique que sa conductivité hydraulique chutera plus rapidement.

Conductivité hydraulique de la pierre calcaire (SM2 %)

Les matériaux calcaires ont fait l'objet de deux échantillonnages. L'analyse pétrographique a permis de constater que les matériaux des deux échantillonnages sont tout à fait de même nature. Toutefois, la conductivité hydraulique à teneur en eau quasi saturée des matériaux SM2 % 1 et SM2 % 2 est mille fois supérieure à la conductivité de SM2 % 0 qui provient du premier échantillonnage.

La conductivité hydraulique des matériaux calcaires du premier échantillonnage comprenant 2, 7 et 12 % de fines ont suivi la même tendance que celles obtenues des matériaux granitiques et schisteux, soit une baisse d'un ordre logarithmique à chaque palier de pourcentage de fines étudié. La conductivité hydraulique à grande saturation de SM2 % 0 est de $1,7E-6$ cm/s, de $4,9E-7$ cm/s pour SM7 % et de $5,5E-8$ cm/s pour SM12 %. Par contre, la conductivité hydraulique de SM2 % 1 et de SM2 % 2 est de $1,1E-3$. Puisque les granulométries après compactage et que les caractéristiques minéralogiques sont sensiblement les mêmes, il reste très peu de possibilité d'explication d'une variation aussi draconienne. À première vue, on est à même de constater que l'indice des vides est beaucoup plus grand pour SM2 % 1 et SM2 % 2 (0,212) que pour SM2 % 0 (0,172). Une moins bonne mise en place au moment du compactage entraîne nécessairement un accroissement de la porosité. Puisque cette dernière est plus grande, l'écoulement est donc favorisé. Par contre, jamais on n'a enregistré de hausse aussi élevée dans la conductivité hydraulique pour des augmentations semblables de l'indice des vides dans un même type de matériau. En effet, le matériau VJ2 % H (indice des vides de 0,240) a une

conductivité hydraulique de $1,3E-3$ cm/s, tandis que VJ2 % (indice des vides de 0,207) affiche une conductivité hydraulique de $1,1E-4$ cm/s, ce qui donne un écart de conductivité hydraulique cent fois inférieur à la conductivité obtenue pour les matériaux SM2 %.

Il est possible que les matériaux du second échantillonnage proviennent d'un horizon différent du premier à l'intérieur de la carrière. Deux horizons donnés peuvent être composés de minéraux de même nature ; par contre, un mode de déposition ou de consolidation distinct à l'occasion de la formation de la roche peut entraîner des changements de la texture et la porosité ainsi que la forme des fines à la suite du concassage de la pierre. Ces facteurs influent sur les conditions de mise en place à l'étape du compactage, ce qui nuit aussi aux conditions d'écoulement. Par contre, comme la constatation du problème est survenue après le mélange des matériaux du premier échantillonnage avec ceux du second, nous n'avons pu procéder à l'examen de ces propriétés ni faire un autre échantillonnage.

Puisque les échantillons ont été mélangés, il est encore une fois impossible de connaître la proportion de chaque échantillonnage ayant servi à les fabriquer pour la mesure de la conductivité hydraulique à grande saturation et la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau. Il faut donc rester prudent quant à l'interprétation des résultats obtenus pour les tests effectués sur les matériaux SM2 %.

Influence de la variation de la conductivité hydraulique sur l'état hydrique d'une fondation de chaussée

La variation de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau ou de la succion matricielle a un impact majeur sur le comportement de la fondation de la chaussée, puisque la conductivité hydraulique diminue à mesure que la succion matricielle augmente.

L'analyse de la conductivité hydraulique d'un matériau en fonction de la teneur en eau doit se faire de concert avec l'analyse de la courbe caractéristique de rétention d'eau. En effet, en examinant les courbes de conductivité de matériaux schisteux (figure 35), on voit qu'elles ont à peu près toujours la même allure ou la même pente. À la suite de cette constatation, on pourrait être tenté de dire que la conductivité hydraulique varie de la même façon dans les fondations, peu

importe le type de matériaux. Une telle déduction est toutefois erronée, puisque lorsqu'on étudie la courbe caractéristique de chacun des matériaux, on observe que, pour drainer des matériaux à haute teneur en fines, un effort considérable (suction matricielle élevée) est demandé, contrairement aux matériaux à faible teneur en fines qui se drainent rapidement sans grande augmentation de la suction. Si l'on prend l'exemple des matériaux VJ2 % et VJ12 %, on constate que la conductivité hydraulique des deux matériaux (figure 35) diminue d'environ un ordre de grandeur (dix fois) pour une désaturation de 90 à 70 %. Toutefois, la suction matricielle pour ces deux matériaux à un degré de saturation de 70 % est de 3 kPa pour VJ2 % et de 35 kPa pour VJ12 %, section a) de la figure 29 et c) de la figure 30. Puisque la suction matricielle est directement proportionnelle à la profondeur de la nappe, pour avoir un degré de saturation de 70 %, la position de la nappe phréatique devra être dix fois plus profonde dans le cas d'une chaussée ayant un matériau de fondation comme VJ12 % par rapport à VJ2 %. De plus, comme la conductivité hydraulique est environ cent fois plus faible pour VJ12 % en comparaison de VJ2 %, il est facile d'imaginer que le temps nécessaire pour atteindre ce degré de saturation sera beaucoup plus long.

Selon Thompson (1969), la dégradation d'une chaussée provoquée par une augmentation des pressions interstitielles causées par des chargements répétés peut être enregistrée pour des degrés de saturation de 80 % et plus. L'adsorption des pressions devient pratiquement nulle dans la phase gazeuse, puisqu'elle est discontinue à ces degrés de saturation. Les pressions sont donc transmises dans l'eau interstitielle, ce qui entraîne la perte de portance et cause la dégradation de la chaussée. Si l'on prend comme hypothèse que la fondation est pratiquement saturée à la période de dégel, il faut donc que le matériau qui la constitue ait une bonne capacité de drainage pour amener rapidement la fondation à des degrés de saturation inférieurs à 80 %. Il doit alors pouvoir se drainer par de faibles gradients négatifs (faibles succions), puisque la nappe est vraisemblablement dans sa position la plus élevée et près de la ligne d'infrastructure dans beaucoup de cas.

Un matériau avec une pression d'entrée d'air élevée a une remontée capillaire équivalente. Lorsque la fondation est en présence d'une nappe phréatique peu profonde, un tel matériau de fondation crée un équilibre entre la charge hydrostatique nulle à la surface de la nappe et la suction matricielle dans le matériau. Si la différence d'élévation entre la nappe et la fondation est

inférieure à la pression d'entrée d'air exprimée en hauteur d'eau ($1 \text{ kPa} \cong 10 \text{ cm d'eau}$), il n'y aura donc pas de possibilité de drainage de la fondation. Elle restera saturée tout en conservant un état de pressions interstitielles négatives. Le passage de camions lourds peut alors faire varier l'état de pression par de très légers changements de volume et, comme résultat, il y aura génération de pressions interstitielles positives.

Pour une fondation de chaussée, une pression d'entrée d'air faible signifie que la nappe peut être à une profondeur très faible sous la fondation sans nuire au drainage. Par exemple, considérons une route sans infiltration par le pavage et les côtés, avec une ligne d'infrastructure à 600 mm sous le pavage. La fondation qui a une épaisseur de 300 mm est donc assise sur une sous-fondation de 300 mm. Prenons ensuite deux matériaux de fondation, soit la pierre granitique (VC2 %) qui a une pression d'entrée d'air de 1,4 kPa et le gravier schisteux (VJ7 % M) qui a une pression d'entrée d'air de 7,7 kPa. Lorsque la nappe est située au niveau de la ligne d'infrastructure, le degré de saturation à la base de la fondation est donc de 65 % (dans la figure 31, section a), $300 \text{ mm}_{\text{d'eau}} = 3 \text{ kPa} \rightarrow 65 \% \text{ de saturation}$) et la conductivité hydraulique est d'environ $1,5\text{E-}5 \text{ cm/s}$. Pour une fondation constituée du matériau VJ7 % M, le degré de saturation à la base de la fondation est supérieur à 80 % (dans la figure 30, section b), $3 \text{ kPa} \rightarrow >80 \% \text{ de saturation}$) et la conductivité hydraulique atteindrait environ $7\text{E-}6 \text{ cm/s}$. Dans cette condition, la fondation est entièrement dans la frange capillaire, puisque la pression d'entrée d'air de VJ7 % M est de 7,7 kPa, alors que la succion maximale créée est de 6 kPa à la surface de la fondation qui se trouve à 600 mm de la ligne d'infrastructure ($600 \text{ mm}_{\text{d'eau}} = 6 \text{ kPa}$). Cela implique donc un degré de saturation élevé et une perte de portance significative. Pour la fondation avec le matériau VC2 %, la frange capillaire a une épaisseur de 140 mm (pression d'entrée d'air de 1,4 kPa), ce qui signifie qu'elle est à une distance de 160 mm de la fondation.

La période de dégel d'une chaussée est d'environ vingt jours ; par contre, la période pendant laquelle la fonte de neige alimente la nappe phréatique peut durer de un à deux mois et demi. De plus, la faible conductivité hydraulique de certains matériaux de fondations ayant une teneur élevée en fines va occasionner des temps de drainage beaucoup plus longs. Ainsi, la période de récupération de la capacité portante de certaines chaussées peut être très grande, en particulier si elle repose sur un sol support argileux. En effet, Saint-Laurent, Roy et Bergeron (1995) ont démontré, dans le cas du rang Saint-Alexis à Saint-Maurice où la fondation a une teneur en fines

de 6 % et où la nappe se situe près de la sous-fondation, que la chaussée ne récupère sa pleine capacité portante qu'au milieu de l'été. La combinaison d'un matériau de fondation peu drainant et la présence d'une nappe peu profonde sont donc néfastes pour la capacité portante d'une chaussée à cause de conditions climatiques sévères et, en particulier, de l'effet du gel.

Jusqu'à présent, on a parlé d'une nappe située sous la fondation, mais la situation peut être différente durant la période de dégel. En effet, puisque le dégel n'est pas instantané, la présence de matériaux gelés sous la partie dégélée constitue une barrière à l'écoulement. L'eau provenant du dégel de la partie supérieure ainsi que de l'infiltration par les fissures ou les accotements s'écoule par gravité jusqu'à la barrière de sol gelé et, ensuite, elle suit la pente du front de dégel. L'écoulement quasi horizontal est beaucoup plus lent puisque les gradients sont très faibles et il conduit à l'accumulation d'eau à la barrière imperméable qui prend la forme d'un bassin au dégel. Un matériau ayant une faible capacité de drainage aura du mal à évacuer l'eau de fonte, alors qu'un matériau drainant va permettre l'écoulement plus rapide et ainsi soulager les excès de pressions interstitielles au moment du passage des camions lourds.

Les matériaux les plus à même d'offrir un bon drainage, pour que la capacité portante soit optimale (entre 70 et 80 % de saturation), doivent se drainer rapidement sans grande augmentation de la succion matricielle. Les matériaux idéaux sont donc ceux qui ont une pente de la courbe caractéristique de rétention d'eau très abrupte et la pression d'entrée d'air la plus faible possible, donc une conductivité hydraulique élevée pour maintenir une portance élevée. On a constaté que, lorsque les matériaux ont une conductivité hydraulique élevée, la teneur en eau résiduelle à 100 kPa et la pression d'entrée d'air sont faibles. Avec l'augmentation de ces dernières, il y a une diminution de la conductivité hydraulique.

Dans la présente étude, les matériaux tels VC2 %, VJ2 %, VJ2 % H et VJ2 % M sont ceux qui répondent le mieux à la définition de matériaux drainants sur la base de la conductivité hydraulique à saturation voisine de l'optimum Proctor et des courbes caractéristiques de rétention d'eau mesurées. D'ailleurs, ils ont permis d'obtenir les degrés de saturation les plus faibles (tableau 15) dans l'étude de simulation du drainage de fondations en condition de dégel.

L'étude de simulation des conditions de drainage a été faite selon des hypothèses très simplificatrices et les variations hydriques calculées par le logiciel SEEP/W peuvent être loin de la réalité pour certains. Cependant, comme tous les matériaux ont été examinés selon les mêmes hypothèses, les résultats sont donc valables pour évaluer, de façon qualitative, les capacités de drainage des matériaux entre eux.

CONCLUSION

La présente étude a porté sur la conductivité hydraulique de matériaux partiellement saturés utilisés dans les fondations de chaussées. La conductivité hydraulique en condition partiellement saturée a été déterminée à partir de la courbe caractéristique de rétention d'eau mesurée en laboratoire pour trois types de matériaux représentatifs des matériaux de fondations des chaussées utilisés dans la région de Québec—Chaudière—Appalaches. Les trois types de matériaux sont une pierre granitique, une pierre calcaire et un gravier schisteux.

Une instrumentation a été mise au point pour permettre la mesure de la courbe caractéristique de rétention d'eau à l'intérieur d'un moule de compactage de 305 mm de diamètre. À la suite de l'évaluation de différents modèles utilisant la courbe caractéristique de rétention d'eau pour prédire la conductivité hydraulique en condition partiellement saturée, le modèle de Jackson (1972), fondé sur la théorie de la distribution du volume des pores de Childs et Collis-George (1950), a été retenu. Ce modèle et l'équation de la courbe caractéristique de rétention d'eau de Fredlund et Xing (1994) combinés ont permis de bien prédire la conductivité hydraulique d'un matériau de fondation de chaussée mesurée par Raimbault (1986b).

L'évolution des courbes caractéristiques de rétention d'eau et des courbes de conductivité hydraulique montre l'influence de la quantité et de la nature des fines. En général, l'augmentation de la teneur en fines, pour un même type de matériau, diminue grandement les capacités de drainage. Par ailleurs, le type de matériau peut aussi avoir une grande influence sur le drainage. Pour vérifier ces observations, une étude paramétrique a été faite par simulations numériques à l'aide du logiciel SEEP/W. Des matériaux fictifs ainsi que les matériaux étudiés en laboratoire ont été utilisés au cours des simulations sur le drainage d'une fondation en période de dégel.

À partir des résultats de laboratoire et des simulations numériques, on a observé que les paramètres qui contrôlent le drainage des fondations sont la conductivité hydraulique quasi saturée, ensuite vient la pression d'entrée d'air qui contrôle la remontée capillaire et, finalement, à une importance moindre, la teneur en eau résiduelle à 100 kPa qui dicte la quantité d'eau drainable par un faible gradient hydraulique négatif. Nous avons également mis en évidence que

la variation de la conductivité hydraulique quasi saturée pour les différents matériaux étudiés est accompagnée d'une variation de la pression d'entrée d'air de la teneur en eau résiduelle à 100 kPa. Ainsi, lorsque la conductivité hydraulique quasi saturée diminue, la pression d'entrée d'air et la teneur en eau résiduelle à 100 kPa augmentent. Cette tendance a été observée pour les trois types de matériaux et nous avons démontré, sans doute possible, que les pierres granitiques sont les matériaux les plus drainants, suivis des graviers schisteux et des pierres calcaires, qui sont les matériaux les moins drainants.

Pour l'avenir, en ce qui concerne la caractérisation de l'influence des fines sur la conductivité hydraulique des matériaux de fondations des chaussées, une étude plus poussée sur la composition chimique ainsi que sur la structure moléculaire des minéraux apportera sûrement plus d'éclairage sur la capacité de rétention d'eau des fines. L'épaisseur de la couche d'eau absorbée par celles-ci est en fait la caractéristique qu'il faudra étudier en profondeur. Les minéraux composant les matériaux de fondations comportent différents ions ayant des capacités d'échange pouvant influencer sur l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée et, puisque l'épaisseur de la couche d'eau adsorbée n'est pas libre de s'écouler à l'aide de faibles gradients, elle influe sur la teneur en eau résiduelle à 100 kPa soit, la capacité de drainage globale du matériau.

En ce qui a trait à l'influence des variations hydriques des chaussées sur leur capacité portante, une étude plus étendue sur la caractérisation de la conductivité hydraulique des différents matériaux entrant dans la conception des chaussées devrait être élaborée. Une meilleure connaissance des capacités de drainage des matériaux permettrait de comprendre davantage les variations hydriques saisonnières. L'utilisation d'une instrumentation précise pour mesurer de faibles variations de teneur en eau et de succion matricielle permettra de bien définir la pression d'entrée d'air qui contrôle la remontée capillaire dans les matériaux.

Une instrumentation sur un ou des sites serait également souhaitable pour la vérification des propriétés hydrauliques mesurées en laboratoire. Considérant que les modes de mise en place sur les chantiers sont très différents du compactage à l'aide de marteaux mécaniques utilisés en laboratoire, nous croyons que les caractéristiques de drainage sur le terrain pourraient être quelque peu différentes de celles rencontrées en laboratoire. Une instrumentation *in situ* permettrait alors de bien caractériser les conditions initiales nécessaires à toute simulation

d'écoulement par méthodes numériques. À l'aide de données de terrain, il serait donc possible de recalibrer les modèles de simulation numérique et, ainsi, de se donner des outils performants pour l'étude des variations hydriques appliquées aux structures de chaussées. Ces outils contribueraient grandement à la compréhension du comportement des chaussées dans différentes conditions saisonnières.

Les facteurs climatiques qui influent sur la température des matériaux et de l'eau dans les chaussées sont aussi à considérer pour une meilleure compréhension du drainage des chaussées. Au printemps, l'eau étant plus froide, sa viscosité est plus grande que celle qui a cours durant l'été où la température de l'eau est plus près de celle reproduite en laboratoire. Donc, lorsque la viscosité de l'eau change, les conditions d'écoulement se modifient aussi.

Tous ces points sont donc à prendre en considération dans une démarche axée sur la compréhension du comportement des chaussées dans différents états hydriques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ayad, R., 1992. *Étude bibliographique sur la perméabilité dans les sols non saturés*, Thèse de maîtrise, Sainte-Foy, Université Laval.
- Ballard, L.F., 1973. *Instrumentation for Measurement of Moisture, Literature Review and Recommended Research. National Cooperative Highway Research Program Report 138*, Highway Research Board.
- Bear, J., 1970. « Two-liquid Flows in Porous Media », *Advances in Hydroscience*, vol. 6, p. 142-252.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*, New York, Dover Publication.
- Bieth, J.L., et L. Bertrand, 1991. « L'eau dans les chaussées et les plates-formes des routes secondaires », *Bulletin de liaison*, n° 173, p. 15-25.
- Brooks, R.H., et A.T. Corey, 1966. « Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow », *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 92, n° IR2, p. 61-88.
- Burdine, N.T., 1953. « Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data », *Petroleum Transactions*, vol. 198, p. 71-78.
- Campbell, G.S., 1974. « A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data », *Soil Science*, vol. 117, p. 311-314.
- Cedergren, H.R., 1987. *Drainage of Highway and Airfield Pavements*, Florida, Robert E. Krieger Publishing Company.
- Cedergren, H.R., 1988. « Why all Important Pavements should be Well Drained », *Transportation Research Record 1188*, p. 56-62.
- Childs, E.C., et N. Collis-George, 1950. « The Permeability of Porous Materials », *Proceedings of the Royal Society*, A. 201, p. 392-405.
- Childs, E.C., 1969. *An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena*, New York, Wiley.
- Davidson, J.M., et al., 1969. « Field Measurement and use of Soil-water Properties ». *Water Resources Research*, vol. 5, p. 1312-1321.
- Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Paris, Dalmont.
- Dupas, A., et G. Raimbault, 1980. « Mise au point d'un capteur de mesure de la teneur en eau et de pression interstitielle adaptable à un modèle de drainage bidimensionnel », *Bulletin du groupe français d'humidimétrie neutronique*, vol. 8, p. 59-72.

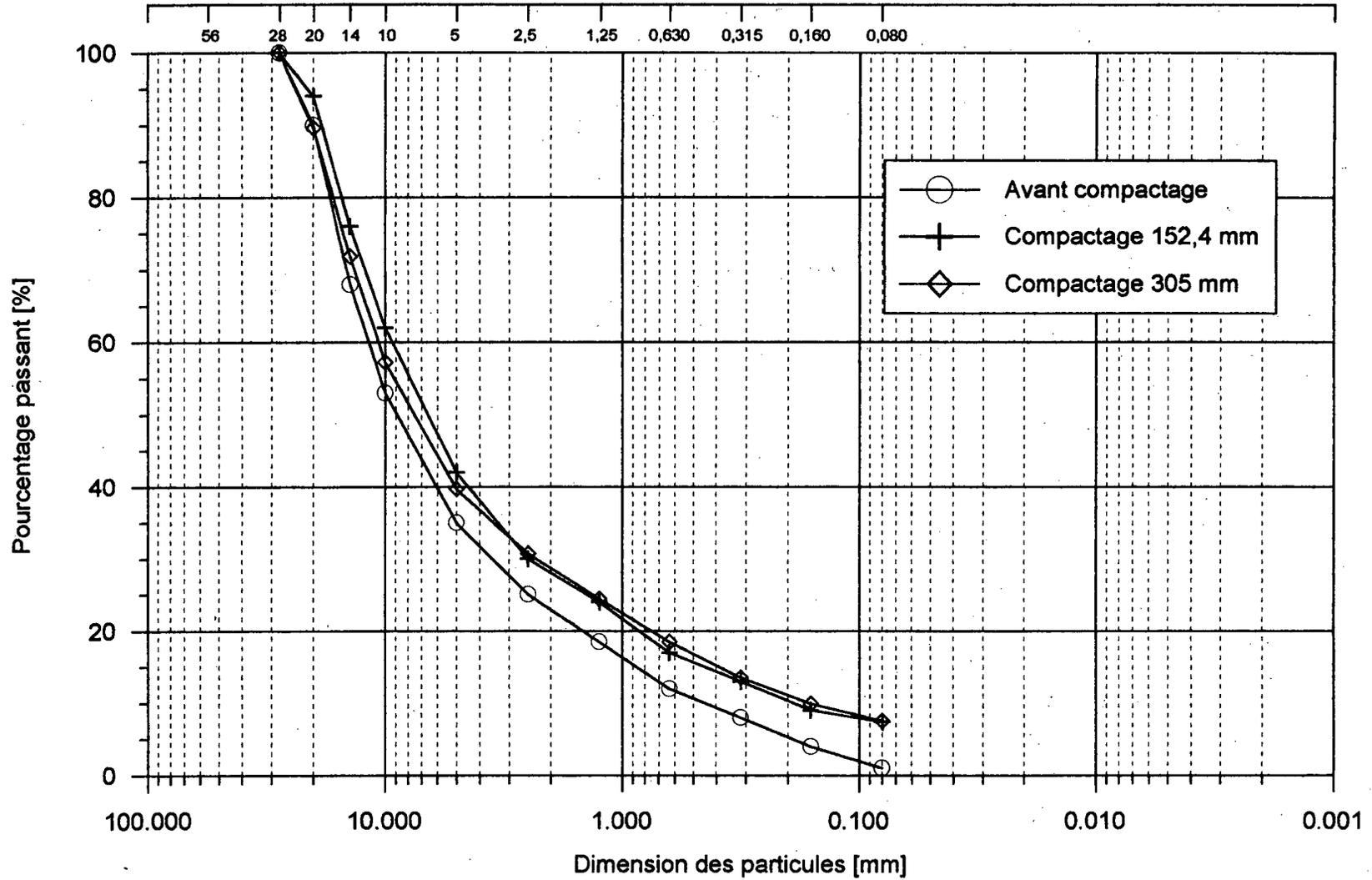
- Flon, P., 1988. *Problèmes de perméabilité et de stabilité des fondations de routes en matériaux à granulométrie ouverte ou en fondations routières en matériaux drainants*, Halifax, Communication ARTC.
- Fredlund, D.G., et H. Rahardjo, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Toronto, Wiley, Interscience Publication.
- Fredlund, D.G., et A. Xing, 1994. « Equations for the Soil-water Characteristic Curve », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, p. 521-532.
- Fredlund, G, A. Xing, et S. Huang, 1994. « Predicting the Permeability Fonction for Unsaturated Soils using the Soil-water Characteristic Curve », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, p. 533-546.
- Gardner, W.R., 1958. « Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table », *Soil Science*, vol. 85, p. 228-232.
- Green, R.E., et J.C. Corey, 1971. « Calculation of Hydraulic Conductivity : A Further Evaluation of Some Predictive Methods », *Soil Science Society of America, Proceedings*, vol. 35, p. 3-8.
- Groupe de géotechnique de l'Université Laval, 1992. *Drainage des chaussées. Stratégie d'intervention et choix d'équipements d'essais et de recherche pour les infrastructures routières*, Annexe G, Rapport GCS-92-02.
- Hopmans, J.W., et B. Overmars, 1986. « Presentation and Application of an Analytical Model to Describe Soil Hydraulic Properties », *Journal of Hydrology*, vol. 87, p. 135-143.
- Hillel, D., 1980. *Fundamentals of Soil Physics*, New York, Academic Press.
- Irmay, S., 1954. « On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils », *Transaction of the American Geophysical Union*, vol. 35, p. 463-467.
- Jackson, R.A., 1972. « On the Calculation of Hydraulic Conductivity », *Soil Science Society of America, Proceedings*, vol. 36, p. 380-383.
- Jones, R.H., et H.A. Jones, 1989. « Keynote paper : Granular Drainage Layers in Pavement Foundations », *Unbound Aggregates in Roads 3*, London, Butterwoths, p. 55-69.
- Klute, A., 1965a. « Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil », *Methods of soils analysis*, Monographe 9, Madison, Wisconsin, Society of Agronomy, p. 253-261.
- Klute, A., 1965b. Water Capacity. *Methods of Soils Analysis*, Monographe 9, Madison, Wisconsin, Society of Agronomy, p. 273-278.
- Klute, A., 1972. « The Determination of the Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils », *Soil Science*, vol. 113, n° 4, p. 264-276.

- Kunze, R.J., G. Uehara, et K. Graham, 1968. « Factors Important in the Calculation of Hydraulic Conductivity » *Soil Science Society of America, Proceedings*, vol. 32, p. 760-765.
- Liu, S.L., J.K. Jeyapalan, et R.L. Lytton, 1983. « Characteristics of Base and Subgrade Drainage of Pavements », *Transportation Research Record*, vol. 945, p. 1-10.
- Marshall, T.J., 1958. « A Relation Between Permeability and Size Distribution of Pores », *Journal of Soil Science*, vol. 9, n° 1, p. 1-8.
- Markow, M.J., 1982. « Simulating Pavement Performance under Various Moisture Conditions », *Transportation Research Record 849*, p. 24-29.
- Millington, R.J., et J.P. Quirk, 1961. « Permeability of Porous Solids », *Transaction of the Faraday Society*, vol. 57, p. 1200-1207.
- Ministère des transports du Québec, LC-23-322, 1987. *Mesure de la perméabilité d'un sol granulaire dans un moule Proctor ou CBR*. Procédure du Laboratoire des chaussées, Québec.
- Ministère des transports du Québec, LC-22-330, 1993. *Potentiel de succion*. Procédure du Laboratoire des chaussées, Québec.
- Mualem, Y., 1976. « A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media », *Water Resources Research*, vol. 12, n° 3, p. 513-522.
- Murray, E.J., 1995. « Prediction of Permeability of Granular Materials », *Unbound Aggregates in Roads 4*, University of Nottingham, p. 61-70.
- Nielsen, D.R., et al., 1972. *Soil Water*, Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy and Soil Science.
- Norme nationale du Canada, 1986. *Sols – Détermination de la relation teneur en eau – masse volumique. Essai Proctor modifié*, CAN/BNQ 2501-255-M-86.
- Paquet, M., 1994. *Couche drainante et gel-dégel des fondations granulaires*. Rapport de stage, Québec, ministère des Transports du Québec, Direction du laboratoire des chaussées.
- Paute, J.L., 1990. « Utilisation des tensiomètres dans les chaussées », *Bulletin de liaison*, n° 168, p. 39-44.
- Pooh, P.S.H., 1992. « Moisture Content Determination of Unbound and Subgrade Materials in a Pavement Structure », *Proceedings of the 4th International Conference, Bearing Capacity of Roads and Airfield*, Minneapolis, Minnesota, p. 807-820.
- Rimbault, G., 1986a. « Cycles annuels d'humidité dans une chaussée souple et son support », *Bulletin de liaison*, n° 145, p. 79-84.

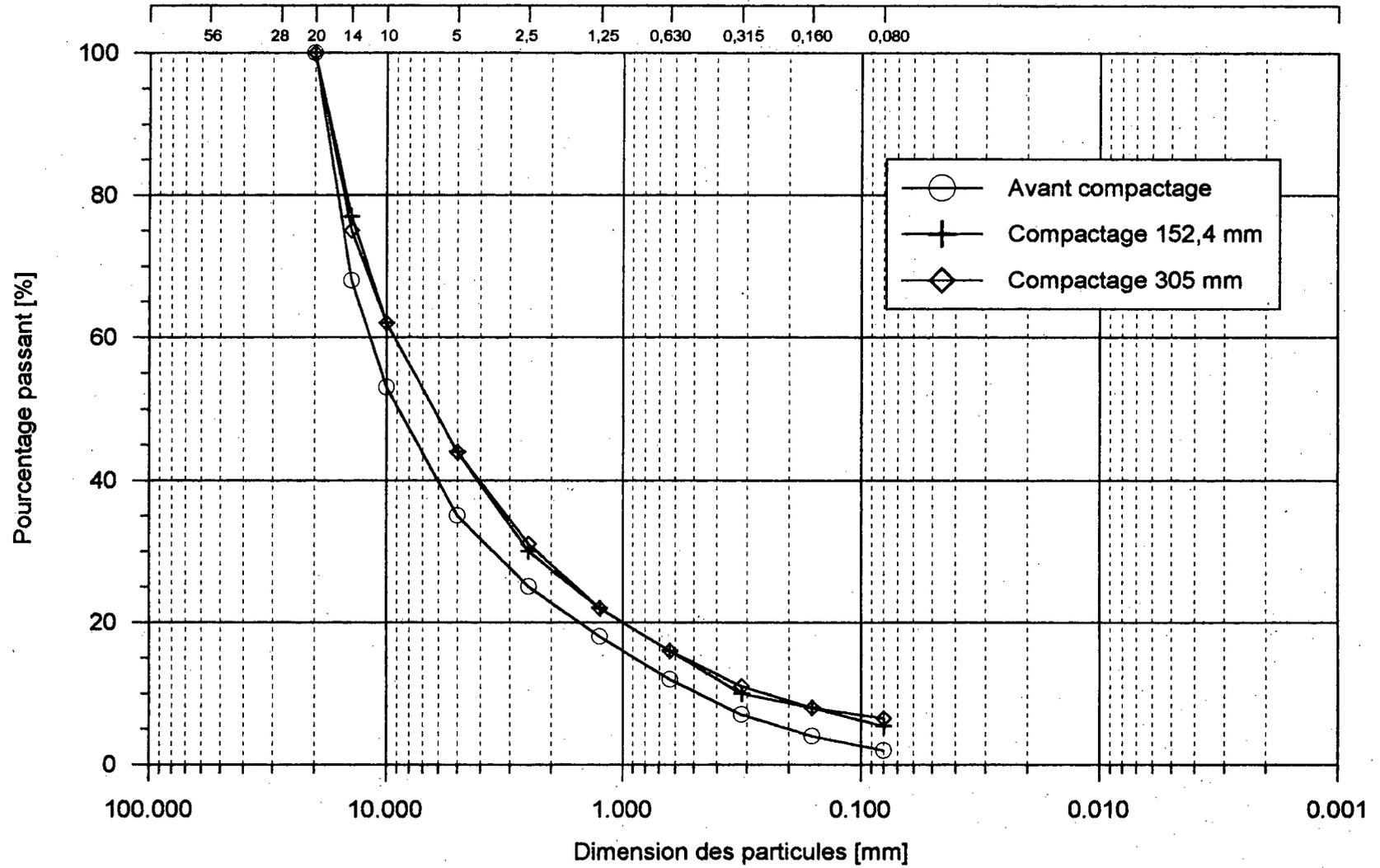
- Raimbault, G., 1986b. « Diffusivité et conductivité hydraulique de matériaux ou sols non saturés en eau », *Bulletin de liaison*, n° 145, p. 61-68.
- Raimbault, G., et P. Sylvestre, 1990. « Analyse des variations d'état hydrique dans les chaussées », *Bulletin de liaison*, n° 167, p. 77-84.
- Richards, L.A., 1931. « Capillary Conduction of Liquids through Porous Medium », *Physics*, vol. 1, p. 318-333.
- Rogowski, A.S., 1971. « Watershed Physics : Model of the Soil Moisture Characteristics », *Water Resources Research*, vol. 7, n° 6, p. 1575-1582.
- Rogowski, A.S., 1972. « Estimation of the Soil Moisture Characteristic and Hydraulic Conductivity : Comparison of Models » *Soil Science*, vol. 114, n° 6, p. 423-429.
- Savard, Y., 1995. *Les développements en drainage des chaussées à Transports Québec*, 31^e Congrès annuel, Association québécoise du transport et des routes inc., p. 125-149.
- Setiawan, B.I, et M. Nakano, 1993. « On the Determination of Unsaturated Hydraulic Conductivity from Soil Moisture Profiles and from Water Retention Curves » *Soil Science*, vol. 156, n° 6, p 389-395.
- Skempton, A.W., et D.J. Henkel, 1960. *Field Evaluation on Pore Pressures in London Clay. Pore Pressure and Suction in Soils*, London, Butterworths.
- Stephens, D.B., et K.R. Rehfeldt, 1985. « Evaluation of Closed Form Analytical Models to Calculate Conductivity in a Fine Sand », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, p. 12-19.
- Saint-Laurent, D., M. Roy, et G. Bergeron, 1995. *Variations saisonnières de la portance des chaussées souples : une étude avec le FWD*, 30^e Congrès annuel, Association québécoise du transport et des routes inc., p. 52-73.
- Tektronix, 1990. *1502C Metallic Time Domain Reflectometer. Operator Manual*, Oregon, Tektronic, inc.
- Thompson, O.O., 1969. *Evaluation of Flexible Pavement Behavior with Emphasis on the Behavior of Granular Layers*, Thèse de doctorat, University of Illinois.
- Topp, G.C., J.L. Davis, et A.P. Annan, 1980. « Electromagnetic Determination of Soil Water Content : Measurements in Coaxial Transmission Lines », *Water Resources Research*, vol. 16, n° 3, p. 574-582.
- Topp, G.C., J.L. Davis, et A.P. Annan, 1982. « Electromagnetic Determination of Soil Water Content Using TDR : 1. Applications to Wetting Front and Steep Gradient », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46, p. 672-678.

- Topp, G.C. et J.L. Davis, 1985. « Measurement of Soil Water Content Using TDR : A Field Evaluation », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, p. 19-24.
- User's guide, 1994. *SEEP/W*, version 3, Calgary, Geo-Slope International Ltd.
- Van Genuchten, M.T., 1980. « A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils », *Soil Science Society of America, Proceedings*, vol. 30, p. 156-162.
- Vachaud, G., 1969. « Analyse des profils hydriques et détermination de $k(\theta)$ », *Bulletin du bureau de recherches géologiques et minières*, 2^e série, section III, n° 4, p. 101-105.
- 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.
- Yong, R.N. et B.P. Warkentin, 1966. *Introduction to Soil Behavior*, New York, Macmillan Series in Civil Engineering/Gene Nordby, editor.

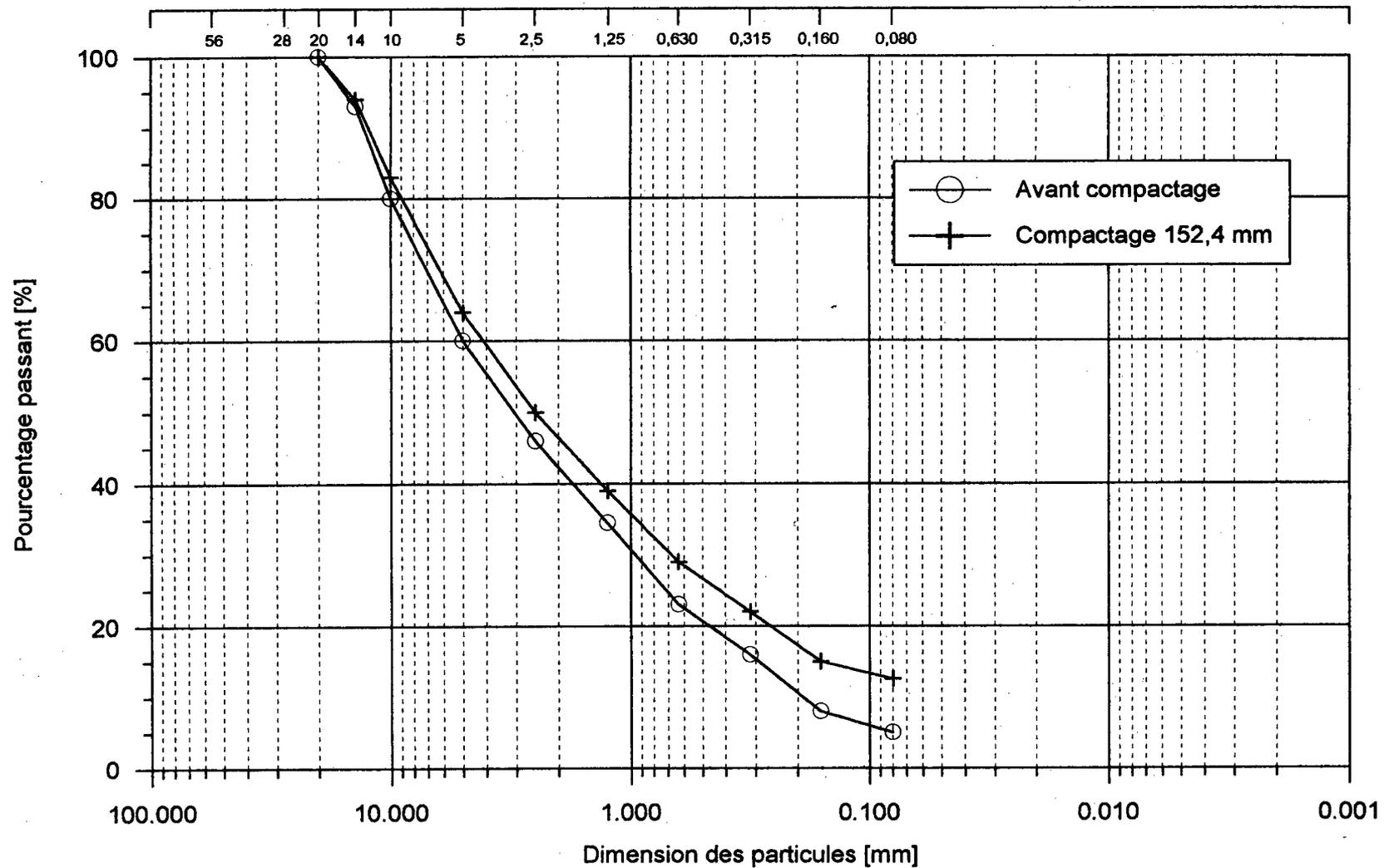
**COURBES GRANULOMÉTRIQUES AVANT ET APRÈS
LE COMPACTAGE DES MATÉRIAUX**



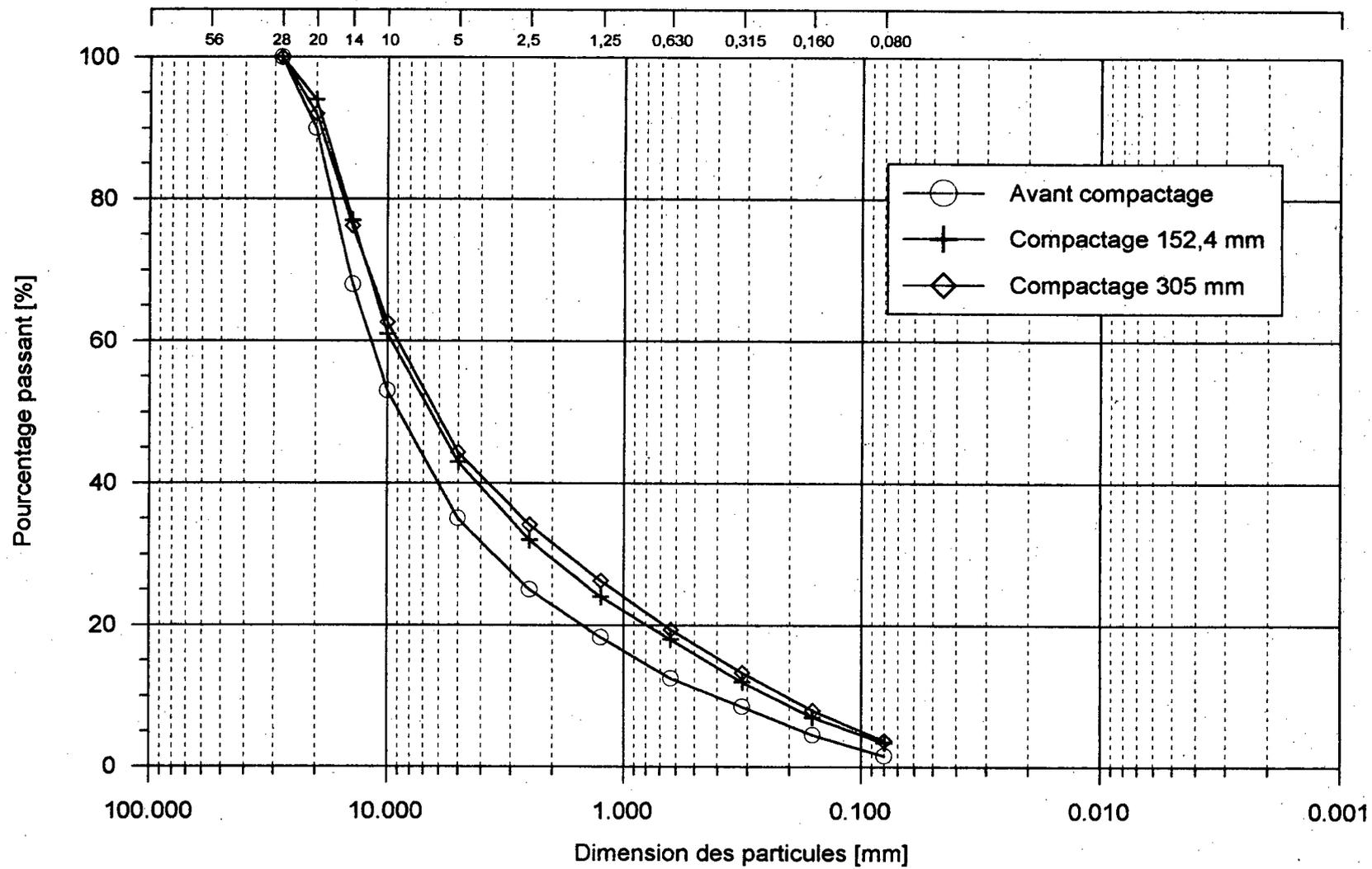
A-1 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau calcaire SM2 % 0 (premier échantillonnage)



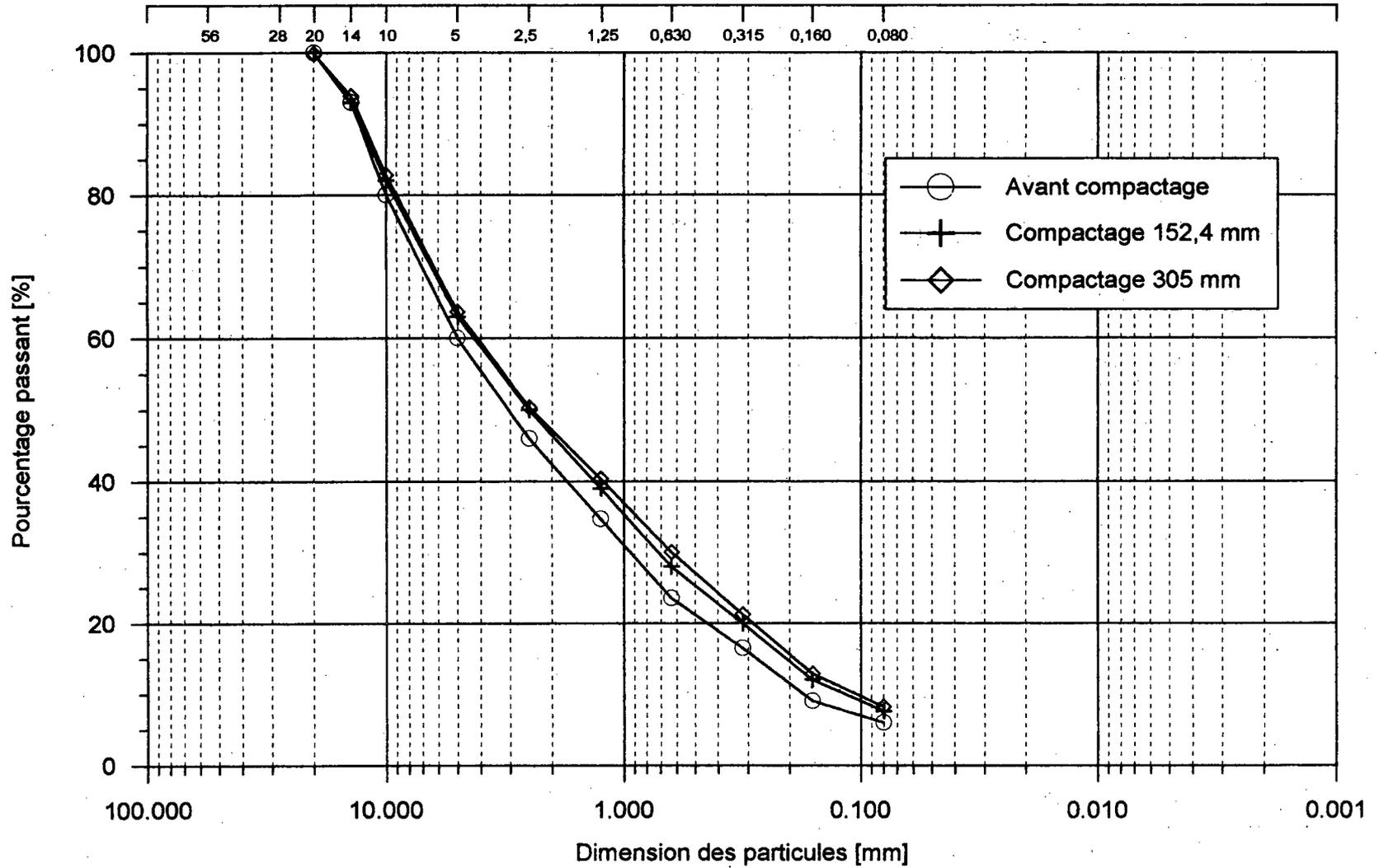
A-2 Courbes granulométriques avant et après le compactage des matériaux calcaires SM2 % 1 et SM2 % 2 (deuxième échantillonnage)



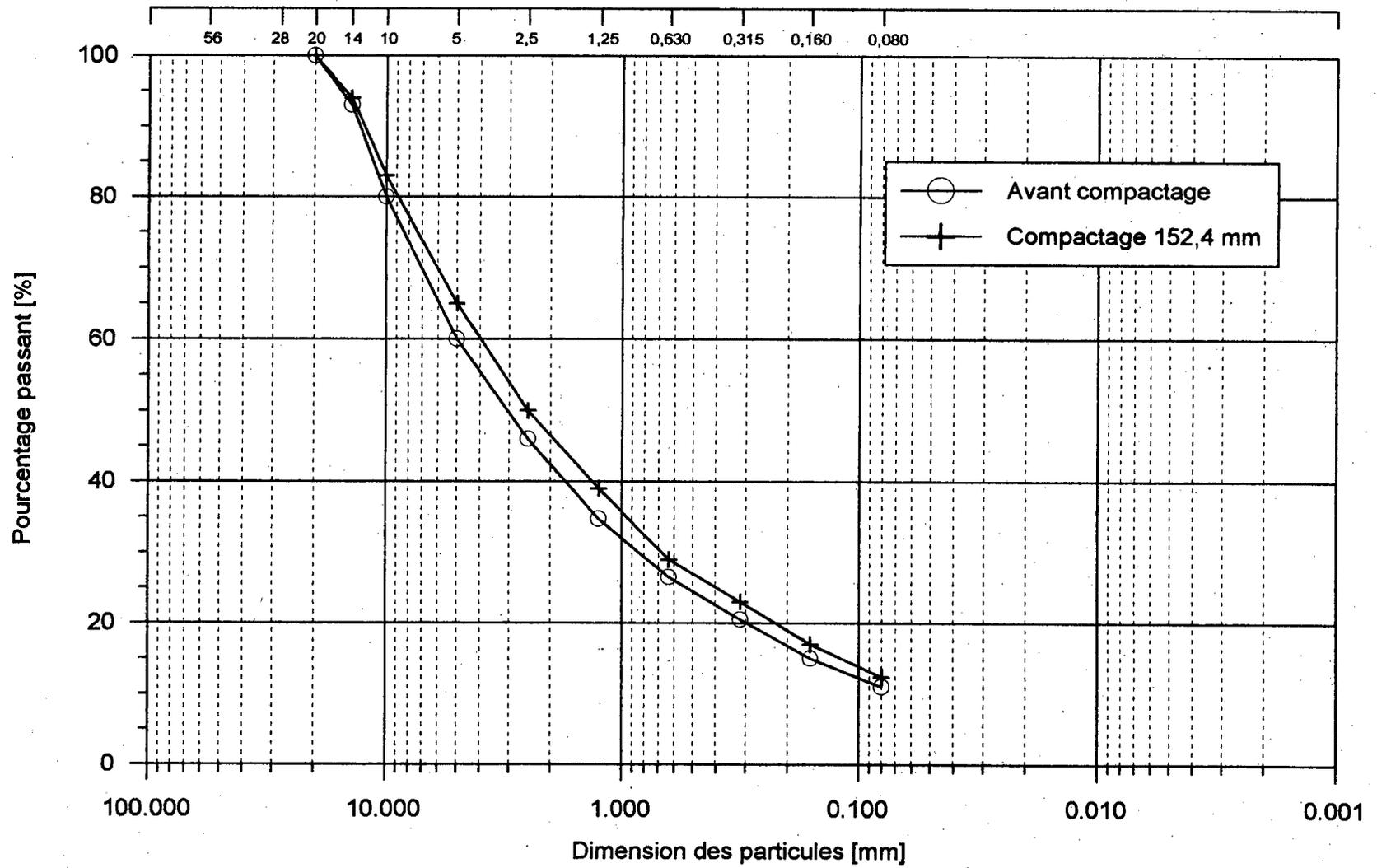
A-3 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau calcaire SM7 % (premier échantillonnage)



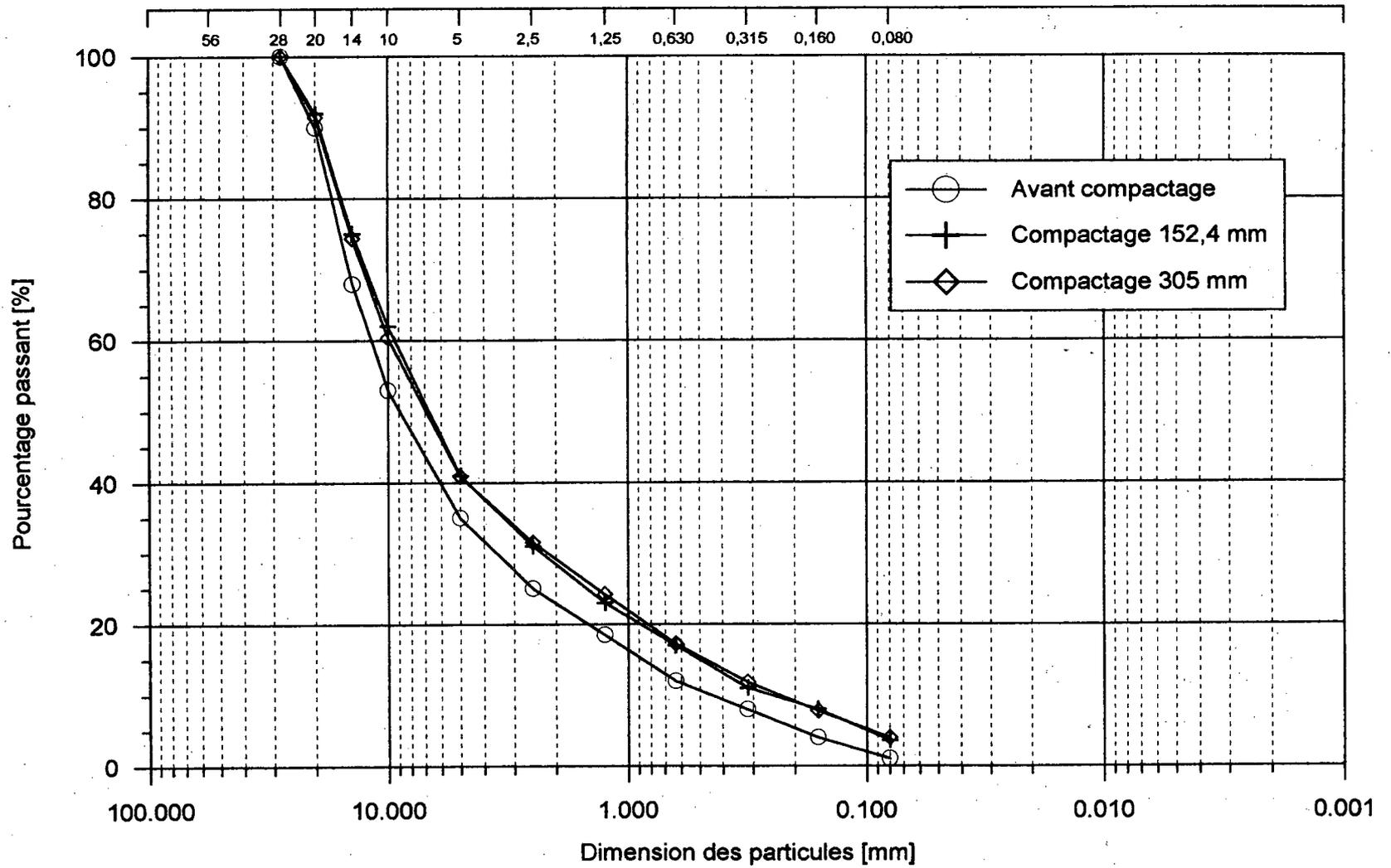
A-4 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériaux granitique VC2 %



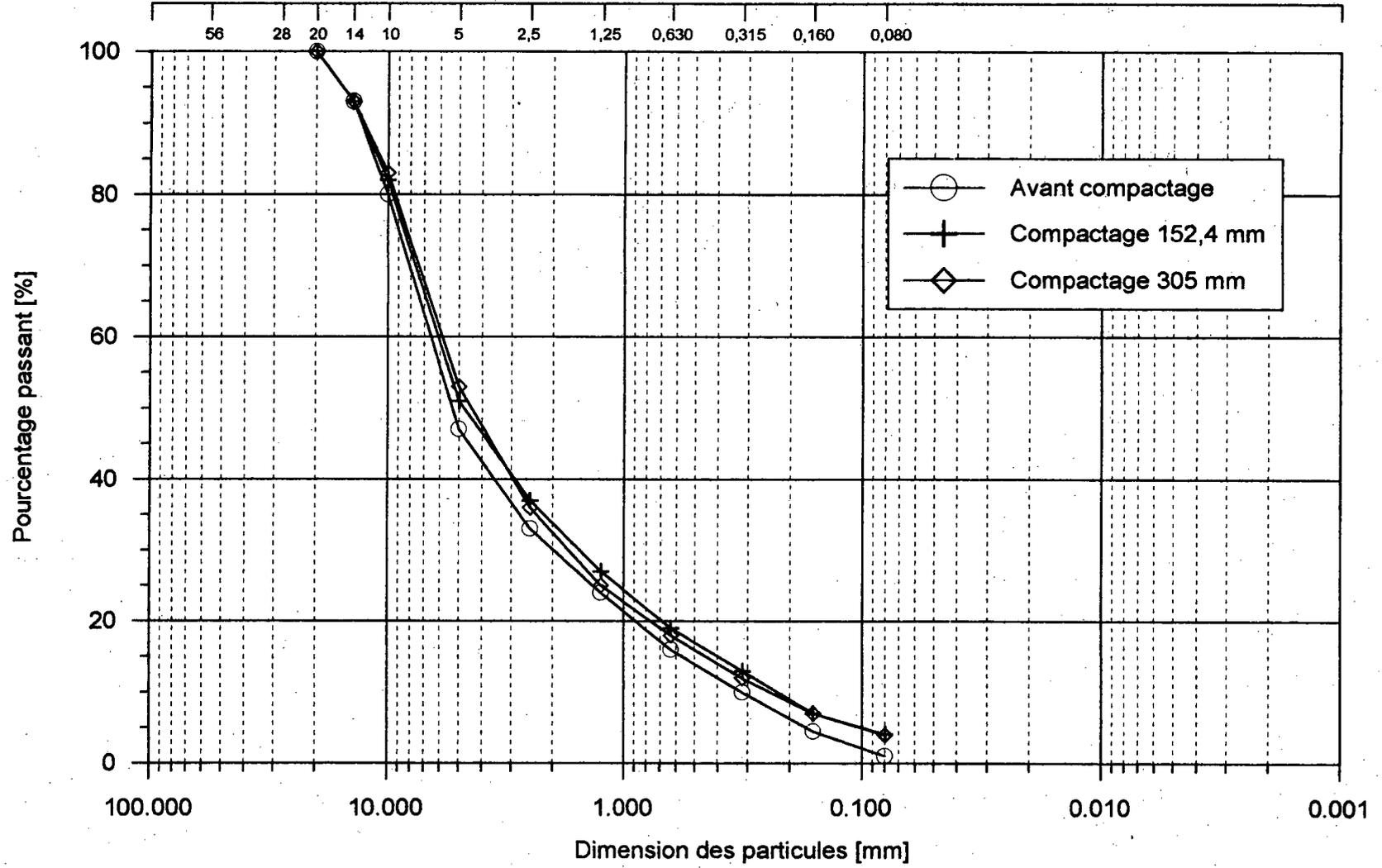
A-5 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VC7 %



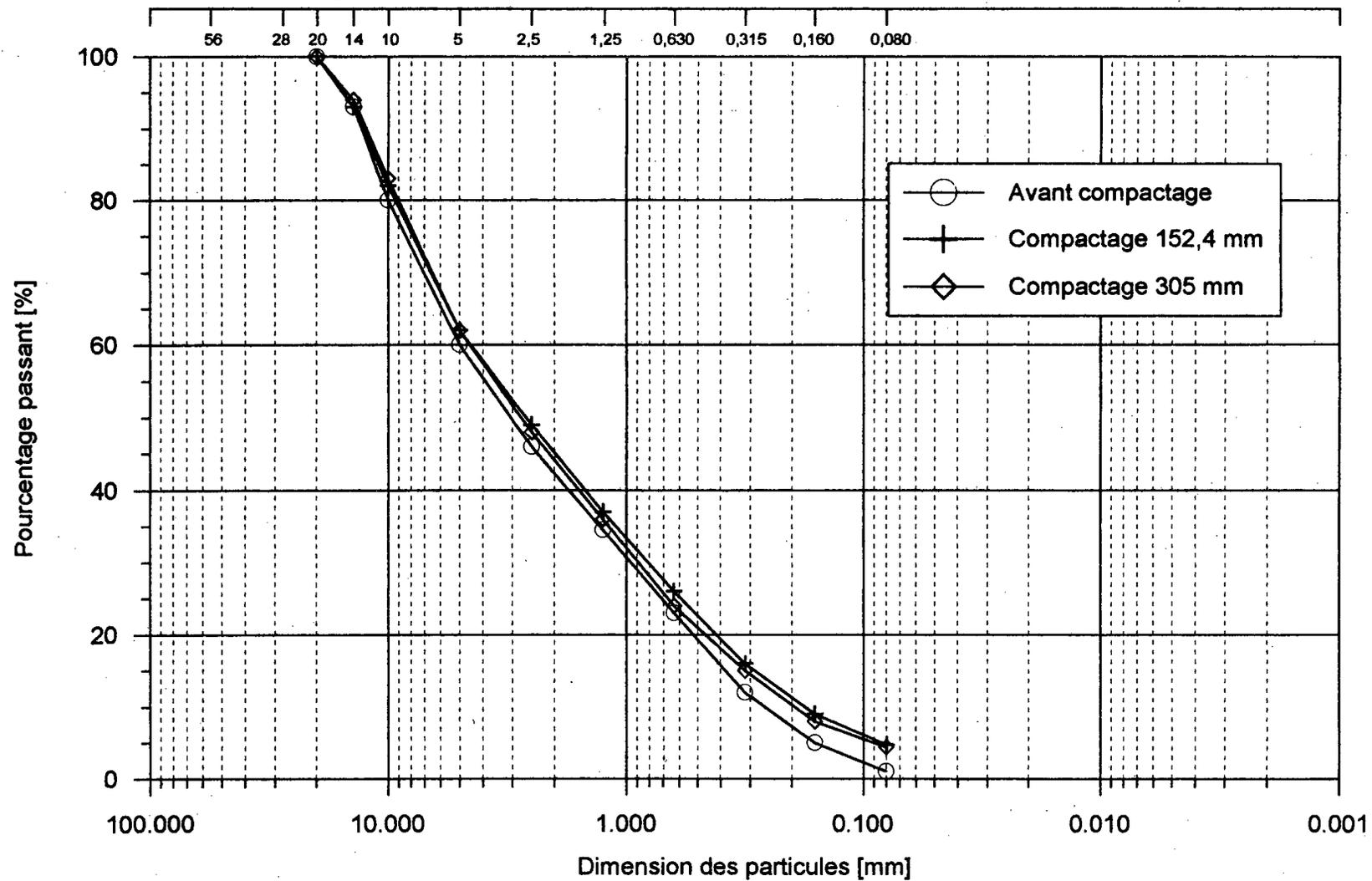
A-6 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VC12 %



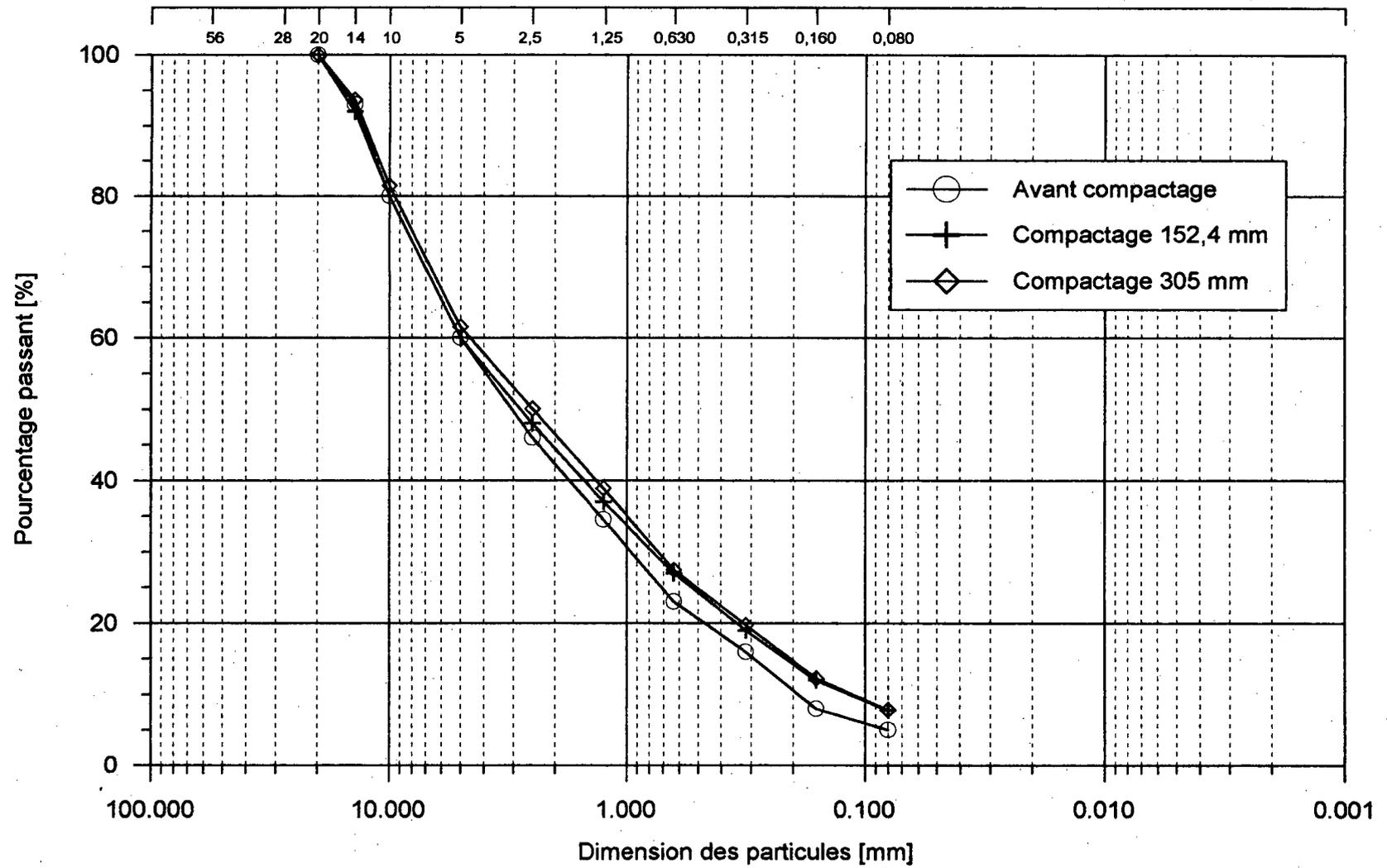
A-7 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ2 %



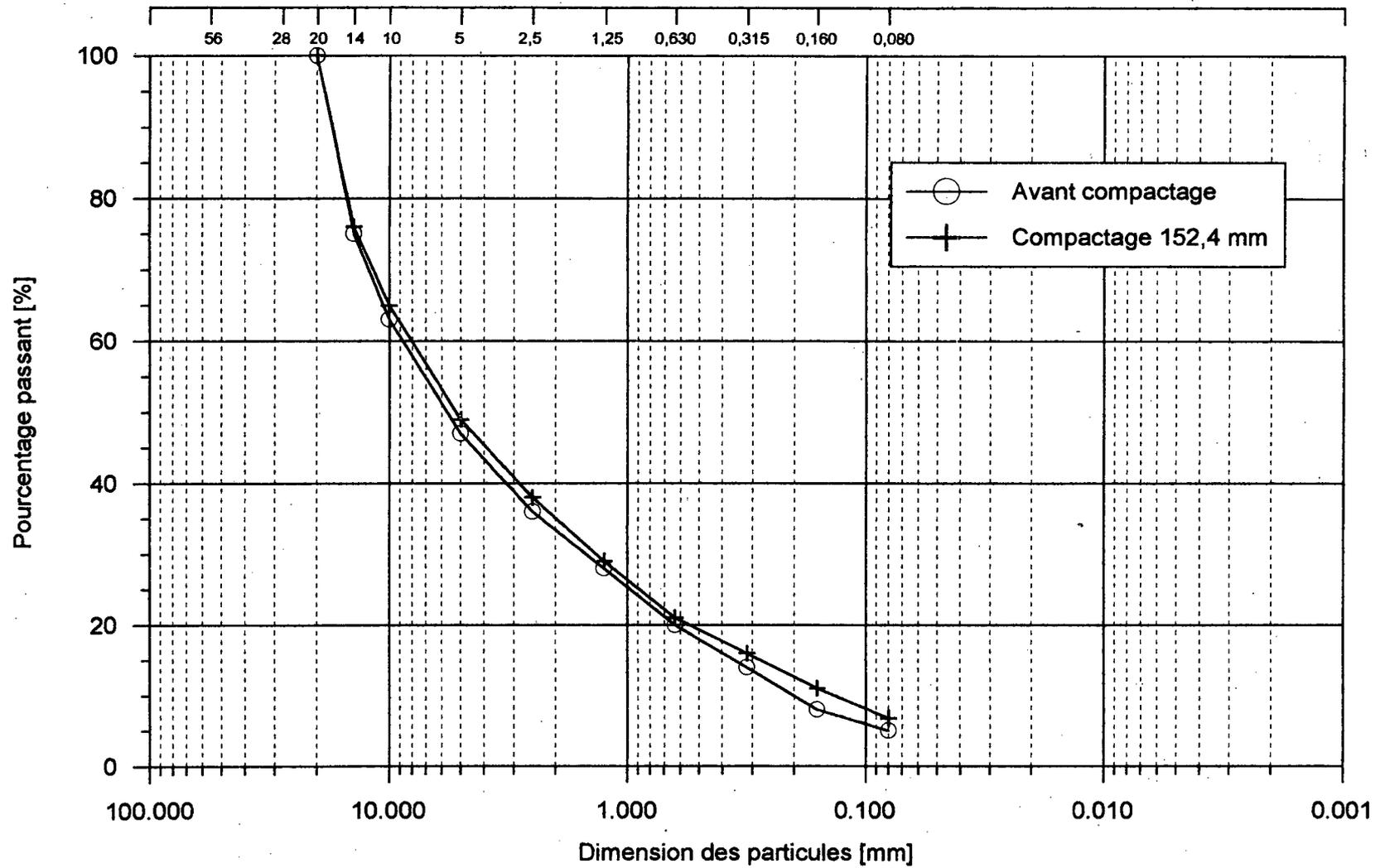
A-8 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ2M %



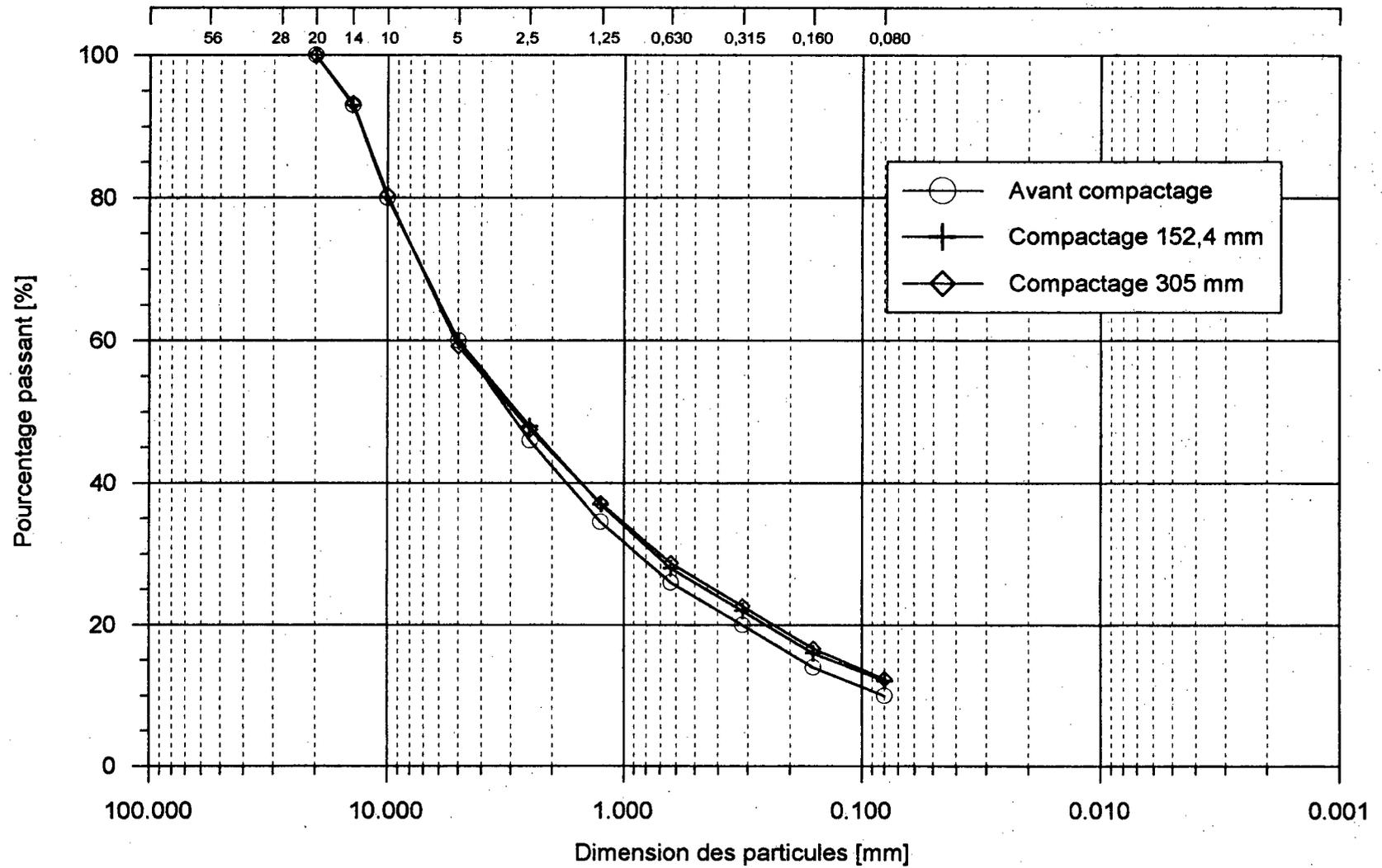
A-9 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ2H %



A-10 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ7 %



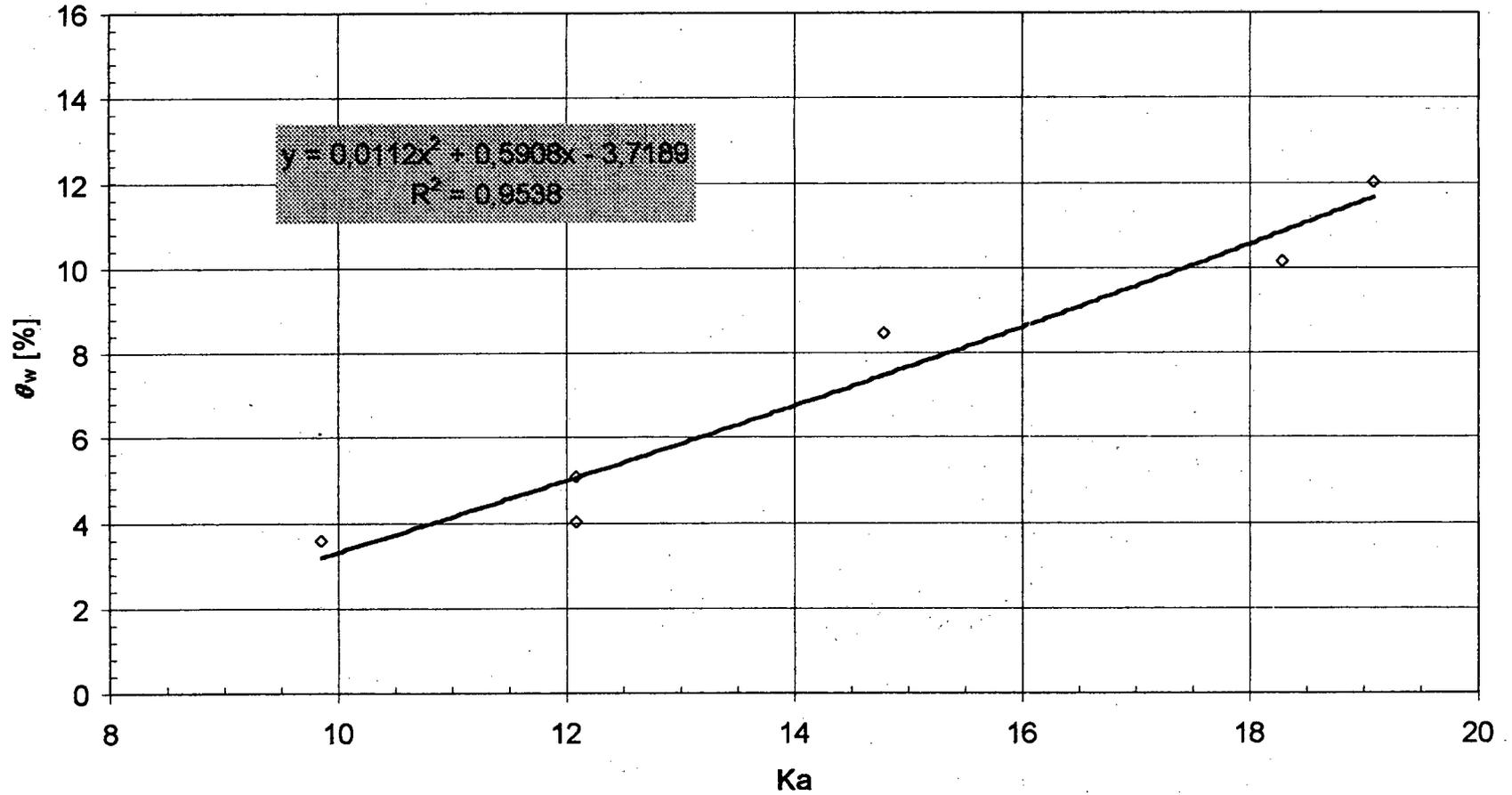
A-11 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ7 %M



A-12 Courbes granulométriques avant et après le compactage du matériau granitique VJ12 %

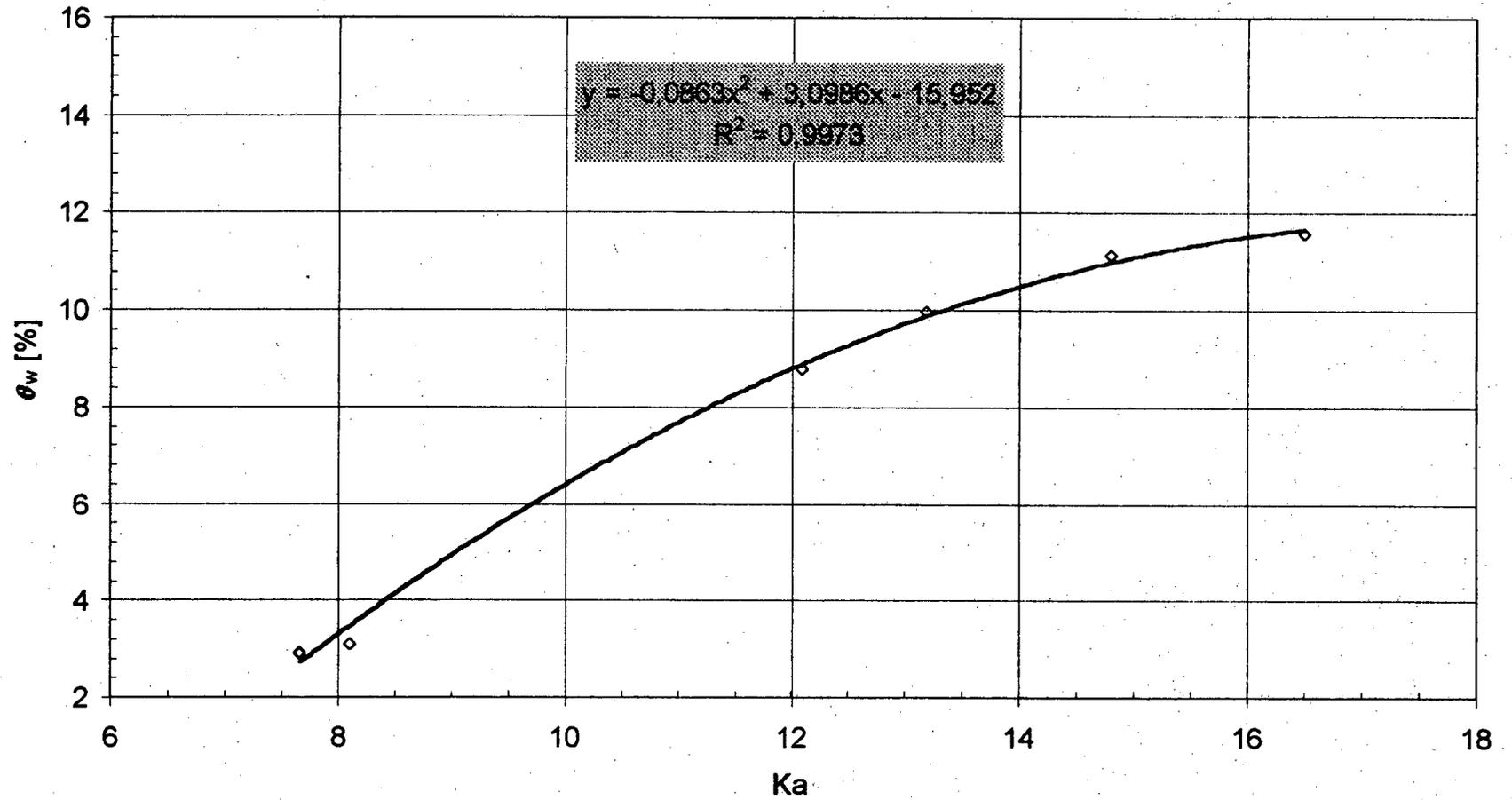
COURBES D'ÉTALONNAGE DES SONDÉS TDR

Calibration TDR St-Marc 2 %



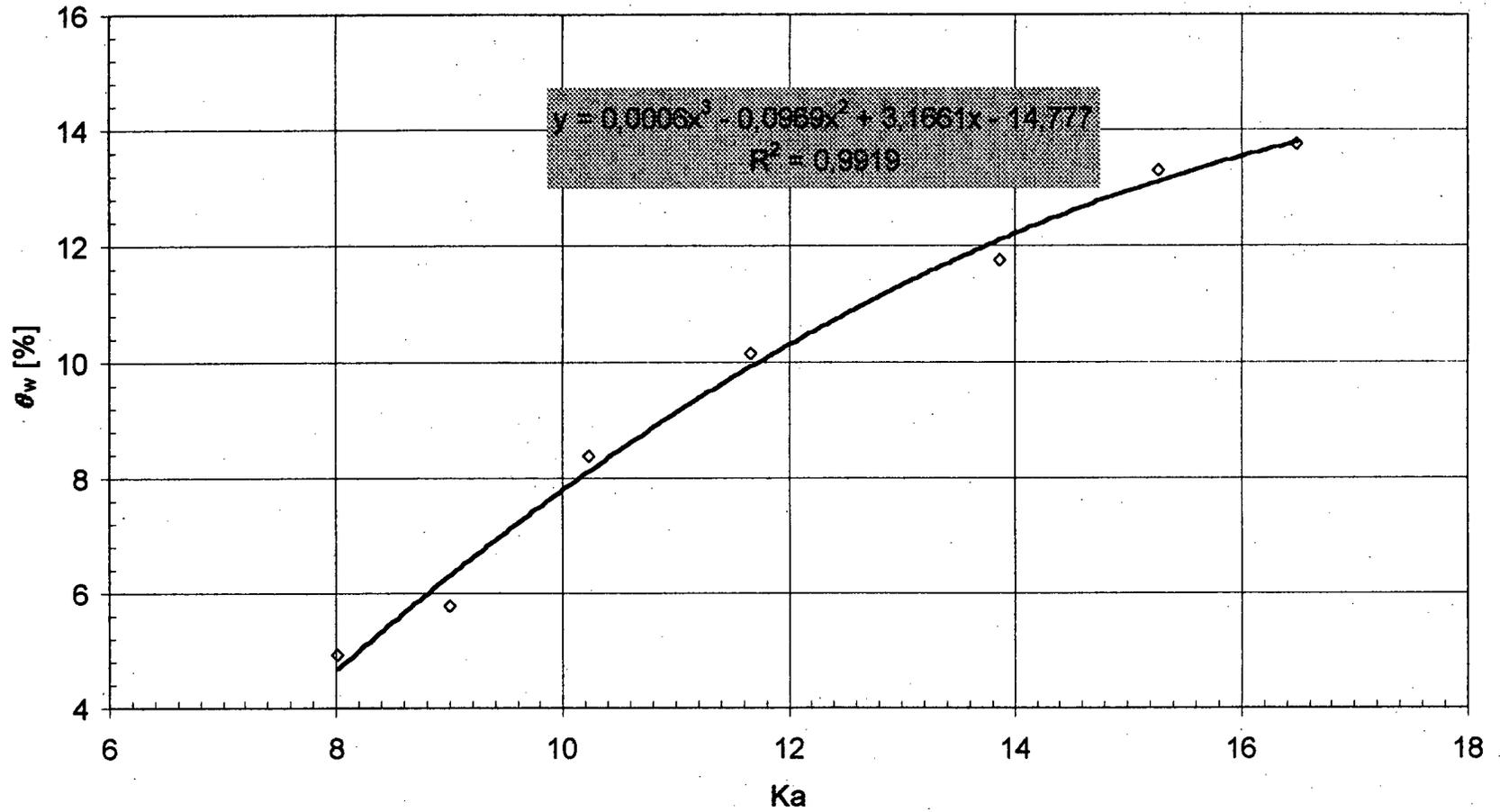
B-1 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau SM2 %

Calibration TDR Vallée-Jonction 2 %



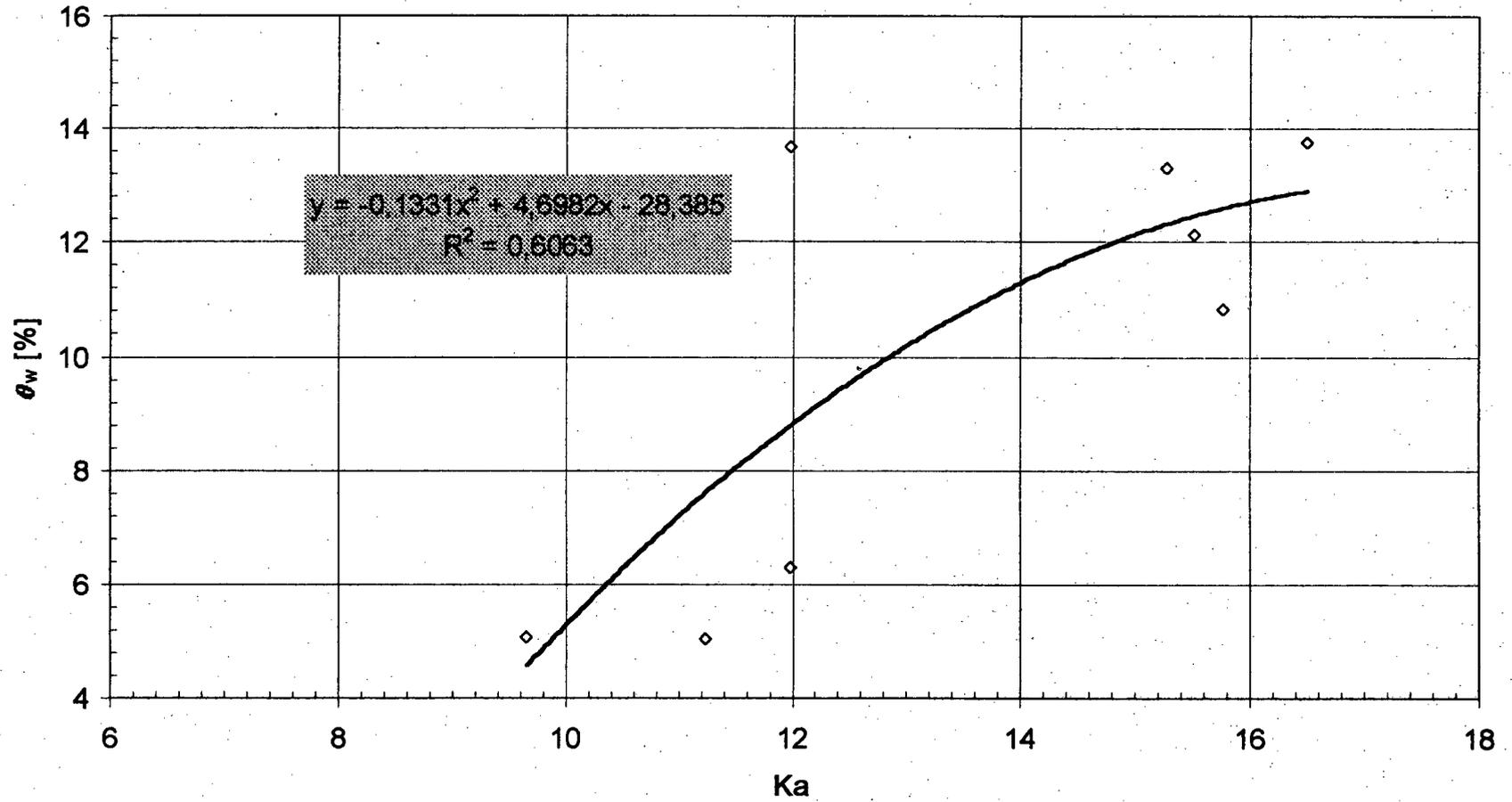
B-2 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VJ2 %

Calibration TDR Vallée-Jonction 7 %



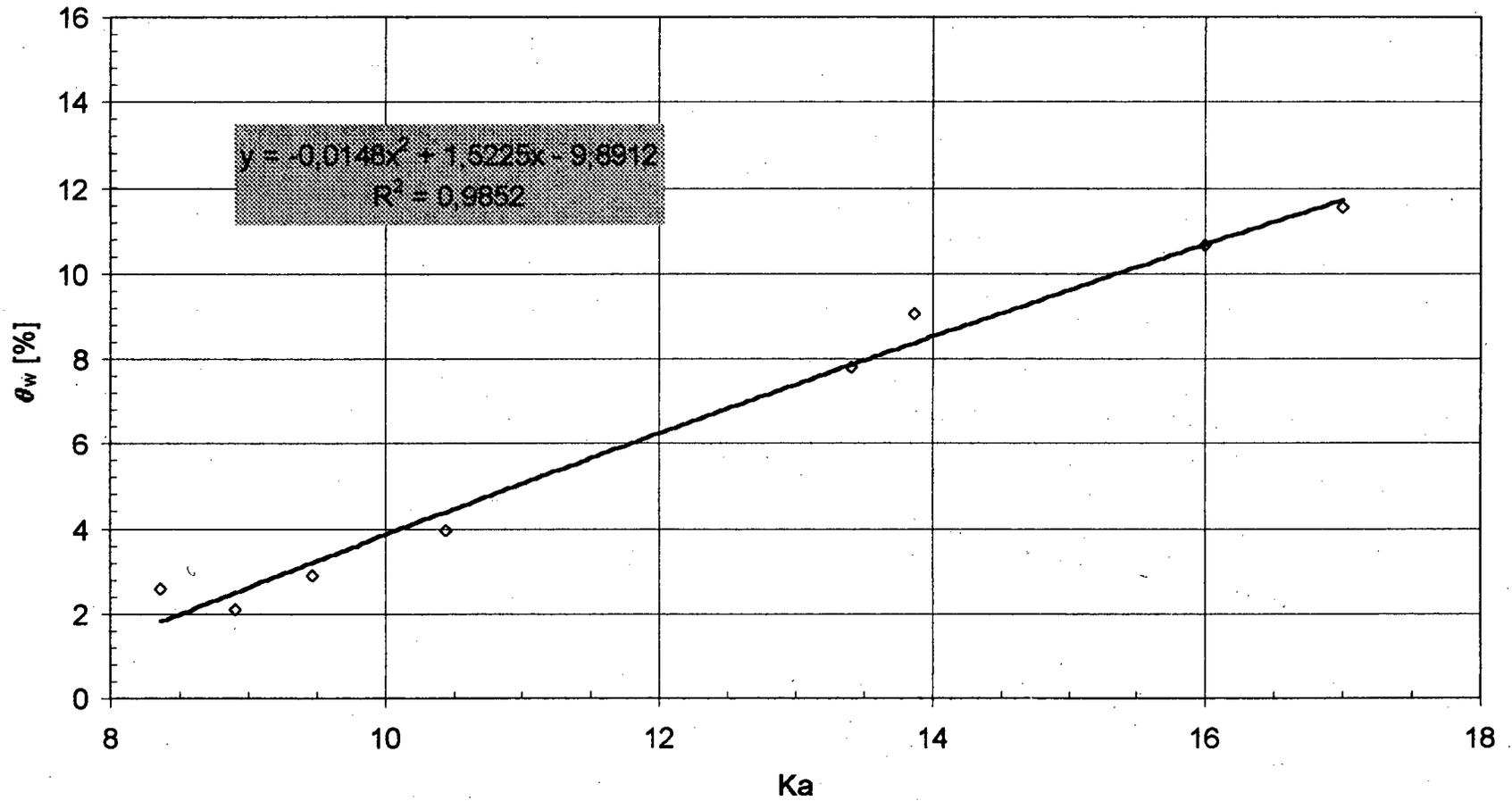
B-3 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VJ7 %

Calibration TDR Vallée-Jonction 12 %



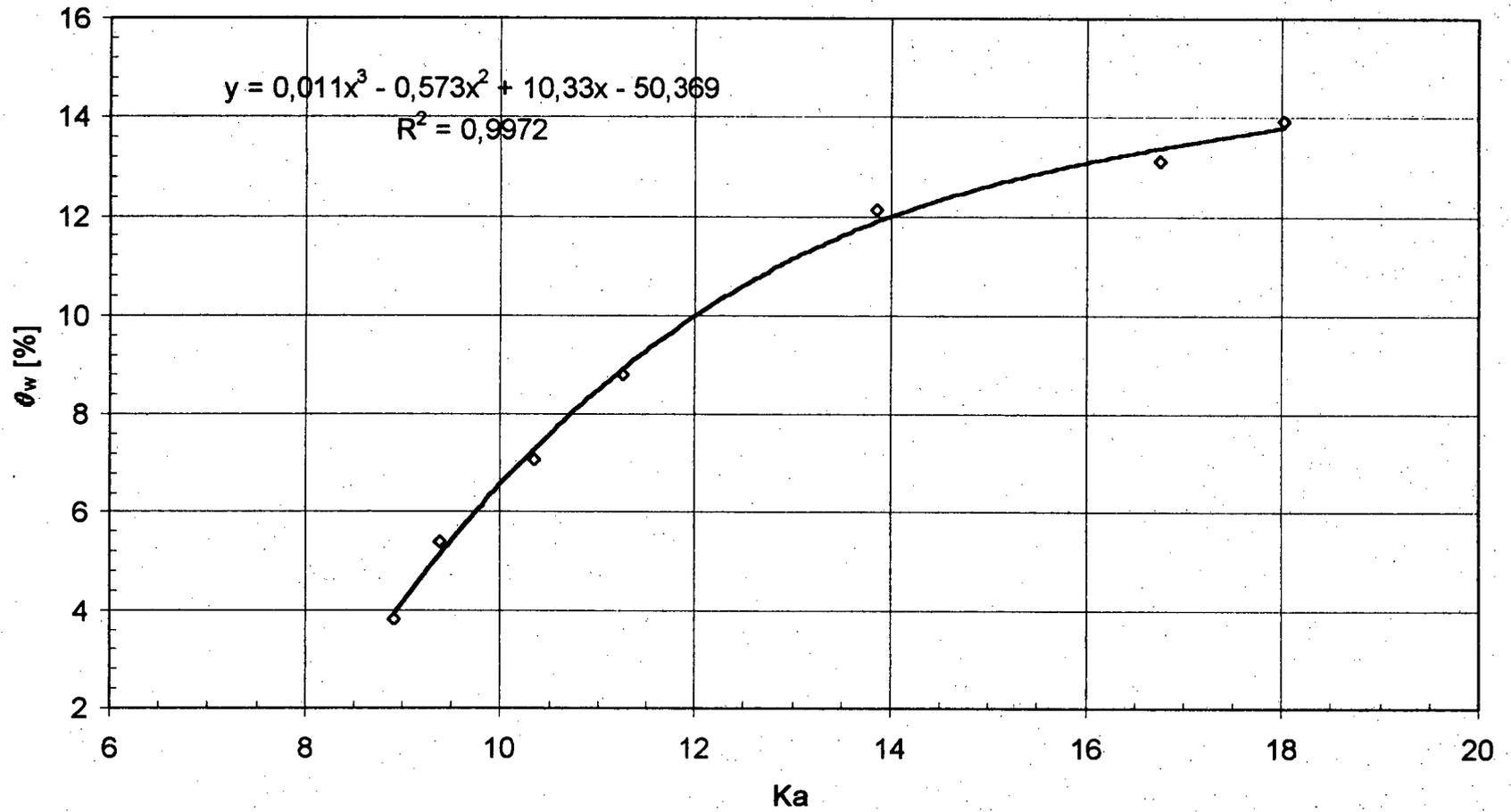
B-4 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VJ12 %

Calibration TDR Valcartier 2 %



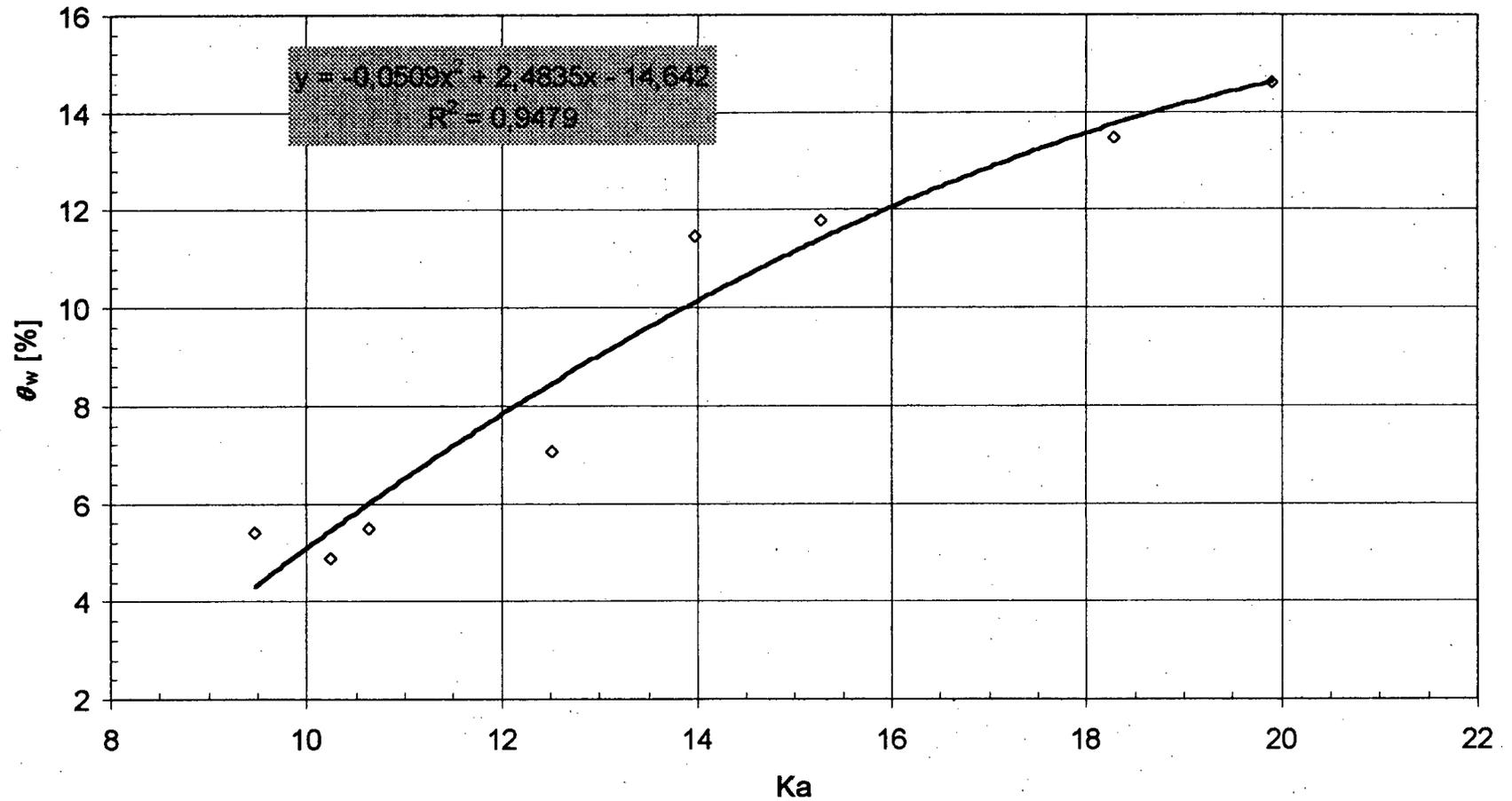
B-5 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VC2 %

Calibration TDR Valcartier 7 %



B-6 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VC7 %

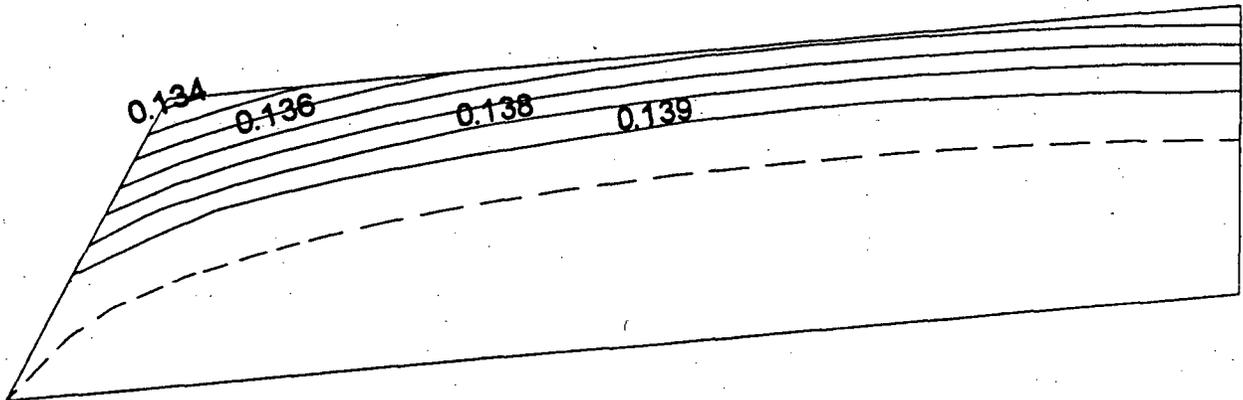
Calibration TDR Valcartier 12 %



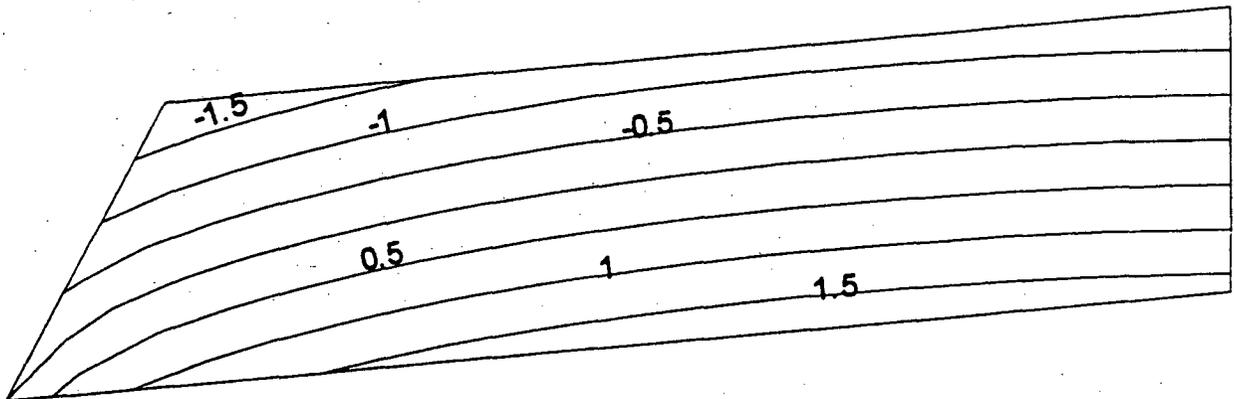
B-7 Étalonnage de la sonde TDR dans le cas du matériau VC12 %

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

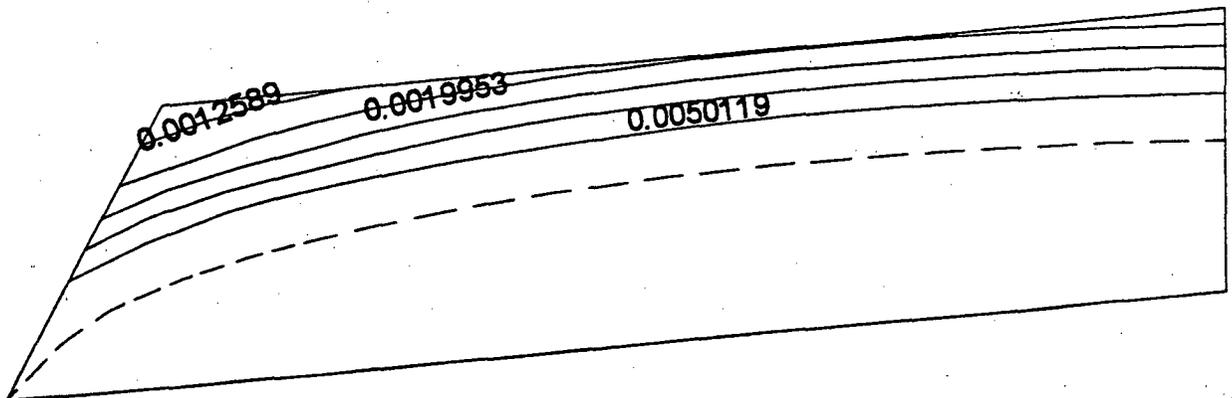
Teneurs en eau



Pressions interstitielles (kPa)

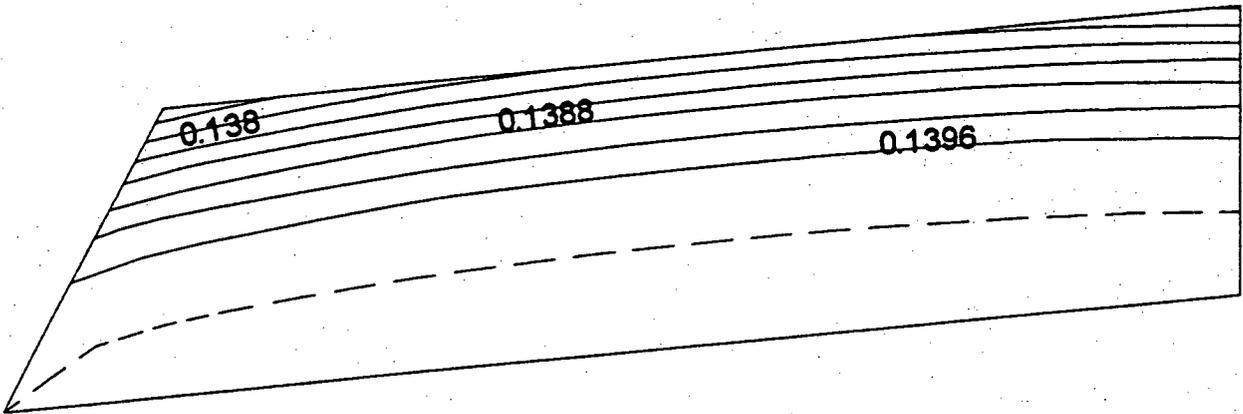


Conductivités hydrauliques (m/j)

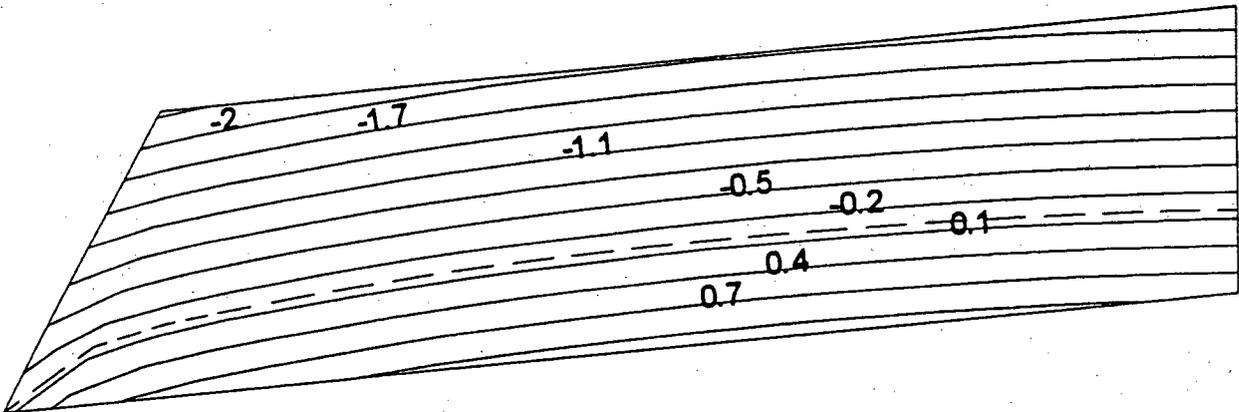


C-1 Simulation numérique lorsque $\theta_r^* = 5,3 \%$, $k_s = 1E-5$ cm/s et $\psi_e = 1$ kPa

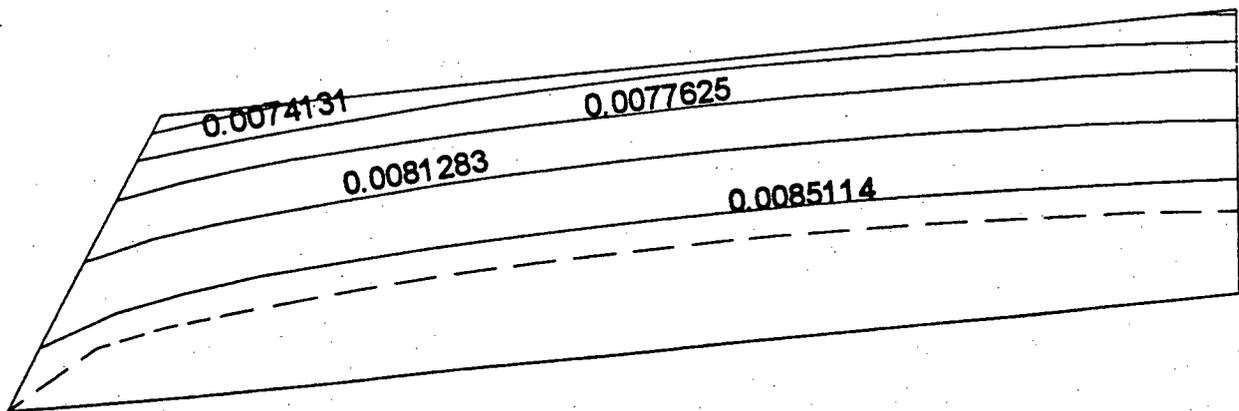
Teneurs en eau



Pressions interstitielles (kPa)

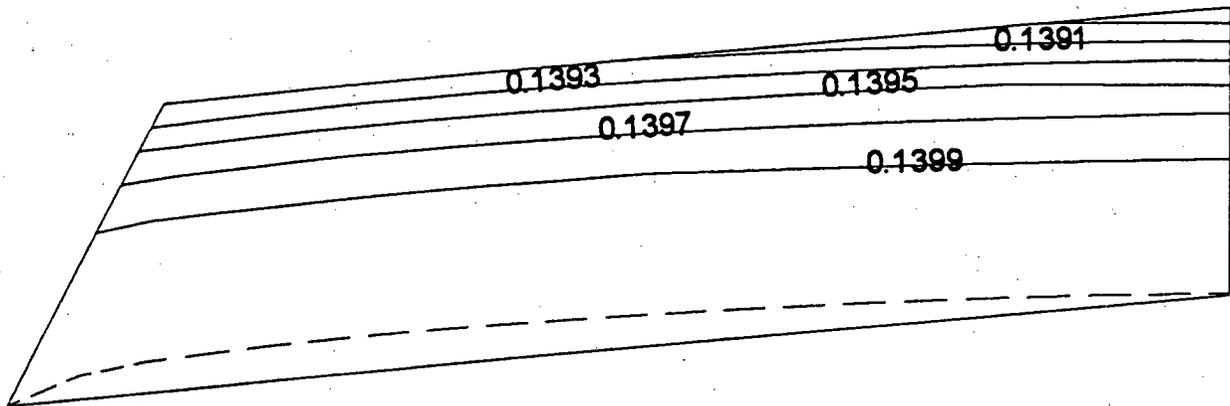


Conductivités hydrauliques (m/j)

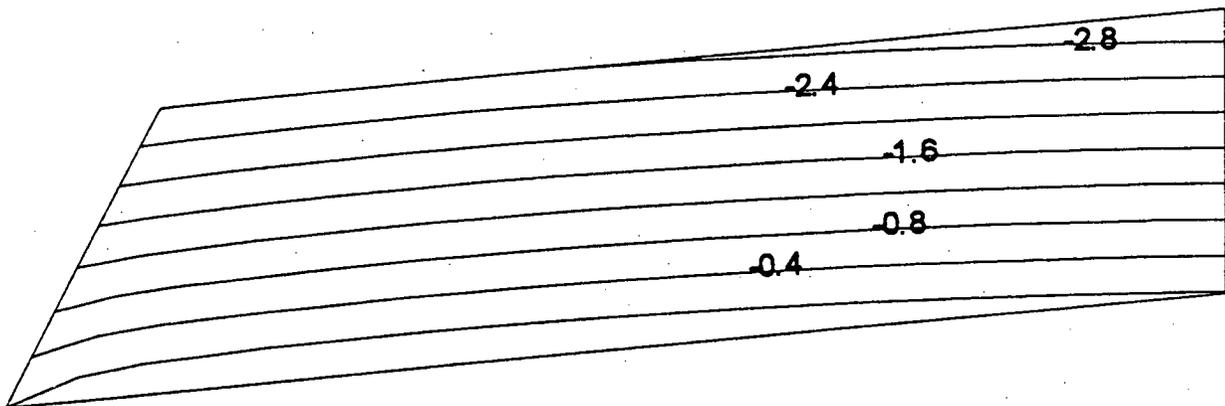


C-2 Simulation numérique lorsque $\theta^*_r = 5,3 \%$, $k_s = 1E-5$ cm/s et $\psi_e = 3$ kPa

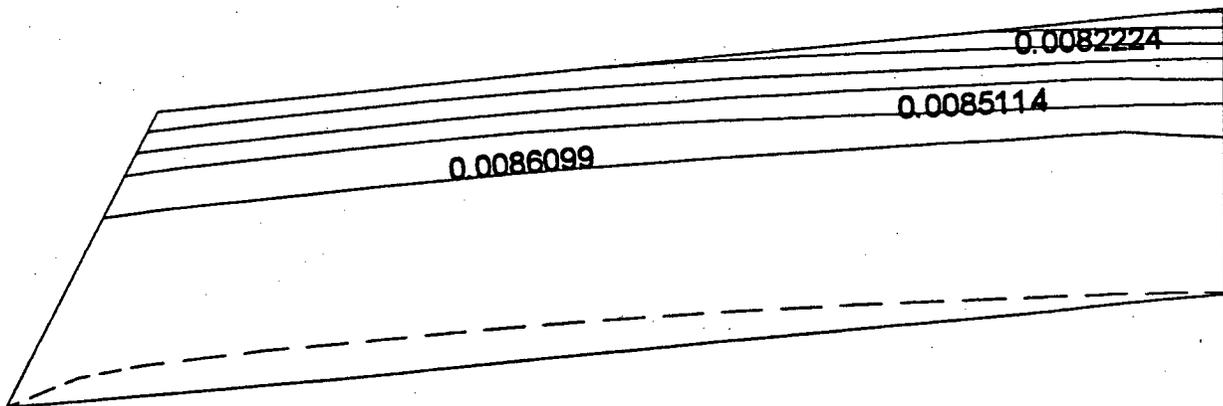
Teneurs en eau



Pressions interstitielles (kPa)

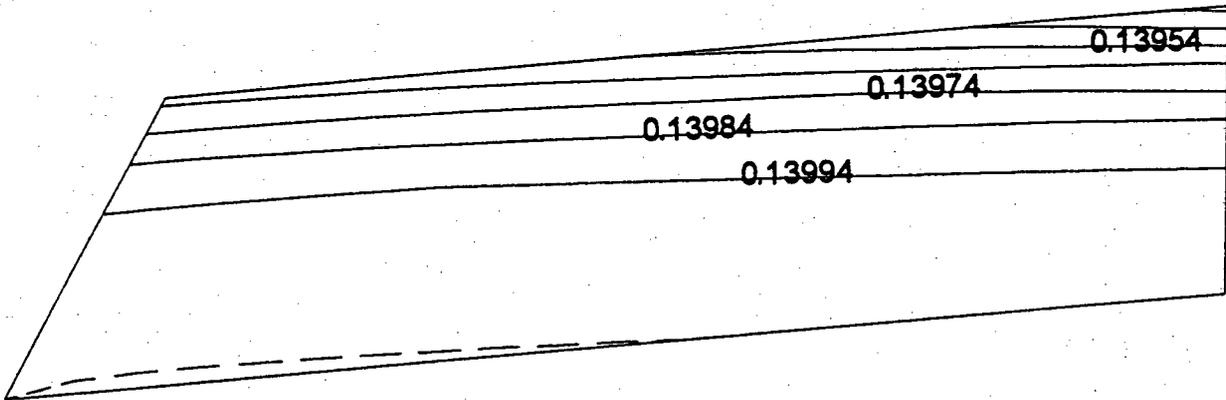


Conductivités hydrauliques (m/j)

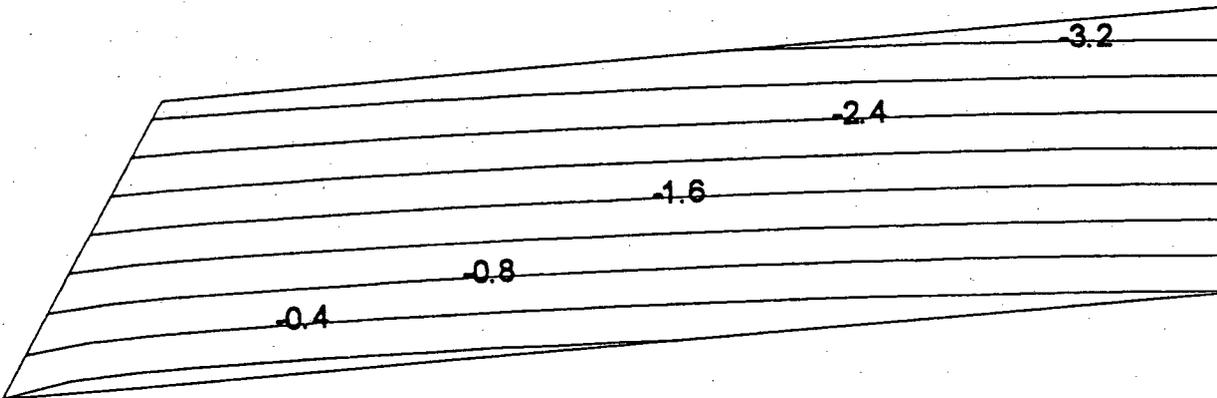


C-3 Simulation numérique lorsque $\theta_r^* = 5,3 \%$, $k_s = 1E-5$ cm/s et $\psi_e = 5$ kPa

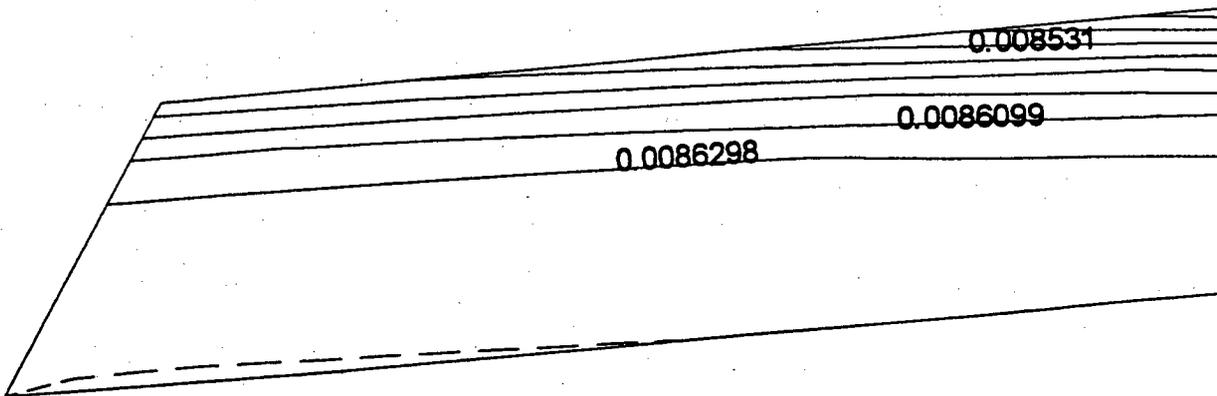
Teneurs en eau



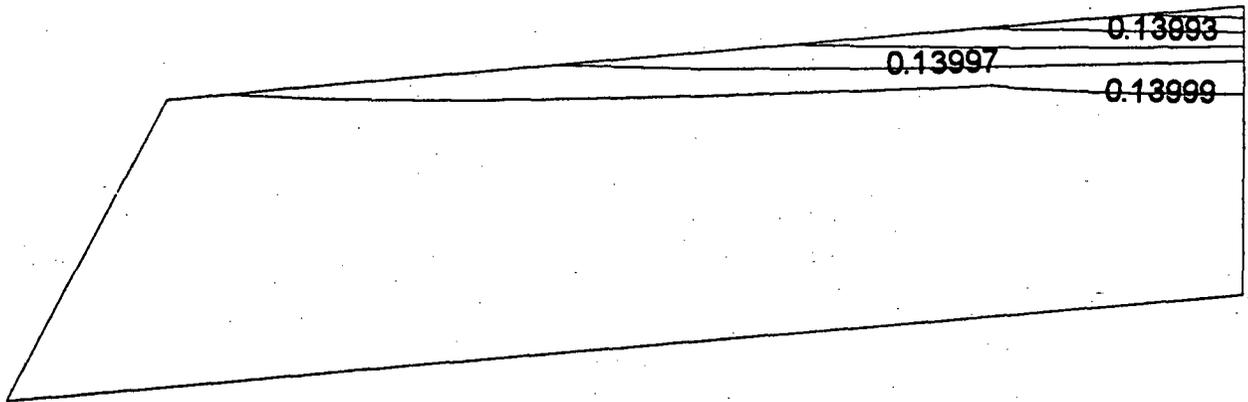
Pressions interstitielles (kPa)



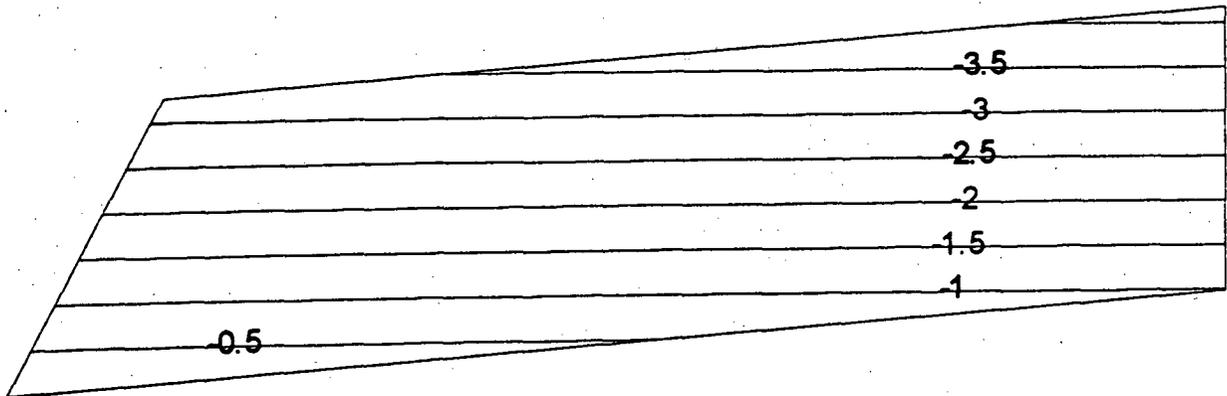
Conductivités hydrauliques (m/j)



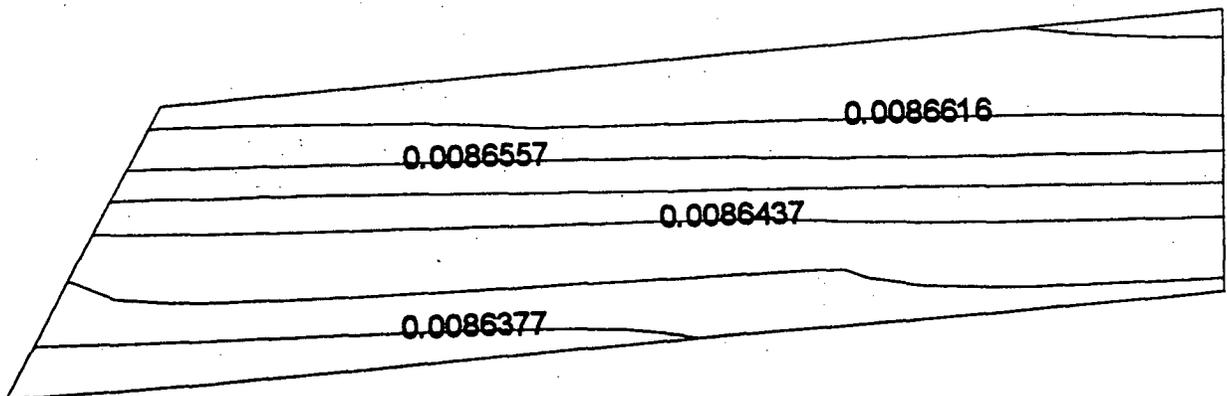
Teneurs en eau



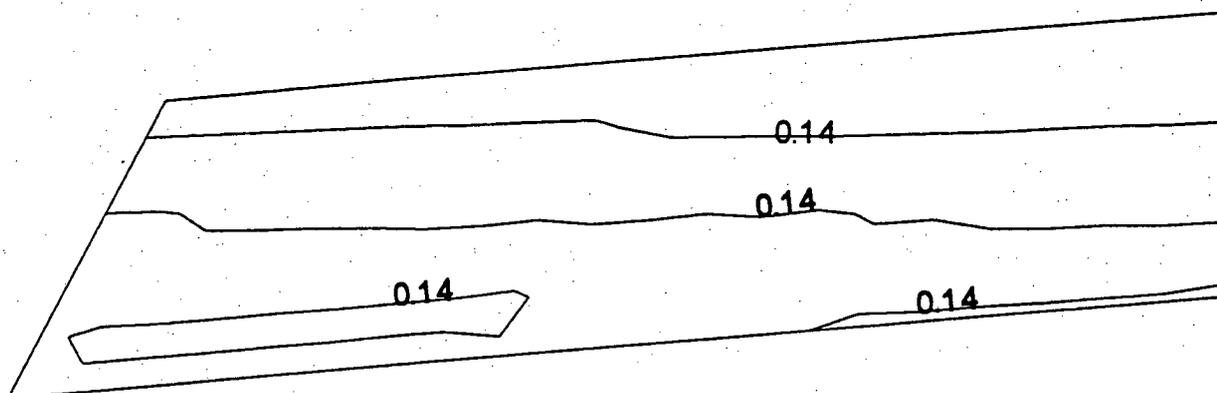
Pressions interstitielles (kPa)



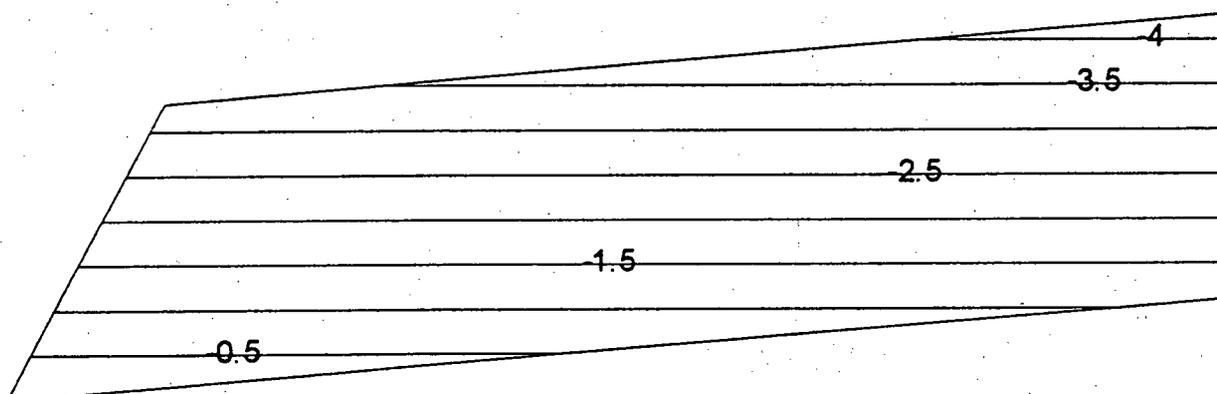
Conductivités hydrauliques (m/j)



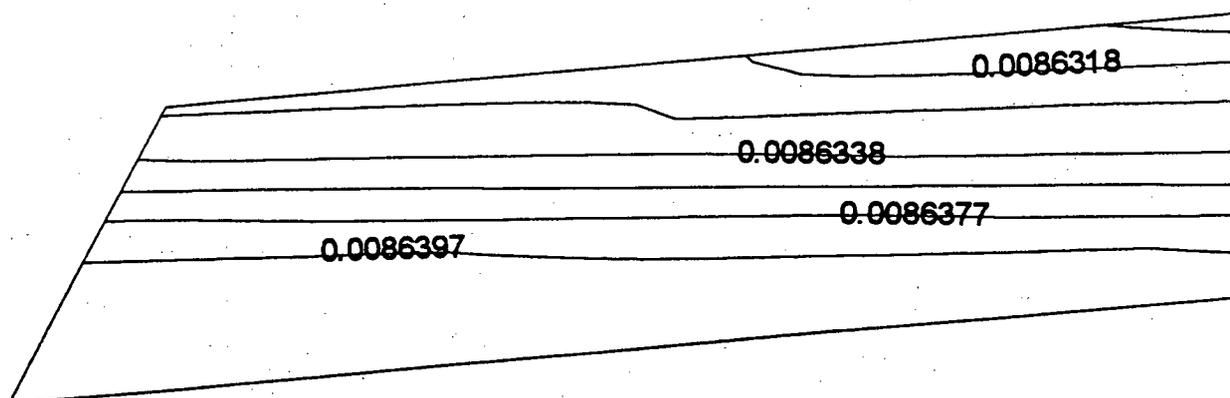
Teneurs en eau



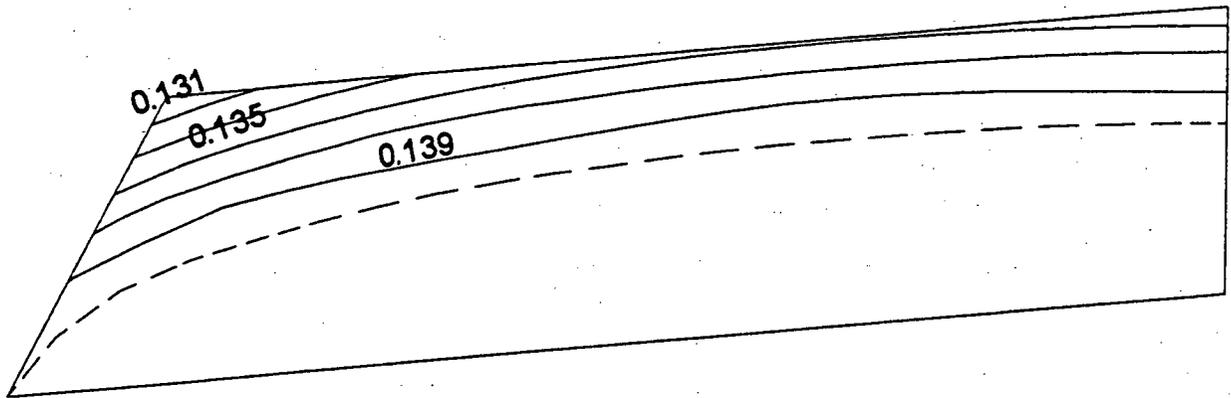
Pressions interstitielles (kPa)



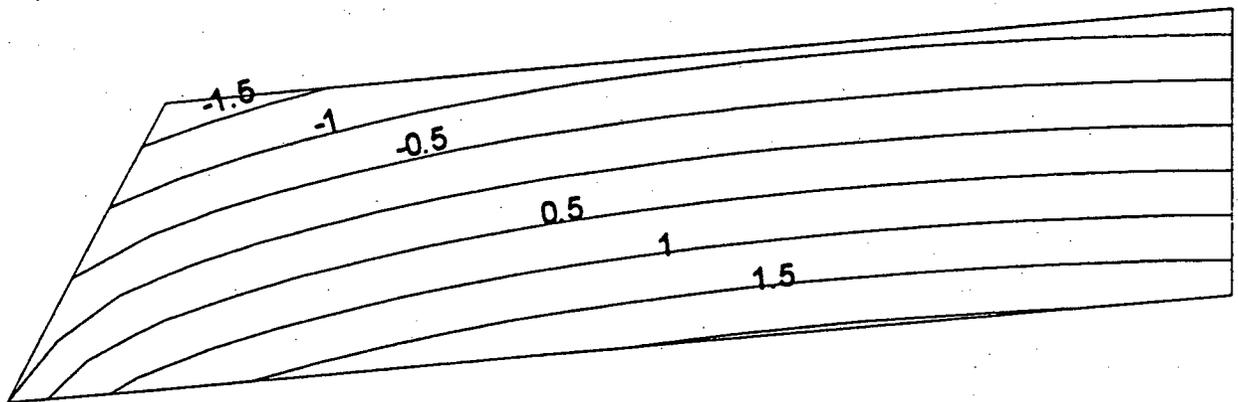
Conductivités hydrauliques (m/j)



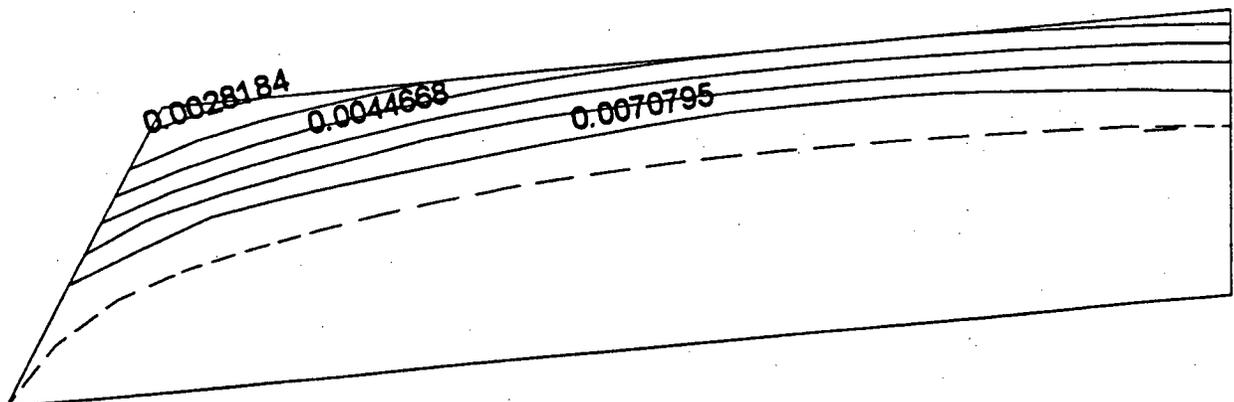
Teneurs en eau



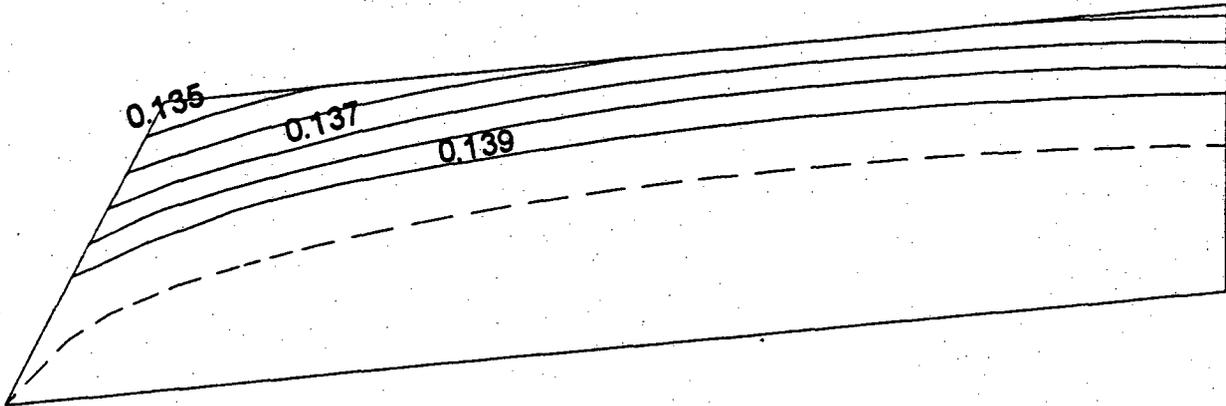
Pressions interstitielles (kPa)



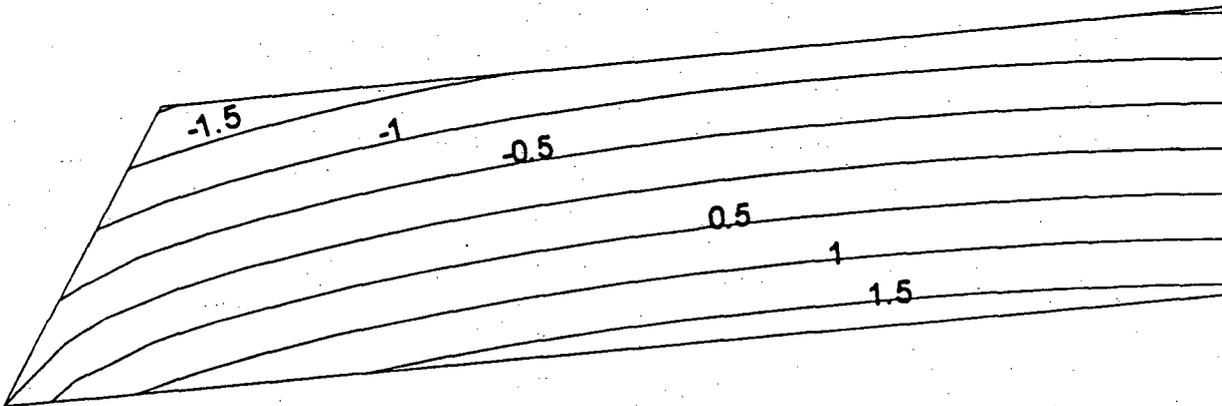
Conductivités hydrauliques (m/j)



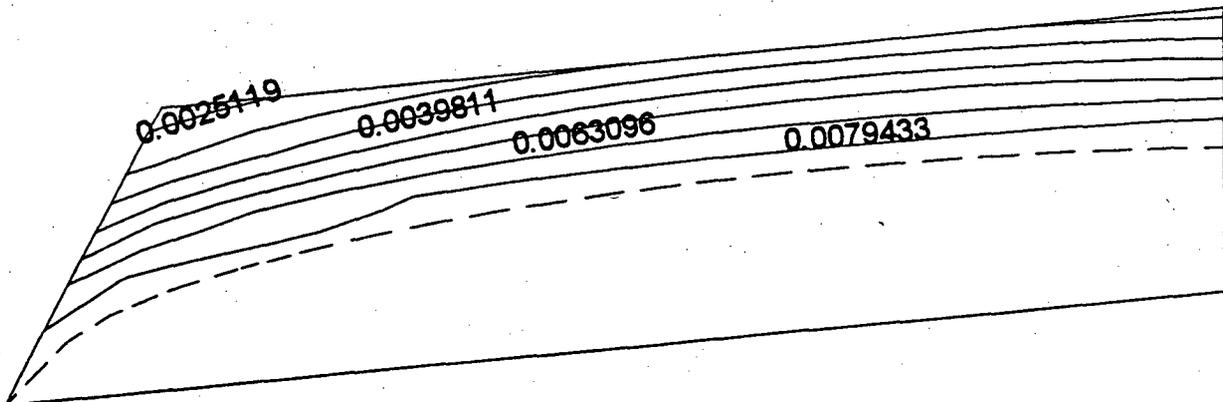
Teneurs en eau



Pressions interstitielles (kPa)

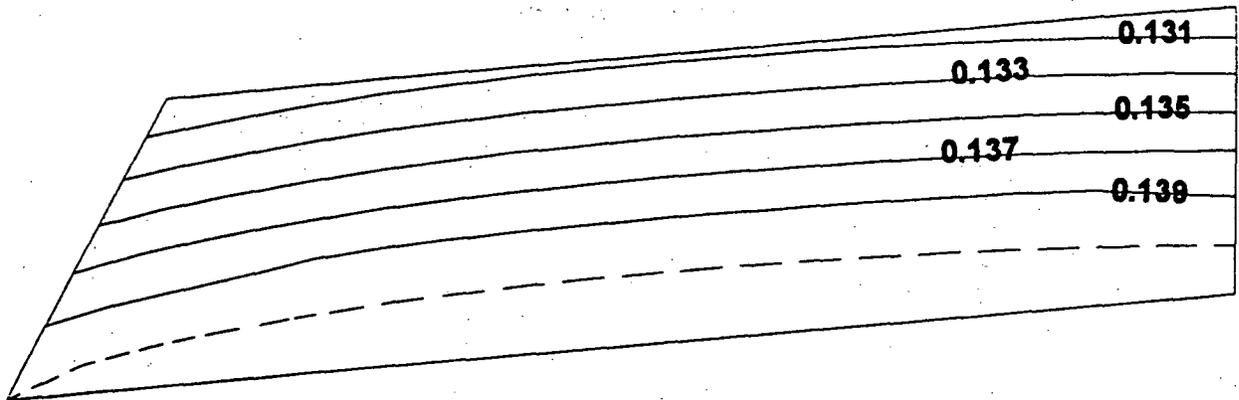


Conductivités hydrauliques (m/j)

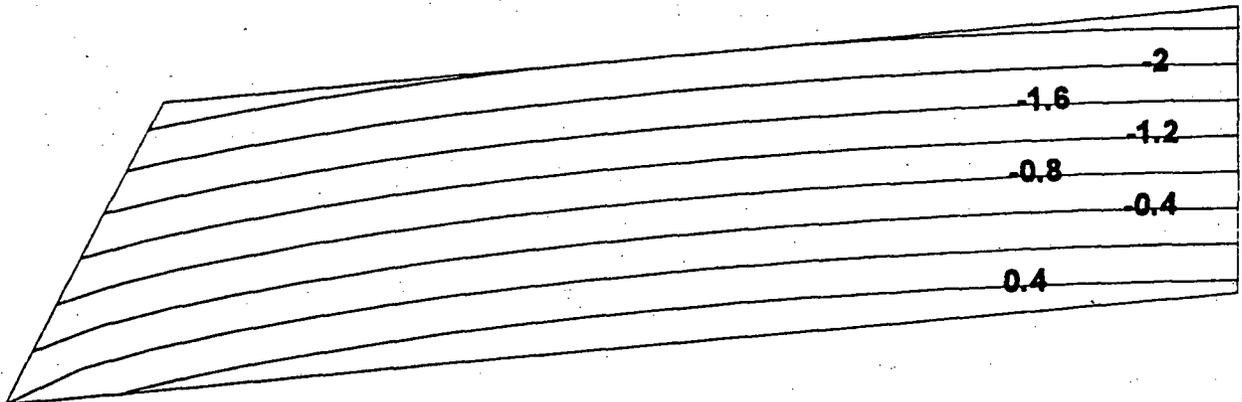


C-8 Simulation numérique lorsque $\psi_e = 1$ kPa, $k_s = 1E-5$ cm/s et $\theta_r^* = 7,7$ %

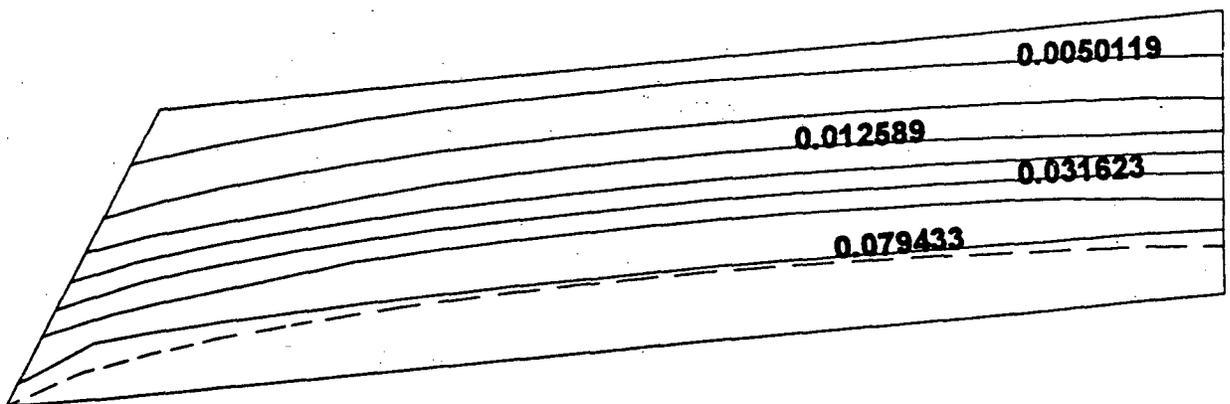
Teneurs en eau



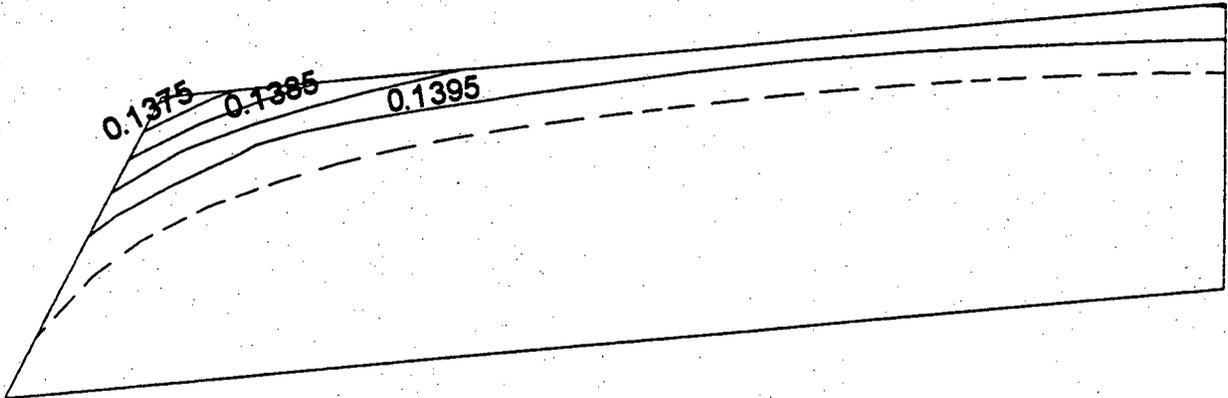
Pressions interstitielles (kPa)



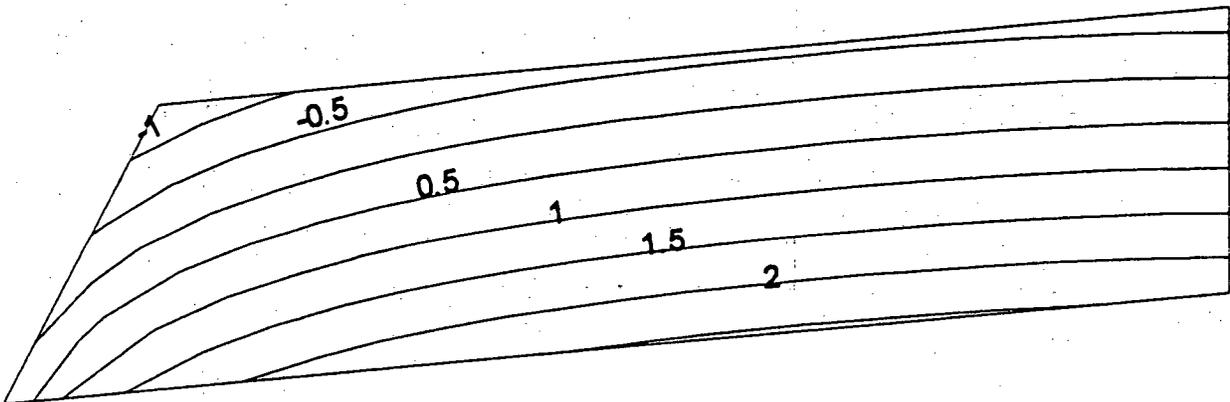
Conductivités hydrauliques (m/j)



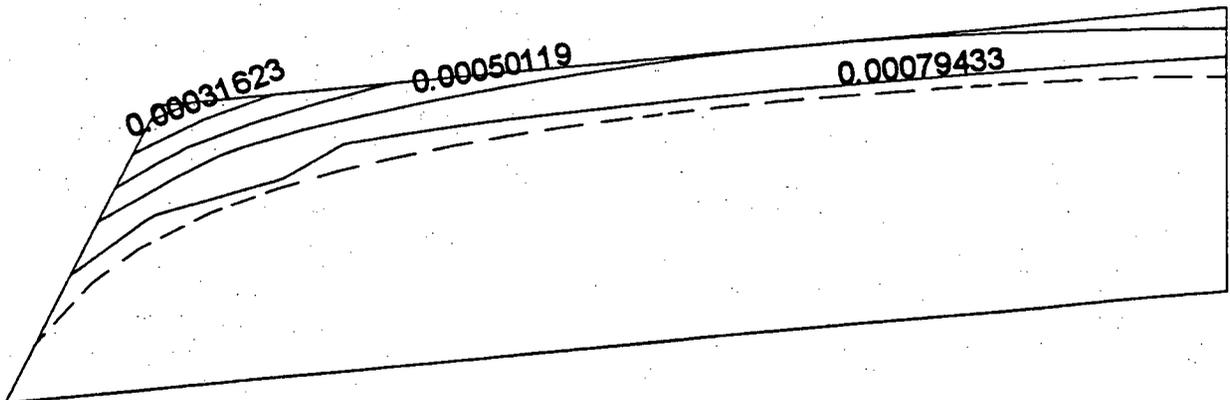
Teneurs en eau



Pressions interstitielles (kPa)

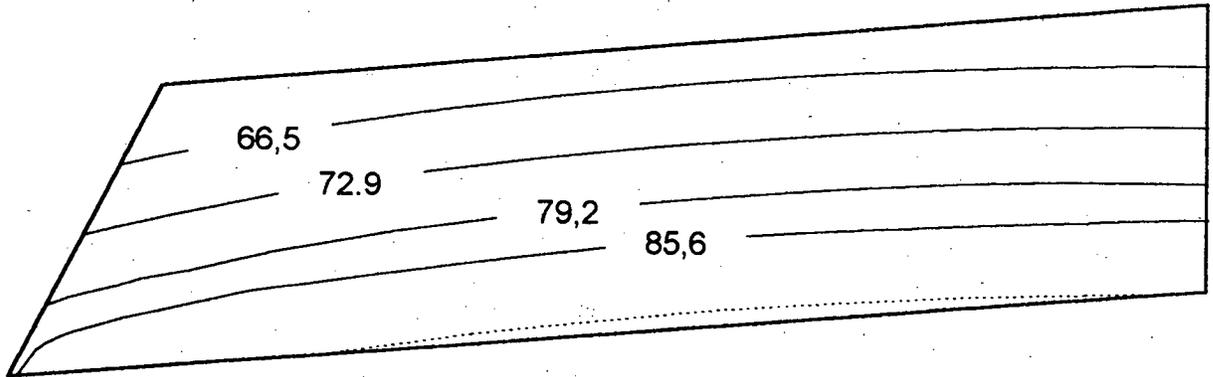


Conductivités hydrauliques (m/j)

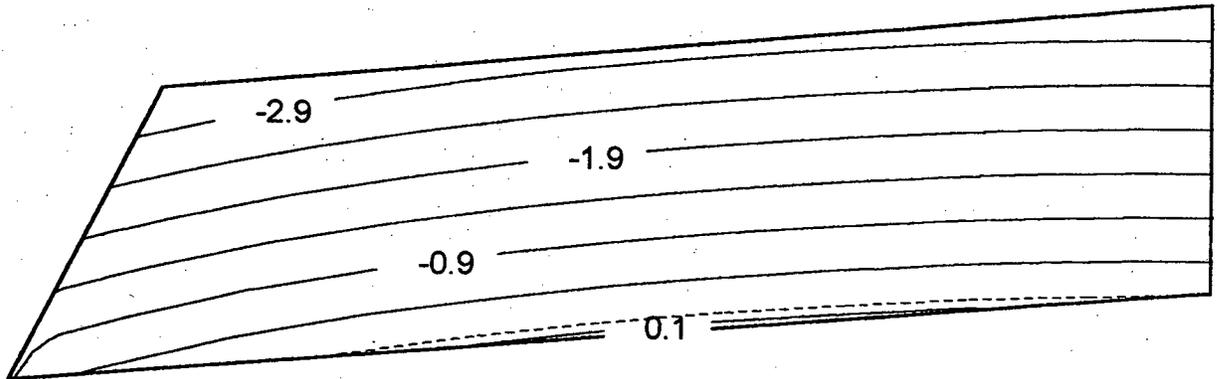


VARIATIONS DE L'ÉTAT HYDRIQUE DANS LA FONDATION

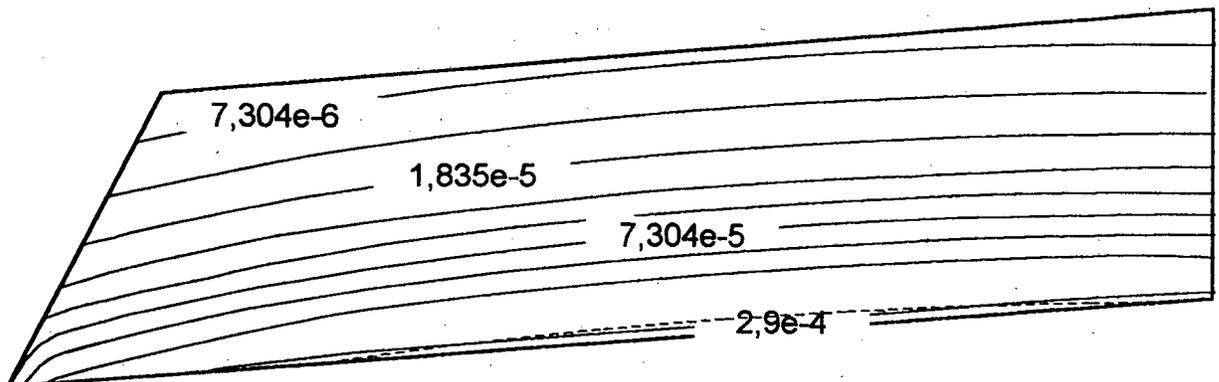
Degré de saturation [%]



Succion [kPa]

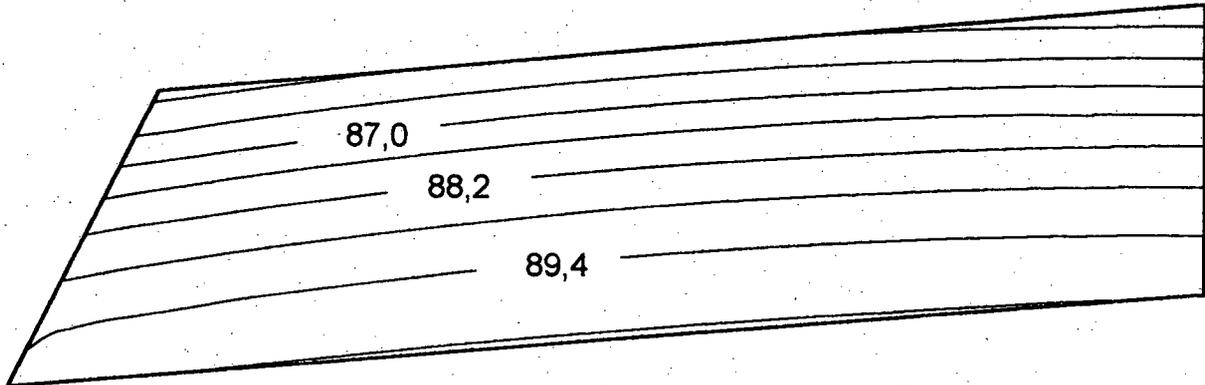


Conductivité hydraulique [cm/s]

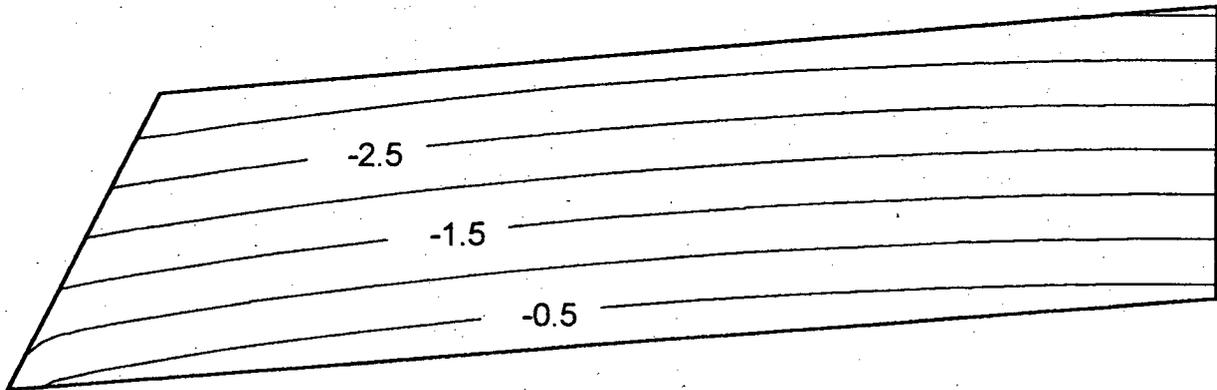


D-1 Simulation numérique dans le cas du matériau VC2 %

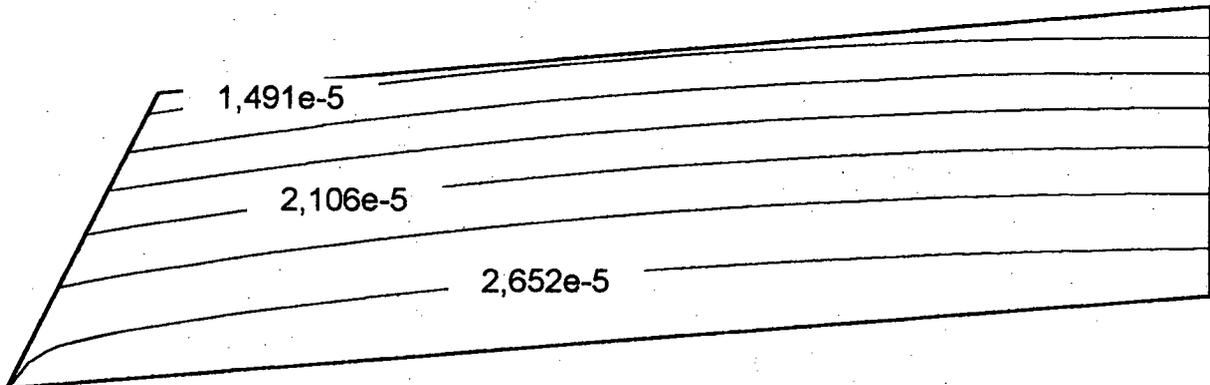
Degré de saturation [%]



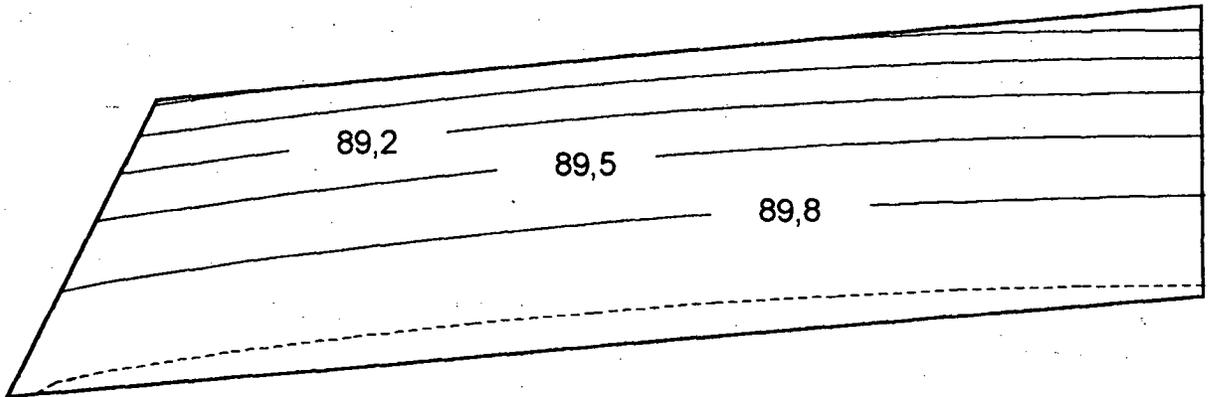
Succion [kPa]



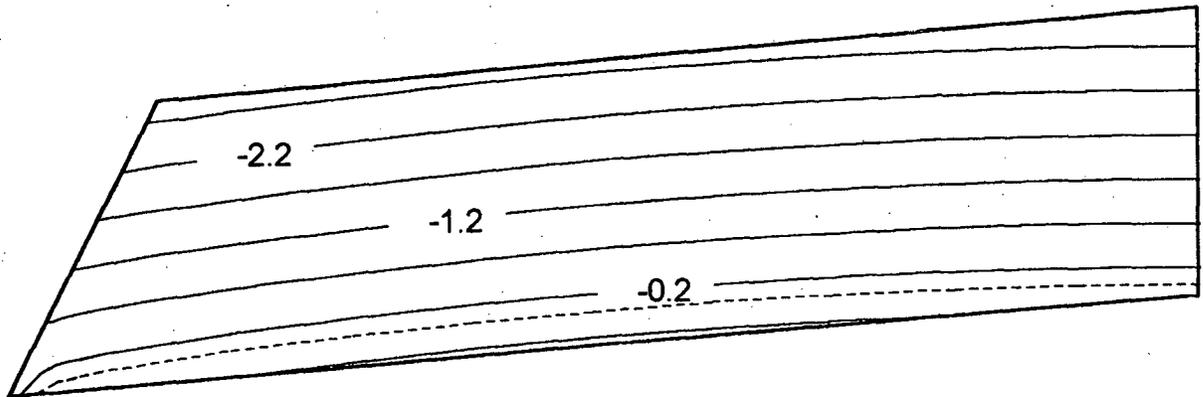
Conductivité hydraulique [cm/s]



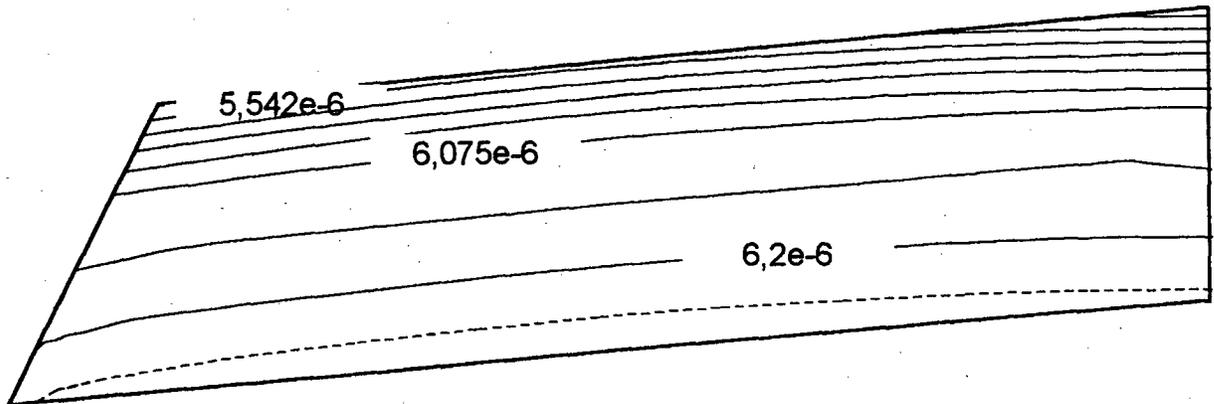
Degré de saturation [%]



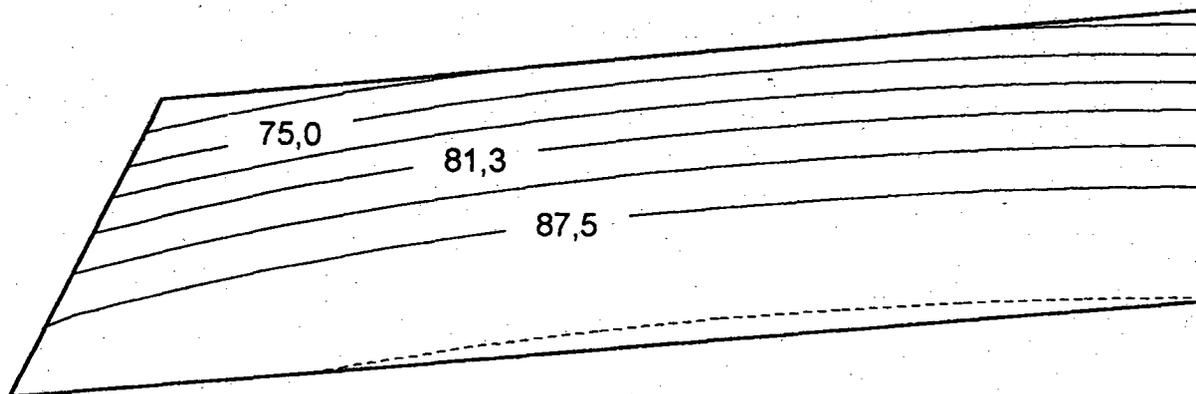
Succion [kPa]



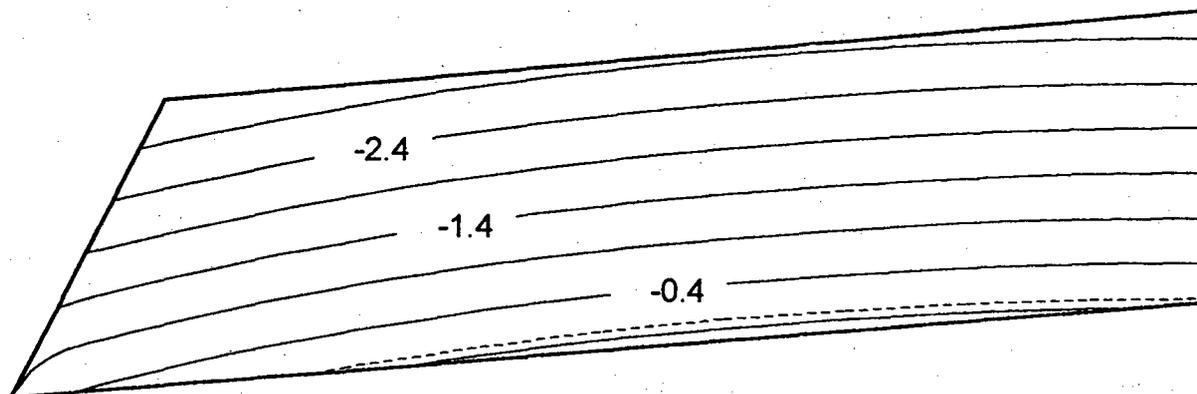
Conductivité hydraulique [cm/s]



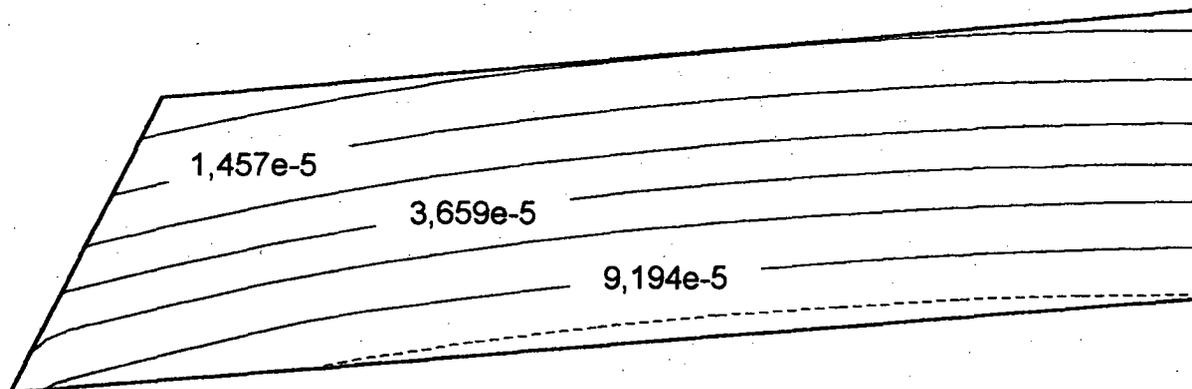
Degré de saturation [%]



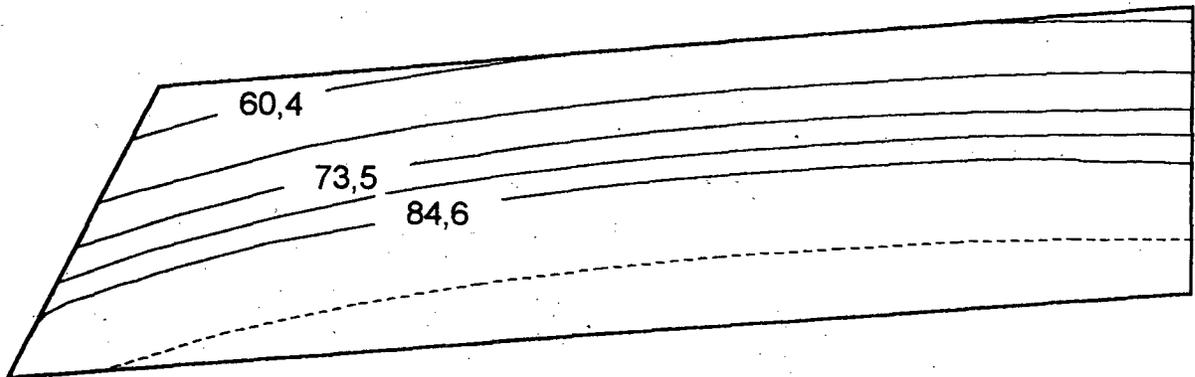
Succion [kPa]



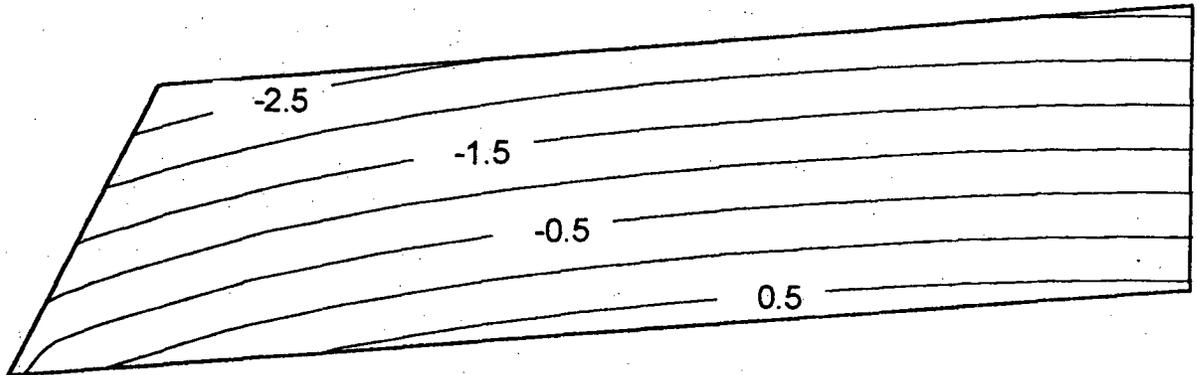
Conductivité hydraulique [cm/s]



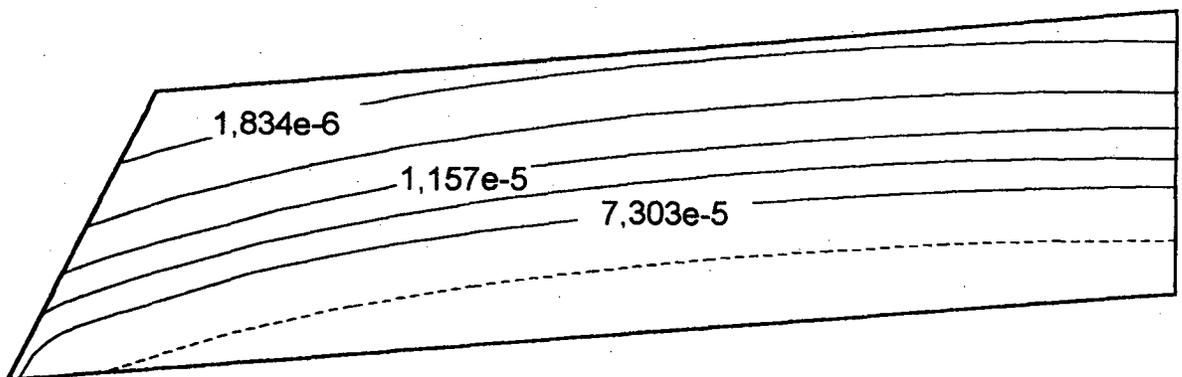
Degré de saturation [%]



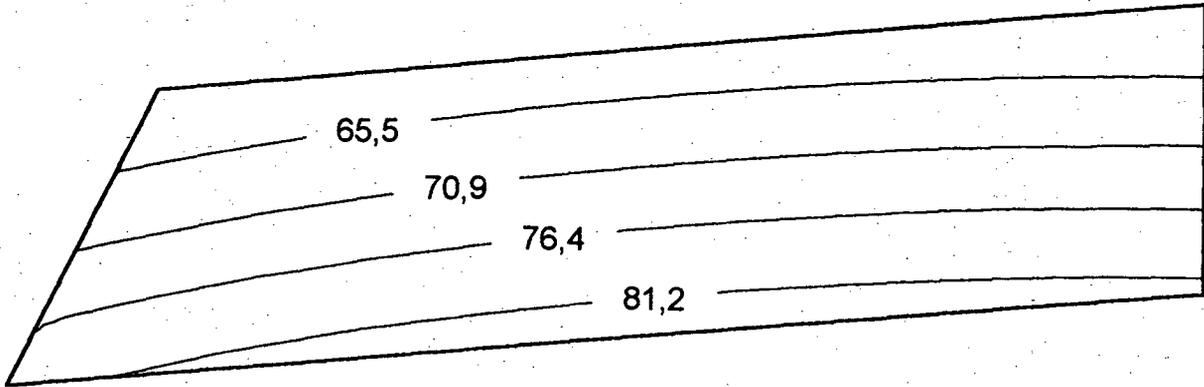
Succion [kPa]



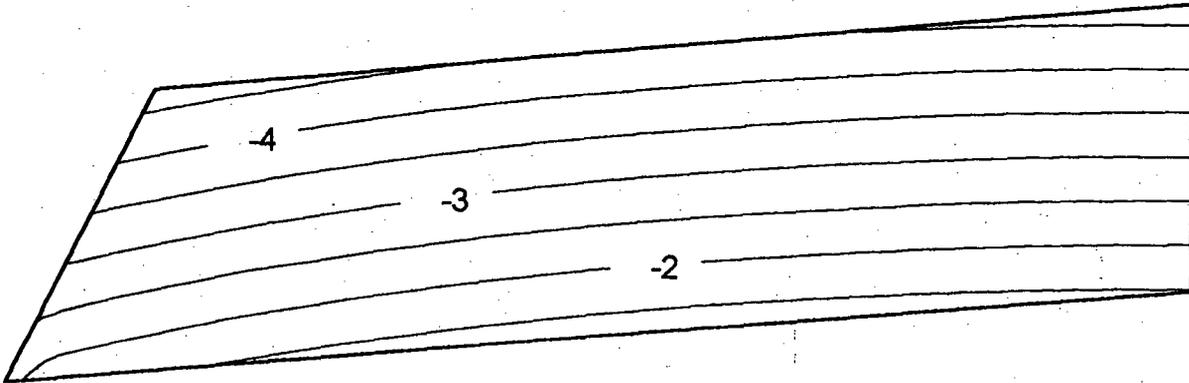
Conductivité hydraulique [cm/s]



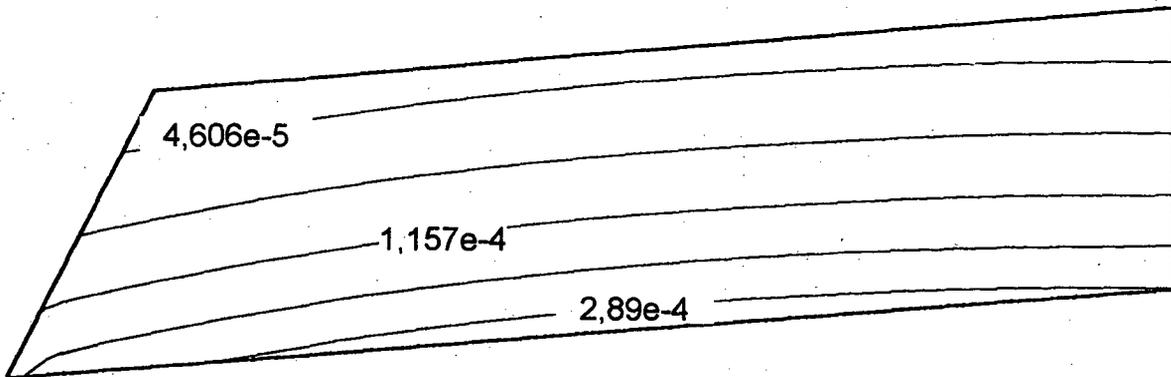
Degré de saturation [%]



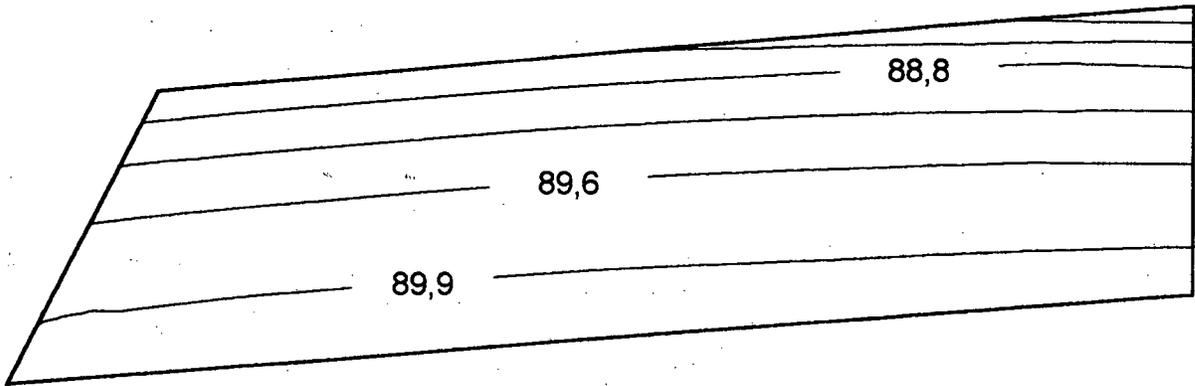
Succion [kPa]



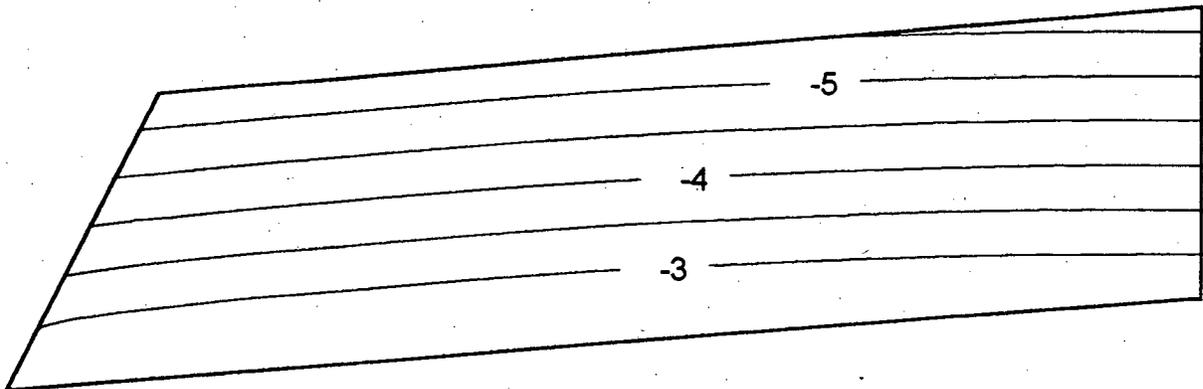
Conductivité hydraulique [cm/s]



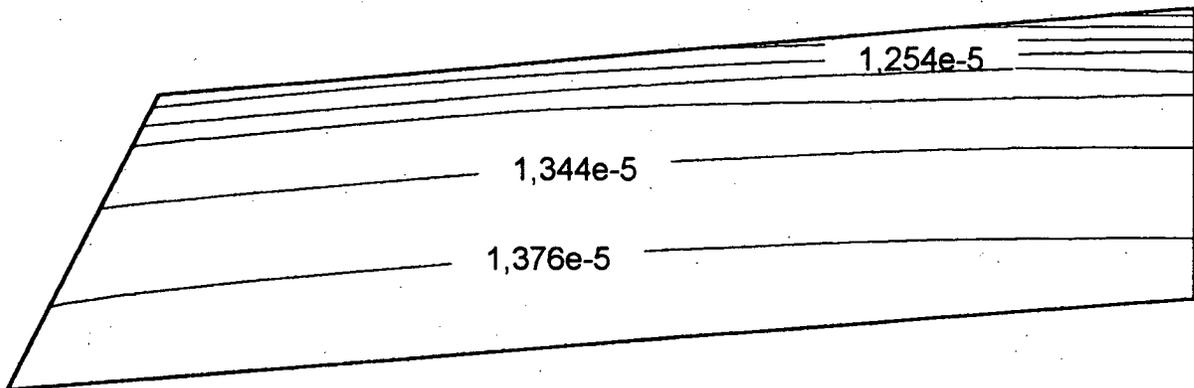
Degré de saturation [%]



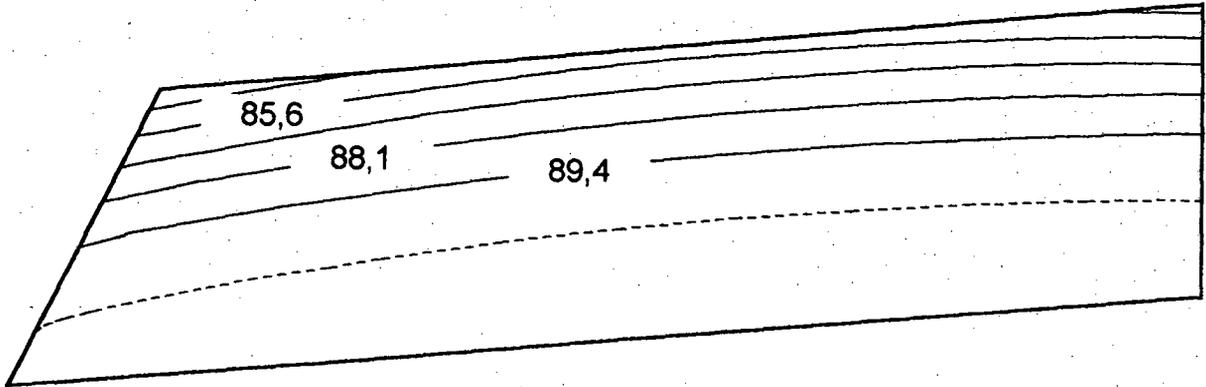
Succion [kPa]



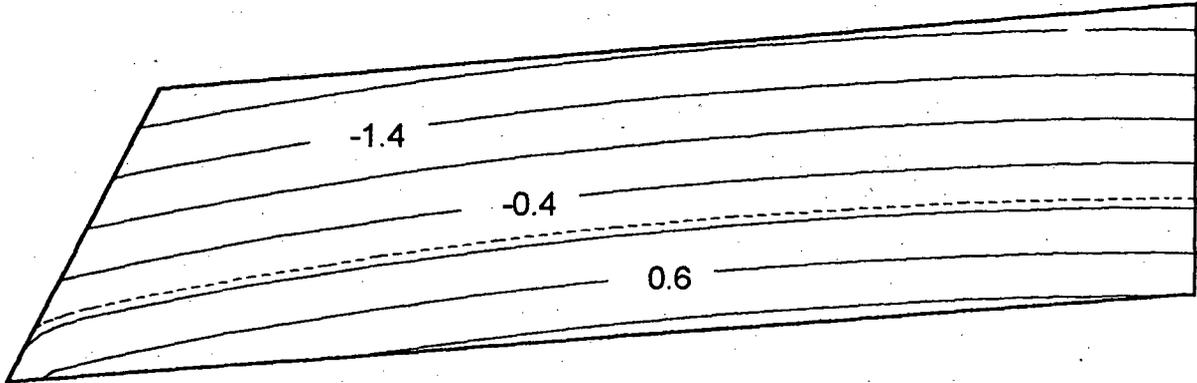
Conductivité hydraulique [cm/s]



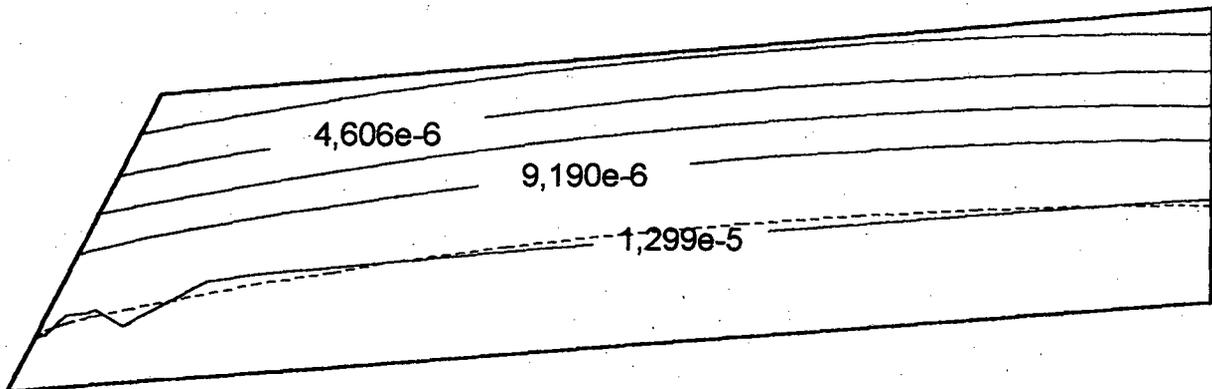
Degré de saturation [%]



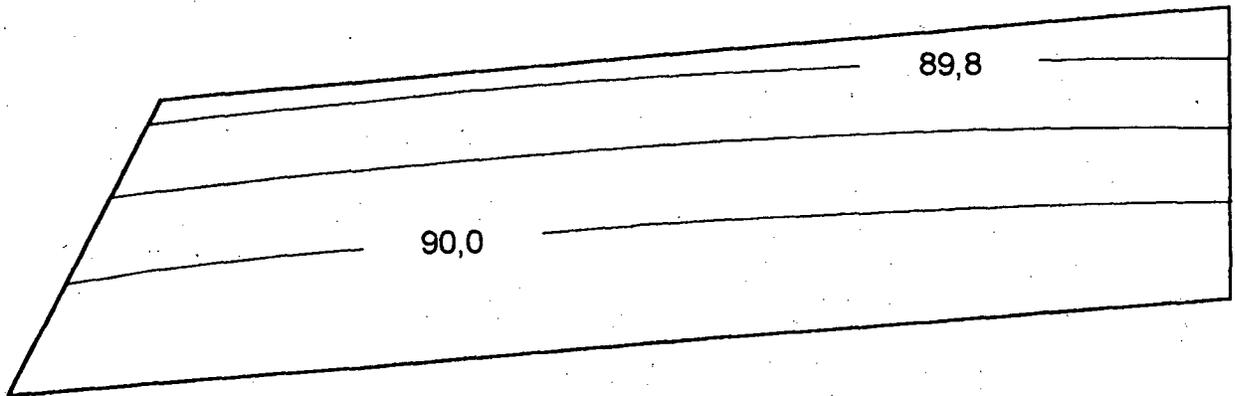
Succion [kPa]



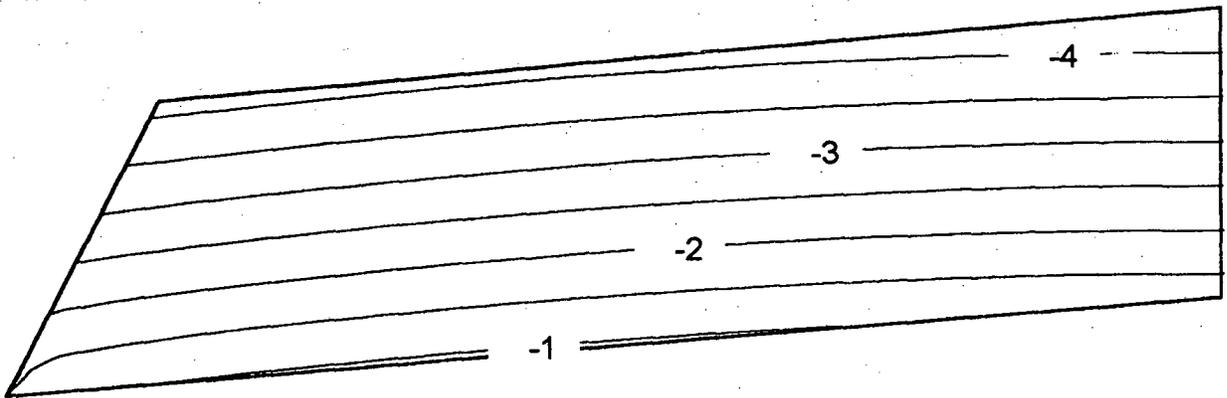
Conductivité hydraulique [cm/s]



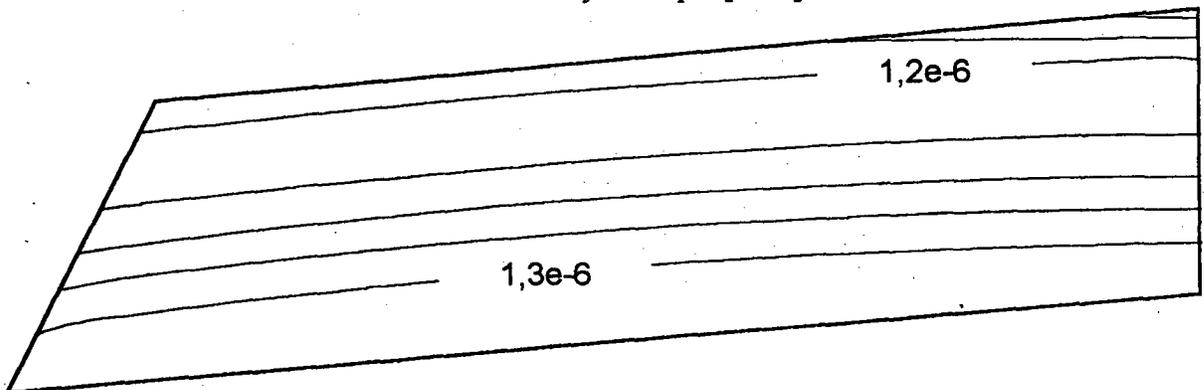
Degré de saturation [%]



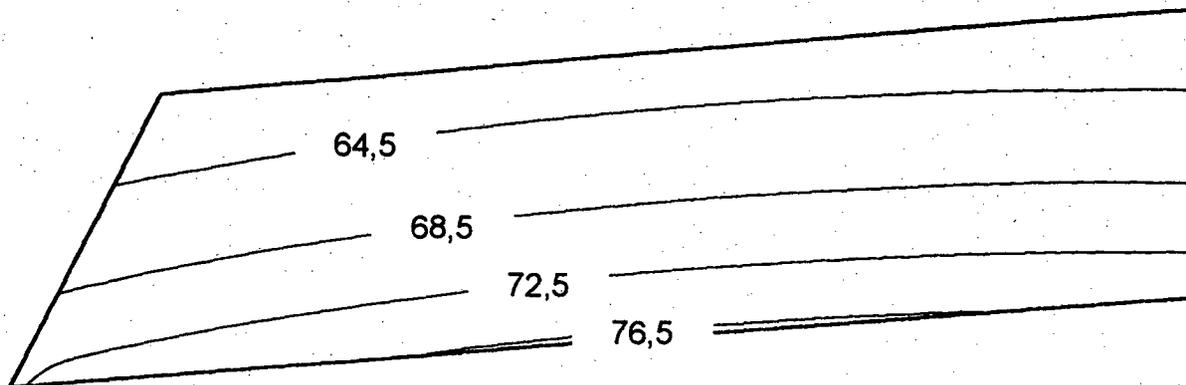
Succion [kPa]



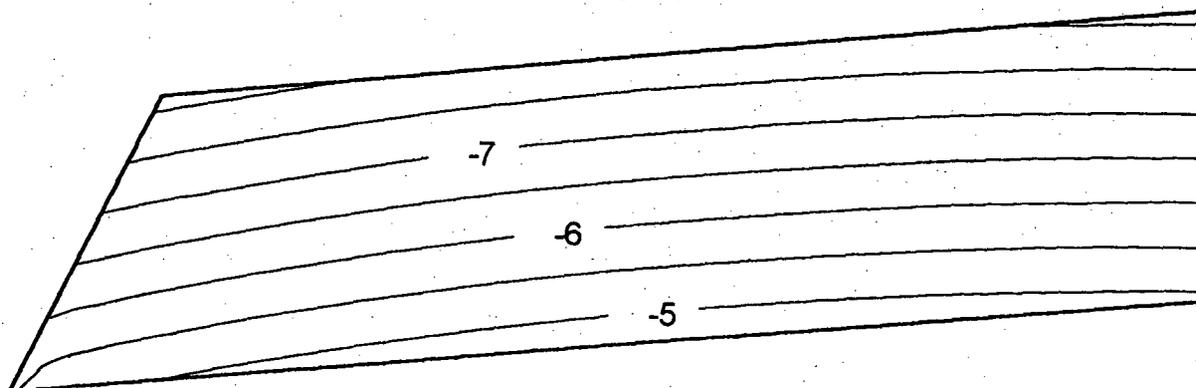
Conductivité hydraulique [cm/s]



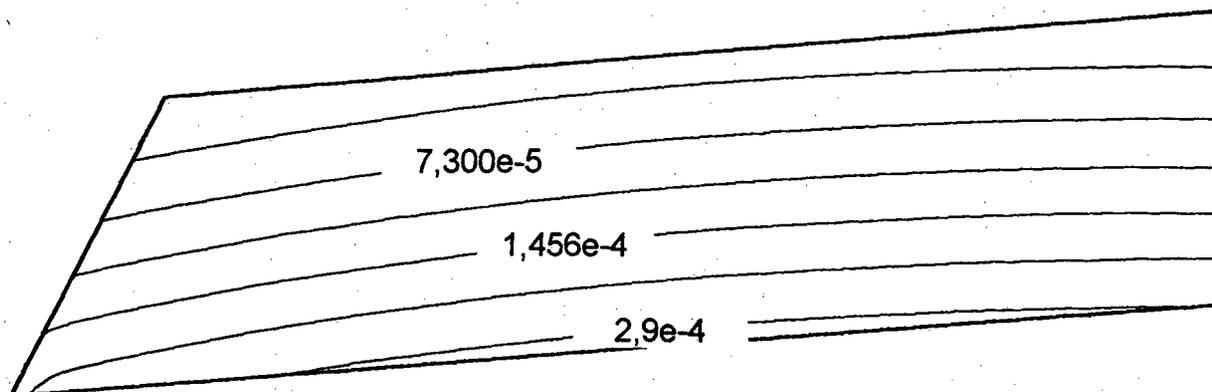
Degré de saturation [%]



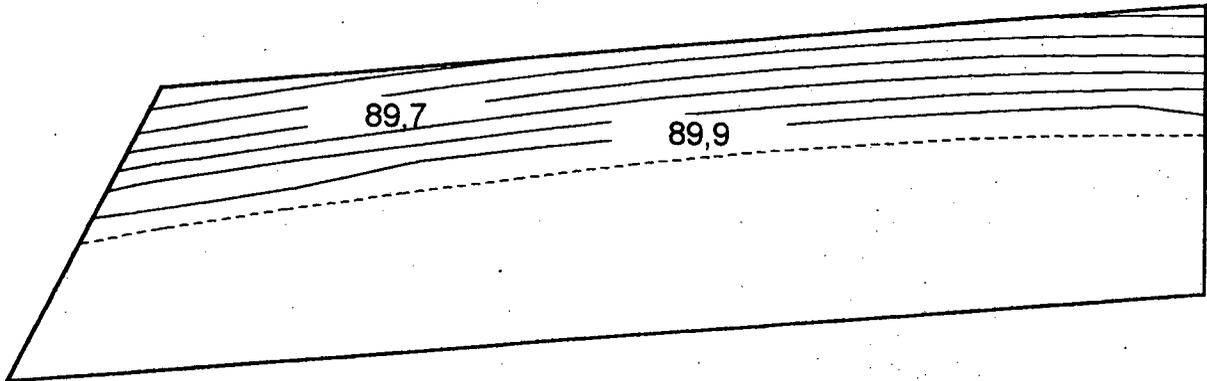
Succion [kPa]



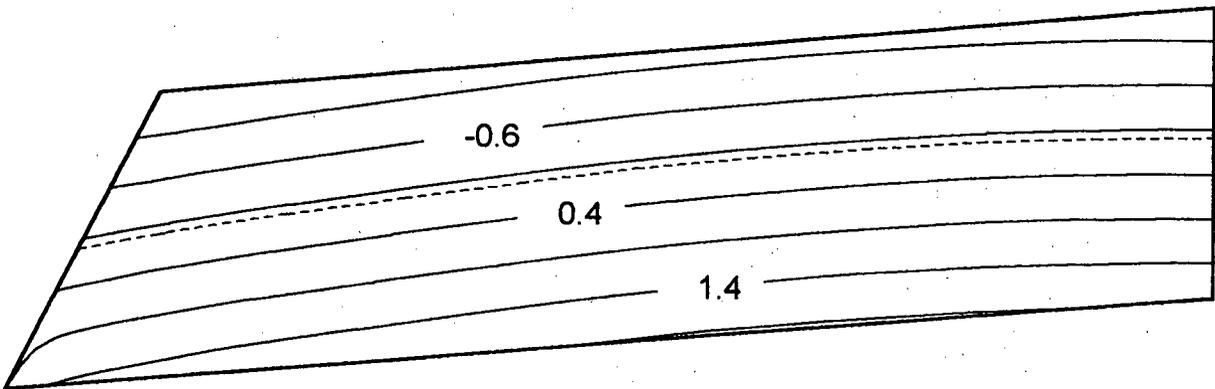
Conductivité hydraulique [cm/s]



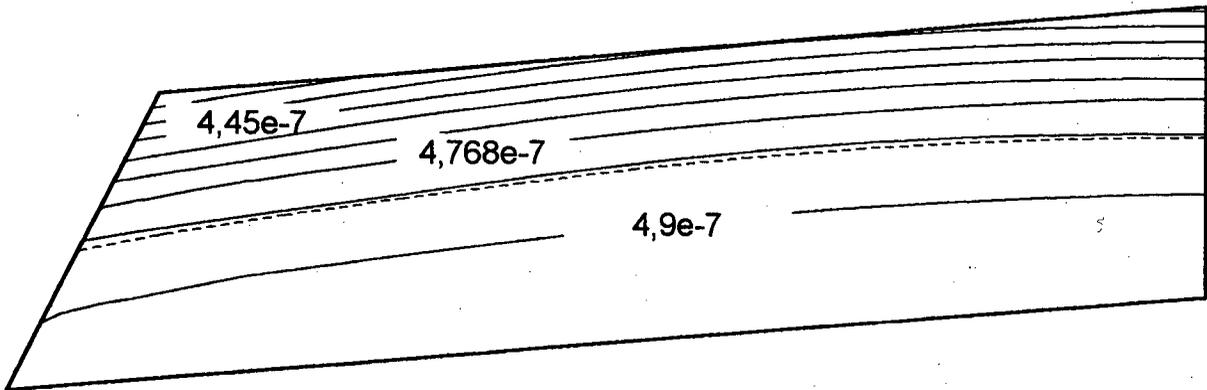
Degré de saturation [%]



Succion [kPa]



Conductivité hydraulique [cm/s]





Gouvernement du Québec
**Ministère
des Transports**

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 115 060

98-06