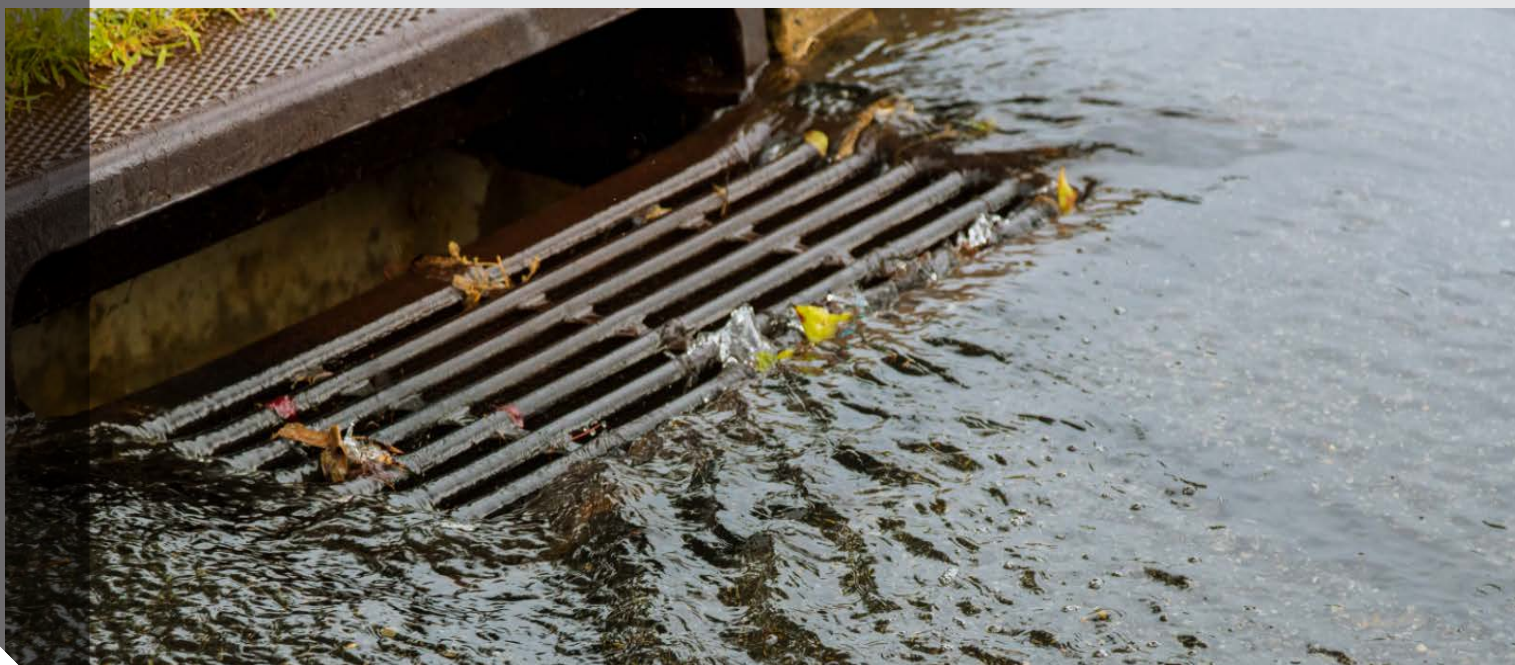


Guide - Drainage souterrain des chaussées urbaines



INFRASTRUCTURES
DE SURFACE

MISSION DU CERIU

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

AVANT-PROPOS

Le Conseil permanent «Chaussées/Ouvrages d'art» du CERIU

Né de la mobilisation des acteurs du milieu, le Conseil permanent « Chaussées» du CERIU favorise la concertation, la mise en commun des compétences et la diffusion des connaissances. Grâce à toute cette expertise et ces connaissances du domaine, le CERIU joue un rôle prépondérant dans le milieu des infrastructures urbaines.

Le Conseil permanent «Chaussées/Ouvrages d'art» valorise et stimule la conservation et la réhabilitation des chaussées municipales (urbaines et rurales). Le Conseil est formé de gens des municipalités du Québec, des firmes d'ingénierie, des universités, des ministères du gouvernement du Québec et des employés du CERIU.

Le comité de travail s'est réuni à plusieurs reprises afin d'échanger l'expertise et les connaissances requises à l'élaboration d'un manuel traitant du drainage souterrain des chaussées visant à sensibiliser les intervenants du milieu sur les incidences du drainage souterrain sur la tenue structurale des chaussées particulièrement dans un contexte nordique comme au Québec.

Mandat du comité de travail

Le comité de travail a le mandat d'élaborer un document de référence traitant du drainage souterrain des chaussées municipales, des bonnes pratiques de construction et mise en œuvre de système de drainage et de préconiser des recommandations tant au niveau de la conception que la construction de systèmes de drainage de chaussées.

REMERCIEMENTS

Le CERIU tient à remercier chaleureusement tous les membres du comité de travail «**Drainage souterrain des chaussées urbaines**» pour leur dévouement et leurs précieuses contributions.

Composition du comité de travail

Participants		Organisation
France	BERNARD	Ville de Montréal, Arr. de Verdun
Éric	BLOND	Sagéos / Groupe CTT
France	DAVIDSON	MTQ
Joseph Jovenel	HENRY	CERIU
Pierre Wickir	JOINT	CERIU
Daniel	LABERGE	Consultant
Jean	LAFLEUR	École polytechnique de Montréal
Pierre	LEGAULT	Génivar
Pascal	SAUNIER	PS2i
Martin	TREMBLAY	Ville de Montréal

Les rencontres

Date	Lieu
17 mai 2006	École polytechnique de Montréal
21 juin 2006	École polytechnique de Montréal
13 septembre 2006	École polytechnique de Montréal
28 mars 2007	École polytechnique de Montréal
12 juin 2007	École polytechnique de Montréal
12 septembre 2007	École polytechnique de Montréal

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	<i>i</i>
REMERCIEMENTS	<i>ii</i>
GLOSSAIRE	<i>1</i>
LISTE DES SYMBOLES	<i>3</i>
LISTE DES ABRÉVIATIONS	<i>4</i>
Chapitre 1 IMPACT DE L'EAU SUR LES CHAUSSÉES	<i>5</i>
1.1 Stabilité des fondations de chaussée	<i>5</i>
1.2 Variation des quantités d'eau dans la chaussée au cours des saisons	<i>7</i>
1.3 Types d'endommagement par l'eau	<i>9</i>
1.3.1 Soulèvements en hiver.....	<i>9</i>
1.3.2 Perte de capacité portante au printemps.	<i>10</i>
1.4 Influence du drainage sur le comportement des chaussées	<i>11</i>
1.5 Particularités du milieu urbain :	<i>12</i>
1.5.1 Hétérogénéité de la fondation.....	<i>12</i>
1.5.2 Absence de fossés.....	<i>12</i>
1.5.3 Zone résidentielle et commerciale.....	<i>12</i>
1.5.4 Les regards et puisards	<i>12</i>
Chapitre 2 INFILTRATION ET DRAINAGE	<i>13</i>
2.1 Distribution des eaux de pluie	<i>13</i>
2.2 Infiltration (charge)	<i>14</i>
2.2.1 par le revêtement I_S	<i>14</i>
2.2.2 par le terrain avoisinant I_L	<i>14</i>
2.2.3 par le sol d'infrastructure I_T	<i>14</i>
2.3 Évacuation de l'eau (décharge)	<i>15</i>
2.3.1 par le sol d'infrastructure E_T	<i>15</i>
2.3.2 par drainage latéral E_L	<i>15</i>
2.3.3 par drainage quasi horizontal à la ligne d'infrastructure E_{CD}	<i>15</i>
2.4 Conception des pentes d'un revêtement	<i>15</i>
Chapitre 3 FACTEURS INFLUENÇANT LE DIMENSIONNEMENT	<i>17</i>
3.1 Position de la nappe phréatique	<i>17</i>
3.2 Profil en dépression avec nappe phréatique en surface	<i>17</i>
3.3 Nature et perméabilité du sol d'infrastructure latéral et sous la chaussée	<i>17</i>
3.4 Nature et perméabilité des granulats	<i>18</i>
3.5 Profil longitudinal	<i>19</i>
3.6 Nature du revêtement : enrobé bitumineux et béton ciment	<i>19</i>
3.7 Profil en remblai	<i>19</i>
3.8 Intensité du trafic	<i>20</i>

3.9	Efficacité d'un système	20
Chapitre 4 NORMES DE CONCEPTION.....		21
4.1	Profondeur	21
4.2	Type et diamètre des conduites et des drains	21
4.3	Pente longitudinale du drain	21
4.4	Pente des interfaces	21
4.5	Position des exutoires.....	21
4.6	Sélection des filtres.....	21
4.6.1	Rétention	22
4.6.2	Perméabilité.....	22
Chapitre 5 SOLUTIONS PROPOSÉES		23
5.1	Imperméabilisation du revêtement.....	23
5.1.1	Points à surveiller pour le contrôle de la fissuration du revêtement	23
5.1.2	Scellement des fissures dans les revêtements existants	23
5.2	Drainage.....	25
5.2.1	Tuyaux perforés TDI.....	25
5.2.2	Tuyau perforé et drain en pierre DL.....	26
5.2.3	Écran de rive ER	26
5.2.4	Couche drainante à la ligne d'infrastructure CDI.....	26
5.2.5	Masque drainant de rive MDR	27
5.2.6	Couche drainante sous le revêtement de béton de ciment	28
5.3	Choix des matériaux de drainage	28
5.3.1	Tuyau perforé à l'infrastructure TDI.....	28
5.3.2	Drain latéral DL ou écran de rive ER.....	28
5.3.3	Couche drainante à l'infrastructure CDI et masque drainant de rive MDR.....	29
5.3.4	Choix d'un système	30
5.4	Utilisation des géosynthétiques en drainage	31
5.4.1	Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires.....	31
5.4.2	Géosynthétiques de drainage disponibles sur le marché	33
5.4.3	Facteurs à considérer	34
5.5	Installation de conduites ou de drains.....	37
ANNEXES : ÉTUDES DE CAS.....		40
A.1	MUNICIPALITÉ DE VERDUN.....	40
A.1.1	Désordres observés.....	40
A.1.1.1	Renversement des trottoirs.....	40
A.1.1.2	Stagnation de l'eau dans les cours d'eau.....	41
A.1.1.3	Instabilité structurale des zones très sollicitées.....	42
A.1.2	Relations entre les désordres observés	42
A.1.3	Drainage longitudinal	43
A.1.3.1	Ralentissement de la vitesse de percolation des eaux parasites	43
A.1.3.2	Capture des eaux et acheminement vers le réseau d'égout.....	43
A.1.4	Comportement à long terme des rues drainées	44
A.2	MUNICIPALITÉ DE LASALLE – CHAUSSÉE EXPÉRIMENTALE.....	45

A.2.1 Instrumentation	45
A.2.2 Comportement de drains de rive géosynthétiques durant une pluie d'orage.....	49
A.2.3. Caractéristiques de l'orage électrique	49
A.2.4 Réponse des piézomètres	50
A.2.5 Débit d'eau.....	51
A.2.6 Réponse de la fondation de la chaussée	52
A.2.7 Discussion.....	52
A.2.7.1 Débit d'eau.....	52
A.2.7.2 Réponse de la fondation de la chaussée	53
A.2.7.3 Connexion des réseaux d'un édifice résidentiel après l'installation des drains	53
A.2.8 Conclusions	53
A.3 MUNICIPALITÉ DE SAINT-HYACINTHE - DRAINAGE ET RENFORCEMENT À L'AIDE DE GÉOSYNTHÉTIQUE	55
A.3.1 Description de la chaussée expérimentale.....	55
A.3.2 Comportement de la fondation de la chaussée	58
A.3.2.1 Teneur en eau de la fondation.....	58
A.3.2.2 Pénétration du gel	59
A.3.3 Conclusion.....	60
<i>RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE.....</i>	61

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.

Degré de fissuration

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.

Gradient hydraulique : Dans un écoulement souterrain, c'est la perte de charge par unité de longueur traversée par l'eau.

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. qui relie la vitesse d'écoulement et la perte de charge.

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.

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 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
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
S_r	=	degré de saturation d'un matériau
τ_f	=	contrainte normale appliquée sur une chaussée
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_L	=	infiltration d'eau dans la structure de la chaussée par le terrain avoisinant
I_T	=	remontée d'eau dans la structure de la chaussée à partir du sol d'infrastructure
E_T	=	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée vers le sol d'infrastructure
E_L	=	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée par drainage latéral
E_{CD}	=	évacuation de l'eau de la structure de la chaussée par drainage quasi horizontal
k	=	conductivité hydraulique
k_n	=	conductivité hydraulique d'un filtre
k_s	=	conductivité hydraulique d'un sol
C_u	=	coefficient d'uniformité
O_f	=	valeur maximale de l'ouverture de filtration
D_I	=	diamètre indicatif
I	=	pourcentage passant inférieur
δ_c	=	ascension capillaire

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BNQ	Bureau des Normes du Québec
CGS	Canadian Geotechnical Society – Société Canadienne de Géotechnique
MTQ	Ministère des Transports du Québec
DJMA	Débit journalier moyen annuel
NFG	Normes françaises sur les géotextiles
PEHD	Polyéthylène haute densité
PP	Polypropylène
PET	Polyéthylène téréphtalate
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CERIU	Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines
AGG	(courbe granulométrique)
NFG	Normes françaises de géotextile
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
AEDAQ	Association des entrepreneurs en drainage agricole au Québec
CTT (Groupe)	Centre des technologies textiles

Chapitre 1 IMPACT DE L'EAU SUR LES CHAUSSÉES

Les ingénieurs routiers ont reconnu depuis longtemps la nécessité du contrôle des effets néfastes de l'eau sur les chaussées. D'ailleurs lors de la planification des projets de grande ou moyenne envergure, AASHTO (1992) recommande fortement l'implication de spécialistes en hydraulique souterraine et en hydrologie pour s'assurer d'une conception efficace tant du point de vue hydraulique qu'économique.

Qu'en est-il de ces considérations dans le cas de chaussées urbaines où apparemment la seule question hydraulique qui se pose ne serait que celle du contrôle des eaux de ruissellement à la surface des chaussées?

Comment l'insertion de couches plus perméables dans la structure de chaussée peut efficacement, d'une part, empêcher une augmentation de la teneur en eau des matériaux de fondation et de sous-fondation et d'autre part, permettre à l'eau de contourner au printemps les couches gelées imperméables.

Dans l'environnement urbain, le contrôle des effets de l'eau ne saurait se limiter seulement au drainage souterrain et à la gestion des eaux de ruissellement sur la voie carrossable mais elle devrait aussi englober les eaux provenant du voisinage immédiat de la chaussée hors des voies de circulation.

1.1 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 qui aide 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 sera :

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

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 en diminue la résistance au cisaillement τ_f et leur capacité portante. Un degré de saturation S_r d'un matériau (volume de l'eau/volume des pores) élevé, 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.

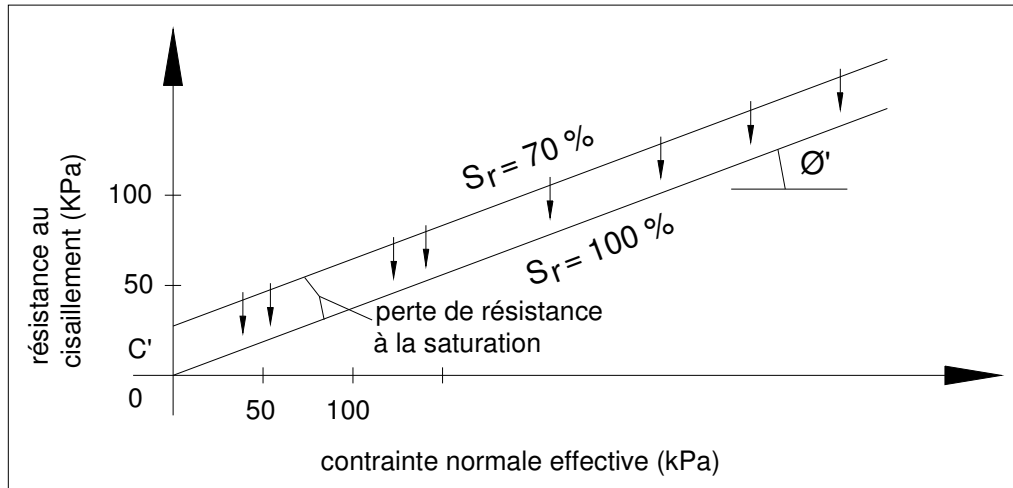


Fig. 1.1 : Courbe enveloppe typique de la résistance au cisaillement de granulats saturés et non saturés.

Chaque saison pluvieuse amène avec elle une augmentation de u et une réduction correspondante de la capacité portante et du coefficient de sécurité pour la capacité portante des remblais et la stabilité des talus. Ces changements périodiques peuvent ne pas être suffisants pour agir directement sur la stabilité pendant la durée de vie de la structure. Cependant 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 concepteurs 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;
- contrôler l'eau par drainage et évacuation

La première méthode consiste à ériger et maintenir une barrière complètement imperméable à la surface afin d'empêcher l'eau d'atteindre les fondations de la chaussées. En empêchant l'eau extérieure d'accéder aux fondations de la 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 de tout ordre.

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

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

Quelle que soit la saison, l'eau trouve toujours le moyen de s'infiltrer dans la chaussée et c'est l'amorce d'un long processus de dégradation qui varie au cours de l'année.

- 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%.

Les quantités d'infiltration varient notamment en fonction de la capacité d'absorption des granulats et des sols, qui à son tour, est directement reliée à leur perméabilité qui varie en fonction du degré de saturation en eau. On voit sur la figure 1.2 que la perméabilité k d'un matériau non saturé peut être beaucoup plus faible qu'en condition saturée. L'infiltration dans la chaussée s'en trouve alors réduite au détriment du ruissellement et elle varie au cours des saisons.

La figure 1.3 donne un histogramme de la distribution des précipitations moyennes mensuelles pour cinq stations au Québec sur une période de cinq années; les précipitations en neige ont été converties en quantité d'eau par un facteur de réduction de 10. 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 regard de cette distribution, la quantité d'eau infiltrée dans un sol perméable en faisant certaines hypothèses sur la fonte des neiges et l'évapotranspiration. En ce qui concerne la perméabilité des sols gelés, la figure 1.2 indique qu'elle 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 constitués de glace. On retrouve deux périodes où l'infiltration est accrue : au printemps et à un moindre degré, à l'automne.

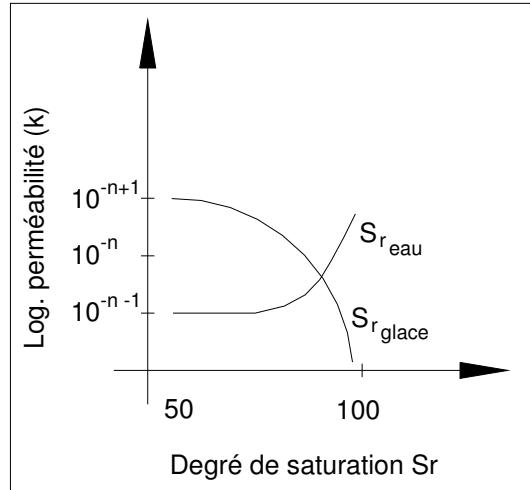


Fig. 1.2 : Variation de la perméabilité en fonction de la saturation des pores en eau et en glace.

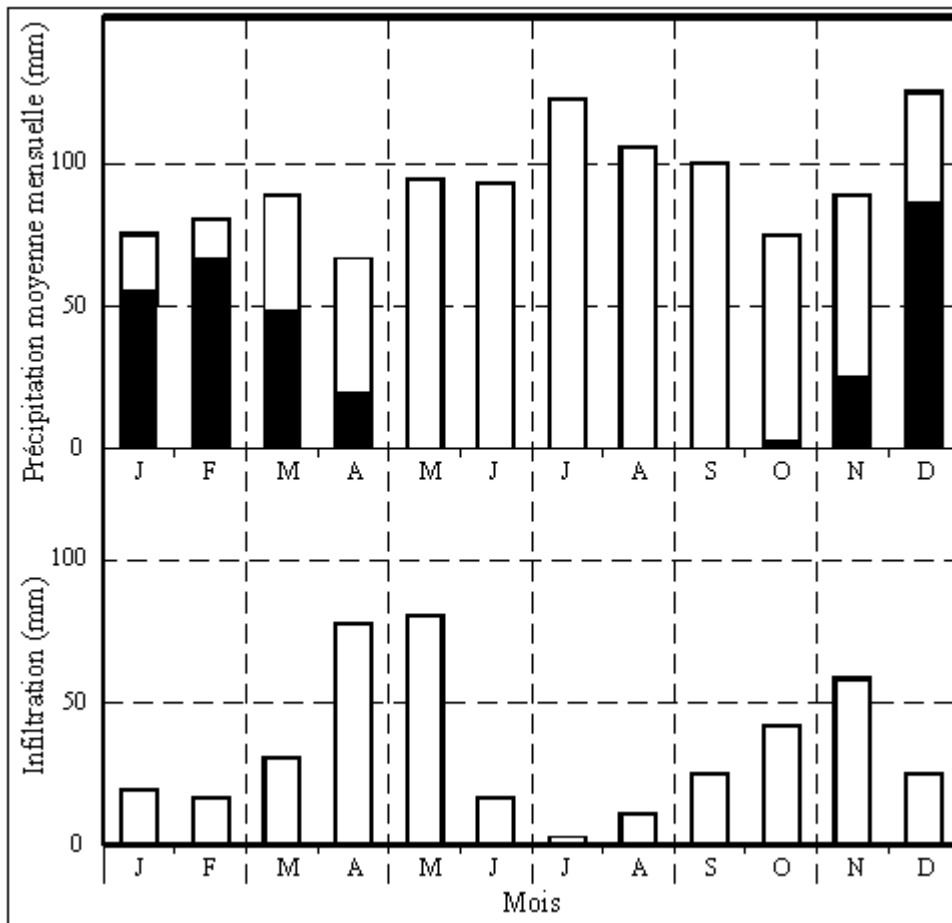


Fig. 1.3 : Distribution mensuelle des précipitations et de l'infiltration

1.3 Types d'endommagement par l'eau

L'endommagement des chaussées se manifeste de différentes façons qui peuvent en être à la fois la cause et l'effet : un revêtement fissuré va permettre plus d'infiltration qui à son tour va être à l'origine de nouvelles fissures. 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 surtout non uniformes associées au remplissage des tranchées de conduits souterrains;
- l'oxydation du bitume qui augmente la perméabilité du revêtement;
- la position élevée de la nappe phréatique

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

1.3.1 Soulèvements en hiver

En gelant dans les pores des couches portantes de la chaussée, le volume de l'eau augmente de 10% et, de ce fait, provoque des soulèvements à la surface. A titre indicatif, pour une pénétration du gel de deux mètres sous la chaussée, on aurait théoriquement un soulèvement de 60 mm. La figure 1.4 illustre les effets de la pénétration du gel 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.

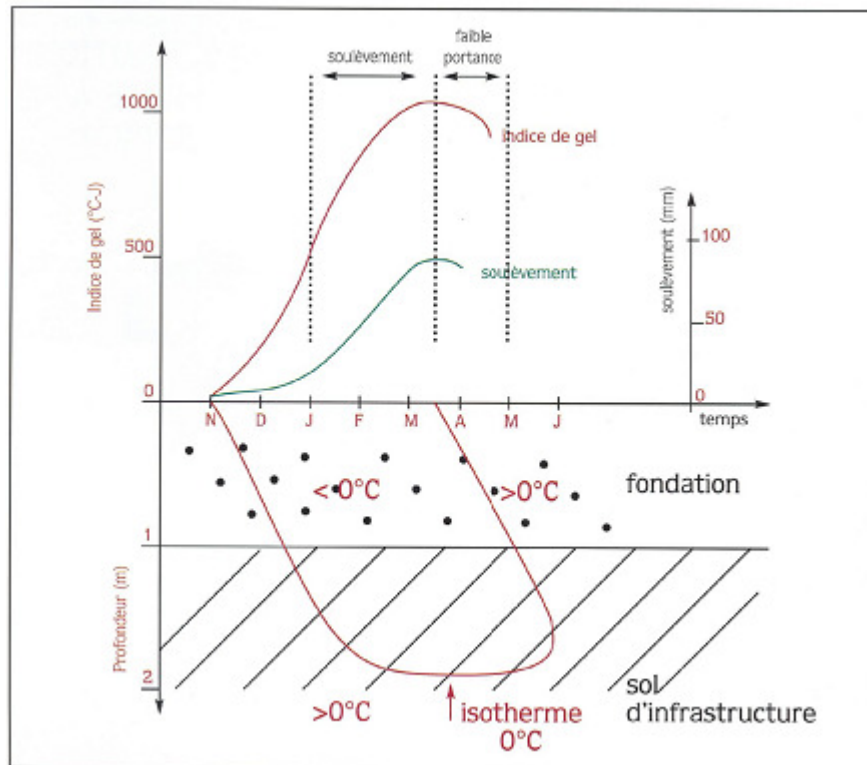


Fig. 1.4 : Progression du gel dans la chaussée et soulèvement associé à l'indice de gel maximum.

Ce dernier facteur peut se chiffrer à l'aide de l'indice de gel 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 l_{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. Le taux de pénétration est accéléré lorsque l'isotherme 0°C atteint le sol d'infrastructure, dont la porosité est généralement plus élevée que celle des matériaux de fondation et de sous-fondation. 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.

**LE DRAINAGE EST GÉNÉRALEMENT INSUFFISANT
 POUR ÉLIMINER CE TYPE DE DOMMAGE.
 L'ISOLATION THERMIQUE CONSTITUE UNE MÉTHODE PLUS EFFICACE.**

1.3.2 Perte de capacité portante au printemps.

A partir de la mi-mars, les températures moyennes journalières demeurent au-dessus du point de congélation et tel que présenté à la figure 1.4, le dégel commence à progresser à partir de la surface et dure plus d'un mois. Les conditions qui prévalent à ce moment sont présentées à la figure 1.5: présence d'une zone gelée imperméable qui confine l'eau dans une zone dégelée en forme de cuvette immédiatement sous le revêtement. Cette zone en forme de cuvette se situe en surface, près des trottoirs parce que le dégel est retardé par la présence de neige et de glace.

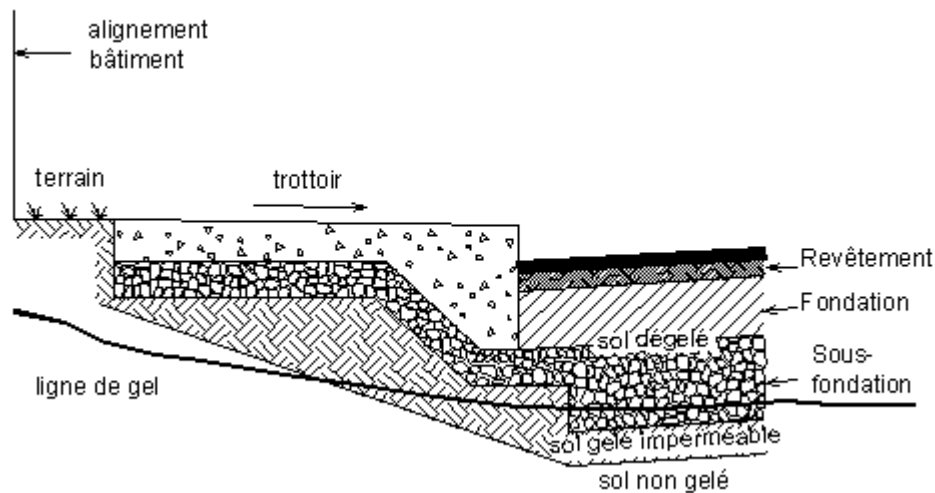


Fig. 1.5 : Position de la zone gelée imperméable en période de dégel.

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. On a illustré à la figure 1.2, la diminution de la valeur de k en fonction du degré de saturation en glace S_{rg} d'un sol. On constate qu'elle peut chuter de plusieurs ordres de grandeur.

La présence accrue d'eau 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.

UN DRAINAGE EFFICACE PEUT PRATIQUEMENT ÉLIMINER CE TYPE DE DOMMAGE



Fig. 1.6 : Chaussées endommagées par l'eau

1.4 Influence du drainage sur le comportement des chaussées

La figure 1.7 provient d'un relevé effectué dans l'arrondissement de Verdun. On constate que le degré de fissuration des chaussées drainées est approximativement réduit de 25%.

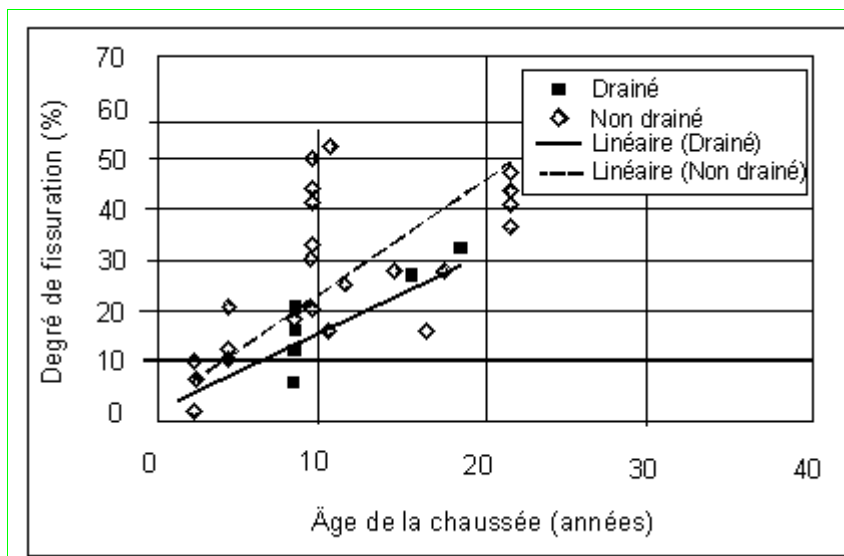


Fig. 1.7 : Fissuration d'une chaussée en fonction du drainage.

1.5 Particularités du milieu urbain :

1.5.1 Hétérogénéité de la fondation

Les chaussées urbaines recouvrent souvent des tranchées de conduits souterrains qui ont été remblayés avec des matériaux différents du sol naturel. De par leur hétérogénéité, la présence de ces matériaux juxtaposés est à l'origine de déformations différentielles qui se traduisent en surface par un endommagement accéléré du revêtement qui à son tour, favorise une infiltration d'eau accélérée.

1.5.2 Absence de fossés

Contrairement aux chaussées en milieu rural qui comportent toujours des fossés latéraux, la voie urbaine constitue souvent le point le plus bas de la topographie. Ceci en fait le réceptacle naturel des eaux de ruissellement et d'infiltration provenant des terrains riverains.

1.5.3 Zone résidentielle et commerciale

En zone résidentielle, il arrive fréquemment que les pelouses soient irriguées. Une fois infiltrées, ces eaux se dirigent vers la fondation de la chaussée. En zone commerciale toutefois, la présence de stationnements revêtus et de grandes surfaces drainées directement à l'égout, diminue l'infiltration et les quantités d'eau sous la chaussée. La nécessité de drainer la chaussée est moins importante dans ces zones.

1.5.4 Les regards et puisards

En milieu urbain, des regards et des puisards sont placés dans la chaussée pour donner accès aux réseaux techniques urbains. Très souvent le manque de bonnes pratiques de constructions fait que ces éléments constituent des points de faiblesse dans la chaussée, occasionnant de la fissuration et la pénétration de l'eau dans le corps de la chaussée (CERIU, 2004).

Chapitre 2 INFILTRATION ET DRAINAGE

L'eau provient principalement des précipitations liquides et de la fonte des neiges. Dans certains cas, les eaux d'irrigation de pelouses, de parcs et de terrains de jeu peuvent également représenter une source non négligeable. 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 34 heures favorise d'avantage l'infiltration qu'un orage estival intensif de courte durée. De façon générale et en l'absence de sol gelé, la figure 1.3 indique que 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, ce qui ne s'infiltré pas, doit nécessairement ruisseler (et/ou s'évaporer), ce qui correspond à 40 à 90% de la précipitation et les puisards de surface doivent être conçus en fonction de ces débits.

2.1 Distribution des eaux de pluie

La figure 2.1 indique la provenance et l'évacuation des eaux à l'origine des écoulements susceptibles de se produire dans et au voisinage d'une chaussée urbaine.

En rouge, on indique les infiltrations qui proviennent soit des fissures ou des joints du revêtement I_S et/ou du sol d'infrastructure encaissant latéralement 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.

En bleu, l'eau de la structure est évacuée vers l'infrastructure si la nappe phréatique est plus basse que ce niveau E_T , et latéralement vers un écran de rive E_L si la nappe phréatique est plus élevée que le sol d'infrastructure.

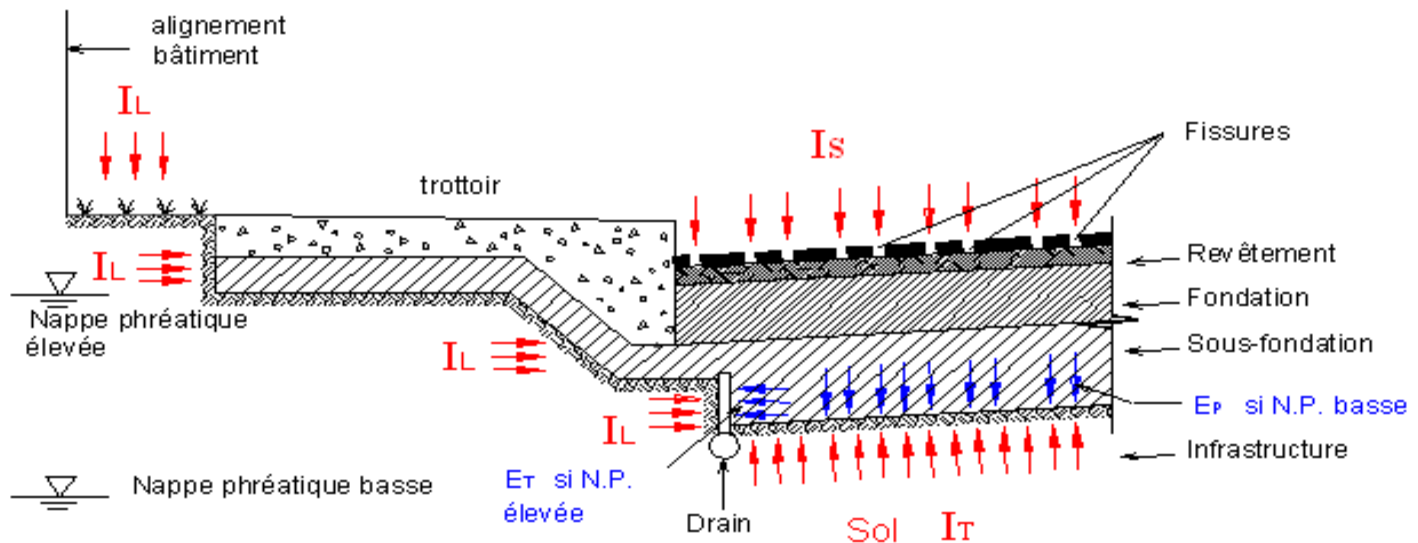


Fig. 2.1 : Localisation des zones de charge et de décharge



Fig. 2.2 : Accumulation de flaques d'eau en surface

2.2 Infiltration (charge)

L'eau des précipitations et de la fonte des neiges qui n'a pas ruisselé vers les puisards de rue s'infiltré dans la structure de chaussée par les fissures et les joints du revêtement ou par le terrain avoisinant.

2.2.1 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 très fissuré. Les joints se rencontrent à la bordure des rue et aux trottoirs.

2.2.2 par le terrain avoisinant I_L

Tel qu'évoqué précédemment, les précipitations de faible intensité et de longue durée sont celles qui ont le plus d'effet sur le rehaussement de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration correspond au bout d'une période de saturation du sol, à la perméabilité du terrain : un sol perméable comme un sable ($k \approx 10^{-4}$ m/s) peut absorber 1000 fois plus d'eau qu'une argile fissurée et altérée ($k \approx 10^{-7}$ m/s) à la condition de ne pas être recouvert de surface gazonnée semi-imperméable.

La pente du terrain avoisinant intervient aussi. Si elle est forte, l'eau va ruisseler en surface ou près de la surface. Si le terrain est plat, elle va finir par s'infiltrer et alimenter la nappe phréatique.

2.2.3 par le sol d'infrastructure I_T

Compte tenu des remarques des paragraphes précédents, 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.

2.3 Évacuation de l'eau (décharge)

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 qui seront discutés au chapitre suivant.

2.3.1 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 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.

2.3.2 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 5.

2.3.3 par drainage quasi horizontal à la ligne d'infrastructure E_{CD}

Dans les cas où le niveau de la nappe phréatique est supérieur à la ligne d'infrastructure 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 5, recouvrant le sol d'infrastructure immédiatement sous la sous-fondation. Pour être efficace, cette couche doit nécessairement être en communication avec le système de drainage latéral.

2.4 Conception des pentes d'un revêtement

L'objectif premier des pentes du revêtement est d'éliminer les accumulations d'eau à la surface et de réduire ainsi les infiltrations dans la structure de chaussée. Par contre pour éviter des problèmes de sécurité, ces pentes doivent être inférieures à des limites acceptables. Pour arriver à une conception adéquate, on doit toutefois avoir à l'idée, les principes suivants :

- la voie de circulation en milieu urbain sert à collecter les eaux de surface et à les diriger vers les puisards. La bordure ou le trottoir forme un caniveau;
- contrairement aux routes rurales (nationales et autoroutes), la conception des chaussées urbaines vise à éliminer la présence d'eau sur le revêtement. L'objectif est de créer une voie libre d'eau stagnante pour éviter l'aquaplanage et assurer l'adhérence des pneus;
- la géométrie des caniveaux de rue (pente 0,5%), la couronne (3%), le nombre de puisards (film d'eau et largeur) et la présence de terrains drainés à la rue influencent la quantité d'eau à drainer;
- l'impact des eaux en zone commerciale est différent :
 - o la proportion des eaux de ruissellement dirigées à la rue est plus faible;

- les eaux sont plutôt canalisées dans les réseaux de drainage de surface des stationnements;
- la quantité d'eau ruisselée est de 2 à 3 fois plus importante qu'en zone résidentielle.

Chapitre 3 FACTEURS INFLUENÇANT LE DIMENSIONNEMENT

Les facteurs à prendre en compte pour le calcul et le choix d'un système de drainage sont énumérés dans le tableau 3.1 par ordre d'importance décroissante. Les sections suivantes décrivent la façon dont ils interviennent dans le dimensionnement.

Tableau 3.1 Importance relative des facteurs intervenant dans le dimensionnement des systèmes de drainage

ID	Facteurs	Importance
1	position de la nappe phréatique	3
2	profil en dépression avec nappe en surface	3
3	nature et perméabilité du sol d'infrastructure latéral et sous la chaussée	3
4	perméabilité des granulats	2
5	profil longitudinal : pente	2
6	nature du revêtement : enrobé bitumineux ou béton de ciment	1
7	profil en remblai	1
8	intensité du trafic	1

Note : 3 important --> 1 peu important

3.1 Position de la nappe phréatique

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 ou de tubes perforés, permettent de savoir si la nappe phréatique vient alimenter la structure de chaussée par le terrain avoisinant I_L et par le sol d'infrastructure I_T (voir fig. 2.1)

3.2 Profil en dépression avec nappe phréatique en surface

Lorsque le profil de la rue est plus bas que le terrain avoisinant et que la nappe s'y trouve en surface, la chaussée sera constamment alimentée en eau par les infiltrations provenant de l'infrastructure I_T et par le terrain avoisinant I_L (voir fig. 2.1).

3.3 Nature et perméabilité du sol d'infrastructure latéral et sous la chaussée

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^{-1} 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 9 ordres de grandeur selon la nature du sol. On doit noter également que lorsqu'ils ne sont pas saturés, la figure 1.2 indique que k peut diminuer de plusieurs ordres de grandeur. Le tableau 3.2 adapté de Holtz et Kovacs (1991) donne des ordres de grandeur pour le coefficient de perméabilité en fonction du type de sol.

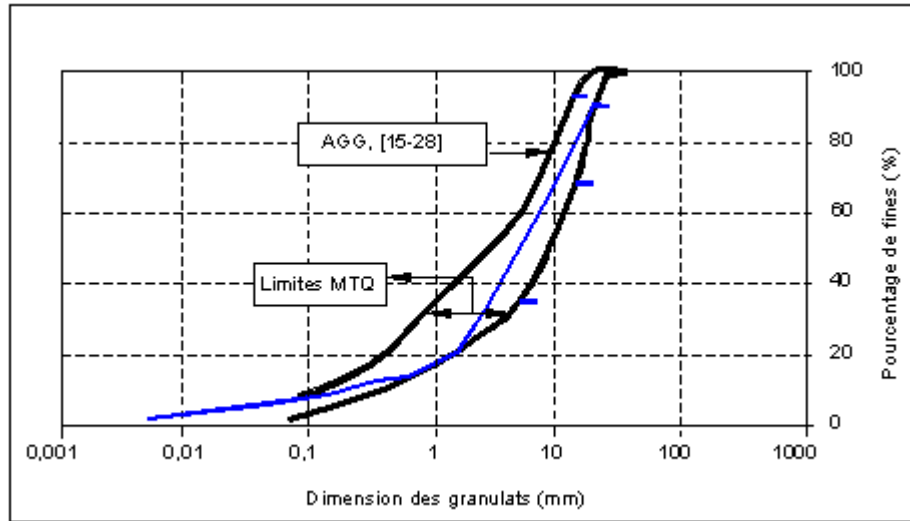


Fig. 3.2 Fuseaux granulométriques acceptables, fondation (MG-20 – MTQ)

3.5 Profil longitudinal

Le profil en long de la chaussée est également un facteur déterminant. En effet, les conditions de drainage sont défavorables lorsque les pentes longitudinales sont fortes et longues. Dans les fondations de chaussée, ces pentes longitudinales augmentent la distance de drainage et le temps de migration de l'eau dans la chaussée avant qu'elle ne se rende au pied de la pente où on peut observer des accumulations importantes d'eau. Il faut donc s'assurer d'une évacuation latérale rapide de l'eau dans la fondation.

3.6 Nature du revêtement : enrobé bitumineux et béton ciment

Immédiatement après la construction, la route en béton de ciment est sensiblement aussi étanche que la route en revêtement bitumineux. La route en béton est munie de joints longitudinaux et de joint transversaux. Ces joints sont faits avec un scellant à chaud pour les joints longitudinaux et de scellant prémoulé pour les joints transversaux. Avec le temps, il faut remplacer ces scellants puisqu'ils deviennent moins étanches, sinon l'eau pénètre dans la fondation de chaussée.

Pour la route en béton bitumineux, il faut choisir un bitume adapté à la région du Québec où l'on se trouve. Plus le mélange a un pourcentage optimal de bitume et plus le revêtement est épais et bien plus, il sera flexible et résistera à la fissuration et à l'orniérage avec le temps. Quand les fissures apparaissent dans le revêtement, il faut les boucher et ceci dans les meilleurs délais.

3.7 Profil en remblai

Pour une route en remblai un système de drainage devrait être choisi si les eaux d'infiltration risquent d'être captives dans la fondation par la présence de sols peu perméables à l'infrastructure.

3.8 Intensité du trafic

Le trafic et le pourcentage de charges lourdes (camions, autobus) influencent le choix et les propriétés mécaniques requises des éléments constituant le système de drainage pour conserver leur capacité d'évacuation.

3.9 Efficacité d'un système

L'efficacité d'un système est définie par le temps nécessaire pour que 85% de l'eau infiltrée suite à une précipitation, soit évacuée. Cedergren (1987) recommande que ce soit moins d'une heure.

Chapitre 4 NORMES DE CONCEPTION

4.1 Profondeur

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 (Normes TOME II (Construction Routière), chapitre 3, page 5, article 3.7 MTQ). En fait, plus le drain est profond, plus il est efficace.

4.2 Type et diamètre des conduites et des drains

Ces dimensions dépendent essentiellement 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. 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 à l'extérieur de la plate forme de la route, on peut utiliser un drain flexible d'une rigidité plus grande ou égale à 210 kPa du PEHD (BNQ 3624-115).

4.3 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 (Normes TOME II (Construction routière), chapitre 3, page 5, article 3.7, MTQ).

4.4 Pente des interfaces

L'évacuation de l'eau hors de l'assise de la chaussée est réalisée par l'aménagement de pentes d'interfaces vers le système de drainage. Les pentes sont réalisées pour chacune des couches composant la structure de chaussées. Généralement, elles varient entre 2 et 3% vers l'extérieur. La couche de fondation a généralement une pente moins forte que la couche de sous-fondation. Les travaux de préparation de l'infrastructure (sol support) doivent veiller à bien profiler la surface afin d'éviter de laisser des déformations (ornières) pouvant retenir l'eau et affaiblir localement l'infrastructure.

4.5 Position des exutoires

Ils sont raccordés à l'égout pluvial. Leur espacement dépend de la pente du terrain. Une sortie pour les drains dans un puisard doit être prévue à tous les 200 mètres au maximum. Lorsque le drain est relié à un égout pluvial, on doit installer un raccord étanche.

4.6 Sélection des filtres

En plusieurs endroits dans la section, 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 grand pour que l'eau y rencontre moins de résistance que dans le sol à retenir (perméabilité).

4.6.1 Rétention

Pour des sols avec moins de 50% passant le tamis 80 µm, on calcule C_u pour tout l'échantillon. Le Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations (CGS, 2006) recommande qu'on évalue la valeur maximale de l'ouverture de filtration O_f (égale à $D_{I5}/4$ pour les filtres granulaires et aux valeurs FOS pour les filtres géosynthétiques), en mm, à partir de la relation suivante :

$$O_f < B \times D_I \quad (3.1)$$

où D_I = diamètre indicatif

I = pourcentage passant inférieur

pour $C_u < 2$

$B = 1$ et $D_I = D_{85}$

pour $2 < C_u < 4$

$B = 0,5 \times C_u$ et $D_I = D_{85}$

pour $4 < C_u < 8$

$B = 8/C_u$ et $D_I = D_{85}$

Pour les sols non cohérents à granulométrie étendue avec $C_u > 8$, utiliser l'équation 3.1 (Lafleur, 1999) où :

$B = 1$ et $D_I = D_{50}$ pour les sols avec granulométrie linéaire

$B = 1$ et $D_I = D_{30}$ 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

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.

4.6.2 Perméabilité

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

pour la rétention des matériaux fins :

$$k_n > 10 * k_s$$

pour la rétention des sables moyen à grossier :

$$k_n > k_s$$

où k_n = conductivité hydraulique du filtre;

k_s = conductivité hydraulique du sol à retenir;

Chapitre 5 SOLUTIONS PROPOSÉES

5.1 Imperméabilisation du revêtement

5.1.1 Points à surveiller pour le contrôle de la fissuration du revêtement

- réduire le nombre de couvercles dans les chaussées nouvelles;
- pose soignée et continue du revêtement – éviter les joints;
- éviter les excavations multiples dans les chaussées existantes;
- contrôler par la conception, l'effet du gel sur les structures enfouies susceptibles de fissurer le revêtement;
- contrôler les conditions susceptibles de créer des affaissements du sol d'infrastructure;
- la nature et la qualité du remblayage des conduites a un impact considérable sur le comportement des eaux sous la chaussée.

5.1.2 Scellement des fissures dans les revêtements existants

Le scellement de fissures étant une technique d'entretien préventif, il doit être effectué peu de temps après l'apparition des fissures sur la chaussée.

Le taux de fissuration longitudinale dans les pistes de roues doit être inférieur à 1000 m/km, soit 25 % de la longueur totale des pistes de roues, pour ne pas rendre la surface de la chaussée glissante et non sécuritaire pour les automobilistes. Les secteurs présentant des dégradations, causées notamment par une faible portance et par des problèmes de drainage, sont à éviter.

On considère que le scellement n'est plus efficace si la longueur de fissures encore scellées est inférieure à 50 % de la longueur de fissures totale. Sur la base de récentes observations, la durée de vie du produit de scellement varie en fonction du trafic. Elle est de 3 à 5 ans sur les autoroutes (8500 < DJMA < 30 000 véhicules/j.) et de 4 à 8 ans sur les routes nationales et régionales (DJMA < 8500 véhicules/j.).

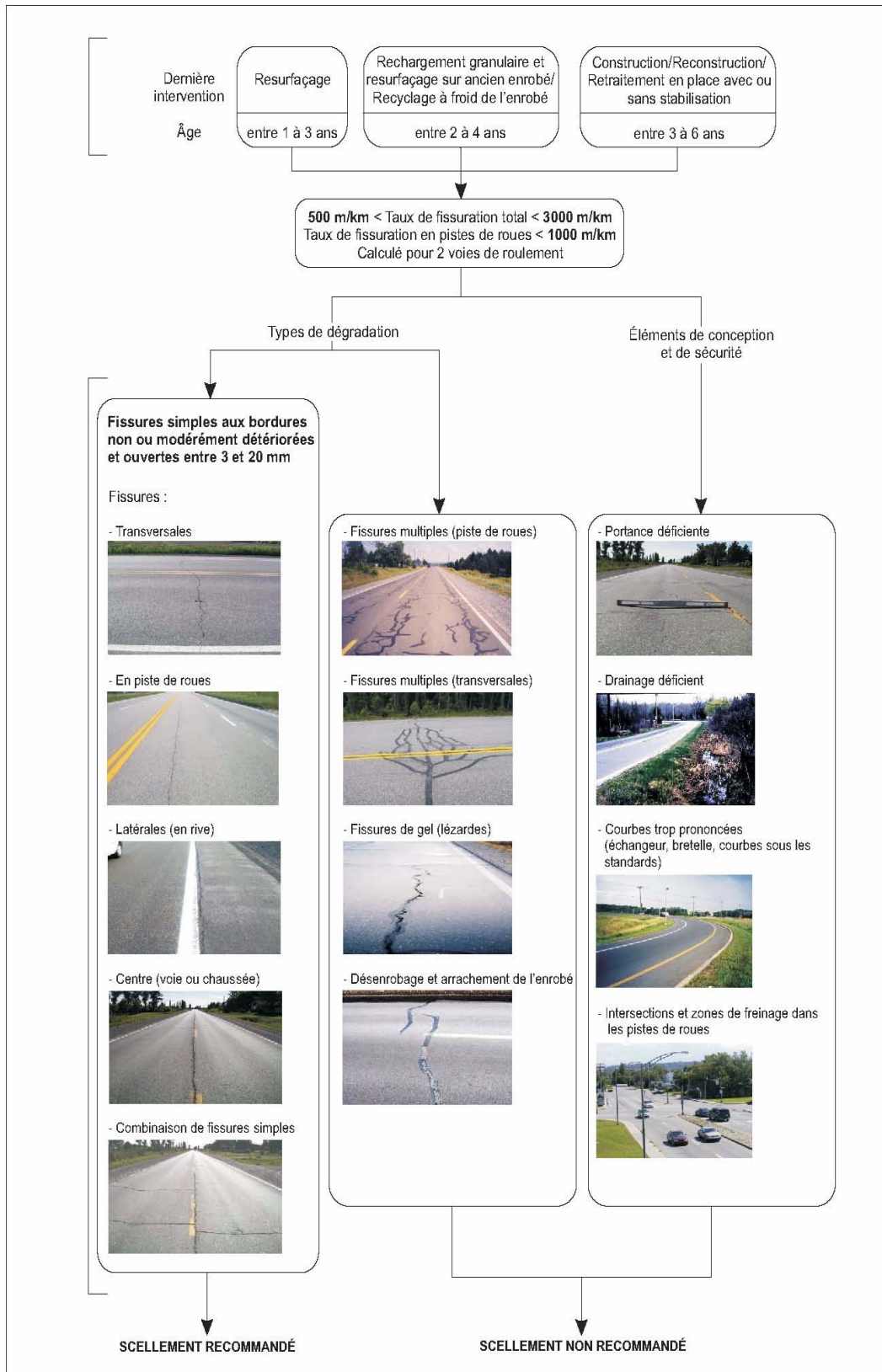


Fig. 5.1 Processus de sélection des routes et des fissures à sceller

Selon les régions, la période comprise entre la mi-mai et la mi-octobre est propice au scellement des fissures. Le scellement n'est pas recommandé avant la mi-mai à cause du taux d'humidité élevé dans les fissures.

5.2 Drainage

Puisque ce manuel est axé sur le drainage des fondations de chaussée en contexte urbain, nous ne nous attarderons pas sur le drainage des fondations de chaussée en milieu rural qui sont décrites et normalisées par le Ministère des Transports du Québec. Cependant, nous ferons un survol des différentes configurations rencontrées en milieu municipal.

On utilise généralement un drainage fermé qui permet l'aménagement d'une plate-forme horizontale de la chaussée sans dépression (sans fossé). Nous avons en général des bordures ou des trottoirs qui longent la voie de communication. L'eau de ruissellement s'écoule transversalement puis longitudinalement le long de ces infrastructures. Les puisards captent ensuite ces eaux. Dans certains cas, les eaux de la fondation de chaussée se drainent vers des écrans de rive qui à leur tour évacuent l'eau vers les puisards puis vers le réseau d'égout pluvial.

5.2.1 Tuyaux perforés TDI

Le drainage à l'aide de tuyaux perforés est utilisé en milieu urbain ou rural. Il est illustré à la figure 5.2.

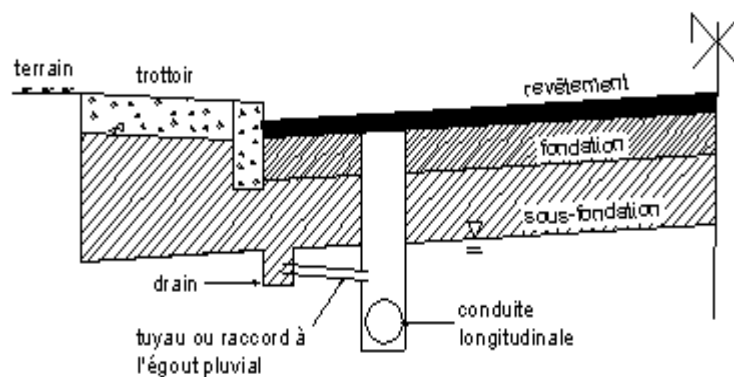


Fig. 5.2 Drainage par tuyau de drainage à l'infrastructure

5.2.2 Tuyau perforé et drain en pierre DL

La figure 5.3 présente le détail d'un drain de pierre typique.

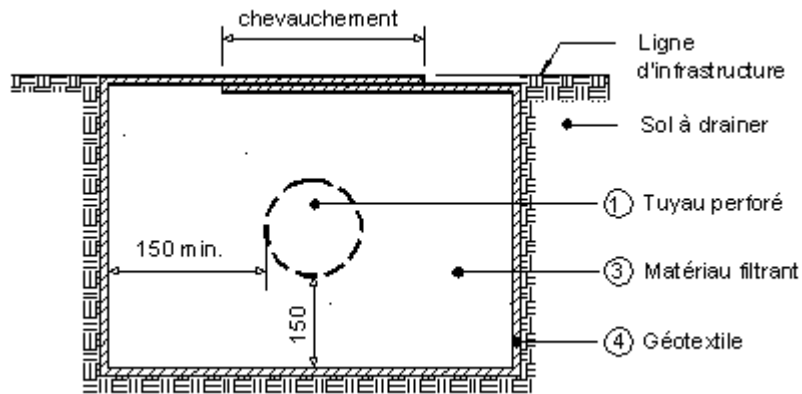


Fig. 5.3 Drainage par tuyau perforé et drain de pierre

5.2.3 Écran de rive ER

On installe des écrans drainants de part et d'autre de la chaussée pour créer une barrière entre les eaux qui pourraient provenir de l'accotement et de la bande centrale et les empêcher de revenir dans la fondation de la chaussée. À l'aide du drain perforé placé à la base de l'écran, il permet d'évacuer les eaux de la fondation de la chaussée à la frontière entre l'infrastructure et la sous-fondation.

Les écrans drainant ne doivent pas être placés jusqu'en surface afin d'éviter de capter les eaux de ruissellement. L'écran drainant doit être positionné à la ligne de rive. Les figures 5.4 et 5.5 illustrent ce mode de drainage.

5.2.4 Couche drainante à la ligne d'infrastructure CDI

- sert en même temps de coussin anti-contaminant pour les granulats de fondation
- empêche la remontée de la nappe dans la fondation
- la couronne est très importante pour l'évacuation de l'eau. Prévoir en fonction des tassements si utilisée sur des sols compressibles.

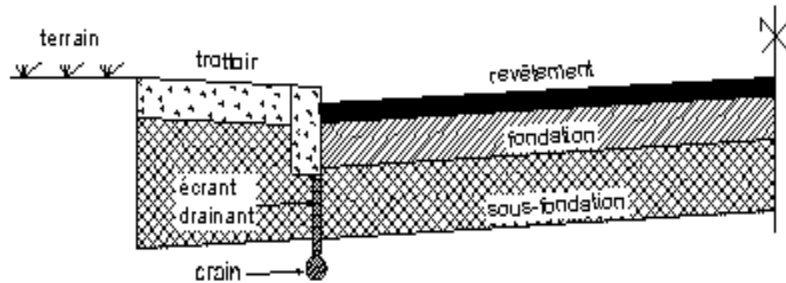


Fig. 5.4 Drainage par écran drainant vertical en rive de chaussée

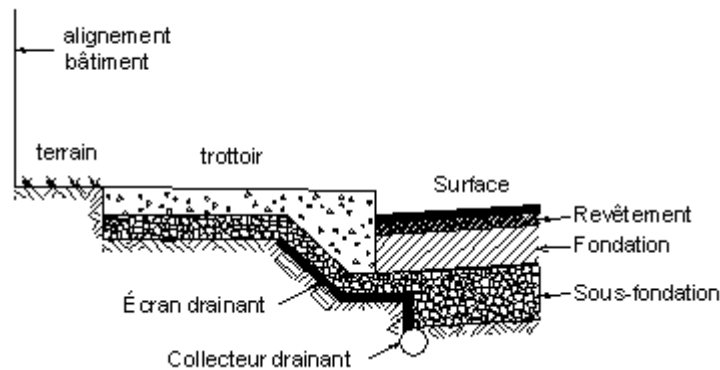


Fig. 5.5 Drainage par écran drainant incliné en rive de chaussée

5.2.5 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 douce. 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 risquer d'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. 5.6).



Fig. 5.6 Exemple de masque drainant de rive

5.2.6 Couche drainante sous le revêtement de béton de ciment

L'utilisation de cette couche 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).

5.3 Choix des matériaux de drainage

5.3.1 Tuyau perforé à l'infrastructure TDI

Le tuyau doit avoir un diamètre suffisant pour intercepter l'eau dans les matériaux granulaires et résister à l'écrasement par le sol encaissant et les charges de trafic (norme MTQ, ouvrages routiers, Tome II – Construction routière) (mise à jour 2007).

5.3.2 Drain latéral DL ou écran de rive ER

La plupart de géocomposites de drainage sont compressibles, et peuvent perdre de ce fait, une partie de leur efficacité sous la contrainte.

La pierre nette, incompressible comme tous les matériaux granulaires, est une solution très performante pour assurer le drainage horizontal des fondations routières. Le sable drainant, moins onéreux et nettement plus disponible que la pierre nette est un matériau toutefois

largement utilisé, même si sa conductivité hydrauliques est au moins de 100 fois inférieure à celle de la pierre nette.

Cependant, les matériaux granulaires de bonne qualité comme la pierre nette 5/20 ou le sable drainant de type MG-112 sont des ressources non renouvelables et des solutions alternatives, aussi performantes devront être mise en pratique dans un avenir plus ou moins proche, selon la sensibilité environnementale des acteurs concernés.

5.3.3 Couche drainante à l'infrastructure CDI et masque drainant de rive MDR

Des applications de drainage horizontal, sous remblai et sur sol compressible, voient l'utilisation de matériaux alternatifs comme les géocomposites avec mini-drains (voir fig. 5.7 à 5.9).

D'une performance sous 100 kPa très proche de la pierre nette, et nettement plus performant qu'un MG-112, le géocomposite avec mini-drains présente l'avantage des géosynthétiques, tout en permettant un sens d'écoulement monodirectionnel dans le sens transversal, et permet ainsi une évacuation rapide de l'eau dans la fondation. Idéalement en remplacement de la couche granulaire de drainage, le matériau peut être placé en combinaison avec une couche granulaire de qualité médiocre (banc d'emprunt à proximité du site) pour en augmenter ces performances hydrauliques et répondre ainsi aux critères de dimensionnement.



Fig. 5.7 : Écran de rive ou drain latéral



Fig. 5.8 Exemple d'application d'un drain latéral



Fig. 5.9 Exemple de drainage horizontal sous remblai

5.3.4 Choix d'un système

Les dépôts meubles du Québec peuvent se résumer en quatre grandes catégories. Le tableau 5.1 propose des systèmes en fonction de la position de la nappe phréatique et de la nature du sol d'infrastructure.

Tableau 5.1 : Solution proposée en fonction de la perméabilité du sol d'infrastructure

Sol d'infrastructure	nappe élevée ¹	nappe basse ²
gravier	TDI	non requis
sable	TDI	non requis
silt, moraine silteuse	DL/ER + CD	DL/ER
argile, moraine argileuse	DL/ER + CD	DL/ER

1 : vient au niveau du terrain naturel ou dans la sous-fondation au printemps

2 : se maintient en tout temps sous le niveau inférieur de la structure de chaussée

5.4 Utilisation des géosynthétiques en drainage

Les matériaux granulaires traditionnellement utilisés pour la construction des routes, lorsque jugés inadaptés, de qualité et/ou performance insuffisante tendent à être substitués par des matériaux alternatif comme les géosynthétiques. Ces sont des textiles techniques essentiellement composés de polypropylène ou de polyester pour la majorité d'entres eux, et dans certain cas de polyéthylène.

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).

5.4.1 Comparaison entre géosynthétiques et matériaux granulaires

Le tableau 5.2 dresse la 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		
Risque de colmatage par :		
<ul style="list-style-type: none"> - activité bactérienne aérobie (colmatage ferrique) - précipitation des sels de déglacage, - particules fines des sols et granulats encaissants, - formation de glace dans la zone de pénétration du gel. 		
Points de différenciation		
Propriétés mécaniques et hydrauliques :		
Épaisseur	Élevée (> à 150 mm)	Faible (< à 30 mm)
Porosité	25-40%	75-95%
Capillarité (δ_c = ascension capillaire)	Parfois importante ($\delta_c < 500$ mm)	Faible ou nulle ($\delta_c < 50$ mm)
Résistance à la traction	Nulle	Peut être élevée
Compressibilité	Négligeable	Peut être élevée
Transmissivité (en fonction des contraintes)	Invariable	Parfois variable
Performance à long terme et durabilité :		
Durabilité	Complètement inerte	Sont altérés par les rayons ultra-violet
Risque d'endommagement	Aucun	Sujets au poinçonnement, à la déchirure
Maîtrise de la qualité des matériaux :		
Uniformité	Granulométries variables selon le banc d'emprunt	Propriétés contrôlées en usine, stables dans le temps
Facilité de mise œuvre et coût :		
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
Impact environnemental :		
Développement durable	Ressource non renouvelable	Ressource manufacturée

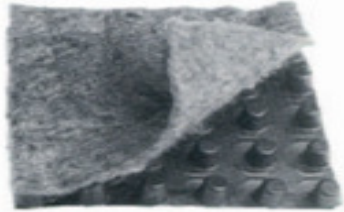



L'utilisation des géosynthétiques doit être faite dans un cadre professionnel, le choix des matériaux variant en fonction du projet, au même titre que des matériaux plus conventionnels.

5.4.2 Géosynthétiques de drainage disponibles sur le marché

Plusieurs solutions s'offrent au drainage vertical, que ce soit par l'utilisation de structure alvéolaire ou de géocomposite de drainage tri-couche ou de matelas à filaments. Par contre, le drainage horizontal est plus sévère en terme 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 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 les sols de 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, dans les couches de fondation. De nouveaux produits, comme les géocomposites de drainage avec mini-drains, sont des alternatives intéressantes pour ce type de drainage.

Plusieurs gammes de produits sont disponibles sur le marché. Chacune d'elle répond à des conditions spécifiques d'utilisation. Le tableau 5.3 présente la plupart d'entre elles.

Tableau 5.3 : Gamme de produits disponibles en drainage de chaussées

Type et structure	Description	Utilisation	Schémas
Structure rigide alvéolée	Âme drainante rigide composée d'une coque en PEHD ou en PP alvéolaire de 15 à 30 mm d'épaisseur, et recouverte d'un géotextile séparateur sur une ou les 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 tri-couche	Âme drainante de 5 mm d'épaisseur en PP ou PET 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	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 PET 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	

5.4.3 Facteurs à considérer

Dans le contexte des chaussées, différents aspects doivent être étudiés.

5.4.3.1 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. La courbe générale ci-dessous traduit assez bien la perte de transmissivité des géosynthétiques sous l'influence de la compression. À l'inverse des matériaux granulaires qui sont incompressibles (et donc gardent leur propriétés hydrauliques quelque soit la charge appliquée au dessus), les géosynthétiques se compriment sous l'effet de la charge, et leur porosité diminuant, la capacité drainante diminue de la même manière. La figure 5.10 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.

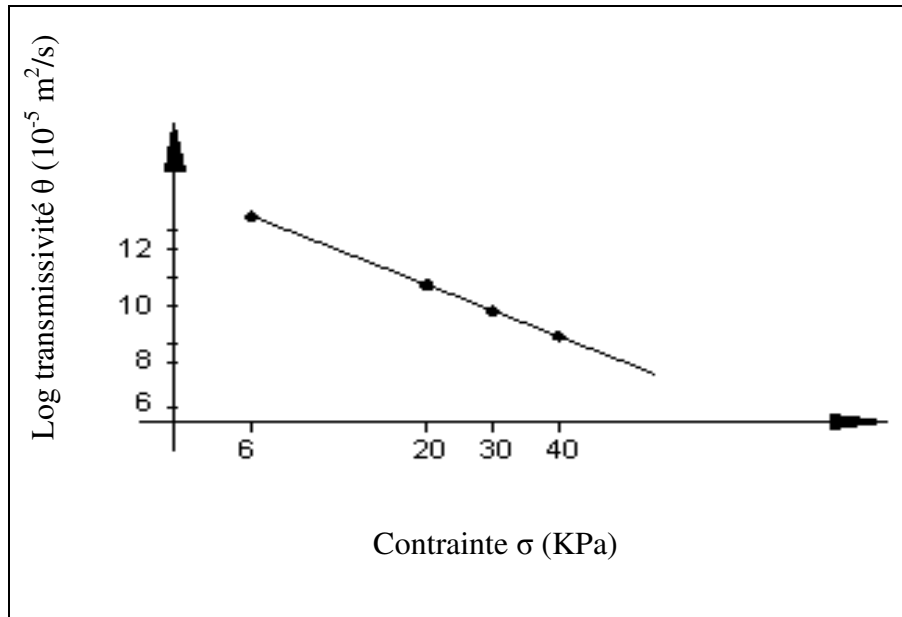


Fig. 5.10 : Variation de la transmissivité d'un géotextile non tissé en fonction de différentes contraintes de compression (Lafleur 1998).

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

Tableau 5.3 : Valeur de la transmissivité en m²/s

Gradient	Compression	Pierre nette (150 mm)	Drain tube (5 mm)	Sable (150 mm)
0,1	20 kPa	2,8*10 ⁻³	2,1*10 ⁻³	1,5*10 ⁻⁵
0,1	200 kPa		1,9*10 ⁻³	

On constate que les géocomposites avec mini drains présentent l'avantage de conserver une bonne transmissivité sous compression, à l'inverse des géosynthétiques plus conventionnels (un tricouche aura une transmissivité 200 fois inférieure à celle du sable sous 200 kPa).

Même sous 200 kPa, les géocomposites avec mini-drains restent 100 fois plus drainant qu'un bon sable. C'est pourquoi ces produits sont largement utilisés en drainage horizontal sous remblai sur sols compressibles.

5.4.3.2 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 à la traction, au poinçonnement et à la déchirure.

5.4.3.3 Pénétration de coulis de béton frais

Des essais ont été réalisés (Gonthier et al. 1997) sur des échantillons de géocomposites sur lesquels on a coulé une dalle de béton de 250 mm d'épaisseur. Le coulis ayant été vibré, et son affaissement au cône se situant entre 30 et 120 mm, les conditions appliquées sont donc considérées comme sévères. Malgré ces conditions, on a démontré que la performance hydraulique du géocomposite n'avait été que très partiellement affectée, le béton n'ayant pénétré à l'intérieur de l'âme drainante que de manière très superficielle.

5.4.3.4 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 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°C, pendant 30 jours à des débits variant entre 100 et 600 ml/min/m correspondant à ceux observés sur une planche expérimentale. Les résultats ont permis de conclure que pour une région où l'indice de gel est moins de 1200 °C-jour :

- le colmatage des géocomposites 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.

5.4.3.5 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 pour mémoire l'essai français NFG 38-020, 1998 (Cet essai a été remplacé en octobre 2000 par l'essai 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.

5.4.3.6 Ouverture de filtration

Le choix d'un filtre géotextile est fait à partir des critères donnés à la section 4. Pour les ouvrages courants, le Ministère des Transports du Québec (2003) requiert une ouverture maximale de 150 µm. 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 µm,
- soit d'interposer une couche de sable compatible avec l'argile (le critère de filtration est donné par la relation $D_{15\text{filtre}} < 5 * d_{85\text{sol}}$ entre l'argile et le géotextile et dimensionner dans ce cas l'ouverture de filtration du géotextile en fonction du sable.

5.5 Installation de conduites ou de drains

Considérant que le drainage souterrain est un art, et en se fiant à deux nouveaux ouvrages le démontrant soient le Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2005) ainsi que la norme BNQ 3624-540 Service de drainage agricole souterrain - Critères de qualité - Protocole de certification (BNQ, 2005), certains principes sont à éviter ou à respecter :

Les erreurs à ÉVITER :

- utilisation d'équipements de pose pour le petit diamètre (100 à 300 mm);
- creusement de tranchée de plus de 400 mm de largeur (ex : pelle avec godet de 1 mètre), le drain reposera ainsi sans appui avant le remblayage;
- Remblayage une tranchée avec un tuyau de drainage sans l'avoir préalablement bien appuyé de façon manuelle de chaque côté jusqu'à mi-diamètre;
- un compactage trop intense qui abîmera le drain et son efficacité.

Les principes importants à RESPECTER :

- exiger que les entreprises aient du personnel formé connaissant le drainage en milieu routier;
- exiger des entreprises spécialisées en drainage souterrain pour réaliser ces travaux conformément au devis de soumissions (BNQ 3624-540, 2005, *Service de drainage agricole souterrain- Critères de qualité, Programme de certification*, Éd. 1, 34 p.);
- impliquer les professionnels pour la conception et la compréhension des problèmes reliés à l'hydraulique des sols;
- s'assurer d'un bon protocole de travail pour l'installation et le remblayage du drain souterrain. Ce protocole assurera que les travaux subséquents ne viennent détruire le travail de drainage;
- bâtir et concevoir en collaboration avec les organismes compétents (MTQ, AEDAQ) un Guide de référence pour le drainage des fondations de chaussées et une norme d'installation pour le drainage routier;
- utiliser des équipements de pose reconnus dans les normes en vigueur 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);
- exiger une surveillance stricte par du personnel qualifié;
- s'assurer que le remblayage et le réglage respecteront les spécifications du fabricant pour la résistance à l'écrasement;
- s'assurer que les granulométries des matériaux sont conformes aux spécifications du fabricant de filtre;
- s'assurer que l'enveloppe filtrante est bien compatible avec les matériaux de remblai;
- prévoir des endroits pour nettoyer le drain si les tests ont démontré la présence d'ocre de fer;

En résumé :

Dans le cas d'une construction nouvelle, enlever le couvert végétal à la largeur de la route, la drainer après avoir vérifié la conductivité hydraulique du sol d'infrastructure, y installer les drains 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 de la fondation selon les spécifications du maître d'œuvre. Cette opération permettrait d'installer des drains sous la nappe phréatique et de l'abaisser le plus possible. Cette opération sera un succès si les collecteurs (fossé, couche drainante ou égout pluvial) sont assez profonds pour les recevoir.

ANNEXES : ÉTUDES DE CAS

A.1 MUNICIPALITÉ DE VERDUN

On a observé et évalué trois désordres d'importance dans certaines chaussées de Verdun, en relation avec les trottoirs, les cours d'eau et les zones de fortes sollicitations structurales. On a établi la relation entre les faits observés et le manque de drainage. Enfin, on relate le comportement observé des zones concernées après une intervention sur le plan du drainage.

A.1.1 Désordres observés

On a spécifiquement étudié trois types de désordres :

- renversement des trottoirs,
- stagnation de l'eau dans les cours d'eau,
- instabilité structurale des zones très sollicitées.

A.1.1.1 Renversement des trottoirs

Le renversement des trottoirs, tel que montré dans la figure A.1, est un phénomène habituel à Verdun, particulièrement dans la moitié sud de la « Terre ferme », limitrophe de la partie Nord de La Salle. Un trottoir neuf a généralement une pente longitudinale identique à celle de la chaussée donc variable de 0.5 à 1.5%, lui permettant d'offrir le même profil longitudinal que la ligne de centre de la rue et de ne pas gêner l'opération des portières d'automobile au voisinage des puisards.



Figure A.1 : Trottoir à pente inverse

En revanche, les pentes transversales des trottoirs sont de l'ordre de 2% vers la rue pour permettre l'écoulement des eaux vers le cours d'eau, sur les bords de la chaussée. Pour une raison inexplicée jusqu'en 1983, certains trottoirs présentaient une pente inverse à celle admise comme normale. Dans le cas de la rue Crawford, la liste des points effectuée lors d'un relevé topométrique montre que sur une longueur de tronçon d'environ cent mètres la pente des trottoirs

(côté nord et sud) variait de -2 à -6%, soit une différence réelle de 4 à 8% si on considère +2% comme la pente normale.

Une telle situation a toujours été dénoncée par les propriétaires riverains car :

- les automobilistes éprouvaient de la difficulté à opérer les portières de leur véhicule du fait que le trottoir « soulevé » accrochait le bas des portes;
- les piétons sentaient un réel inconfort car la forte pente négative les attirait vers la pelouse et ce phénomène était très accentué en période hivernale, car lors de pluie verglaçante dans ce quartier de retraités majoritairement, les personnes âgées n'arrivaient pas à circuler sur les trottoirs, pas plus d'ailleurs que les quelques mères de famille dont les landaus n'étaient plus contrôlables;
- le soulèvement des trottoirs entraînait des bris et des fissures très ouvertes et très dénivelées rendant les trottoirs impraticables.

A.1.1.2 Stagnation de l'eau dans les cours d'eau

Parallèlement au renversement des trottoirs, on a observé un autre phénomène non moins dommageable au niveau de la chaussée. Il s'agit d'un gonflement du revêtement d'asphalte localisé généralement sur les bords de la rue suivant un profil plus ou moins parallèle au trottoir à la bordure et illustré à la figure A.2. Dans quelques rares cas au voisinage de tranchées récentes effectuées par des compagnies d'utilité publique, il survient des gonflements perpendiculaires au trottoir.



Figure A.2 : Chaussée gonflée

Les déformations longitudinales et transversales ont eu pour effets :

- d'empêcher l'écoulement transversal des eaux de surface via le cours d'eau vers les puisards d'où accumulation et formation de flaques parfois étendues, cause d'aquaplanage et d'éclaboussement,

- de rendre difficile l'accès aux entrées de garage, aux descentes pour fauteuils roulants,
- d'augmenter la rugosité de la chaussée et de diminuer d'autant le confort au roulement des automobilistes,
- d'entraîner la fissuration de rive.

A.1.1.3 Instabilité structurale des zones très sollicitées

Un troisième phénomène consiste en la perte de capacité portante des sections fortement sollicitées aux arrêts d'autobus. On a dû remplacer dans les années soixante-dix, les zones d'arrêt d'autobus des rues du secteur desservies par le transport en commun, par des dalles de béton alors que le reste de la chaussée est flexible. De plus les puisards de ces rues étaient l'objet de réfection à intervalles de deux ans. Il faut cependant préciser que ce phénomène d'instabilité structurale était aussi observable dans les zones d'arrêt d'autobus situées au voisinage de certains parcs et autres grands espaces.

A.1.2 Relations entre les désordres observés

On a observé le renversement des trottoirs et bordures, la formation de gonflement du revêtement et l'instabilité structurale suivant une fréquence très élevée dans un quartier présentant quelques particularités. Les habitants du secteur et les vieux employés de Verdun mentionnaient souvent que le sol était de la « glaise »; en effet des analyses granulométriques effectuées sur des échantillons provenant de différents sondages dans le secteur et certains rapports de forage indiquent un sol argileux ou à tout le moins silteux, donc peu perméable. Par ailleurs, dans ce quartier dont le développement date de la fin de la Seconde guerre mondiale quand il a fallu loger les vétérans, la presque totalité des maisons sont du type cottage avec une grande cour en avant de la maison et souvent une belle pelouse entretenue comme un « green » de golf par leurs propriétaires pour la plupart de souche irlandaise, abondamment et régulièrement irriguée dans une ville où la taxe d'eau est fixe et où des compteurs d'eau ne sont pas installés.

✚ Tableau A .1 – Granulo sol Crawford Park

Toutes les observations prises séparément ou dans leur totalité ne sont-elles pas dues à un manque de drainage longitudinal des eaux provenant de ces cours avant?

Dans le cas d'une chaussée non drainée (figure A.3) l'accumulation d'eau sous le bord de la chaussée au droit du nez du trottoir, en présence d'un sol d'infrastructure peu perméable, est permanente; avec l'arrivée des grands froids l'eau résiduelle gèle, augmente de volume et exerce des pressions énormes sous l'avant du trottoir qui se soulève d'où pente inverse et fissuration.

✚ Figure A.3 – Chaussée, non drainée coupe transversale montrant le trajet et l'accumulation d'eau sans le trottoir.

Une partie de cette eau sous le bord de la chaussée est sujette à la même expansion d'où soulèvement de la chaussée même si elle est en béton armé.

Dans les zones d'arrêt c'est au dégel que cela se passe; les fondations perdent de leur capacité structurale et le sol support de sa capacité portante d'où instabilité et affaissement.

A.1.3 Drainage longitudinal

Une fois le diagnostic effectué et l'hypothèse émise, on a procédé à un banc d'essai et on a observé le comportement dans le temps. On a alors décidé d'agir sur deux plans :

- d'abord ralentir la vitesse de percolation de ces eaux parasites;
- ensuite capter ces eaux et les acheminer dans le réseau d'égout.

A.1.3.1 Ralentissement de la vitesse de percolation des eaux parasites

La figure 7.3 représente une coupe transversale d'une chaussée urbaine non drainée: les eaux indésirables transitent de la pelouse via le support en pierre nette 20 mm et viennent s'accumuler sous le nez du trottoir ou de la bordure juste devant le sol d'infrastructure imperméable. La couche de pierre nette servant de lit au trottoir est un milieu hautement perméable dont le coefficient de perméabilité k est de l'ordre de 10^{-2} m/s ou davantage.

Pour ralentir la vitesse de percolation de ces eaux, on a choisi comme lit de trottoir, un matériau plus compact comme une pierre concassée 0-20 mm compactée à 95% de la densité maximale et dont le coefficient k est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Cette première intervention contribue à contrôler la vitesse d'arrivée des eaux dans le système d'évacuation, évitant ainsi d'autres problèmes reliés à la capacité du réseau d'égout, et aussi à ne pas drainer trop rapidement la pelouse des propriétés riveraines en plus de réduire les risques d'érosion interne des couches végétales.

A.1.3.2 Captage des eaux et acheminement vers le réseau d'égout

Une fois prise la décision de capter les eaux provenant du ruissellement latéral il ne restait plus qu'à dimensionner le drain longitudinal qui serait composé essentiellement en section courante d'une tranchée drainante constituée de pierre nette protégée par une enveloppe géotextile perméable pour éviter le colmatage et les risques de contamination, selon la figure P-1; au voisinage des puisards une conduite perforée est ajoutée pour faciliter l'écoulement du drain vers le puisard. Le débit d'eau à drainer est calculé selon la méthode conventionnelle d'hydrologie (formule rationnelle) pour une pluie d'intensité maximale d'après Dorval. La section du drain longitudinal est calculée pour offrir une capacité suffisante, en supposant un drain fonctionnant aux deux tiers de sa capacité réelle et un pourcentage de vides voisin de 15% dans la couche de pierre nette.

Les sections du drain dans la plupart des cas variaient de 300 à 450 mm, sauf dans un cas où la section rectangulaire devait être de 300 mm x 700 mm.

Ce procédé a été utilisé à quelques reprises à titre d'essai; il s'agit des rues suivantes :

RUE	TRANSVERSALE (1)	TRANSVERSALE (2)
Clémenceau	Ouimet	Churchill
Lloyd George	Ouimet	Churchill
Ouimet	Clémenceau	Foch
Dunver	Crawford	Fin

Cependant, il nous est arrivé à la rue Crawford un cas où un drain longitudinal même de largeur réduite aurait été difficile à utiliser à cause de l'encombrement souterrain; d'un côté de la rue une conduite de distribution de gaz longeant pratiquement le trottoir créait un obstacle à peu près incontournable, c'est alors qu'on pensa à l'écran drainant (figure A.4); le principe était le même à partir du moment où le drain de pied avait la capacité suffisante pour drainer les eaux latérales, l'installation du système posait peu de problèmes pratiques et le rapport qualité-prix était acceptable.

 **Figure A.4 – Coupe du drain longitudinal et en travers**

A.1.4 Comportement à long terme des rues drainées

Au départ, on s'était fixé une période d'observation de cinq ans correspondant au temps d'amortissement de l'investissement effectué pour corriger la situation. Des relevés visuels annuels ont permis de constater que de 1984 à 1989, aucun des trois désordres observés avant la construction des drains n'avait resurgi.

Au cours de l'été '90, on a procédé au relevé topométrique des sections traitées. Tel que prévu, les trottoirs n'avaient pas bougé, leur niveau étant demeuré identique à celui du profil de la ligne de centre. Les bourrelets avaient fondu et les zones d'arrêt d'autobus asphaltées et non bétonnées avaient retrouvé leur stabilité.

Cependant une question demeure ouverte : quand ces drains vont-ils se colmater? Les plus âgés ont déjà 16 ans; nos chaussées étant prévues pour vingt ans, nous avons théoriquement encore quatre années d'angoisse.

Les problèmes posés ont été résolus de façon simple, traditionnelle et peu coûteuse. On n'avait rien inventé; on a tout bonnement appliqué des méthodes connues pour résoudre un problème technique courant. On a mis en pratique une recommandation que les géotechniciens routiers mettent en pratique depuis une cinquantaine d'années.

Est-ce à dire qu'on doit drainer à outrance, quels que soient le milieu ou les conditions? Évidemment non, même si à Verdun, au vu et au su des résultats obtenus, depuis 1985 l'installation du drainage latéral fait partie des normes de construction et de reconstruction de rues et trottoirs; c'était une exigence des autorités administratives et politiques, pour une fois qu'on n'a pas eu à se battre pour les en convaincre.

On draine bien sûr quand il y a de l'eau et que des effets néfastes sont susceptibles de se manifester; on ne péchera jamais par excès de prudence mais les situations doivent être analysées

au cas par cas comme toujours en sciences appliquées, évaluées, diagnostiquées et résolues de préférence avant l'occurrence des dégâts, de façon sécuritaire et économique.

Cette présentation a pour objet d'illustrer, à l'aide d'exemples vécus, la performance des systèmes ont été constatés et, après analyse, reliés à la même cause, il s'agit de :

- l'insécurité de certaines sections de trottoirs provoquée par le soulèvement de la partir avant, provoquant un inconfort aux usagers et l'impraticabilité lors de verglas;
- la stagnation des eaux de ruissellement sur les bords des chaussées suite au gonflement du revêtement d'où aquaplanage, inconfort au roulement et accès difficile aux entrées de garage;
- l'instabilité de la structure de chaussée dans les zones d'arrêt d'autobus.

On a de plus observé une fréquence plus élevée de ces phénomènes dans un secteur de la Ville où le sol était reconnu pour être argileux en général ou silteux dans certains cas.

On a émis l'hypothèse d'un manque de drainage. Deux sections ont été choisies pour être l'objet d'un drainage longitudinal et deux types de drains latéraux ont été utilisés.

Les résultats positifs obtenus ont été tellement convaincants que l'installation du drainage latéral est devenue une norme pour la construction des chaussées à Verdun.

- ✚ **Coupes-types des planches expérimentales**
- ✚ **photos des planches en cours de réalisation**

A.2 MUNICIPALITÉ DE LASALLE – CHAUSSÉE EXPÉRIMENTALE

Dans le cadre d'un projet expérimental conduit en partenariat avec la municipalité de LaSalle, des drains de rive ont été installés sur huit sections de chaussée continues, tandis qu'une neuvième est demeurée sans drainage afin de servir de référence. Un type de drain différent a été installé sur chacune des sections de la chaussée expérimentale. Ceux-ci sont décrits dans le Tableau 1.

Chaque structure de chaussée était identique, d'une épaisseur totale de 625 mm. On peut trouver les renseignements complets concernant le site, les fondations de la chaussée et les matériaux géosynthétiques dans les rapports de projet rédigés par Mlynarek et al. (1997, 1998a et 1998b) et disponibles auprès du Ministère des Affaires Municipales, de la Ville de LaSalle ou du groupe CTT.

A.2.1 Instrumentation

Chacune des sections de chaussée a été équipée de différents instruments ayant permis de suivre le comportement des matériaux :

- Sondes TDR, installées pour surveiller les variations de teneur en eau dans les matériaux de fondation ;

- Piézomètres (de type à tube ouvert);
- Tubes de gel, permettant d'évaluer la profondeur de pénétration du gel ;
- Mesures manuelles de débit aux exutoires de drains dans les puisards ;
- Pluviomètre.

La fréquence de suivi était modulée selon la période de l'année, les conditions météorologiques, et quelques événements environnementaux spécifiques (travaux de construction additionnels, orages prévus, etc.).

Table 1 (1/3) : Experimental sections properties

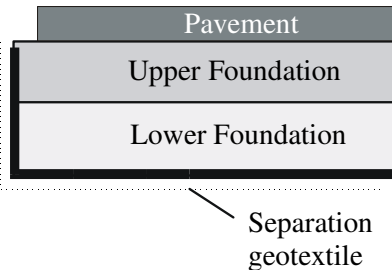
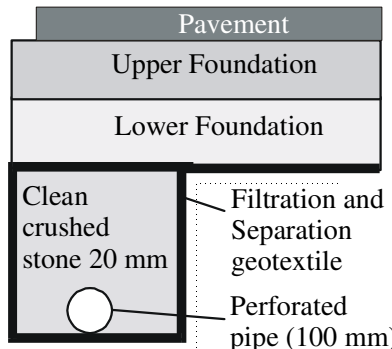
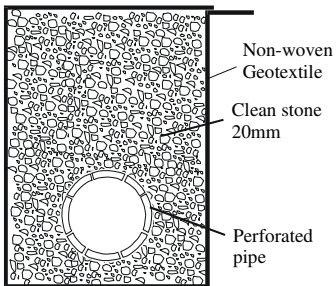
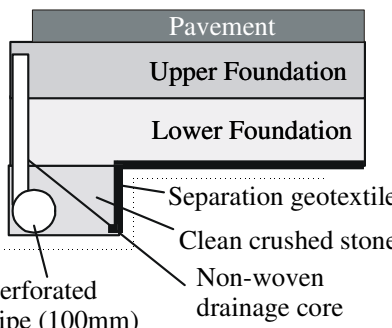
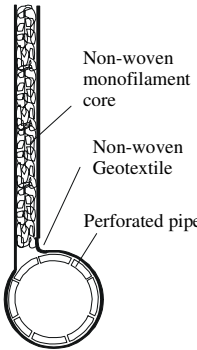
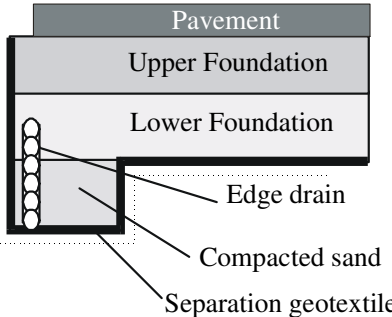
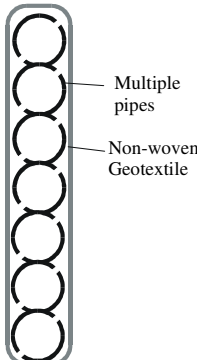
Section	Tested product	Product cost (CAN\$/lm)	Typical cross-section	Drain section
1	None (reference section)	/		None
2	French drain : Non-Woven Geotextile, FOS = 55-80 μ m Clean crushed stone, perforated pipe to connect drains to outflow. Trench : 300 mm x 250 mm	Geotextile : 6.15 to 1.26		
3	Draincotex height : 400 mm with 100 mm perforated pipe Trench : 300 mm x 250 mm	5.90		
4	Multiflow height : 300 mm Trench : 300 mm x 250 mm	10.99 to 12.80		

Table 1 (2/3) : Experimental sections properties

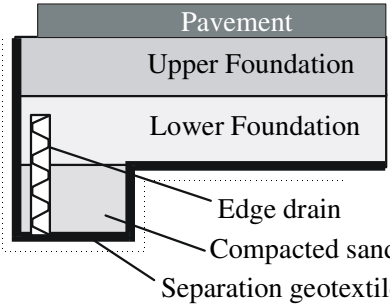
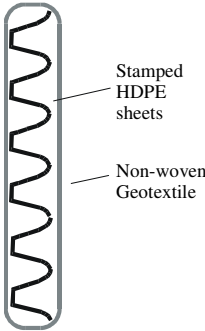
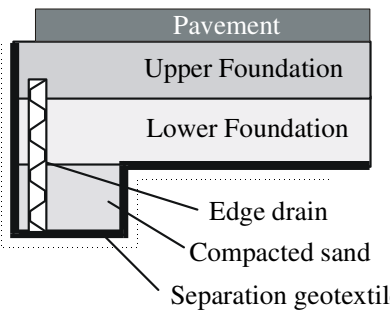
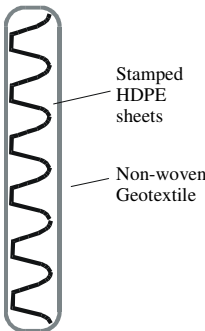
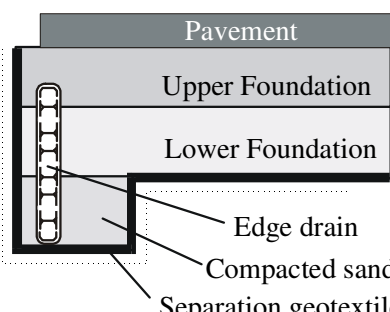
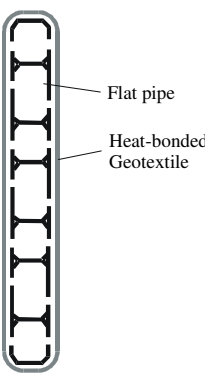
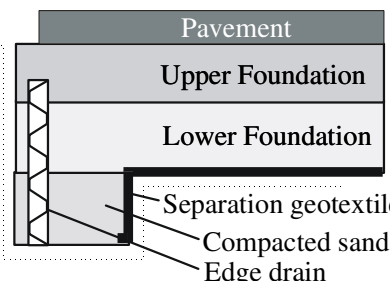
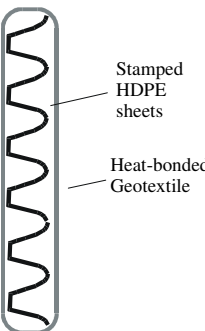
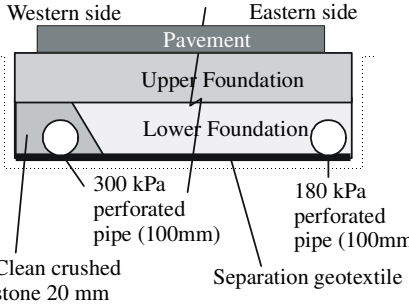
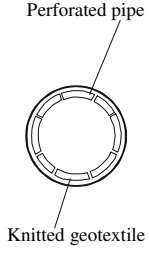
<p>5</p> <p>Soldrain 4000 height : 300 mm</p> <p>Trench : 300 mm x 250 mm</p>	<p>6.57 to 7.10</p>		 <p>Stamped HDPE sheets</p> <p>Non-woven Geotextile</p>
<p>6</p> <p>Soldrain 4000 height : 450 mm</p> <p>Trench : 300 mm x 250 mm</p>	<p>6.83 to 7.59</p>		 <p>Stamped HDPE sheets</p> <p>Non-woven Geotextile</p>
<p>7</p> <p>ADS Flatpipe height : 450 mm</p> <p>Trench : 300 mm x 250 mm</p>	<p>11.00</p>		 <p>Flat pipe</p> <p>Heat-bonded Geotextile</p>
<p>8</p> <p>Alidrain height : 450 mm</p> <p>Trench : 300 mm x 250 mm</p>	<p>6.00</p>		 <p>Stamped HDPE sheets</p> <p>Heat-bonded Geotextile</p>

Table 1 (3/3) : Experimental sections properties

9	Perforated pipe d = 100 mm East side : 180 kPa West side : 300 kPa	1.42 3.59		
---	---	--------------	--	---

A.2.2 Comportement de drains de rive géosynthétiques durant une pluie d'orage

La réponse des drains à une intense pluie d'été a été surveillée durant un orage électrique le 25 août 1998, dans la région de la chaussée expérimentale. L'intensité de la pluie et son volume total ont été mesurées avec un compteur de pluie, installé sur une surface plane contiguë à la chaussée. Durant l'événement, tous les instruments ont été utilisés pour mesurer et analyser le temps de réponse des drains ainsi que le comportement hydraulique des fondations de la chaussée.

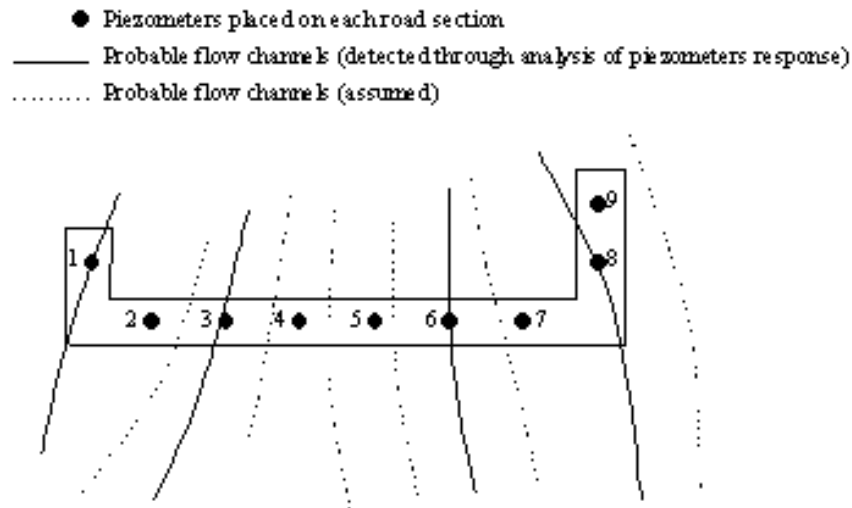


Figure A.1. Circulation hypothétique de l'eau dans la chaussée

A.2.3. Caractéristiques de l'orage électrique

56 mm de pluie sont tombés sur la structure de la chaussée et les jardins environnants durant 6.8 heures, avec une intensité moyenne de 8.2 mm/h, et un pic d'intensité enregistré d'environ 85 mm / heure. Les données sur la pluie recueillies durant cet événement sont regroupées dans la in Figure 2.

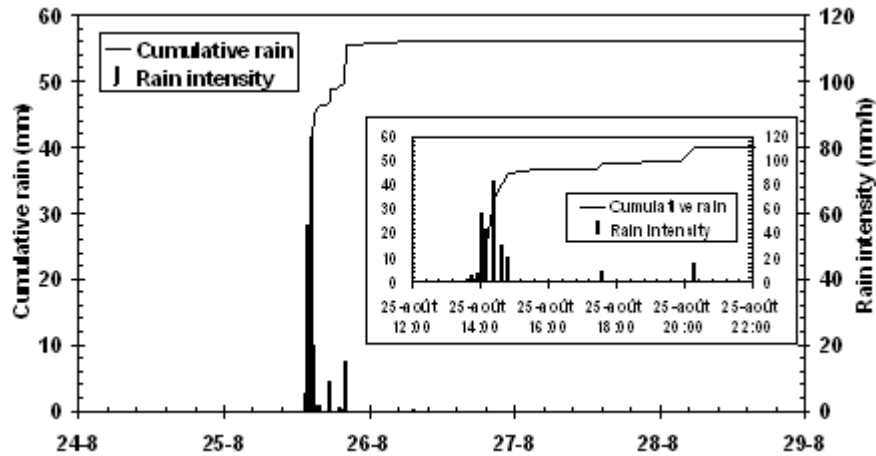
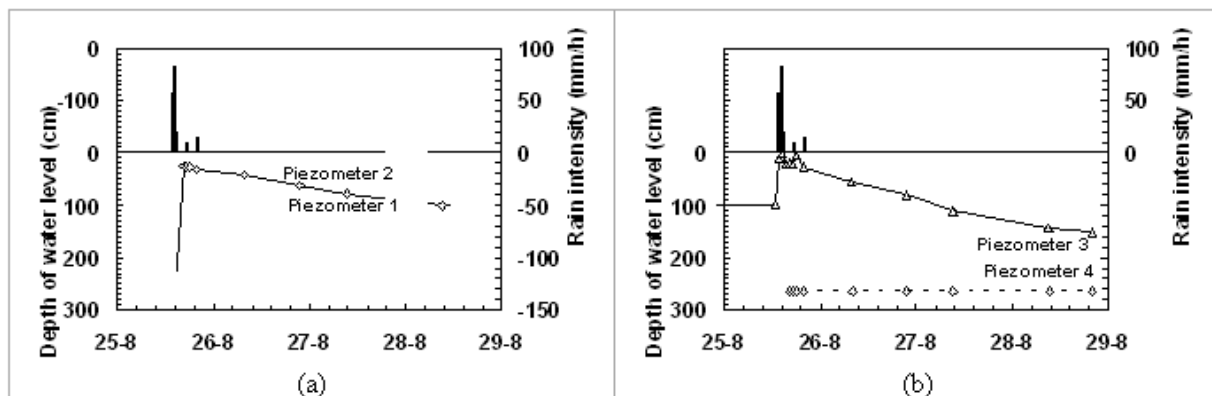


Figure A.2. Pluies enregistrées

A.2.4 Réponse des piézomètres

Un exemple de réponse des piézomètres à la pluie est illustré dans la Figure 3. Cette figure permet notamment d’observer le caractère erratique de la réponse des piézomètres. On peut également noter que, trois jours après l’averse, quelques-uns des piézomètres ne sont toujours pas revenus à leur niveau précédent.

Ces observations ont permis de suggérer que l’eau circule suivant des canaux d’écoulement préférentiels dans le sous-sol de la chaussée. Le comportement observé dépend alors essentiellement de l’emplacement du piézomètres: si il croise un de ces canaux, on observe une augmentation rapide, suivie d’une diminution de vitesse variables. Par contre, si ils sont localisés dans une zone ‘morte’, ceux-ci ne sont pas affectés par l’averse.



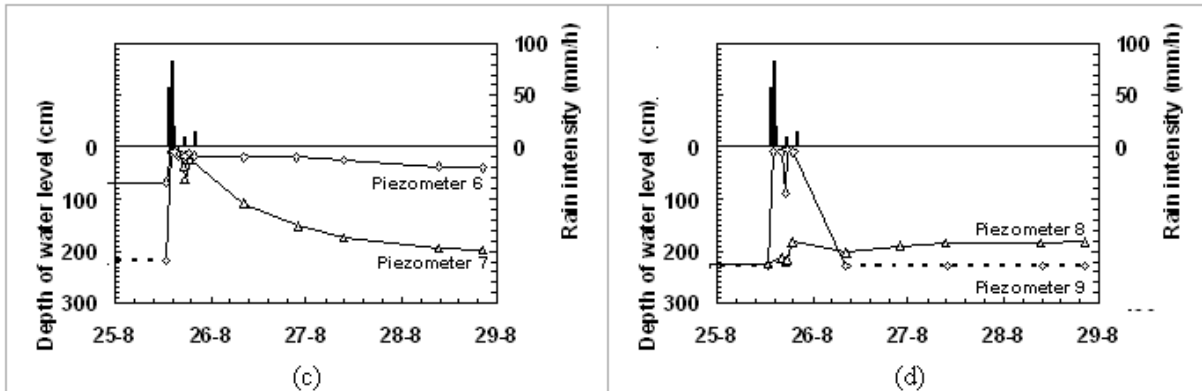


Figure A.3: Exemples de niveaux piézométriques

A.2.5 Débit d'eau

La réponse des drains a été mesurée à l'exutoire de chaque section. Une décharge maximale de 57 litres par minute a été enregistrée dans la section 7, pour une section de chaussée de 30 mètres de long. Ceci approche 2 litres/minute/mètre linéaire de drain pour l'averse décrite plus haut.

Tous les drains de rive ont démontré une bonne réponse à l'arrivée de l'eau, tel que présenté à la figure 4. On peut notamment observer un certain décalage temporel de la réponse des drains : moins d'une heure sépare un changement dans l'intensité de la pluie et le changement équivalent dans le débit de l'eau. Ce phénomène peut être observé au début de l'averse vs le début de l'écoulement dans les drains, tout comme le pic d'écoulement enregistré vs le pic de l'averse.

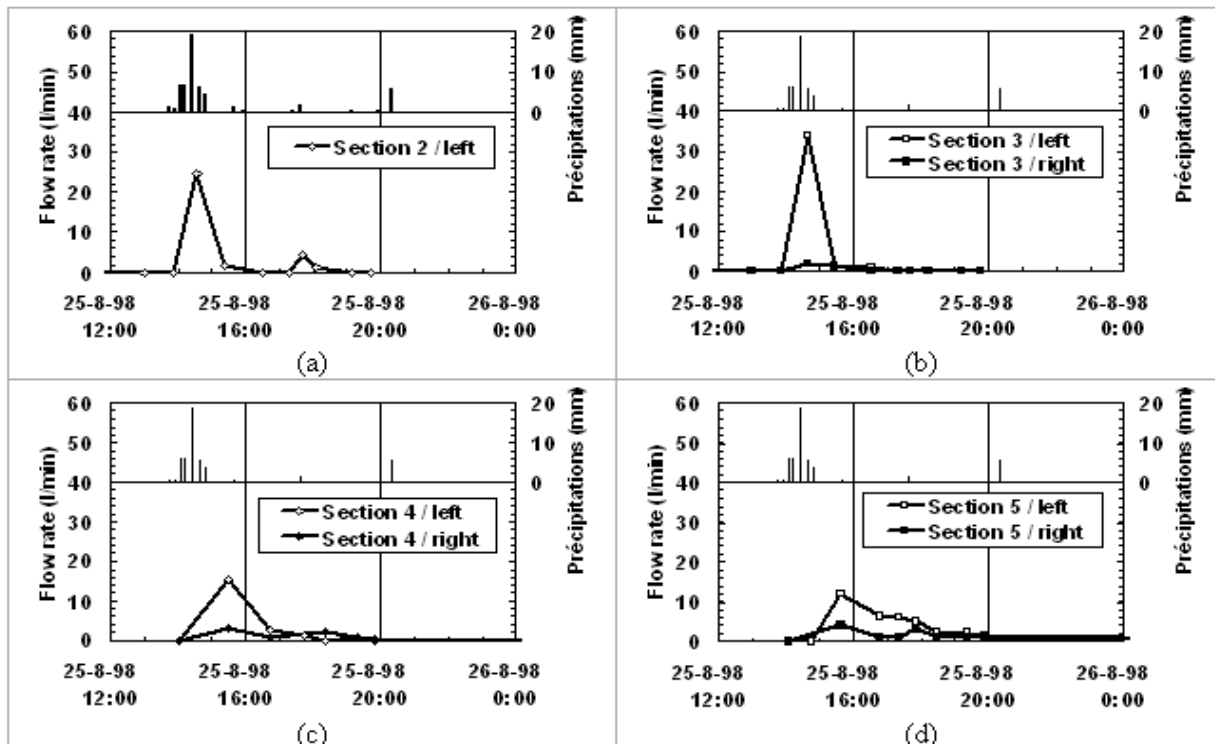


Figure A.4: Débits enregistrés

A.2.6 Réponse de la fondation de la chaussée

Les variations de teneur en eau, telle que mesurée à l'aide des cellules TDR dans les neuf sections sont présentées à la Figure 5. Ces figures montrent la variation de teneur en eau relative à la teneur en eau enregistré le jour précédant la pluie $[(w_f - w_i) \times 100 / w_i]$.

La Figure 7 montre une augmentation significative de la teneur en eau dans la plupart des sections expérimentales. Quelques-unes des sections n'ont montré aucune variation (sections 4 et 9), et quelques sections drainées (section 6, 7) montrent avec le temps une diminution lente du contenu d'eau.

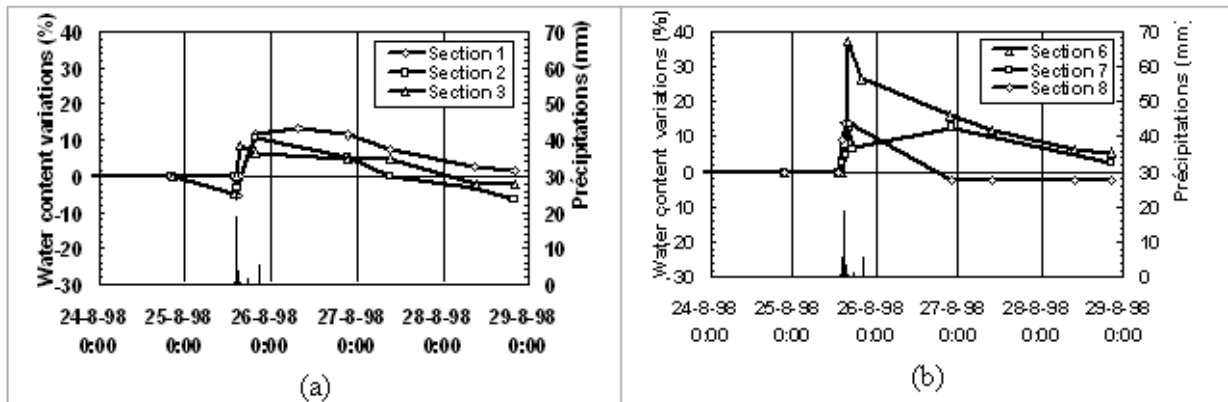


Figure 5: Variations de teneurs en eau enregistrées

A.2.7 Discussion

Après trois ans de service, aucune fissure significative n'avait été observée sur le revêtement. Aussi, la plupart des décharges mesurées et des variations de teneur en eau peuvent être considérées comme étant associées à l'entrée d'eau dans la chaussée depuis le sol support, ou bien par les côtés, ou bien par le dessous de la structure de la chaussée.

A.2.7.1 Débit d'eau

L'observation des débits des drains a montré que le débit d'eau n'est pas relié aux propriétés du drain, mais plutôt à l'entrée d'eau à partir du sol. Ainsi, pour les sections expérimentales évaluées de 30 mètres de longueur, tous les drains avaient une capacité plus élevée que celle requise au cours de l'averse surveillée. Par contre, l'arrivée d'eau était variable selon les sections d'essai, du fait de l'hétérogénéité du sol mise en évidence lors de l'observation des mesures piézométriques.

De plus, des débits d'eau très élevés ont été mesurés, ceux-ci dépassant largement ce qui aurait pu être calculé en considérant la conductivité hydraulique du sol mesurée en laboratoire et un écoulement uniforme. Ceci a permis de confirmer la présence de chemins préférentiels à l'intérieur du sol, qui transportent un très large volume d'eau vers les drains.

A.2.7.2 Réponse de la fondation de la chaussée

La variation de teneur en eau des fondation est liée à l'entrée d'eau dans la chaussée ainsi qu'à la capacité du sol à être drainé. Ainsi, l'augmentation de la teneur en eau observée est un indicateur de la quantité d'eau accédant à la fondation, soit à travers les côtés, soit à travers le fond de la structure routière. Ainsi, il semble que pour une pluie aussi abondante que celle qui fut suivie, le manqué de drainage horizontal a pu affecter la teneur en eau observée dans la fondation de la chaussée.

A.2.7.3 Connexion des réseaux d'un édifice résidentiel après l'installation des drains

Longtemps après avoir complété les observations décrites dans le chapitre précédent, il s'est avéré nécessaire de connecter un nouvel édifice aux services municipaux installés sous la chaussée. Cette installation a exigé l'excavation d'une tranchée de 2.0 mètres de largeur entre l'édifice et les lignes de service. Au cours de cette intervention, les drains de rive ont été coupés et il a été nécessaire de développer une technique de réhabilitation pour le drain lui-même, en plus d'une réhabilitation de la chaussée.

Trois techniques ont été définies comme étant susceptibles de convenir afin de maintenir la continuité hydraulique du drain :

- Installation d'une nouvelle section du même drain de rive;
- Installation of d'une volume important de pierre nette enveloppée dans un géotextile;
- Installation de tout type de tuyau de drainage enveloppé dans un géotextile, en remplacement du drain de rive original.

Dans la mesure où la chaussée était un site expérimental suivi dans le cadre d'un projet supervisé par la municipalité, la solution choisie a été la première technique. Cependant, la deuxième et la troisième solutions pourraient s'avérer devenir des méthodes plus pratiques à long terme du fait de la disponibilité des matériaux associés : de la pierre nette et du géotextile sont toujours disponibles dans un garage municipal, ce qui ne sera pas forcément le cas d'un drain de rive.

A.2.8 Conclusions

Dans le cadre de ce projet, on a pu observer que :

1. L'eau peut s'écouler dans le sol à travers des chemins et des canaux localisés, qui sont distribués au hasard dans les discontinuités du sol. Ce type de comportement devrait être considéré avec une attention particulière dans les zones en remblai, ainsi que sur les sols à granulométrie étalée, car ils peuvent créer des conditions de drainage très critiques pour les structures routières.
2. Les débits d'écoulement maximums enregistrés lors d'une pluie d'une intensité moyenne de 8.2 mm/h durant 6.8 heures étaient aussi élevés que 2 litres / minute / mètre linéaire de drain.
3. Les réactions des drains ont été très rapides et variables d'un secteur à l'autre. Celles-ci ont pu être reliées au fait que l'eau s'écoule de façon erratique dans les discontinuités du sol. Ce comportement suggère la nécessité d'installer des drains de rive dans chaque structure routière, afin de couper l'entrée de l'eau dans les fondations de la chaussée.

4. Les drains de rive permettent d'accélérer l'évacuation de l'eau de la structure de chaussée.
5. Si un drain de rive devait être coupé pour effectuer l'entretien d'un service municipal, il est possible de le réparer en utilisant une technique très simple et accessible aux cols bleus.

A.3 MUNICIPALITÉ DE SAINT-HYACINTHE - DRAINAGE ET RENFORCEMENT À L'AIDE DE GÉOSYNTHÉTIQUE

A.3.1 Description de la chaussée expérimentale

Trois sections de 100 mètres d'une chaussée municipale supportant un trafic lourd (Figure 6) ont été construites sur la rue Martineau, dans la municipalité de Saint-Hyacinthe. Deux des sections comportaient des drains latéraux et un géotextile, tel que décrit à la figure 7, tandis que la troisième respectait les méthodes de construction conventionnelles afin d'offrir une référence.

Toutes les structures comportaient 100 mm d'enrobé bitumineux, installé sur 450 mm de MG20. Les différences entre les trois structures expérimentales n'apparaissent que sous la fondation de la chaussée (Figure 7).

Les propriétés sélectionnées des différents géosynthétiques installés dans les sections expérimentales 2 et 3 sont présentées dans le Tableau 2.



Figure 6: rue Martineau

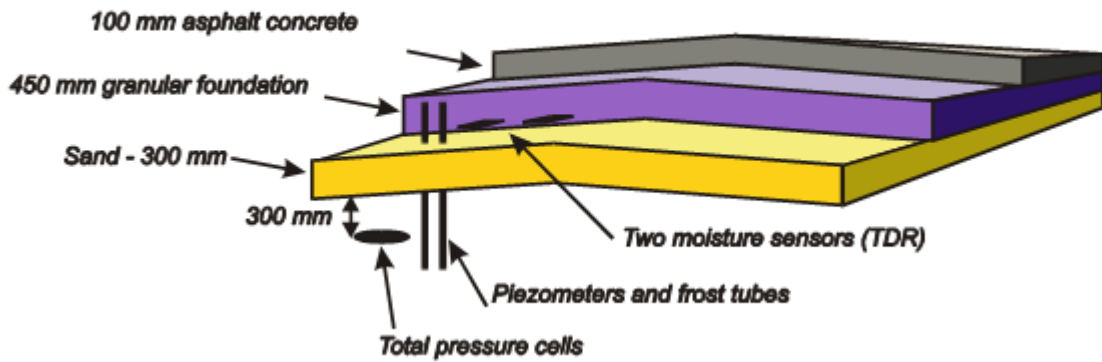
Table 2 : Propriétés sélectionnées des géosynthétiques utilisés dans le projet la rue Martineau

Road section	2	3	2 et 3
Product	Separation geotextile	Reinforced separation geotextile	Edge drain
Structure	Needle-punched non-woven	Needle-punched non-woven with woven reinforcement	Multi-layered needle-punched non-woven
Unit weight (g/m ²) CGSB 148.1 - 2	257	352	157 ⁽¹⁾
Permittivité (s ⁻¹) CGSB 148.1 - 4	1.7	0.39	3.2 ⁽¹⁾
Transmissivité 20kPa (m ² /s) ASTM D4716	4.2 x 10 ⁻⁶	5.8 x 10 ⁻⁶	1.5 x 10 ⁻⁴
FOS (µm) CGSB 148.1 - 10	85.5	N/E	181 ⁽¹⁾
Grab strength (N) CGSB 148.1 - 7.3	940.8	909.8	462.8 ⁽¹⁾
Elongation at break (%)	46.3	35.7	67.1 ⁽¹⁾
Puncture res. (N) ASTM D4833	618.2	650.5	284.3 ⁽¹⁾
Tear res. (N) CAN 4.2 - 12.2	435.7	411.3	188.7 ⁽¹⁾

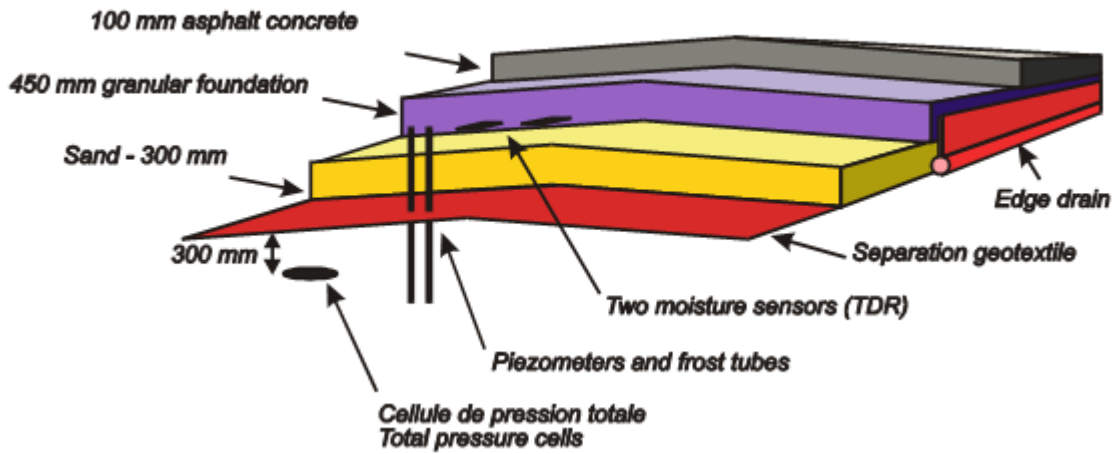
⁽¹⁾ : filter only

Le suivi des trois sections de chaussée a été réalisé durant l'été 1996, à l'aide de différents équipements enfouis : teneur en eau (sondes TDR), pression totale, température, piézomètres, tubes de gel). Les variations de niveau de la surface de la chaussée ont été également enregistrées de façon périodique, et la capacité structurale a été mesurée à l'aide d'un déflectomètre Dynaflect. Après 2 années de service, une tranchée d'observation a été creusée. Un échantillon de géotextile renforcé a été extrait pour analyses ultérieure au laboratoire.

Section 1 (standard)



Section 2



Section 3

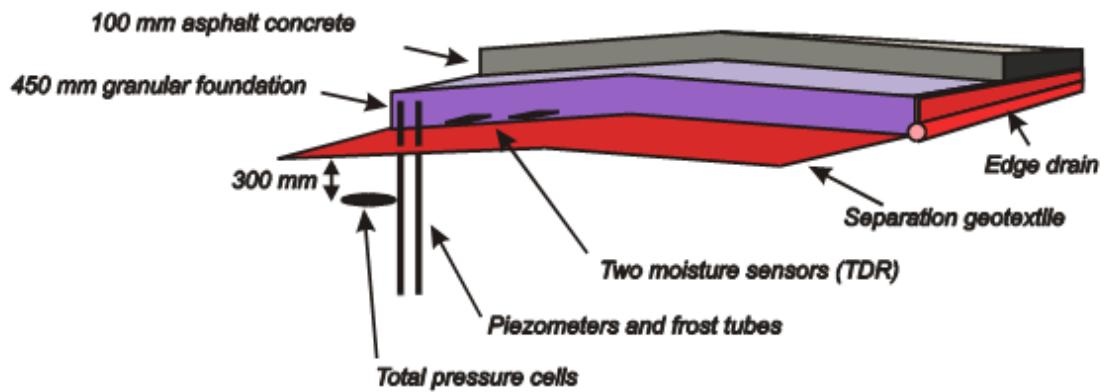


Figure 7: Structures expérimentales

A.3.2 Comportement de la fondation de la chaussée

A.3.2.1 Teneur en eau de la fondation

Le suivi de la teneur en eau des matériaux de fondation a permis de mettre en évidence que le printemps est la période la plus critique de l'année pour les fondations des chaussées. Tel qu'observé à la Figure 8, la teneur en eau de la fondation de chaussée non drainée (section de contrôle) augmente de façon significative à cette période de l'année. Ce phénomène peut être relié à l'accumulation de neige sur les terrains contigus et sur les épaulements (Figure 6). Cette neige fond rapidement dès que la température de l'air dépasse zéro degrés, libérant de l'eau liquide qui peut alors s'infiltrer dans la structure de chaussée.

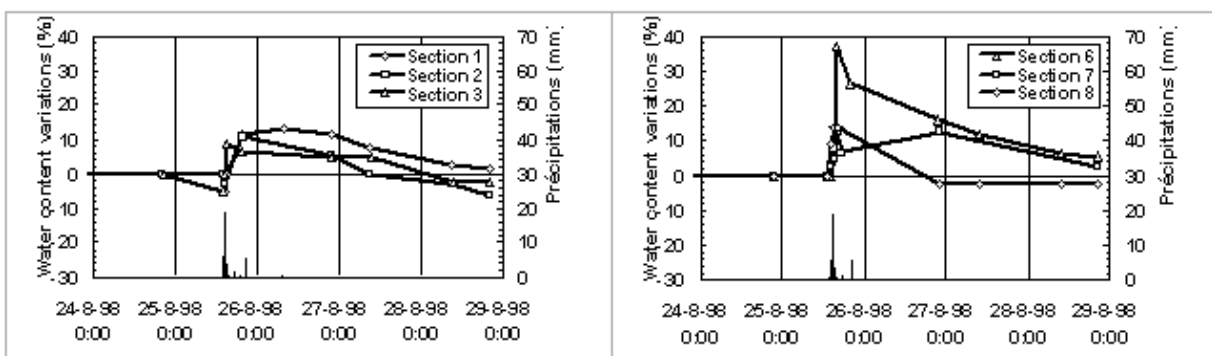


Figure 8: Teneur en eau des matériaux de fondation

Sur la Figure 8, on peut observer l'influence des différentes structures de drainage sur la teneur en eau de la fondation de la chaussée :

- L'absence d'un système efficace de drainage (section de contrôle 1) engendre une importante augmentation du contenu d'eau dans la structure de la chaussée au printemps.
- Les drains de rive, utilisés comme seul système de drainage dans la fondation de la chaussée (section 3), réduisent de façon substantielle cette augmentation de teneur en eau printannière;
- Les drains de rive, associés avec la couche horizontale de drainage faite de sable (section 2), permettent d'éviter complètement l'augmentation printannière de teneur en eau dans la fondation de la chaussée.

L'analyse de ces résultats permet de conclure que:

- Le drainage de la couche de sable de 300 mm d'épaisseur peut être amélioré de façon significative avec l'addition de drains de rive le long du sous-bassement de la chaussée.;
- La couche de sable de 300 mm d'épaisseur peut être remplacée de façon avantageuse par des drains de rive situés à côté des matériaux de la fondation de la chaussée, en autant que la structure de la route soit protégée adéquatement contre la contamination par un géotextile de séparation.

A.3.2.2 Pénétration du gel

Les températures, enregistrées à 300 mm sous la structure de la chaussée, sont présentées sur la Figure 10. Ces résultats indiquent que la pénétration du gel dans le sous-sol est similaire pour les sections 1 (design conventionnel) et 3 (drainé, sans sable). Par contre, le sol support situé sous la section 2 (sable drainé) souffre de variations de température plus grandes : il gèle plus rapidement au début de l'hiver et dégèle plus rapidement au printemps.

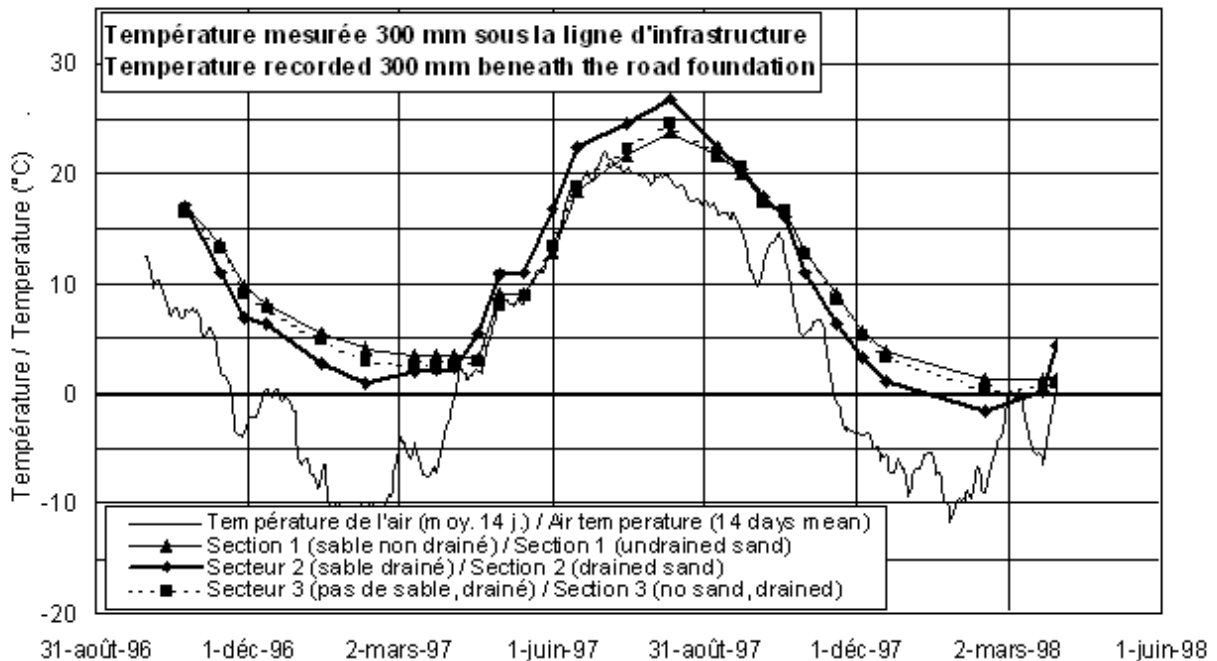


Figure 10: Température à 300 mm sous la fondation de la chaussée

Cette observation peut être reliée à la chaleur latente des matériaux du sol, et à la variation de cette propriété avec la teneur en eau des sols : un sable présentant une faible teneur en eau offre une piètre barrière thermique en comparaison avec un sable ou une argile saturé.

Ainsi, il est possible de conclure que :

- Une couche de sable non drainé de 300 mm d'épaisseur n'est pas suffisante pour protéger contre le gel un sol support avec les conditions climatiques observées à Saint-Hyacinthe. L'absence de cette couche ne modifie pas de façon significative la température du sol support à 300 mm sous la fondation de la route, que celle-ci comporte une couche de sable ou non.
- Le fait de drainer la couche de sable réduit la protection contre le gel du sol support.

A.3.3 Conclusion

Les tableaux 4 et 5 présentent le résumé des conclusions obtenues durant les deux années de suivi des chaussées expérimentales.

Table 3: Comparaison des comportements des trios types de sous-fondation

Section	1	2	3
Type de sous-fondation → Aspect considéré ↓	300 mm de sable (section de contrôle)	Géotextile de séparation, sable et drains de rive	Géotextile de séparation renforcé et drains de rive
Mécanique / structural	Les trois structures ont une fonctionnalité similaire		
Drainage	insuffisant	Bon	Bon
Protection contre le gel	Insuffisant		

Table 4: Influence des différentes composantes

Influence de → sur ↓	300 mm de sable	Drains de rive	Géotextile de séparation	Géotextile de séparation renforcé
Comportement structural	(Référence)	N / A	N / A	Peut remplacer 300 mm de sable (1)
Drainage	Insuffisant sans drains de rive	bon (excellent avec sable)	N / A	N / A
Protection au gel	faible (+ réduite par le drainage)	N / A	N / A	N / A

N / A: Non applicable

⁽¹⁾ : avec les conditions spécifiques de ce projet.

Les drains de rive sont des outils permettant de réduire l'infiltration d'eau dans la chaussée, particulièrement durant le printemps lors de la fonte des neiges. Ils contribuent ainsi à la réduction de la formation de nids-de-poule et limitent les pertes de capacité portante observées au printemps.

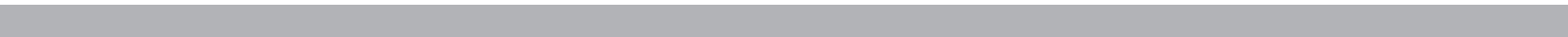
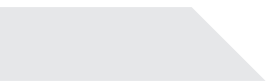
Il n'y a pas de restrictions significatives associées à l'utilisation de drains de rive dans les chaussées. Aucun effet secondaire négatif n'a été identifié et ces drains peuvent donc être largement utilisés.

Le principal questionnement associé à leur utilisation dans un contexte urbain est relié aux interventions sur les réseaux souterrains. Cependant, certaines techniques de réparation ont été développées, qui permettent d'assurer le maintien de leur fonctionnalité dans ce type de situation.

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,
- ARAB, R. - FAURE Y.H. & GENDRIN, P. (2003). Remblais d'accès à un ouvrage sur sols compressibles. EuroGeo
- BNQ (2005). Norme 3624-540 Service de drainage souterrain – Critères de qualité (mai)
- 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.
- CERIU – classeurs – fiche descriptive CS 4.3.1 Drainage vertical
- CERIU – classeurs – fiche descriptive CS 4.3.2 Drainage horizontal
- CERIU, 2004, Dégradation de la chaussées autour des structures d'accès et méthodes de réfection.
- CRAAQ (2005) Guide de référence technique en drainage souterrain et travaux accessoires.
- CYR, R.Y. & CHIASSON, P. 1999. Modeling Subsoil Drainage Systems for Urban Roadways. Canadian Journal of Civil Engineering, 26: pp. 799-809.
- 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.
- LAFLEUR, J. (1998). Drainage des routes, 1ere partie : Action de l'eau. GÉOGLOBE, No. 2, Été 1998, pp. 8-11.
- LAFLEUR, J. & RIOUX, N. (1998). Drainage des routes, 2e partie : Critères de sélection. GÉOGLOBE, No. 3, Automne 1998, pp. 8-11.

- LAFLEUR, J. & FAURE, Y.H. (1999). Drainage des routes, 3e partie : Utilisation des géosynthétiques. GÉOGLOBE, No. 4, Hiver1999, pp. 44-47.
- 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.
- MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2003). Cahier des charges et devis généraux. Infrastructures routières, construction et réparations. Les Publications du Québec.
- MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC. (2003). Normes, ouvrages routiers – Tome VII. Les Publications du Québec.
- 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.
- SOCIETE CANADIENNE DE GEOTECHNIQUE (1994) "Manuel Canadien des Fondations, 3e édition". Bi-Tech Publishers, Vancouver, B.C. 558 p.
- TRANSPORTS-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.
- TRANSPORTS-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.
- TRANSPORTS-QUÉBEC (2004): Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées, Direction du Laboratoire des Chaussées



La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

Tous droits réservés.
© CERIU



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines

1255, boul. Robert-Bourassa, bur. 800
Montréal (Québec) H3B 3W3
Canada

514 848-9885

info@ceriu.qc.ca
www.ceriu.qc.ca