

Critères d'application des couches drainantes
dans les chaussées: limites d'applications



**MATÉRIAUX
ET INFRASTRUCTURES**



**ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT**

CRITÈRES D'APPLICATION DES COUCHES DRAINANTES DANS LES CHAUSSÉES : LIMITES D'APPLICATIONS

Professeur Jean Lafleur, ing., Ph. D.
Département des génies civil, géologique et des mines

Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec

Février 2013

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et financée par la Direction de l'environnement et de la recherche.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Soucieux de protéger l'environnement, le ministère des Transports du Québec favorise l'utilisation de papier fabriqué à partir de fibres recyclées pour la production de ses imprimés et encourage le téléchargement de cette publication.

Imprimé sur du papier Rolland Enviro100 contenant 100 % de fibres recyclées postconsommation, certifié Éco-Logo, procédé sans chlore, FSC recyclé et fabriqué à partir d'énergie biogaz.



© École Polytechnique de Montréal

ISBN 978-2-550-69907-1 (PDF)

Dépôt légal – 2014

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés. La reproduction de ce document par procédé mécanique ou électronique, y compris la microreproduction, et sa traduction, même partielles sont interdites sans l'autorisation écrite des Publications du Québec.

Titre et sous-titre du rapport <i>Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées : limites d'applications</i>	Numéro du rapport Transports Québec RTQ-13-01	
Titre du projet de recherche <i>Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées : limites d'applications</i>	Date de publication du rapport (année-mois) 2013-02	Numéro du dossier 4502-09-RD04
Responsable de recherche Professeur Jean Lafleur, École Polytechnique de Montréal	Numéro du projet R002.4	Date de début de la recherche Juin 2009
Auteur du rapport Professeur Jean Lafleur, École Polytechnique de Montréal	Date de fin de la recherche Mars 2013	
Chargé de projet, direction Denis St-Laurent, Direction du laboratoire des chaussées	Coût total de l'étude 27 857 \$	
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Département des génies civil, géologique et des mines École Polytechnique de Montréal 2500, chemin Polytechnique Montréal (Québec) H3T 1J4	Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Service de la coordination de la recherche et de l'innovation Direction de l'environnement et de la recherche Ministère des Transports du Québec 930, chemin Sainte-Foy, 6 ^e étage Québec (Québec) G1S 4X9	
Problématique Un rapport intitulé <i>Étude paramétrique sur les couches drainantes dans les chaussées</i> et signé par J. Lafleur et F. Généreux a été produit en juillet 2007 dans le cadre du projet <i>Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées</i> . Ce rapport concluait, sur la base de considérations exclusivement hydrauliques, que la présence de ces couches immédiatement sous le revêtement n'était pas souhaitable dans les profils rasants et en remblai. En effet, celles-ci augmentent la quantité d'eau dans la fondation et la sous-fondation. Le rapport de recherche en arrivait à des conclusions plus nuancées quant à l'utilité de mettre en place une couche drainante entre le sol d'infrastructure et l'assise de la chaussée dans les profils en déblai avec dépression de la nappe phréatique jusqu'à 10 m. La présence de cette couche apparaîtrait alors justifiable, puisque les degrés de saturation et les pressions interstitielles sont diminués dans l'assise de chaussée, en particulier lorsque le sol d'infrastructure a une conductivité hydraulique supérieure à 10^{-7} m/s. Cette couche drainante devra toutefois avoir une conductivité hydraulique supérieure à 10^{-3} m/s et une épaisseur de plus de 100 mm. Or, certains points restent à éclaircir, notamment : <ul style="list-style-type: none"> • les paramètres hydrauliques des granulats et des couches drainantes; • l'hétérogénéité du sol d'infrastructure; • les conditions aux frontières de la nappe initiale; • l'influence des fissures dans les déblais en dépression; • la validité du logiciel commercial SEEP/W. 		

Objectifs

L'objectif initial du projet était de préciser les paramètres qui influencent les quantités d'eau d'infiltration dans une chaussée pour établir les caractéristiques de conception des couches drainantes. Ultimement, ces résultats ont été intégrés à ceux de recherches antérieures dans un document synthèse. Le rapport comprend l'ensemble des travaux de recherche qui portent sur le drainage interne des structures de chaussée, échelonnés sur la période de 1993 à 2012.

Méthodologie

Une comparaison entre les différents systèmes de drainage interne utilisés par le ministère des Transports du Québec sur les sections d'autoroute a été établie sur la base d'une étude paramétrique à l'aide du logiciel d'éléments finis SEEP/W, qui simule les écoulements souterrains en conditions saturées et non saturées.

Des simulations en trois dimensions de profils longitudinaux ont également permis de constater la présence accrue d'eau au pied des pentes. Dans les profils en coupe, les couches drainantes à l'infrastructure sont indispensables dans les matériaux perméables.

Les études paramétriques débouchent sur une comparaison du niveau de performance des divers systèmes de drainage et sur un exposé des facteurs à considérer dans leur conception, le principal étant l'évaluation exacte des conditions de la nappe phréatique et des niveaux piézométriques.

Résultats et recommandations

Les résultats présentés découlent d'observations en laboratoire et sur le terrain consignées dans divers rapports de recherche soumis au Ministère de 1993 à 1996. Ces observations ont par la suite été appuyées par des études paramétriques des conditions d'écoulement souterrain dans les chaussées, à l'aide du logiciel d'éléments finis SEEP/W, dont les résultats ont été présentés dans des rapports produits entre 1999 et 2009.

Le rapport comprend des études comparatives entre divers systèmes de drainage tels que les fossés ou tuyaux de drainage à l'infrastructure, l'extension de la sous-fondation, les écrans de rive, la couche drainante placée directement sous le revêtement et la couche drainante déposée sur la ligne d'infrastructure. Ces études comprennent l'influence du profil (remblai ou déblai), l'effet de l'infiltration d'eau par les fissures du revêtement, la nature du sol d'infrastructure, la nature du matériau d'épaulement des talus de fossé intérieurs, la présence d'accotements revêtus ou non revêtus, la position des tuyaux de drainage ou des écrans de rive par rapport à la ligne de rive, et la pente longitudinale. L'utilisation des géosynthétiques et des couches filtrantes a aussi été traitée de même que la stabilité interne des couches filtrantes.

Les résultats de ce projet de recherche contribueront à améliorer la durabilité des chaussées et à diminuer les

Mots clés

système de drainage, écoulement souterrain, couches drainantes, pression interstitielle, conductivité hydraulique, géosynthétiques

Nombre de pages

64

Nombre de
références
bibliographiques
37

Langue du document

Français

Anglais

Autre (spécifier) :

Avant-propos

Ce rapport fait état des résultats obtenus dans le cadre du projet Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées : limites d'applications. La description du projet, les objectifs particuliers et les modalités ont été définis dans notre proposition d'étude P3805 portant le titre susmentionné et adressée à M. Yves Savard, ing., M. Sc., chargé de projet au ministère des Transports du Québec, le 10 février 2009. Les travaux ont été exécutés conformément au contrat de service n° 850769248 conclu entre le Ministère et l'École Polytechnique de Montréal le 15 juin 2009.

L'objectif initial du projet était de préciser les paramètres qui influencent les quantités d'eau entrant dans une chaussée en dépression pour établir les caractéristiques de conception des couches drainantes à la base de la structure de chaussée pour intercepter les infiltrations. Ultimement, ces résultats ont été intégrés à ceux des recherches antérieures dans un document synthèse qui est une version préliminaire d'un guide à être produit par le Ministère sur le drainage interne des structures de chaussées.

Les résultats présentés dans ce rapport découlent d'observations en laboratoire et sur le terrain exposées dans divers rapports de recherche soumis au Ministère de 1993 à 1996. Ces travaux ont par la suite été appuyés par des études paramétriques des conditions d'écoulement souterrain dans les chaussées effectuées avec le logiciel SEEP/W et dont les résultats ont été donnés dans des rapports échelonnés entre 1999 et 2009.

Ce rapport se limite à présenter des critères généraux de conception pour le drainage interne des structures de chaussées. On n'y traite pas des dispositifs d'évacuation comme les conduites, les ponceaux, etc. ou encore de la constitution et de la composition des couches drainantes.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente d'abord une comparaison entre les différents systèmes de drainage interne utilisés par le ministère des Transports du Québec sur les sections d'autoroute :

- extension de la sous-fondation (ESF);
- tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI);
- écran drainant en rive de chaussée (EDRC).

Cette comparaison est établie sur la base d'une étude paramétrique à l'aide du logiciel d'éléments finis SEEP/W, qui simule les écoulements souterrains en conditions saturées et non saturées. Elle fait ressortir l'influence des facteurs suivants sur les quantités d'eau infiltrées dans la structure de chaussée (par ordre d'importance) :

- fissures dans le revêtement;
- nature du sol d'infrastructure;
- présence d'un accotement revêtu ou non;
- nature des matériaux d'épaulement;
- position du TDI et de l'EDRC par rapport à la ligne de rive.

Des simulations en trois dimensions de profils longitudinaux permettent également de constater la présence accrue d'eau au pied des pentes. Dans les profils en coupe, les couches drainantes à l'infrastructure sont indispensables dans les matériaux perméables, auquel cas elles doivent avoir au moins 150 mm d'épaisseur et une perméabilité minimale de 10^{-2} m/s. Dans le contexte d'un profil en coupe dans un sol imperméable, un calcul indique la profondeur minimale de sol à conserver sous la ligne d'infrastructure lorsqu'un aquifère s'y trouve pour élever les soulèvements de fond, à défaut de quoi il faut soulager les pressions artésiennes par pompage durant la construction et par drainage permanent par la suite.

Les études paramétriques débouchent sur un exposé des facteurs à considérer dans la conception des systèmes de drainage, le principal étant l'évaluation exacte des conditions de nappe phréatique et des niveaux piézométriques. Des éléments de conception sont ensuite donnés en adaptant les normes du Ministère et un tableau propose des recommandations quant au choix et à la position des systèmes de drainage en fonction de la nature des sols encaissants et de la position de la nappe phréatique. Finalement, un chapitre traite de l'utilisation des géosynthétiques comme substituts aux granulats traditionnels et aborde les caractéristiques des produits disponibles, ce qui les distingue des granulats et les limitations dans leur utilisation.

TABLE DES MATIÈRES

1. EFFET DE L'EAU SUR LES STRUCTURES DE CHAUSSÉES	20
1.1. Stabilité des fondations de chaussée	20
1.2. Variation des quantités d'eau dans la chaussée au cours des saisons.....	22
1.3. Types d'endommagement par l'eau.....	25
1.3.1. Soulèvements en hiver	25
1.3.2. Perte de capacité portante au printemps	28
1.3.3. Où et quand mettre en place un système de drainage.....	30
2. INFILTRATION ET DRAINAGE	32
2.1. Localisation des zones de charge (infiltration) et de décharge (drainage, évacuation) dans les structures de chaussées.....	32
2.1.1. Définition des termes	32
2.1.2. Infiltration	34
2.1.3. Évacuation	35
2.2. Relation entre les précipitations, l'infiltration et le ruissellement dans les chaussées	35
2.3. Modélisation par éléments finis de l'écoulement dans les chaussées	36
2.3.1. Sections transversales et conditions aux frontières.....	37
2.3.2. Écoulement saturé/non saturé.....	39
2.4. Propriétés des sols modélisés	41
2.4.1. Sols d'infrastructure	41
2.4.2. Granulats de fondation et de sous-fondation.....	42
2.4.3. Couche drainante	44
3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS	46
3.1. Profil d'autoroute.....	46
3.1.1. Comparaison entre les différents systèmes et présence de fissures	46
3.1.2. Position relative du tuyau de drainage à l'infrastructure par rapport à la ligne de rive	48
3.1.3. Accotement revêtu ou non.....	48
3.1.4. Nature des matériaux d'épaulement.....	49

3.1.5.	Nature du sol d'infrastructure	49
3.1.6.	Couche drainante immédiatement sous le revêtement	50
3.1.7.	Écoulement tridimensionnel	51
3.1.8.	Variations de la teneur en eau volumique en période de dégel au printemps	52
3.2.	Profils de route régionale	53
3.2.1.	Hauteur du déblai et nature du sol d'infrastructure	53
3.2.2.	Épaisseur et perméabilité de la couche drainante	54
3.2.3.	Présence de fissure dans la voie de roulement	55
3.3.	Limites de l'étude	55
4.	FACTEURS INTERVENANT DANS LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME	58
4.1.	Position de la nappe phréatique et niveaux piézométriques	58
4.2.	Topographie du profil	60
4.2.1.	Profil transversal	60
4.2.2.	Profil longitudinal	61
4.3.	Nature des sols d'infrastructure	61
4.3.1.	Catégories ou classes	62
4.3.2.	Stratification et variabilité naturelle	62
4.3.3.	Pierre nette, roc dynamité	62
4.4.	Nature des matériaux d'apport et propriétés hydrauliques	63
4.4.1.	Granulats de sous-fondation et de fondation	63
4.4.2.	Granulats stabilisés ou non au bitume ou au ciment (couches drainantes à l'infrastructure)	68
4.5.	Autres considérations	69
4.5.1.	Fissuration sur chaussée	69
4.5.2.	Pénétration du gel	69
4.5.3.	Remplissage autour des conduites	69
5.	UTILISATION DES GÉOSYNTHÉTIQUES EN DRAINAGE	70
5.1.	Description des produits disponibles	70
5.2.	Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires	72
5.3.	Facteurs à considérer	73
5.3.1.	Perméabilité sous compression – résistance à la compression	73
5.3.2.	Résistance à la déchirure	75

5.3.3. Formation de glace	75
5.3.4. Mouillabilité	75
5.3.5. Ouverture de filtration	75
6. ÉLÉMENTS DE CONCEPTION	78
6.1. Profondeur et rigidité des tuyaux de drainage	78
6.2. Diamètre des conduites et des drains	78
6.3. Pente longitudinale du drain	79
6.4. Pente des interfaces vers l'extérieur de la chaussée	79
6.5. Position des exutoires.....	80
6.6. Sélection des filtres.....	81
6.6.1. Rétention	82
6.6.2. Perméabilité.....	83
6.7. Stabilité du fond de fouille dans les profils en coupe	84
7. SOLUTIONS PROPOSÉES	86
7.1. Description des systèmes.....	86
7.1.1. Extension de la sous-fondation ESF	86
7.1.2. Tuyaux de drainage à l'infrastructure TDI.....	86
7.1.3. Écran drainant en rive de chaussée EDRC	87
7.1.4. Couche drainante à l'infrastructure CDI.....	88
7.1.5. Masque drainant de rive MDR.....	89
7.1.6. Couche drainante immédiatement sous le revêtement de béton de ciment	90
7.2. Critères de sélection d'un système.....	90
7.3. Comparaison des coûts des systèmes de drainage	91
7.4. Installation des conduites, contrôle de qualité et entretien	92
8. RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Courbe de l'enveloppe typique de résistance au cisaillement de granulats saturés et non saturés	21
Figure 2	Précipitations moyennes mensuelles	23
Figure 3	Variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation des pores en eau et en glace	24
Figure 4	Fissures créées par le soulèvement différentiel en hiver....	26
Figure 5	Progression du gel dans la chaussée et soulèvement associé à l'indice de gel maximal	27
Figure 6	Chaussée endommagée par le soulèvement hivernal (MTQ, 2013b).....	28
Figure 7	Chaussée endommagée par une faible portance au printemps (MTQ, 2013b)	29
Figure 8	Fissures créées par un excès d'eau au printemps dans la fondation.....	29
Figure 9	Éléments d'un système de drainage dans la structure de chaussée.....	33
Figure 10	Localisation des zones de charge et de décharge – profil rasant d'autoroute	34
Figure 11	Localisation des zones de charge et de décharge – profil en coupe	34
Figure 12	Distribution des infiltrations dans un gravier en fonction du temps, après le début d'une précipitation	36
Figure 13	Section transversale de structure de chaussée d'autoroute avec profil rasant.....	37
Figure 14	Section transversale avec profil en coupe.....	38
Figure 15	Détail de la structure de chaussée régionale avec profil en coupe	38
Figure 16	Courbes de rétention d'eau	40
Figure 17	Courbes granulométriques des sols d'infrastructure modélisés	41

Figure 18	Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) des sols d'infrastructure des chaussées modélisées.....	42
Figure 19	Courbes granulométriques des granulats.....	43
Figure 20	Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) des granulats des chaussées modélisées	43
Figure 21	Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) de la couche drainante	44
Figure 22	Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec extension de la sous-fondation (ESF).	46
Figure 23	Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI).	47
Figure 24	Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec écran drainant en rive de chaussée (EDRC).	47
Figure 25	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue : a) sans fissure et b) avec une fissure au milieu de la voie de roulement. Chaussée d'autoroute	48
Figure 26	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement : a) profil d'autoroute avec accotement revêtu et b) profil de route régionale avec accotement non revêtu.....	49
Figure 27	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée régionale sans couche drainante ..	50
Figure 28	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée d'autoroute avec couche drainante immédiatement sous le revêtement.....	51
Figure 29	Écoulement tridimensionnel dans une extension de la sous-fondation. Chaussée d'autoroute.....	52
Figure 30	Distribution des teneurs en eau durant le dégel. Chaussée de route régionale	53
Figure 31	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure. Profil en coupe sans couche drainante	54

Figure 32	Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure au milieu de la voie de roulement. Profil en coupe, sable d'infrastructure avec couches drainantes d'épaisseurs et de perméabilités différentes, $\Delta H = 10$ m	54
Figure 33	Fluctuations de la nappe phréatique en fonction des saisons (Lafleur et coll., 1987).....	59
Figure 34	Profil transversal de terrain en pente.....	60
Figure 35	Profil longitudinal de terrain en pente	61
Figure 36	Fuseaux granulométriques admissibles (MTQ, 2013a)	64
Figure 37	Influence des particules fines sur la perméabilité des granulats.....	66
Figure 38	Méthode de Kenney et Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne des particules	67
Figure 39	Enrochement utilisé sur la route 175 dans un déblai de sable silteux	68
Figure 40	Variation de la transmissivité d'un géotextile non tissé en fonction de différentes contraintes de compression (Lafleur, 1998)	74
Figure 41	Débits d'eau recueillis dans les systèmes de drainage de Saint-Donat (Racette et Lafleur, 1993)	79
Figure 42	Pentes minimales des interfaces (MTQ, 2013c, dessin normalisé 025 du chapitre 1)	80
Figure 43	Saignée sur le talus du fossé, autoroute 15.	81
Figure 44	Classification des courbes granulométriques de sols à granulométrie étendue	83
Figure 45	Aquifère artésien sous la chaussée en coupe	84
Figure 46	Pression interstitielle maximale u à la base du matériau imperméable sous la structure de route, en fonction de l'épaisseur h sous le fond de la coupe, pour des sols d'infrastructure avec $16 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 20 \text{ kN/m}^3$	85
Figure 47	Section type d'extension de la sous-fondation (dessin normalisé 025 du chapitre 1)	86

Figure 48	Détail du tuyau de drainage à l'infrastructure (dessin normalisé 005 du chapitre 3).....	87
Figure 49	Tuyau de drainage à l'infrastructure	87
Figure 50	Écran drainant en rive de chaussée, route 116, Dosquet...	88
Figure 51	Couche drainante à l'infrastructure dans un profil en coupe, autoroute 50	89
Figure 52	Exemples de masques drainants de rive.....	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Variation du degré de saturation et de la perméabilité des agrégats routiers au cours des saisons	25
Tableau 2	Degré de saturation moyen (%) sous la piste extérieure de roue dans un sable d'infrastructure. Profil en coupe	55
Tableau 3	Importance relative par ordre décroissant des facteurs intervenant dans le dimensionnement des systèmes de drainage (nouvelle construction)	58
Tableau 4	Gamme des géosynthétiques disponibles en drainage de chaussées	71
Tableau 5	Comparaison entre matériaux granulaires et géosynthétiques	72
Tableau 6	Comparaison des transmissivités de géocomposites de drainage et de matériaux granulaires de 150 mm d'épaisseur (m^2/s)	74
Tableau 7	Choix et position des systèmes en fonction de la nature des sols encaissants et de la position de la nappe phréatique. Route régionale	91
Tableau 8	Coût de chaque système (1995)	92

GLOSSAIRE

Contrainte effective ou intergranulaire

Correspond à la contrainte totale diminuée de la pression interstitielle à un niveau donné dans le sol.

Contrainte totale (verticale)

Correspond à la pression exercée par les terres à une profondeur donnée. C'est la sommation des produits du poids volumique par l'épaisseur de chaque couche sus-jacente à cette profondeur.

Couche drainante

Couche de matériau granulaire grossier très perméable, stabilisé ou non à l'aide d'additifs, mis en place pour accélérer l'évacuation d'eau dans la chaussée. Les géosynthétiques sous forme de géotextiles ou de géocomposites peuvent aussi faire office de couche drainante.

Degré de saturation

Rapport entre le volume de l'eau interstitielle et le volume des vides d'un sol. Dans le cas de la glace, c'est la portion des vides occupée par la glace par rapport au volume des vides.

Indice de gel maximum

Valeur maximale cumulée des produits des degrés Celsius sous le point de congélation par le temps, au cours d'un hiver.

MG-20

Terme utilisé par le ministère des Transports du Québec pour désigner le granulats utilisé le plus souvent dans la couche de fondation d'une chaussée.

MG-112

Terme utilisé par le ministère des Transports du Québec pour désigner le granulats utilisé le plus souvent dans la couche de sous-fondation d'une chaussée.

Nappe phréatique

Limite supérieure de l'aquifère que l'on rencontre généralement à faible profondeur. Elle peut correspondre à la surface du terrain naturel au printemps. C'est la partie saturée du sol où les interstices entre les grains solides sont entièrement remplis d'eau. On évalue sa position à l'aide de piézomètres ou de tubes perforés.

Perméabilité ou conductivité hydraulique

Vitesse apparente de l'eau (à 20 °C) en mètres par seconde dans un sol soumis à un gradient hydraulique unitaire.

Permittivité

Pour un écoulement normal au plan, c'est le quotient de la perméabilité sur l'épaisseur de la couche traversée par l'eau.

Piézomètre

Appareil constitué d'un tuyau fermé muni à sa base d'une pierre poreuse isolée de la surface par une couche de bentonite, à l'intérieur duquel la colonne d'eau vient en équilibre avec la pression interstitielle qui s'exerce dans le sol. On mesure la position du niveau d'eau dans le tuyau à l'aide d'un circuit électrique qui se ferme au contact de l'eau.

Porosité

Rapport du volume des pores sur le volume total.

Pression interstitielle

Pression de l'eau à l'intérieur des vides d'un sol à une profondeur donnée.

Résistance au cisaillement

Par le contact entre les grains des granulats et des sols, il se développe, dans la fondation de la chaussée, une résistance aux déformations induites par les charges de trafic.

Système de drainage

Ensemble de moyens visant à accélérer l'évacuation gravitaire de l'eau présente dans un domaine d'écoulement. Le système est constitué de différents éléments comme les matériaux filtrants et drainants, les tuyaux d'évacuation et les exutoires.

Transmissivité

Pour un écoulement parallèle à un plan, c'est le produit de la perméabilité par l'épaisseur de la couche soumise à l'écoulement de l'eau.

LISTE DES SYMBOLES

c'	cohésion
C_u	coefficient d'uniformité (d_{60}/d_{10})
d_l	diamètre indicatif
E_{CD}	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée par drainage quasi horizontal
E_L	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée par drainage latéral
E_T	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée vers le sol d'infrastructure
φ'	angle de frottement interne du sol en contraintes effectives
I	pourcentage passant inférieur à I
I_g	indice de gel cumulatif
I_{gmax}	indice de gel cumulatif maximal
I_S	infiltration d'eau dans la structure de la chaussée par les fissures du revêtement
I_T	infiltration d'eau dans la structure de la chaussée à partir du sol d'infrastructure
I_L	infiltration d'eau latérale dans la structure de la chaussée par le terrain avoisinant
k	conductivité hydraulique (perméabilité)
k_n	conductivité hydraulique d'un filtre
k_s	conductivité hydraulique d'un sol
n	porosité
O_f	valeur maximale de l'ouverture de filtration
S_r	degré de saturation d'un matériau
σ	contrainte totale en un point, due au poids des terres et aux charges de trafic
σ'	contrainte effective en ce point
tg	tangente
τ_f	contrainte en cisaillement
u	pression interstitielle en ce point

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AASHTO :	American Association of State Highway and Transportation Officials
BNQ :	Bureau de normalisation du Québec
CD :	couche drainante
CDI :	couche drainante à l'infrastructure
CRE :	courbe de rétention d'eau
EDRC :	écran drainant en rive de chaussée
ESF :	extension de la sous-fondation
F :	fondation granulaire (constituée de MG-20) ou fraction granulométrique
FCH :	fonction de conductivité hydraulique
FOS :	filtration opening size (ouverture de filtration obtenue par tamisage hydrodynamique)
LA :	ligne d'accotement
LR :	ligne de rive
MDR :	masque drainant de rive
MTQ :	ministère des Transports du Québec
PE :	polyester
PER :	piste extérieure de roue
PET :	polyéthylène
PP :	polypropylène
SF :	sous-fondation granulaire (constituée de MG-112)
TDI :	tuyau de drainage à l'infrastructure
VEA :	valeur d'entrée d'air

1. EFFET DE L'EAU SUR LES STRUCTURES DE CHAUSSÉES

1.1. Stabilité des fondations de chaussée

Les mécanismes par lesquels l'eau agit sur les granulats et les sols sont liés à deux phénomènes :

- 1) leurs vides sont partiellement constitués d'air et d'eau. Si la teneur en eau augmente substantiellement, la tension superficielle qui fournit à ce sol une cohésion apparente contribuant à la stabilité est éliminée;
- 2) le rehaussement du niveau piézométrique dans la structure de chaussée provoque une augmentation des pressions interstitielles de l'eau qui se traduit par une réduction de la résistance au cisaillement.

Ainsi, la résistance au cisaillement τ_f du sol en fonction des contraintes effectives en un point est donnée par :

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (1.1)$$

où c' = cohésion

σ = contrainte totale en un point, due au poids des terres et aux charges de trafic

u = pression interstitielle en ce point

σ' = contrainte effective en ce point

φ' = angle de frottement interne du sol en contraintes effectives

En saturant les matériaux granulaires, l'eau diminue leur résistance au cisaillement τ_f et, par conséquent, leur capacité portante. Un degré de saturation élevé S_r d'un matériau (pourcentage du volume de l'eau par rapport au volume des pores) annule les tensions capillaires responsables d'une cohésion apparente et d'une résistance accrue. Ce mécanisme est illustré à la figure 1 à l'aide des enveloppes de résistance caractéristiques d'un matériau non saturé à la teneur en eau optimale ($S_r \approx 70\%$) et du même matériau à saturation ($S_r = 100\%$). Dans la gamme des contraintes normales transmises à l'intérieur des structures de chaussées, c'est-à-dire entre 25 et 100 kPa, τ_f peut diminuer de plus de la moitié.

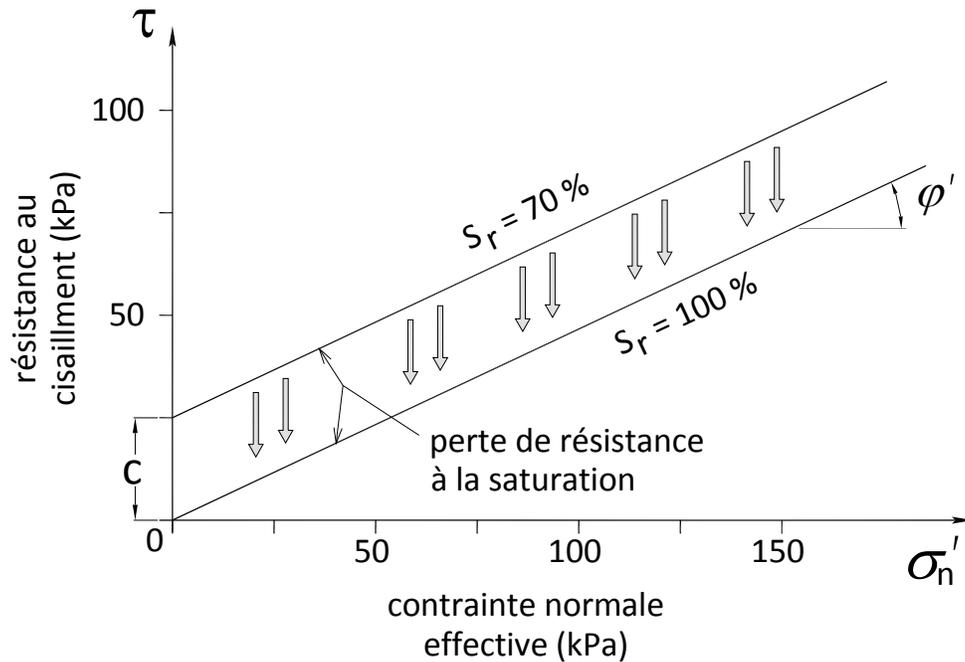


Figure 1 Courbe de l'enveloppe typique de résistance au cisailiment de granulats saturés et non saturés

Chaque saison pluvieuse amène avec elle une augmentation des pressions interstitielles et une réduction correspondante de la capacité portante de la chaussée. De plus, les cycles d'augmentation et de réduction de résistance peuvent causer par fatigue un affaiblissement du sol non défini par l'équation 1.1.

Le rôle joué par les changements de teneur en eau, de pression interstitielle et d'écoulement est l'un des facteurs les plus difficiles à établir quand on étudie les effets de l'eau. Il demeure néanmoins très important.

Les ingénieurs considèrent usuellement les méthodes suivantes pour le contrôle de l'eau susceptible d'affecter leurs projets :

- réduire les infiltrations des zones où elles peuvent causer des dommages en imperméabilisant ces zones;
- contrôler l'eau par drainage et par évacuation.

La première méthode consiste à mettre en place et à maintenir une barrière complètement imperméable à la surface pour empêcher l'eau d'atteindre les fondations de la chaussée; la pose d'un revêtement remplit généralement cette fonction. En empêchant l'eau extérieure d'accéder à la structure de chaussée par cette barrière, on réduit les risques d'affaiblissement de la fondation. La seconde approche consiste à drainer et à évacuer le plus rapidement possible l'eau qui aurait atteint les fondations de la chaussée pour l'empêcher de

causer des dommages, que ce soit par infiltration directe dans les chaussées non revêtues ou à travers les fissures et les joints dans les chaussées revêtues.

En génie routier, les conceptions basées sur le drainage de l'infrastructure sont un complément à l'imperméabilisation de la surface. L'efficacité de ces méthodes repose sur l'utilisation de matériaux adéquats, imperméables ou drainants, pour réduire l'infiltration ou pour faciliter l'évacuation rapide de l'eau.

1.2. Variation des quantités d'eau dans la chaussée au cours des saisons

Quelle que soit la saison, l'eau trouve toujours un chemin pour s'infiltrer dans la structure de chaussée; c'est l'amorce d'un long processus de dégradation qui varie au cours de l'année. La partie supérieure de la figure 1.2 est un histogramme typique de la distribution des précipitations moyennes mensuelles au cours de l'année, pour cinq stations au Québec (Bagotville, Québec, Lavaltrie, Sainte-Anne-de-Bellevue, Hull) sur une période de cinq années, soit de 1971 à 1975; les précipitations en neige ont été converties en quantité d'eau par un facteur de réduction de 10 (c'est la partie en noir des barres). On constate que les précipitations ne varient pas beaucoup au cours des saisons et se situent autour d'une moyenne de 93 mm par mois. On a indiqué, en dessous de cette distribution, la quantité d'eau moyenne mensuelle infiltrée directement dans un sol perméable en faisant certaines hypothèses sur le taux de fonte des neiges au printemps et sur la quantité d'évapotranspiration au cours de l'été. On constate que les saisons où la quantité d'eau infiltrée est la plus grande sont le printemps et, à moindre échelle, l'automne.

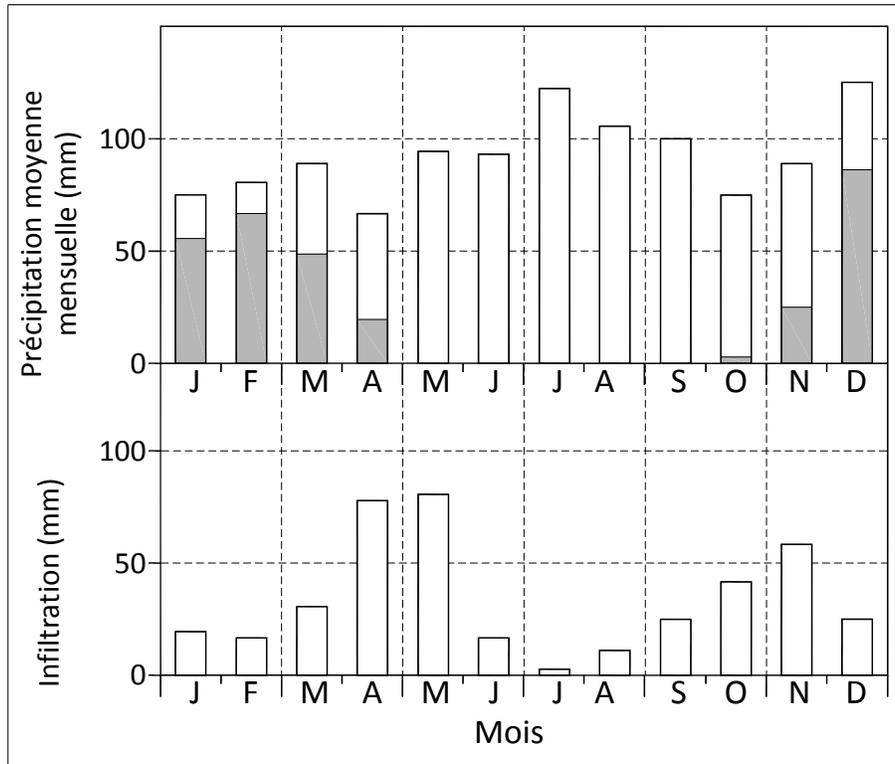


Figure 2 Précipitations moyennes mensuelles

Dans les structures de chaussées, les quantités d'infiltration varient notamment en fonction de la capacité d'absorption des granulats et des sols. Cette capacité est principalement liée à leur perméabilité. Or, comme l'indique la courbe en rouge de la figure 3, toutes autres choses étant égales pour un matériau donné, ce paramètre varie en fonction du degré de saturation en eau : la perméabilité k d'un matériau est beaucoup plus faible en condition non saturée ($S_r < 100$) qu'en condition saturée. Cet aspect sera traité plus en détail à la section C du chapitre II du présent rapport.

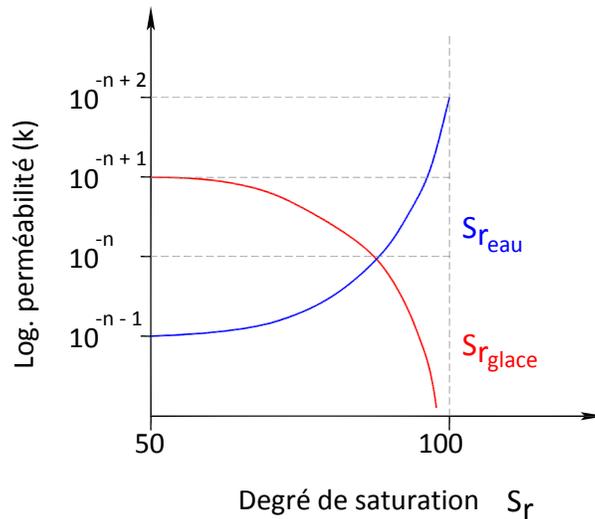


Figure 3 Variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation des pores en eau et en glace

Comme mentionné précédemment, on trouve deux périodes dans l'année où l'infiltration est accrue : au printemps et, à un degré moindre, à l'automne.

- au cours de l'hiver, la valeur de S_r s'accroît graduellement jusqu'à atteindre localement 100 %;
- au printemps, les matériaux de fondation peuvent être saturés;
- en période estivale, les débits d'infiltration sont diminués à cause du taux élevé d'évaporation;
- finalement, à l'automne, la perméabilité k des matériaux granulaires désaturés durant l'été est abaissée. Pendant cette période, ces matériaux ont un degré de saturation en eau S_r qui peut varier entre 70 et 90 %.

Le tableau 1 décrit ces variations en termes généraux. On peut apprécier également la relation de cause à effet entre les conditions météorologiques, l'infiltration et les variations du degré de saturation et de la perméabilité des agrégats.

Tableau 1 Variation du degré de saturation et de la perméabilité des agrégats routiers au cours des saisons

Saison	Précip. liquide	Infiltration	Saturation de la fondation	Perméabilité
HIVER : (D, J, F)	Faible	Faible : le sol gelé est imperméable	Augmente graduellement jusqu'à la fin de l'hiver	Faible : $S_r \ll 100\%$
PRINTEMPS : (M, A, M)	Moy.	Élevée : les précip. se combinent aux eaux de fonte	$S_r \approx 100\%$	Augmente
ÉTÉ : (J, J, A)	Moy.	Diminue à cause de l'évaporation	$70\% < S_r < 90\%$	Diminue
AUTOMNE : (S, O, N)	Moy.	Plus élevée pour décroître à la mi-nov.	$S_r \square 100\%$ et diminue à la mi-nov.	Augmente de nouveau jusqu'en nov. et diminue avec la réduction de l'infiltration

1.3. Types d'endommagement par l'eau

L'endommagement des chaussées se manifeste de différentes façons qui peuvent en être à la fois la cause et l'effet : un revêtement fissuré permet un accroissement d'infiltration, qui, à son tour, provoque l'apparition de nouvelles fissures à cause de la réduction de portance des agrégats en présence d'eau. Parmi les facteurs qui favorisent l'augmentation de la quantité d'eau et l'endommagement des fondations de chaussées, on note :

- la présence de fissures non bouchées ou de nids-de-poule causés par des fondations déficientes et parfois de compacité non uniforme, associées au remplissage des tranchées de conduits souterrains;
- la dégradation par oxydation du bitume qui augmente la perméabilité du revêtement;
- la position élevée de la nappe phréatique.

Selon les saisons, la présence d'eau se manifeste sous deux formes : les soulèvements hivernaux et les pertes de portance au printemps.

1.3.1. Soulèvements en hiver

En gelant dans les pores des couches portantes de la chaussée, le volume de l'eau augmente de 10 % et, de ce fait, provoque des soulèvements différentiels à la surface qui causent la formation de fissures dans le revêtement. La figure 4 montre ce type d'endommagement où les fissures sont passablement ouvertes et longues.

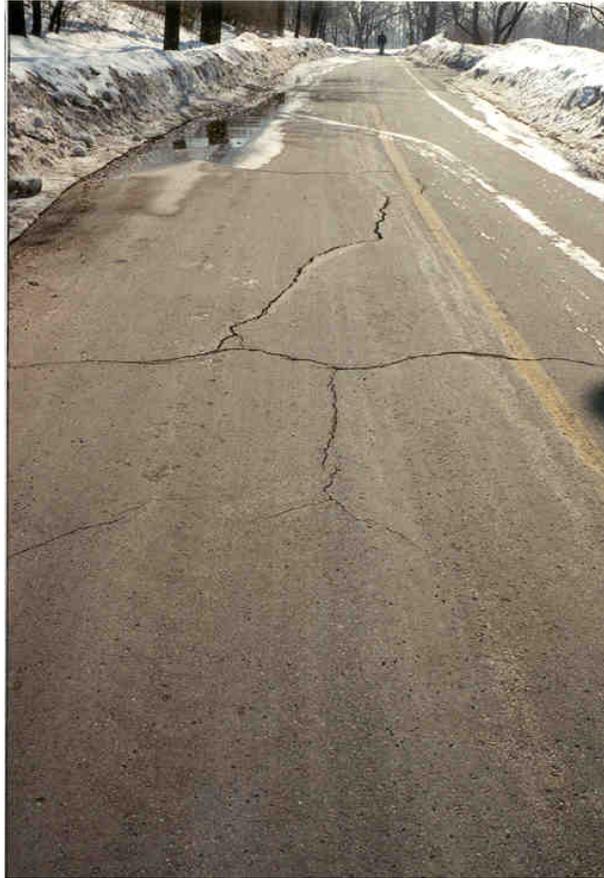


Figure 4 Fissures créées par le soulèvement différentiel en hiver

À titre indicatif, pour une pénétration du gel de 2 m sous la chaussée, en supposant des matériaux avec une porosité moyenne de 30 % et un degré de saturation de 100 %, le volume global s'accroîtrait de 3 % et l'on aurait théoriquement un soulèvement de 60 mm. Le bas de la figure 5 schématise la pénétration du gel en fonction du temps sous une chaussée typique du Québec, entre novembre et février. La profondeur de l'isotherme 0 °C varie en fonction du temps, de la nature des sols et de la quantité de froid disponible à la surface. La progression d'un front de gel dans les granulats de fondation et le sol d'infrastructure peut s'accompagner d'un soulèvement de surface qui, comme l'indique la partie supérieure du graphique, croît aussi avec la saison froide pour atteindre un maximum vers la mi-mars. Étant donné que l'épaisseur de fondation et de sous-fondation est de l'ordre du mètre et que la pénétration du gel sous une chaussée peut atteindre deux mètres, on constate également sur cette figure que le front de gel pénètre dans le sol d'infrastructure, généralement plus gélif que les granulats de fondation et de sous-fondation. Lorsque cela se produit, on remarque que le taux de soulèvement s'accélère. À cause des variations locales dans les caractéristiques du sol, le soulèvement varie d'un point à l'autre, ce qui se traduit à la surface par des défauts d'uni.

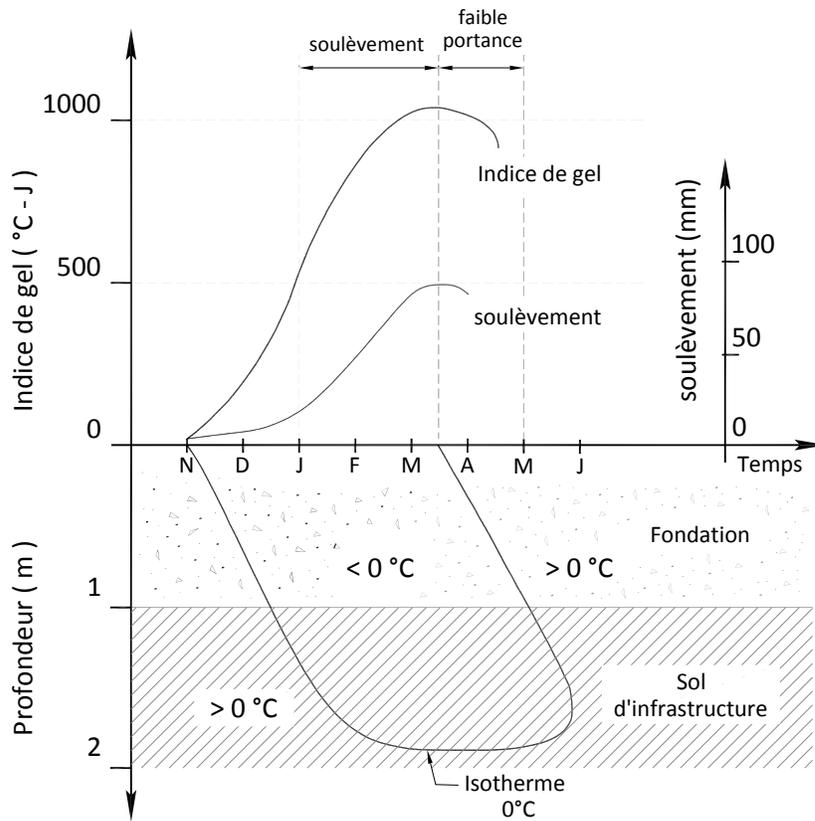


Figure 5 Progression du gel dans la chaussée et soulèvement associé à l'indice de gel maximal

La pénétration du gel et le soulèvement sont intimement liés à l'indice de gel cumulé I_g défini par :

$$I_g = \sum \theta \Delta t \quad (1.2)$$

où θ = température sous le point de congélation

Δt = intervalle de temps correspondant

La valeur de I_{gmax} varie au Québec de 800 à 2 000 °C-jour et la pénétration maximale du gel se situe entre 0,6 et 2,4 m. La figure 6, tirée du site Web du ministère des Transports du Québec (2013b), définit la position des zones gelées sous la chaussée et leur effet sur le revêtement.

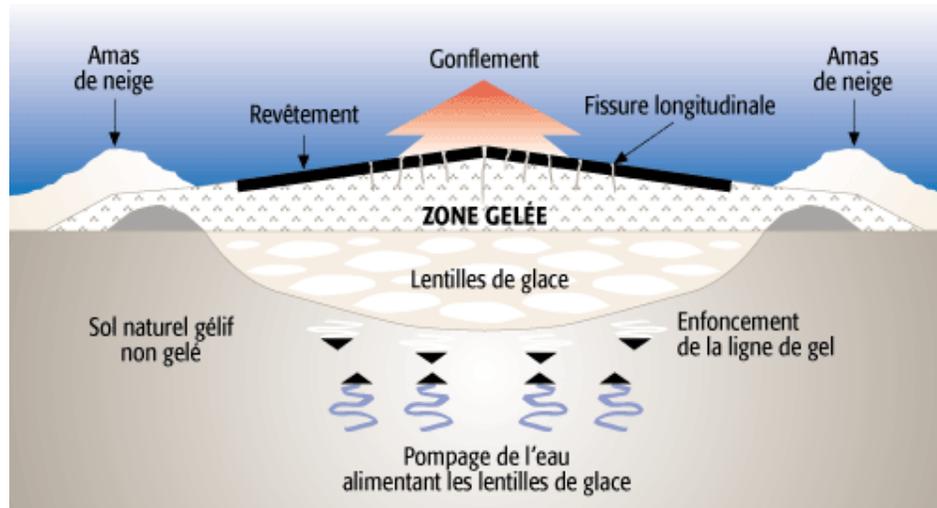


Figure 6 Chaussée endommagée par le soulèvement hivernal (MTQ, 2013b)

1.3.2. Perte de capacité portante au printemps

Dans la partie inférieure de la figure 1.5, on note que le front de dégel commence à progresser à partir de la surface et dure plus d'un mois à partir de la mi-mars, au moment où les indices de gel commencent à décroître, c'est-à-dire que les températures journalières moyennes demeurent au-dessus du point de congélation. Les conditions qui existent à ce moment sont illustrées à la figure 1.7, où l'on remarque une zone gelée imperméable qui confine l'eau dans une zone dégelée en forme de cuvette immédiatement sous le revêtement. Lorsqu'ils ont été soumis à des températures sous le point de congélation pendant l'hiver, les pores se sont graduellement obstrués et le sol est devenu pratiquement imperméable à l'eau. La figure 1.3 indique que la perméabilité d'un sol gelé diminue considérablement en fonction du degré de saturation en glace S_{rg} (volume de glace/volume des pores) et qu'un matériau peut devenir pratiquement imperméable lorsque ses vides sont comblés de glace; la perméabilité peut alors chuter de plusieurs ordres de grandeur.

La présence accrue d'eau emprisonnée dans la zone située immédiatement sous les charges de roue se traduit par une baisse de capacité portante et une dégradation accélérée de la couche de revêtement, comme le montre la figure 7. Cette zone en forme de cuvette se situe en surface parce que le dégel hors de la chaussée est retardé par la présence de neige et de glace qui isolent des rayons du soleil.

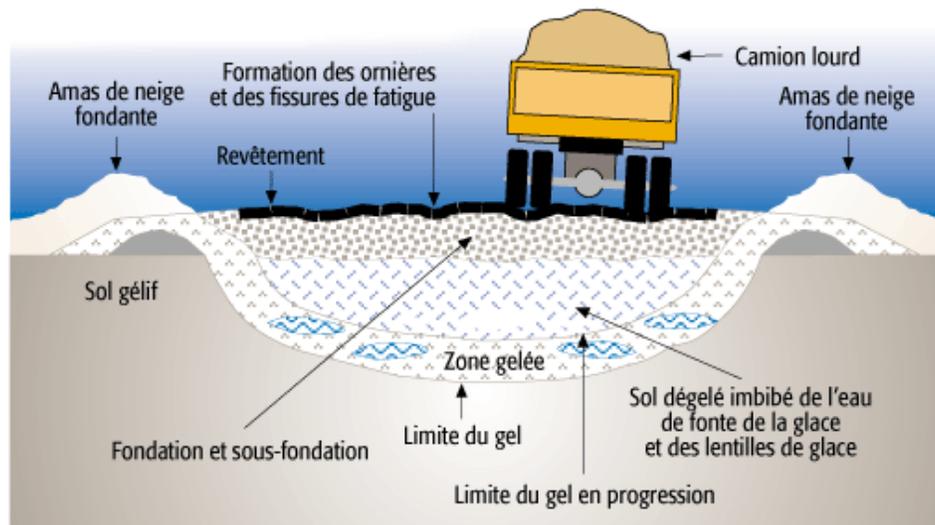


Figure 7 Chaussée endommagée par une faible portance au printemps (MTQ, 2013b)

La figure 8 montre l'endommagement caractéristique d'un revêtement causé par un drainage déficient. La capacité de support des matériaux de fondation est considérablement réduite et le revêtement est incapable de reprendre les charges de trafic. Ces fissures favorisent une infiltration d'eau accrue qui augmente la dégradation de façon exponentielle.



Figure 8 Fissures créées par un excès d'eau au printemps dans la fondation

1.3.3. Où et quand mettre en place un système de drainage

On a vu précédemment que le bon comportement des chaussées passe par un drainage efficace. Même si celles-ci sont conçues et construites initialement suivant les normes, elles seront inévitablement soumises, au cours de leur durée de vie, à une présence d'eau qui affaiblira les matériaux de support situés immédiatement sous le revêtement. Or, les comportements de drainage des chaussées sont largement méconnus; c'est pourquoi ce rapport vise à fournir un éclairage sur les mécanismes en présence et les moyens de prolonger la durée de vie des chaussées en réduisant les quantités d'eau sous les charges de trafic.

Un système de drainage peut être mis en place dans deux contextes différents :

- dans les nouvelles constructions :

Lorsque les facteurs qui interviennent dans la conception d'un système de drainage, décrits au chapitre IV du présent rapport, débouchent sur la nécessité de la mise en place d'un tel système, la vie utile d'une nouvelle chaussée peut être prolongée de façon appréciable. Les éléments de conception sont expliqués au chapitre VI, alors que les chapitres V et VII décrivent le rôle potentiel des géosynthétiques en filtration/drainage et les systèmes de drainage disponibles.

- dans les chaussées dégradées :

Pour des raisons économiques, il peut être plus justifié de prolonger la vie utile et d'améliorer le comportement d'une chaussée en implantant un système de drainage plutôt que de procéder à sa reconstruction. La conception du système doit alors prendre en compte la disposition des lieux et les propriétés des matériaux de la chaussée. Le présent rapport donne des indications sur les ajustements à faire lors de la conception en fonction de ces deux facteurs.

Il importe également de faire la distinction entre les chaussées en milieu rural avec fossés et les chaussées en milieu urbain. Dans le premier cas, le fond du fossé constitue le point bas à un minimum de 1,7 m sous le centre de la chaussée pour le drainage gravitaire, alors que dans le second, le point bas pour l'écoulement des eaux à l'intérieur de la chaussée se situe à la ligne d'infrastructure. L'évacuation des eaux présentes dans cette structure doit alors se faire par des conduits reliés à un système d'égout pluvial. Ce rapport ne traite que des chaussées en milieu rural avec fossés.

2. INFILTRATION ET DRAINAGE

2.1. Localisation des zones de charge (infiltration) et de décharge (drainage, évacuation) dans les structures de chaussées

2.1.1. Définition des termes

Les éléments qui constituent une chaussée sont représentés à la figure 9.

Structure de chaussée : ensemble des matériaux mis en place au-dessus de la ligne d'infrastructure : sous-fondation, fondation, revêtement et système de drainage (écran de rive, tuyaux de collecte et d'évacuation, exutoires).

Profil rasant : la structure de chaussée est posée directement sur le sol d'infrastructure débarrassé de la terre végétale.

Profil en remblai : le profil est rehaussé à l'aide d'un emprunt de type B entre le sol d'infrastructure naturel et la structure de chaussée. Sur le plan hydraulique, les conclusions obtenues dans les simulations pour les profils rasants s'appliquent également à ce type de profil. Le matériau de remblai peut alors être considéré comme un sol d'infrastructure.

Profil en coupe : la structure de chaussée est posée sur le sol d'infrastructure, qui a été préalablement excavé pour respecter le profil longitudinal de la route. La nappe phréatique environnante peut se situer au-dessus ou au-dessous de la ligne d'infrastructure.

Profil transversal en pente : la route longe un versant dans lequel il existe un écoulement naturel perpendiculaire à l'axe de la route.

Ligne de rive : bordure extérieure du revêtement de la voie de roulement.

Ligne d'infrastructure : limite supérieure du sol d'infrastructure ou du remblai de classe B.

Épaulements latéraux : constitués de matériaux qui ne servent qu'à adoucir la pente des talus pour des raisons de sécurité. L'étude de Lafleur et Kirschbaum (1994) a démontré que ces matériaux correspondent à un emprunt de classe B et qu'ils peuvent être moins perméables que le MG-112 de sous-fondation et constituer alors une barrière à l'évacuation des eaux présentes dans la structure de chaussée.

Drains d'évacuation : tuyaux perforés qui sont placés pour recueillir les écoulements latéraux provenant de la sous-fondation; ils peuvent être enrobés dans une pierre nette ou le sable de sous-fondation, à la condition de prévoir des filtres aux interfaces pour empêcher le colmatage du système. Leur

diamètre et leur résistance sont déterminés en fonction de la nature du trafic et des conditions de mise en place.

Exutoires : points d'évacuation des eaux captées par le système vers le fossé. Leur espacement dépend principalement de la pente des drains d'évacuation. Il est important qu'ils ne soient pas obstrués par des débris ou de la glace.

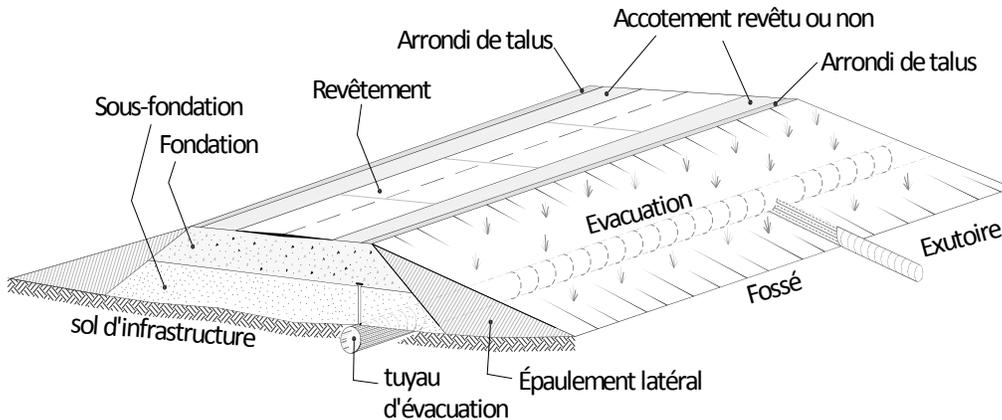


Figure 9 Éléments d'un système de drainage dans la structure de chaussée

Les figures 10 et 11 indiquent, à l'aide de flèches, la provenance et l'évacuation des eaux à l'origine des écoulements susceptibles de se produire dans une chaussée et au voisinage de celle-ci.

En **rouge**, on indique les infiltrations qui proviennent des fissures ou des joints du revêtement I_S ou des épaulements latéraux I_L ou d'en dessous de la structure de chaussée I_T si la nappe phréatique est plus élevée que le niveau de l'infrastructure, comme dans les profils en coupe. Une quantité d'eau peut pénétrer dans la sous-fondation pendant l'hiver si le matériau est gélif et si la nappe phréatique est près de la surface du sol d'infrastructure.

En **bleu**, l'eau de la structure est évacuée vers le sol d'infrastructure si la nappe phréatique est plus basse que ce niveau E_T et par un dispositif d'évacuation latérale E_L si les épaulements sont moins perméables que les granulats de fondation et de sous-fondation ou si la nappe phréatique environnante est plus élevée que le sol d'infrastructure, comme dans les profils en coupe. Le chapitre VII décrit plus en détail les systèmes de drainage les plus courants pour les cas de nappe phréatique élevée.

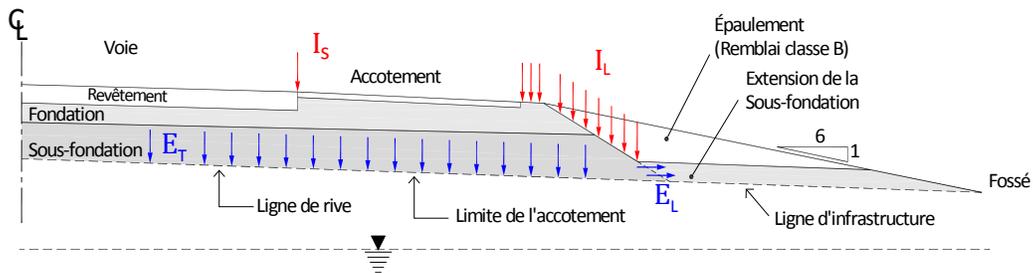


Figure 10 Localisation des zones de charge et de décharge – profil rasant d'autoroute

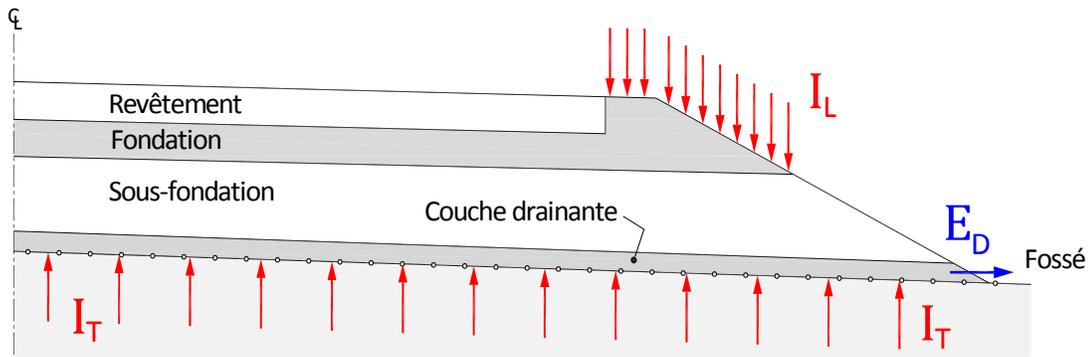


Figure 11 Localisation des zones de charge et de décharge – profil en coupe

2.1.2. Infiltration

i) Infiltration par le revêtement I_S

L'infiltration ne peut se faire que par les joints et les fissures dans le revêtement; on considère que peu d'eau pénètre à travers le revêtement à moins qu'il ne soit fissuré et oxydé. Ridgeway (1976) a démontré expérimentalement que le débit d'eau dans une fissure varie entre 0,186 et 92 litres/h/m de fissure (moyenne de 10 litres/h/m) pour une chaussée avec un revêtement bitumineux et entre 0 et 7,4 litres/h/m de fissure (moyenne de 4,7 litres/h/m) pour une chaussée avec un revêtement en béton de ciment. Ces valeurs sont intimement liées à la nature des granulats de fondation situés immédiatement sous le revêtement et à l'ouverture des fissures.

ii) Infiltration par les arrondis de talus et les épaulements latéraux I_L

Les arrondis de talus et les épaulements latéraux peuvent aussi être une source d'infiltration directe s'ils sont perméables.

iii) Infiltration verticale par le sol d'infrastructure I_T

Si la nappe est plus élevée que le sol d'infrastructure, la pression de l'eau dans la structure de chaussée tend à s'équilibrer au niveau du terrain avoisinant, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en eau des granulats. Ce phénomène est accentué si le sol d'infrastructure est plus perméable que la structure de chaussée. On doit de plus tenir compte de l'alimentation par les fuites de conduits d'aqueduc ou d'égout en mauvais état.

2.1.3. *Évacuation*

L'eau qui a pénétré dans la structure de chaussée peut en être évacuée à l'aide d'un système qui sera conçu en fonction des facteurs discutés au chapitre IV.

i) Évacuation par le sol d'infrastructure E_T

L'eau d'infiltration dans la structure de chaussée peut être évacuée vers le sol d'infrastructure à condition que celui-ci soit plus perméable que la sous-fondation et que la nappe phréatique soit plus basse que le niveau de l'infrastructure en tout temps de l'année. Dans le cas contraire, on trouve les apports d'eau I_L et I_T vers la structure de chaussée.

ii) Évacuation par drainage latéral E_L

Dans les cas où le niveau de la nappe phréatique est supérieur à la ligne d'infrastructure pendant une bonne partie de l'année, comme dans les profils en déblai, l'eau peut être évacuée à l'aide d'un système de drainage tel que décrit au chapitre IV.

iii) Évacuation par drainage quasi horizontal à la ligne d'infrastructure E_{CD}

Dans les cas où le niveau de la nappe phréatique est supérieur à la ligne d'infrastructure pendant une bonne partie de l'année, comme dans les profils en déblai, on peut accélérer l'évacuation de l'eau en mettant en place une couche drainante telle que décrite au chapitre VI qui recouvrira le sol d'infrastructure immédiatement sous la sous-fondation. Pour être efficace, cette couche doit nécessairement être en communication avec le fossé.

2.2. Relation entre les précipitations, l'infiltration et le ruissellement dans les chaussées

L'eau dans les structures de chaussées provient des précipitations liquides et de la fonte des neiges. La figure 12 présente le taux d'infiltration en fonction du temps dans un gravier de fondation pour une précipitation constante de 1,3 mm/h. On constate que l'infiltration diminue en fonction du temps pour atteindre la perméabilité à saturation du gravier au bout de 5 heures (la notion de saturation est détaillée à la section suivante). Les précipitations de faible

intensité et de longue durée sont celles qui génèrent le plus d'infiltration. Par exemple, une faible précipitation automnale ou printanière de 1,3 mm/h qui dure plus d'une journée favorise davantage l'infiltration qu'un orage estival intense de courte durée. De façon générale et en l'absence de sol gelé, de 5 à 80 % de cet apport s'infiltré dans le sol, un pourcentage qui varie en fonction des saisons, de la pente et de la perméabilité du terrain. À l'opposé, l'eau qui ne s'infiltré pas doit nécessairement ruisseler vers les fossés (ou s'évaporer), ce qui correspond à 40 à 90 % de la précipitation. L'infiltration dans la chaussée s'en trouve alors réduite au détriment du ruissellement et varie au cours des saisons.

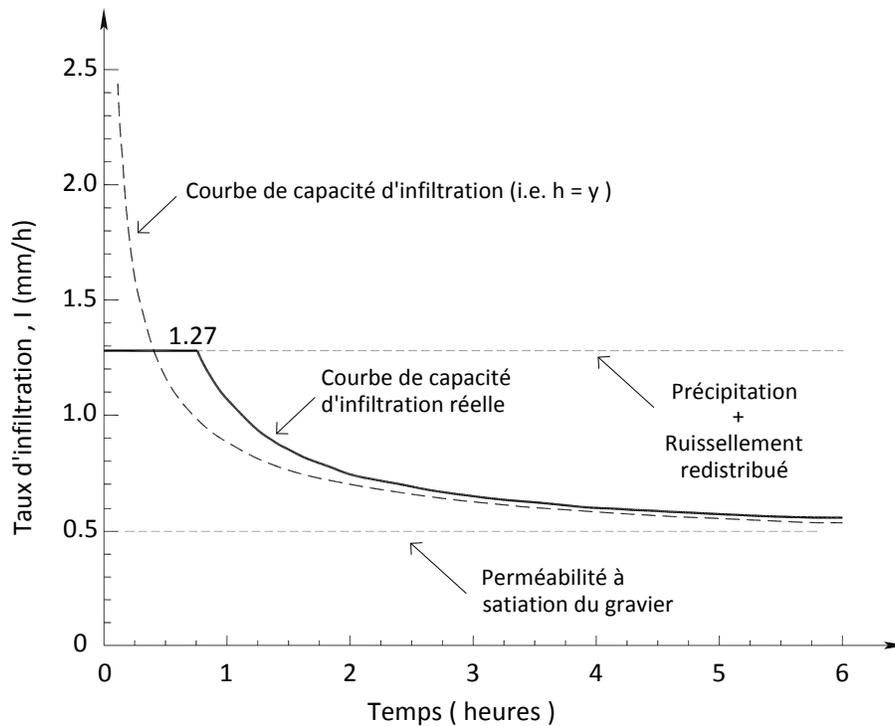


Figure 12 Distribution des infiltrations dans un gravier en fonction du temps, après le début d'une précipitation

2.3. Modélisation par éléments finis de l'écoulement dans les chaussées

Les résultats présentés dans ce rapport découlent d'observations en laboratoire et sur le terrain faites par Racette et Lafleur (1993), Lafleur et Boursier (1994), Lafleur et Kirschbaum (1994), Blanchet et Lafleur (1996) et Lafleur et Savard (1996). Ces travaux ont par la suite été appuyés par des études paramétriques avec le logiciel SEEP/W effectuées par Lafleur et

Lebeau (1999), Lebeau et Lafleur (2002), Lafleur et Généreux (2007) et Lafleur & Ja'far (2009).

2.3.1. Sections transversales et conditions aux frontières

On considère une chaussée d'autoroute, dont la section transversale est présentée à la figure 13, pour le profil rasant et une chaussée de route régionale, représentée aux figures 14 et 15, pour le profil en coupe. Il s'agit d'une chaussée de béton de 200 mm d'épaisseur à deux voies symétriques avec accotement de 64 mm d'épaisseur. Les débits d'infiltration ont été basés sur les courbes intensité-durée-fréquence de la ville de Montréal et ont imposé une précipitation à la surface de 0,60 mm/h pour une durée de 34 heures.

- pour les profils rasants d'autoroute : la fondation de MG-20 a une épaisseur de 200 mm et la sous-fondation de MG-112, 400 mm. Le sol d'infrastructure est une couche d'argile d'un mètre d'épaisseur beaucoup moins perméable que les matériaux de la structure de chaussée. L'écran drainant en rive de chaussée (EDRC) a une épaisseur de 40 mm et le tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI), un diamètre de 150 mm; comme indiqué, il est parfois de pierre nette non capillaire ou de sable de sous-fondation capillaire. L'infiltration se fait par un joint de 4 mm situé à la bordure extérieure du revêtement et par l'arrondi de talus. La nappe phréatique (horizontale) initiale (avant le début de l'infiltration) se situe au niveau du fond du fossé, à 1,7 m sous la ligne de centre. Le centre de la chaussée est un plan de symétrie et c'est une frontière imperméable, alors que la frontière droite du domaine a été fixée au fossé avec des conditions hydrostatiques. On a traité les cas suivants :
 - infiltration supplémentaire par une fissure au centre de la voie de roulement;
 - sols d'infrastructure variables;
 - couche drainante immédiatement sous le revêtement.

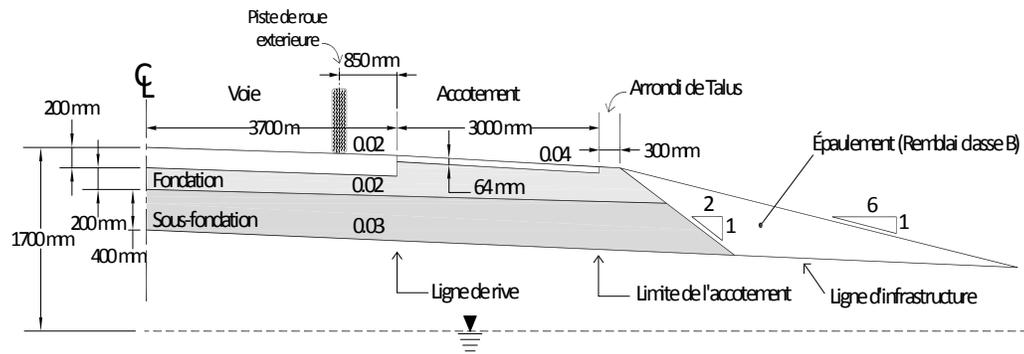


Figure 13 Section transversale de structure de chaussée d'autoroute avec profil rasant

- pour les profils en coupe de route régionale : les épaisseurs et les matériaux de la structure de chaussée sont les mêmes que pour le profil d'autoroute. On a simulé quatre sols d'infrastructure : sable, limon, moraine et argile d'une épaisseur de 6 m sous la ligne d'infrastructure. L'infiltration se fait sur la surface du plateau, dans le talus et par l'arrondi de talus dans la structure de chaussée. La nappe phréatique initiale se trouve à la surface du terrain avoisinant et au niveau du fond du fossé, à 1,7 m sous la ligne de centre. On a appliqué une distribution de pression hydrostatique au centre de la chaussée, alors que la frontière droite imperméable du domaine a été fixée à des distances de 35 à 65 m. On a fait varier :
 - la présence ou non d'une fissure au milieu de la voie de roulement;
 - la profondeur du déblai ΔH , de 2 à 10 m;
 - la présence ou non d'une couche drainante à l'infrastructure (CDI);
 - l'épaisseur de la CDI, de 100 ou de 150 mm;
 - la perméabilité de la CDI, de $1,2 \cdot 10^{-2}$ à $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

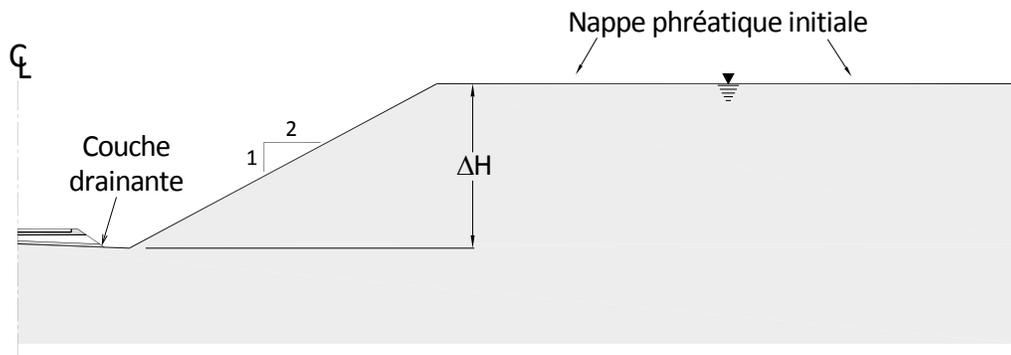


Figure 14 Section transversale avec profil en coupe

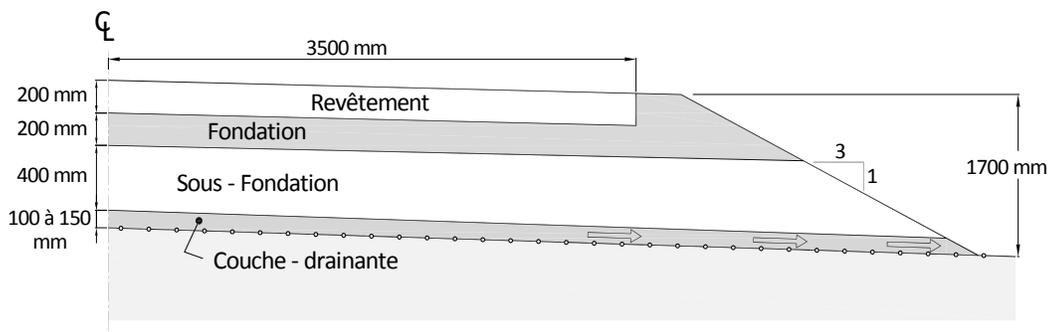


Figure 15 Détail de la structure de chaussée régionale avec profil en coupe

2.3.2. Écoulement saturé/non saturé

Le logiciel SEEP/W s'applique à résoudre l'équation suivante par la méthode des éléments finis.

$$\nabla \cdot (k(u_w) \cdot \nabla h) = \rho_w \cdot g \cdot m_w \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.1)$$

Le programme nécessite comme données d'entrée des conductivités hydrauliques $k(u_w)$ en conditions saturées/non saturées qui s'obtiennent à partir de la courbe de rétention d'eau (CRE) d'un sol; la CRE est une propriété caractéristique qui est principalement fonction de la dimension des pores et de leur distribution statistique. La figure 16 illustre cette propriété sous forme de graphique de la succion matricielle en fonction de la teneur en eau volumétrique. Les courbes ont une allure différente (hystérèse) si le sol est en absorption (mouillage) ou en désorption d'eau (séchage). Les succions seront plus élevées lorsqu'on assèche un sol préalablement saturé que lorsqu'on mouille le même sol préalablement non saturé; la valeur d'entrée d'air (VEA) en désorption correspond à la succion où un sol préalablement saturé absorbe de l'air, alors que la VEA en absorption correspond à la succion où le sol a atteint sa teneur en eau maximale. Lorsque les pressions interstitielles deviennent égales à zéro ou positives, la différence de teneur en eau correspond à l'écart entre la saturation et la saturation. Étant donné que les granulats et les sols compactés dans les structures de chaussées ont été mis en place et compactés en conditions non saturées, on devrait appliquer les paramètres en mouillage. Comme il n'existe pas de données expérimentales présentées dans la littérature pour ce cas particulier, les simulations ont été faites à partir de données obtenues d'échantillons en désorption et l'on a supposé qu'elles étaient représentatives. La CRE est formulée en termes de teneur en eau volumétrique par l'équation tirée de Fredlund et coll. (1994) :

$$\frac{\theta}{\theta_s} = C(u_a - u_w) \cdot \sum_{i=1}^{\mu} W_i \cdot \left[\frac{1}{\ln \left(e + \left(\frac{(u_a - u_w)^{v_i}}{a_i} \right) \right)} \right]^{\omega_i} \quad (2.2)$$

où

$e = 2,71828\dots$

$i =$ variable nominale de sommation

$\mu =$ modalité de la distribution de la taille des pores

$W_i =$ facteurs de pondération des sous-courbes avec $0 < W_i < 1$ et $\sum W_i = 1$

$a_i, u_i, \omega_i =$ trois paramètres de forme des différentes courbes

$\theta_s =$ teneur en eau du sol saturé

$(u_a - u_w)_r$ = succion matricielle correspondant à la teneur en eau résiduelle
 C = facteur de correction :

$$C((u_a - u_w)) = \left[\frac{\ln \left(1 + \left(\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_r} \right) \right)}{\ln \left(1 + \left(\frac{1 \cdot 10^6}{(u_a - u_w)_r} \right) \right)} \right] \quad (2.3)$$

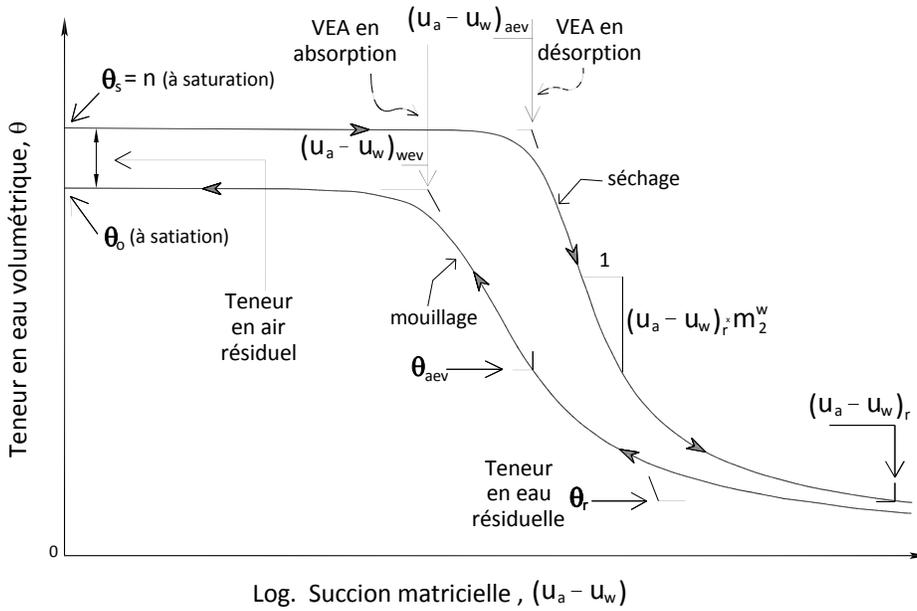


Figure 16 Courbes de rétention d'eau

Les fonctions de conductivité hydraulique (FCH) sont obtenues à partir des CRE par la relation de Fredlund et coll. (1994) :

$$k_r((u_a - u_w)) = \frac{k((u_a - u_w))}{k_s} = \frac{\int_{Z=\ln((u_a - u_w))}^{\ln(1 \cdot 10^6)} \frac{\theta(e^z) - \theta((u_a - u_w))}{e^z} \cdot \theta'(e^z) \cdot dZ}{\int_{Z=\ln((u_a - u_w)_{aev})}^{\ln(1 \cdot 10^6)} \frac{\theta(e^z) - \theta_s}{e^z} \cdot \theta'(e^z) \cdot dZ} \quad (2.4)$$

où

$k_r((u_a - u_w))$ = conductivité hydraulique relative fonction de la

succion matricielle

k_s = conductivité hydraulique en condition saturée

$\varphi(e^Z)$ = provient de l'équation 2.2 à e^Z

$\varphi'(e^Z)$ = dérivée de l'équation 2.2 à e^Z

Z = variable nominale d'intégration représentant la succion matricielle

2.4. Propriétés des sols modélisés

Les figures 17 à 21 présentent les courbes granulométriques et les FCH des différents matériaux qui ont été étudiés et dont les propriétés sont données dans la littérature.

2.4.1. Sols d'infrastructure

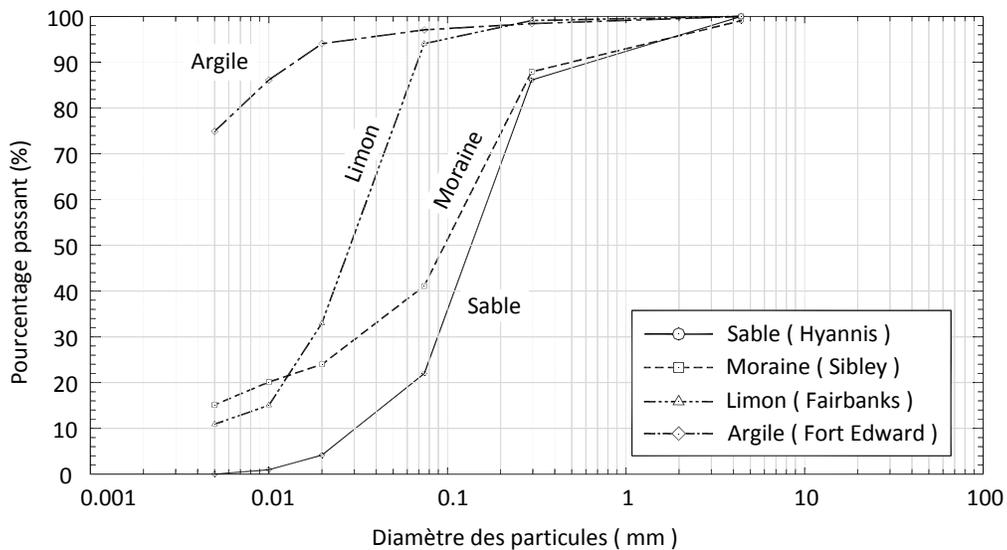


Figure 17 Courbes granulométriques des sols d'infrastructure modélisés

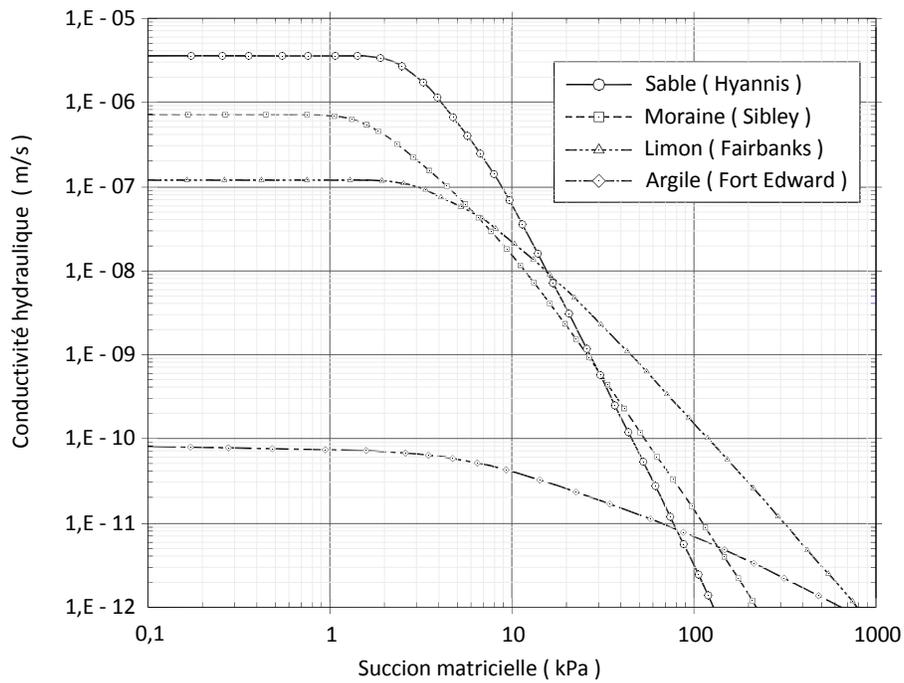


Figure 18 Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) des sols d'infrastructure des chaussées modélisées

2.4.2. Granulats de fondation et de sous-fondation

Les figures 2.11 et 2.12 donnent respectivement les courbes granulométriques et les fonctions de conductivité hydraulique des matériaux qui constituent la structure de chaussée. On a tracé aux fins de comparaison les fuseaux granulométriques admissibles du ministère des Transports du Québec pour les granulats de la structure de chaussée et l'on constate qu'ils sont compris à l'intérieur du fuseau admissible.

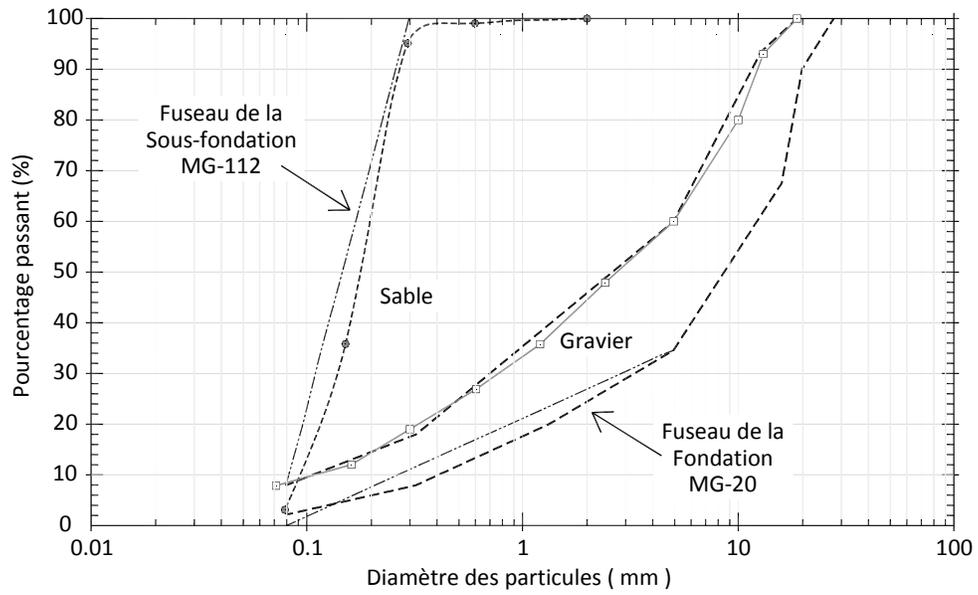


Figure 19 Courbes granulométriques des granulats

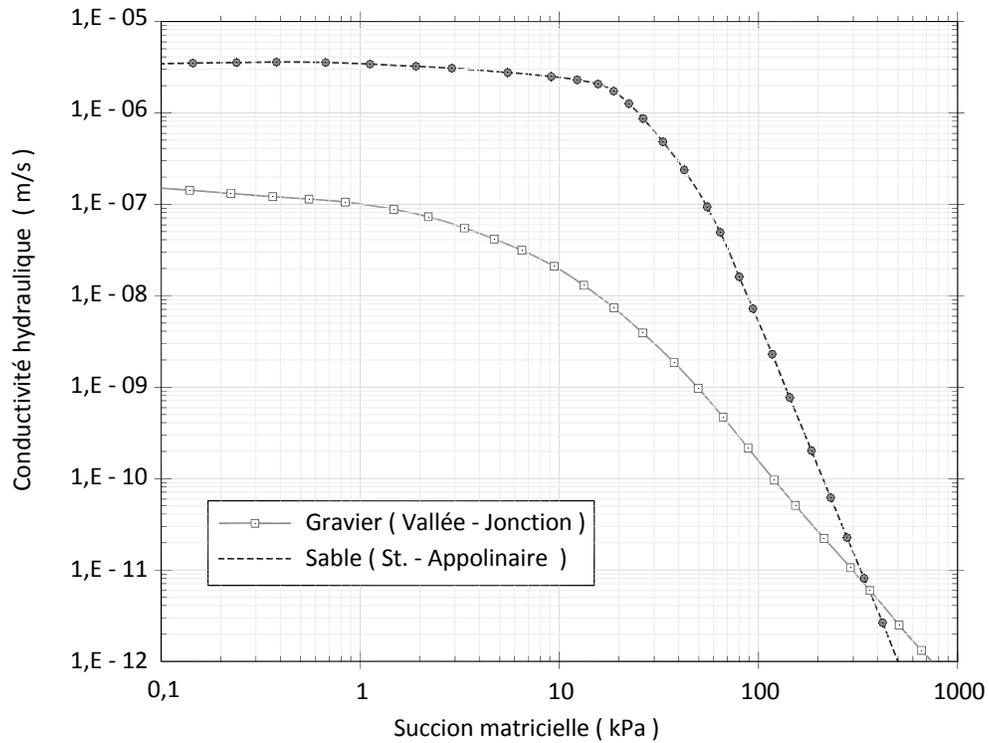


Figure 20 Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) des granulats des chaussées modélisées

2.4.3. Couche drainante

La figure 2.13 donne la FCH pour les couches drainantes de $1,2 \cdot 10^{-2}$ et $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, adaptée de l'article de Stormont et Zhou (2005).

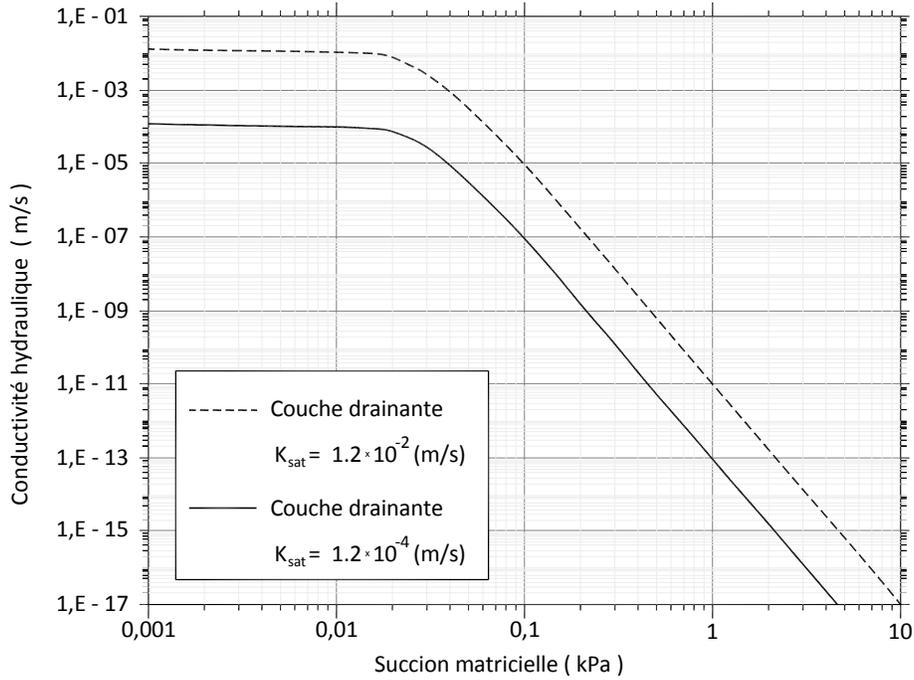


Figure 21 Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) de la couche drainante

Le critère d'évaluation des différentes configurations consiste essentiellement en une comparaison entre les profils verticaux de degrés de saturation sous la piste extérieure de roue (PER) à 0,85 m de la ligne de rive, soit l'endroit le plus vulnérable sur le plan de la mécanique et de l'hydraulique souterraine.

3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

L'étude paramétrique a porté sur des facteurs qui étaient perçus comme déterminants dans le comportement des chaussées :

- présence de fissures dans le revêtement;
- profil transversal : rasant ou en coupe, avec ou sans accotement revêtu, nature des matériaux d'épaulement;
- profil longitudinal en pente;
- nature et propriétés des matériaux utilisés en conditions saturées/non saturées.

Ce qui différencie les deux sections types étudiées, ce sont les épaulements latéraux dans les autoroutes, souvent constitués de matériaux moins perméables qui peuvent confiner l'eau dans la structure de chaussée. Dans les routes régionales, il y a un drainage à ciel ouvert, sans épaulement.

3.1. Profil d'autoroute

Dans la pratique actuelle au ministère des Transports du Québec, il existe trois principaux types de systèmes de drainage dans les profils d'autoroute : l'extension de la sous-fondation (ESF), le TDI et l'EDRC. Ces trois systèmes ont été évalués par Lafleur et Lebeau (1999) en matière d'efficacité hydraulique relative en période estivale. Un article du Ministère (1999) résume les résultats de ces simulations et les figures 22 à 24 montrent l'allure générale des écoulements à la fin d'une précipitation de 0,6 mm/h.

3.1.1. Comparaison entre les différents systèmes et présence de fissures

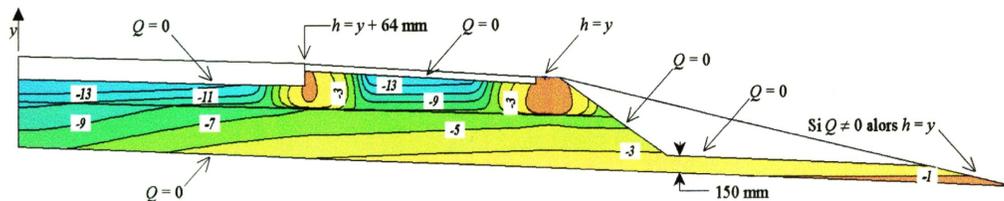


Figure 22 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec extension de la sous-fondation (ESF).

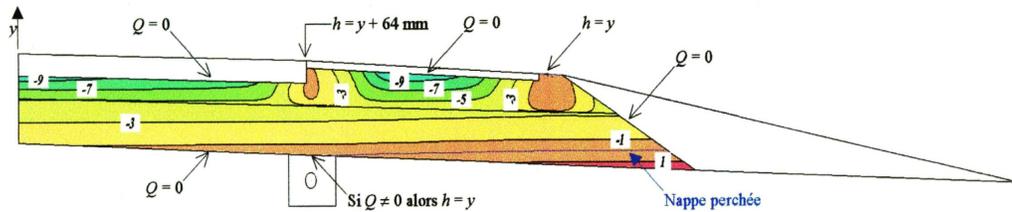


Figure 23 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI).

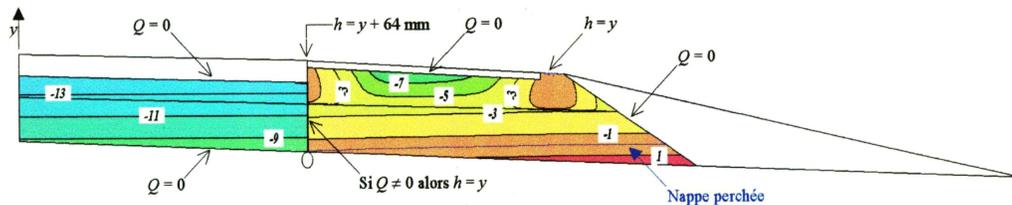


Figure 24 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec écran drainant en rive de chaussée (EDRC).

De façon générale, en l'absence de fissures dans le revêtement, les pressions interstitielles sous celui-ci demeurent négatives. Les bulbes d'imbibition (zones orange à l'intérieur desquelles les pressions interstitielles sont égales à zéro ou plus grandes que zéro) demeurent de petite dimension et situés près du joint avec l'accotement et dans l'arrondi de talus; ils n'influencent pas de façon appréciable le degré de saturation S_r dans la fondation sous la piste extérieure de roue et les pressions interstitielles demeurent négatives. La figure 3.4, qui représente les profils de S_r , confirme cette observation dans la fondation avec des valeurs de S_r nettement inférieures à 100 %. Dans la sous-fondation, on voit sur la figure 25 a) qu'avec l'EDRC à la ligne de rive (LR), le profil de S_r a des valeurs nettement plus faibles que les autres systèmes lorsqu'il n'y a pas de fissure. Par contre, lorsque l'EDRC est placé en ligne d'accotement (LA) ou lorsqu'il y a une fissure dans la voie de roulement, cet effet bénéfique est perdu, alors que le profil de S_r pour le TDI et l'ESF demeure pratiquement inchangé avec ou sans fissure.

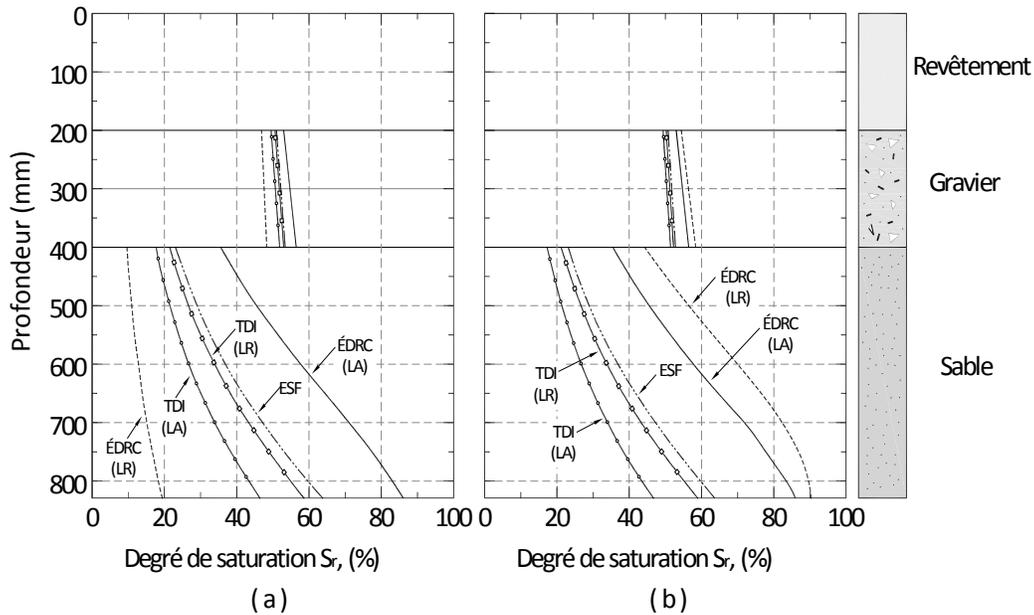


Figure 25 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue : a) sans fissure et b) avec une fissure au milieu de la voie de roulement. Chaussée d'autoroute

Une évaluation du remblai placé immédiatement autour du TDI a fait ressortir une efficacité légèrement supérieure lorsque celui-ci est constitué de MG-112 capillaire plutôt que de pierre nette non capillaire.

3.1.2. Position relative du tuyau de drainage à l'infrastructure par rapport à la ligne de rive

La figure 3.4 b) indique une légère hausse de saturation lorsque le tuyau de drainage est implanté à la ligne de rive plutôt qu'à la ligne d'accotement. Cela est dû au fait que l'élévation du radier du tuyau est légèrement plus basse dans le cas de la ligne d'accotement.

3.1.3. Accotement revêtu ou non

En éloignant le bulbe d'imbibition, un accotement revêtu se traduit par une diminution de S_r sous la piste extérieure de roue. La figure 26 présente une comparaison entre les deux types d'accotement et montre une nette augmentation du degré de saturation sous la PER avec l'accotement non revêtu.

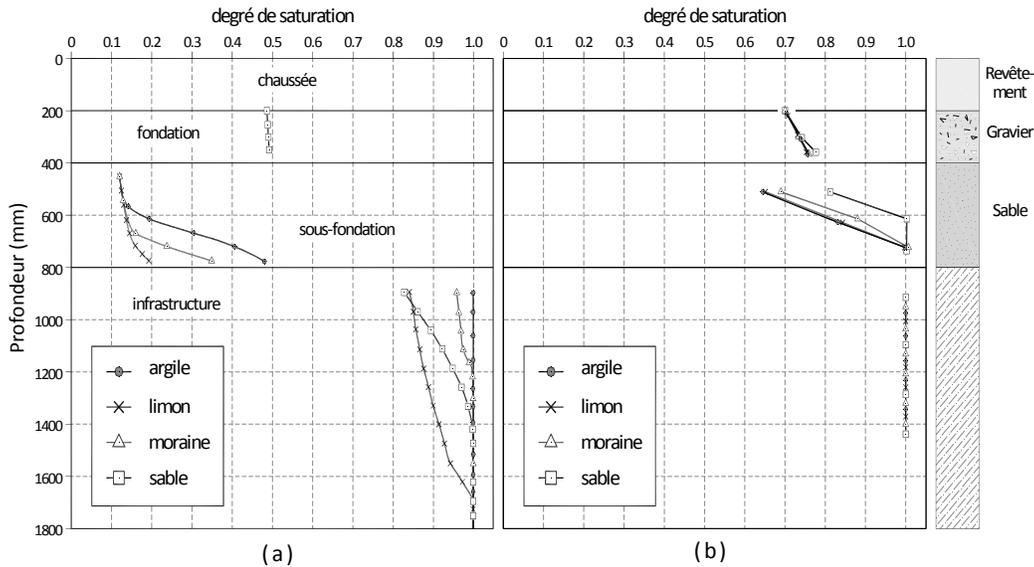


Figure 26 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement : a) profil d'autoroute avec accotement revêtu et b) profil de route régionale avec accotement non revêtu

3.1.4. Nature des matériaux d'épaulement

Une comparaison des trois systèmes de drainage (ESF, TDI et EDR) visant à évaluer l'effet de l'utilisation d'un matériau d'épaulement plus perméable que les granulats de la structure de chaussée a été faite par Lebeau et Lafleur (2002). On a noté que la valeur de S_r sous la PER n'était pas augmentée de façon appréciable dans la structure de route. L'infiltration y est faible au détriment du ruissellement à cause de la pente; de plus, les épaulements sont passablement éloignés de la voie de roulement.

3.1.5. Nature du sol d'infrastructure

Les simulations de Lebeau et Lafleur (2002) ont indiqué que les valeurs de S_r sous la PER dans la F et la SF ne sont pas influencées par la nature du sol d'infrastructure en l'absence de fissure dans la voie de roulement. On note toutefois une augmentation de S_r au sein des sols d'infrastructure fins (argile et moraine). Les simulations de Lafleur et Généreux (2007) avec fissure au milieu de la voie de roulement indiquent que les valeurs de S_r sous la PER dans la F ne sont pas influencées par la nature du sol d'infrastructure, comme le montre la figure 27, ce qui rejoint les résultats de Lebeau et Lafleur (2002). Par contre, les valeurs de S_r dans la SF sont augmentées de façon inversement proportionnelle à la perméabilité du sol d'infrastructure; par exemple, les valeurs de S_r dans la SF et dans le sol sont plus élevées avec des sols d'infrastructure argileux qu'avec des sols sableux.

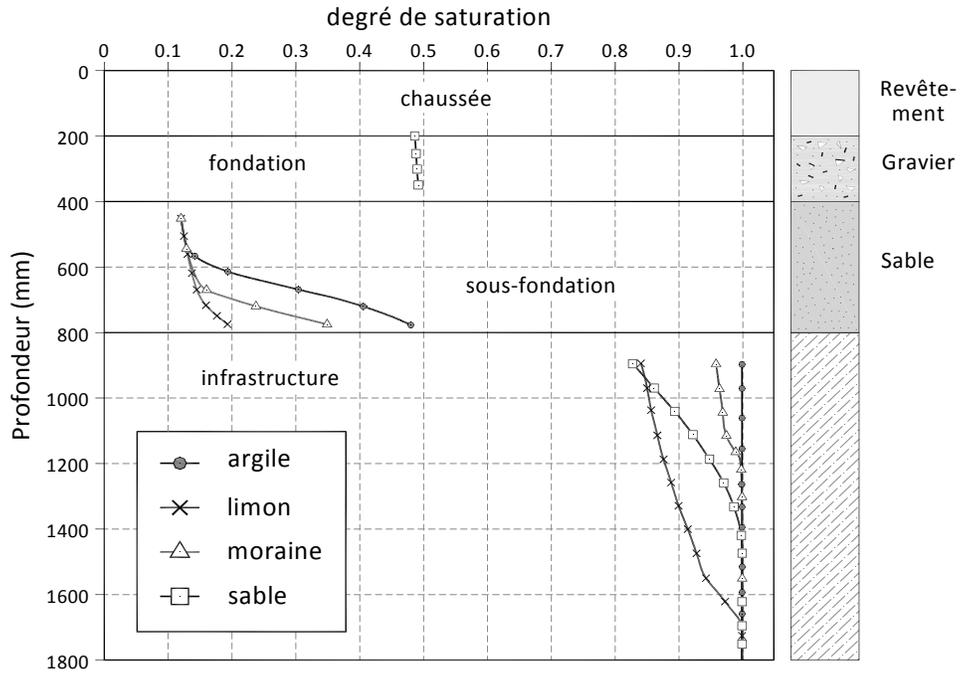


Figure 27 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée régionale sans couche drainante

3.1.6. Couche drainante immédiatement sous le revêtement

La figure 28 met en évidence, pour tous les sols d'infrastructure, que la CD augmente de façon appréciable les valeurs de S_r dans la F, qui passent de 50 % sans CD à plus de 75 % avec CD immédiatement sous le revêtement. Grâce à leur grande perméabilité, les CD permettent une meilleure diffusion dans le granulat de fondation des eaux qui se sont infiltrées par une fissure.

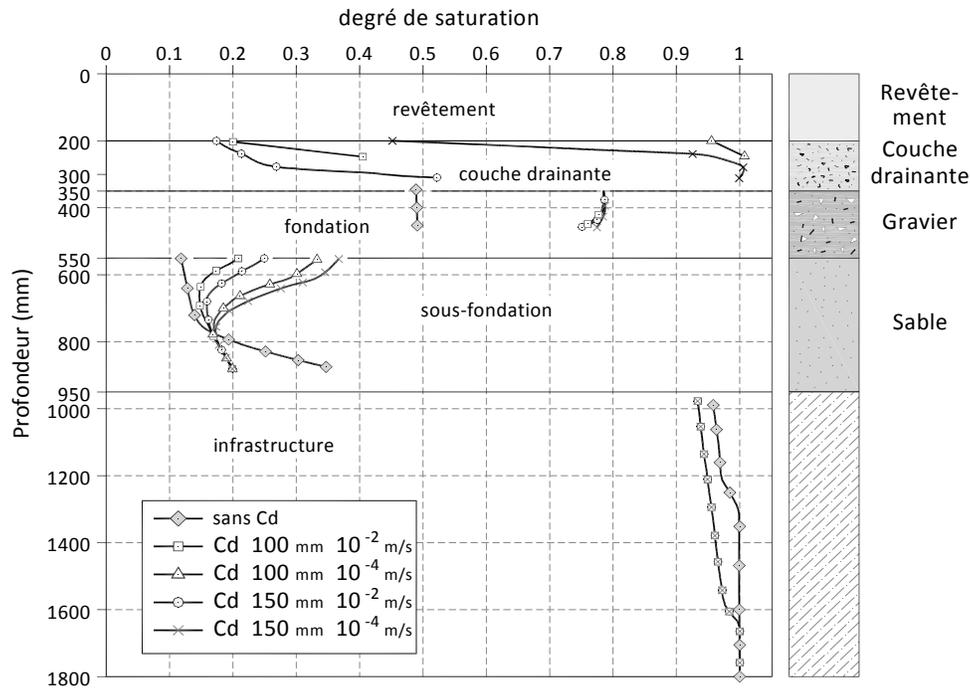


Figure 28 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée d'autoroute avec couche drainante immédiatement sous le revêtement

3.1.7. Écoulement tridimensionnel

L'étude de Lebeau et Lafleur (2002) a porté sur l'effet d'une pente longitudinale de 6 % sur le drainage avec ESF en considérant l'infiltration par le joint en ligne de rive, par l'arrondi de talus et par des joints transversaux espacés de 5 m. Sur la figure 29, la ligne blanche indique la nappe phréatique à la fin de la précipitation et l'on voit qu'elle est plus élevée dans le coin inférieur. On peut en déduire une concentration des débits (et des pressions) à la sortie au pied de la pente. Ce phénomène serait lié à la longueur et à l'angle de la pente longitudinale ainsi qu'à la présence ou non de joints transversaux qui favorisent l'infiltration.

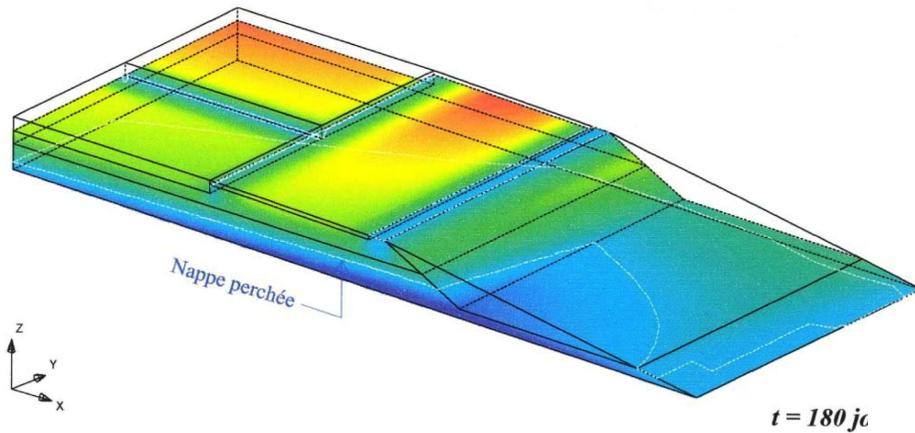


Figure 29 Écoulement tridimensionnel dans une extension de la sous-fondation. Chaussée d'autoroute

3.1.8. Variations de la teneur en eau volumique en période de dégel au printemps

La même étude de Lebeau et Lafleur (2002) comporte une modélisation numérique des régimes hydraulique et thermique réalisée à l'aide du logiciel FROST2B en fonction de la température extérieure. On a tenu compte des propriétés calorifiques des matériaux en présence et de la neige. La figure 30 présente la distribution des teneurs en eau durant le dégel, le 7 avril, soit 219 jours après le début de la période de simulation, le 1^{er} septembre. La ligne blanche qui sépare les zones bleues et vertes dans l'infrastructure donne la position de l'isotherme zéro degré en dessous de laquelle le sol est gelé et pratiquement imperméable. On y observe la partie supérieure de la couche de sol gelé en forme de cuvette qui pourrait être liée à la progression plus lente du front de dégel dans les épaulements que sous la voie de roulement. Cette forme concave peut être à l'origine de l'emprisonnement d'eau dans la structure de chaussée en période de dégel.

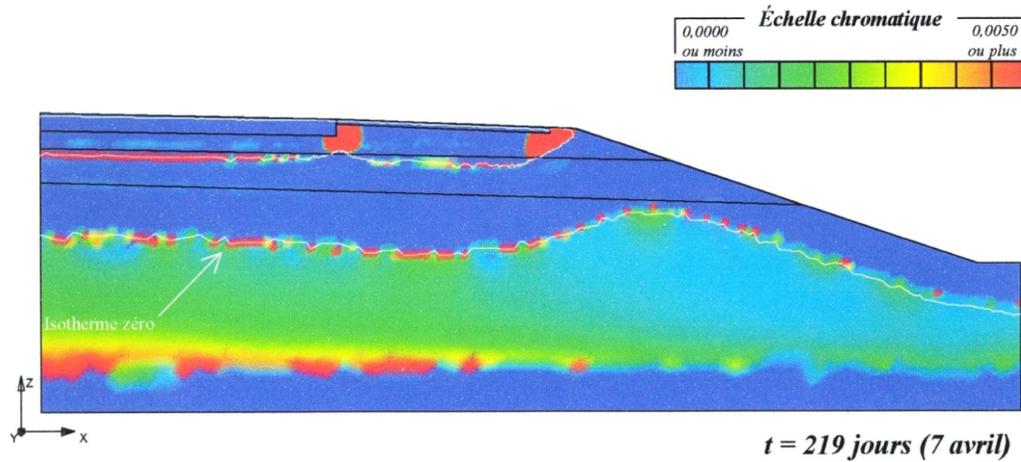


Figure 30 Distribution des teneurs en eau durant le dégel. Chaussée de route régionale

3.2. Profils de route régionale

Les études subséquentes de Lafleur et Généreux (2007) et de Lafleur et Ja'far (2009) ont considéré un profil en coupe de route régionale sans épaulement latéral, avec fissure ou non au milieu de la voie de roulement.

3.2.1. Hauteur du déblai et nature du sol d'infrastructure

La figure 31 présente une comparaison entre les valeurs de S_r avec des hauteurs de déblai ΔH de 2 et de 10 m sans fissure au milieu de la voie de roulement. La F n'est pas affectée par l'absence de CDI pour des ΔH de 10 m, alors que dans la SF, il n'y a pas de changement appréciable de S_r avec les sols autres que les sables. Dans ce cas, S_r est plus élevé, puisque sa valeur moyenne passe de 70 à 88 % lorsque ΔH passe de 2 à 10 m. Il en ressort que la mise en place d'une CD à la ligne d'infrastructure dans les profils en coupe avec des sols perméables est nécessaire à cause de l'augmentation notable de S_r dans la SF.

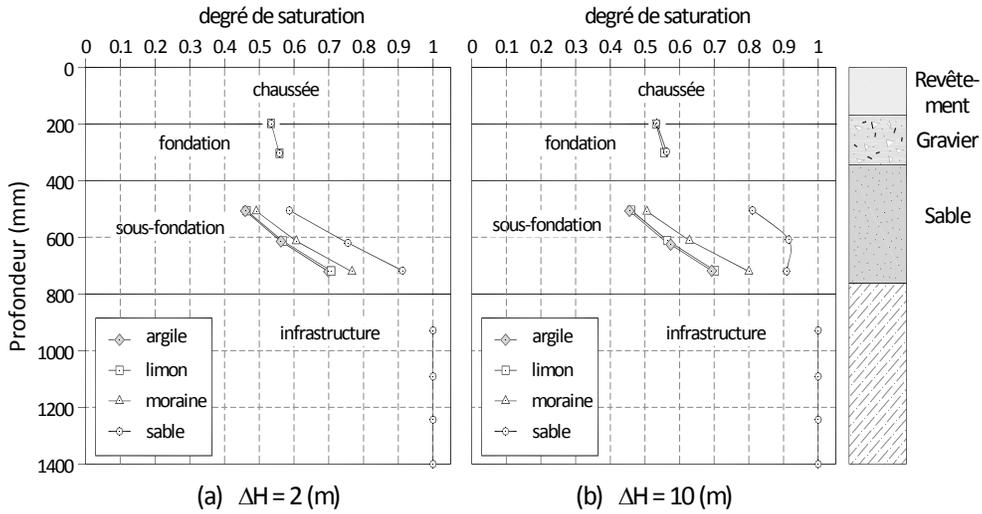


Figure 31 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure. Profil en coupe sans couche drainante

3.2.2. Épaisseur et perméabilité de la couche drainante

La comparaison présentée à la figure 32 fait ressortir l'importance de la perméabilité et de l'épaisseur de la CD avec les sables comme sol d'infrastructure. On constate que pour atteindre de meilleurs résultats, il faut une CD de 150 mm d'épaisseur et de perméabilité supérieure à 10^{-2} m/s.

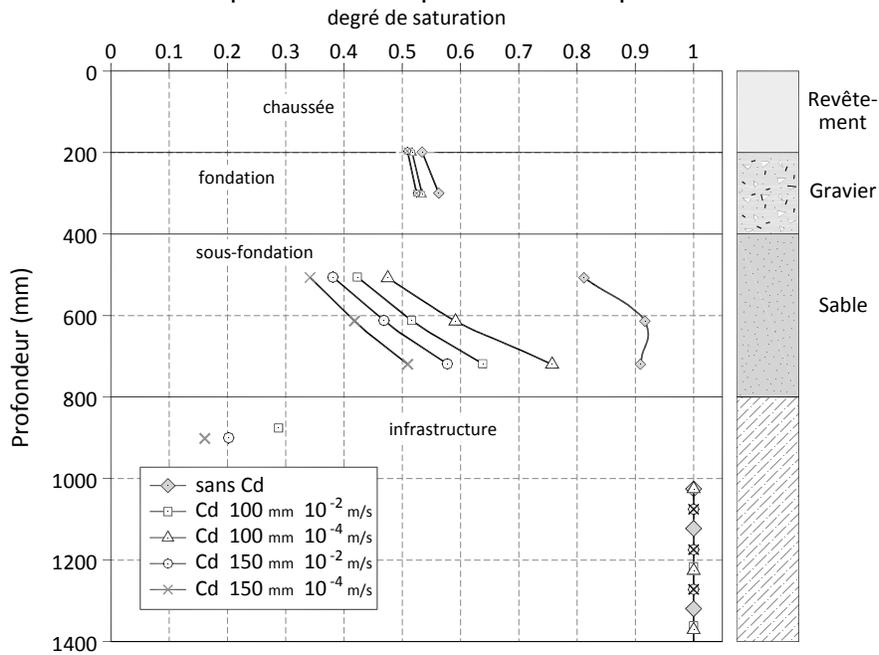


Figure 32 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure au milieu de la voie de roulement. Profil en

coupe, sable d'infrastructure avec couches drainantes d'épaisseurs et de perméabilités différentes, $\Delta H = 10$ m

3.2.3. Présence de fissure dans la voie de roulement

Le tableau 2 présente une comparaison des valeurs de S_r moyen sous la PER pour le sable (qui constitue le cas le plus critique) dans la F et la SF. Toutes autres choses étant égales, il se produit dans tous les cas une augmentation de S_r moyen avec l'apparition d'une fissure dans la voie de roulement.

Tableau 2 Degré de saturation moyen (%) sous la piste extérieure de roue dans un sable d'infrastructure. Profil en coupe

a) Fondation			b) Sous-fondation		
$\Delta H = 2$ m	$\Delta H = 5$ m	$\Delta H = 10$ m	$\Delta H = 2$ m	$\Delta H = 5$ m	$\Delta H = 10$ m
Sans CDI, sans fissure			Sans CDI, sans fissure		
55	55	53	88		
Sans CDI, avec fissure			Sans CDI, avec fissure		
73	75	81	100		
c			Avec CDI $150 - 10^{-2}$, sans fissure		
53			47		
Avec CDI $150 - 10^{-2}$ avec fissure			Avec CDI $150 - 10^{-2}$, avec fissure		
68			58		

3.3. Limites de l'étude

Les simulations numériques doivent être perçues comme une étude paramétrique qui fait ressortir l'influence relative des différents facteurs énumérés au début de ce chapitre. Il manque de données expérimentales pour valider les conclusions qu'elles ont amenées.

On a supposé que la fondation à 10^{-7} m/s est moins perméable que la sous-fondation à 10^{-5} m/s et qu'elle est drainée verticalement. Les variations de degrés de saturation seraient sans doute différentes si la sous-fondation était moins perméable que la fondation, puisque davantage d'infiltration se diffuserait dans cette dernière zone plus près du revêtement.

Les simulations thermiques de la section A ont indiqué une progression des fronts de gel et de dégel. Ces hypothèses mériteraient d'être validées par des mesures expérimentales pour s'assurer de l'efficacité des systèmes de drainage.

Les simulations des profils en coupe transversale ont été faites en supposant une distribution hydrostatique des pressions sur le plan vertical de symétrie au centre de la chaussée, alors que l'on aurait dû supposer une frontière

imperméable. Ce défaut entraîne probablement une sous-estimation des degrés de saturation dans la chaussée tout en n'invalidant pas le caractère comparatif des simulations.

4. FACTEURS INTERVENANT DANS LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME

Les facteurs à considérer pour le choix d'un système de drainage sont énumérés par ordre d'importance décroissante dans le tableau 3. Les sections suivantes décrivent la façon dont ils interviennent dans le dimensionnement d'une nouvelle chaussée. La section E traite de facteurs supplémentaires à considérer, soit la fissuration des revêtements existants, la pénétration du gel et le remplissage autour des TDI.

Tableau 3 Importance relative par ordre décroissant des facteurs intervenant dans le dimensionnement des systèmes de drainage (nouvelle construction)

	Facteur
A.	Position de la nappe phréatique et niveaux piézométriques
B.	Topographie du profil
C.	Nature et perméabilité du sol d'infrastructure latéral et sous la chaussée
D.	Nature des matériaux d'apport et propriétés hydrauliques

4.1. Position de la nappe phréatique et niveaux piézométriques

Il est important de localiser la position maximale de la nappe phréatique au cours de l'année. Des mesures du niveau d'eau dans le sol, prises à l'aide de piézomètres à tube ouvert ou de tubes perforés, permettent de savoir si la nappe phréatique vient alimenter la structure de chaussée par le terrain avoisinant et par le sol d'infrastructure.

La nappe phréatique peut être sujette à des fluctuations saisonnières qui sont largement influencées par la topographie locale (terrain plat mal drainé ou en pente, mieux drainé), la nature du sol, la présence de végétation et la stratigraphie. La figure 33 (Lafleur et coll., 1987) présente les résultats de mesures faites dans une argile fissurée dans des pentes, à l'aide de piézomètres à 3 m de profondeur. Ces piézomètres permettaient l'enregistrement de la position maximale de la nappe phréatique. On a constaté qu'au printemps et à l'automne, la nappe venait à quelques centimètres de la surface de l'argile pour des périodes plus ou moins longues, alors que durant l'été, la nappe s'abaissait de plus de 3 m au ruisseau Leamy

et de 1,5 m à Saint-Ambroise, cette amplitude étant liée à l'épaisseur de la croûte fissurée, plus grande dans le premier cas.

Il ressort de ces observations qu'il faut être prudent avec les mesures de niveau d'eau faites à l'été si l'on veut connaître les conditions les plus défavorables. De plus, si le sol d'infrastructure contient un pourcentage important de fines, on doit tenir compte de la remontée capillaire, qui peut être à l'origine d'un accroissement de la teneur en eau lorsque fond la glace formée durant l'hiver.

Des mesures piézométriques doivent également être faites lorsque les coupes sont prévues dans des terrains stratifiés, pour prévenir les soulèvements de fond. Il est alors important que les conduits des piézomètres soient scellés adéquatement pour que les mesures soient représentatives du régime hydraulique souterrain.

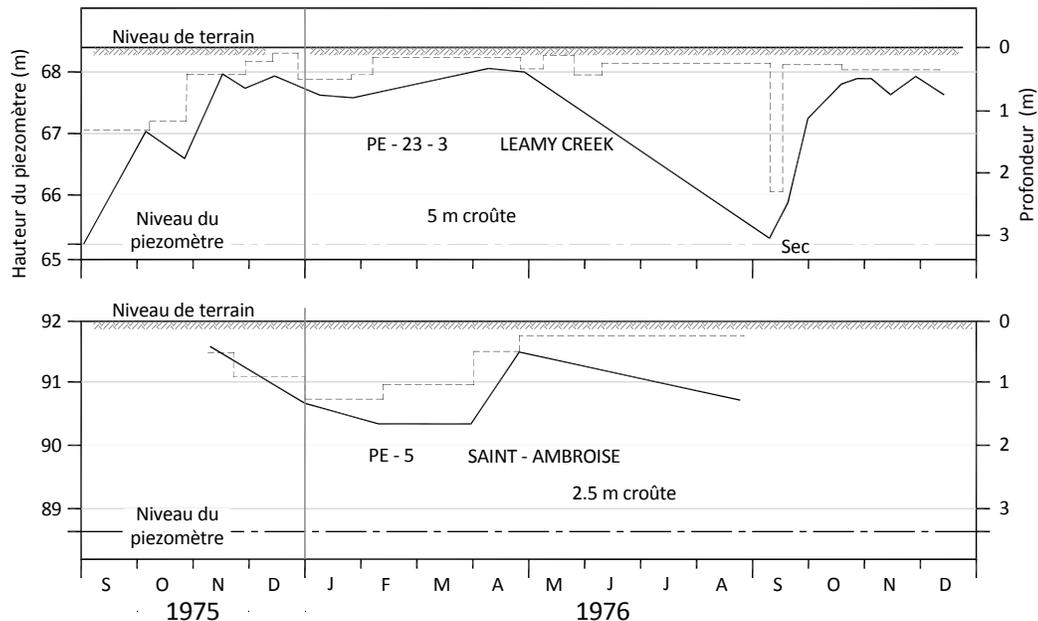


Figure 33 Fluctuations de la nappe phréatique en fonction des saisons (Lafleur et coll., 1987)

Si la nappe phréatique est située à plus de 2 m sous la ligne d'infrastructure en tout temps de l'année, les débits d'infiltration par le revêtement peuvent être évacués verticalement à travers la structure de chaussée vers le sol d'infrastructure, à la condition que le revêtement soit exempt de fissures.

4.2. Topographie du profil

4.2.1. Profil transversal

On a vu au chapitre précédent que les profils en coupe symétrique avec nappe phréatique près de la surface originale dans un sol d'infrastructure perméable pouvaient être à l'origine d'un surcroît d'eau dans la structure de chaussée. Les simulations ont indiqué qu'une CDI était nécessaire en présence de coupes de plus de 2 m dans les matériaux plus perméables comme les sables. Dans les autres matériaux simulés (limon, moraine et argile), la sous-fondation a pu absorber les débits verticaux provenant de l'infrastructure et les évacuer vers le fossé.

Lorsqu'on envisage des coupes d'une quelconque importance, il est essentiel de vérifier que le fond de fouille est stable en cours de réalisation. Sinon, il est nécessaire de soulager les pressions dans les nappes captives au moyen de drains verticaux ou subhorizontaux. Une mesure additionnelle inclut la mise en place de filtres inversés pour éviter la pénétration de particules fines du sol d'infrastructure dans le système de drainage.

La figure 34 présente un schéma de profil transversal en pente avec nappe phréatique près de la surface. Le tracé exige une coupe du côté amont pour la mise en place d'un fossé qui peut, dans une certaine mesure, rabattre la nappe. Selon la perméabilité du sol d'infrastructure, il peut toutefois être nécessaire d'ajouter un écran drainant vertical pour éviter des remontées de la nappe dans la structure de chaussée. Ce type de drainage a été installé avec succès sur la planche expérimentale de la route 329 à Saint-Donat par Racette et Lafleur (1993) dans un sol d'infrastructure constitué de moraine. Les tranchées ont fait en sorte qu'après leur mise en place, la nappe se situait à plus de 2 m sous le revêtement en tout temps de l'année.

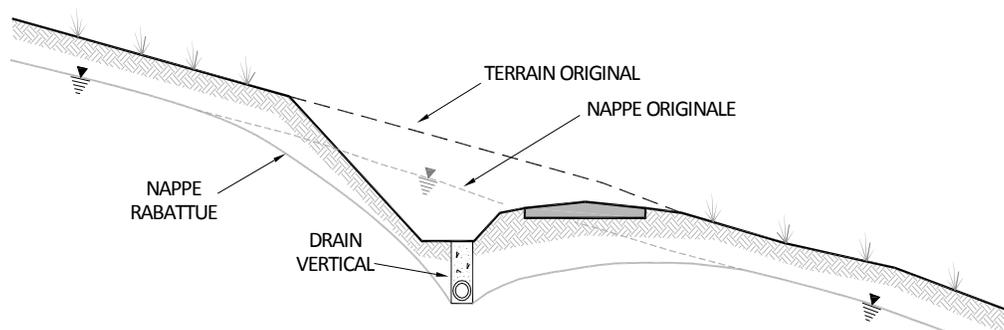


Figure 34 Profil transversal de terrain en pente

4.2.2. Profil longitudinal

Les simulations pour l'écoulement tridimensionnel du chapitre III ont mis en relief l'accumulation d'eau qui peut se produire au pied d'un profil longitudinal en pente. La quantité d'eau à évacuer latéralement est fonction de :

- la longueur et l'angle de la pente;
- la présence de joints transversaux.

De plus, comme l'indique la figure 35, il peut y avoir, sous le profil de la route, un aquifère en charge qui nécessitera la mise en place d'une CDI et de drains pour soulager les surpressions en cours de construction; ces systèmes sont conçus en fonction des débits anticipés de l'aquifère captif.

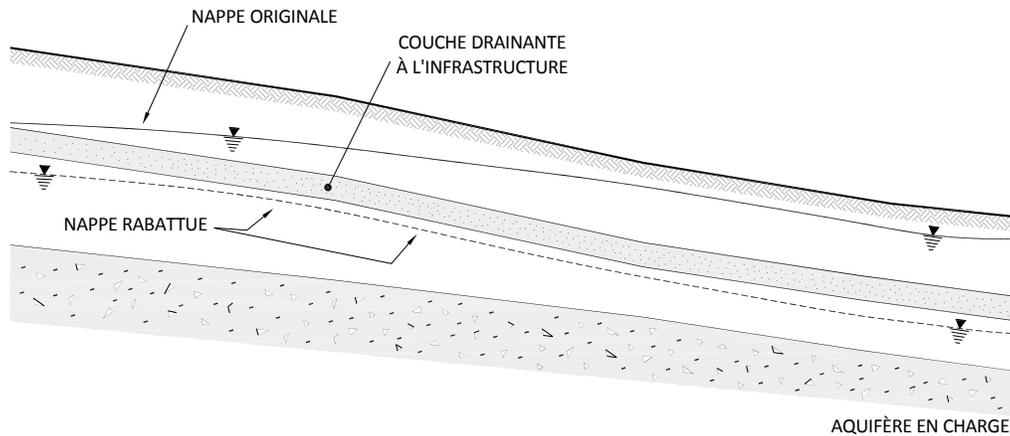


Figure 35 Profil longitudinal de terrain en pente

La topographie où est implantée la route joue un rôle important. Dès que le terrain est en pente ou que le profil est en déblai, il est essentiel de connaître le régime hydraulique souterrain pour drainer efficacement les eaux souterraines qui pourraient se trouver dans la structure de chaussée.

4.3. Nature des sols d'infrastructure

La nature des sols d'infrastructure est un facteur qui intervient directement dans le dimensionnement des éléments constituant le système de drainage et la perméabilité des sols est directement liée à leur granulométrie. Ainsi, pour un gravier, la perméabilité k est d'environ 10^{-2} m/s, alors que pour une argile, elle peut être de l'ordre de 10^{-10} m/s, ce qui signifie que les débits impliqués peuvent varier de 8 ordres de grandeur selon la nature du sol.

4.3.1. Catégories ou classes

Les simulations par éléments finis ont couvert toute la gamme possible de sols d'infrastructure présents sur le territoire québécois :

- argile;
- silt;
- moraine (mélanges);
- sable.

Les basses-terres du Saint-Laurent sont constituées à 80 % d'argiles marines sensibles que l'on trouve sur des épaisseurs variant de quelques mètres à plus de 100 m. Elles peuvent être recouvertes, à la surface, de dépôts de sable alluvionnaire. Sous-jacente à l'argile et souvent en surface, une moraine plus ou moins argileuse, souvent gélive selon le pourcentage de fines qu'elle contient, est présente. On trouve également en surface quelques dépôts plus restreints de silt non plastique, aussi gélifs. Dans les Laurentides et les Appalaches, on rencontre souvent des dépôts localisés de graviers, de sables et de moraines.

4.3.2. Stratification et variabilité naturelle

Les sols rencontrés dans une section de route sont rarement homogènes. En raison de leur perméabilité variable, ils viennent modifier le régime hydraulique souterrain, notamment lorsque les profils transversaux et longitudinaux sont en pente.

4.3.3. Pierre nette, roc dynamité

Il arrive parfois que le remblai de classe B soit un produit de dynamitage. Le ministère des Transports du Québec (2013a) stipule que la grosseur des pierres ne doit pas excéder 1 m et que le remblai doit être épandu en couches uniformes d'une épaisseur maximale de 1,5 m, sauf pour les derniers 3 m sous la ligne de sous-fondation, où elles doivent être de moins d'un mètre. La dernière couche de 300 mm sous cette ligne doit être composée de matériaux à granularité étalée, dont les éléments ont une dimension maximale de 150 mm. Il est important de prévenir la pénétration de la sous-fondation dans ce matériau et les critères de filtre exposés au chapitre VI doivent être appliqués. La mise en place d'un géotextile peut servir de séparateur efficace. Si la nappe est nettement plus basse que le niveau supérieur de ce remblai, ce matériau grossier peut agir comme drain.

La nature des sols d'infrastructure exerce une influence directe sur les débits à évacuer par les éléments de drainage : plus ils sont perméables, plus les débits seront élevés.

4.4. Nature des matériaux d'apport et propriétés hydrauliques

4.4.1. Granulats de sous-fondation et de fondation

Fuseaux granulométriques admissibles

Les propriétés des granulats sont spécifiées dans la norme NQ 2560-114 « Travaux de génie civil – Granulats », partie II « Matériaux pour fondation, sous-fondation, couche de roulement et accotement ». Le fuseau granulométrique de la SF montré à la figure 36 est très large de telle sorte que l'on puisse rencontrer des sables uniformes, des graviers ou des mélanges bien étalés. La F fait l'objet de critères plus exigeants qui limitent l'usage, en pratique, à de la pierre concassée suivant une granularité bien étalée entre 0 et 20 mm. Comme on le verra à la section suivante, les exigences concernant les particules fines (passant le tamis de 80 microns) revêtent une grande importance au point de vue de la perméabilité et de la gélivité de ces matériaux. Ces deux fuseaux granulométriques sont représentés à la figure 36; ils s'appliquent au matériau obtenu après sa mise en place et son compactage.

L'épaisseur totale de la structure de chaussée est souvent déterminée par les impératifs de contrôle des soulèvements au gel, ce qui mène en général à une épaisseur totale de plus de 1 m. Il peut arriver en outre pour les mêmes raisons que certains sols problématiques situés en dessous de la sous-fondation soient excavés et remplacés par un sol de meilleure qualité avant la construction de la structure de chaussée.

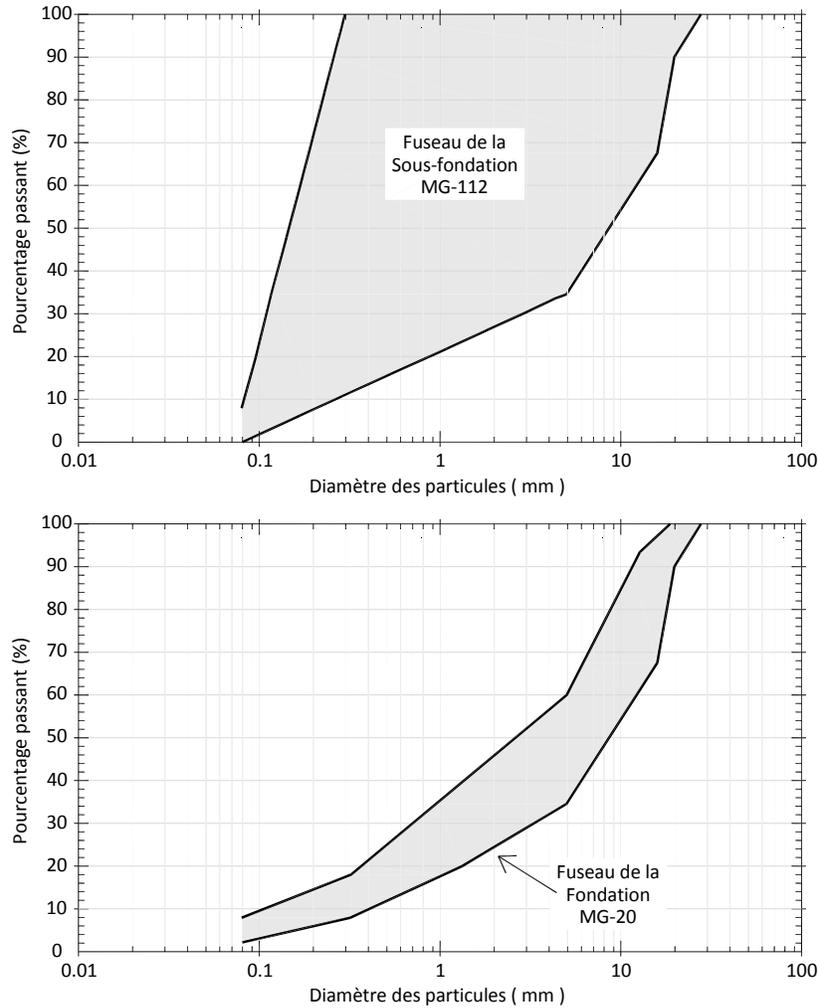


Figure 36 Fuseaux granulométriques admissibles (MTQ, 2013a)

Conductivité hydraulique en conditions non saturées

Les matériaux qui constituent la structure de chaussée ont été mis en place à une teneur en eau voisine de l'optimum. De ce fait, ils ont un degré de saturation inférieur à 100 %. Comme l'indique la figure 1.3, cette saturation incomplète abaisse leur perméabilité et joue un rôle important sur la capacité d'infiltration. Ce phénomène n'est généralement pas considéré dans les analyses courantes.

Parallèlement aux études présentées dans ce rapport, Stormont et Zhou (2005) ont réalisé une étude paramétrique sur le drainage latéral des routes en utilisant des propriétés en conditions non saturées. Ils en ont conclu que la perméabilité en conditions saturées n'est pas un indicateur fiable de l'efficacité du drainage. De plus, ils ont constaté que le matériau de remplissage d'une

tranchée peut, dans une certaine mesure, restreindre l'entrée de l'eau dans la tranchée même s'il a une perméabilité élevée. Cela vient appuyer les résultats présentés dans ce rapport à la section A du chapitre III sur le remplissage autour des TDI.

Effet de la fraction argileuse sur la perméabilité

La figure 37 reproduit les résultats de Savard (1996). Sur la partie a), on a indiqué les courbes granulométriques des granulats testés ainsi que les gammes de perméabilité correspondantes. Sur la partie b), on constate non seulement que le pourcentage de fines influence la perméabilité, mais aussi que la nature silteuse ou argileuse de ces fines joue également sur ce paramètre. Il en résulte que des fines argileuses ne répondant pas aux normes du test au bleu de méthylène peuvent constituer un obstacle au drainage des granulats de fondation.

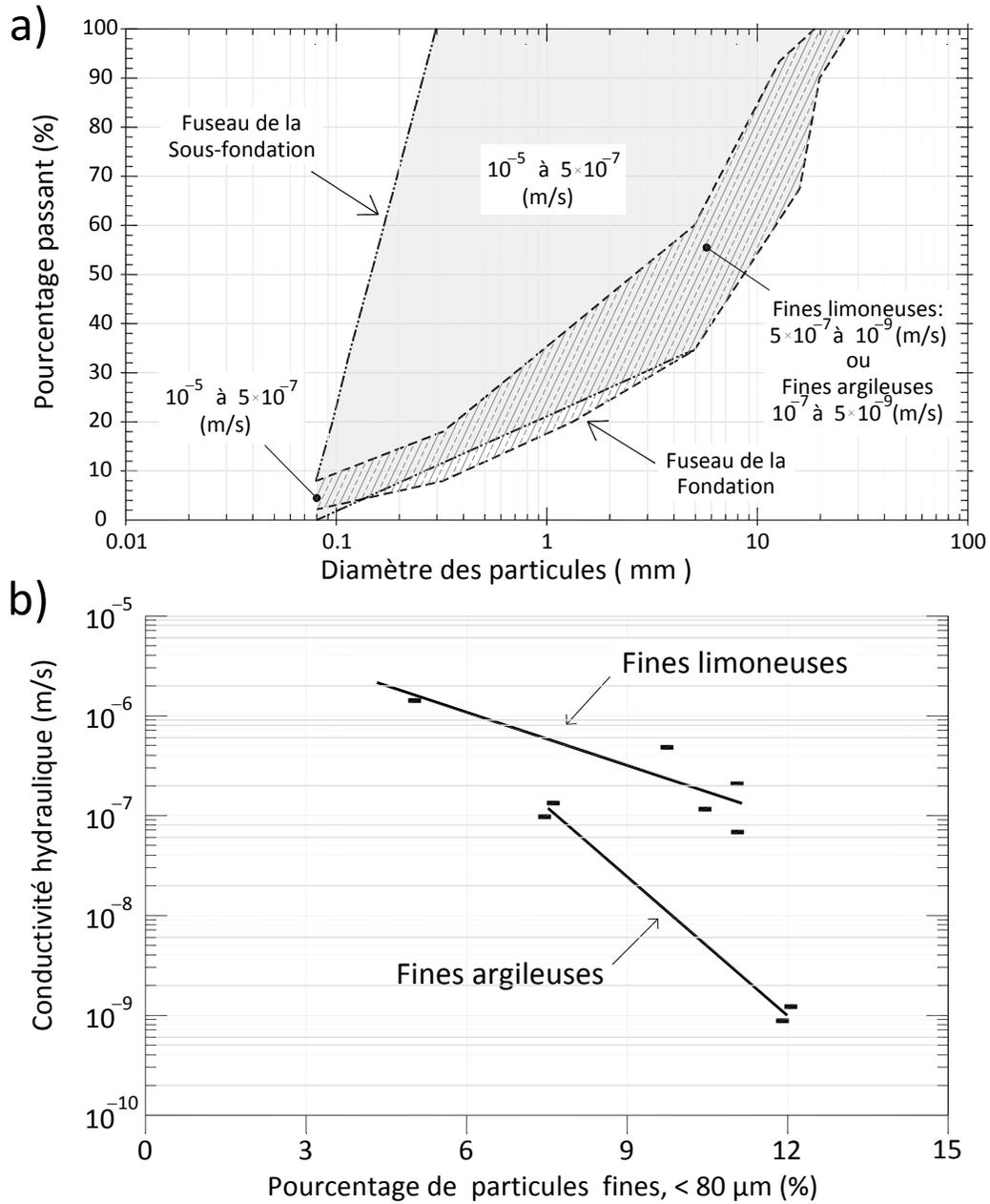


Figure 37 Influence des particules fines sur la perméabilité des granulats

Stabilité interne des particules

Les travaux de Kenney et Lau (1985) ont mis en évidence qu'au sein d'un sol à granulométrie étendue comme les granulates de la structure de chaussée, les particules plus fines sont susceptibles de se déplacer parmi les plus grosses

sous l'effet d'un écoulement d'eau. La figure 38 donne le principe de la construction graphique : sur la gauche, on a la courbe granulométrique, alors que sur la droite, on a tracé la courbe de forme qui traduit les variations de pente de la courbe granulométrique. Ainsi, en ordonnée, F signifie toujours le pourcentage inférieur à d, et H est la différence de F entre les diamètres d et 4d. Dans le programme expérimental, on a pu définir les sols pour lesquels il y avait instabilité, à savoir ceux dont la courbe de forme se trouvait, pour une portion, dans la zone instable pour $F < 20\%$ sur le graphique de droite, comme celle du sol n° 1 dans l'exemple, alors que pour le sol n° 2, la courbe de forme se situe dans la zone stable pour $F < 20\%$. Les sols avec courbe granulométrique concave vers le haut comme le sol n° 1 sont souvent des sols potentiellement instables ou suffosifs, comme on les a désignés.

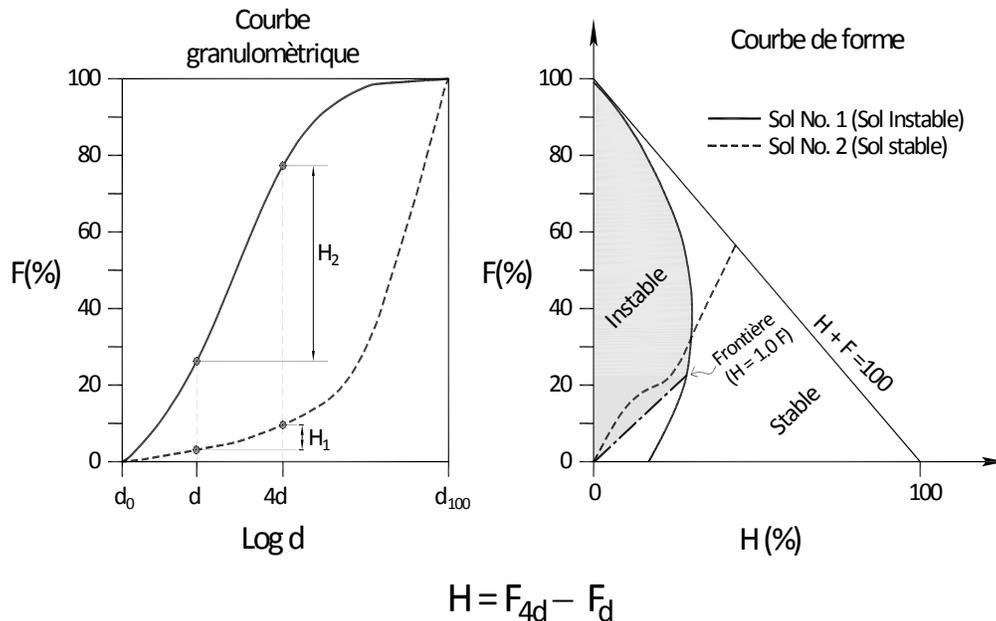


Figure 38 Méthode de Kenney et Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne des particules

Lafleur et Savard (2004) ont effectué des essais de stabilité interne sur sept granulats dont les courbes granulométriques se situaient à l'intérieur du fuseau acceptable du Ministère. Les résultats ont confirmé la validité de l'approche de Kenney et Lau (1985) et ont permis de détecter que deux des sept granulats étaient instables. Ils ont également démontré que l'application des critères classiques de rétention basés sur le diamètre d_{85} des plus grosses particules pouvait entraîner un lessivage important de fines qui se traduit par un colmatage des conduits de drainage en aval si le filtre est trop ouvert.

Une autre conséquence de ce phénomène de suffosion est qu'avec une migration de ses particules plus fines, un granulat peut devenir plus perméable. À l'interface avec un filtre trop fermé, ces particules migrées

peuvent former un cake moins perméable qui compromet la capacité de drainage d'un système.

Perméabilité des matériaux d'épaulement dans les autoroutes

Si les épaulements sont plus perméables, il n'est pas nécessaire de prévoir un système de drainage, puisque l'évacuation de l'eau dans la structure de chaussée se fera par drainage à ciel ouvert.

4.4.2. Granulats stabilisés ou non au bitume ou au ciment (couches drainantes à l'infrastructure)

Les couches drainantes en granulats stabilisés à l'émulsion de bitume ou de ciment sont généralement situées immédiatement sous le revêtement. On a vu au chapitre III que ce système n'était pas justifiable sur le plan hydraulique.

Les CDI sont constituées d'un granulat ouvert et grossier (pierre nette ou enrochement) idéalement enrobé d'une couche filtrante. La figure 39 montre l'utilisation d'enrochement dans un déblai important de sable silteux soumis à de fortes pressions interstitielles.



Figure 39 Enrochement utilisé sur la route 175 dans un déblai de sable silteux

De façon générale, il est impératif d'avoir un granulat de SF plus perméable que le granulat de F pour favoriser le drainage vertical de ce dernier. Il faut également s'assurer de la compatibilité en filtration à l'interface des divers granulats, notamment des couches drainantes, généralement constituées de matériaux qui comportent de grands vides.

4.5. Autres considérations

4.5.1. Fissuration sur chaussée

Les simulations présentées au chapitre III ont mis en relief l'influence capitale de la fissuration des revêtements sur les infiltrations dans la structure de chaussée. Le ministère des Transports du Québec a établi des normes pour la réhabilitation des chaussées en fonction de la fissuration du revêtement. Le scellement des fissures représente une bonne technique pour préserver l'imperméabilité d'un revêtement modérément fissuré. La technique du scellement par pontage sans fraisage est préconisée. Le colmatage est alors effectué à l'aide d'un produit à base de bitume modifié par ajout de polymères. Le produit utilisé doit être conforme à la norme 4401 « Produits de colmatage de fissures et de joints » du Ministère.

Le choix des routes et des fissures à sceller est décrit dans un bulletin technique (MTQ, 2003) et un guide a été publié sur le sujet (MTQ, 2004b). Les routes visées sont celles dont le taux de fissuration se situe entre 500 et 3 000 m/km, sans dépasser 1 000 m/km dans les pistes de roue. Des techniques plus imposantes, telles que le recouvrement bitumineux ou la réhabilitation de la chaussée, sont utilisées lorsque le taux de fissuration est plus important.

4.5.2. Pénétration du gel

Comme mentionné au chapitre III, on possède des données expérimentales limitées sur la position du front de dégel. Il est possible qu'une portion des systèmes de drainage se trouve dans une zone gelée imperméable pendant la période de dégel et que leur efficacité en soit compromise.

Il est généralement admis que la présence d'un bon système de drainage soit essentielle au bon comportement de la route mais l'expérience de Saint-Donat (ministère des Transports du Québec, 1997) a permis de démontrer que ce n'est pas nécessairement une solution adaptée à la résolution de problèmes de soulèvement au gel.

4.5.3. Remplissage autour des conduites

Compte tenu des résultats des simulations présentées au chapitre III, il ne serait pas nécessaire d'enrober le tuyau de drainage avec de la pierre nette comme on le fait habituellement. Il faut toutefois s'assurer que le matériau à filtrer ne pénètre pas dans les perforations des conduits de drainage.

5. UTILISATION DES GÉOSYNTHÉTIQUES EN DRAINAGE

5.1. Description des produits disponibles

Les géosynthétiques sont utilisés lorsqu'ils sont jugés préférables à un matériau granulaire. Ils sont choisis sur la base de leur grande perméabilité, en tenant compte des réductions de performance sous contraintes et sous gel et de leur ouverture de filtration.

Les drains de matériaux granulaires traditionnellement utilisés pour la construction des routes tendent à être régulièrement remplacés par des matériaux de rechange comme les géosynthétiques. Ce sont des textiles techniques essentiellement composés de polypropylène (PP) ou de polyester (PE), pour la majorité d'entre eux, et de polyéthylène (PET), dans certains cas.

L'utilisation des matériaux géosynthétiques peut présenter plusieurs avantages, que ce soit sur le plan :

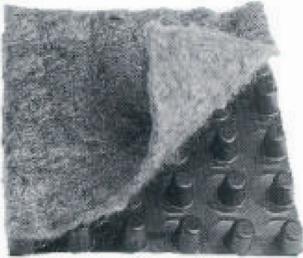
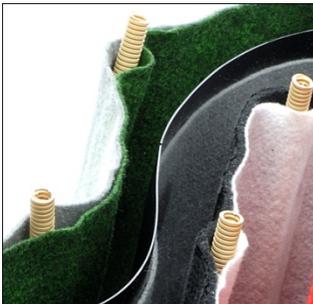
- de la facilité de mise en œuvre;
- de la qualité maîtrisée et de l'homogénéité de la performance des produits;
- du respect de l'environnement et du développement durable;
- des coûts.

Les géocomposites sont des produits composés de plusieurs types de géotextiles qui remplissent chacun une fonction particulière. Parmi les géocomposites, on trouve la plupart des produits de drainage bicouches (séparation – drainage) et, dans certains cas, tricouches (séparation – renforcement – drainage).

Plusieurs solutions s'offrent au drainage vertical, que ce soit l'utilisation d'une structure alvéolaire, de géocomposites tricouches ou de matelas de filaments. Par contre, le drainage horizontal est plus sévère en matière de performance requise. En effet, l'eau qui pénètre dans la fondation routière met quelques heures à circuler de haut en bas, au travers des différentes couches. Elle mettra plus de trois semaines, selon la distance à parcourir et la perméabilité des milieux rencontrés, pour passer du centre de la route au fossé. De plus, comme les couches de drainage horizontal sont placées sous la sous-fondation, la résistance à la compression des matériaux drainants doit être suffisante pour permettre au produit de conserver sa performance hydraulique; c'est pourquoi le sable ou la pierre nette sont des matériaux largement utilisés en drainage routier.

Plusieurs gammes de produits sont offertes sur le marché. Chacune d'entre elles répond à des conditions particulières d'utilisation. Le tableau 4 présente la plupart de ces produits.

Tableau 4 Gamme des géosynthétiques disponibles en drainage de chaussées

Type et structure	Description	Utilisation	Schéma
Structure rigide alvéolée	Âme drainante rigide composée d'une coque en PET ou en PP alvéolaire de 15 à 30 mm d'épaisseur et recouverte d'un géotextile filtrant sur une ou deux faces.	Écran vertical	
Matelas de filaments grossiers	Âme drainante de 7 à 20 mm d'épaisseur constituée de filaments grossiers de PP enrobés d'un géotextile séparateur.	Écran vertical	
Géocomposite tricouche	Âme drainante de 5 mm d'épaisseur en PP ou en PE recouverte d'un géotextile séparateur sur les deux faces. L'extrémité est composée d'une chaussette contenant un drain collecteur.	Écran vertical, couche drainante subhorizontale et enrobage de tuyau perforé à la base	
Enrobage de matériaux granulaires	Pierre nette de 20 mm, enrobée d'un géotextile et déversée dans une tranchée de 300 à 600 mm de largeur.	Couche drainante subhorizontale. Écran vertical avec ou sans tuyau perforé à la base	
Géocomposite de drainage avec minidrain	Âme drainante de 5 mm d'épaisseur en PP ou en PE recouverte d'un géotextile séparateur sur les deux faces. La structure est composée d'un réseau de minidrain d'un diamètre de 16 à 20 mm placés à intervalles réguliers.	Drainage horizontal Masque drainant	

5.2. Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires

Le tableau 5 dresse une comparaison entre les matériaux granulaires et les matériaux géosynthétiques. Le comparatif peut porter sur des aspects variés tels que :

- les propriétés hydrauliques et mécaniques;
- les performances à long terme et la durabilité;
- la maîtrise de la qualité des matériaux;
- la facilité de mise en œuvre et le coût;
- l'impact environnemental lié à l'utilisation.

Tableau 5 Comparaison entre matériaux granulaires et géosynthétiques

	Matériaux granulaires	Géosynthétiques
Points communs		
Risque de colmatage par :		
<ul style="list-style-type: none"> - activité bactérienne aérobie (colmatage ferrique); - précipitation des sels de déglacage; - particules fines des sols et des granulats encaissants; - formation de glace dans la zone de pénétration du gel. 		
Points de différenciation		
Propriétés mécaniques et hydrauliques :		
Épaisseur	Élevée (> 150 mm)	Faible (< 30 mm)
Porosité	25-40 %	75-95 %
Hauteur d'ascension capillaire	Parfois importante (< 500 mm) Nulle avec pierre nette	Faible ou nulle (< 50 mm)
Résistance à la traction	Nulle	Peut être élevée
Compressibilité	Négligeable	Peut être élevée
Transmissivité (en fonction des contraintes)	Invariable	Parfois variable
Performance à long terme et durabilité :		
Durabilité	Complètement inerte	Sont altérés par les rayons ultraviolets
Risque d'endommagement	Aucun	Sujets au poinçonnement, à la déchirure

	Matériaux granulaires	Géosynthétiques
Maîtrise de la qualité des matériaux :		
Uniformité	Gravier : granulométries variables selon le banc d'emprunt Pierre concassée : propriétés contrôlées en usine, stables dans le temps	Propriétés contrôlées en usine, stables dans le temps
Facilité de mise en œuvre et coût :		
Mise en place	Doivent éviter la contamination par le sol encaissant, nécessitent un compactage	Doivent être en contact intime avec les granulats à drainer, installation facilitée par couture des joints
Coût	Variable en fonction de la source et de la saison	Relativement stable, quelle que soit la région du projet
Impact environnemental :		
Développement durable	Ressource non renouvelable	Ressource manufacturée

L'utilisation des géosynthétiques doit être faite dans un cadre professionnel, le choix des matériaux variant en fonction du projet, au même titre que des matériaux plus traditionnels.

5.3. Facteurs à considérer

Dans le contexte des chaussées, différents aspects doivent être considérés lors de l'utilisation des géotextiles, notamment l'épaisseur, la conductivité hydraulique, la perméabilité en présence de gel ou de contraintes de compression, la résistance, la durabilité, la mouillabilité et l'ouverture de filtration.

5.3.1. Perméabilité sous compression – résistance à la compression

Des essais de perméabilité ont été effectués en appliquant différents niveaux de contrainte de confinement sur l'échantillon. Le graphique de la figure 40 traduit assez bien la perte de transmissivité d'un géotextile non tissé sous l'influence d'une contrainte de compression. À l'inverse des matériaux granulaires, qui sont incompressibles (et donc qui gardent leurs propriétés hydrauliques, quelle que soit la charge appliquée au-dessus), certains géosynthétiques se compriment sous l'effet de la charge et perdent de leur porosité, et donc de leur capacité drainante. La figure 5.1 indique que la

perméabilité (ou transmissivité) peut diminuer (30 à 50 %) dans la gamme des contraintes appliquées près de la surface d'une chaussée (10 à 50 kPa). Il est donc recommandé de dimensionner le drain en fonction de la valeur de perméabilité sous contrainte.

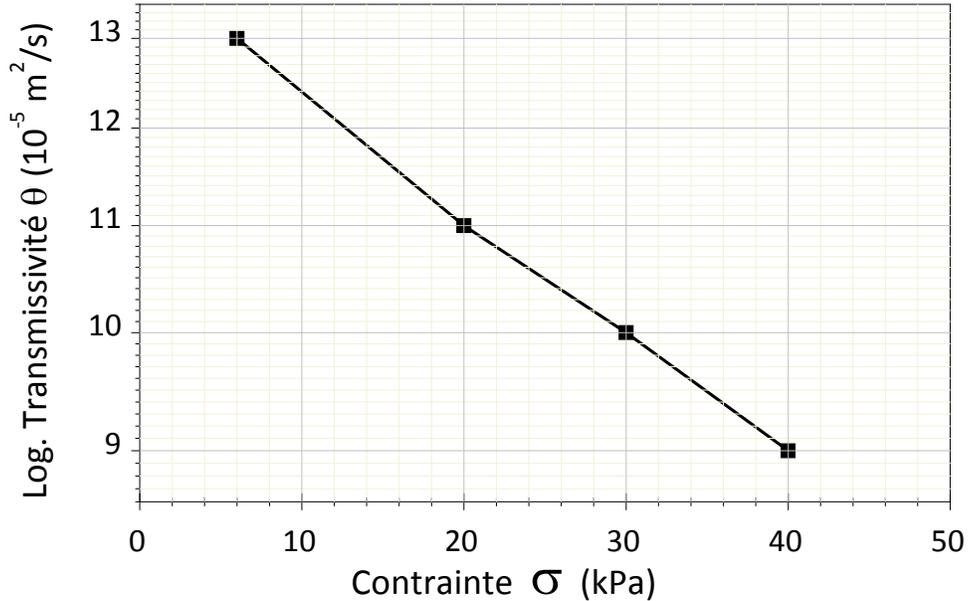


Figure 40 Variation de la transmissivité d'un géotextile non tissé en fonction de différentes contraintes de compression (Lafleur, 1998)

D'autres essais de performance hydraulique ont été réalisés en comparant des géocomposites avec minidrains et des matériaux usuels. Le tableau 6 présente les résultats obtenus.

Tableau 6 Comparaison des transmissivités de géocomposites de drainage et de matériaux granulaires de 150 mm d'épaisseur (m^2/s)

Gradient	Contrainte appliquée (kPa)	Pierre nette (150 mm)	Géocomposite avec minidrains	Sable (150 mm)	Géocomposite tricouche
0,1	20	$2,8 * 10^{-3}$	$2,1 * 10^{-3}$	$1,5 * 10^{-5}$	$6,5 * 10^{-5}$
0,1	200		$1,9 * 10^{-3}$		$0,9 * 10^{-5}$

On constate que les géocomposites avec minidrains conservent une transmissivité acceptable sous compression qui est comparable à celle d'une couche de gravier de 150 mm. Le géocomposite tricouche a une transmissivité légèrement supérieure à celle d'une couche de sable de 150 mm, mais diminuée par un facteur de 7 lorsque la contrainte de compression passe de 20 kPa à 200 kPa.

5.3.2. Résistance à la déchirure

Pour s'assurer de l'intégrité des nappes géotextiles lors de leur mise en place, on vérifie que les géosynthétiques ont une résistance suffisante à la traction, au poinçonnement et à la déchirure. On trouve dans les normes du ministère des Transports du Québec (2012) relatives aux matériaux des directives qui concernent la résistance des géotextiles dans différentes applications.

5.3.3. Formation de glace

Des essais ont été réalisés (Lafleur et Savard, 1996) de manière à simuler la formation de glace à l'intérieur d'un géocomposite tricouche de drainage, et donc à observer la variation de la performance hydraulique de celui-ci. Dans cette série d'essais, le montage était placé à l'intérieur d'une chambre froide à -6°C . Le géocomposite était confiné verticalement ou horizontalement, à l'intérieur de divers matériaux routiers. On a fait circuler de l'eau à $0,5^{\circ}\text{C}$ pendant 30 jours, à des débits variant entre 100 et 600 ml/min/m correspondant à ceux observés sur la planche expérimentale de Saint-Donat (Racette et Lafleur, 1993). Les résultats ont permis de conclure que pour une région où l'indice de gel est de moins de 1 200 $^{\circ}\text{C}$ -jour :

- le colmatage des géocomposites tricouches par la glace, en drainage vertical à l'intérieur d'un écran de rive, est improbable;
- des obstructions dans les couches drainantes horizontales ont été observées après 21 jours à faible débit. Il est cependant improbable que l'on rencontre ces conditions sur le terrain, une alimentation en eau ne pouvant se produire sur une période aussi longue en hiver.

5.3.4. Mouillabilité

Les polymères utilisés pour les géotextiles d'enrobage sont relativement hydrophobes. Il est possible de réaliser des essais de caractérisation de la résistance à la pénétration de l'eau à l'intérieur d'un géotextile. Notons l'essai français NF EN 13562 « Géotextiles et produits apparentés – Détermination de la résistance à la pénétration d'eau (essai sous pression hydrostatique) ». La charge hydraulique nécessaire à la pénétration de l'eau au travers d'un écran géotextile ne devrait pas excéder quelques millimètres.

5.3.5. Ouverture de filtration

Le choix d'un filtre géotextile est fait à partir des critères donnés à la section F du chapitre VI. Pour les ouvrages courants, le ministère des Transports du

Québec (2012) requiert une ouverture maximale de 150 μ m. Cette ouverture convient à des matériaux de fondation et à des sols d'infrastructure plus gros que les moraines. Si les géotextiles sont en contact direct avec de l'argile sensible, les risques de colmatage du drain sont très élevés. Il convient alors :

- soit de remplacer le géotextile séparateur par un filtre dont l'ouverture de filtration est de l'ordre de 60 μ m;
- soit d'interposer une couche de sable compatible avec l'argile suivant les directives données à la section F du chapitre VI.

6. ÉLÉMENTS DE CONCEPTION

6.1. Profondeur et rigidité des tuyaux de drainage

Pour évacuer l'eau de la structure de chaussée, le fond de la tranchée doit être situé à une profondeur d'au moins 450 mm sous la ligne d'infrastructure (MTQ, 2013c). En fait, plus le drain est profond, plus il est efficace.

Le type de drain dépend de la proximité de la zone de sollicitation des charges. Lorsque le drain est situé près des voies de circulation, un tuyau rigide ou semi-rigide est utilisé (rigidité plus grande ou égale à 300 kPa, selon la norme de l'essai de rigidité à l'écrasement). Lorsqu'il est situé à l'extérieur de la plateforme de la route, on peut utiliser un drain flexible d'une rigidité plus grande ou égale à 210 kPa (BNQ 3624-115). La même norme spécifie des tuyaux thermoplastiques perforés d'une rigidité minimale de 300 kPa et d'un diamètre de 150 ou 200 mm.

6.2. Diamètre des conduites et des drains

Le risque de colmatage et la vitesse sont des critères plus critiques que le débit pour le choix des conduites d'évacuation. La dimension de ces conduites dépend théoriquement du taux d'infiltration et de la perméabilité des granulats et du sol d'infrastructure. Généralement, les drains sont des tuyaux perforés ayant un diamètre variant de 150 à 200 mm.

Les simulations numériques ont indiqué que les débits à évacuer sont largement inférieurs à la capacité des conduites qui existent sur le marché. Une planche d'essai en grandeur réelle a été réalisée à Saint-Donat, sur la route 329 (Racette et Lafleur, 1993). Des mesures de débits ont été effectuées sur trois sections différentes de 150 m :

- 1 : géocomposite avec noyau de filaments grossiers en PP, en sandwich entre deux géotextiles non tissés aiguilletés, avec à sa base un tuyau flexible non perforé de 150 mm de diamètre;
- 2 : géocomposite avec noyau alvéolé, avec à sa base un tuyau flexible non perforé de 150 mm de diamètre;
- 3 : tranchée de pierre nette de 20 mm enrobée par un géotextile non tissé aiguilleté, avec un tuyau flexible perforé de 100 mm de diamètre.

Les mesures indiquent que les débits (voir la figure 40) varient énormément selon les saisons. Ainsi, les débits totaux maximaux captés ($0,30 < Q_{\max} < 0,64$ l/s) dans chaque section sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à la capacité des conduites (6 l/s pour le tuyau de 100 mm de diamètre et 17 l/s pour le tuyau de 150 mm de diamètre). Toutefois, à cause de la facilité de pose

et d'entretien, de même que des risques de colmatage, il est préférable de surdimensionner les conduites pour qu'elles ne coulent pas en charge.

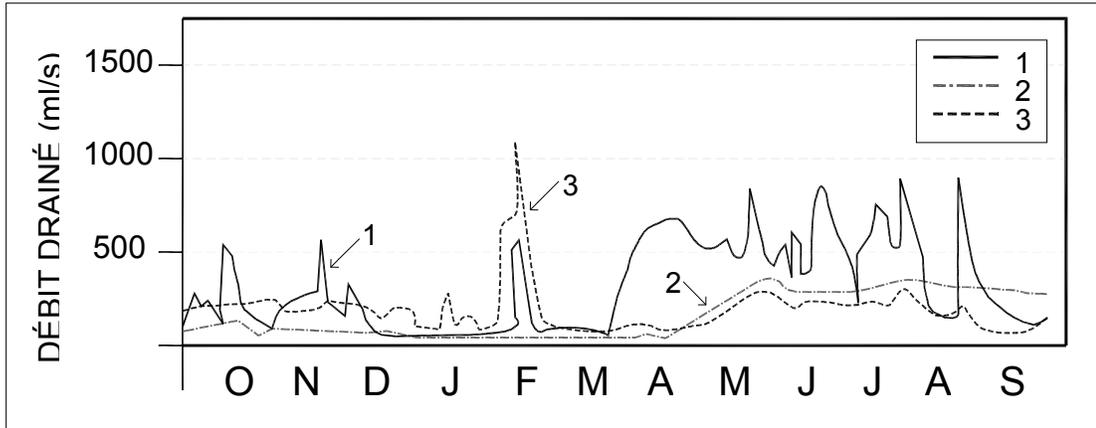


Figure 41 Débits d'eau recueillis dans les systèmes de drainage de Saint-Donat (Racette et Lafleur, 1993)

6.3. Pente longitudinale du drain

La pente du drain correspond à celle du profil longitudinal de la chaussée, évaluée à la ligne du centre. Aux fins de calcul de la capacité, on utilise la formule de Manning. La pente minimale longitudinale d'installation des drains est de 0,2 % (MTQ, 2013c).

6.4. Pente des interfaces vers l'extérieur de la chaussée

Les normes du ministère des Transports du Québec (2013c) indiquent que des pentes minimales de 2 % (et de 3 % pour la ligne d'infrastructure) doivent être respectées. On doit tenir compte des tassements dus au poids de la structure de chaussée qui peuvent diminuer ces pentes ou même les rendre négatives, ce qui transformerait l'assiette de la route en une cuvette favorisant l'accumulation d'eau. On doit aussi s'assurer, lors de la construction, d'éviter la formation d'ornières sur la ligne d'infrastructure qui pourraient nuire à l'écoulement de l'eau vers les côtés.

La figure 42 présente les éléments de base communs à toutes les structures de chaussées, c'est-à-dire les pentes de ruissellement aux interfaces entre les couches, la pente de ruissellement de surface ainsi que les fossés de drainage ou drains en milieu urbain. L'ESF doit être faite à la ligne d'infrastructure jusqu'au drain ou fossé, dont la largeur minimale est de 1 m.

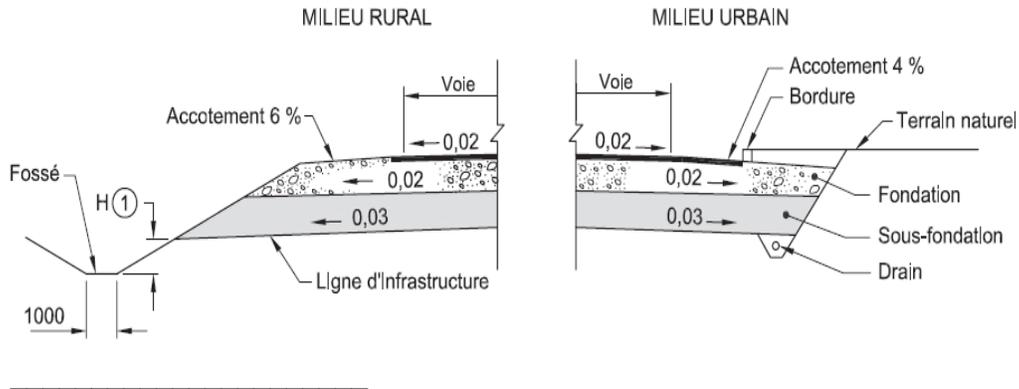


Figure 42 Pentés minimales des interfaces (MTQ, 2013c, dessin normalisé 025 du chapitre 1)

6.5. Position des exutoires

L'espacement des exutoires est basé sur des critères hydrauliques pour éviter que les conduites ne coulent en charge. Il dépend de la pente du terrain. Pour les drains, une sortie vers les fossés doit être prévue tous les 200 m au maximum pour faciliter le récurage des tuyaux.

La figure 43 montre une saignée faite dans l'épaulement d'une autoroute pour permettre le drainage de la chaussée. L'espacement entre les saignées sur des chaussées doit être suffisamment petit compte tenu de la profondeur des fossés et de la perméabilité des granulats de la structure de chaussée.



Figure 43 Saignée sur le talus du fossé, autoroute 15.

6.6. Sélection des filtres

Les filtres d'enrobage des drains et aux interfaces entre matériaux de granulométrie différente doivent être choisis en fonction du sol à protéger, pour éviter le colmatage des conduites. Ces filtres peuvent être granulaires ou géosynthétiques. En plusieurs endroits dans la section de route, des matériaux de granulométries différentes sont en contact les uns avec les autres et après l'écoulement de l'eau souterraine, il peut se produire une interpénétration de particules. Pour éviter ce phénomène, les matériaux doivent respecter deux critères contradictoires :

- les vides du matériau filtrant doivent être suffisamment petits pour prévenir la migration des particules du sol à retenir (rétention);
- les vides du matériau filtrant doivent être suffisamment grands pour que l'eau y rencontre moins de résistance que dans le sol à retenir (perméabilité).

6.6.1. Rétention

Pour des sols avec moins de 50 % de particules fines passant le tamis 80 μm , on calcule le coefficient d'uniformité C_u (d_{60}/d_{10}) pour tout l'échantillon. Le Manuel canadien d'ingénierie des fondations (Canadian Geotechnical Society, 2006) recommande que l'on évalue la valeur maximale de l'ouverture de filtration O_f , en millimètres, à partir de l'équation 6.1.

- Pour les filtres géosynthétiques :

O_f = valeur FOS (filtration opening size) obtenue par tamisage hydrodynamique.

- Pour les filtres granulaires :

$O_f = D_{15}/4$, où D_{15} est le diamètre des particules du filtre correspondant à 15 % passant inférieur.

La valeur maximale de l'ouverture de filtration O_f est donnée par :

$$O_f < B \times d_l \quad (6.1)$$

où d_l = diamètre indicatif du sol à protéger

l = pourcentage passant inférieur

pour $C_u < 2$ $B = 1$ et $d_l = d_{85}$

pour $2 < C_u < 4$ $B = 0,5 \times C_u$ et $d_l = d_{85}$

pour $4 < C_u < 8$ $B = 8/C_u$ et $d_l = d_{85}$

Pour les sols non cohérents à granulométrie étendue avec $C_u > 8$, utiliser l'équation 6.1 (Lafleur, 1999) où :

$B = 1$ et $d_l = d_{50}$ pour les sols avec granulométrie linéaire

$B = 1$ et $d_l = d_{30}$ pour les sols avec granulométrie concave vers le haut

$B = 1$ et $d_l = d_G$ pour les sols à granulométrie discontinue, où d_G est le diamètre minimal de la discontinuité

La figure 44 donne des exemples de ces courbes granulométriques et de diamètres indicatifs.

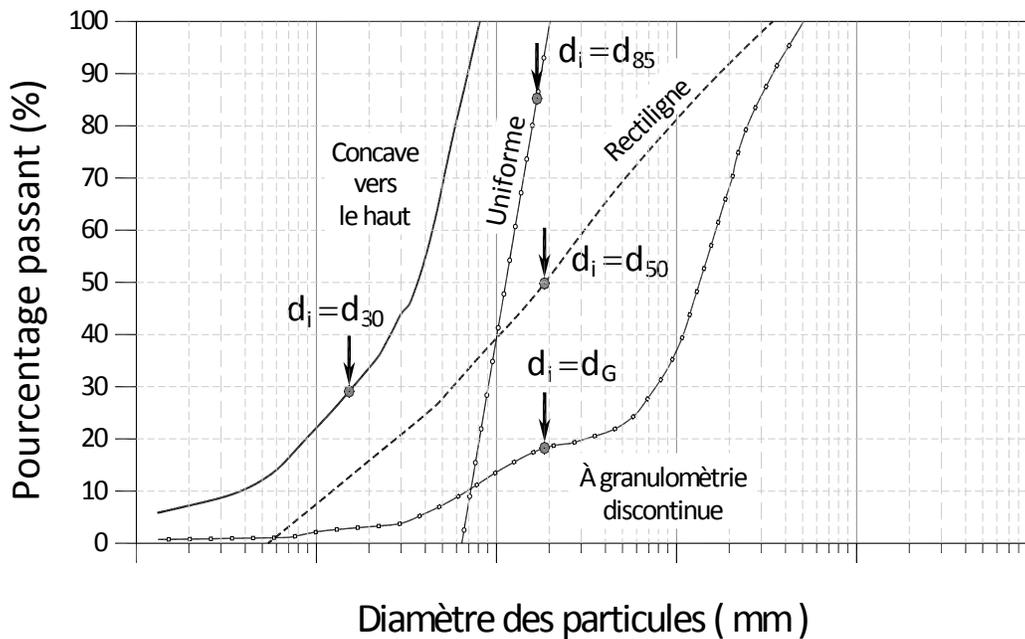


Figure 44 Classification des courbes granulométriques de sols à granulométrie étendue

Pour des sols avec plus de 50 % de particules fines passant le tamis 80 μm , la valeur maximale de O_f devra être de moins de 300 μm . Dans le cas des sols silteux avec un contenu de plus de 35 % de particules fines, une investigation plus détaillée sera nécessaire.

6.6.2. Perméabilité

On peut évaluer la conductivité hydraulique requise pour un géotextile à partir des relations suivantes :

pour la rétention des matériaux fins : $k_n > 10 * k_s$

pour la rétention des sables moyens à grossiers : $k_n > k_s$

où k_n = conductivité hydraulique du filtre

k_s = conductivité hydraulique du sol à retenir

Les simulations indiquent que l'utilisation d'un filtre capillaire accroît la performance des drains en milieu partiellement saturé.

6.7. Stabilité du fond de fouille dans les profils en coupe

On a évalué les pressions artésiennes induites lorsqu'une coupe est effectuée dans un matériau 10 fois moins perméable que celui d'un aquifère situé en dessous. On a fait varier l'épaisseur de matériau imperméable h sous la structure de route en fonction des hauteurs de déblai ΔH . La figure 45 indique ces paramètres.

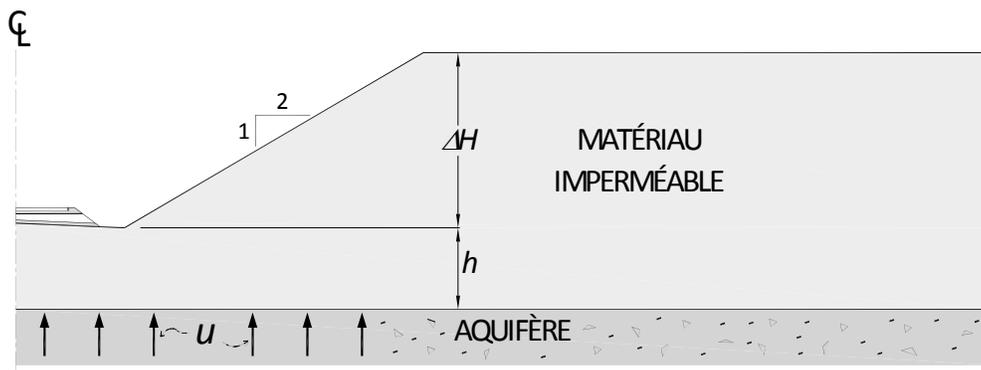


Figure 45 Aquifère artésien sous la chaussée en coupe

La figure 46 présente les valeurs maximales de la pression interstitielle u à maintenir à la base du matériau imperméable sous la structure de route en fonction de l'épaisseur h sous le fond de la coupe, pour des sols d'infrastructure avec des poids volumiques γ variant de 16 à 20 kN/m³. Le Manuel canadien d'ingénierie des fondations (Canadian Geotechnical Society, 2006) stipule que u doit être inférieure à 70 % de la contrainte totale qui agit à ce niveau. Cela implique que l'on doit effectuer du pompage dans l'aquifère pendant la construction et un drainage subséquent pour éviter le soulèvement de fond de l'excavation et de la structure de chaussée.

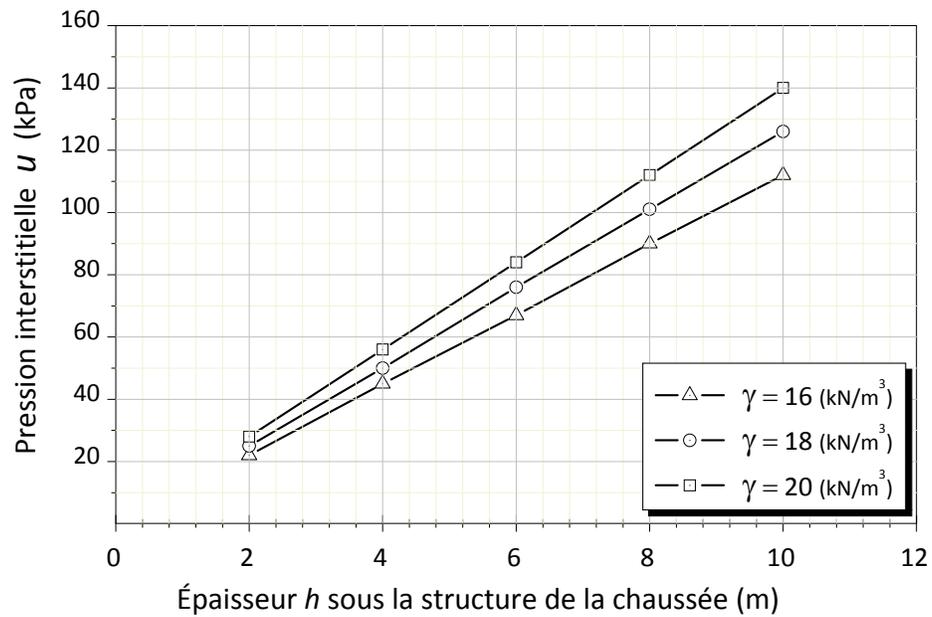


Figure 46 Pression interstitielle maximale u à la base du matériau imperméable sous la structure de route, en fonction de l'épaisseur h sous le fond de la coupe, pour des sols d'infrastructure avec $16 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 20 \text{ kN/m}^3$

7. SOLUTIONS PROPOSÉES

7.1. Description des systèmes

7.1.1. Extension de la sous-fondation ESF

La figure 47, tirée des normes du ministère des Transports du Québec (2013c) relatives à la construction routière, donne les dimensions à respecter pour la mise en place d'une ESF. La hauteur H de l'extrémité de l'ESF au-dessus du fossé est de 0,5 m pour les autoroutes et de 0,3 m pour les routes régionales.

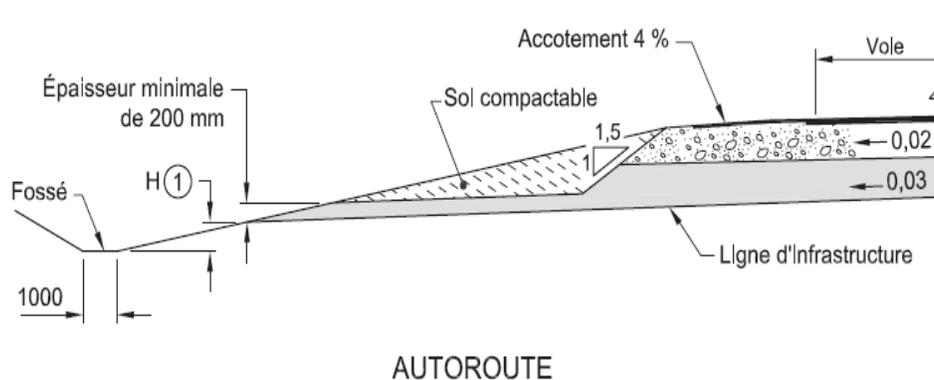


Figure 47 Section type d'extension de la sous-fondation (dessin normalisé 025 du chapitre 1)

7.1.2. Tuyaux de drainage à l'infrastructure TDI

La figure 48, tirée du même ouvrage du Ministère (2013c), présente le détail d'un TDI. Dans cette figure, le géotextile est en contact avec les sols à drainer, alors que dans un autre dessin provenant de la même source, on place le géotextile autour du tuyau perforé si le diamètre indicatif d_i (voir la section F du chapitre VI) du sol en contact est inférieur au diamètre des perforations ou si la fente est plus large que $1,25 * D_i$. Dans l'un ou l'autre des cas, il est important d'assurer la compatibilité de filtration aux différentes interfaces, comme prescrit à la section F du chapitre VI.

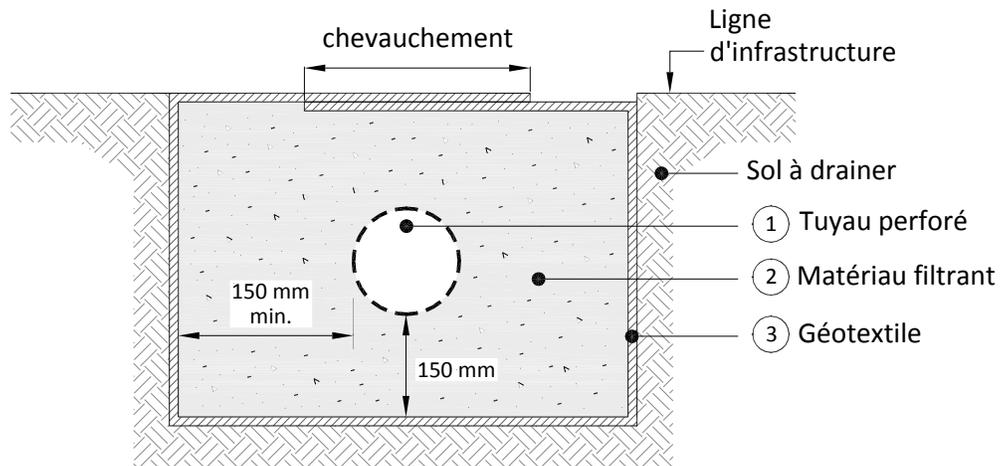


Figure 48 **Détail du tuyau de drainage à l'infrastructure (dessin normalisé 005 du chapitre 3)**

La figure 49 montre un TDI enrobé de géotextile, avant la mise en place de la structure de chaussée. Le tuyau transversal est un exutoire vers le fossé.



Figure 49 **Tuyau de drainage à l'infrastructure**

7.1.3. Écran drainant en rive de chaussée EDRC

On installe des écrans drainants de part et d'autre de la voie de roulement pour empêcher les eaux qui pourraient provenir de l'accotement et de la bande centrale de revenir dans la structure de chaussée. Avec le drain perforé placé à leur base, à la frontière entre l'infrastructure et la sous-fondation, ces écrans permettent l'évacuation des eaux d'infiltration.

Les écrans drainants ne doivent pas être placés jusqu'en surface pour éviter de capter les eaux de ruissellement. De plus, ils doivent être installés à la ligne de rive. La figure 50 montre ce mode de drainage.



Figure 50 Écran drainant en rive de chaussée, route 116, Dosquet

7.1.4. Couche drainante à l'infrastructure CDI

Les CDI sont constituées de matériaux grossiers avec un pourcentage très faible de fines. Elles peuvent être stabilisées par l'ajout d'un faible pourcentage, variant de 2 à 5 %, de ciment ou de bitume. On a aussi utilisé des géosynthétiques comme CDI. La conductivité hydraulique des CDI varie entre 10^{-1} et 10^{-4} m/s. Celles-ci servent en même temps de coussin anticontaminant pour les granulats de fondation. De plus, elles empêchent la remontée de la nappe dans la fondation par capillarité. Elles sont nécessaires dans les endroits où la nappe phréatique vient au-dessus de la ligne d'infrastructure à un moment de l'année. Il est important de prévoir une couronne (pente) vers l'extérieur de 2 % pour l'évacuation de l'eau; cette pente devra tenir compte des tassements si la CDI est utilisée sur des sols compressibles. Au besoin, la CDI peut être enrobée de filtres, conformément aux indications de la section F du chapitre VI. La figure 51 donne un exemple de CDI constituée de géocomposite de drainage avec minidrain dans un profil en coupe sur l'autoroute 50.



Figure 51 Couche drainante à l'infrastructure dans un profil en coupe, autoroute 50

7.1.5. Masque drainant de rive MDR

Le principe du masque drainant de rive (MDR) est analogue à celui du drainage latéral, mais sur des longueurs d'écoulement nettement plus importantes et suivant une pente généralement plus forte. On a recours au MDR lorsque la chaussée se situe dans un déblai important, à proximité d'une nappe phréatique perchée. Par exemple, la proximité d'un boisé surplombant le tracé de la chaussée peut entraîner des venues d'eau du talus directement sur la chaussée par temps de pluie. Ce phénomène non souhaitable peut être corrigé en interceptant les arrivées d'eau périphériques par un masque de grande taille, couvrant tout ou partie du talus bordant le tracé de la route (voir la figure 52).



Figure 52 Exemples de masques drainants de rive

7.1.6. Couche drainante immédiatement sous le revêtement de béton de ciment

L'utilisation, immédiatement sous le revêtement de béton de ciment, d'une couche drainante constituée de géocomposites ou de granulats traités au bitume ou au ciment n'est pas justifiée au point de vue du drainage, puisqu'elle provoque une augmentation de la teneur en eau du granulat de fondation. Toutefois, elle peut être appropriée du point de vue structural (transmission des charges de roues).

7.2. Critères de sélection d'un système

Le tableau 7 donne des recommandations quant à l'utilisation d'un des systèmes de drainage décrits à la section A pour les routes régionales.

Tableau 7 Choix et position des systèmes en fonction de la nature des sols encaissants et de la position de la nappe phréatique. Route régionale

Sol d'infrastructure	Nappe élevée ¹	Nappe basse ²
Gravier	TDI	Non requis
Sable ³	TDI	Non requis
Silt, moraine silteuse	TDI/EDRC + CDI	TDI
Argile, moraine argileuse	TDI/EDRC + CDI	TDI

1 : Vient au-dessus de la ligne d'infrastructure ou dans la sous-fondation à certaines périodes de l'année. S'applique principalement aux profils en coupe.

2 : Se maintient en tout temps à 2 m sous la ligne d'infrastructure.

3 : Contient moins de 12 % de particules fines. Avec plus de 12 %, il a le comportement d'un silt.

Pour les autoroutes avec épaulements latéraux imperméables, il est nécessaire de prévoir un des trois systèmes (ESF, TDI ou EDRC) si la nappe phréatique vient à moins de deux mètres sous la ligne d'infrastructure. La sélection d'un de ces systèmes se fera sur la base des normes de conception établies au chapitre VI. De plus, les simulations du chapitre III ont indiqué qu'il est hautement recommandé de mettre en place des accotements revêtus pour réduire les degrés de saturation sous la voie de roulement.

7.3. Comparaison des coûts des systèmes de drainage

Le tableau 8 présente les coûts relatifs des systèmes ainsi que les méthodes d'installation exposés dans la publication de Savard (1996). Les méthodes de mise en place peuvent changer en fonction du marché et de la région. On constate que l'EDRC est nettement plus coûteux que les autres méthodes.

Tableau 8 Coût de chaque système (1995)

	Installation	Coût au mètre courant (\$)
Extension de la sous-fondation ESF		
Emprunt A – épaisseur 150 mm	Niveleuse	6,90
Granulat concassé – épaisseur 150 mm	Niveleuse	9,70
Tuyau de drainage à l'infrastructure TDI		
Drain flexible (180 kPa) – 150 mm diam.	Enfouissement mécanique	7,00
Drain flexible (180 kPa) – 300 mm diam.	Enfouissement mécanique	18,60
Drain semi-rigide (300 kPa) – 150 mm diam.	Trancheuse	13,90
Drain rigide TTOG – 150 mm diam.	Rétrocaveuse	24,60
Écran drainant en rive de chaussée EDRC		
Drain flexible (180 kPa) – 150 mm diam.	Trancheuse	31,30
Drain semi-rigide (300 kPa) – 300 mm diam.	Trancheuse	25,00

7.4. Installation des conduites, contrôle de qualité et entretien

Considérant que :

- le drainage souterrain est un aspect souvent négligé dans la conception et la réalisation de travaux routiers;
- deux ouvrages y ont été consacrés, soit celui du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (2005) ainsi que la norme BNQ 3624-540 (BNQ, 2005);

certains points sont à respecter, alors que d'autres pratiques sont à éviter.

Les points importants à RESPECTER :

- concevoir et bâtir en collaboration avec les organismes compétents (MTQ, Association des entrepreneurs en drainage agricole du Québec) à l'aide d'un guide de référence pour le drainage des fondations de chaussées et une norme d'installation pour le drainage routier;

- exiger que les entreprises aient du personnel formé connaissant le drainage en milieu routier;
- engager des professionnels pour la conception et la compréhension des problèmes liés à l'hydraulique des sols;
- effectuer un contrôle strict des pentes minimales des tuyaux et des interfaces;
- utiliser des équipements de pose reconnus et munis d'un système laser complètement automatisé pour l'installation des systèmes de drainage (justifié par la faible pente lors de l'installation);
- maximiser la surveillance par du personnel qualifié;
- prévoir des endroits pour nettoyer les drains si les tests ont démontré la présence d'ocre de fer;
- s'assurer que :
 - ✓ un bon protocole de travail est suivi pour l'installation et le remblayage du drain souterrain. Ce protocole garantira que les travaux subséquents ne viendront pas annuler les effets du drainage;
 - ✓ le remblayage et le réglage respectent les spécifications du fabricant pour la résistance à l'écrasement;
 - ✓ les granulométries des matériaux mis en place sont conformes aux spécifications du fabricant de filtres;
 - ✓ l'enveloppe filtrante est compatible avec les matériaux de remblai;
 - ✓ le chevauchement des géotextiles d'enrobage est réalisé adéquatement;
 - ✓ le nettoyage des exutoires des drains de TDI, de CDI, d'EDRC et des sorties d'ESF est fait régulièrement.

Les pratiques à ÉVITER :

- creuser des tranchées de plus de 400 mm de largeur (ex. : pelle avec godet de 1 m), sinon le drain reposera sans appui avant le remblayage;
- remblayer un tuyau de drainage sans l'avoir préalablement bien appuyé de façon manuelle de chaque côté jusqu'à mi-diamètre avant le remblayage final;

- effectuer un compactage trop intense qui abîmera le drain et diminuera son efficacité.

En résumé :

Dans le cas d'une construction nouvelle, enlever le couvert végétal sur toute l'emprise de la route, la drainer après avoir vérifié la conductivité hydraulique du sol d'infrastructure, y installer les drains en procédant de l'aval vers l'amont avec l'équipement recommandé dans la norme 3624-540 du BNQ et en respectant l'espacement calculé à partir des résultats des essais, et, par la suite, procéder à la mise en place des granulats de la structure de chaussée selon les spécifications du maître d'œuvre. Cette opération permet d'installer des drains sous la nappe phréatique et de l'abaisser le plus tôt possible. Son succès n'est assuré qu'à condition que les collecteurs (fossé, couche drainante ou égout pluvial) soient assez bas pour recevoir les eaux par gravité.

8. RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1992). Guidelines for Hydraulic Consideration in Highway Planning and Location. Vol 1: Highway Drainage Guidelines, AASHTO, Washington. [Prepared by the Task Force on Hydrology and Hydraulics].

BLANCHET, M. et J. LAFLEUR (1996). Évaluation des chaussées drainantes, juillet, 230 p. [Rapport final CDT P1584 soumis au ministère des Transports du Québec].

BUREAU DE NORMALISATION DU QUÉBEC (2005). Norme 3624-540 Service de drainage souterrain – Critères de qualité.

CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (2006). Canadian Foundation Engineering Manual, 4th Edition, Bi-Tech Publishers, Vancouver, B.C., 488 p.

CEDERGREN, H.R. (1987). Drainage of Highway and Airfield Pavements, Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 289 p.

CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2005). Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires, CRAAQ, 67 p.

COMITÉ FRANÇAIS DES GÉOTEXTILES. Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration.

FREDLUND, D.G., A. XING et S. HUANG (1994). "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, n° 4, p. 533-546.

GONTHIER, A., P. GOTTELAND et J. LAFLEUR (1997). « Drainage par géocomposite sous une chaussée en béton », Recueil des communications, 32^e Congrès annuel de l'AQTR, Trois-Rivières, AQTR, tome 1, p. 298-316.

HOLTZ, R.D. et W.D. KOVACS (1991). Introduction à la géotechnique, traduit par J. Lafleur, Montréal, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.

KENNEY, T.C. et D. LAU (1985). "Internal Stability of Granular Filters", Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, n° 2, p. 215-225.

LAFLEUR, J. (1998). « Drainage des routes, 1^{re} partie : action de l'eau », GÉOGLOBE, n° 2, été, p. 8-11.

LAFLEUR, J. (1999). "Selection of Geotextiles to Filter Broadly Graded Cohesionless Soils", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 17, n^{os} 5 & 6, p. 299-312.

LAFLEUR, J. et P. BOURSIER (1994). Évaluation des chaussées drainantes – Sous-projet III – Capacité de drainage en présence de froid, janvier, 48 p. [Rapport CDT P1584 soumis au ministère des Transports du Québec].

LAFLEUR, J. et Y.H. FAURE (1999). « Drainage des routes, 3^e partie : utilisation des géosynthétiques », *GÉOGLOBE*, n^o 4, hiver, p. 44-47.

LAFLEUR, J. et F. GÉNÉREUX (2007). Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées, avril, 94 p. [Rapport CDT P2982 soumis au ministère des Transports du Québec].

LAFLEUR, J., F. GIROUX et M. HUOT (1987). "Field Permeability Testing of the Weathered Champlain Clay Crust", *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 24, n^o 4, p. 581-589.

LAFLEUR, J. et I. JAFAR (2009). Étude paramétrique sur l'efficacité des couches drainantes dans les chaussées routières, janvier, 58 p. [Rapport CDT P3805 soumis au ministère des Transports du Québec].

LAFLEUR, J. et A. KIRSCHBAUM (1994). Évaluation des chaussées drainantes – Sous-projet II – Bilan de systèmes de drainage en opération, mai, 114 p. [Rapport CDT P1584 soumis au ministère des Transports du Québec].

LAFLEUR, J. et M. LEBEAU (1999). Modélisation de l'état hydrique dans les structures de chaussées en période estivale, mars, 205 p. [Rapport final CDT P1780 soumis au ministère des Transports du Québec].

LAFLEUR, J. et N. RIOUX (1998). « Drainage des routes, 2^e partie : critères de sélection », *GÉOGLOBE*, n^o 3, automne, p. 8-11.

LAFLEUR, J. et Y. SAVARD (1996). "Efficiency of Geosynthetic Lateral Drainage in Northern Climates", *Transportation Research Record n^o 1534: Soils, Geology, and Foundations. Geosynthetics: Cold Regions, Flexible Pavements, and Other Issues*, Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council, p. 12-18.

LAFLEUR J. et Y. SAVARD (2004). "Internal Stability of Road Aggregates Submitted to Water Flow", *Proc. 57th Conf. of the Canadian Geotechnical Society*, Québec, 24-27 octobre.

LEBEAU, M. et J. LAFLEUR (2002). Modélisation de l'état hydrique dans les structures de chaussées en période de dégel, octobre, 178 p. [Rapport final CDT P2278 soumis au ministère des Transports du Québec].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (1997). « Limites du drainage latéral pour contrer les soulèvements différentiels dus au gel », Info DLC, vol. 2, n° 8, août. [Bulletin d'information technique de la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (1999). « Comparaison de l'efficacité des systèmes de drainage de chaussées en période estivale par simulations numériques », Info DLC, vol. 4, n° 10, octobre. [Bulletin d'information technique de la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2002). « Analyse du comportement hydrique d'une structure de chaussée par simulations numériques », Info DLC, vol. 7, n° 10, octobre. [Bulletin d'information technique de la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2003). « Où et quand sceller les fissures d'un revêtement bitumineux? », Info DLC, vol. 8, n° 8, août. [Bulletin d'information technique de la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2004a). Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées, 40 p. [Préparé par la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2004b). Guide de scellement des fissures, 27 p. [Préparé par la Direction du laboratoire des chaussées].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2012). Tome VII – Matériaux, Les Publications du Québec, (Normes – Ouvrages routiers).

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2013a). Cahier des charges et devis généraux – Infrastructures routières – Construction et réparation, Les Publications du Québec.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2013b). Les chaussées et le climat québécois, [En ligne]. [http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/chaussees_climat_quebécois].

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (2013c). Tome II – Construction routière, Les Publications du Québec, (Normes – Ouvrages routiers).

RACETTE, S. et J. LAFLEUR (1993). Étude expérimentale du comportement des géosynthétiques dans le drainage latéral des routes, août, 153 p. [Rapport CDT P1584 soumis au ministère des Transports du Québec].

RIDGEWAY, H.H. (1976). "Infiltration of Water Through the Pavement Surface", Transportation Research Record n° 616, Washington, D.C., Transportation Research Board, National Research Council, p. 98-100.

SAVARD, Y. (1996). « Les développements en drainage des chaussées à Transports Québec », Recueil des communications, 31^e Congrès annuel de l'AQTR, Québec, AQTR, tome 2, p. 125-188.

STORMONT, J.C. et S. ZHOU (2005). "Impact of Unsaturated Flow on Pavement Edge Drain Performance", Journal of Transportation Engineering, vol. 131, n° 1, p. 46-53.

