

-- Rapport final --

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

préparé pour

MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

Direction du Laboratoire des Chaussées

930. chemin Sainte-Foy, 5^e étage

Québec (Québec)

Par

Professeur Jean Lafleur, ing. Ph.D.

Département des génies civil, géologique et des mines

Soumis par

CENTRE DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (C.D.T.)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

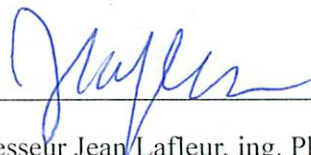
Campus de l'Université de Montréal

Case postale 6079, succursale Centre-ville

Montréal (Québec)

H3C 3A7

Février 2013



Professeur Jean Lafleur, ing. Ph.D.

Directeur de projet

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 spécifiques et les modalités ont été définis dans notre proposition d'étude P3805 portant le titre ci-haut mentionné et adressée à M. Yves Savard, ing. M.Sc. chargé de projet au Ministère des Transports du Québec (MTQ), le 10 février 2009. Les travaux ont été exécutés conformément au contrat de service 850769248 conclu entre le MTQ 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 MTQ 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 MTQ de 1993 à 1996. Ces travaux ont par la suite été appuyés par des études paramétriques des conditions d'écoulement souterrain dans les chaussées avec le logiciel SEEP/W 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

Le rapport présente d'abord une comparaison entre les différents systèmes de drainage interne utilisés par le MTQ sur les sections d'autoroute :

- extension de la sous-fondation (ESF),
- tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI) et
- 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/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 et finalement
- 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 artésienne par pompage durant la construction et 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 donnés en adaptant les normes existantes du MTQ et un tableau propose un choix et 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 conventionnels : caractéristiques des produits disponibles, comparaison avec les granulats et limitations dans leur utilisation.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	I
Résumé.....	II
Figures	VI
Tableaux.....	VIII
Glossaire.....	IX
Liste des symboles	XI
Liste des abréviations.....	XII
I. Impact de l'eau sur les structures de chaussées	1
A. Stabilité des fondations de chaussée	1
B. Variation des quantités d'eau dans la chaussée au cours des saisons.....	3
C. Types d'endommagement par l'eau.....	5
1. Soulèvements en hiver.....	5
2. Perte de capacité portante au printemps.	8
3. Où et quand mettre en place un système de drainage.....	10
II. Infiltration et drainage	11
A. Localisation des zones de charge (infiltration) et de décharge (drainage, évacuation) dans les structures de chaussée	11
1. Définition des termes.....	11
2. Infiltration	13
3. Évacuation.....	13
B. Relation entre les précipitations, l'infiltration et le ruissellement dans les chaussées	14
C. Modélisation par éléments finis de l'écoulement dans les chaussées	15
1. Sections transversales et conditions aux frontières.....	15
2. Écoulement saturé/non saturé	17
D. Propriétés des sols modélisés	19
1. Sols d'infrastructure INF.....	20
2. Granulats de fondation F et de sous-fondation SF.....	20
3. Couche drainante CD	22
III. Résultats des simulations.....	23
A. Profil d'autoroute	23
1. Comparaison entre les différents systèmes et présence de fissures	23
2. Position relative du TDI par rapport à la ligne de rive.....	25
3. Accotement revêtu ou non	25

4. Nature des matériaux d'épaulement	25
5. Nature du sol d'infrastructure.....	25
6. Couche drainante immédiatement sous le revêtement	26
7. Écoulement tridimensionnel.....	27
8. Variations de la teneur en eau volumique en période de dégel au printemps.....	28
B. Profils de route régionale.....	29
1. Hauteur du déblai et nature du sol d'infrastructure	29
2. Épaisseur et perméabilité de la couche drainante.....	29
3. Présence de fissure dans la voie de roulement.....	30
C. Limitations de l'étude.....	31
IV. Facteurs intervenant dans la conception d'un système.....	32
A. Position de la nappe phréatique et niveaux piézométriques	32
B. Topographie du profil	33
1. Profil transversal	33
2. Profil longitudinal.....	34
C. Nature des sols d'infrastructure.....	35
1. Catégories ou classes	35
2. Stratification et variabilité naturelle	35
3. Pierre nette, roc dynamité	36
D. Nature des matériaux d'apport et propriétés hydrauliques	36
1. Granulats de sous-fondation et de fondation	36
a) fuseaux granulométriques admissibles.....	36
b) conductivité hydraulique en conditions non saturées.....	37
c) impact de la fraction argileuse sur la perméabilité.....	38
d) stabilité interne des particules.....	39
e) perméabilité des matériaux d'épaulement dans les autoroutes.	40
2. Granulats stabilisés ou non au bitume ou au ciment (couches drainantes à l'infra)	40
E. Autres considérations	41
1. Fissuration sur chaussée existante.....	41
2. Pénétration du gel.....	41
3. Remplissage autour des conduites	41
V. Utilisation des géosynthétiques en drainage	42
A. description des produits disponibles	42

B.	Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires.....	44
C.	Facteurs à considérer	45
1.	Perméabilité sous compression – résistance à la compression.	45
2.	Résistance à la déchirure	46
3.	Formation de glace.....	47
4.	Mouillabilité	47
5.	Ouverture de filtration	47
VI.	Éléments de conception.....	48
A.	Profondeur et rigidité des tuyaux de drainage	48
B.	Diamètre des conduites et des drains.....	48
C.	Pente longitudinale du drain.....	49
D.	Pente des interfaces vers l'extérieur de la chaussée.....	49
E.	Position des exutoires	50
F.	Sélection des filtres	51
1.	Rétention.....	51
2.	Perméabilité	52
G.	Stabilité du fond de fouille dans les profils en coupe	53
VII.	Solutions proposées.....	55
A.	Description des systèmes.....	55
1.	Extension de la sous-fondation ESF	55
2.	Tuyaux de drainage à l'infrastructure TDI	55
3.	Écran de rive EDRC	56
4.	Couche drainante à la ligne d'infrastructure CDI	57
5.	Masque drainant de rive MDR	57
6.	Couche drainante immédiatement sous le revêtement de béton de ciment.....	58
B.	Critères de sélection d'un système	58
C.	Coûts comparatifs de systèmes de drainage.....	59
D.	Installation des conduites – contrôle de qualité – entretien	60

FIGURES

- Figure 1.1** Courbe enveloppe typique de la résistance au cisaillement de granulats saturés et non saturés.
- Figure 1.2** Distribution mensuelle des précipitations et de l'infiltration.
- Figure 1.3** Variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation des pores en eau et en glace.
- Figure 1.4** Fissures créées par le soulèvement différentiel en hiver.
- Figure 1.5** Progression du gel dans la chaussée et soulèvement associé à l'indice de gel maximum.
- Figure 1.6** Chaussée endommagée par le soulèvement hivernal (MTQ, 2004).
- Figure 1.7** Chaussée endommagée par une faible portance au printemps (MTQ, 2004).
- Figure 1.8** Fissures créées par un excès d'eau au printemps dans la fondation.
- Figure 2.1** Définition des éléments d'un système de drainage dans la structure de chaussée.
- Figure 2.2** Localisation des zones de charge et de décharge – profil rasant d'autoroute.
- Figure 2.3** Localisation des zones de charge et de décharge – profil en coupe.
- Figure 2.4** Distribution des infiltrations dans un gravier en fonction du temps, après le début d'une précipitation.
- Figure 2.5** Section transversale de structure de la chaussée d'autoroute avec profil rasant.
- Figure 2.6** Section transversale avec profil en coupe.
- Figure 2.7** Détail de la structure de chaussée régionale avec profil en coupe.
- Figure 2.8** Courbes de rétention d'eau.
- Figure 2.9** Courbes granulométriques des sols d'infrastructure modélisés.
- Figure 2.10** Fonctions de conductivité hydraulique FCH des sols d'infrastructure des chaussées modélisées.
- Figure 2.11** Courbes granulométriques des granulats.
- Figure 2.12** Fonctions de conductivité hydraulique FCH des granulats de chaussées modélisées.
- Figure 2.13** Fonctions de conductivité hydraulique FCH de la couche drainante.

- Figure 3.1** Équipotentiellles de l'écoulement dans une chaussée avec extension de la sous-fondation (ESF).
- Figure 3.2** Équipotentiellles de l'écoulement dans une chaussée avec tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI).
- Figure 3.3** Équipotentiellles de l'écoulement dans une chaussée avec écran drainant en rive de chaussée (EDRC).
- Figure 3.4** 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.
- Figure 3.5** Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil d'autoroute avec accotement revêtu a) et profil de route régionale avec accotement non revêtu b).
- Figure 3.6** 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.
- Figure 3.7** 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.
- Figure 3.8** Écoulement tridimensionnel dans une extension de la sous-fondation. Chaussée d'autoroute.
- Figure 3.9** Distribution des teneurs en eau durant le dégel. Chaussée de route régionale.
- Figure 3.10** Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure. Profil en coupe sans couche drainante.
- Figure 3.11** 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.
- Figure 4.1** Fluctuations de la nappe phréatique en fonction des saisons (Lafleur et coll., 1987).
- Figure 4.2** Profil transversal de terrain en pente.
- Figure 4.3** Profil longitudinal de terrain en pente.
- Figure 4.4** Fuseau granulométrique admissibles MTQ (2013a).
- Figure 4.5** Influence des particules fines sur la perméabilité des granulats.
- Figure 4.6** Méthode de Kenney et Lau (1985) pour évaluer la stabilité interne des particules.
- Figure 4.7** Enrochement utilisé sur la route #175 dans un déblai de sable silteux.
- Figure 5.1** Variation de la transmissivité d'un géotextile non tissé en fonction de différentes contraintes de compression (Lafleur 1998).

- Figure 6.1** Débits d'eau recueillis dans les systèmes de drainage de Saint-Donat (Racette et Lafleur, 1993).
- Figure 6.2** Pentés minimales des interfaces (MTQ, 2013c).
- Figure 6.3** Saignée sur autoroute existante sans système de drainage, autoroute #15.
- Figure 6.4** Classification des courbes granulométriques des sols à granulométrie étendue.
- Figure 6.5** Aquifère artésien sous la chaussée en coupe.
- Figure 6.6** 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 $16 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 20 \text{ kN/m}^3$.
- Figure 7.1** Section type d'extension de la sous-fondation.
- Figure 7.2** Détail du tuyau de drainage à l'infrastructure.
- Figure 7.3** Tuyau de drainage à l'infrastructure.
- Figure 7.4** Écran drainant en rive de chaussée, route #116, Dosquet.
- Figure 7.5** Couche drainante à l'infrastructure dans un profil en coupe, autoroute #50.
- Figure 7.6** Exemples de masque drainant de rive.

TABLEAUX

- Tableau 1.1** Variation du degré de saturation et de la perméabilité des agrégats routiers au cours des saisons.
- Tableau 3.1** Degré de saturation moyen sous la piste extérieure de roue dans un sable d'infrastructure. Profil en coupe.
- Tableau 4.1** Importance relative par ordre décroissant des facteurs intervenant dans le dimensionnement des systèmes de drainage (nouvelle construction).
- Tableau 5.1** Gamme des géosynthétiques disponibles en drainage de chaussées.
- Tableau 5.2 :** Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires.
- Tableau 5.3 :** Comparaison des transmissivités d'un géocomposite de drainage avec mini-drains avec des matériaux granulaires.
- Tableau 7.1** Choix et position des systèmes en fonction de la nature des sols encaissants et de la géométrie. Route régionale.

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 géotextile 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 MTQ pour désigner le granulat utilisé le plus souvent dans la couche de fondation d'une chaussée.

MG-112

Terme utilisé par le MTQ pour désigner le granulat utilisé le plus souvent dans la couche de sous fondation d'une chaussée.

Nappe phréatique

Limite supérieure de l'aquifère souterrain 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 m/s 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 au niveau de la pierre poreuse. 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_I	=	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
u	=	pression interstitielle en ce point
τ_f	=	contrainte normale appliquée sur une chaussée

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BNQ	Bureau des Normes du Québec
CD	couche drainante
CDI	couche drainante à l'infrastructure
EDRC	écran drainant en rive de chaussée
ESF	extension de la sous-fondation
F	granulat de fondation (MG-20)
FOS	Filtration Opening Size (ouverture de filtration obtenue par tamisage hydrodynamique)
INF	sol d'infrastructure
MDR	Masque drainant de rive
MTQ	Ministère des Transports du Québec
NFG	Normes françaises sur les géotextiles
PE	polyester
PER	piste extérieure de roue
PET	polyéthylène
PP	polypropylène
SCG	Société Canadienne de Géotechnique
SF	granulat de sous-fondation (MG-112)
TDI	tuyau de drainage à l'infrastructure

I. Impact de l'eau sur les structures de chaussées

A. Stabilité des fondations de chaussée

Les mécanismes par lesquels l'eau agit sur les granulats et les sols sont reliés 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 sur la figure 1.1 à l'aide des enveloppes de résistance caractéristiques d'un matériau non saturé à la teneur en eau optimum ($S_r \approx 70\%$) et du même matériau à saturation ($S_r = 100\%$). Dans la gamme des contraintes normales appliquées dans les chaussées, i.e. entre 25 et 100 kPa, τ_f peut diminuer de plus de la moitié.

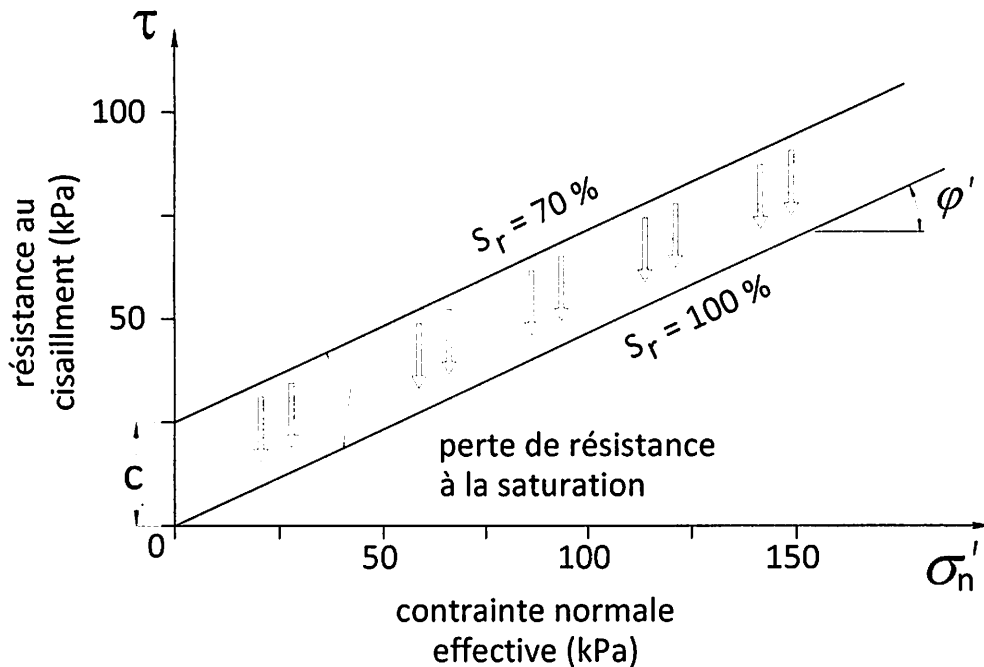


Figure 1.1 Courbe enveloppe typique de la résistance au cisaillement de granulats saturés et non saturés.

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 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 les imperméabilisant;
- contrôler l'eau par drainage et évacuation

La première méthode consiste à mettre en place et maintenir une barrière complètement imperméable à la surface afin d'empêcher l'eau d'atteindre les fondations de la chaussées; 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 deuxième 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 des ces méthodes repose sur l'utilisation de matériaux adéquats, imperméables ou drainants, soit pour réduire l'infiltration ou pour faciliter l'évacuation rapide de l'eau.

B. 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 et 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 donne un histogramme typique de la distribution des précipitations moyennes mensuelles au cours de l'année, pour cinq stations au Québec (Bagotville, Québec, Lavaltrie, Ste-Anne-de-Bellevue, Hull) sur une période de cinq années 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 contrebas 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.

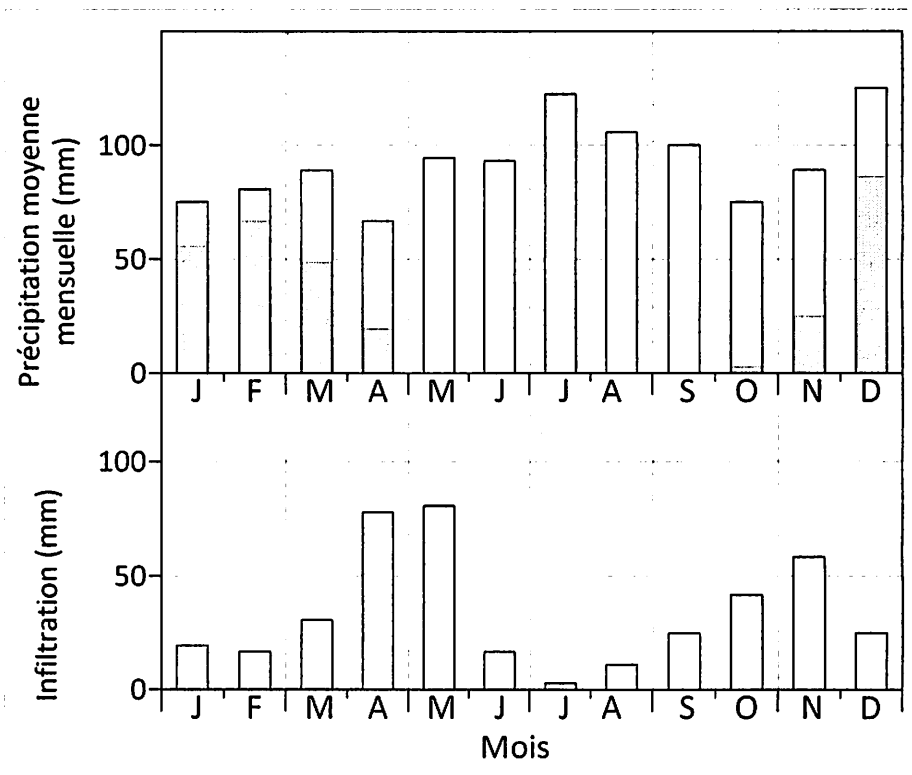


Figure 1.2 Distribution mensuelle des précipitations et de l'infiltration.

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 reliée à leur perméabilité. Or comme l'indique la courbe en rouge de la figure 1.3, 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 en condition non saturée ($S_r < 100$) est beaucoup plus faible qu'en condition saturée. Cet aspect sera traité plus en détail à la section C du chapitre II du présent rapport.

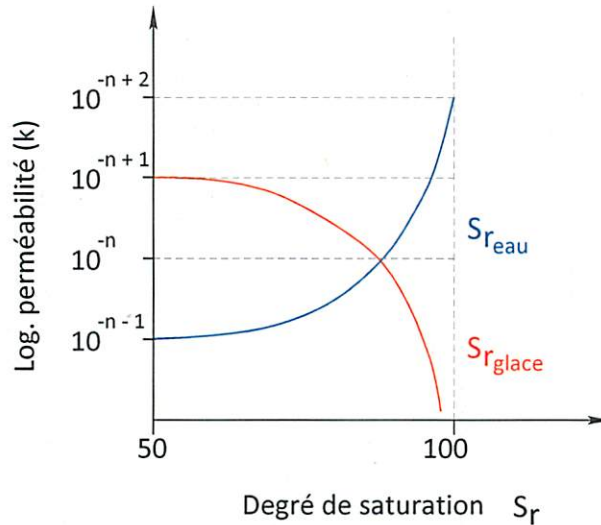


Figure 1.3 Variation de la perméabilité en fonction du degré de saturation des pores en eau et en glace.

De ce qui précède, on retrouve 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;
- et finalement à l'automne, la perméabilité k des matériaux granulaires désaturés durant l'été est abaissée. A cette période, ces matériaux ont un degré de saturation en eau S_r qui peut varier entre 70 et 90%.

Le tableau 1.1 suivant illustre 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 1.1 Variation du degré de saturation et de la perméabilité des agrégats routiers au cours des saisons.

saison	précip. liquid.	infiltration	S_r dans la fondation	k_r
<u>HIVER:</u> (D-J-F)	faible	faible : le sol gelé est imperméable	augmente graduellement jusqu'à la fin de l'hiver	faible : $S_r < 100\%$
<u>PRINTEMPS:</u> (M-A-M)	moy.	élevée : les précip. se combinent aux eaux de fonte	$S_r \approx 100\%$	augmente
<u>ÉTÉ:</u> (Jn-JI-A)	moy.	diminue à cause de l'évaporation	$70 < S_r < 90\%$	diminue
<u>AUTOMNE</u> (S-O-N)	moy.	plus élevée pour décroître à la mi-nov.	$S_r \approx 100\%$ et diminue à la mi-nov.	augmente de nouveau jusqu'en nov. et diminue avec la réduction de l'infiltration

C. 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, cause 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, 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. 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 1.4 illustre ce type d'endommagement où les fissures sont passablement ouvertes et longues.



Figure 1.4 Fissures créées par le soulèvement différentiel en hiver.

A titre indicatif, pour une pénétration du gel de deux mètres 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 on aurait théoriquement un soulèvement de 60 mm. Le bas de la figure 1.5 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, tel qu'indiqué sur la partie supérieure du graphique, croît aussi avec la saison froide pour atteindre un maximum vers la mi-mars. Compte tenu 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 aussi 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. En atteignant le sol d'infrastructure, on constate que le taux de soulèvement s'accélère. A 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.

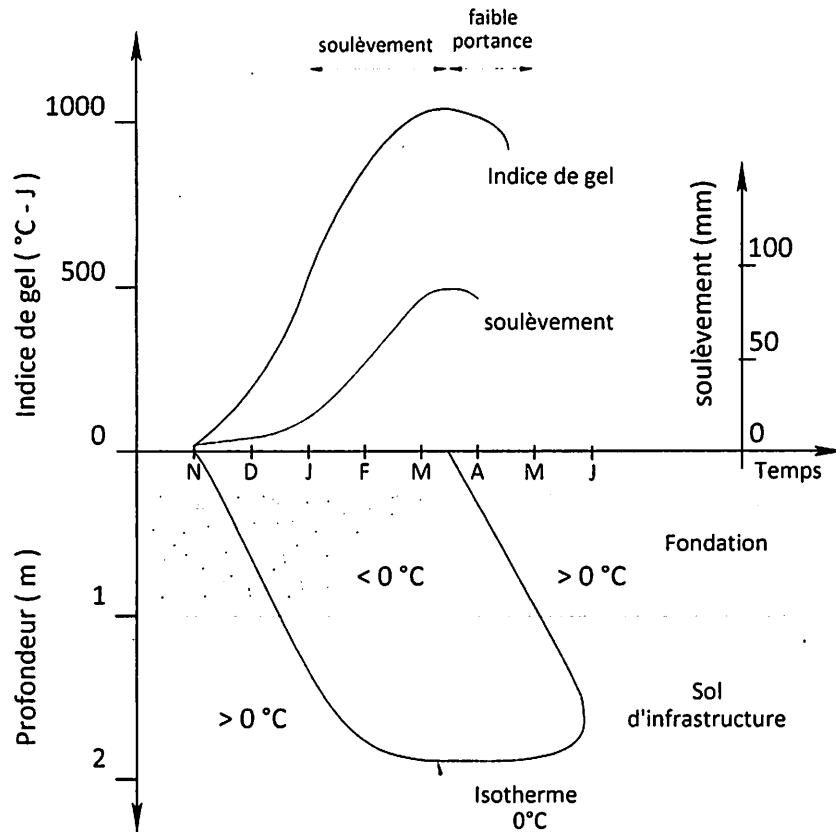


Figure 1.5 Progression du gel dans la chaussée et soulèvement associé à l'indice de gel maximum.

La pénétration du gel et le soulèvement sont intimement liés à l'indice de gel défini cumulatif 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 2000 degrés Celsius-jours et la pénétration maximale du gel se situe entre 0,6 et 2,4 m. La figure 1.6 tirée de MTQ (2004) définit la position des zones gelées sous la chaussée et leur effet sur le revêtement.

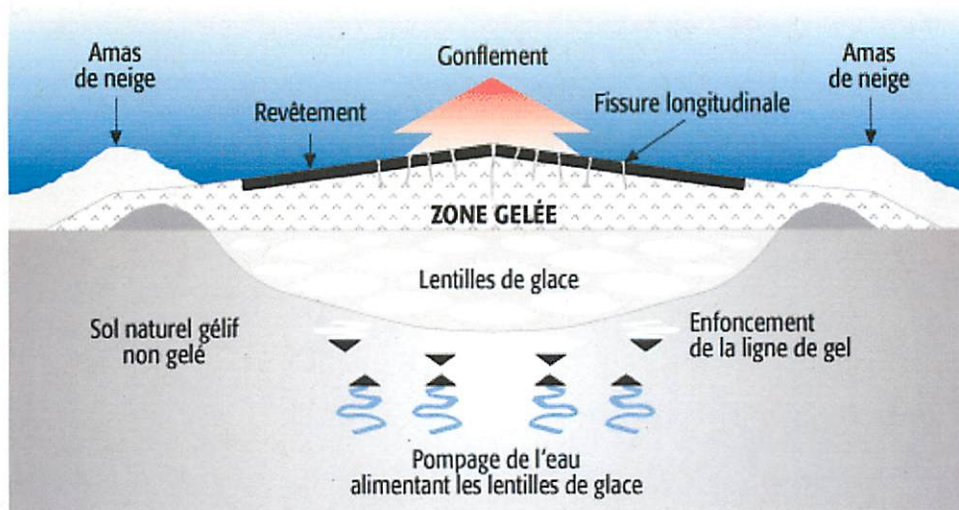


Figure 1.6 Chaussée endommagée par le soulèvement hivernal (MTQ, 2013b).

2. Perte de capacité portante au printemps.

Sur 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 prévalent à ce moment sont illustrées à la figure 1.7 : présence d'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; elle peut chuter de plusieurs ordres de grandeur.

La présence accrue d'eau emprisonnée dans la zone localisée immédiatement sous les charges de roue se traduit par une baisse de capacité portante et une dégradation accélérée de la couche de revêtement tel qu'illustré à la figure 1.7. 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 isolante des rayons du soleil.

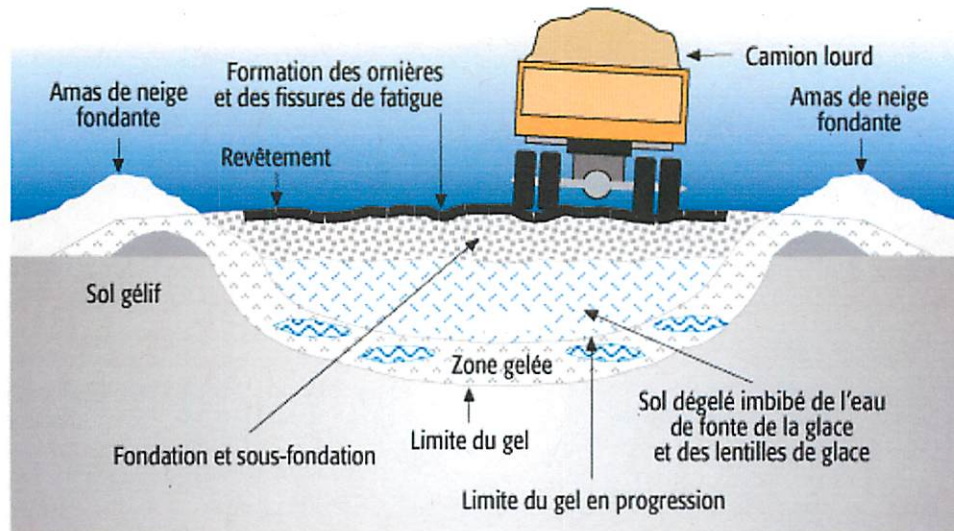


Figure 1.7 Chaussée endommagée par une faible portance au printemps (MTQ, 2013b).

La figure 1.8 illustre 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 1.8 Fissures créées par un excès d'eau au printemps dans la fondation.

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 les chaussées sont conçues et construites initialement suivant les normes, il est inévitable qu'au cours de leur durée de vie, elles seront soumises à la présence d'eau qui affaiblira les matériaux de support immédiatement sous le revêtement. Il existe beaucoup de méconnaissance des comportements en drainage des chaussées et ce rapport veut 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 intervenant dans la conception d'un système de drainage décrits au chapitre IV du présent rapport débouchent sur la nécessité de leur mise en place, la vie utile d'une nouvelle chaussée peut être prolongée de façon appréciable. Les éléments de conception sont expliqués au chapitre VI alors que le chapitre V et VII décrivent le rôle potentiel des géosynthétiques en filtration/drainage et les systèmes de drainage disponibles.

- dans les chaussées existantes dégradées :

En appliquant des critères économiques, il peut être plus justifié de prolonger la vie utile et améliorer le comportement d'une chaussée existante 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 existante. Ce rapport donne des indications sur les ajustements à faire sur 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 mètre sous le centre de la chaussée pour le drainage gravitaire alors qu'en milieu urbain, 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 doivent alors être se faire par des conduits reliés à un système d'égout pluvial. Ce rapport ne traite que de chaussées en milieu rural avec fossés.

II. Infiltration et drainage

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

1. Définition des termes

Les éléments constituant une chaussée sont définis sur la figure 2.1.

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. Les conclusions au point de vue hydraulique 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 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 : ils sont constitués de matériau 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.

drain d'évacuation : ce sont des 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 : ce sont les 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 que ces éléments ne soient pas obstrués par des débris ou de la glace.

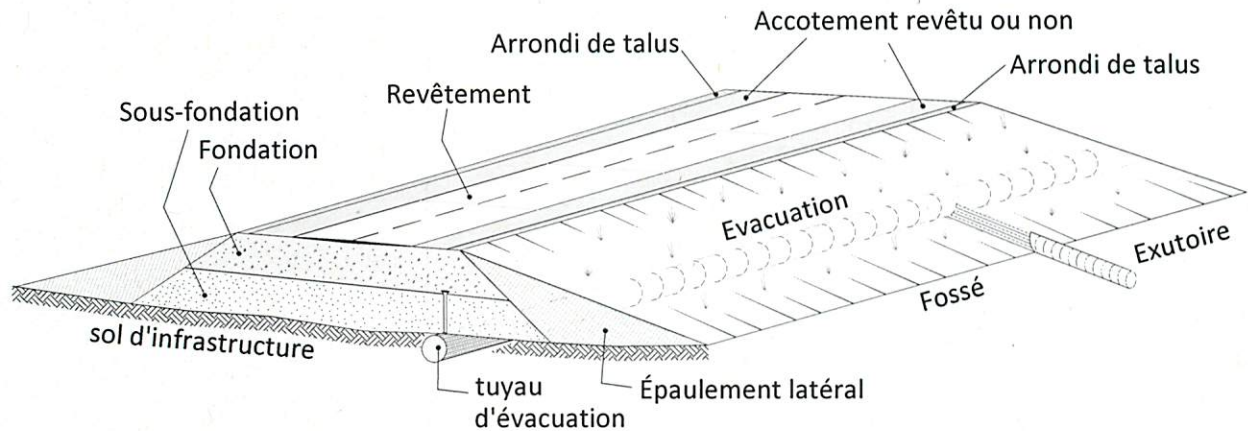


Figure 2.1 Définition des éléments d'un système de drainage dans la structure de chaussée.

Les figures 2.2 et 2.3 indiquent à l'aide de flèches, la provenance et l'évacuation des eaux à l'origine des écoulements susceptibles de se produire dans et au voisinage d'une chaussée.

En **rouge**, on indique les infiltrations qui proviennent soit des fissures ou des joints du revêtement I_s et/ou des épaulements latéraux I_L ou 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.

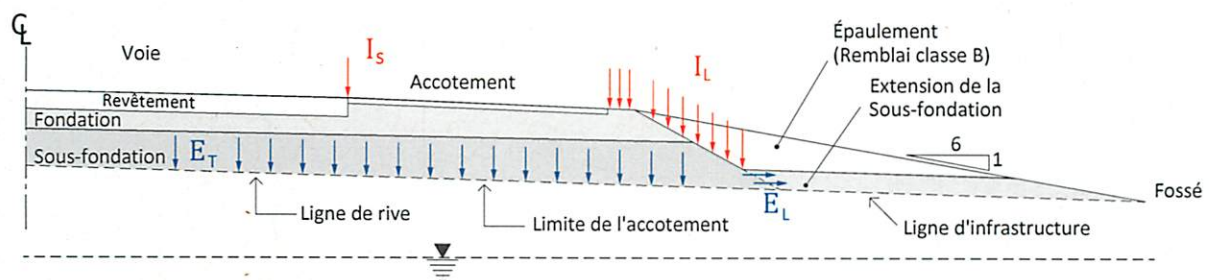


Figure 2.2 Localisation des zones de charge et de décharge – profil rasant d'autoroute.

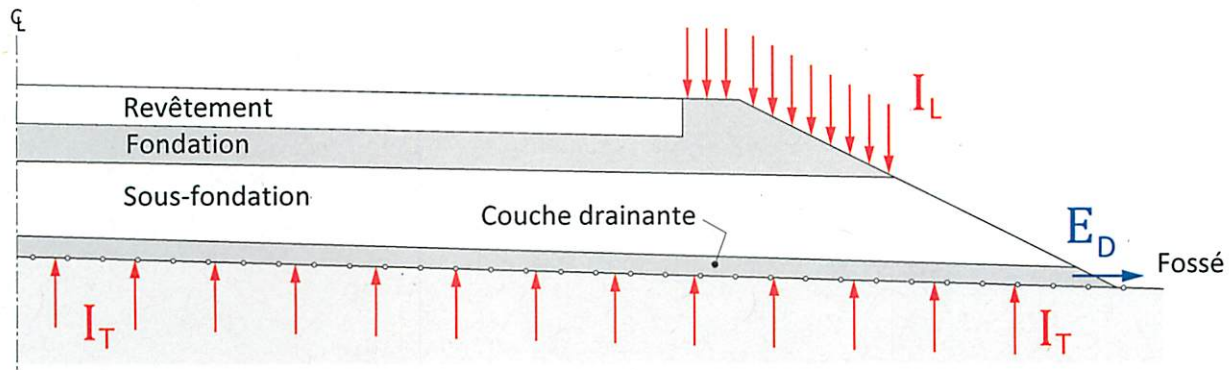


Figure 2.3 Localisation des zones de charge et de décharge – profil en coupe.

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 vient 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 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 reliées à la nature des granulats de fondation 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'égouts en mauvais état.

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 ne peut être évacuée vers le sol d'infrastructure qu'à la condition qu'il 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 retrouve 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 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_D

Dans les cas où le niveau de la nappe phréatique est supérieur à la ligne d'infrastructure 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, recouvrant le sol d'infrastructure immédiatement sous la sous-fondation. Pour être efficace, cette couche doit nécessairement être en communication avec le fossé.

B. 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 2.4 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/heure et qui dure plus d'une journée favorise d'avantage l'infiltration qu'un orage estival intensif 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 et ce pourcentage 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 (et/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 elle varie au cours des saisons.

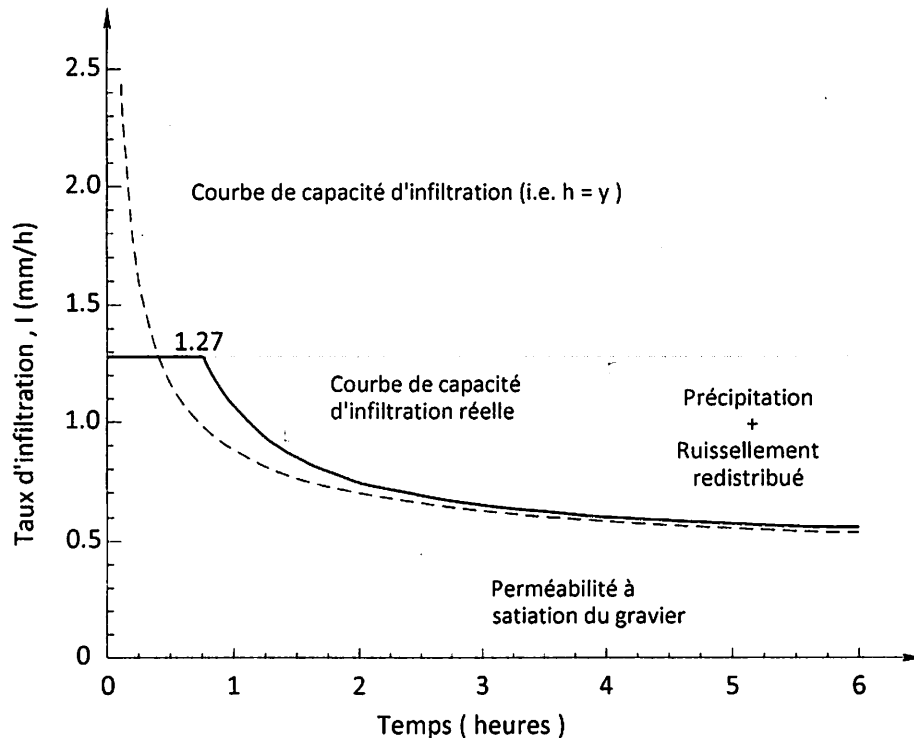


Figure 2.4 Distribution des infiltrations dans un gravier en fonction du temps, après le début d'une précipitation.

C. 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)

1. Sections transversales et conditions aux frontières

On considère une chaussée d'autoroute dont la section transversale est donnée sur la figure 2.5 pour le profil rasant et une chaussée de route régionale sur les figures 2.6 et 2.7 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 EDRS a une épaisseur de 40 mm et le tuyau de drainage à l'infrastructure TDI, un diamètre de 150 mm; tel qu'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 localisé à la bordure extérieure du revêtement et par l'arrondi de talus. La nappe phréatique

- infiltration supplémentaire par une fissure au centre de la voie de roulement
- sols d'infrastructure variables
- couche drainante immédiatement sous le revêtement



- 16

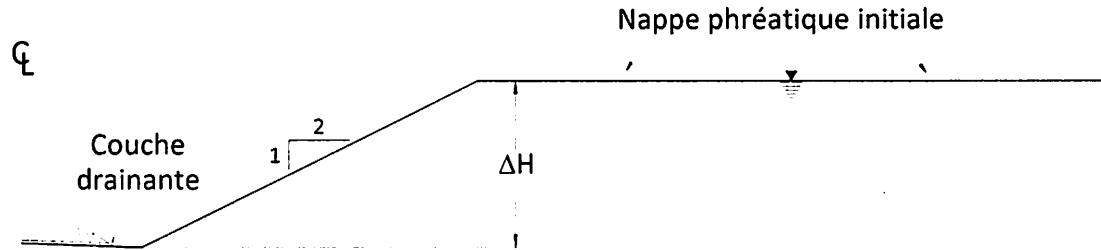


Figure 2.6 Section transversale avec profil en coupe.

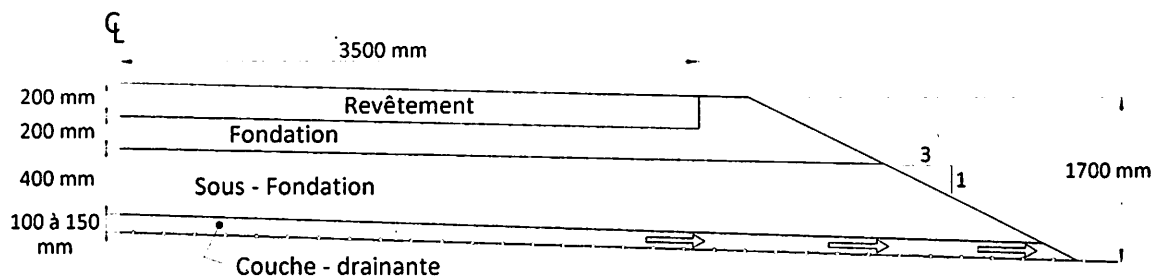


Figure 2.7 Détail de la structure de chaussée régionale avec profil en coupe.

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 donnée d'entrée des conductivités hydrauliques $k(u_w)$ en conditions saturé/non saturé 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 2.8 illustre cette propriété sous forme de graphique de la succion matricielle en fonction de la teneur en eau volumétrique. Ces 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 lorsque l'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. Compte tenu 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 données obtenues d'échantillons en désorption et on a supposé qu'elles étaient représentatives. La CRE est formulée en termes de la 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

$e = 2,71828...$;

i = variable nominale de sommation;

μ = 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, v_i, ω_i sont trois paramètres de forme des différentes courbes;

θ_s = teneur en eau du sol saturé;

$(u_a - u_w)_r$ = succion matricielle correspondant à la teneur en eau résiduelle et

C = facteur de correction :

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

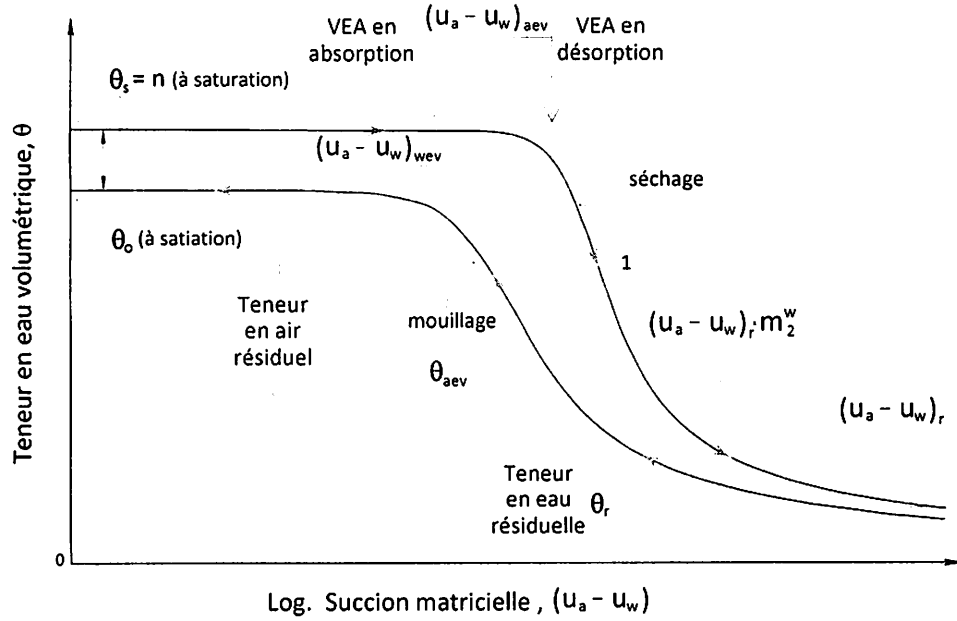


Figure 2.8 Courbes de rétention d'eau.

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

$$k_r((u_a - u_w)) = \frac{k((u_a - u_w))}{k_s} = \frac{\int_{Z=\ln((u_a - u_w)_{aev})}^{\ln(1 \cdot 10^6)} \frac{\theta(e^z) - \theta((u_a - u_w))}{e^z} \cdot \theta'(e^z) \cdot dZ}{\int_{Z=\ln((u_a - u_w)_{aev})}^{\ln(1 \cdot 10^6)} \frac{\theta(e^z) - \theta_s}{e^z} \cdot \theta'(e^z) \cdot dZ} \quad (2.3)$$

où

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

k_s = conductivité hydraulique en condition saturée;

$\theta(e^z)$ provient de l'équation 2.2 à e^z ;

$\theta'(e^z)$ = dérivée de l'équation 2.2 à e^z

Z = variable nominale d'intégration représentant la succion matricielle.

D. Propriétés des sols modélisés

Les figures 2.9 à 2.13 présentent les courbes granulométriques et les FCH des différents matériaux qui ont été étudiés et dont les propriétés sont données dans la littérature.

1. Sols d'infrastructure INF

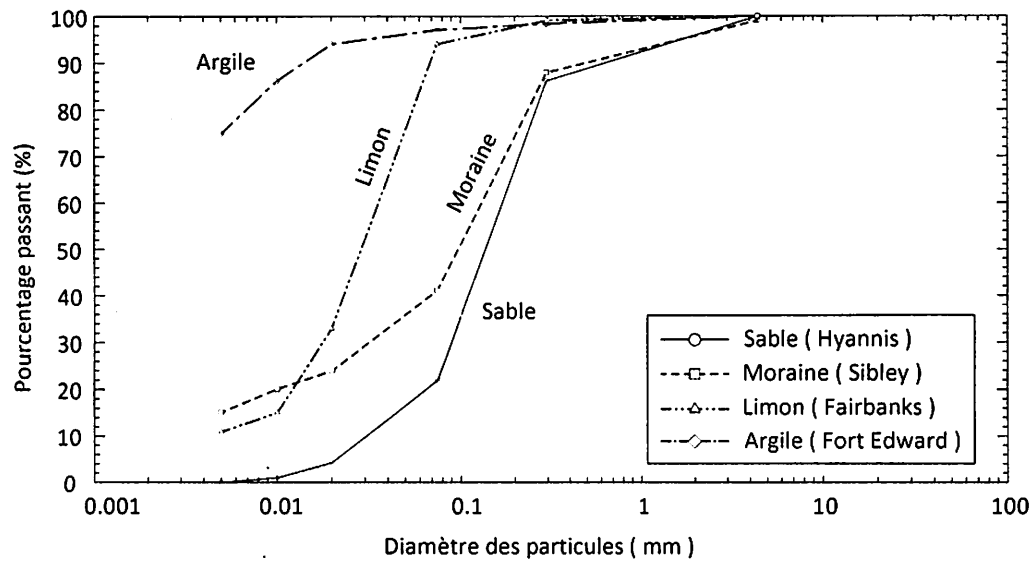


Figure 2.9 Courbes granulométriques des sols d'infrastructure modélisés.

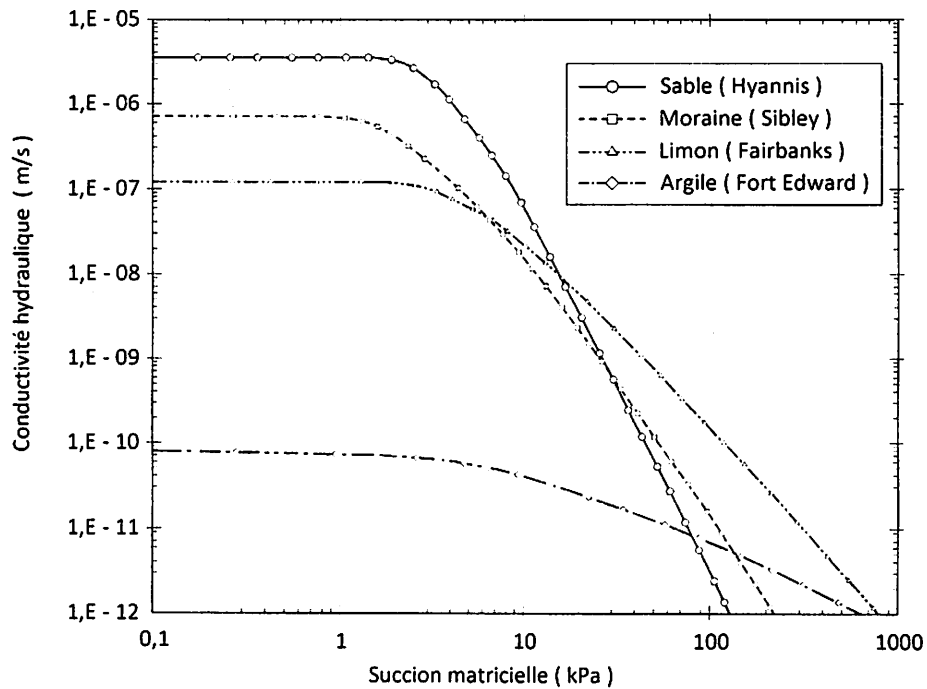


Figure 2.10 Fonctions de conductivité hydraulique FCH des sols d'infrastructure des chaussées modélisés.

2. Granulats de fondation F et de sous-fondation SF

Les figures 2.11 et 2.12 donnent respectivement les courbes granulométriques et les fonctions de conductivité hydraulique des matériaux constituant la structure de chaussée. On a tracé pour fins de

comparaison les fuseaux granulométriques admissibles du MTQ pour les granulats de la structure de chaussée et on constate qu'ils sont compris à l'intérieur du fuseau admissible.

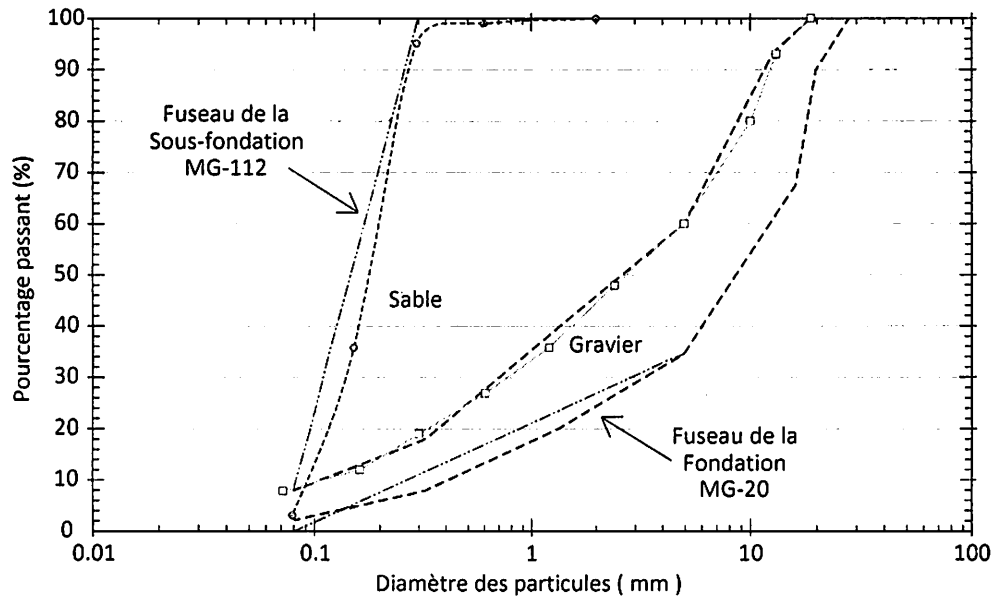


Figure 2.11 Courbes granulométriques des granulats.

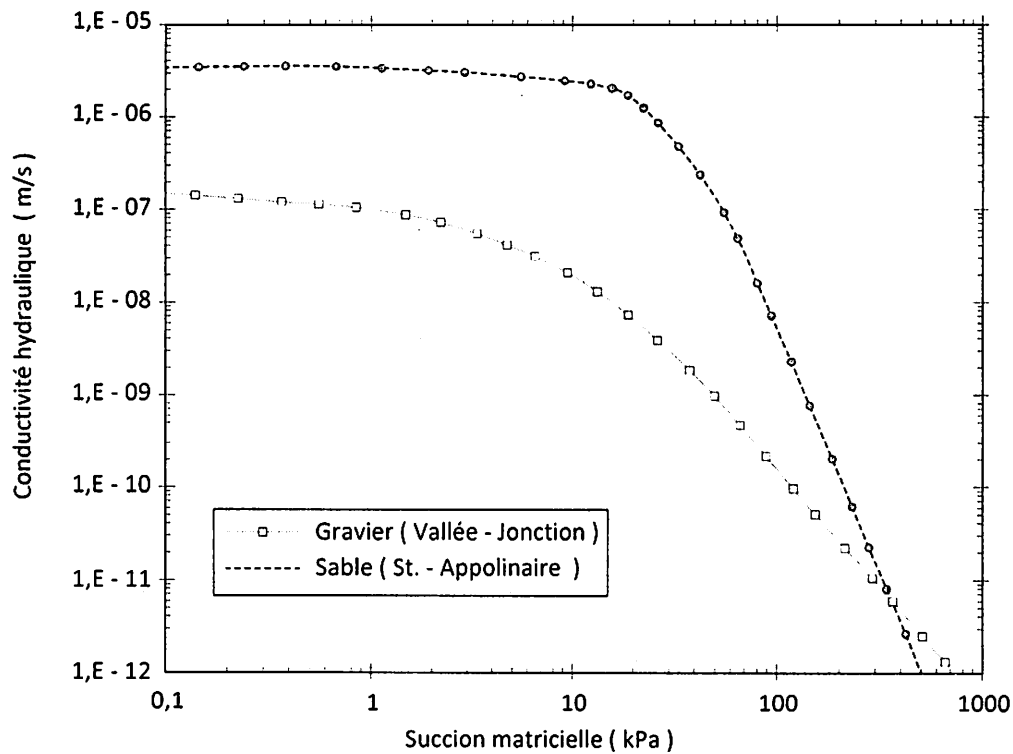


Figure 2.12 Fonctions de conductivité hydraulique FCH des granulats de chaussées modélisées.

3. Couche drainante CD

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).

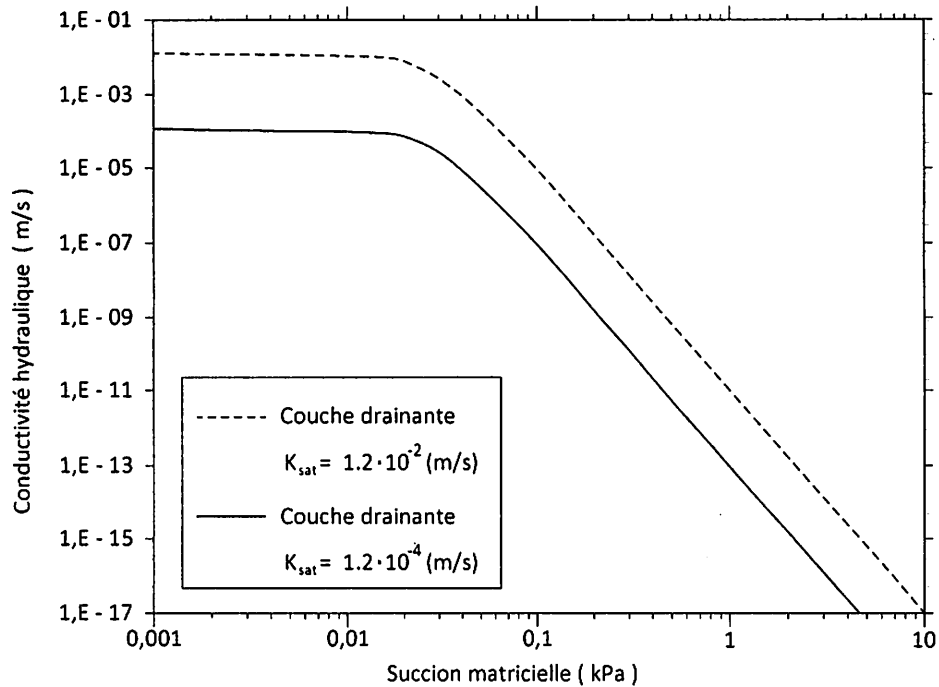


Figure 2.13 Fonctions de conductivité hydraulique FCH de la couche drainante.

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, c'est l'endroit le plus vulnérable sur les plans mécanique et hydraulique souterraine.

III. 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 saturé/non saturé

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, on a un drainage à ciel ouvert, sans épaulement.

A. Profil d'autoroute

Dans la pratique actuelle au MTQ, il existe trois principaux types de systèmes de drainage dans les profils d'autoroute : extension de la sous-fondation (ESF), tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI) et écran drainant en rive de chaussée (EDRC). Ces trois systèmes ont été évalués par Lafleur et Lebeau (1998) en termes d'efficacité hydraulique relative en période estivale. L'article du MTQ (1999) résume les résultats de ces simulations et les figures 3.1 à 3.3 donnent l'allure générale des écoulements à la fin de la précipitation de 0,6 mm/h.

1. Comparaison entre les différents systèmes et présence de fissures

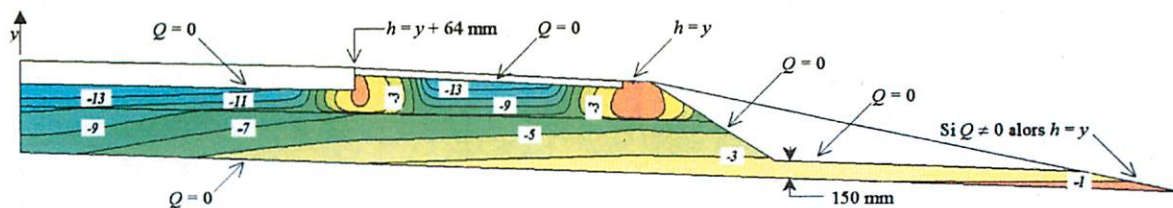


Figure 3.1 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec extension de la sous-fondation (ESF).

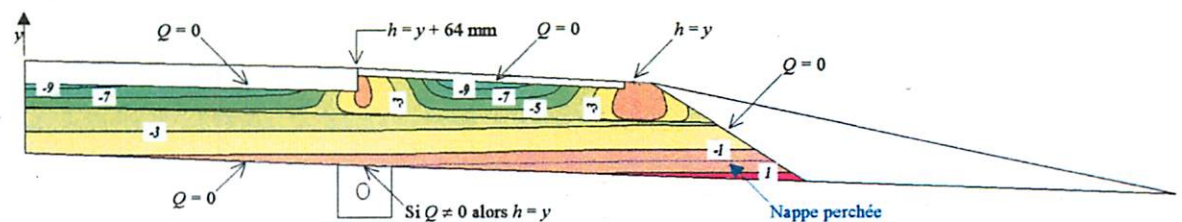


Figure 3.2 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec tuyau de drainage à l'infrastructure (TDI).

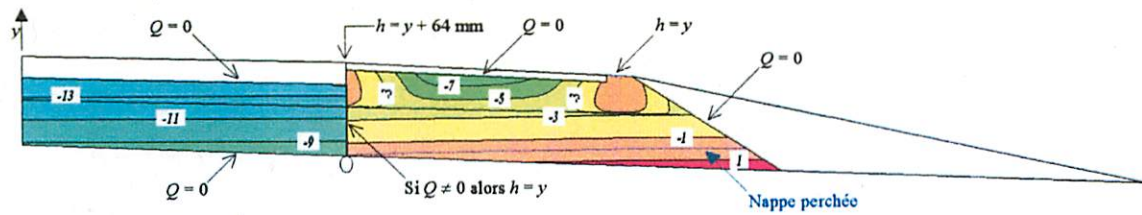


Figure 3.3 Équipotentiels de l'écoulement dans une chaussée avec écran drainant en rive de chaussée (EDRC).

De façon générale en l'absence de fissures dans le revêtement, les pressions interstitielles sous le revêtement demeurent négatives. Les bulbes d'imbibition (zones orange à l'intérieur desquelles les pressions interstitielles sont égales à ou plus grandes que zéro) demeurent de petite dimension et localisées 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 F sous la piste extérieure de roue (PER), les pressions interstitielles demeurent négatives. La figure 3.4 qui représente les profils de S_r , confirme cette observation dans la F avec des valeurs de S_r nettement inférieures à 100%. Dans la sous-fondation SF, on voit sur la figure 3.4a) 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 pas de fissure. Par contre lorsque l'EDRC est placé en ligne d'accotement (LA) ou lorsqu'il se trouve 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.

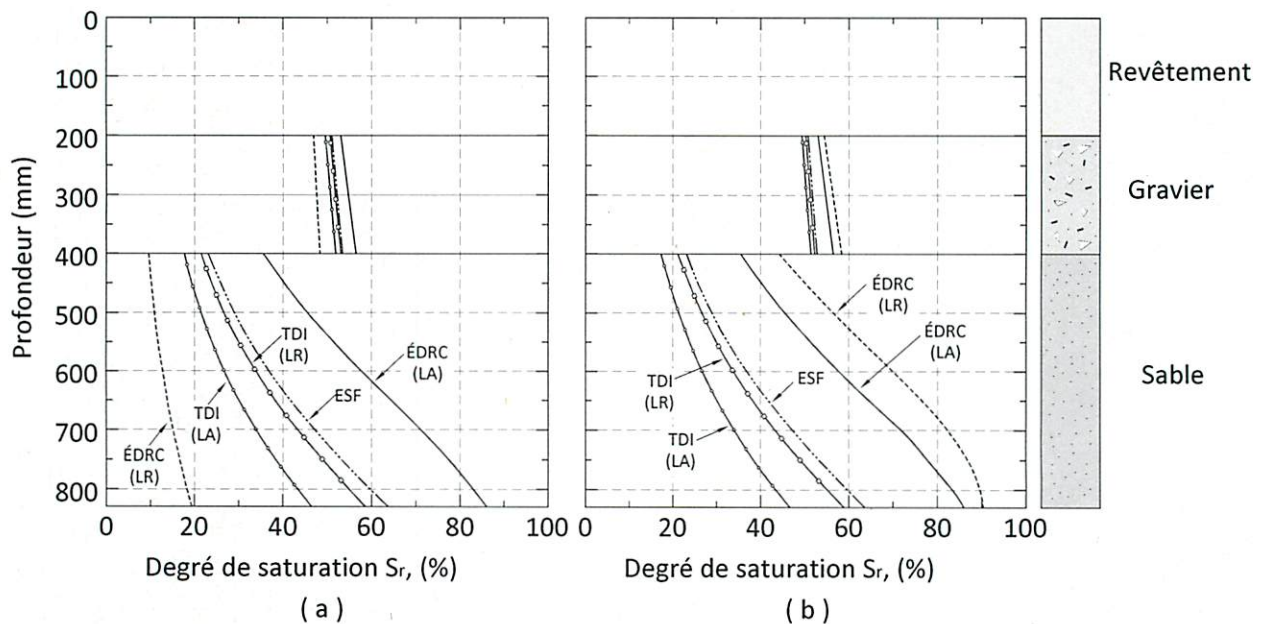


Figure 3.4 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue: a) sans fissure et b) avec une fissure au milieu de la voie de roulement. Chaussée d'autoroute.

Une comparaison du remblai placé immédiatement autour du TDI a fait ressortir une efficacité légèrement supérieure lorsqu'il est constitué de MG-112 capillaire plutôt qu'avec de la pierre nette non capillaire.

2. Position relative du TDI par rapport à la ligne de rive

Lorsque ces systèmes sont implantés à la LR plutôt qu'à la LA, la figure 3.4 b) indique une légère hausse de S_r due au fait que l'élévation du radier du tuyau est légèrement plus basse dans le cas LA.

3. Accotement revêtu ou non

En éloignant le bulbe d'imbibition de la PER, un accotement revêtu se traduit par une diminution de S_r sous la PER. La figure 3.5 présente une comparaison entre les deux cas et on voit une nette augmentation du degré de saturation sous la PER avec l'accotement non revêtu.

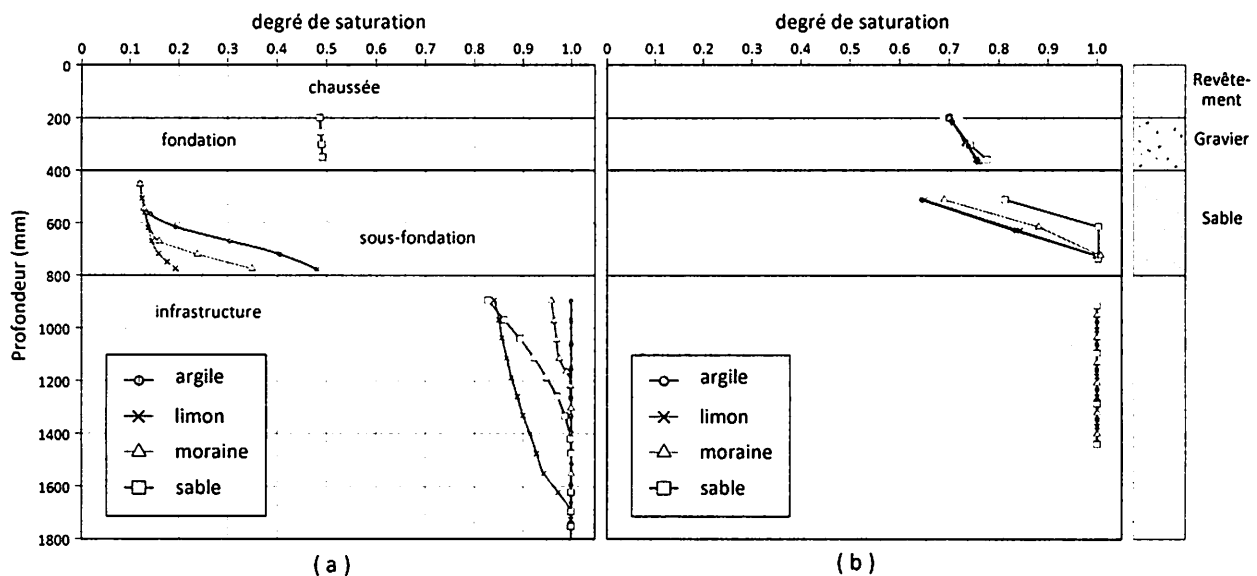


Figure 3.5 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil d'autoroute avec accotement revêtu a) et profil de route régionale avec accotement non revêtu b).

4. Nature des matériaux d'épaulement

Une comparaison a été faite par Lebeau et Lafleur (2002) sur les trois systèmes de drainage (ESF, TDI et EDRC), visant à évaluer l'effet d'utiliser un matériau d'épaulement plus perméable que les granulats de la structure de chaussée. 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.

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. Avec les sols d'infrastructures fines, argile et moraine, on note toutefois une augmentation

de S_r au sein même de ces sols d'infrastructure. Les simulations de Lafleur et Gagné (2007) avec fissure au milieu de la voie de roulement indiquent sur la figure 3.6 que les valeurs de S_r sous la PER dans la F ne sont pas influencées par la nature du sol d'infrastructure et ceci 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 l'INF sont plus élevées avec des sols d'infrastructure argileux qu'avec des sols sableux.

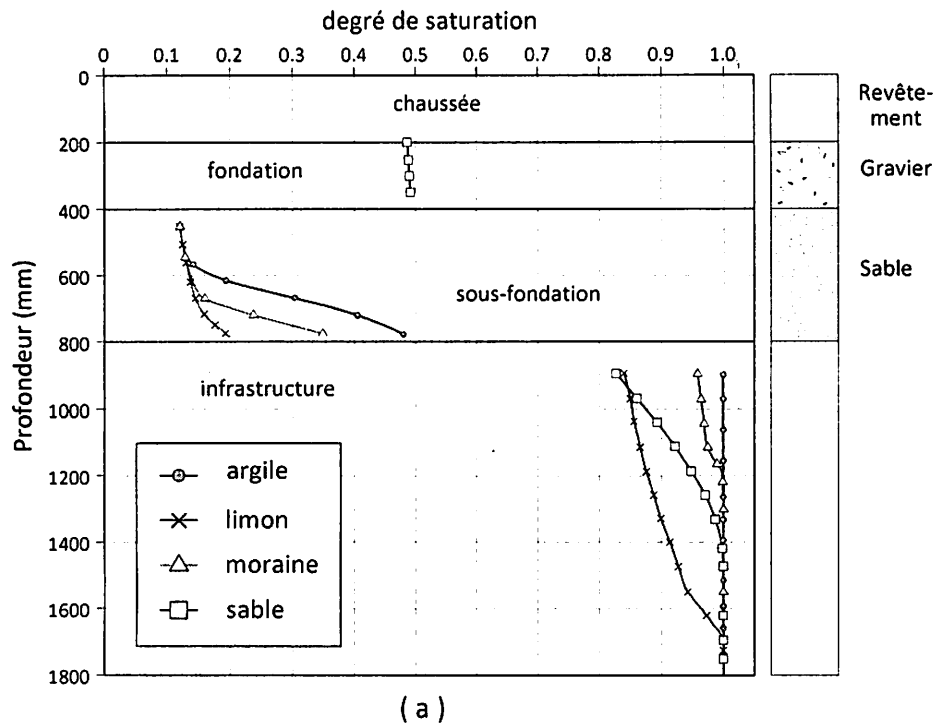


Figure 3.6 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée régionale sans couche drainante.

6. Couche drainante immédiatement sous le revêtement

Les résultats de la figure 3.7 mettent en évidence avec tous les sols d'infrastructure que la CD augmente de façon appréciable les valeurs de S_r dans la F qui passe de 50% sans CD à plus de 75% avec CD immédiatement sous le revêtement. Avec leur grande perméabilité, les CD permettent une meilleure diffusion dans le granulat de fondation des eaux qui se sont infiltrées par une fissure.

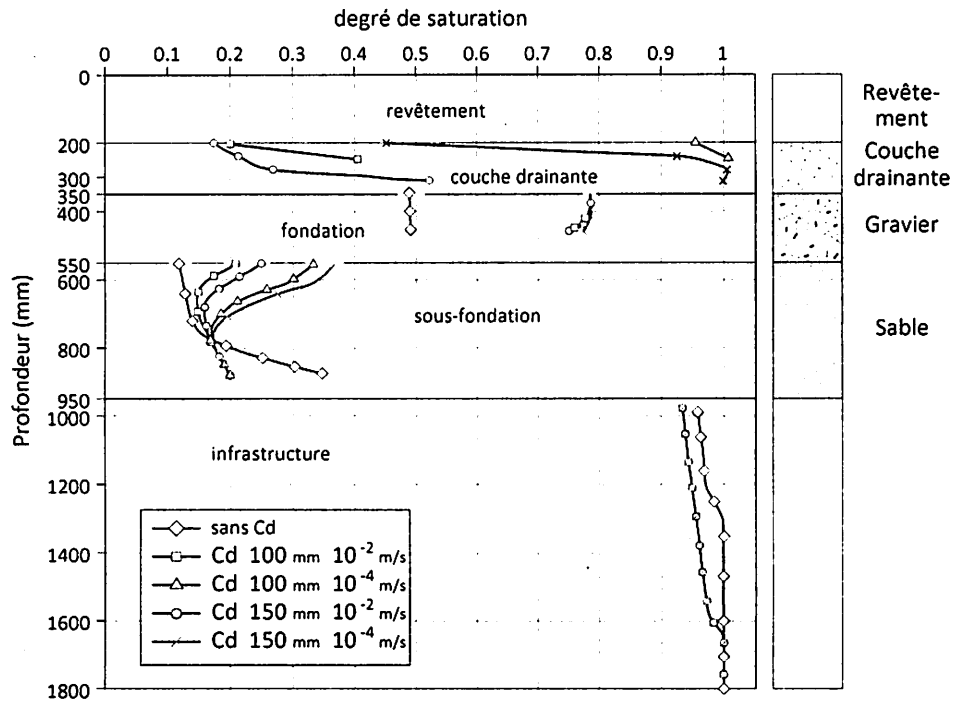


Figure 3.7 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, avec fissure au milieu de la voie de roulement. Profil rasant, chaussée d'autoroute avec couche drainante immédiatement sous le revêtement.

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, l'arrondi de talus et par des joints transversaux espacés de 5 mètres. Sur la figure 3.8, la ligne blanche indique la nappe phréatique à la fin de la précipitation et 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 relié à la longueur et l'angle de la pente longitudinale, ainsi que de la présence ou non de joints transversaux qui favorisent l'infiltration.

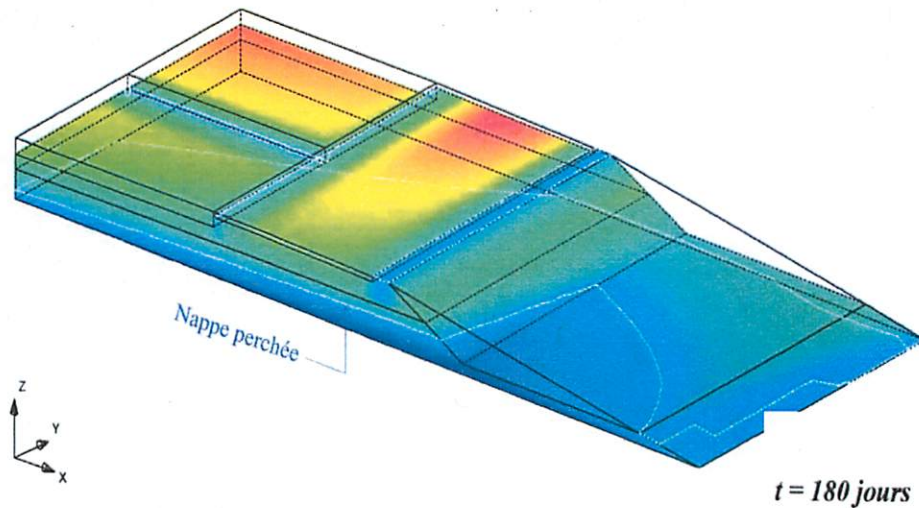


Figure 3.8 Écoulement tridimensionnel dans une extension de la sous-fondation. Chaussée d'autoroute.

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

La même étude de Lebeau et Lafleur (2002) a comporté une modélisation numérique des régimes hydraulique et thermique 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 3.9 présente la distribution des teneurs en eau durant le dégel, le 7 avril, soit 219 jours après le 1^{er} septembre, soit le début de la période de simulation. La ligne blanche qui sépare les zones bleue et verte 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 que sous la voie de roulement du front de dégel dans les épaulements. Cette forme concave peut être à l'origine de l'emprisonnement d'eau dans la structure de chaussée en période de dégel.

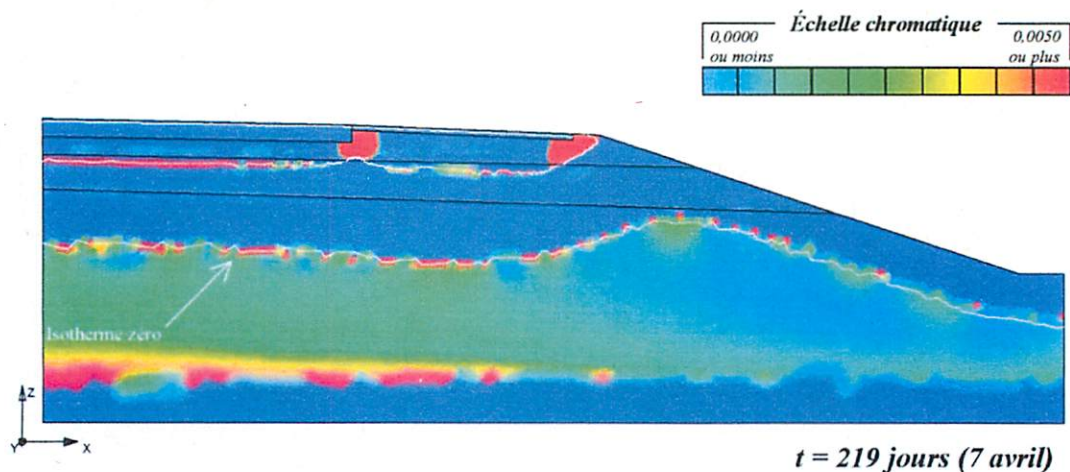


Figure 3.9 Distribution des teneurs en eau durant le dégel. Chaussée de route régionale.

B. Profils de route régionale

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

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

La figure 3.10 présente une comparaison entre les valeurs de S_r avec des hauteurs de déblai ΔH de 2 et de 10 mètres 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 mètres 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 la valeur moyenne passe de 70 à 88% lorsque ΔH passe de 2 à 10 mètres. Il en ressort que la mise en place d'une CD à la ligne d'infrastructure dans les profils en coupe avec les sols perméables est nécessaire à cause de l'augmentation notable de S_r dans la SF.

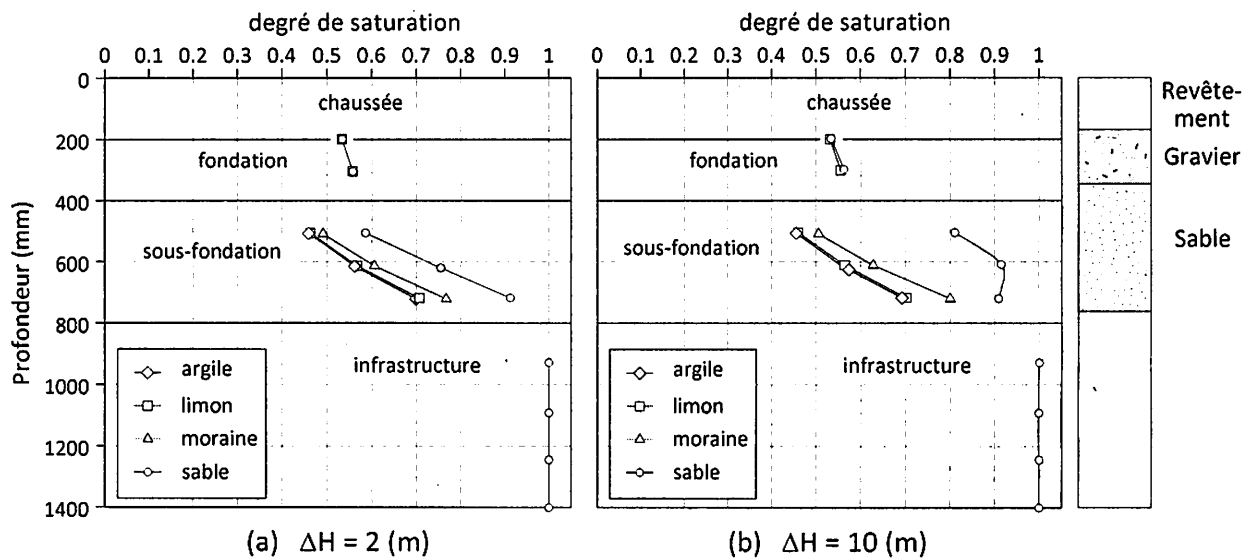


Figure 3.10 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure. Profil en coupe sans couche drainante.

2.  paisseur et perméabilité de la couche drainante

La figure 3.11 donne une comparaison qui 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.

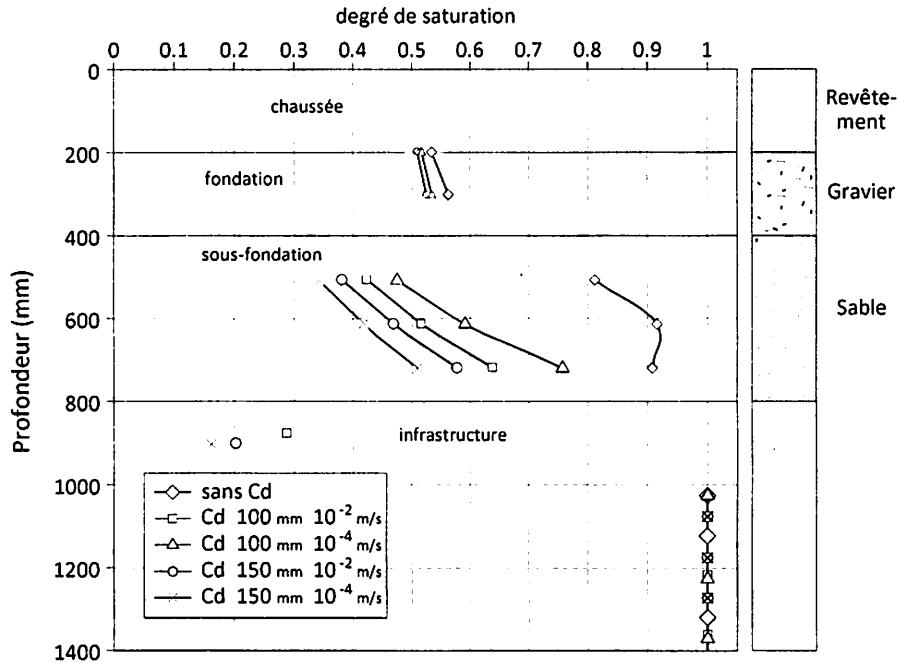


Figure 3.11 Distribution des degrés de saturation sous la piste extérieure de roue, sans fissure au milieu de la voie de roulement. Profil en coupe, sable d'infrastructure avec couches drainantes d'épaisseurs et de perméabilités différentes, $\Delta H = 10$ m.

3. Présence de fissure dans la voie de roulement

Le tableau 3.1 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 3.1 Degré de saturation moyen sous la piste extérieure de roue dans un sable d'infrastructure. Profil en coupe

a) fondation

$\Delta H = 2$ m.	$\Delta H = 5$ m.	$\Delta H = 10$ m.
sans CDI, sans fissure		
55	55	53
sans CDI, avec fissure		
73	75	81
avec CDI 150 – 10^{-2} , sans fissure		
53		
avec CDI, 150 – 10^{-2} avec fissure		
68		

b) sous-fondation

$\Delta H = 2$ m.	$\Delta H = 5$ m.	$\Delta H = 10$ m.
sans CDI, sans fissure		
88		
sans CDI, avec fissure		
100		
avec CDI 150 – 10^{-2} , sans fissure		
47		
avec CDI 150 – 10^{-2} , avec fissure		
58		

C. Limitations 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 qu'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.

IV. Facteurs intervenant dans la conception d'un système

Suite aux simulations et aux observations expérimentales, les facteurs à considérer pour le choix d'un système de drainage sont énumérés dans le tableau 4.1 par ordre d'importance décroissante. Les sections suivantes décrivent la façon dont ils interviennent dans le dimensionnement d'une chaussée nouvelle. La section E traite de facteurs supplémentaires à considérer : la fissuration des revêtements existants, la pénétration du gel et le remplissage autour des TDI.

Tableau 4.1 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 et perméabilité des matériaux d'apport

A. 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 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), nature du sol, présence de végétation, stratigraphie. La figure 4.1 (Lafleur et coll., 1987) présente les résultats de mesures faites dans une argile fissurée dans des pentes, à l'aide de piézomètres à 3 mètres de profondeur. Ces piézomètres permettaient l'enregistrement de la position maximale de la nappe phréatique. On constate qu'au printemps et à l'automne, la nappe vient à quelques centimètres de la surface de l'argile pour des périodes plus ou moins longues alors que durant l'été, la nappe s'abaisse de plus de 3 mètres au ruisseau Leamy et de 1,5 à Saint-Ambroise, cette amplitude étant reliée à l'épaisseur de 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 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.

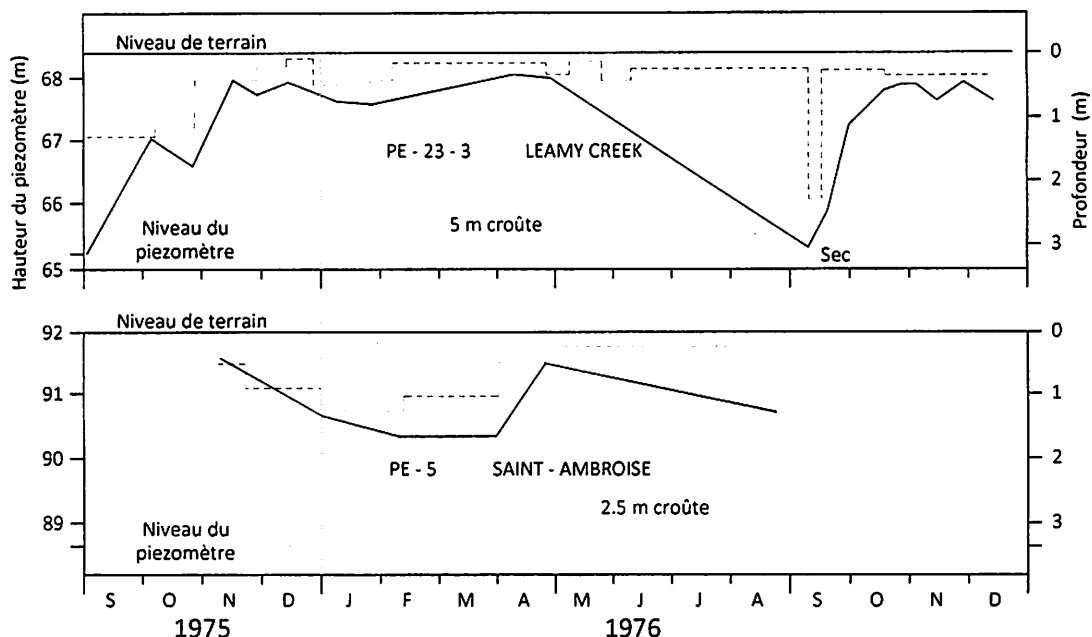


Figure 4.1 Fluctuations de la nappe phréatique en fonction des saisons (Lafleur et coll., 1987).

Si la nappe phréatique est localisée à plus de 2 mètres 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.

B. Topographie du profil

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 lorsqu'on était en présence de coupes de plus de 2 mètres avec les matériaux plus perméables comme les sables. Dans les autres matériaux simulés (limon, moraine et argile), la sous-fondation peut 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 l'interpénétration de particules fines du sol d'infrastructure dans le système de drainage.

La figure 4.2 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 fait 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 que la nappe se situait à plus de 2 mètres sous le revêtement en tout temps de l'année après leur mise en place.

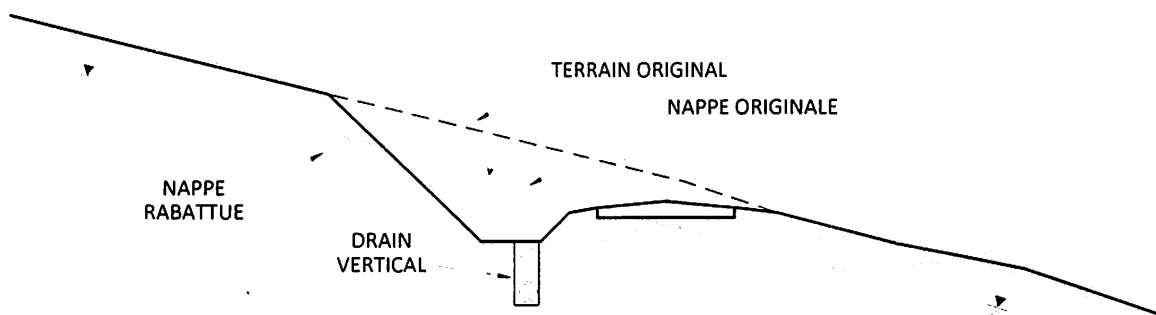


Figure 4.2 Profil transversal de terrain en pente.

2. Profil longitudinal

Les simulations pour 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, et de
- la présence de joints transversaux

De plus, comme l'indique la figure 4.3, il peut se trouver sous le profil de la route, un aquifère en charge qui va nécessiter la mise en place d'une couche drainante à l'infrastructure et de drains pour soulager ces surpressions en cours de construction; ces systèmes sont conçus en fonction des débits anticipés de l'aquifère captif.

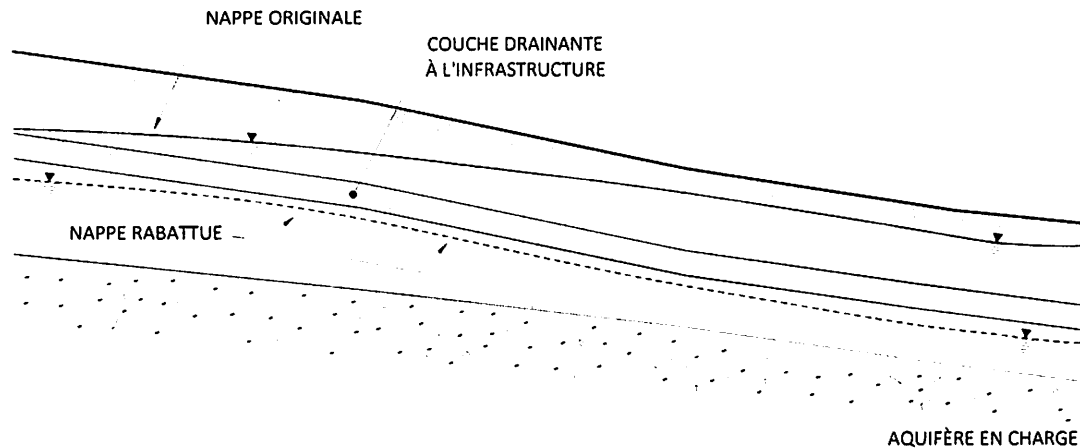


Figure 4.3 Profil longitudinal de terrain en pente.

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 retrouver dans la structure de chaussée.

C. Nature des sols d'infrastructure

Ce facteur intervient directement sur le dimensionnement des éléments constituant le système de drainage et la perméabilité des sols est directement reliée 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.

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 qu'on retrouve 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-jacent à l'argile et souvent en surface, on a une moraine plus ou moins argileuse souvent gélive selon le pourcentage de fines qu'elle contient. On retrouve 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.

2. Stratification et variabilité naturelle

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

3. Pierre nette, roc dynamité

Il arrive parfois que le remblai de classe B soit un produit de dynamitage. MTQ (2013a) stipule que la grosseur maximale des pierres ne doit pas excéder 1 m et 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 l'interpénétration 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.

D. Nature des matériaux d'apport et propriétés hydrauliques

1. Granulats de sous-fondation et de fondation

a) 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 sous-fondation (MG-112) donné sur la figure 4.4 est très large, de telle façon que l'on puisse rencontrer des sables uniformes, des graviers ou des mélanges bien étalés. La fondation MG-20 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 sur 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 illustrés sur la figure 4.4, ils s'appliquent au matériau obtenu après sa mise en place et compactage.

L'épaisseur totale de la structure de chaussée est souvent gouvernée pas les impératifs de contrôle des soulèvements au gel, ce qui mène en général à une épaisseur totale de plus de 1 mètre. 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.

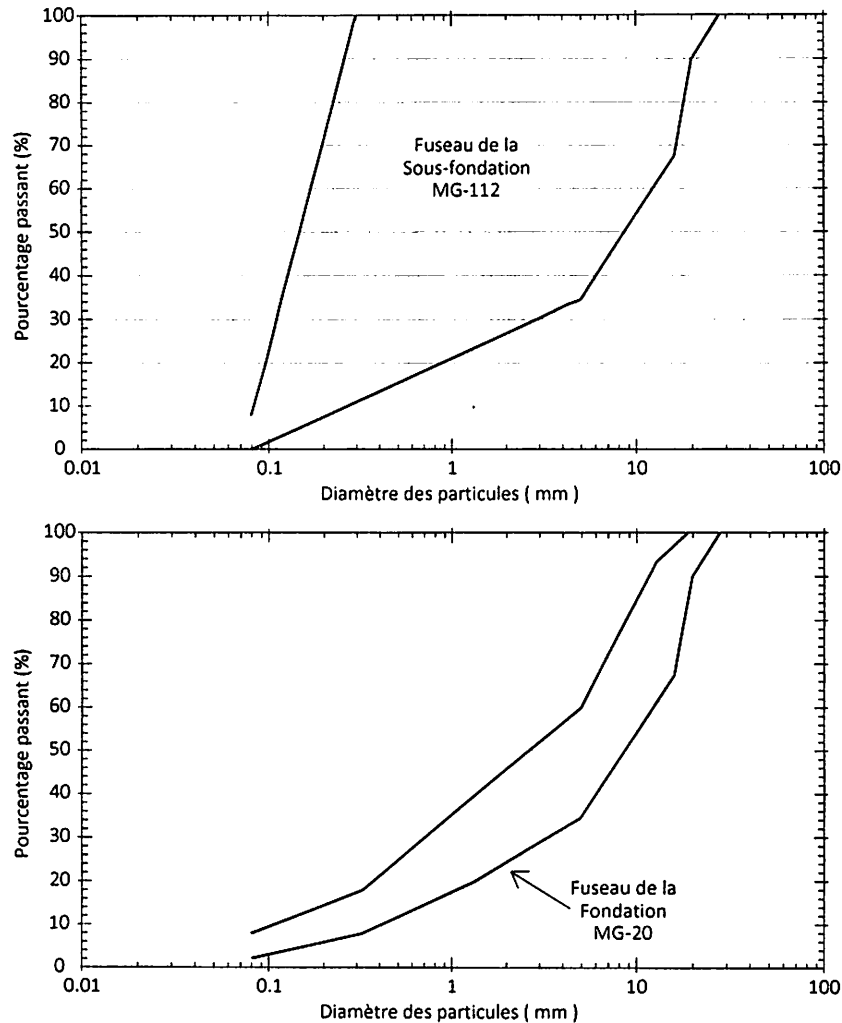


Figure 4.4 Fuseaux granulométriques admissibles MTQ (2013a).

b) conductivité hydraulique en conditions non saturées

Les matériaux constituant 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%. Tel qu'indiqué sur 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.

En parallèle avec les études présentées dans ce rapport, Stormont & Zhou (2005) ont fait 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. Ceci vient appuyer les résultats présentés dans ce rapport à la section A du chapitre III sur le remplissage autour des TDI.

c) impact de la fraction argileuse sur la perméabilité,

La figure 4.5 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 que non seulement le pourcentage de fines influence la perméabilité mais 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.

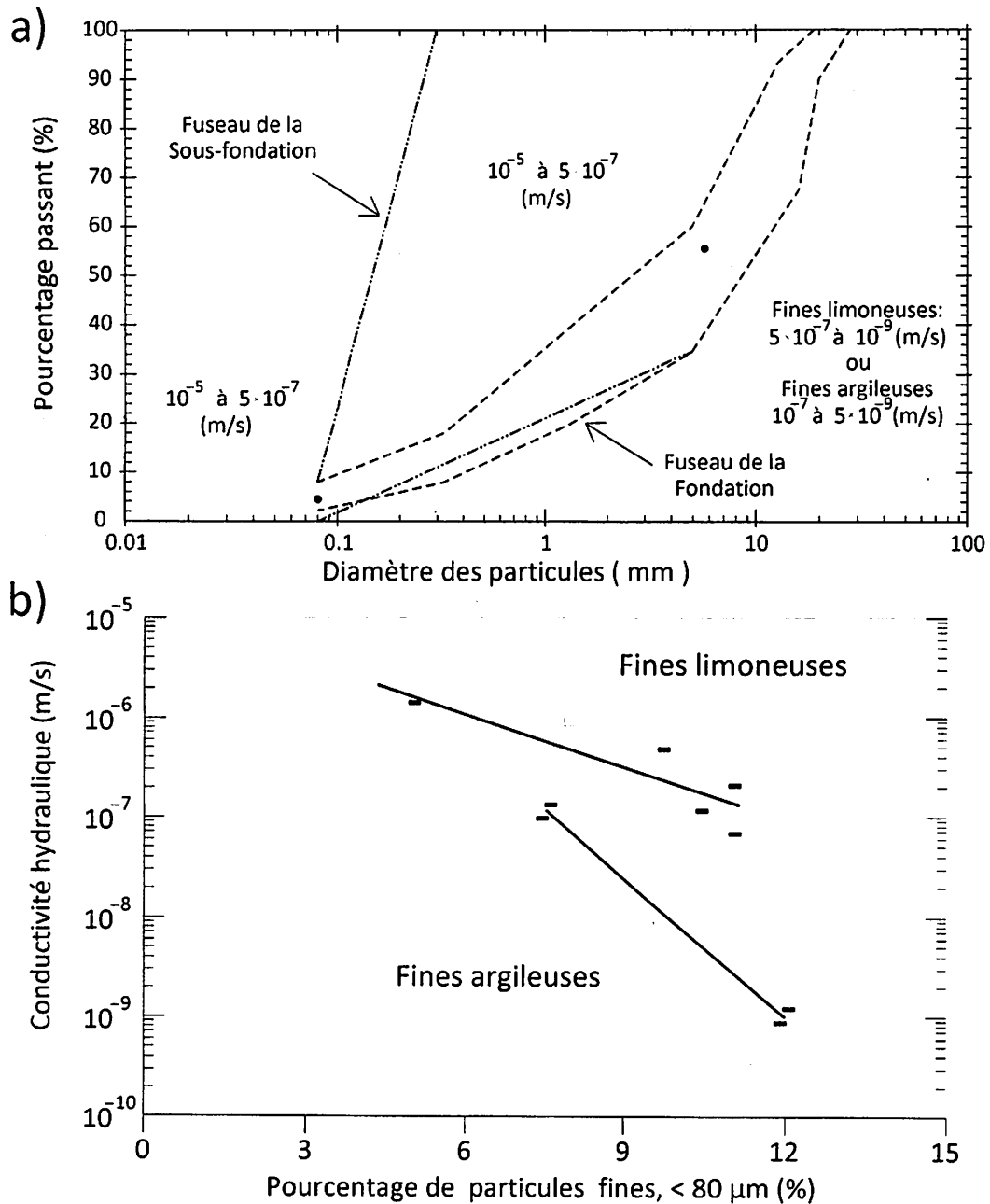


Figure 4.5 Influence des particules fines sur la perméabilité des granulats.

d) 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 granulats de la structure de chaussée, les particules plus fines peuvent être susceptible de se déplacer parmi les plus grosses sous l'effet d'un écoulement d'eau. La figure 4.6 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 no. 1 dans l'exemple alors que pour le sol no.2, la courbe de forme se situe dans la zone stable pour $F < 20\%$. Les sols avec courbe granulométriques concaves vers le haut comme le sol no.1 sont souvent des sols potentiellement instables ou suffosifs, comme on les a désignés.

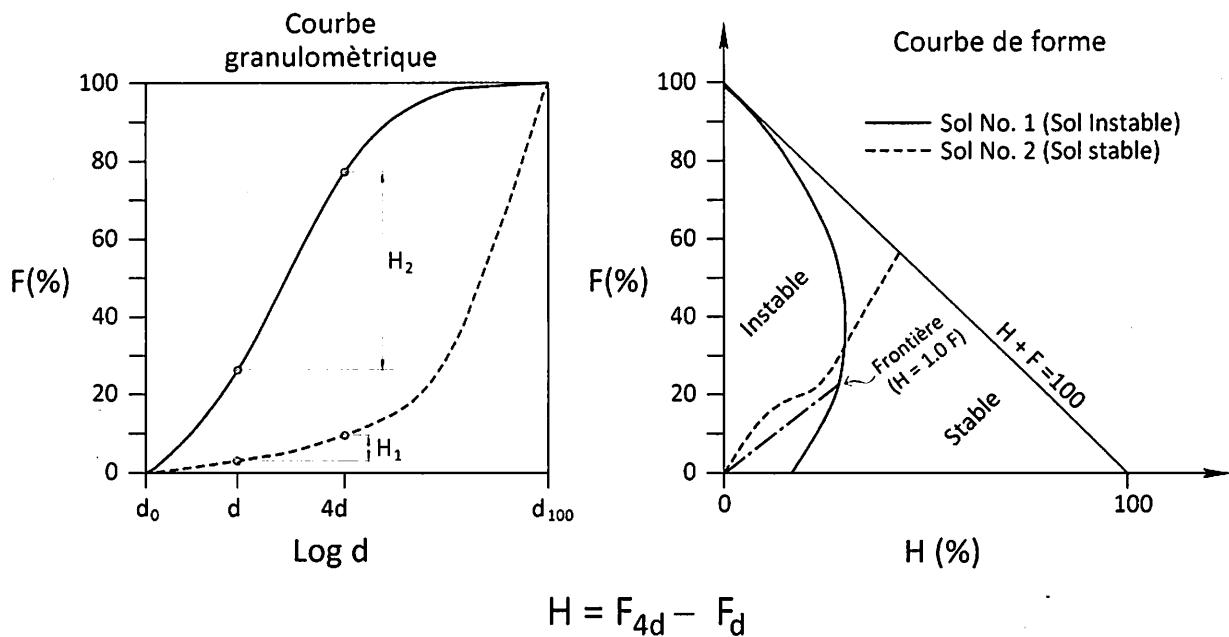


Figure 4.6 Méthode de Kenney et Lau pour évaluer la stabilité interne des particules.

Lafleur et Savard (2004) ont effectué des essais de stabilité interne sur 7 granulats dont les courbes granulométriques se situaient à l'intérieur du fuseau acceptable du MTQ. Les résultats ont confirmé la validité de l'approche de Kenney et Lau (1985) et ils ont pu 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.

e) 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.

2. Granulats stabilisés ou non au bitume ou au ciment (couches drainantes à l'infra)

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

Les couches drainante au niveau de l'infrastructure CDI sont constituées d'un granulat ouvert et grossier (pierre nette ou enrochement) idéalement enrobés d'une couche filtrante. La figure 4.7 illustre l'utilisation d'enrochement dans un déblai important de sable silteux soumis à de fortes pressions interstitielles.



Figure 4.7 Enrochement utilisé sur la route #175 dans un déblai de sable silteux.

De façon générale, il est impératif d'avoir un granulat de sous-fondation plus perméable que le granulat de fondation afin de 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 comportant de grands vides.

E. Autres considérations

1. Fissuration sur chaussée existante

Les simulations présentées au chapitre III ont mis en relief l'importance capitale de la fissuration des revêtements sur les infiltrations dans la structure de chaussée. Il existe des normes du MTQ pour leur reconstruction en fonction de la fissuration. 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 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 MTQ.

Le choix des routes et des fissures à sceller est décrit dans un bulletin technique (info DLC, 2003) et un guide a été publié sur le sujet (MTQ, 2004). Les routes visées sont celles dont le taux de fissuration se situe entre 500 et 3000 m/km, sans dépasser 1000 m/km dans les pistes de roues. 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.

2. Pénétration du gel

Tel que discuté 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 soit compromise.

3. Remplissage autour des conduites

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

V. Utilisation des géosynthétiques en drainage

A. description des produits disponibles

Les géosynthétiques sont utilisés lorsque 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 alternatifs comme les géosynthétiques. Ces sont des textiles techniques essentiellement composés de polypropylène PP ou de polyester PE pour la majorité d'entre eux, et dans certain cas de polyéthylène PET.

L'utilisation des matériaux géosynthétiques présente plusieurs avantages, que ce soit au niveau :

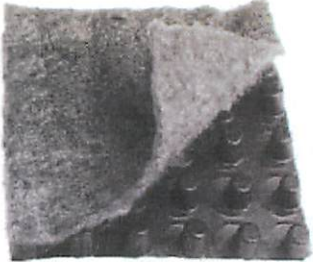
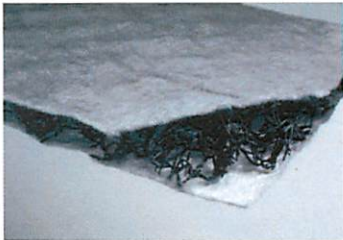
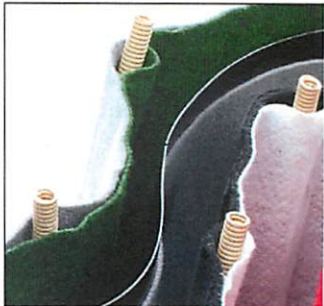
- de la facilité de mise en œuvre,
- de la qualité maîtrisée et de l'homogénéité de la performance des produits,
- du respect de l'environnement et de sa contribution au développement durable,
- et dans de nombreux cas, des coûts.

Les géocomposites sont des produits composés de plusieurs types de géotextiles, remplissant chacun une fonction spécifique. Parmi les géocomposites, on retrouve la plupart des produits de drainage bicouche (séparation – drainage), et dans certains cas tricouche (séparation – renforcement – drainage).

Plusieurs solutions s'offrent au drainage vertical, que ce soit par l'utilisation de structure alvéolaire, de géocomposite de drainage tricouche ou de matelas à filaments. Par contre, le drainage horizontal est plus sévère en termes 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 3 semaines, selon la distance à parcourir et la perméabilité des milieux rencontrés, pour passer du centre de la route vers le 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 conserver au produit 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 disponibles sur le marché. Chacune d'elle répond à des conditions spécifiques d'utilisation. Le tableau 5.1 présente la plupart d'entre elles.

Tableau 5.1 Gamme des géosynthétiques disponibles en drainage de chaussées.

Type et structure	Description	Utilisation	Schémas
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 filament grossier	Âme drainante de 7 à 20 mm d'épaisseur constituée de filaments grossiers de PP et enrobés d'un géotextile séparateur.	Écran vertical	
Géocomposite tricouche	Âme drainante de 5 mm d'épaisseur en PP ou 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 mini-drains	Âme drainante de 5 mm d'épaisseur en PP ou PE recouverte d'un géotextile séparateur sur les deux faces. La structure est composée d'un réseau de mini-drain de diamètre de 16 à 20 mm placés à intervalle régulier	Drainage horizontal Masque drainant	

B. Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires

Le tableau 5.2 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 leur utilisation.

Tableau 5.2 : Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires.

	Matériaux granulaires	Géosynthétiques
Points communs		
<u>Risque de colmatage par :</u>		
- activité bactérienne aérobie (colmatage ferrique) - précipitation des sels de déglacage, - particules fines des sols et granulats encaissants, - formation de glace dans la zone de pénétration du gel.		
Points de différenciation		
<u>Propriétés mécaniques et hydrauliques :</u>		
Épaisseur	Élevée (> à 150 mm)	Faible (< à 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
<u>Performance à long terme et durabilité :</u>		
Durabilité	Complètement inerte	Sont altérés par les rayons ultra-violets
Risque d'endommagement	Aucun	Sujets au poinçonnement, à la déchirure

<u>Maîtrise de la qualité des matériaux :</u>		
Uniformité	<u>Gravier</u> : Granulométries variables selon le banc d'emprunt. <u>Pierre concassée</u> : Propriétés contrôlées en usine, stables dans le temps.	Propriétés contrôlées en usine, stables dans le temps
<u>Facilité de mise œuvre et coût :</u>		
Mise en place	Doit éviter la contamination par le sol encaissant, nécessite 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, quelque que soit la région du projet
<u>Impact environnemental :</u>		
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 conventionnels.

C. 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.

1. Perméabilité sous compression – résistance à la compression.

Des essais de perméabilité ont été effectués en appliquant différents niveaux de contraintes de confinement sur l'échantillon. Le graphique de la figure 5.1 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 gardent leur propriétés hydrauliques quelque soit la charge appliquée au dessus), certains géosynthétiques se compriment sous l'effet de la charge et leur porosité diminuant, la capacité drainante diminue de la même manière. 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 (10-50 kPa). Il est donc recommandé de dimensionner le drain en fonction de la valeur de perméabilité sous contrainte.

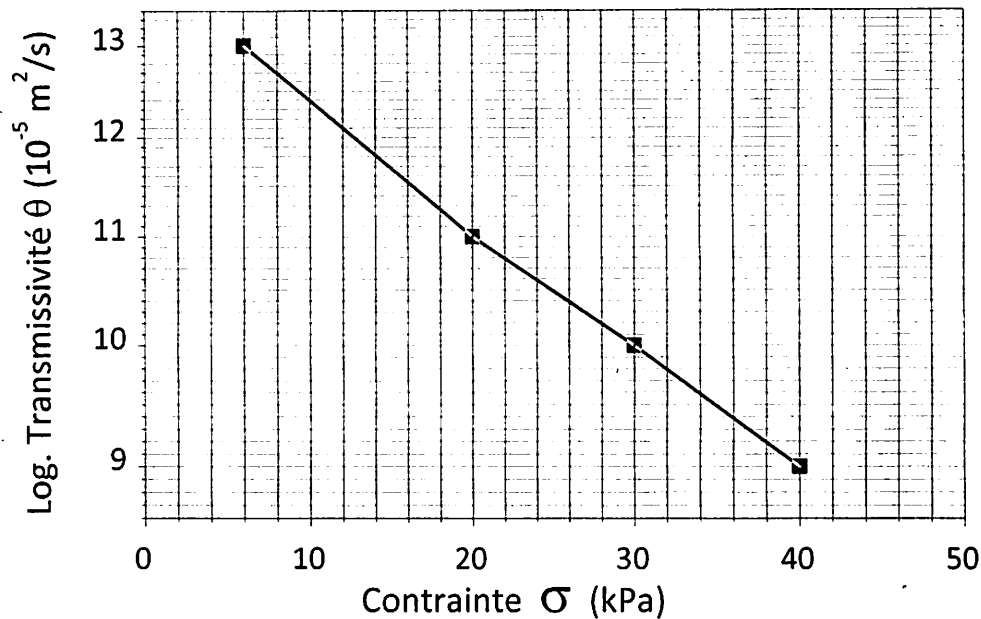


Figure 5.1 Variation de la transmissivité d'un géotextile non tissé en fonction de différentes contraintes de compression (Lafleur 1998).

D'autres essais de performance hydraulique ont été réalisés en comparant des géocomposites avec mini-drains et des matériaux usuels. Le tableau 5.3 présente les résultats obtenus.

Tableau 5.3 : Comparaison des transmissivités de géocomposites de drainage avec des matériaux granulaires de 150 mm d'épaisseur (en m^2/s).

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

On constate que les géocomposites avec mini drains 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 elle est diminuée par un facteur de 7 lorsque la contrainte de compression passe de 20 kPa à 200 kPa.

2. Résistance à la déchirure

Pour s'assurer de l'intégrité des nappes géotextiles lors de leur mise en place, on s'assure que les géosynthétiques ont une résistance suffisante à la traction, au poinçonnement et à la déchirure. On retrouve dans MTQ (2012) des directives concernant la résistance des géotextiles dans différentes applications.

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, la variation de sa performance hydraulique. 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 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 moins de $1200^{\circ}\text{C-jour}$:

- le colmatage des géocomposites tricouche par la glace, en drainage vertical à l'intérieur d'un écran de rive, est improbable,
- dans les couches drainantes horizontales, on a observé des obstructions après 21 jours à faibles débits. Il est cependant improbable qu'on rencontre ces conditions sur le terrain, une alimentation en eau ne pouvant se produire sur une période aussi longue en hiver.

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. 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 $150\ \mu\text{m}$. Cette ouverture convient à des matériaux de fondation et des sols d'infrastructure plus gros que les moraines. Si des géotextiles sont en contact direct avec l'argile sensible, les risques de colmatage du drain sont très élevés et il convient

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

VI. Éléments de conception

A. 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 localisé 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 localisé 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 du PET (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.

B. 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. Leur dimension 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 des diamètres variant de 150 à 200 mm.

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

- 1 : géocomposite avec noyau de filaments grossiers en polypropylène, 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 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 figure 6.1) varient énormément avec les saisons. Ainsi les débits captés totaux maximum ($0,30 < Q_{max} < 0,64$ 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 et de 17 l/s pour le tuyau de 150 mm). Toutefois à cause de la facilité de pose et d'entretien, de même que des risques de colmatage, il est préférable de les surdimensionner afin qu'ils ne coulent pas en charge.

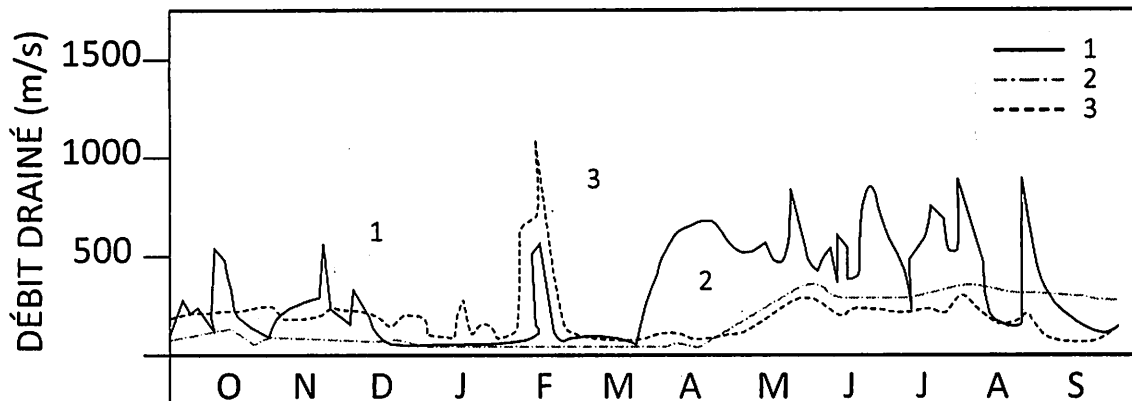


Figure 6.1 Débits d'eau recueillis dans les systèmes de drainage de Saint-Donat (Racette et Lafleur, 1993).

C. Pente longitudinale du drain

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

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

Les normes du MTQ (2013c) indiquent que des pentes minimales de 2% (et 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 fait que l'assiette de la route deviendrait une cuvette favorisant l'accumulation d'eau. On doit aussi s'assurer d'éviter la formation d'ornières sur la ligne d'infrastructure lors de la construction, qui pourraient nuire à l'écoulement de l'eau vers les côtés.

La figure 6.2 illustre 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'extension de la sous-fondation doit être faite à la ligne d'infrastructure jusqu'au drain ou fossé dont la largeur minimale est de 1 mètre.

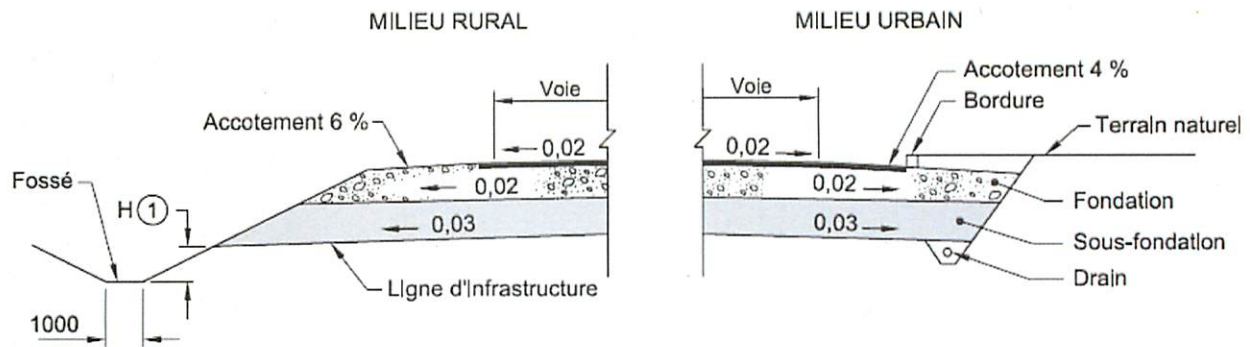


Figure 6.2 Pentés minimales des interfaces (MTQ, 2013c).

E. Position des exutoires

L'espacement des exutoires est basé sur des critères hydrauliques pour éviter que les conduites ne coulent en charge. Leur espacement dépend de la pente du terrain. Une sortie pour les drains vers les fossés doit être prévue à tous les 200 mètres au maximum pour faciliter le récupération des tuyaux.

La figure 6.3 illustre une saignée faite dans l'épaulement d'une autoroute pour permettre le drainage de la chaussée. L'espacement de ces saignées sur des chaussées existantes doit être suffisamment rapproché compte tenu de la profondeur des fossés et de la perméabilité des granulats de la structure de chaussée.



Figure 6.3 Saignée sur autoroute existante sans système de drainage, autoroute #15.

F. 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 suite à l'écoulement de l'eau souterraine, il peut se produire une interpénétration de particules. Pour éviter ce phénomène, les matériaux doivent rencontrer 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).

1. Rétention

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

- pour les filtres géosynthétiques

O_f = valeur FOS 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 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 $d_i = d_G$

pour les sols à granulométrie discontinue, où d_G est le diamètre minimum de la discontinuité

La figure 6.4 donne des exemples de ces courbes granulométriques et de diamètres indicatifs.

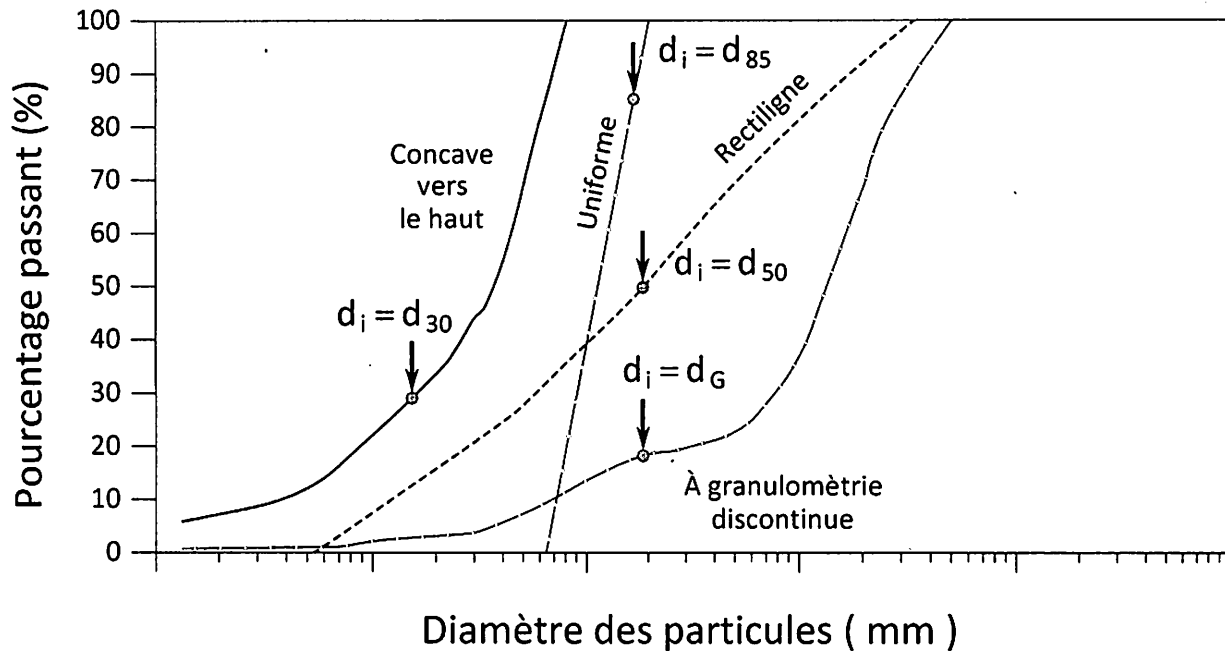


Figure 6.4 Classification des courbes granulométriques de sols à granulométrie étendue.

Pour des sols avec plus de 50% passant le tamis 80 μm , la valeur maximale de O_f devra être 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.

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 moyen à grossier : $k_n > k_s$

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.

G. 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 qui surplombe un aquifère. On a fait varier l'épaisseur de matériau imperméable h sous la structure de route en fonction des hauteurs de déblai ΔH . La figure 6.5 définit ces paramètres.

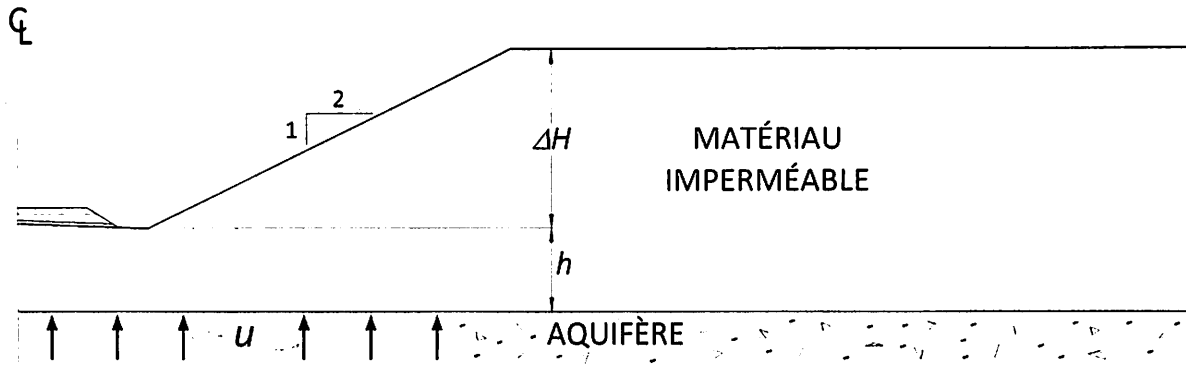


Figure 6.5 Aquifère artésien sous la chaussée en coupe.

La figure 6.6 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 inférieur à 70% de la contrainte totale agissant à ce niveau. Ceci implique qu'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.

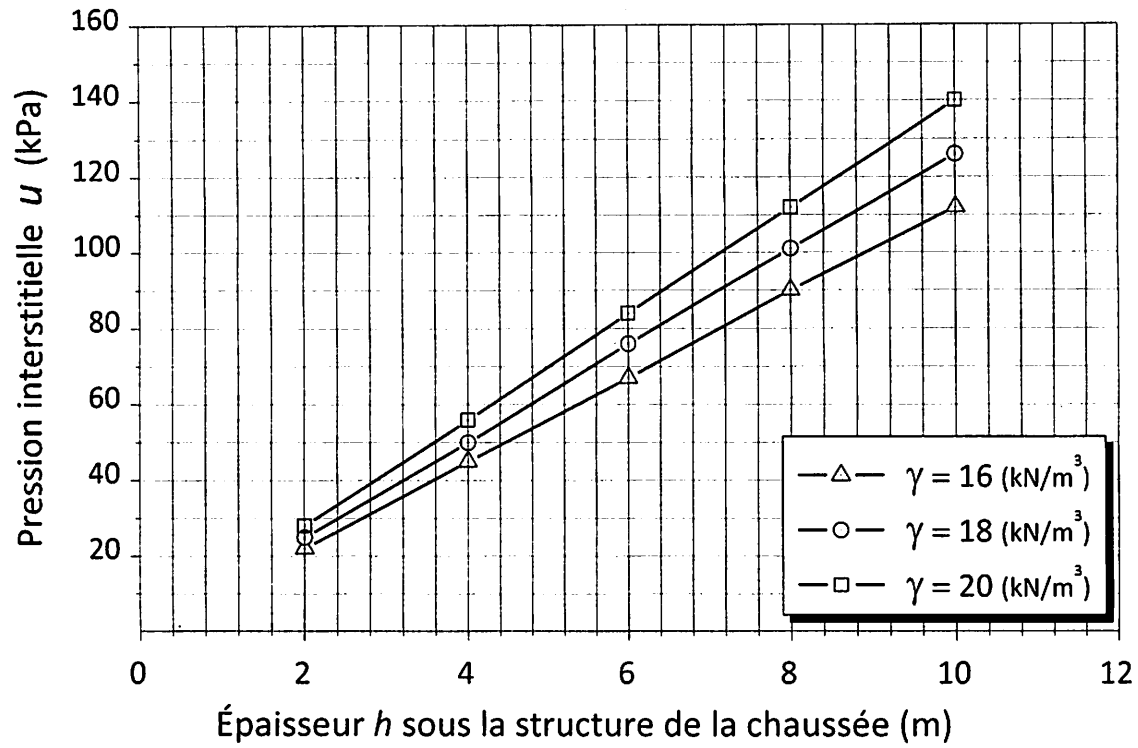


Figure 6.6 Pression interstitielle maximale u à la base du matériau imperméable sous la structure de route, en fonction de l'épaisseur h sous le fond de la coupe, pour des sols d'infrastructure avec $16 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 20 \text{ kN/m}^3$.

VII. Solutions proposées

A. Description des systèmes

1. Extension de la sous-fondation ESF

La figure 7.1 tirée de MTQ (2013c) donne les dimensions à respecter pour la mise en place d'une extension de la sous-fondation. 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.

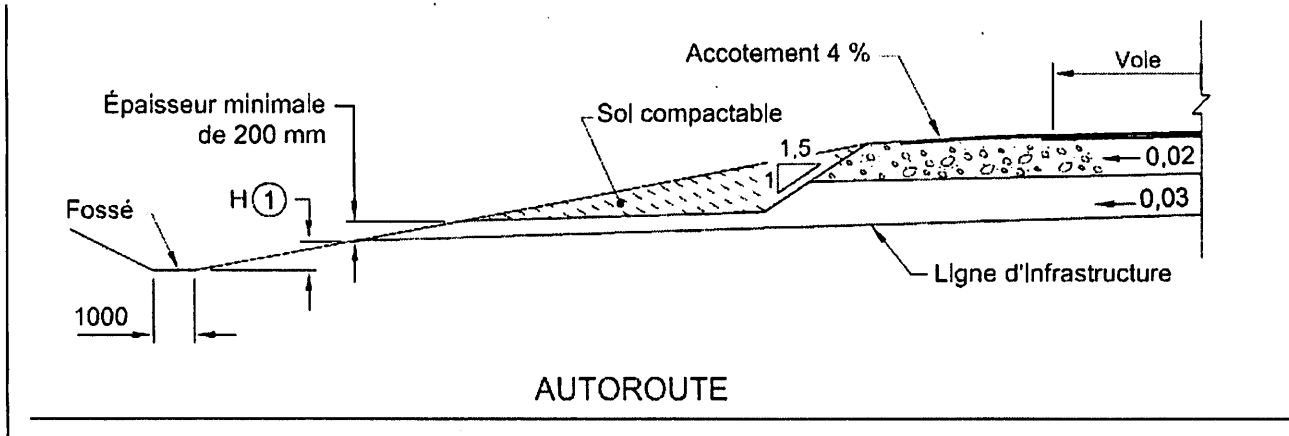


Figure 7.1 Section type d'extension de la sous-fondation.

2. Tuyaux de drainage à l'infrastructure TDI

La figure 7.2 présente le détail d'un TDI tel que stipulé par MTQ (2013c). Sur cette figure, le géotextile est en contact avec les sols à drainer alors que sur un autre dessin de cette référence, on place le géotextile autour du tuyau perforé si le diamètre indicatif d_i (voir section F du chapitre VI) du sol en contact, est inférieur au diamètre des perforations ou si la fente est plus large que $1,25 \cdot D_i$. Dans l'un ou l'autre des cas, il est important d'assurer la compatibilité de filtration aux différentes interfaces, tel que prescrit à la section F du chapitre VI.

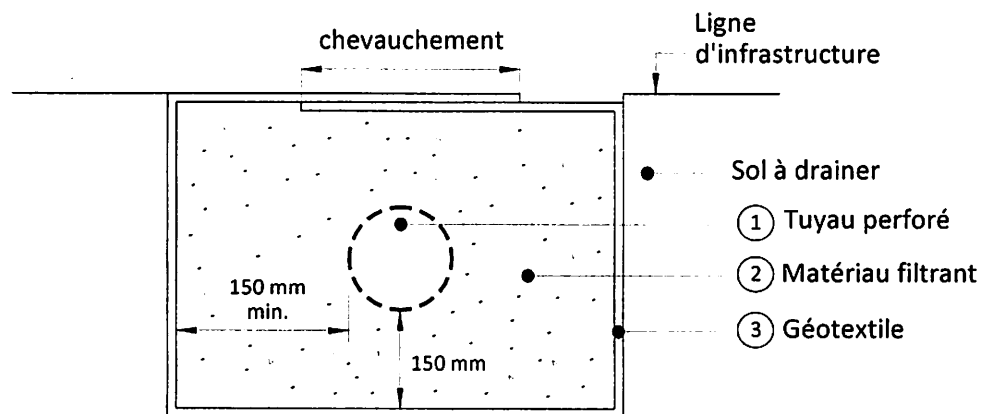


Figure 7.2 Détail du tuyau de drainage à l'infrastructure.

La figure 7.3 donne l'image d'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 7.3 Tuyau de drainage à l'infrastructure.

3. Écran de rive 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 la base de l'écran à la frontière entre l'infrastructure et la sous-fondation, il permet l'évacuation de ces eaux d'infiltration.

Les écrans drainant ne doivent pas être placés jusqu'en surface afin d'éviter de capter les eaux de ruissellement. De plus, l'écran drainant doit être positionné à la ligne de rive. La figure 7.4 illustre ce mode de drainage.



Figure 7.4 Écran drainant en rive de chaussée, route #116, Dosquet.

4. Couche drainante à la ligne d'infrastructure CDI

Elles 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} à 10^{-4} m/s et elle sert en même temps de coussin anti-contaminant pour les granulats de fondation. De plus, elle empêche la remontée de la nappe dans la fondation par capillarité. Elle est nécessaire 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. Elle doit être enrobée de filtres au besoin conformément aux indications de la section F du chapitre VI. La figure 7.5 donne un exemple de CDI constitué de géocomposite de drainage avec mini-drains dans un profil en coupe sur l'autoroute #50.



Figure 7.5 Couche drainante à l'infrastructure dans un profil en coupe, autoroute #50.

5. Masque drainant de rive MDR

Le principe du masque drainant de rive est similaire au drainage latéral, mais sur des longueurs d'écoulement nettement plus importantes, et suivant une pente généralement plus fortes. On a recours au masque drainant de rive 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 fig. 7.6).



Figure 7.6 Exemples de masque drainant de rive.

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

L'utilisation de cette couche constituée de géocomposites ou de granulats traités au bitume ou au ciment, n'est pas justifiée au point de vue 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).

B. Critères de sélection d'un système

Pour les routes régionales, le tableau 7.1 donne les recommandations quant à l'utilisation d'un des systèmes de drainage décrits à la section A.

Tableau 7.1 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	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 mètres 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 recommandable de mettre en place des accotements revêtus pour réduire les degrés de saturation sous la voie de roulement.

C. Coûts comparatifs de systèmes de drainage

Le tableau 7.2 présente les coûts relatifs de chaque système ainsi que les méthodes d'installation 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 dispendieux que les autres méthodes.

Tableau 7.2 Coûts (1995) de chaque système.

	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'infra 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		
avec drain flexible (180 kPa) 150 mm diam.	trancheuse	31,30
avec drain semi-rigide (300 kPa) 300 mm diam.	trancheuse	25,00

D. Installation des conduites – contrôle de qualité – entretien

Considérant que

- le drainage souterrain est un aspect souvent négligé dans la conception et la réalisation de travaux routiers et que
- deux ouvrages y ont été consacrés: CRAAQ (2005) ainsi que la norme BNQ3624-540 (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, AEDAQ) 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;
- impliquer 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 pour l'installation des systèmes de drainage, équipés de système laser complètement automatisé pour l'installation (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 viennent annuler les effets du drainage;
 - ✓ le remblayage et le réglage respecte les spécifications du fabricant pour la résistance à l'écrasement;
 - ✓ les granulométries des matériaux mis en place sont conformes aux spécifications du fabricant de filtre;
 - ✓ 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 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. Le succès de cette opération n'est assuré qu'à la condition que les collecteurs (fossé, couche drainante ou égout pluvial) sont assez bas pour les recevoir.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO (1992). Highway Drainage Guidelines, Vol. 1, AASHTO Guidelines for Hydraulic consideration in highway Planning and Location, prepared by the Task Force on Hydrology and Hydraulics, Washington,
- BLANCHET, M. & LAFLEUR, J. (1996). Évaluation des chaussées drainantes - Rapport final CDT P1584 soumis au Ministère des Transports du Québec, en juillet 1996. 230 p.
- BNQ (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.
- COMITÉ FRANÇAIS DES GÉOTEXTILES. Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration.
- CEDERGREN, H.R. (1987). Drainage of Highway and Airfield Pavements. Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 289 pages.
- CRAAQ (2005) Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 67 p.
- FREDLUND, D.G., XING, A. & HUANG, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31: 533-546.
- GONTHIER, A., GOTTELAND, P. & LAFLEUR, J. (1997). Drainage par géocomposite sous une chaussée en béton. Recueil des communications, 32e Congrès Annuel de l'A.Q.T.R. Trois-Rivières, Tome 1, pp. 298-316.
- HOLTZ, R.D., & KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la Géotechnique. Traduit par J. Lafleur, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. 808 p.
- Info DLC (2003). Où et quand sceller les fissures d'un revêtement bitumineux?, Bulletin d'information technique, vol. 8, n°8, août, Ministère des Transports du Québec.
- KENNEY, T.C. & LAU, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No. 2, pp. 215-225.
- LAFLEUR, J. (1998). Drainage des routes, 1^{ère} partie : Action de l'eau. GÉOGLOBE, No. 2, Été 1998, pp. 8-11.
- LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. Geotextiles and Geomembranes. Vol. 17, Nos. 5 & 6, pp. 299-312.
- LAFLEUR, J. & BOURSIER, P. (1994). Évaluation des chaussées drainantes - Sous-projet III - Capacité de drainage en présence de froid. Rapport CDT P1584 soumis à Ministère des Transports du Québec, en janvier 1994. 48 p.
- LAFLEUR, J. & FAURE, Y. H. (1999). Drainage des routes, 3^e partie : Utilisation des géosynthétiques. GÉOGLOBE, No. 4, Hiver 1999, pp. 44-47.
- LAFLEUR, J. & GÉNÉREUX, F. (2007). Critères d'application des couches drainantes dans les chaussées. Rapport CDT P2982, soumis au Ministère des Transports du Québec, en avril 2007. 94 p.
- LAFLEUR, J., GIROUX, F. et HUOT, M. (1987). Field permeability testing of the weathered Champlain clay crust. Revue Canadienne de Géotechnique. Vol. 24, No. 4. pp. 581-589.

- LAFLEUR, J. & JA'FAR, I. (2009). Étude paramétrique sur l'efficacité des couches drainantes dans les chaussées routières. Rapport CDT P3805, soumis au Ministère des Transports du Québec, en janvier 2009. 58 p.
- LAFLEUR, J. & KIRSCHBAUM, A. (1994). Évaluation des chaussées drainantes - Sous-projet II - Bilan de systèmes de drainage en opération. Rapport CDT P1584 soumis au Ministère des Transports du Québec, en mai 1994. 114 p.
- LAFLEUR, J. & LEBEAU, M. (1999). Modélisation de l'état hydrique dans les structures de chaussées en période estivale. Rapport final CDT P1780, soumis au Ministère des Transports du Québec, en mars 1999. 205 p.
- LAFLEUR, J. & RIOUX, N. (1998). Drainage des routes, 2^e partie : Critères de sélection. GÉOGLOBE, No. 3, Automne 1998, pp. 8-11.
- LAFLEUR, J. & SAVARD, Y. (1996). Efficiency of Geosynthetic Lateral Drainage in Northern Climates. Transportation Research Record, No. 1534, Soils, Geology, and Foundations. Geosynthetics: Cold Regions, Flexible Pavements, and Other Issues, pp 12-18.
- LAFLEUR J. & SAVARD, Y. (2004). Internal stability of road aggregates submitted to water flow. Proc. 57th Conf. of the Canadian Geotechnical Society, Québec, QC, Oct. 24-27.
- LEBEAU, M. & LAFLEUR, J. (2002). Modélisation de l'état hydrique dans les structures de chaussées en période de dégel. Rapport final CDT P2278, soumis au Ministère des Transports du Québec, en octobre 2002. 178 p.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC (1999). Comparaison de l'efficacité des systèmes de drainage de chaussées en période estivale par simulations numériques. Bulletin d'information technique. Direction du Laboratoire des Chaussées. Vol. no. 4, no. 10. Oct.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC (2002). Analyse de comportement hydrique d'une structure de chaussée par simulations numériques. Bulletin d'information technique. Direction du Laboratoire des Chaussées. Vol. no. 7, no. 10. Oct.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC (2004): Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées, Direction du Laboratoire des Chaussées. 40 p.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2004) Guide de scellement des fissures, Direction du Laboratoire des Chaussées. 27 p.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2012). Normes, ouvrages routiers – Tome VII - Matériaux. Les Publications du Québec.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2013a). Cahier des charges et devis généraux. Infrastructures routières, construction et réparations. Les Publications du Québec.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2013b). Les chaussées et le climat québécois. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussées/chaussées_climat_quebécois.. Gouvernement du Québec.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2013c). Normes, ouvrages routiers – Tome II - Construction routière. Les Publications du Québec.
- RACETTE, S. & LAFLEUR, J. (1993). Étude expérimentale du comportement des géosynthétiques dans le drainage latéral des routes. Rapport CDT P1584 soumis au Ministère des Transports du Québec, en août 1993. 153 p.

- RIDGEWAY, H.H. (1976). Infiltration of water through the pavement surface. Transportation Research Record 616, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, .D.C., pp.98-100
- SAVARD, Y (1996). Les développements en drainage des chaussées à Transports-Québec. Recueil des communications. 31e Congrès Annuel de l'A.Q.T.R. Québec, Tome 2, pp. 125-188.
- STORMONT, J.C. & ZHOU, S. (2005). Impact of unsaturated flow on pavement edge drain performance. Journal of Transportation Engineering. ASCE, Vol. 131, No. 1, pp. 46-53.