

SIMULATION DES EFFETS DU GEL SUR LE COMPORTEMENT DES CHAUSSEES SOUMISES AUX SELS DEGLAÇANTS

Francisco PADILLA et Jean-Pierre VILLENEUVE
Université du Québec, INRS-Eau, 2800 Einstein, Ste-Foy, G1X 4N8.

1. INTRODUCTION

La fissuration et la dégradation accélérée des chaussées récentes dues à la présence de sols gélifs est un sujet de recherche prioritaire au Québec comme dans tous les pays nordiques.

La "gélivité" d'un sol dépend de la disponibilité de l'eau souterraine, de sa qualité et de la rigueur de l'hiver. On doit donc étudier l'impact de ces facteurs sur la "gélivité", c'est-à-dire qu'il faut trouver les facteurs, tels que le niveau de la nappe phréatique, la quantité de sels déglaçants et éventuellement l'épaisseur d'isolation, qui assurent une protection maximale de la chaussée contre le gel. Cette étude facilitera ainsi la planification des techniques d'entretien et de réhabilitation des routes dans la province de Québec.

2. LE MODELE

Le modèle de base choisi pour ce genre d'application est le modèle à une dimension de F. Padilla et P. Gélinas, 1988a (Padilla et Villeneuve, 1989). Le modèle est très complet puisqu'il est conçu pour tenir compte du flux de l'eau et du transport de la chaleur et des solutés dans les zones non saturée et saturée du sol. Il considère aussi la formation de lentilles de glace et la possibilité de sols mixtes (granulaires et/ou argileux). Le modèle procède par la méthode des éléments finis et présente des développements numériques nouveaux permettant une très grande précision et une grande souplesse dans la simulation (Padilla *et al.*, 1988b). Le logiciel MELEF-3v exécute ce modèle.

Les inconnues du problème sont, respectivement, le potentiel total de l'eau H , la température absolue T et la concentration en solutés de l'eau liquide C . La méthode des éléments finis s'avère en général souhaitable dans ce genre d'applications (figure 1).

Tel que décrit par Pickens *et al.* (1979), la procédure intégrale de Galerkin est utilisée pour le flux non saturé et le transport de solutés. On utilise aussi cette procédure pour le transport de la chaleur. Dès que la glace est présente, on doit résoudre le problème dit de Stefan (Menot, 1979). Les phénomènes précédents sont ainsi couplés sur les discontinuités ou fronts de gel.

Les phénomènes reproduits par le présent modèle sont très variés. En plus des variables primaires (C , T , H), ce modèle contrôle 48 autres paramètres. Leur évolution dans le temps et dans l'espace se compare très bien avec la théorie de R.D. Miller, 1978. A titre d'exemple, on illustre l'évolution de quelques-unes de ces variables à la figure 2.

3. APPLICATIONS AUX PROBLEMES DE GEL DU BOULEVARD HENRI IV

3.1. Caractéristiques de la chaussée étudiée

Des forages exécutés les 19 et 20 avril 1988 ont mis en évidence la structure suivante:

- un revêtement en béton de ciment dont l'épaisseur est d'environ 19 cm;
- une fondation, d'une épaisseur moyenne de 17 cm, constituée de gravier sableux et de sable graveleux classifié GP-GM et SP-SM;
- une sous-fondation constituée de sable SP-SM et dont l'épaisseur moyenne est de 30 cm;
- un sol de support composé par une formation superficielle d'alluvions récentes (silts, argiles et sables accompagnés de matière organique) classifiées CL, PT et SM. Une couche inférieure de

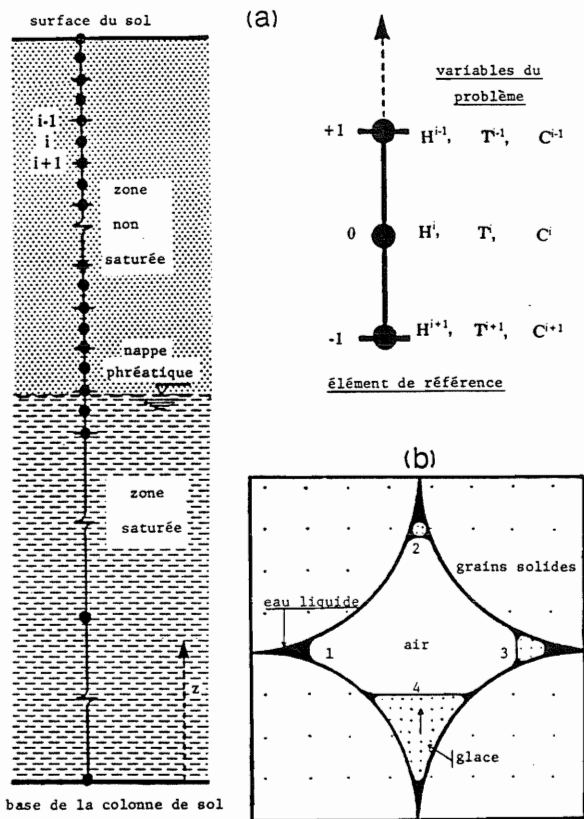


Figure 1: (a) Discretisation physique à une dimension des zones non saturée et saturée du sol.

Formes de la glace dans un milieu poreux:
 (b) non saturé, gelé (1, 2, 3, 4 = stades d'évolution de la glace);
 (c) saturé, gelé; et
 (d) saturé, gelé, avec soulèvement.

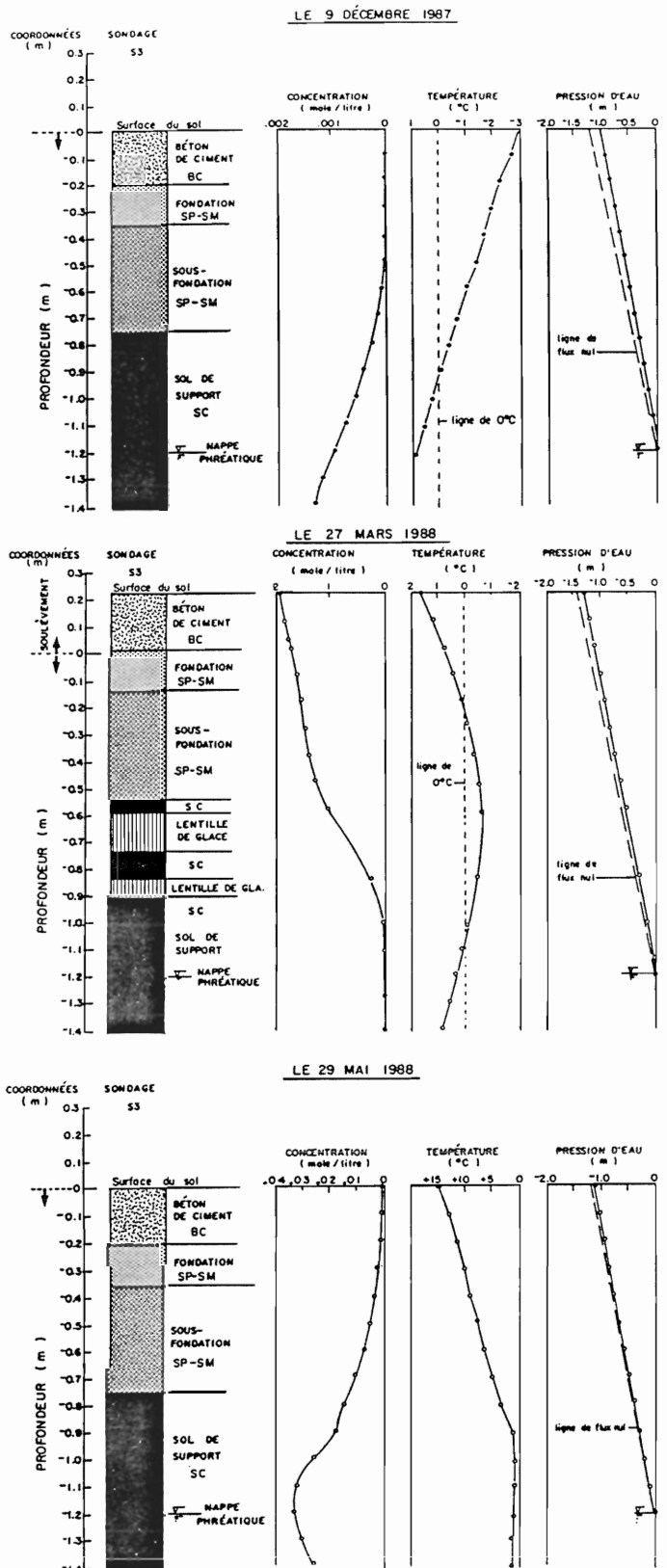


Figure 2: Evolution de certaines variables associées au comportement général d'une chaussée au cours de l'hiver 1988 (sondage S3 du boulevard Henri IV; Laroche, 1988).

sable grossier avec silt (SM) correspond à une formation de sables et graviers littoraux. Plus en profondeur, on retrouve un till remanié composé de sable moyen silteux qui est en général classifié SC. Une partie des résultats des sondages est présentée à la figure 3.

3.2. Choix des sites pour les simulations

Un des sites retenus est situé au chaînage de construction 1416+73 de la voie est. On retrouve à cet endroit le sondage S3 (figure 3) et le piézomètre P-1. Ce site a la particularité de posséder un sol de support à environ 75 cm de profondeur. Ce sol est un sable moyen, classifié SC (till remanié), avec environ de 40% de silt et argile. La profondeur de la nappe est à environ 1 mètre.

Un deuxième site se trouve au chaînage de construction 0564+53 (sondage S14) à proximité du piézomètre P-4. Ce site a la particularité de posséder un sol de support d'argile sableuse (environ 70% de silt et argile), classifiée CL, à environ 66 cm de profondeur.

3.3. Paramètres physiques utilisés

Certains des paramètres physiques des matériaux et des sols géologiques impliqués dans les simulations peuvent être évalués à partir des données qui ont été fournies par le personnel du ministère des Transport de Québec (Laroche, 1988). Cependant, il a fallu que d'autres paramètres soient estimés à partir des corrélations effectuées avec des types de matériaux semblables. Les indices de distribution des pores des fondations de la chaussée ne sont malheureusement pas disponibles. Ces indices sont toutefois essentiels pour reproduire correctement la profondeur et l'épaisseur des lentilles de glace. Si l'on considère la rigueur de l'hiver 1988 ainsi que les soulèvements enregistrés et les caractéristiques des matériaux, on peut supposer que les lentilles de glace ne se forment presque pas dans les fondations de la chaussée et que les indices de distribution des pores doivent respecter cette caractéristique.

4. RESULTATS DES SIMULATIONS

La figure 4 représente la comparaison entre les soulèvements moyens mesurés sur le chaînage de construction le plus près du sondage S3 et les soulèvements simulés. On peut remarquer que le modèle reproduit assez bien la forme du gonflement de la chaussée dû à la formation des lentilles de glace.

4.1. Action des sels sur le comportement de la chaussée

Les résultats des simulations ont indiqué que les doses actuellement utilisées, soit 65 t/km, sont suffisamment faibles pour ne pas affecter de façon importante le soulèvement de la chaussée dû à l'action du gel. Les différences ont été tellement minimes que l'on n'a pas jugé pertinent de les représenter. Cependant, des doses de sel aussi fortes que 2 000 t/km (sels qui vraisemblablement devraient être davantage dilués dans l'eau d'infiltration) seraient nécessaires pour réduire à des niveaux tolérables (3 à 4 cm) les soulèvements attendus à l'endroit étudié (figure 5).

4.2. Action de l'eau sur le comportement de la chaussée

Lorsque la nappe phréatique est superficielle (0.6 et 1.0 mètre), les soulèvements attendus (figure 6) doivent être inférieurs à ceux obtenus pour des nappes phréatiques plus profondes (2.8 et 4.0 mètres). Cela est dû à l'accumulation de glace dans les fondations de nature non-gélive retarde l'avancement du front de gel dans le sol de support gélif. Toutefois, cette accumulation d'eau et/ou de glace dans la fondation de la chaussée ne doit pas être tolérée puisqu'elle peut être à l'origine de l'instabilité structurale de la fondation. Les dégradations apparaissant sur la surface de la chaussée

seraient alors de nature différente, ce qui semble s'observer sur les lieux.

4.3. Action du renforcement sur le comportement de la chaussée

D'après cette étude, les causes principales des soulèvements rencontrés sur le tronçon en béton de ciment de l'autoroute Henri IV sont:

- a) le non respect des épaisseurs requises pour les fondations en présence de sols gélifs, et
- b) l'utilisation d'un revêtement en béton de ciment avec des propriétés thermiques nettement plus défavorables, face à l'action du gel, que celles des mélanges bitumineux.

Des simulations ont été effectuées en remplaçant le béton de ciment existant par un revêtement asphaltique. Dans ces conditions, le soulèvement maximal simulé est réduit environ 25%. Si par contre, nous utilisons un renforcement bitumineux de 20 cm d'épaisseur sur le revêtement en béton de ciment, le soulèvement maximal peut être réduit de 45% (figure 7).

5. RECOMMANDATIONS

L'état actuel des simulations effectuées sur le problème du gel des chaussées nous permet de faire les recommandations suivantes:

- a) Le modèle d'éléments finis MELEF-3v est présentement applicable à l'estimation de l'impact de la concentration de l'eau de fonte en sels déglaçants sur la qualité des eaux des aquifères. Les applications peuvent actuellement s'étendre à l'évaluation des soulèvements attendus dans des sols granulaires, faiblement colloïdaux, sous diverses conditions de simulation.
- b) Il s'est avéré nécessaire de vérifier et de calibrer les simulations pour les différents types de sols et de granulats existant au Québec. Cette calibration est plus importante encore pour les sols essentiellement argileux (colloïdaux). Les essais de gel déjà effectués sur des colonnes de sols dans les laboratoires du ministère des Transports seraient d'une grande utilité à ce sujet.
- c) Il serait souhaitable d'étudier davantage la possibilité d'augmenter les doses de sels déglaçants à des endroits où la chaussée est particulièrement sensible à l'action du gel.
- d) A l'exception des cas où la nappe phréatique pourrait provoquer l'accumulation de glace dans les fondations, un renforcement "thermiquement adéquat" peut minimiser les soulèvements et, conséquemment, les déformations qui se produisent dans des secteurs spécifiques.

Références

- LAROCHE, G. (1988). Autoroute 573, municipalité de Val-Bélair, comté de Chauveau. Service des sols et chaussées. Ministère des Transports du Québec. Rapport 0573-01-050(22) 87.
- MENOT, J.M. (1979). Equations of frost propagation in unsaturated porous media. *Engineering Geology*, 13: 101-109.
- MILLER, R.D. (1978). Frost heaving in non-colloïdal soils. *Proc. Third International Conference on Permafrost*, Edmonton, Canada: 708-713.
- PADILLA, F. et GELINAS, P. (1988a). Un modèle pour l'infiltration dans les sols gelés tenant compte de la qualité de l'eau. *Revue Canadienne de Génie Civil*, 15: 263-271.
- PADILLA, F., VILLENEUVE, J.P. et LECLERC, M. (1988b). Finite-element analysis of the transport of water, heat and solutes in frozen saturated-unsaturated soils with self-imposed boundary conditions. *Proc. VII Int. Conf. Comput. Methods in Water Res.*, MIT, USA, juin, 35: 121-126.
- PADILLA, F. et VILLENEUVE, J.P. (1989). Simulation des effets de l'hiver sur les chaussées du Québec pour une meilleure planification des techniques de protection et de réhabilitation. Fonds FCAR-Ministère des Transports (Réf.: 88-RR-0013), Rapport INRS-Eau n° 270, 55 p.
- PICKENS, J.F., GILLHAM, R.W. et CAMERON, D.R. (1979). Finite element analysis of the transport of water and solutes in tile-drained soils. *Journal of Hydrology*, 40: 243-264.

AUTOROUTE 573 (Henri IV) voie est
Direction nord
Accotement droit

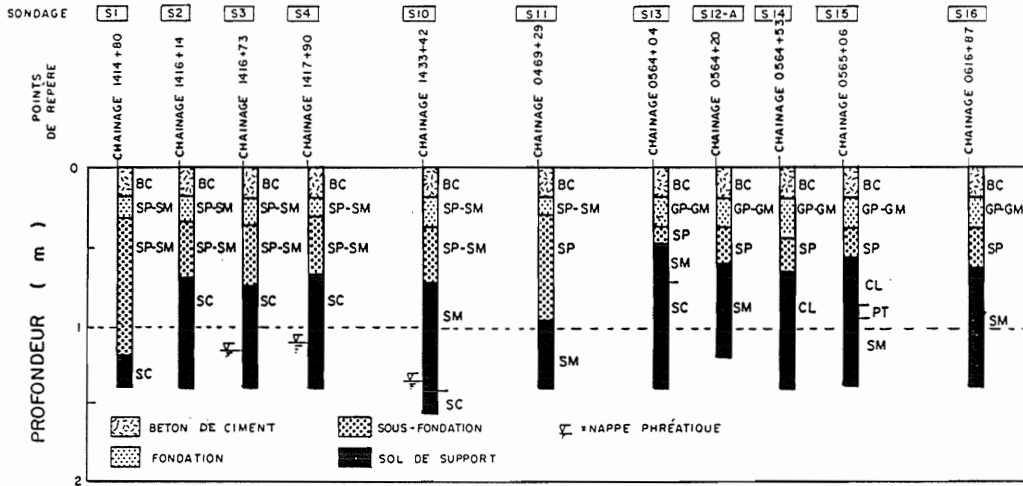


Figure 3: Caractéristiques des certains sondages effectués sur la voie est du tronçon en béton de ciment du boulevard Henri IV.

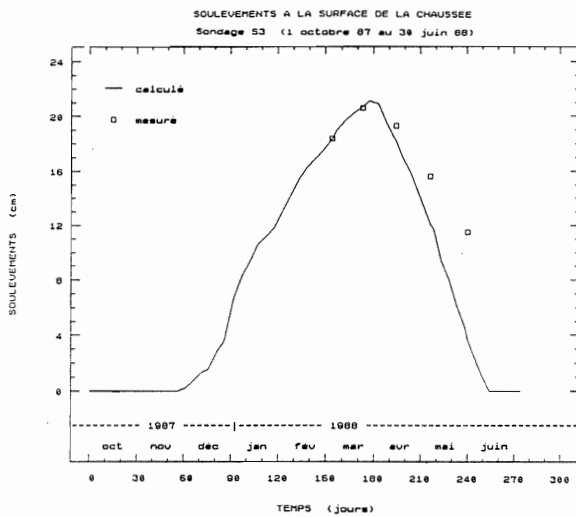


Figure 4: Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 1416 + 75, près du sondage S3, pendant la période hivernale 87-88.

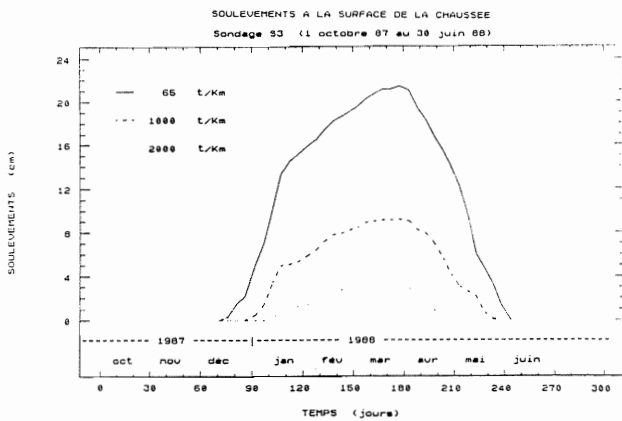


Figure 5: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 pour des doses de sels déglaçants différentes.

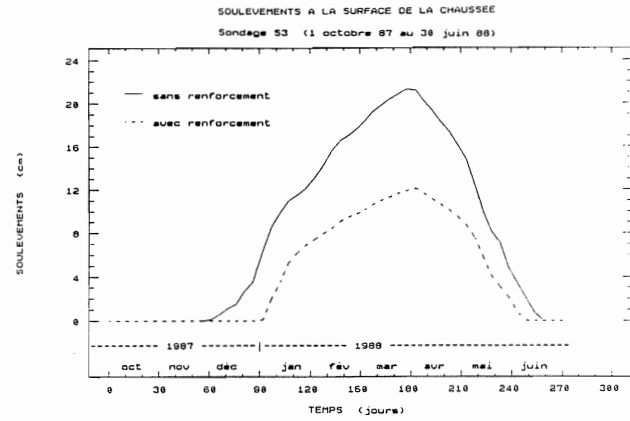


Figure 7: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 lorsqu'on utilise ou non un renforcement asphaltique de 20 cm d'épaisseur sur la surface de la chaussée.

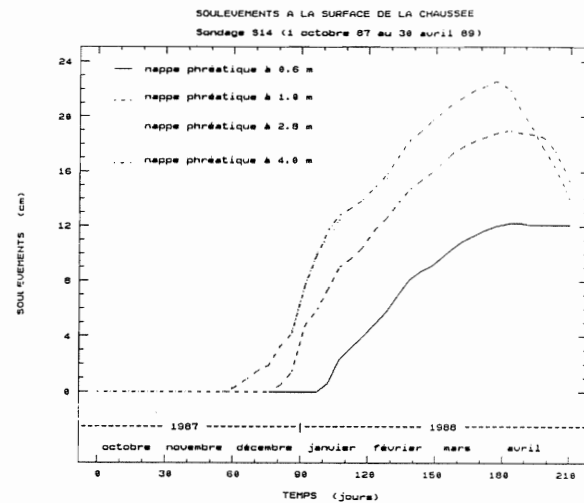


Figure 6: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S14 lorsque la nappe phréatique se trouve à 0,6 m, 1,0 m, 2,8 m et 4,0 m de profondeur.