



GEOQuébec  
2015

Challenges from North to South

Des défis du Nord au Sud

# Affaissement d'une chaussée construite sur argile à Montréal, QC

Jocelyn Lavoie C., Sébastien Dubeau et Martin Tremblay  
Division de l'expertise et du soutien technique – Ville de Montréal,  
Québec, Canada

## ABSTRACT

Spatial planning invariably involves a drastic modification of water-balance parameters prevailing before urban infrastructure is erected. The increase in runoff water on paved areas and roofing areas reduces the amount of groundwater seepage. As a result, the presence of clay combined with prolonged drought conditions, are cause of concern: the result of these modifications to the landscape is a reduction of water content which alters the clay affecting the roads lying on top of it. The case of the East Roy Street is presented. Soil properties, extent of observed deformations, water content variations and other factors that may have had an impact on drying progression are discussed. Different solutions to this problem are proposed. Long term monitoring of these solutions after implementation offers the opportunity to provide comments and warnings with regards to design of urban infrastructure on clay.

## RÉSUMÉ

L'aménagement d'un territoire entraîne inévitablement un changement drastique dans le bilan hydrique qui prévalait avant la construction des infrastructures urbaines. L'augmentation du ruissellement sur les surfaces minéralisées et les toitures diminue la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol. Lorsque le sol d'infrastructure est constitué d'argile, ces changements combinés à des périodes de sécheresse prolongées peuvent provoquer son assèchement. Cela cause une diminution de la teneur en eau du sol par altération de l'argile, entraînant des tassements qui déforment les chaussées. Un cas d'affaissement de chaussée, documenté sur plusieurs années, est analysé. Les propriétés du sol, l'ampleur des déformations, les variations de teneur en eau et les facteurs qui peuvent accentuer la progression de l'assèchement sont présentés. Différentes solutions pour remédier à ce problème sont discutées. L'observation du comportement, plusieurs années après les travaux de réparation, permet de formuler des commentaires et des mises en garde à prendre en compte dans la conception des infrastructures urbaines sur l'argile.

## 1 INTRODUCTION

De l'argile est présente sur une grande portion du territoire de la Ville de Montréal. Ce type de sol, particulièrement sensible aux changements de teneur en eau, est susceptible au phénomène d'assèchement, qu'il soit engendré par les changements climatiques (périodes de sécheresse), l'évapotranspiration ou encore associé à une diminution du taux d'infiltration (imperméabilisation des surfaces) ou à la présence de tranchées d'infrastructures remblayées à l'aide de matériaux drainants. L'assèchement peut engendrer des tassements importants qui affectent l'intégrité des chaussées et des trottoirs.

En 2002, le cas de la rue Roy Est a été soulevé. Des affaissements importants y ont été signalés et depuis, les déformations se sont accentuées. Aucun vide n'ayant été décelé sous le revêtement de la chaussée, l'hypothèse que les déformations observées soient associées à l'assèchement de l'argile sous-jacente a été retenue.

Afin de réduire l'impact du phénomène sur ses infrastructures, la Ville a cherché un moyen rapide de déceler sa présence par l'analyse des propriétés géotechniques usuelles des sols et a évalué l'efficacité de différentes solutions pour réduire l'occurrence du phénomène dans les zones les plus sensibles.

## 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

### 2.1 Retrait de l'argile

L'argile de plasticité élevée, telle que souvent retrouvée au Québec, a la propriété de retenir une grande quantité d'eau. Cette eau, qui occupe un volume important, est liée aux microscopiques particules d'argile par des forces de nature électrique; elle ne peut donc pas être facilement drainée.

De façon générale, les déformations volumiques des sols peuvent être attribuées à trois (3) phénomènes (Bigot et Zerhouni, 2000), soit à une variation de l'état des contraintes, à une variation des pressions interstitielles ou encore à une hydratation ou déshydratation intraparticulaire.

La compression de l'argile due aux variations de contraintes externes est largement couverte dans la littérature et ne fait pas l'objet du présent article.

De même, l'hydratation des particules microscopiques agglomérées en feuillets n'est pas couverte par le présent article du fait que ce phénomène se produit principalement en présence de minéraux gonflants. Selon Quigley (1980), l'argile de la mer de Champlain est en effet principalement composée de minéraux de quartz, de feldspath, d'amphibole, de mica, de chlorite et en faible proportion de smectite.

Le groupe des smectites, qui comprend entre autres la montmorillonite, se caractérise par des forces interfeuillets faibles. Les ions échangeables et les molécules d'eau peuvent ainsi y pénétrer facilement ce qui engendre du gonflement par absorption (Holtz et Kovacs, 1981). Comme seules les smectites sont très sensibles au phénomène de retrait-gonflement par absorption, son effet sur l'argile présente à Montréal est négligeable.

De façon générale, les variations de la pression interstitielle ( $u_w$ ) dans les sols sont provoquées par des variations du niveau de la nappe d'eau. D'ailleurs, sous la nappe d'eau, une diminution de la pression interstitielle par son abaissement engendre une augmentation des contraintes effectives. Au-dessus de la nappe d'eau, une augmentation de la succion matricielle ( $u_a - u_w$ ) engendre également une augmentation des contraintes effectives (Bigot et Zerhouni, 2000). La relation générale proposée par Bishop (1959) pour la détermination des contraintes effectives dans les sols non saturés illustre l'impact de ces variations :

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad [1]$$

où  $\sigma'$  est la contrainte effective,  $\sigma$  est la contrainte totale,  $u_a$  est la pression atmosphérique, et  $\chi$  est un paramètre de sol relié au degré de saturation variant de 0 à 1.

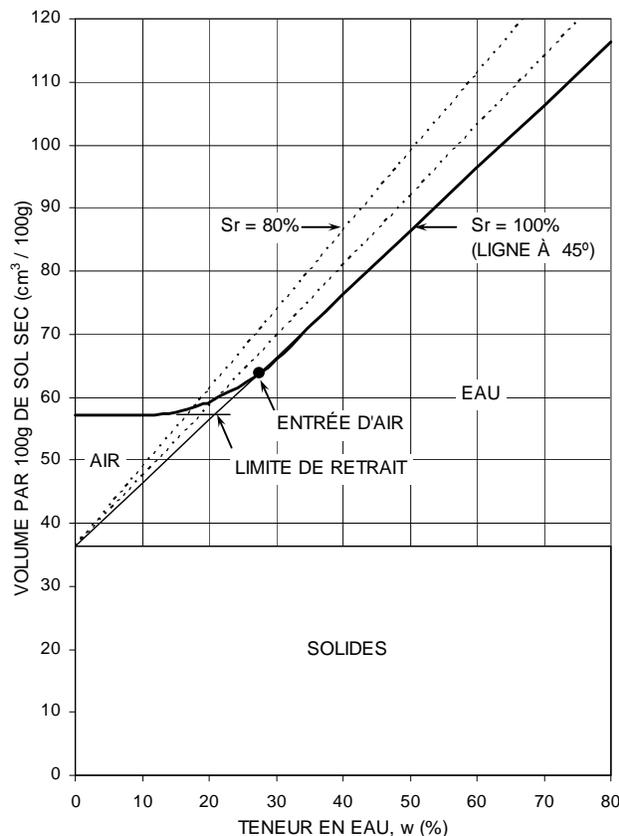


Figure 1. Courbe typique de l'assèchement de l'argile (d'après Marinho, 1994 et Fredlund *et al.*, 2012)

Ces augmentations de contraintes effectives peuvent produire une diminution de volume par consolidation. Ce changement de volume est illustré par la courbe typique de l'assèchement de l'argile de la figure 1.

Cette figure montre qu'en milieu saturé, toute réduction de la teneur en eau se traduit par une diminution égale du volume de sol. Lorsqu'une baisse de teneur en eau survient au-dessus de la nappe d'eau, l'argile demeure tout de même saturée par capillarité malgré une pression interstitielle négative, c'est-à-dire que sa structure interne composée exclusivement d'eau et de particules minérales ne laisse pas pénétrer l'air. La perte d'eau se traduit alors automatiquement par une perte de volume, les forces capillaires rapprochant les particules minérales à mesure que l'eau s'évapore.

Lorsque la succion augmente jusqu'à la pression d'entrée d'air, la perte d'eau ne se traduit plus par une perte de volume équivalente puisque l'air peut s'introduire progressivement dans les pores. Les particules d'argile entrent ensuite en contact et le volume se stabilise enfin lors de l'atteinte de la limite de retrait du sol.

Cette consolidation par augmentation de la succion matricielle se produit progressivement à chaque fluctuation significative. Elle survient, entre autres, lorsque l'argile est mise en contact avec l'atmosphère, directement ou indirectement, par de nouvelles fissures dans le sol en période de sécheresse. L'initiation de ces fissures peut se produire lors des cycles de gel et dégel ou lorsque la contrainte horizontale totale est égale à la résistance en tension du sol (Konrad et Ayad, 1997), et ce, que le sol soit saturé ou non.

## 2.2 Susceptibilité au retrait

On retrouve dans les sols de l'eau interstitielle, de l'eau adsorbée et parfois de l'eau absorbée, en proportions variables. La susceptibilité au retrait d'un sol est proportionnelle à la quantité d'eau adsorbée. La structure minéralogique en feuillets de l'argile lui confère une plus grande capacité d'adsorption de l'eau due à la plus grande surface spécifique et à d'autres phénomènes physico-chimiques. L'eau ainsi adsorbée assure les liaisons interparticulaires et ce même lors de variations de teneurs en eau.

Pour estimer la susceptibilité au retrait de l'argile, la plasticité et la fraction argileuse sont des paramètres fréquemment employés. Ces paramètres, dont le rapport se traduit par l'activité de l'argile, sont également largement employés pour estimer la susceptibilité au gonflement d'une argile. Une classification proposée par le Building Research Establishment (BRE) du Royaume-Uni, présentée au tableau 1, fait intervenir l'indice de plasticité modifié pour tenir compte de la proportion de particules fines. Cet indice de plasticité modifié s'obtient comme suit :

$$I_{p(m)} = I_p \times \frac{\% < 425 \mu\text{m}}{100 \%} \quad [2]$$

Tableau 1. Susceptibilité au retrait (BRE, Digest 240)

Indice de plasticité modifié $I_{p(m)}$	Potentiel de retrait
> 60	Très élevé
40 à 60	Élevé
20 à 40	Moyen
< 20	Faible

### 2.3 Mesure du retrait

La comparaison d'un profil de la succion matricielle d'un sol avec celui d'un secteur contrôle, c'est-à-dire ne présentant pas de signe d'assèchement, est une méthode efficace pour observer la progression du retrait dans un sol (BRE, Digest 412). Cette mesure est toutefois complexe, coûteuse et est peu adaptée à l'analyse du phénomène sur l'ensemble d'un territoire comme celui de l'île de Montréal. L'analyse indirecte par d'autres paramètres usuels comme la teneur en eau, l'indice de plasticité, la teneur en particules argileuses et la résistance au cisaillement non drainé peut s'avérer plus simple et appropriée à cette échelle d'investigation.

Comme vu précédemment, la variation volumique d'un sol est proportionnelle à la variation de teneur en eau. En somme, la teneur en eau est un bon indicateur du potentiel de retrait ou du retrait déjà survenu. La figure 1 illustre que plus la teneur en eau initiale est élevée, plus le potentiel de retrait est grand. La comparaison du profil de teneur en eau dans un secteur contrôle avec celui du site étudié peut informer efficacement sur le niveau d'assèchement. Une des difficultés de cette méthode réside dans la localisation d'un secteur contrôle suffisamment près pour en permettre la comparaison. Une autre vient de la présence locale de variations des propriétés générant des teneurs en eau différentes pour un même degré d'assèchement. Le Digest 412 du BRE du Royaume-Uni suggère d'employer les profils de l'indice de liquidité ( $I_L$ ) pour réduire l'effet de ces variations.

Comme l'indique l'équation suivante (dérivée de Vanapalli et Fredlund, 1997), la réduction de la pression

interstitielle ou l'augmentation de la succion matricielle est proportionnelle à l'augmentation de la résistance au cisaillement non drainé (BRE, Digest 412) :

$$c_u = \frac{[\tan \phi^b \cdot (u_a - u_w)] - c'}{\cos \phi' + (\sin \phi' \cdot \tan \phi')} \quad [3]$$

où  $c_u$  est la résistance au cisaillement non drainé,  $c'$  est la cohésion,  $\phi'$  est l'angle de friction en contraintes effectives, et  $\phi^b$  est l'angle indiquant l'augmentation de résistance en fonction de la succion matricielle.

L'utilisation du profil de résistance au cisaillement non drainé comporte l'avantage qu'il est facile de le comparer aux valeurs normalement rencontrées compte tenu du grand nombre de valeurs mesurées sur l'île de Montréal.

### 2.4 Déclencheurs du processus

Plusieurs facteurs dont l'évapotranspiration et les sécheresses, décrits ci-après, peuvent déclencher le phénomène de retrait et d'assèchement progressif de l'argile. En milieu fortement urbanisé, l'imperméabilisation des surfaces par la construction de rues et de bâtiments, le reprofilage des terrains, la construction d'infrastructures souterraines, les défauts de mise en place de bouchons d'argile dans les tranchées des conduites souterraines et les drains sous les structures profondes, tels le métro et les stationnements souterrains, s'ajoutent à ces causes.

L'effet des périodes de sécheresse a été étudié suite aux nombreuses réclamations de propriétaires de maisons lézardées associées à la grande sécheresse de 1983 (Silvestri *et al.*, 1990). Une période de sécheresse survient en présence de déficit pluviométrique. Ce déficit se manifeste lorsque l'apport d'eau par les précipitations est inférieur, entre autres, à la perte d'eau liée à l'évapotranspiration (évaporation et transpiration des plantes). Le degré d'évapotranspiration qu'un site peut atteindre peut être estimé à l'aide de la température et de la durée des journées (Thornwaite, 1948).

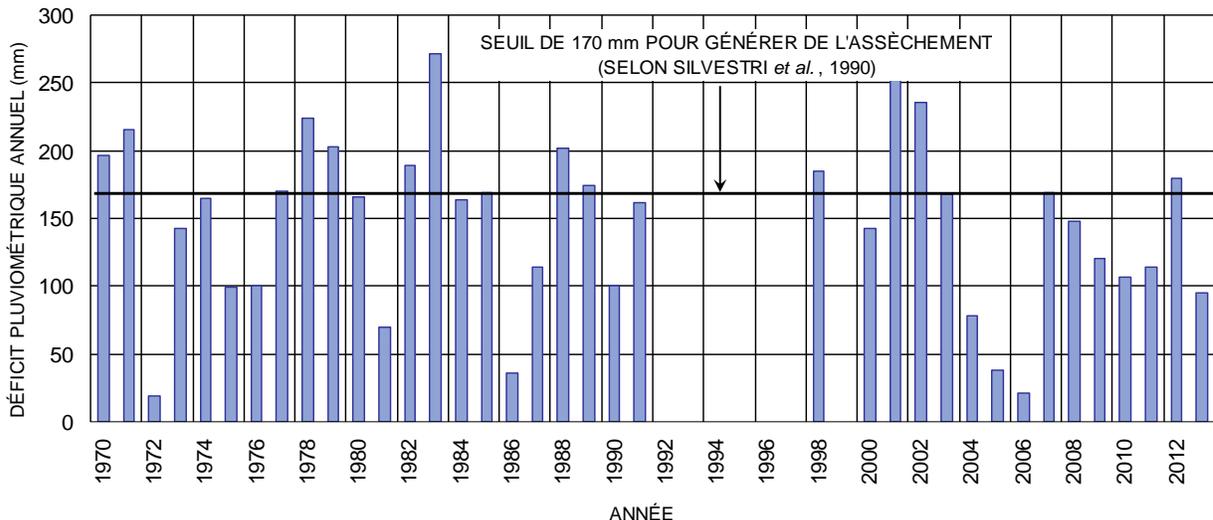


Figure 2. Déficits pluviométriques annuels de 1970 à 2013

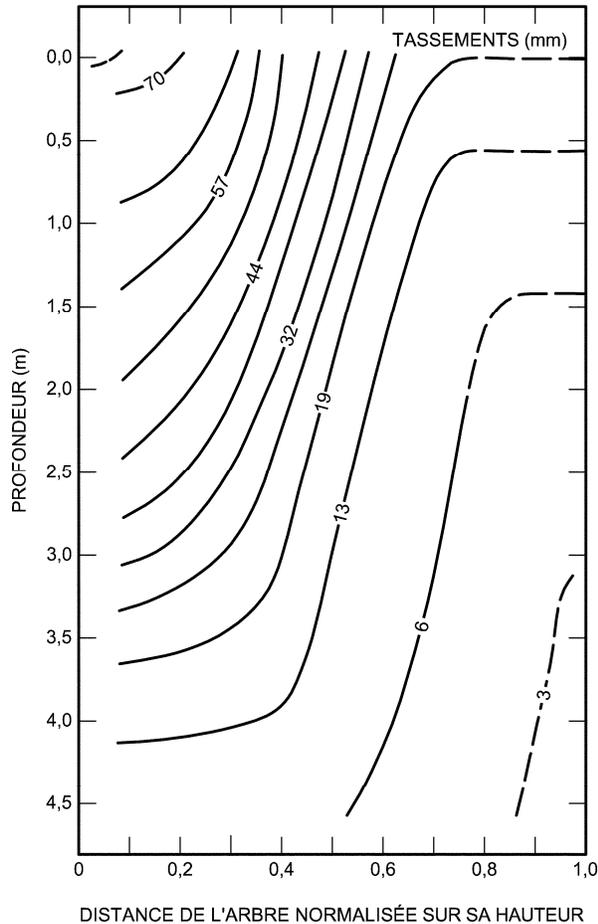


Figure 3. Tassements autour d'ormes sur l'argile de la mer de Champlain (d'après Bozozuk et Burn, 1960)

Pour l'île de Montréal, Silvestri *et al.* (1990) suggèrent que lorsque le déficit pluviométrique atteint 170 mm au cours d'un été, le phénomène de l'assèchement s'amplifie. La figure 2 montre les déficits pluviométriques maximum atteints pour les années 1970 à 2013, calculés avec la méthode de Thornthwaite (1948) à partir des données d'Environnement Canada. Ce graphique montre que pour au moins douze (12) années pendant cette période, un déficit pluviométrique annuel pouvant entraîner de l'assèchement a été enregistré.

Le calcul de l'évapotranspiration cité ci-haut est une approximation englobant, entre autres, l'ensemble des effets de la végétation (plantes et arbres), sans égard aux espèces. Les déformations au pourtour de différentes espèces d'arbres sur l'argile ont été étudiées par plusieurs auteurs. Une charte des déformations autour d'ormes sur l'argile de la mer de Champlain (argile de Leda) lors de l'année 1955, année de grande sécheresse, a été produite par Bozozuk et Burn (1960). Cette charte reproduite à la figure 3 nous informe sur l'influence de cette espèce d'arbre sur l'assèchement de l'argile en termes de distance et de profondeur.

Driscoll (1983) a rassemblé les résultats de plusieurs études sur le rayon d'influence d'assèchement dans l'argile pour diverses espèces d'arbres en fonction de la

hauteur de ceux-ci au Royaume-Uni. Selon l'auteur, l'implantation des arbres à une distance minimale d'environ la moitié de la hauteur anticipée de l'arbre permettrait d'empêcher dans la majorité des cas des désordres aux immeubles. Cet article présente également un classement du nombre de cas de dommages recensés en fonction des espèces d'arbres. Il importe de préciser cependant que ces données peuvent difficilement être transposées au Québec compte tenu des différences de climat, de sol et de profondeur des fondations.

### 3 INVENTAIRE DES MESURES DE MITIGATION

Parmi l'ensemble des mesures envisageables pour réduire les problèmes associés à l'assèchement de l'argile on retrouve celles qui agissent directement sur le bilan hydrique du site tels que les systèmes d'irrigation passive ou active, celles qui agissent sur les éléments déclencheurs du phénomène de retrait tels que l'étanchéisation, les barrières antiracinaires et l'éloignement des arbres, et enfin celles qui minimisent les impacts comme l'augmentation de la rigidité des surfaces.

L'irrigation passive comprend toutes les mesures visant l'irrigation à l'aide de l'eau de pluie par emmagasinement, par modification du chemin de drainage ou encore par modification de la perméabilité des surfaces. Un tel système d'irrigation permet de détourner une partie des eaux de ruissellement normalement collectées par le réseau d'égout. Les eaux collectées sont accumulées temporairement pour ensuite être réinjectées par capillarité à la profondeur souhaitée. Une tranchée absorbante raccordée à des puitsards a été construite sous le trottoir de la rue Villeneuve en 2006. Ce concept proposé et décrit par Tremblay *et al.* (2006) semble avoir bien fonctionné à ce jour.

L'irrigation active comprend, entre autres, l'apport d'eau potable, au besoin, par l'entremise d'un drain, d'un puits ou autre. La Ville de Montréal a mis à l'essai trois (3) systèmes d'irrigation soit un système de drainage au goutte-à-goutte, un système d'arrosage en surface et un système d'alimentation à l'aide de puits de recharge, dans le but de prévenir les désordres causés aux fondations d'immeubles par l'assèchement du sol. La performance de ces systèmes a été évaluée par une recherche conjointe avec l'École Polytechnique de Montréal (Silvestri, 1993). Cette recherche conclut que le système d'irrigation à l'aide de puits de recharge est la méthode la plus efficace. La différence d'efficacité réside probablement dans la profondeur d'influence du système. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles requièrent une alimentation en eau et un entretien plus soutenu.

Les barrières antiracinaires de type géotextile enduites d'un inhibiteur qui limite la progression des racines peuvent être employées pour réduire l'effet des arbres sur l'assèchement de l'argile. Ces barrières peuvent être mises en place sur une certaine profondeur en bordure de la chaussée ou au pourtour des fosses d'arbre. L'inconvénient de ces barrières est leur impact négatif sur les arbres, c'est-à-dire que leur emploi intensif limiterait grandement la croissance de ceux-ci en empêchant le déploiement du réseau racinaire.

Lors de la construction de structures souterraines ou de structures dont l'extension des fondations est profonde, la mise en place de pierre concassée, de drains ou autres, peut provoquer un abaissement localisé de la nappe d'eau. Ce phénomène peut se produire malgré certaines précautions comme la mise en place de bouchons d'argile. Dans ce contexte et en amont des projets, il est approprié de tendre à minimiser les écarts de perméabilité en maximisant autant que possible la réutilisation des matériaux d'excavation lors du remblayage sous la ligne d'infrastructure. À Montréal, il est plutôt d'usage, pour des raisons d'ordre logistique, d'importer des matériaux de remblai granulaire que de réutiliser les sols en place.

La construction de chaussées rigides, soit par la mise en place d'une plus forte épaisseur de pierre concassée ou d'une chaussée en béton de ciment, peut être utile pour estomper les désordres dus à l'assèchement. Cette solution ne peut cependant être employée là où l'amplitude des déformations anticipée est grande.

#### 4 RUE ROY EST : DESCRIPTION DU SITE ET RÉSULTATS

Le site de la rue Roy Est se trouve dans un quartier à prédominance résidentielle, au cœur de l'arrondissement du Plateau Mont-Royal. Des déformations importantes y ont été observées au niveau de la chaussée et des trottoirs du tronçon compris entre la rue Saint-Denis (à l'ouest) et la rue Berri (à l'est). Celui-ci présente une largeur de l'ordre de 12,5 m et une longueur de l'ordre de 100 m. L'élévation du terrain dans ce secteur est de l'ordre de 44 à 45 m.

La figure 4 est une représentation graphique du tronçon, incluant la localisation des affaissements de même que celle des arbres et des infrastructures souterraines présentes dans le secteur. Pour les besoins de rédaction, l'axe de la rue Roy Est a été considéré d'orientation est-ouest.

Les sols en place dans ce secteur consistent en des sédiments d'eau profonde associés à l'épisode glaciaire de la mer de Champlain (argile de Leda).

Ce tronçon de rue a fait l'objet d'une reconstruction en 1990; des travaux de réfection ponctuels de la chaussée ont été réalisés dans les années subséquentes. Le trottoir

sud de la rue a pour sa part été reconstruit en béton armé en 2008.

Le terrain situé du côté sud de la rue est occupé par un bâtiment à vocation institutionnelle, établi vers 1863 par une communauté religieuse; un stationnement pavé occupe le coin nord-ouest de cette propriété, soit le secteur situé près de l'intersection formée par les rues Saint-Denis et Roy Est. Un parc borde le côté nord de la rue, sur les derniers 50 m du tronçon (partie est).

Sept (7) fosses contenant des arbres de petit diamètre sont présentes dans le trottoir du côté sud de la rue et huit (8) sont présentes dans le trottoir nord; les essences d'arbre sur les propriétés de la Ville sont le frêne et le micocoulier. Six (6) arbres de plus grand diamètre sont présents sur la propriété privée au sud et deux (2) sont observés sur la propriété située à l'intersection formée par les rues Rivard et Roy Est.

L'étude de la carte des anciens et ruisseaux et fossés indique qu'un cours d'eau était présent dans l'axe de la rue Roy Est à l'ouest de la rue Saint-Denis, à partir d'où il bifurquait légèrement vers le nord pour ensuite s'écouler vers l'est à environ 100 m au nord de la rue Roy Est. Aucune dépression comblée avec des matériaux de remblai instables avant l'urbanisation n'est répertoriée dans ce secteur. Par contre, l'examen des plans et profils datant de 1954 (R-36 Saint-Jacques) indique que les travaux initiaux de construction de ce tronçon de rue ont nécessité un déblai; le niveau du terrain original au centre du tronçon était de l'ordre de 1,7 m supérieur au niveau actuel de la chaussée.

##### 4.1 Désordres observés

Des déformations importantes de la chaussée et du trottoir sont observées du côté sud de la rue (voie en direction est). Une description exhaustive de ces désordres est fournie par Tremblay (2008); un résumé de ceux-ci est décrit ci-dessous.

Avant les travaux de reconstruction du trottoir sud en 2008, celui-ci était fortement incliné vers le sud plutôt que vers la rue sur une longueur d'environ 20 m entre les rues Saint-Denis et Rivard (voir figure 5). L'amplitude des désordres observés variait entre 300 et 450 mm. Une deuxième dépression d'une amplitude similaire était aussi observée sur environ 30 m de longueur dans le secteur situé entre les rues Rivard et Berri.

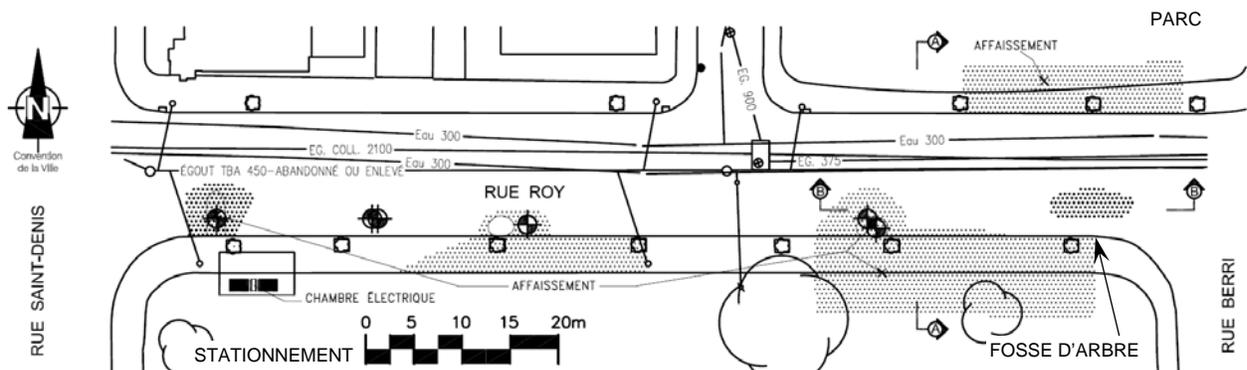


Figure 4. Représentation graphique du tronçon de la rue Roy Est (d'après Tremblay, 2008)



Figure 5. Déformations observées au niveau du trottoir sud de la rue Roy Est (vue vers l'ouest – 30 juillet 2007)

Bien que des travaux de reconstruction du trottoir et de la chaussée aient été effectués en 2008, des déformations d'une amplitude similaire y sont aujourd'hui toujours visibles dans les mêmes secteurs (voir figure 6).

#### 4.2 Infrastructures souterraines existantes

La chaussée de ce tronçon de la rue Roy Est est drainée sur toute sa largeur vers le nord, les puisards étant présents uniquement du côté nord, près des intersections avec les rues Saint-Denis, Rivard et Berri.

Un égout collecteur de 2,1 m de diamètre (84 po), construit en 1990, est présent dans l'axe de la rue. Le radier de cette conduite est situé à l'élévation approximative de 39 m à la hauteur de la rue Saint-Denis et autour de l'élévation 38 m dans le secteur de l'intersection avec la rue Berri (profondeur de 5 à 6 m sous le niveau de la surface). Ce collecteur a été construit en tranchée et cette dernière a été remblayée avec de la pierre concassée; des bouchons d'argile ont été mis en place, mais la distance entre chacun est inconnue.

Deux (2) conduites d'eau de 300 mm sont aussi présentes dans l'axe de la rue. Finalement, une (1) conduite de gaz est présente sous le trottoir sud de la rue. Une (1) chambre électrique de la Commission des services électriques de Montréal se trouve à une distance d'environ 15 m à l'est de l'intersection formée par les rues Saint-Denis et Roy Est, dans le trottoir sud de cette dernière; des lampadaires sont présents à intervalles réguliers de 20 à 25 m des deux (2) côtés de la rue.

#### 4.3 Conditions géotechniques

Les données de dix (10) forages ont été analysées. Ils ont été réalisés sur ou à proximité de ce tronçon de rue en 1961, 1979, 2001, 2002 et 2013; lors des campagnes de forages de 2002 et 2013, des forages ont été réalisés dans les secteurs où des désordres ont été observés ainsi que dans un secteur où les désordres étaient moins importants ou inexistant (forages de contrôle).

Il ressort de ces données que la stratigraphie des sols du secteur consiste en une couche de remblai d'une épaisseur comprise entre 0,6 et 1,0 m, mais pouvant

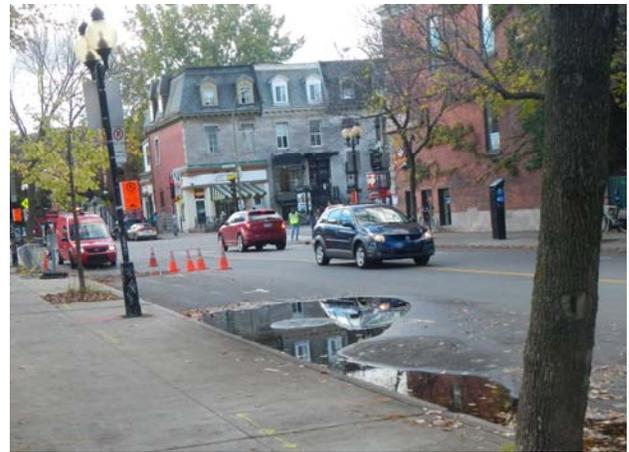


Figure 6. Déformations observées au niveau de la rue Roy Est (vue vers l'ouest – 19 septembre 2013)

atteindre près de 2,0 m, associée à la structure de chaussée et aux infrastructures souterraines en place. Une épaisseur de remblai supérieure est toutefois présente au droit des tranchées aménagées pour la construction des infrastructures souterraines.

Sous les matériaux de remblai, un mince horizon sableux sans doute d'origine naturelle est localement présent. Cet horizon est suivi d'un dépôt argileux d'une épaisseur variant entre environ 7 et 9 m devenant plus silteux avec la profondeur; ce dépôt repose sur le till. Le roc serait situé autour de l'élévation 26 m, soit à environ 20 m sous le niveau de la surface de la rue.

La nappe d'eau a été mesurée dans un forage, réalisé en 1979, à 3,2 m de profondeur (élévation de 41 m). Compte tenu des travaux de construction réalisés depuis cette date, il est fort probable que cette mesure ne soit plus représentative.

Les résultats des essais de détermination des limites de consistance réalisés sur des échantillons prélevés au sein de ces forages sont présentés à la figure 7. Ils indiquent que la limite liquide se situe le plus souvent entre 64 et 79 % et que la limite plastique varie entre 22 et 29 %, correspondant à un indice de plasticité compris entre 38 et 51 %. Des limites liquides plus faibles de 57 et 58 % ont été obtenues pour deux (2) essais, réalisés sur des échantillons prélevés à une profondeur supérieure à 4,8 m. L'argile en place peut donc être qualifiée de « CH » selon le système de classification unifiée des sols (USCS), soit une argile inorganique de plasticité élevée.

Les teneurs en eau mesurées varient le plus souvent entre 45 et plus de 80 %; une valeur de 40 % a été mesurée dans la portion inférieure plus silteuse du dépôt.

Des mesures de la résistance au cisaillement non drainé de l'argile à l'état intact ont été réalisées en chantier à l'aide d'un scissomètre à déformation contrôlée (Nilcon) à intervalles réguliers au sein du dépôt lors des campagnes de forages de 2002 et 2013. Des essais au cône ont aussi été réalisés en laboratoire sur des échantillons prélevés en 2013. Les résultats de ces essais sont présentés graphiquement à la figure 8.

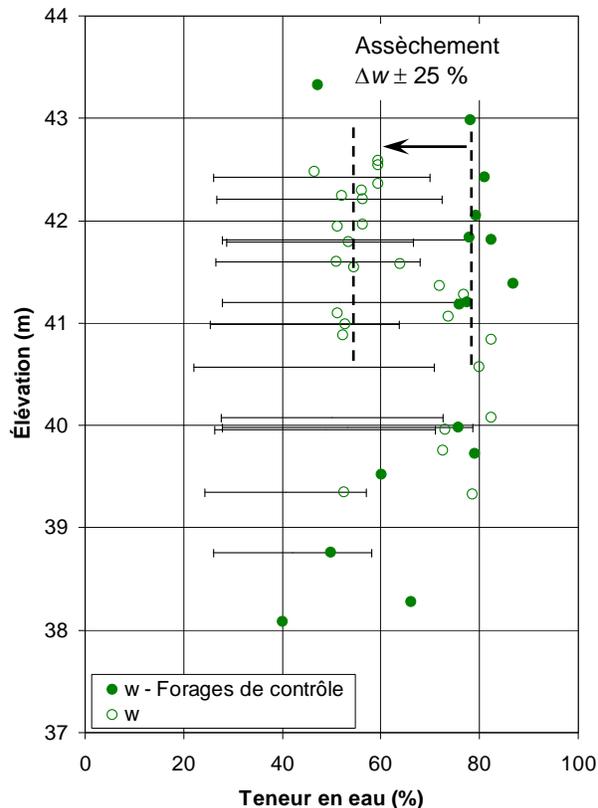


Figure 7. Rue Roy Est – Profil des teneurs en eau et des limites de consistance (toutes années confondues)

Des données de 2002, on observe que la résistance au cisaillement non drainé du dépôt argileux augmente de façon quasi linéaire avec la profondeur, avec des valeurs variant entre 10 et 50 kPa.

Le profil obtenu des résultats réalisés en 2013 est pour sa part légèrement différent. La résistance au cisaillement non drainé à l'état intact semble avoir augmenté sur les premiers 2 m du dépôt avec des valeurs mesurées supérieures à 25 kPa et pouvant atteindre jusqu'à plus de 100 kPa. Autour de l'élévation 41 m, le profil de 2013 tend à se confondre avec celui de 2002.

#### 4.4 Discussion des résultats

Les résultats des essais de détermination de la teneur en eau obtenus semblent indiquer que les affaissements observés avant 2008 sur la rue Roy Est sont attribuables au phénomène d'assèchement de l'argile. En effet, la figure 7 montre que la teneur en eau des sols interceptés dans les forages de contrôle est généralement plus élevée, soit près ou au-delà de la limite liquide, en comparaison des valeurs mesurées dans les secteurs où des désordres ont été observés.

Il est également à noter que ces différences dans la teneur en eau sont observées sur environ les premiers 2 m de l'argile. Sous l'élévation 41 m, les teneurs en eau mesurées sont d'un même ordre de grandeur. La variation de teneur en eau d'environ 25 % observée sur ces premiers 2 m entre les forages situés dans les secteurs

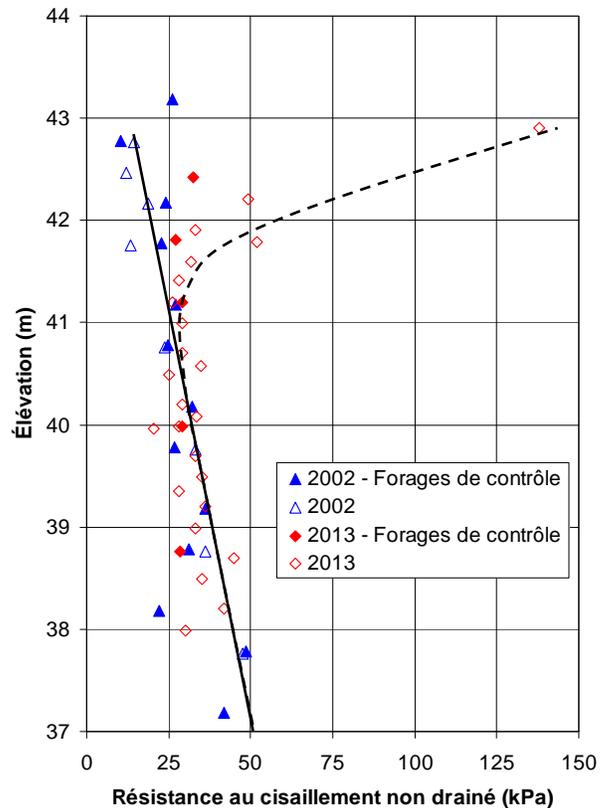


Figure 8. Rue Roy Est – Profil de la résistance au cisaillement non drainé

des désordres et les forages contrôles correspond à un tassement de l'ordre de 450 mm, ce qui concorde avec les observations faites au site.

Les données de la résistance au cisaillement non drainé indiquent que l'état des contraintes de la portion supérieure du dépôt a été modifié entre 2002 et 2013 (figure 8). L'augmentation de la succion matricielle engendrée par l'assèchement de l'argile a entraîné une contraction et une consolidation apparente de l'argile.

Les résultats des teneurs en eau en tenant compte de l'année (figure 9) indiquent une progression vers le bas de l'assèchement sur environ 500 mm entre 2002 et 2013.

#### 4.5 Causes des affaissements

Les raisons qui peuvent expliquer l'amplitude et la rapidité de la progression des désordres observés peuvent être attribuables à l'état quasi normalement consolidé de l'argile combiné à des teneurs en eau atteignant par endroit plus de 80 %, ce qui augmente son potentiel de retrait. L'absence d'une couche supérieure altérée et desséchée plus résistante aux endroits où les affaissements sont plus apparents est peut-être attribuable aux travaux de déblai réalisés pour l'aménagement initial de la rue. La présence de la tranchée de l'égout collecteur remblayée avec de la pierre concassée, qui accentue le drainage de l'argile et accélère sa consolidation, peut être un autre facteur favorisant l'assèchement.

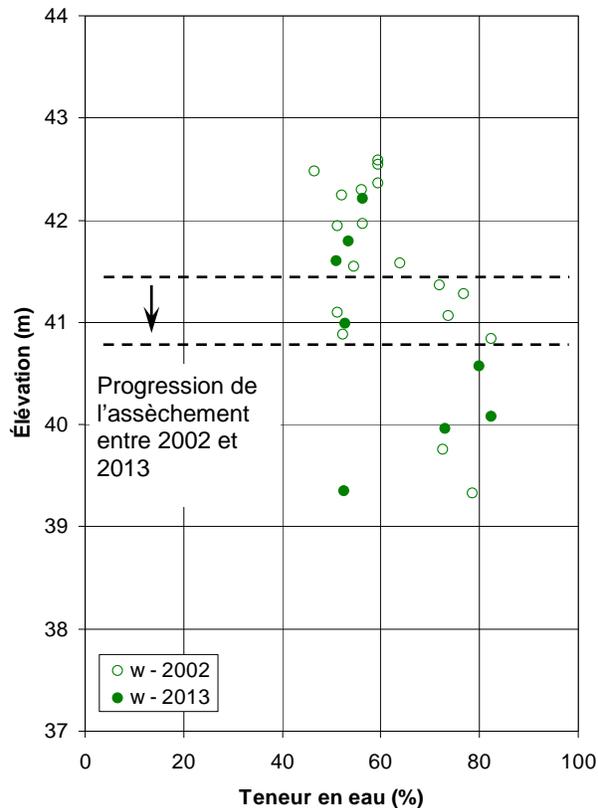


Figure 9. Rue Roy Est – Teneur en eau en fonction des années (zones avec désordres)

L'objectif de la recherche effectuée n'est pas de discriminer laquelle de ces causes est la principale responsable des désordres observés.

## 5 CONCEPTS DE MITIGATION DES DÉSORDRS POUR LA RUE ROY EST

Selon Tremblay (2008), les affaissements du trottoir de ce tronçon de la rue Roy Est sont attribuables à la présence d'un sol d'infrastructure composé d'une couche d'argile particulièrement susceptible à l'assèchement. Le potentiel de retrait futur reste très élevé puisque des teneurs en eau de l'ordre de 60 à 80 % ont été observées à faible profondeur.

Les principales causes de l'assèchement, notamment les conditions climatiques (les étés secs) et l'urbanisation, qui fait diminuer la quantité de précipitations qui s'infiltrent dans le sol, sont des facteurs sur lesquels on ne peut pas agir. La végétation, soit la présence d'arbres matures, est aussi un facteur aggravant pour des ouvrages portant directement ou à faible profondeur sur l'argile tels une chaussée et un trottoir.

Pour ce site, deux (2) concepts ont été élaborés par la Ville de Montréal dans le but de minimiser les désordres futurs liés à l'assèchement de l'argile. L'un consiste en la construction d'une tranchée d'irrigation active longeant le trottoir sud; l'autre consiste à simplement surexcaver l'argile sur une certaine épaisseur et à la remplacer par

une couche de sable servant à emmagasiner de l'eau de ruissellement. Les deux (2) concepts sont décrits ci-dessous.

### 5.1 Surexcavation

Afin de minimiser les déformations futures du trottoir à reconstruire, il a été envisagé par Tremblay (2008) de réaliser une surexcavation de 800 mm sous le niveau final prévu du trottoir, et de la remblayer à l'aide d'un sable uniforme, légèrement densifié et enrobé d'un géotextile séparateur au contact de l'infrastructure argileuse. Ce concept est illustré à la figure 10.

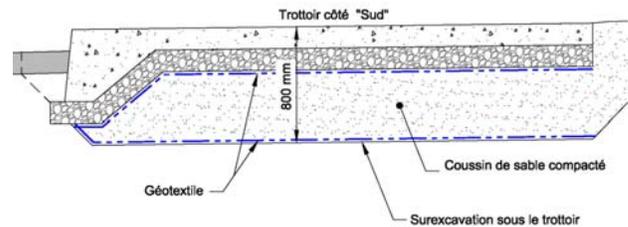


Figure 10. Concept de mitigation par surexcavation (tiré de Tremblay, 2008)

Par la mise en œuvre de ce concept, Tremblay (2008) anticipe que l'enlèvement d'une partie de la couche d'argile située immédiatement sous le trottoir diminuera le potentiel de tassement futur. D'autre part, le coussin de sable est poreux et plus facile à coloniser par les racines que l'argile, ce qui offre une certaine protection à la couche d'argile sous-jacente. Enfin, les pertes d'eau dans le sol dues à l'évapotranspiration par les arbres devraient se faire dans la couche de sable, plutôt que dans l'argile sous-jacente. L'expérience montre que la présence, d'une couche sablonneuse recouvrant un dépôt d'argile a toujours pour effet de diminuer la formation d'une couche altérée (croûte). C'est le cas à l'extrémité est de l'île de Montréal, dans le secteur Pointe-aux-Trembles où l'on retrouve naturellement des dépôts de sable alluvionnaire recouvrant le dépôt argileux.

Pour des raisons budgétaires et de simplicité, c'est ce concept qui a été retenu et mis en œuvre sur le site de la rue Roy Est plutôt que celui d'irrigation active décrit ci-après; il n'a cependant pas permis de réduire considérablement les tassements dus à l'assèchement si ce n'est que la dalle de béton armé du trottoir aura permis d'adoucir les déformations.

### 5.2 Tranchée d'irrigation

En 2007, afin de minimiser l'assèchement de l'argile, M. Martin Tremblay a conçu un système d'irrigation afin de fournir un apport d'eau au moment opportun, soit au cours de l'été, lorsque les réserves d'eau accumulées dans le sol sont épuisées et qu'il est anticipé que l'évapotranspiration fera progresser en profondeur la fissuration et l'assèchement du sol.

Dans ce concept, il est envisagé de réaliser sous la rue, une tranchée d'absorption telle qu'illustrée aux figures 11 et 12. Cette tranchée doit être rechargée par

l'eau de l'aqueduc suite à l'ouverture manuelle d'une vanne aux moments opportuns. Un certain volume d'eau est alors emmagasiné dans la tranchée et diffusé en profondeur, dans la couche d'argile susceptible à l'altération. La tranchée, d'une profondeur de 3 m, est constituée d'une couche d'assise de pierre concassée sur laquelle est mis en place un drain enrobé d'un gravier net sur 750 mm d'épaisseur puis recouvert d'une couche de sable filtrant jusqu'en surface. Un trop-plein est positionné au-dessus de la couche d'argile.

Ce système doit permettre de compenser les déficits pluviométriques de façon à empêcher l'assèchement dû à cette cause.

La Ville n'avait pas retenu ce concept lors des travaux de 2008. Étant donné l'ampleur des déformations actuelles, d'autres travaux de réfection de la chaussée et des trottoirs devront être effectués.

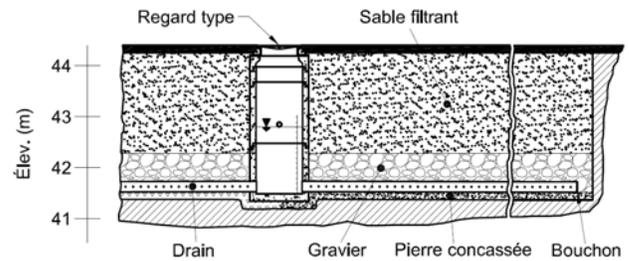


Figure 11. Vue longitudinale (coupe B-B de la figure 4) de la tranchée d'irrigation (selon le concept de 2007 de Tremblay)

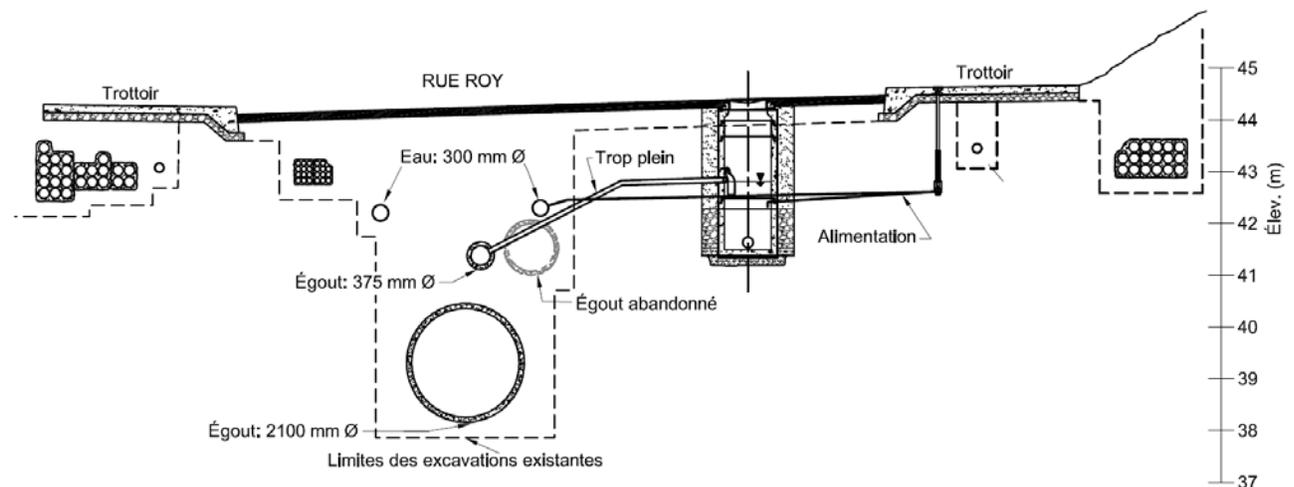


Figure 12. Vue transversale (coupe A-A de la figure 4) de la tranchée d'irrigation (selon le concept de 2007 de Tremblay)

## 6 CONCLUSIONS

L'étude de la compilation des données présentées concernant les propriétés du dépôt argileux présent dans le tronçon de la rue Roy Est, en terme de profil de teneur en eau et de résistance au cisaillement non drainé, a permis de confirmer et de quantifier la cause et l'ampleur des déformations dues à l'assèchement de l'argile. L'emploi de forages de contrôle a clairement permis de distinguer l'état de l'argile avant et après assèchement.

La recherche des causes de l'assèchement exceptionnel survenu au site pointe vers trois (3) facteurs, soit vers le fait que l'argile est très légèrement surconsolidée, qu'il y a absence d'une couche altérée (croûte) ou qu'il y a présence d'une tranchée profonde remplie de pierre concassée adjacente à la zone des désordres. Il n'a pas été établi lequel de ces facteurs était prépondérant.

Des investigations supplémentaires visant à discriminer les causes de l'assèchement pourraient être envisagées. Par exemple, des forages pourraient être réalisés sur une ligne perpendiculaire à la tranchée de l'égout collecteur. De plus, un suivi de la fluctuation des pressions interstitielles jumelé à un suivi des déformations

nous informerait sur leur progression dans le temps ainsi que sur l'influence relative de l'évapotranspiration et du drainage par la tranchée d'infrastructure. Ces travaux complémentaires permettraient de mieux orienter les investigations futures liées aux problèmes d'assèchement.

Différentes mesures de mitigation des déformations dues à l'assèchement de l'argile ont été répertoriées et certaines d'entre elles ont été mises en œuvre en divers endroits à Montréal. Dans un contexte où le bâti actuel et la végétation ne peuvent être modifiés considérablement, il appert que les tranchées d'irrigation actives ou passives peuvent être efficaces pour limiter l'assèchement.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel de la Division de l'expertise et du soutien technique de la Ville de Montréal, en particulier, M. Sylvain Roy, chef de Division, ainsi que Mme Marie-Eve Dufour et MM. Gilles Paquette et Jacques Poulin qui ont rendu possible cette publication.

## RÉFÉRENCES

- Bigot, G., Zerhouni, M. I. 2000. Retrait, gonflement et tassement des sols fins. *Bulletin-Laboratoires des ponts et chaussées*, pp. 105-114.
- Bishop, A.W. 1959. The principle of effective stress, *Teknisk Ukeblad*, Norwegian Geotechnical Institute, vol. 106, no 39, pp. 859-863.
- Bozozuk, M., Burn, K.N. 1960. Vertical ground movements near elm trees. *Geotechnique*, 10(1), pp. 19-32.
- Building Research Establishment. 1993. Low-rise buildings on shrinkable clay soils: Part 1, BRE Digest 240.
- Building Research Establishment. 1996. Dessication in clay soils, BRE Digest 412.
- Driscoll, R. 1983. The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*, 33(2), pp. 93-105.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D. 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons Inc.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D. 1981. *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Konrad, J.-M., Ayad, R. 1997. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), pp.477-488.
- Marinho, F.A.M. 1994. Shrinkage behaviour of some plastic soils. Thèse de doctorat, University of London.
- Quigley, R.M. 1980. Geology, mineralogy, and geochemistry of Canadian soft soils: a geotechnical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(2), pp. 261-285.
- Silvestri, V. 1993. Programme de recherche pour la gestion des sécheresses futures, Centre de développement technologique de l'École Polytechnique, Ville de Montréal, projet C.D.T C-107, 142 p.
- Silvestri, V., Sarkis, G., Bekkouche, N., Soulié, M. 1990. Evapotranspiration, Trees and Damage to Foundations in Sensitive Clays, *Proceedings of the 43rd Canadian Geotechnical Conference*, Québec, Canada, Vol. 2, pp. 533-538.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, pp. 55-94.
- Tremblay M., Paquette Y. 2006. Nouvelle approche pour la réfection d'une chaussée sur sol argileux susceptible au retrait en période de sécheresse. *Recueil des communications de la conférence Infra 2006*
- Tremblay, M. 2008. Réfection du trottoir de la rue Roy, entre les rues Berri et Saint-Denis, Rapport d'expertise géotechnique, Ville de Montréal, référence 02F204, 9 p.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. 1997. Interpretation of undrained shear strength of unsaturated soils in terms of stress state variables. *Proceedings of the Third Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, Vol. 1, pp. 35-45.