

**Record Number:**

**Author, Monographic:** Padilla, F./Villeneuve, J. P.

**Author Role:**

**Title, Monographic:** Simulation des effets de l'hiver sur les chaussées du Québec pour une meilleure planification des techniques de protection et de réhabilitation

**Translated Title:**

**Reprint Status:**

**Edition:**

**Author, Subsidiary:**

**Author Role:**

**Place of Publication:** Québec

**Publisher Name:** INRS-Eau

**Date of Publication:** 1989

**Original Publication Date:** Mai 1989

**Volume Identification:**

**Extent of Work:** ix, 57

**Packaging Method:** pages

**Series Editor:**

**Series Editor Role:**

**Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche

**Series Volume ID:** 270

**Location/URL:**

**ISBN:** 2-89146-267-X

**Notes:** Rapport annuel 1988-1989

**Abstract:** Rapport rédigé dans le cadre du Fonds FCAR - ministère des Transports: action concertée sur l'entretien et en réhabilitation du réseau routier du Québec  
10.00\$

**Call Number:** R000270

**Keywords:** rapport/ ok/ dl

**SIMULATION DES EFFETS DE L'HIVER  
SUR LES CHAUSSEES DU QUEBEC  
POUR UNE MEILLEURE PLANIFICATION  
DES TECHNIQUES DE PROTECTION ET DE REHABILITATION**

par

Francisco PADILLA  
Jean-Pierre VILLENEUVE

Rapport scientifique INRS-Eau n° 270

mai 1989

**OBJET:** Rapport final relatif à la subvention Fonds FCAR - Ministère des Transports:  
Action concertée sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier du  
Québec, concours 1987-1988 (Réf.: 88-RR-0013).

**de:**

Université du Québec  
Institut national de la  
recherche scientifique (INRS-Eau)  
2800, rue Einstein, suite 105  
SAINTE-FOY, (Québec)  
Canada, G1X 4N8

**pour:**

Fonds pour la formation de chercheurs  
et l'aide à la recherche, Fonds FCAR  
3700, rue du Campanille  
Bureau 102  
SAINTE-FOY, (Québec)  
Canada, G1X 4G6

## **REMERCIEMENTS**

Les travaux reliés à cette étude ont été réalisés par une équipe de chercheurs de l'INRS-Eau, en collaboration avec le personnel professionnel et technique du ministère des Transports. Nous tenons à remercier Messieurs Gérard Tessier, Jean-Pierre Leroux, Denis Giroux, Paul Flon, Daniel Vézina et Richard Langlois du ministère des Transports du Québec, pour leur collaboration lors de la quête des données. Nous voulons également souligner la participation essentielle de Madame Kateri Guertin et Messieurs Michel Leclerc, Pierre Lafrance, Olivier Banton et Claude Blanchette de l'INRS-Eau. Enfin, nous remercions Madame Lucie Mercier qui a travaillé à l'édition de cette publication.

## TABLE DES MATIERES

|                                                                                           |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| REMERCIEMENTS .....                                                                       | i    |
| TABLE DES MATIERES .....                                                                  | ii   |
| LISTE DES FIGURES .....                                                                   | v    |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                                  | vii  |
| LISTE DES SYMBOLES .....                                                                  | viii |
| <br>                                                                                      |      |
| CHAPITRE 1    CONTEXTE GENERAL.....                                                       | 1    |
| 1.1    INTRODUCTION .....                                                                 | 1    |
| 1.2    PROBLEMATIQUE DU GEL DANS LES CHAUSSEES .....                                      | 1    |
| 1.3    PROBLEMATIQUE DU GEL DANS LES SOLS GELIFS .....                                    | 3    |
| <br>                                                                                      |      |
| CHAPITRE 2    LE PROJET .....                                                             | 5    |
| 2.1    INTRODUCTION .....                                                                 | 5    |
| 2.2    BUT GLOBAL DU PROJET.....                                                          | 5    |
| 2.3    OBJECTIFS PARTICULIERS .....                                                       | 6    |
| 2.4    PERTINENCE DES OBJECTIFS DU PROJET .....                                           | 6    |
| 2.5    TRAVAUX EN COURS.....                                                              | 7    |
| <br>                                                                                      |      |
| CHAPITRE 3    UN MODELE POUR LA PREVISION DU COMPORTEMENT DES<br>CHAUSSEES DU AU GEL..... | 8    |
| 3.1    CHOIX DU MODELE DE BASE .....                                                      | 8    |
| 3.2    ECHANGES D'ENERGIE A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE .....                               | 8    |
| 3.3    REABSORPTION DES LENTILLES DE GLACE .....                                          | 10   |

|            |                                                                 |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.4        | CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU MODELE .....                    | 10 |
| 3.4.1      | Enoncé du problème.....                                         | 10 |
| 3.4.1.1    | Eau liquide .....                                               | 11 |
| 3.4.1.2    | Chaleur .....                                                   | 11 |
| 3.4.1.3    | Solutés .....                                                   | 12 |
| 3.4.1.4    | Méthodes de résolution.....                                     | 12 |
| 3.4.2      | Types de conditions: formation de la glace .....                | 14 |
| 3.4.2.1    | Noeud non saturé, gelé.....                                     | 15 |
| 3.4.2.2    | Noeud saturé, gelé.....                                         | 15 |
| 3.4.2.3    | Noeud saturé, gelé, avec soulèvement .....                      | 17 |
| 3.4.3      | Vérifications du modèle .....                                   | 17 |
|            |                                                                 |    |
| CHAPITRE 4 | APPLICATIONS AUX PROBLEMES DE GEL DU BOULEVARD<br>HENRI IV..... | 22 |
| 4.1        | INTRODUCTION .....                                              | 22 |
| 4.2        | CARACTERISTIQUES DE LA CHAUSSEE ETUDIEE .....                   | 22 |
| 4.3        | APPLICATIONS.....                                               | 25 |
| 4.3.1      | Choix des sites pour les simulations.....                       | 25 |
| 4.3.2      | Paramètres physiques utilisés .....                             | 26 |
| 4.3.3      | Types des simulations effectuées.....                           | 28 |
| 4.3.3.1    | Conditions initiales .....                                      | 28 |
| 4.3.3.2    | Conditions aux limites .....                                    | 28 |
|            |                                                                 |    |
| CHAPITRE 5 | RESULTATS DES SIMULATIONS .....                                 | 30 |
| 5.1        | RESULTATS DES APPLICATIONS SUR LE SONDAGE S3.....               | 30 |
| 5.1.1      | Action des sels sur le comportement de la chaussée .....        | 32 |
| 5.1.2      | Action de l'eau sur le comportement de la chaussée .....        | 32 |
| 5.1.3      | Action du renforcement sur le comportement de la chaussée.....  | 35 |
| 5.2        | RESULTATS DES APPLICATIONS SUR LES SONDAGES S14 ET S15.....     | 35 |
| 5.2.1      | Action de l'eau sur le comportement de la chaussée .....        | 40 |
| 5.2.2      | Action du renforcement sur le comportement de la chaussée.....  | 40 |
|            |                                                                 |    |
| CHAPITRE 6 | CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....                             | 43 |
| 6.1        | CONCLUSIONS CONCERNANT LES SIMULATIONS .....                    | 43 |

|         |                                                             |    |
|---------|-------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.1   | Phénomènes simulés .....                                    | 43 |
| 6.1.1.1 | Soulèvements à la surface de la chaussée.....               | 43 |
| 6.1.1.2 | Effet des sels déglacants.....                              | 44 |
| 6.1.1.3 | Effet de la nappe phréatique.....                           | 44 |
| 6.1.1.4 | Effet du renforcement.....                                  | 45 |
| 6.1.2   | Matériaux simulés.....                                      | 45 |
| 6.1.2.1 | Revêtements .....                                           | 45 |
| 6.1.2.2 | Granulats des fondations .....                              | 45 |
| 6.1.2.3 | Sol de support SC (SO-6224).....                            | 46 |
| 6.1.2.4 | Sol de support SM (SO-6213) .....                           | 46 |
| 6.1.2.5 | Sol de support CL (SO-6211, SO-6212) .....                  | 46 |
| 6.2     | CONCLUSIONS CONCERNANT LES CONDITIONS DES SIMULATIONS ..... | 47 |
| 6.3     | RECOMMANDATIONS.....                                        | 47 |
|         | REFERENCES .....                                            | 49 |

## LISTE DES FIGURES

|            |                                                                                                                                                                                                         |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1:  | Discrétisation physique à une dimension des zones non saturée et saturée du sol. ....                                                                                                                   | 13 |
| Figure 2:  | Formes de la glace dans un milieu poreux: .....                                                                                                                                                         | 16 |
| Figure 3:  | Comparaison des données calculées et analytiques pour la convection et la dispersion des solutés dans une colonne de sol, à 2 et 6 heures, et à 1 et 2 jours .....                                      | 18 |
| Figure 4:  | Comparaison des données calculées et analytiques pour la convention (vitesse contraire) et la dispersion des solutés dans une colonne de sol, à 1, 2, 6 et 48 heures.....                               | 18 |
| Figure 5:  | Comparaison des données calculées et analytiques pour la convection et la dispersion de la chaleur dans une colonne de sol, à 1, 4, 10, 20 et 30 jours .....                                            | 19 |
| Figure 6:  | Comparaison des données calculées et analytiques, à 5 et 15 minutes, et à 1 et 2 heures, pour la saturation d'une colonne de sol à partir d'une nappe souterraine située à 2 mètres de profondeur ..... | 19 |
| Figure 7:  | 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).....                                       | 21 |
| Figure 8:  | Plan de localisation du secteur étudié.....                                                                                                                                                             | 23 |
| Figure 9:  | Caractéristiques de certains sondages effectués sur la voie est du tronçon en béton de ciment du boulevard Henri IV.....                                                                                | 24 |
| Figure 10: | Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 1416+75, près du sondage S3, pendant la période hivernale 87-88. ....                                                      | 31 |
| Figure 11: | Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 pour des doses de sels déglaçants différentes.....                                                                       | 33 |

|            |                                                                                                                                                                                               |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 12: | Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 lorsque la nappe phréatique se trouve à 1.2 m et à 2.5 m de profondeur. ....                                   | 34 |
| Figure 13: | 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. ....  | 36 |
| Figure 14: | Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 564 + 53, correspondant au sondage S14, pendant la période hivernale 87-88. ....                                 | 38 |
| Figure 15: | Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 565 + 00, près du sondage S15, pendant la période hivernale 87-88. ....                                          | 39 |
| Figure 16: | 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. ....                      | 41 |
| Figure 17: | Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S14 lorsqu'on utilise ou non un renforcement asphaltique de 20 cm d'épaisseur sur la surface de la chaussée. .... | 42 |



## **LISTE DES TABLEAUX**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Paramètres physiques utilisés dans les simulations. .... | 27 |
|---------------------------------------------------------------------|----|

## LISTE DES SYMBOLES

|           |                                                                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $c$       | chaleur spécifique ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )                                            |
| $c(H)$    | capacité thermique apparente du sol ( $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )                            |
| $C$       | concentration de solutés dissous dans l'eau ( $\text{kg m}^{-3}$ )                                 |
| $D_c$     | coefficient hydrodynamique de dispersion du soluté ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )                  |
| $D_m$     | coefficient de diffusion moléculaire du soluté ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )                      |
| $\vec{e}$ | vitesse de Darcy de l'eau liquide ( $\text{m s}^{-1}$ )                                            |
| $\vec{g}$ | flux d'eau qui devient de la glace ( $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )                            |
| $\vec{g}$ | vitesse de Darcy de la glace ( $\text{m s}^{-1}$ )                                                 |
| $H_f$     | chaleur latente de fusion de l'eau ( $\text{J kg}^{-1}$ )                                          |
| $H$       | potentiel total de l'eau liquide (Pa)                                                              |
| $i$       | indice                                                                                             |
| $k_e$     | perméabilité intrinsèque à l'eau ( $\text{m}^2$ )                                                  |
| $K$       | coefficient effectif de conduction de la chaleur ( $\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) |
| $K_v$     | constante de Von Karman                                                                            |
| $m$       | coefficient d'emmagasinement spécifique                                                            |
| $N$       | "front" ou discontinuité                                                                           |
| $n_o$     | porosité des solides minéraux                                                                      |
| $P$       | pression (Pa)                                                                                      |
| $P_b$     | pression de formation de boules d'air (Pa)                                                         |
| $P_o$     | pression matricielle à laquelle $S = S_o$ (Pa)                                                     |
| $q_e$     | flux d'eau par unité de volume de sol ( $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )                         |
| $Q$       | flux de chaleur ( $\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1}$ )                                                |
| $r$       | coefficient de rugosité de la surface de la chaussée                                               |
| $R_L$     | radiation de grande longueur d'onde ( $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                            |
| $R_s$     | radiation solaire incidente ( $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                                    |
| $S$       | saturation à l'eau liquide                                                                         |
| $S_o$     | saturation irréductible du sol                                                                     |
| $t$       | temps (s)                                                                                          |
| $T$       | température (K)                                                                                    |
| $T_c$     | valeur de la température de congélation                                                            |
| $\vec{v}$ | vitesse du vent ( $\text{m s}^{-1}$ )                                                              |
| $x_{ar}$  | facteur de partage de surface des argiles                                                          |
| $x_g$     | facteur de partage des solutés dans la glace                                                       |
| $z$       | coordonnée verticale (m)                                                                           |
| $Z_v$     | hauteur à laquelle la vitesse du vent est observée (m)                                             |
| $\alpha$  | indice de distribution de pores                                                                    |

|             |                                                                                 |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_L$  | dispersivité longitudinale (m)                                                  |
| $\alpha_s$  | albedo                                                                          |
| $\epsilon$  | émissivité de grande longueur d'onde                                            |
| $\theta$    | fraction volumique                                                              |
| $\eta$      | viscosité dynamique ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )                        |
| $\pi$       | pression osmotique de l'eau liquide (Pa)                                        |
| $\rho$      | densité ( $\text{kg m}^{-3}$ )                                                  |
| $\sigma$    | constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{J m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{K}^{-4}$ ) |
| $\sigma_z$  | composante verticale de la contrainte totale du sol (Pa)                        |
| $\sigma'_z$ | composante verticale de la contrainte effective du sol (Pa)                     |
| $\tau$      | coefficient de transformation capillaire                                        |
| $[ ]_N$     | variation d'un côté et de l'autre de la discontinuité N                         |

a, e, g, s (indices inférieurs): air, eau, glace, solides minéraux.  
 \*, ° (indices supérieurs): valeur connue, valeur en °C.

## CHAPITRE 1

### CONTEXTE GENERAL

#### 1.1 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.

Pendant la période de gel, les dégradations subies par la chaussée sont en général peu importantes et se limitent à une légère fissuration superficielle. Cette fissuration est causée par des gonflements différentiels dans le sol de support associés à une fragilisation du revêtement sous l'effet du froid.

Au cours de la période de dégel, tant que l'isotherme de dégel n'a pas atteint le sol de support, la circulation peut entraîner l'apparition de dégradations, telles que la fissuration et même l'arrachement partiel du revêtement de la chaussée.

Lorsque l'isotherme de dégel atteint le sol gélif, ce dernier peut, selon sa nature, perdre toute consistance et se transformer en une véritable "bouillie de dégel". La chaussée repose alors sur un sol n'ayant plus aucune portance sur une certaine épaisseur. L'effet de la circulation lourde peut alors devenir catastrophique et entraîner, dans certains cas, la destruction presque totale de la route. Dans la plupart des cas, les fissures atteignent presque le sol de support; d'autres fissures s'en tiennent au revêtement.

Lorsque le dégel est terminé, un affaissement graduel de la chaussée sous le poids de la circulation peut encore se produire. Le sol sous-jacent récupère alors progressivement sa portance initiale de sorte que la fissuration peut s'accroître. La durabilité de la chaussée est alors grandement réduite.

#### 1.2 PROBLEMATIQUE DU GEL DANS LES CHAUSSEES

L'utilisation de nouvelles **chaussées rigides** anti-gel est maintenant de pratique courante (Eisenmann et Leykauf, 1974). Ces chaussées sont moins épaisses que les

chaussées classiques souples, ce qui entraîne une économie de matériau. Certaines comportent (Eaton et Van Pernis, 1974) des couches d'isolation, souvent en béton Styropor, et des couches de roulement en béton bitumineux ou même en béton armé continu (Apostolopoulos et Schneider, 1974; Balduzzi, 1974). Le principe repose sur l'isolation thermique et/ou la diminution des contraintes à la base de la fondation. Cependant, les chaussées minces sont généralement soumises aux gonflements et à la perte de capacité portante du sol gélif sous-jacent. Quoique la fatigue de ces chaussées ne soit pas bien connue, des fractures peuvent apparaître dès la première année. Les nouvelles **chaussées souples**, avec couches d'isolation à la base sont aussi très utilisées. Les matériaux d'isolation sont le plus souvent le polystyrène expansé ou extrudé (Recordon et Dysli, 1974; Dunphy, 1974), la fibre de bois ou d'écorce (Knutson, 1974) et le gravier léger ou le sable (Orama, 1974). Le principe de ces chaussées repose sur l'économie des matériaux granulaires et leur pouvoir d'isolation à la pénétration du gel. Cependant, leur construction est en général plus délicate que dans le cas des chaussées rigides anti-gel.

En ce qui a trait au **renforcement des chaussées** dégradées par l'action du gel, le traitement superficiel est assez courant (Hansen et Refsdal, 1974). On utilise souvent une couche supérieure avec certaines propriétés d'isolation thermique sous un revêtement bitumineux de roulement. Plusieurs méthodes économiques de régénération des couches de surface des chaussées sont aussi utilisées pour le renforcement. Parmi les techniques existantes, le recyclage en place permet le rehaussement de la route et l'amélioration de la performance des matériaux existants (Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 1981).

Lorsqu'on considère les couches d'isolation superficielles, on doit se préoccuper des gradients thermiques à la surface de la chaussée. Si les gradients sont faibles et les températures sous 0°C, ils favorisent l'apparition de verglas (Frémond, 1979), ce qui nécessite l'utilisation de sels déglaçants. Dans ce cas, une action basée sur l'expérience des ingénieurs est la plus recommandée (Orama, 1974).

Il faut mentionner que les fondations des chaussées sont faites de matériaux granulaires très peu gélifs. C'est donc la gélivité du sol sous-jacent qui cause le gonflement et qui entraîne une diminution de la capacité portante au printemps et la dégradation progressive de la chaussée (Nordal, 1974). La chaussée a donc une fonction mécanique et une autre thermique par rapport aux effets du gel sur le sol sous-jacent. La fonction mécanique lui permet de réagir à la perte de capacité portante du sol gélif sous le poids du trafic au printemps. La fonction thermique réduit la pénétration du gel dans le sol de support.

### 1.3 PROBLEMATIQUE DU GEL DANS LES SOLS GELIFS

Le terme "sol gélif" est un terme mécanique désignant les sols susceptibles de présenter une augmentation appréciable de leur volume ordinaire sous l'effet du gel. Il s'ensuit une perte considérable de la capacité portante de ces sols au moment du dégel. Les sols seront plus ou moins gélifs en fonction de la rigueur de l'hiver, de la disponibilité en eau, de leur perméabilité, de leur granulométrie et de leur composition. Les sols considérés comme plus gélifs sont les limons, les argiles limoneuses et les sables fins.

Depuis quelques années, le problème de l'infiltration de l'eau à travers les sols gelés attire l'attention des hydrogéologues. La théorie concernant ce phénomène est principalement attribuable à R.D. Miller (dans Hillel, 1980; Miller, 1978; Miller, 1980). Cependant, certains auteurs ont des approches théoriques différentes (Takagi, 1980).

R.L. Harlan (1973) a développé un des premiers modèles numériques de prévision sur les sols granulaires gelés. Par la suite, plusieurs modèles de simulation du mouvement de l'eau et de la chaleur à une dimension ont été conçus, surtout pour la zone saturée du sol (Taylor et Luthin, 1978; Fukuda, 1983; Berg *et al.*, 1980; Hromadka *et al.*, 1981; Gilpin, 1980; O'Neill et Miller, 1985; Runchal, 1982). Dans la zone non saturée, il faut mentionner l'application de Hopke (1980). Tout dernièrement, J.W. Cary (1987) a proposé une nouvelle méthode pour évaluer le gonflement dû au gel. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un modèle numérique et que l'approche soit beaucoup plus simple que les précédentes, il faut compter ce modèle parmi les premiers qui considèrent la salinité de l'eau dans la simulation. Récemment, F. Padilla et P. Gélinas (1988a) ont développé un modèle par la méthode des éléments finis tenant compte du flux de l'eau et du transport de la chaleur et des solutés dans les zones non saturée et saturée du sol. Ce modèle considère le gonflement du sol dû au gel et la présence de sols mixtes granulaires et/ou colloïdaux (Padilla, 1986). Encore de nos jours, un des paramètres qui présente le plus de difficulté à la simulation est le soulèvement du sol dû au gel, c'est-à-dire la capacité du sol à former des lentilles de glace. Plusieurs des modèles ont également besoin d'être vérifiés et/ou calibrés pour les différents types de sols. La plupart des modèles ont été étudiés par Anderson et Morgenstern (1973), Dingman (1975), Loch (1981) et O'Neill (1983). Dans ces études, on considère que la théorie concernant ce phénomène n'est qu'au début de son développement. Elle est, de plus, assez complexe pour justifier l'utilisation de modèles très complets.

Bien que de nombreuses expérimentations sur les sols gelés aient été faites durant les dernières années, le point le plus controversé demeure le mécanisme de

gonflement par le gel. A ce sujet, les essais de laboratoire sur les sols gélifs (E. Penner et T. Ueda, 1977) offrent les données nécessaires pour la vérification des modèles existants.

Des essais ont été faits pour appliquer la théorie existante sur les sols gelés aux problèmes des chaussées. Parmi les plus classiques se trouve le modèle de M. Frémond (1979). Des essais plus complets ont été faits par R.L. Berg et al. (1980). Les vérifications expérimentales effectuées en laboratoire et les travaux d'autres chercheurs (O'Neill, 1983) n'ont malheureusement pas corroboré la fiabilité de la simulation de R.L. Berg. Des modèles plus représentatifs seraient donc souhaitables.

## **CHAPITRE 2**

### **LE PROJET**

#### **2.1 INTRODUCTION**

Le besoin d'un outil de prévision fiable, qui soit adapté aux diverses caractéristiques des chaussées, des sols et de l'hiver, se dégage clairement de la problématique précédente. Cet outil ou modèle doit être vérifié et/ou calibré. Ce modèle doit être suffisamment complet pour être adapté aux caractéristiques des sols et des chaussées québécois. Il doit considérer le transport des sels déglacants ainsi que leur effet sur la gélivité (Cary *et al.*, 1979); il doit également être adaptable à différents types de sols granulaires et argileux. Enfin ce modèle pourra être utilisé pour étudier des cas particuliers ou pour optimiser le choix des techniques de protection de la route.

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 déglacants et éventuellement l'épaisseur d'isolation, qui assurent une protection maximale de la chaussée contre le gel.

#### **2.2 BUT GLOBAL DU PROJET**

Le but de ce projet est de quantifier les phénomènes qui se produisent dans les sols et les fondations des chaussées de la province de Québec durant les périodes de gel et de dégel de l'hiver. D'un point de vue pratique, ce projet permettra d'évaluer l'impact néfaste du gel sur les chaussées et les sols de nos régions. Ceci permettra d'optimiser et de contrôler les répercussions des techniques d'entretien, de réhabilitation et/ou de renforcement du réseau routier du Québec.

L'entretien et le renforcement des chaussées contre les effets du gel se font principalement par l'addition de sels déglacants, par l'installation de systèmes de drainage, et par la mise en place de couches supérieures d'isolation (Jeuffroy, 1985). Il est important de remarquer que l'utilisation de sels déglacants est liée au transport de solutés, que les drainages sont associés au transport de l'eau et que les couches d'isolation sont reliées au transport de la chaleur. S'intéresser aux diverses techniques



de protection contre le gel revient donc à étudier les différents phénomènes de transport qui y sont liés. On peut difficilement optimiser ou rentabiliser une des actions possibles contre le gel, si l'on ne peut évaluer leur effet conjoint sur le comportement général de la chaussée et du sol gélif.

### **2.3 OBJECTIFS PARTICULIERS**

Le but global de ce projet peut être décomposé en ces objectifs particuliers:

- 1) Disposer d'un modèle fiable de prévision des effets du gel sur la distribution des paramètres et sur le comportement des chaussées et des sols.
- 2) Vérifier ce modèle pour différents types de sols et de chaussées du Québec.
- 3) Appliquer ce modèle à des exemples québécois afin d'être en mesure de mieux planifier les techniques d'entretien et de réhabilitation du réseau routier.
- 4) Etudier les effets du niveau de la nappe phréatique et des doses de sels déglacants sur le comportement de la chaussée, ceci dans le but de minimiser les effets du gel et les coûts qui y sont attribués.
- 5) Disposer d'un outil de prévision adapté aux problèmes de gel dans les chaussées et dans les sols du Québec afin d'apporter des solutions sécuritaires à long terme lors de la construction de nouvelles chaussées ou de la réhabilitation du réseau routier existant.

### **2.4 PERTINENCE DES OBJECTIFS DU PROJET**

Les objectifs ci-haut mentionnés s'inscrivent dans les priorités de recherche énoncées par le ministère des Transports:

- 1) Etablissement de modèles prévisionnels (La gestion).
- 2) Etablissement de règles d'intervention pour l'entretien et le renforcement des chaussées (La gestion).
- 3) Méthodes économiques de contrôle des sols gélifs (Les techniques).

- 4) Etude des variations de température et de ses effets sur le comportement des chaussées (Les techniques).
- 5) Effet des sels de déglacage sur le comportement des chaussées (Les techniques).
- 6) Méthodes économiques de contrôle des polluants routiers (Les techniques).
- 7) Techniques de réhabilitation des chaussées dont la dégradation est produite par l'action du gel (Les techniques).

## **2.5 TRAVAUX EN COURS**

Les travaux présentement en cours dans le cadre de ce projet sont les suivants:

- 1) Mettre au point un modèle fiable de prévision des effets du gel sur l'évolution du comportement des chaussées et des sols sous-jacents. Ce modèle facilitera la planification des techniques d'entretien et de réhabilitation des routes.
- 2) Appliquer ce modèle à différents types de chaussées au Québec.
- 3) Etudier l'influence de la profondeur de la nappe phréatique et des sels de déglacage sur le comportement de la chaussée et du sol.

## **CHAPITRE 3**

# **UN MODELE POUR LA PREVISION DU COMPORTEMENT DES CHAUSSEES DU AU GEL**

### **3.1 CHOIX DU MODELE DE BASE**

Le modèle de base choisi pour ce genre d'application est le modèle à une dimension de F. Padilla et P. Gélina, 1988a (Padilla, 1986). Les raisons du choix sont simples:

- 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. Il a été développé par les membres de l'équipe.

Les caractéristiques du modèle de base utilisé sont décrites dans les références indiquées ci-dessus. Néanmoins, des modifications et de nombreux tests ont été nécessaires ultérieurement afin de rendre le programme original applicable aux caractéristiques thermiques des chaussées et aux problèmes de la réabsorption des lentilles de glace lors du gel-dégel.

### **3.2 ECHANGES D'ENERGIE A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE**

Des modifications ont été effectuées afin d'adapter le modèle de base aux caractéristiques thermiques des chaussées.

Pour traiter le problème des échanges d'énergie à la surface des chaussées, on doit tenir compte de facteurs autres que la simple température extérieure (Frémond, 1979; Noss, 1974). A partir des échanges énergétiques, certaines relations thermodynamiques permettent de décrire l'évolution de la température à la surface de la chaussée. Nous avons utilisé cette approche afin de pouvoir donner plus de fiabilité à l'aspect thermique de la simulation sur les chaussées.

Parmi les paramètres climatiques pouvant déterminer la température à la surface de la chaussée, on doit noter: la précipitation, la radiation solaire, la température extérieure et la vitesse du vent. Tous ces paramètres ont été inclus dans la simulation à travers deux types de conditions limites à la surface (Akan, 1984; Padilla et al., 1988b):

a) condition limite de Neuman pour l'ensoleillement,

$$Q = R_s (1 - \alpha_s) + \epsilon (R_L - \sigma T^4) \quad (2)$$

où:

$Q$  = flux d'énergie à la surface,  $J m^{-2} s^{-1}$   
 $R_s$  = radiation solaire incidente,  $J m^{-2} s^{-1}$   
 $R_L$  = radiation de grande longueur d'onde,  $J m^{-2} s^{-1}$   
 $\alpha_s$  = albedo  
 $\epsilon$  = émissivité de grande longueur d'onde  
 $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann,  $J m^{-2} s^{-1} K^{-4}$   
 $T$  = température à la surface de la chaussée

b) condition limite de Cauchy pour la précipitation, la température extérieure et la vitesse du vent,

$$Q = c_e q_e (T^* - T) + \rho_a c_a \frac{K_v^2 \vec{v}}{\left[ \ln \frac{z_v}{r} \right]^2} (T^* - T) \quad (3)$$

où:

$c_e$  et  $c_a$  sont les chaleurs spécifiques de l'eau et de l'air,  $J kg^{-1} K^{-1}$

- $\rho_a$  = densité de l'air,  $\text{kg m}^{-3}$
- $q_e$  = précipitation,  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- $K_v$  = constante de Von Karman
- $\vec{v}$  = vitesse du vent,  $\text{m s}^{-1}$
- $Z_v$  = hauteur à laquelle la vitesse du vent est observée, m
- $r$  = coefficient de rugosité de la surface de la chaussée
- $T^*$  = température extérieure

Toutefois, il faudra décider de la pertinence de chaque paramètre en fonction de sa disponibilité, de la précision apportée à la simulation et des caractéristiques spécifiques du problème.

### **3.3 REABSORPTION DES LENTILLES DE GLACE**

Afin d'être en mesure de simuler la réabsorption des lentilles de glace, le modèle de base qui possédait tous les éléments pour le gel a été testé pour différentes conditions de gel-dégel dans le sol.

Lorsqu'il y a une augmentation de la température ou de la concentration en sels dissous, la réabsorption des lentilles de glace existantes fait que la chaussée repose sur un sol n'ayant plus aucune portance. La circulation lourde entraîne alors l'affaissement différentiel de la structure de la chaussée.

L'inversion gel-dégel a donc été ajoutée et vérifiée dans le logiciel MELEF-3v. La théorie utilisée concernant ce phénomène est en général attribuable à R.D. Miller (1978). Les applications les plus évoluées de cette théorie font état des caractéristiques des phénomènes impliqués lors du gel-dégel (O'Neill, 1983; O'Neill et Miller, 1985). Les modifications informatiques effectuées à ce sujet sont destinées à conserver les bilans des différentes masses existantes, tout en respectant la théorie de R.D. Miller concernant la formation de la glace dans les milieux poreux.

### **3.4 CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU MODELE**

#### **3.4.1 Enoncé du problème**

On désire décrire l'évolution mécanique, thermique et chimique d'un milieu poreux où l'air, à la pression atmosphérique, peut coexister avec l'eau en forme liquide

et/ou solide (glace). Ces hypothèses permettront de mieux comprendre les équations différentielles qui sont utilisées et qui contrôlent le flux de l'eau et le transport de la chaleur et des solutés dans un milieu poreux en présence de glace.

#### 3.4.1.1 Eau liquide

L'équation de l'écoulement de l'eau liquide dans un milieu poreux partiellement saturé et/ou gelé s'écrit comme suit (Brutsaert et El-Kadi, 1984; Laliberté et al., 1967; Milly, 1982; Padilla et Gélinas, 1988a):

$$\begin{aligned} \rho_e m(H, T) \frac{(P_e - P_g)}{\tau(T)} \frac{\partial \tau(T)}{\partial t} - \rho_e m(H, T) \frac{\partial P_g}{\partial t} \\ + \rho_e m(H, T) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_e \frac{k_e(H, T)}{\eta_e(T)} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + q_e - g \end{aligned} \quad (4)$$

où les deux premiers termes indiquent les flux d'eau engendrés lors des variations de la tension superficielle et de la pression de la glace, respectivement;  $T$  est la température,  $H$  est le potentiel de l'eau,  $P_e$  et  $P_g$  sont les pressions de l'eau et de la glace;  $k_e$  est la perméabilité intrinsèque à l'eau,  $\eta_e$  est la viscosité dynamique de l'eau, et  $\tau$  est le coefficient de transformation capillaire qui dépend du rapport des tensions superficielles dans des conditions standards et réelles; enfin,  $m$  est le coefficient d'emménagement spécifique, et  $g$  est le flux d'eau qui devient de la glace.

#### 3.4.1.2 Chaleur

Les hypothèses précédentes permettent d'exprimer comme suit le transport de la chaleur dans un milieu poreux (De Vries, 1963; Menot, 1979; O'Neill et Miller, 1985):

$$\begin{aligned} c(H) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(H) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho_e c_e \frac{\partial T}{\partial t} \\ + ((c_e - c_g) T + H_f) g + Q \end{aligned} \quad (5)$$

où  $c(H)$  est la capacité thermique apparente du sol,  $H_f$  est la chaleur latente de fusion de l'eau,  $\vec{e}$  est la vitesse de Darcy de l'eau et  $K$  est la conductivité thermique du milieu.

### 3.4.1.3 Solutés

L'équation différentielle pour le NaCl présent dans la phase liquide peut être exprimée comme suit (Padilla et Gélinas, 1988a; Padilla et al., 1988b; Pickens et al., 1979):

$$\theta_e \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \theta_e D_c \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \vec{e} \frac{\partial C}{\partial z} + (C^* - C) \frac{q_e}{\rho_e} + (1 - X_g) \frac{g}{\rho_e} C \quad (6)$$

où  $C$  est la concentration des solutés dissous dans l'eau,  $C^*$  est la concentration de l'eau qui s'infiltre,  $\theta_e$  est la teneur en eau,  $X_g$  est le facteur de partage des solutés dans la glace et  $D_c$  est le coefficient hydrodynamique de dispersion du soluté.

### 3.4.1.4 Méthodes de résolution

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. Cependant, afin d'éviter le manque de précision des éléments linéaires sur les bilans (Nieber 1980), nous avons discrétisé le milieu physique avec des éléments quadratiques (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. Toutefois, les conditions aux limites ont été améliorées et augmentées afin de mieux représenter les conditions réelles des phénomènes impliqués, tant dans les sols en général que dans les sols gelés en particulier.

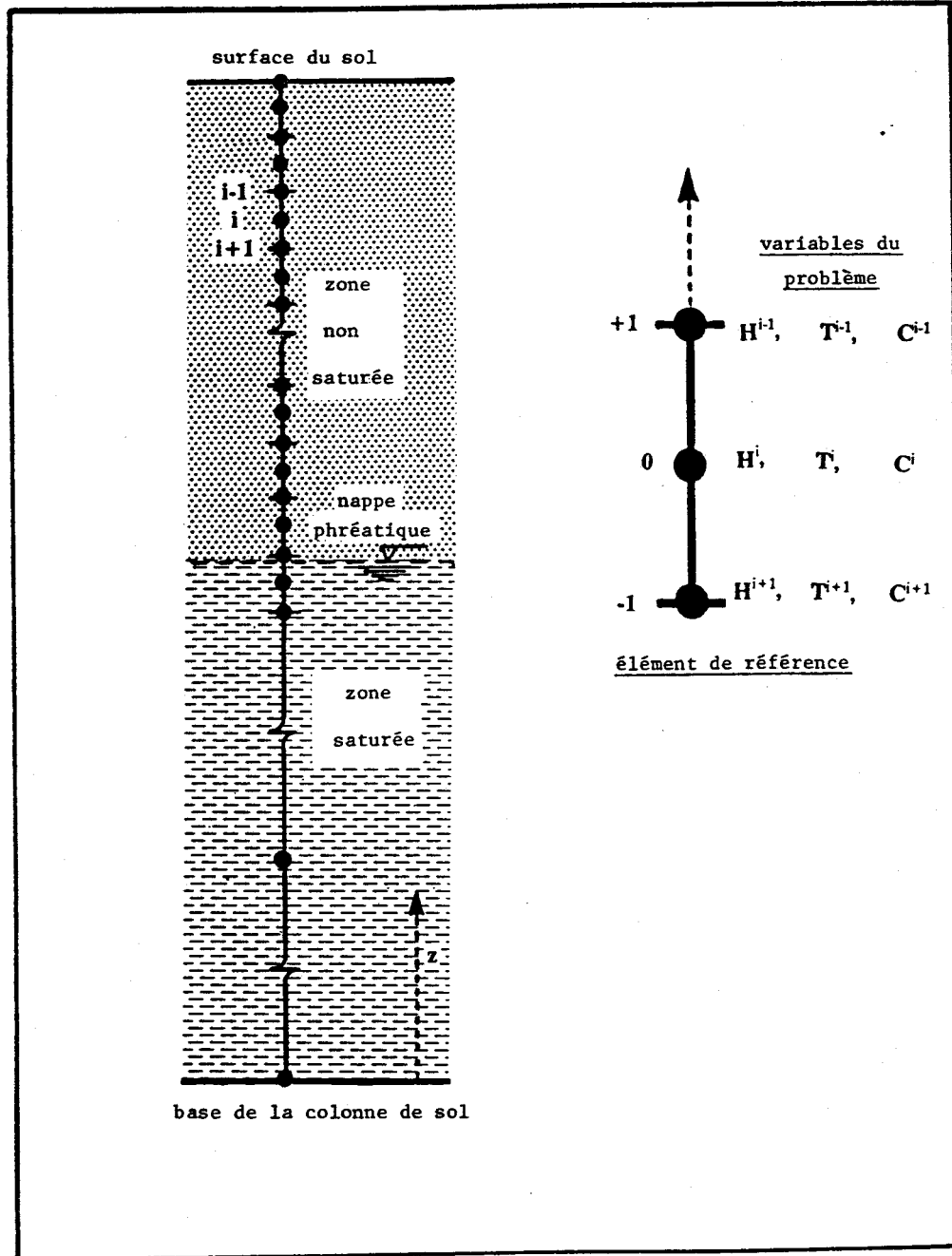


Figure 1: Discrétisation physique à une dimension des zones non saturée et saturée du sol.



Il y a quatre types de conditions aux limites qui s'imposent:

- (1) condition de Dirichet où la variable est imposée;
- (2) condition de Neuman où le flux est imposé;
- (3) condition de Cauchy où la variable et le flux sont imposés (seulement applicable aux équations de transport); et
- (4) condition auto-imposée où les conditions dépendent de la solution (Padilla et al. 1988b).

Nous avons à résoudre trois systèmes d'équations par la méthode des éléments finis. Trois méthodes pour la résolution non linéaire de ces équations sont disponibles dans MELEF-3v:

- a) la méthode itérative de Crank-Nicholson ou bien la méthode implicite d'Euler;
- b) l'évaluation de matrices aux pas intermédiaires; et
- c) la méthode de Runge-Kutta au cinquième ordre de troncature.

Ces deux dernières techniques comportent, dans certains cas, une épargne considérable de temps de calcul sans que cela n'affecte grandement l'exactitude de la solution.

### **3.4.2 Types de conditions: formation de la glace**

Les différentes conditions rencontrées sur le terrain peuvent être classées par association avec la discrétisation numérique en types de noeuds différents. Ces noeuds sont:

- (a) saturés sans glace;
- (b) non saturés sans glace;
- (c) non saturés avec glace;
- (d) saturés avec glace; et
- (e) saturés avec soulèvement produit par la glace.

Lorsqu'il n'y a pas de glace (noeuds a et b), le changement de phase  $g$  est nul (pas de front) et les trois variables  $C$ ,  $T$  et  $H$  sont résolues par [5], [4] et [3] respectivement. Cependant, dès que la glace est présente (noeuds c, d et e),  $g$  n'est pas nul et les équations précédentes doivent être couplées sur les discontinuités. On peut ainsi démontrer en résolvant le problème dit de Stefan (Menot, 1979) que pour chaque élément de discrétisation physique  $\Delta z$ :

$$g = - \frac{\left[ K \frac{\partial T}{\partial z} \right]_N}{(T (C_e - C_g) + H_f) \Delta z} \quad (7)$$

On peut observer maintenant les conséquences de l'énoncé du problème de Stefan (figure 2) pour chacun des trois noeuds gelés.

#### 3.4.2.1 Noeud non saturé, gelé

Il faut tout d'abord remarquer que l'eau liquide commence à geler dans la zone non saturée du sol dès que la température est assez basse pour satisfaire l'équation de Classius-Clapeyron (Kay et Groenevelt, 1974; Groenevelt et Kay, 1974; Miller, dans Hillel 1980)

$$\frac{P_e}{\rho_e} = \frac{P_g}{\rho_g} + \left[ \frac{H_f}{273,15} \right] T^o + \frac{\pi}{\rho_e} \quad (8)$$

lorsque  $P_g = 0$  (la glace étant en équilibre avec la pression atmosphérique de l'air):

$$\frac{(P_e - \pi)}{\rho_e} = \left[ \frac{H_f}{273,15} \right] T^o_c \quad (9)$$

La formation de glace dans un volume de sol non saturé s'emploie dans une grande proportion à remplir les pores occupés par l'air (figure 2a).

#### 3.4.2.2 Noeud saturé, gelé

Quand l'air est tout à fait chassé, le volume de sol devient saturé. A ce moment, la pression de la glace n'est plus nulle ( $P_g \neq 0$ ). Pour qu'un noeud non gelé et saturé commence à geler, il faut que la température soit assez basse (Ayers et Campbell, 1951; Koopmans et Miller, 1966) pour satisfaire l'expression [7] lorsque  $P_g = P_e$ :

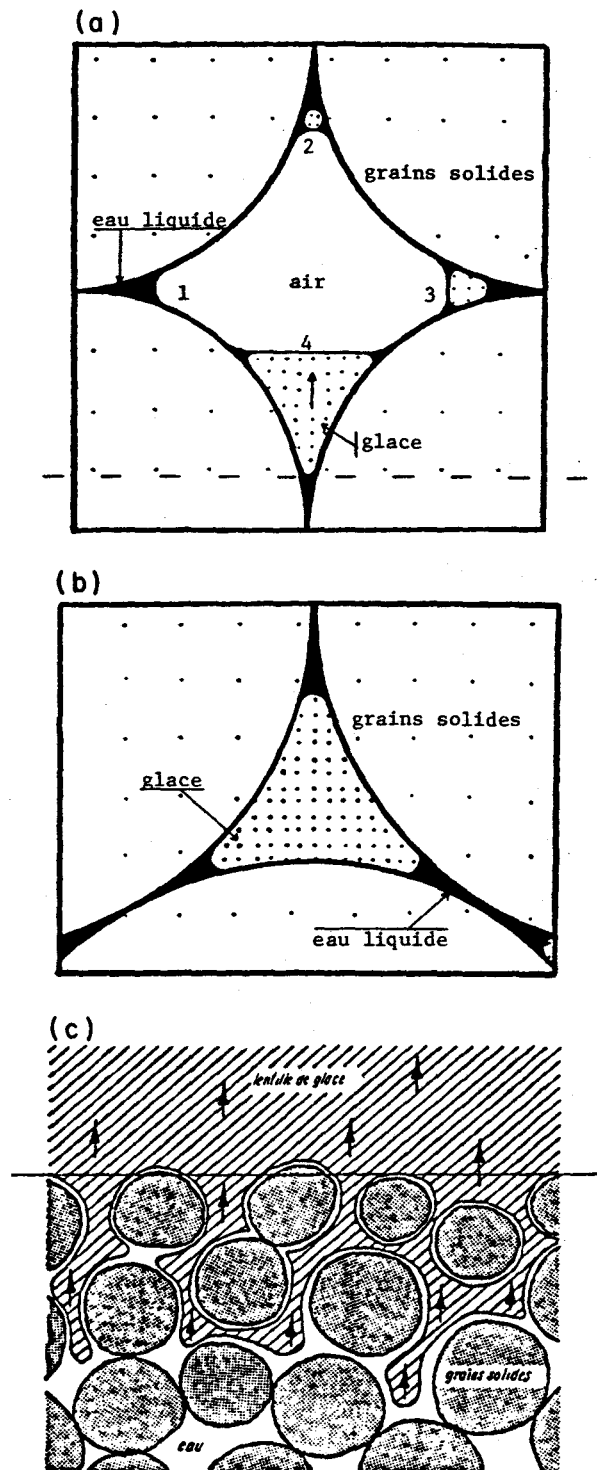


Figure 2: Formes de la glace dans un milieu poreux:  
 (a) non saturé, gelé (1, 2, 3, 4 = stades d'évolution de la glace);  
 (b) saturé, gelé; et  
 (c) saturé, gelé, avec soulèvement.

$$P_e - \left[ \frac{\rho_g}{(\rho_g - \rho_e)} \right] \pi = \left[ \frac{\rho_g \rho_e}{(\rho_g - \rho_e)} \right] \left[ \frac{H_f}{273,15} \right] T^{\circ}_c \quad (10)$$

Le front est mobile à ce moment-là et la vitesse de la glace est donc nulle. (figure 2b)

### 3.4.2.3 Noeud saturé, gelé, avec soulèvement

Il faut dire que, selon la méthode de Miller (O'Neill et Miller, 1985), le noeud saturé ne se soulève pas tant que la contrainte effective  $\sigma'_z$  n'est nulle (Miller, 1980), c'est-à-dire, tant que:

$$\sigma_z \leq \frac{\theta_e}{n_0} P_e + \frac{\theta_g}{n_0} P_g \quad (11)$$

Lorsque cette condition se réalise, le sol commence à se soulever ou à gonfler au noeud indiqué. Nous retrouvons alors la définition de la vitesse de formation d'une lentille de glace  $\vec{g}$  (figure 2c):

$$\vec{g} = g \frac{\Delta z}{\rho_g} \quad (12)$$

L'approche exprimée ci-dessus est basée sur le concept de discontinuité du problème de Stefan ainsi qu'en partie sur la théorie de R.D. Miller.

### 3.4.3 **Vérifications du modèle**

Afin de vérifier la précision des simulations, on a comparé les résultats du modèle avec la solution analytique à une dimension de Ogata et Banks (1961) pour l'équation de transport. Les résultats obtenus pour la concentration et la température sont en général plus précis dès qu'on utilise la méthode de Crank-Nicholson. La variable (C ou T) est imposée sur une des frontières tandis que la condition à la limite est auto-imposée sur l'autre. On obtient ainsi des résultats très précis sur tout le domaine discrétisé. La maille de discrétisation spatiale étant de 10 cm dans ce cas particulier.

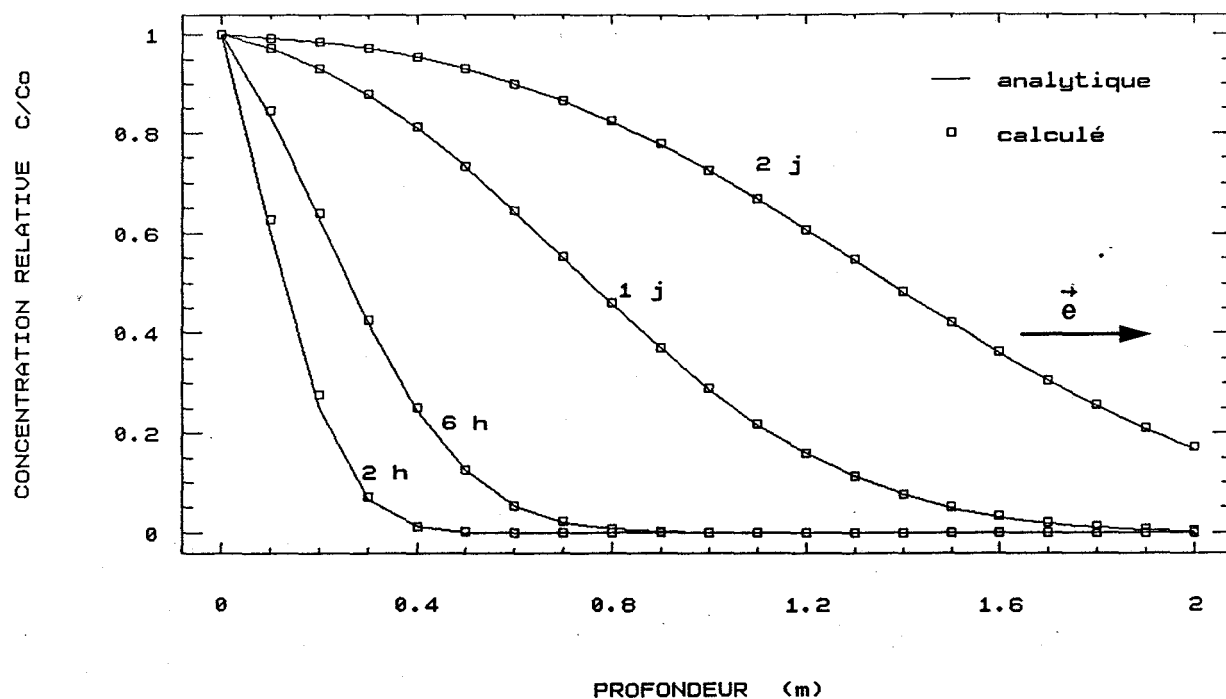


Figure 3: Comparaison des données calculées et analytiques pour la convection et la dispersion des solutés dans une colonne de sol, à 2 et 6 heures, et à 1 et 2 jours.

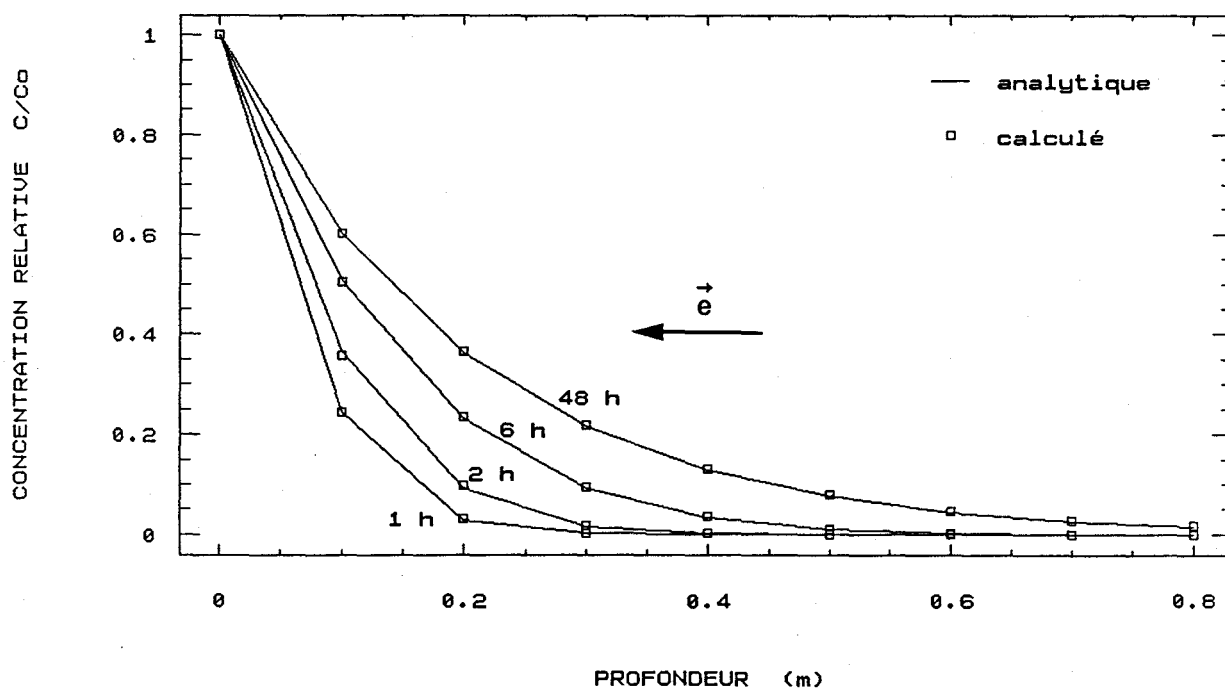


Figure 4: Comparaison des données calculées et analytiques pour la convection (vitesse contraire) et la dispersion des solutés dans une colonne de sol, à 1, 2, 6 et 48 heures.

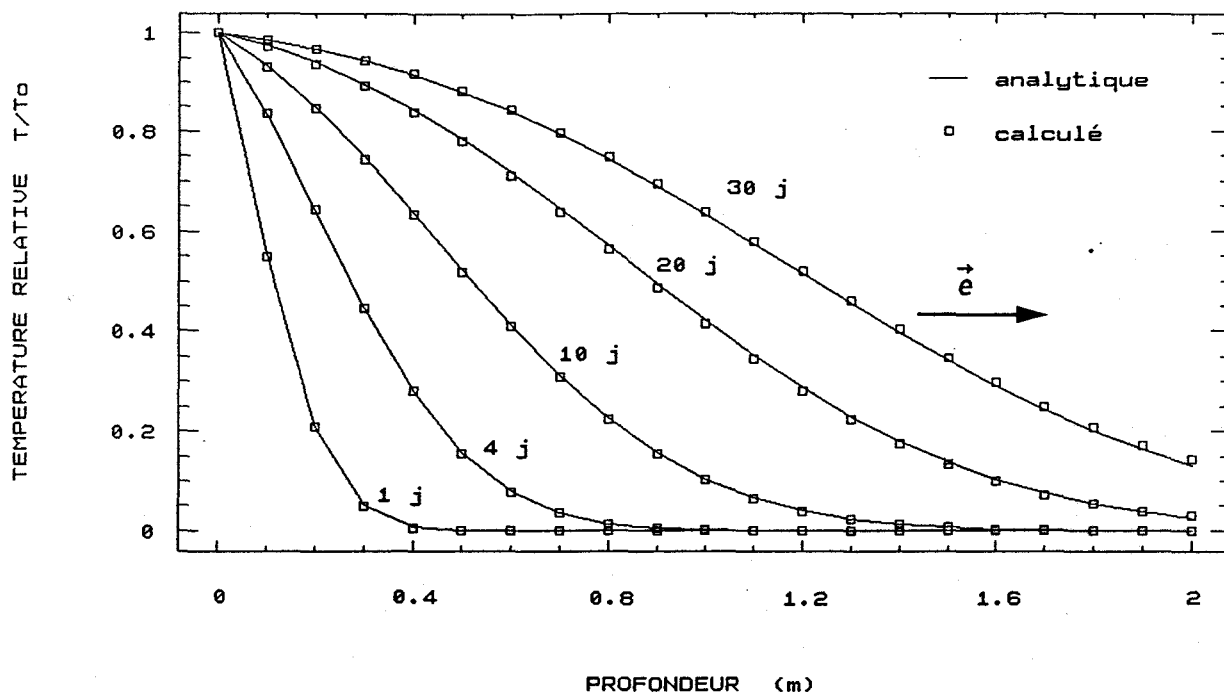


Figure 5: Comparaison des données calculées et analytiques pour la convection et la dispersion de la chaleur dans une colonne de sol, à 1, 4, 10, 20 et 30 jours.

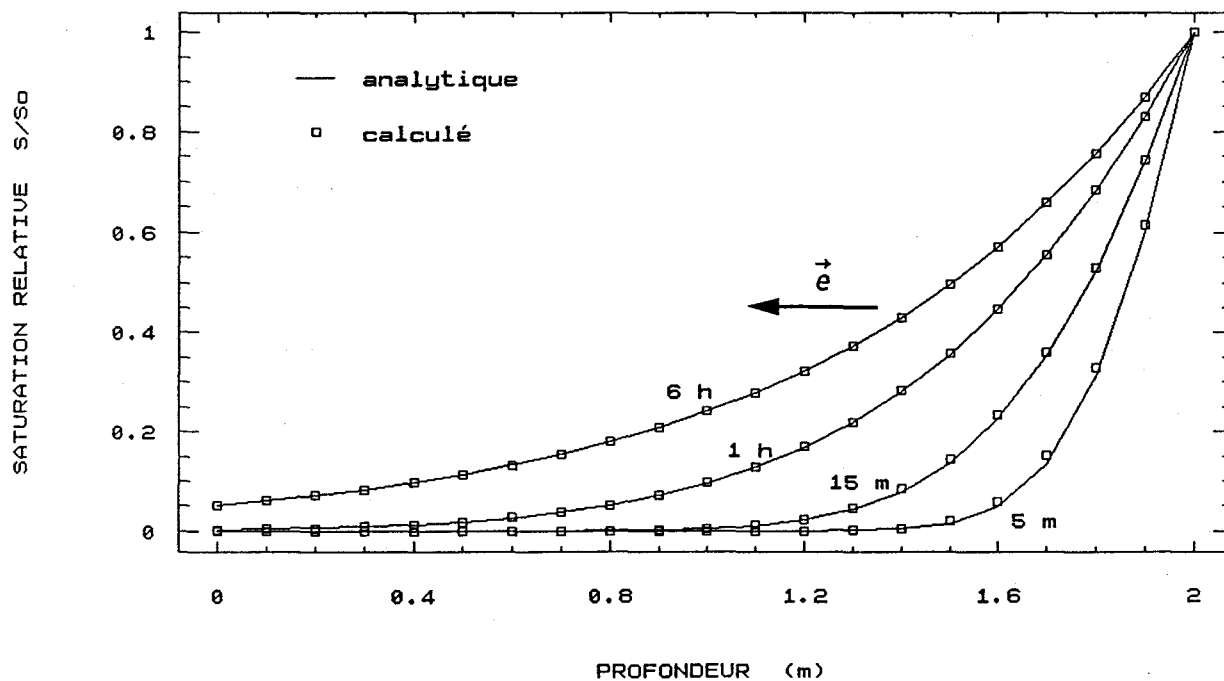


Figure 6: Comparaison des données calculées et analytiques, à 5 et 15 minutes, et à 1 et 2 heures, pour la saturation d'une colonne de sol à partir d'une nappe souterraine située à 2 mètres de profondeur.

La comparaison entre les concentrations calculées et analytiques est représentée aux figures 3 et 4. La vitesse de Darcy, la porosité effective et la dispersion longitudinale sont respectivement 0,24 m/j, 0,4 et 0,2 m.

Pour ce qui est de la température (figure 5), en plus des conditions indiquées, on a utilisé une conductivité thermique pour les solides minéraux de  $14\,446\text{ J m}^{-1}\text{ j}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Il est également possible de comparer le modèle non saturé à la solution analytique de Ogata et Banks malgré la forte non linéarité de cette équation. Cela est rendu possible grâce à une dépendance logarithmique entre la tension de l'eau et la saturation correspondante (figure 6; Padilla et al., 1988b).

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 (Padilla et Gélinas, 1988a). A titre d'exemple, on illustre l'évolution de quelques-unes de ces variables à la figure 7.

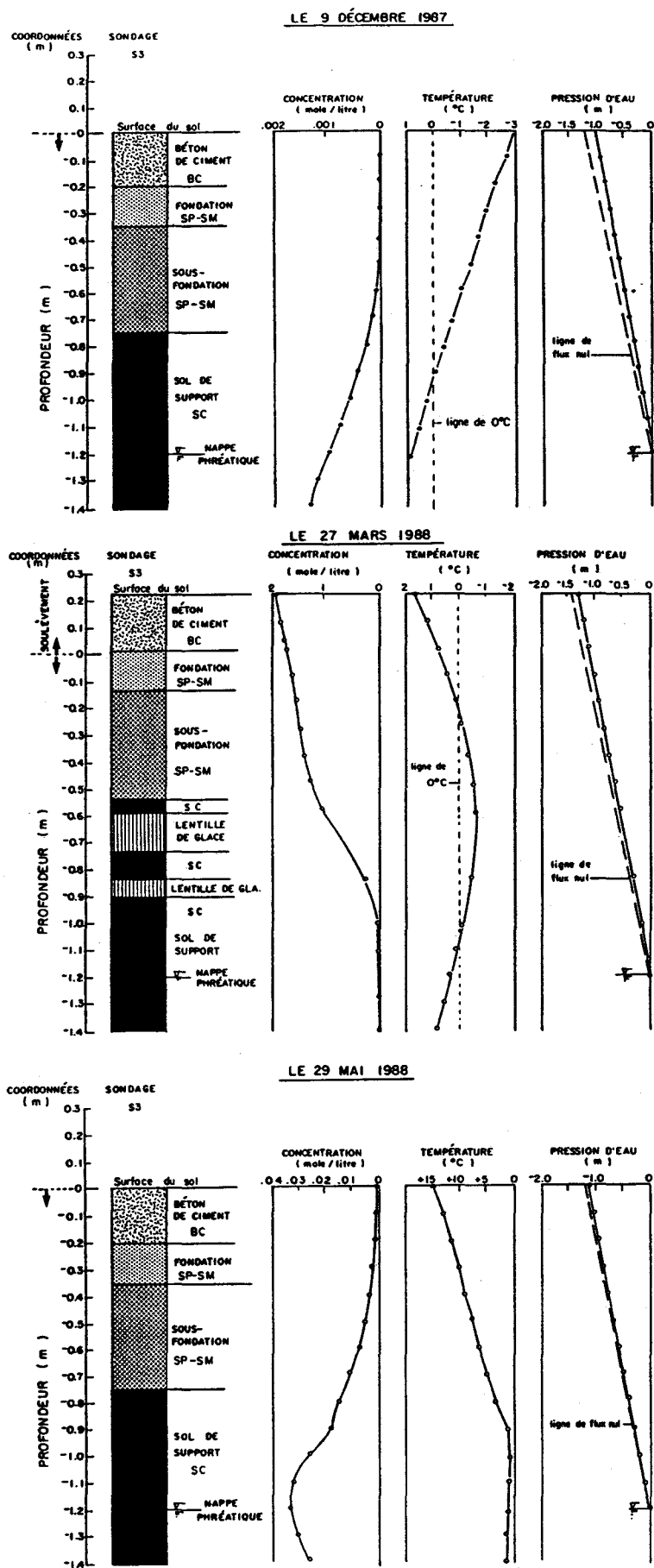


Figure 7: Evolution de certaines variables associées au comportement général d'une chaussée au cours de l'hiver 1988 (sondage S3 du boulevard Henri IV; Laroche, 1988).



## **CHAPITRE 4**

# **APPLICATIONS AUX PROBLEMES DE GEL DU BOULEVARD HENRI IV**

### **4.1 INTRODUCTION**

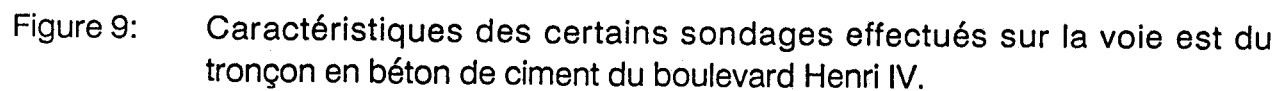
Monsieur Jean-Pierre Leroux du Service des sols et chaussées nous a fourni des informations concernant certaines chaussées problématiques du point de vue du gel au Québec. Parmi celles-ci, nous avons retenu un tronçon du boulevard Henri IV (autoroute 573) principalement à cause de l'abondance des données existantes. Une autre raison importante du choix est le fait que ce tronçon, récemment construit en béton de ciment, a présenté dès le premier hiver de sérieux problèmes de déformation et de fissuration dus à la formation de lentilles de glace. Ce tronçon a été ouvert à la circulation en 1987 (figure 8). Les efforts de simulation seront donc concentrés dans ce secteur.

### **4.2 CARACTERISTIQUES DE LA CHAUSSEE ETUDIEE**

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 classifié 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 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 (Cockburn, 1982). Une partie des résultats des sondages effectués apparaissent à la figure 9.





Des mesures de soulèvement ont aussi été effectuées pendant l'hiver 1988 (Denis Giroux, District 20). Ces mesures sont précieuses car elles permettront de vérifier les résultats du modèle aux endroits choisis.

Les piézomètres, les sondages et les analyses existantes ont permis de caractériser certaines propriétés de la chaussée et du sol de support (Jean-Pierre Leroux, Service des sols et chaussées; Denis Giroux, District 20; Paul Flon, Division des sols et granulats). D'autres paramètres ont été estimés à partir de visites sur le terrain, ainsi qu'à partir de la cartographie des dépôts meubles de la région de Québec (Cockburn, 1982). Les caractéristiques du béton de ciment et de l'asphalte utilisés ont été fournies par Daniel Vézina et Richard Langlois des laboratoires du Ministère des Transports.

Les données climatiques de l'aéroport de Québec ont été choisies comme étant les plus représentatives du secteur étudié.

Les données sur la qualité de l'eau ont été estimées à partir des doses de sels déglaçants (Denis Giroux, District 20) et des mesures effectuées sur l'aquifère de Trois-Rivières (Gélinas et Locat, 1987).

## **4.3 APPLICATIONS**

### **4.3.1 Choix des sites pour les simulations**

Trois sites de caractéristiques différentes ont été choisis afin de procéder aux simulations déterminant les comportements possibles de la chaussée pendant l'hiver 1987-88. Le choix de ces sites a été fait après une analyse détaillée des données existantes. La particularité principale des endroits choisis pour la simulation est la différence entre les caractéristiques des sols de support existants ainsi que leurs comportements et soulèvements différents pendant le même hiver.

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 9) 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 pendant le printemps. Ces caractéristiques, jointes à la faible épaisseur des fondations (55 cm environ), laissent entrevoir les fissurations observées et les soulèvements différentiels enregistrés.

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. La faible épaisseur des fondations de la chaussée (25 cm de GP-GM et 22 cm de SP) jointe à la présence d'un sol de support très argileux expliquent que cet endroit ait enregistré des déformations importantes.

Un troisième site est situé au chaînage de construction 0565+06 de la voie est (sondage S15). Le piézomètre P-4 situé à proximité indique que la nappe souterraine se trouve autour de 2.6 mètres de profondeur pendant le printemps. Une couche de 37 cm d'argile sableuse (CL) accompagnée de matière organique (PT) forme l'horizon supérieur du sol de support. Plus en profondeur, on retrouve un sable grossier avec silt classifié SM. L'épaisseur de la fondation de la chaussée (GP-GM et SP) est à cet endroit de 39 cm. Bien que le sol de support (CL) soit supposément gélif et qu'il se trouve à faible profondeur (58 cm), son épaisseur est faible et les déformations enregistrées ne sont pas notables comparativement aux sites précédents. La confirmation de ces hypothèses par les simulations est un des objectifs envisagés.

#### **4.3.2 Paramètres physiques utilisés**

Certains des paramètres physiques des matériaux et des sols géologiques impliqués dans les simulations peuvent être évalués à partir des données existantes (Laroche, 1988). Cependant, il a fallu que d'autres paramètres soient estimés à partir des corrélations effectuées avec des types de matériaux semblables (Finn, 1967; Lunardini, 1981; Cockburn, 1982; Lowry, 1969).

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. Il semble qu'aucune lentille de glace n'ait été détectée dans les matériaux de la fondation (Laroche, 1988). Des lentilles de glace ont été cependant trouvées dans le sol de support. Si l'on considère la rigueur de l'hiver 1988 ainsi que les soulèvements enregistrés et les caractéristiques précédentes, 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.

Le tableau 1 résume les principaux paramètres physiques des différents matériaux utilisés dans les simulations.

Tableau 1: Paramètres physiques utilisés dans les simulations.

| Type de matériel                            | Argile % | Porosité $n_o$ | Perméabilité intrinsèque à saturation $k_o$ ( $m^2$ ) | Indice de distribution des pores $\alpha$ | Conductivité thermique des solides $K_s$ ( $J m^{-1} s^{-1} K^{-1}$ ) | Chaleur spécifique des solides $C_s$ ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ) | Pression de formation de bulles d'air (m) | Saturation irréductible $S_o$ | Densité des solides $\rho_s$ ( $kg m^{-3}$ ) | Facteur de portage des argiles $X_{ar}$ |
|---------------------------------------------|----------|----------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Revêtement bitumineux                       | -        | 0.05           | -                                                     | -                                         | 0.7                                                                   | 1675                                                        | -                                         | 1                             | 2.1                                          | 0                                       |
| Revêtement en béton de ciment (BC)          | -        | 0.05           | -                                                     | -                                         | 2.6                                                                   | 750                                                         | -                                         | 1                             | 2.4                                          | 0                                       |
| Fondation de la chaussée (GP-GM, SP-SM, SP) | 10       | 0.4            | $4.7 \times 10^{-11}$                                 | 1500                                      | 3.5                                                                   | 806                                                         | - 0.03                                    | 0.125                         | 2.7                                          | 0                                       |
| Sol de support (CL)                         | 70       | 0.55           | $1 \times 10^{-13}$                                   | 30                                        | 1.5                                                                   | 650                                                         | - 0.6                                     | 0.2                           | 2.4                                          | 0.99                                    |
| Sol de support (PT)                         | -        | 0.6            | $1 \times 10^{-13}$                                   | 20                                        | 0.5                                                                   | 2000                                                        | - 1.0                                     | 0.25                          | 0.8                                          | 1                                       |
| Sol de support (SM)                         | 20       | 0.4            | $1 \times 10^{-11}$                                   | 500                                       | 3.0                                                                   | 750                                                         | - 0.2                                     | 0.13                          | 2.5                                          | 0.8                                     |
| Sol de support (SC)                         | 40       | 0.45           | $1 \times 10^{-12}$                                   | 60                                        | 2.0                                                                   | 714                                                         | - 0.4                                     | 0.15                          | 2.4                                          | 0.9                                     |

### 4.3.3 Types des simulations effectuées

La détermination des conditions idéales à imposer au modèle est le principal problème qui a dû être élucidé lors de la réalisation des simulations. Le choix des meilleures conditions initiales et aux limites, devant être imposées à un modèle comme MELEF-3v, a exigé l'acquisition d'une expertise numérique dans le domaine de la simulation unidimensionnelle du comportement des chaussées dû à l'action du gel. Il est évident que pour ce genre de phénomènes, l'évolution des variables peut se faire dans les deux dimensions verticale et transversale de la route. L'établissement des conditions pouvant représenter ce phénomène à une dimension dans un temps de calcul minimal, est une question d'expérience numérique dans cette sorte de phénomène physique.

#### 4.3.3.1 Conditions initiales

Les études précédentes (Gélinas et Locat, 1987) ont montré que la concentration en NaCl de l'eau qui se trouve dans les zones non saturée et saturée du sol est d'environ 0.002 mole/litre. Cette valeur est considérée vraisemblable pour les conditions initiales du modèle de transport de solutés. Il est intéressant de rappeler que lors de la formation de la glace à l'intérieur des pores du sol, les solutés présents se concentrent davantage dans l'eau liquide, dans une proportion telle que la glace retient environ 60% des solutés présents dans ses réseaux cristallins (Leung et Carmichael, 1984).

La température initiale de l'eau souterraine est considérée uniforme et près de 7° C au début du mois d'octobre de 1987. Les zones non saturée et saturée du sol sont supposées hydrogéologiquement à l'équilibre au début des simulations. Les températures extérieures et les pluies de l'automne se chargeront donc de ramener ces paramètres à des valeurs plus vraisemblables.

#### 4.3.3.2 Conditions aux limites

Nous avons procédé à la simulation de la période climatique s'étalant du 1er octobre 1987 au 30 juin 1988. Cette période englobe largement les phénomènes de gel-dégel possibles sous la surface de la chaussée. A ce sujet, les données climatiques correspondantes ont été synthétisées à tous les cinq jours afin d'élaborer les conditions réelles à imposer au modèle.

Pour ce qui est des sels déglacants, 65 tn/km ont été épandus durant l'hiver 1987-88 sur l'autoroute 573 (boulevard Henri IV). Si la plupart de ces sels s'infiltrant ou

se distribuent lentement sous le corps de la chaussée pendant l'hiver, nous estimons que cela doit se faire principalement par l'eau des précipitations occasionnelles de l'hiver. Le taux de dilution nécessaire est dans ce cas de l'ordre de 2 moles/l. D'après les analyses faites sur la qualité de la neige à Trois-Rivières (Gélinas et Locat, 1987), la neige ne conserverait pas, juste avant la fonte, plus de 10% des sels déglçants déversés pendant l'hiver. Si nous admettons que cette hypothèse est la plus vraisemblable, la condition à imposer à la surface du modèle de transport de solutés est une limite de Cauchy où le volume et la qualité de l'eau qui s'infiltre sont connus. Nous alternons cette condition avec d'autres possibilités afin de déterminer l'influence des différentes doses de sels déglçants sur le comportement général de la chaussée. A la base du modèle, nous estimons que la qualité de l'eau évolue de façon à admettre que la concentration se stabilise à 0.002 moles/litre (limite auto-imposée) à une grande profondeur.

L'évolution de la température se fait en assumant que la température extérieure conditionne principalement les apports d'énergie à la surface de la chaussée (condition de Dirichlet). Dans ces simulations, représentant neuf mois de temps réel, on a estimé négligeables, devant l'incertitude d'autres paramètres, les différences qui pourraient exister avec les solutions obtenues si l'on considérait l'ensoleillement et la vitesse du vent. La température serait alors constante et près de 7° C à une grande profondeur (condition auto-imposée à la base du modèle). D'autres possibilités dans les simulations envisagent l'utilisation d'un revêtement d'asphalte à la place du béton de ciment. Nous avons envisagé aussi un renforcement asphaltique à la surface de la chaussée afin d'estimer les possibilités futures de réhabilitation de l'autoroute en cas de dégradations majeures.

Le niveau de l'eau souterraine a été introduit dans le modèle de flux d'eau par une condition limite à charge constante à la base, indiquant le niveau phréatique pendant l'hiver (condition de Dirichlet). Les précipitations sont indiquées par une limite où le flux est imposé à la surface (condition de Neuman). Différentes positions de la nappe phréatique ainsi que des infiltrations possibles à la surface ont été envisagées dans les simulations afin de déterminer principalement l'influence d'un rabattement artificiel de la nappe souterraine sur le comportement de la chaussée en hiver.



## CHAPITRE 5

### RESULTATS DES SIMULATIONS

#### 5.1 RESULTATS DES APPLICATIONS SUR LE SONDAGE S3

Indépendamment des particularités des simulations indiquées dans le chapitre précédent, il a été estimé que la nappe phréatique se trouvait à une profondeur constante d'environ 1.2 mètre pendant la période hivernale 87-88. On procède donc à la simulation la plus plausible du comportement de la chaussée pendant cette période.

Afin de vérifier la qualité des simulations, on a fait la comparaison entre les soulèvements calculés et mesurés. Les enregistrements disponibles ayant été effectués après que le mouvement ascendant de la surface de la chaussée ait été amorcé, nous avons fait coïncider le nivellement moyen de la surface de la chaussée mesuré le 2 mars 1988 avec le soulèvement simulé pour la même date. Les comparaisons sont donc relatives à partir de cette date. La figure 10 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. Le soulèvement maximal de la surface de la chaussée calculé pour ce secteur serait de l'ordre de 21 cm. Toutefois, cette affirmation est purement estimative puisqu'il n'y a pas de fondements absolus sur les paramètres physiques utilisés ni sur les comparaisons effectuées. Une fois la fonte de la neige amorcée, les données mesurées et simulées se comparent moins bien, mais cela est justifiable. On sait que le rabattement de la surface de la chaussée (en béton de ciment) se fait plus lentement que la consolidation graduelle du sol de support et que le taux de fusion des lentilles de glace existantes (base de calcul pour le soulèvement et l'affaissement de la surface de la chaussée). Ceci est d'autant plus vrai lors du premier dégel de la chaussée. Il y a des évidences de terrain de ce phénomène exprimées de façon très claire dans la littérature et aussi dans le rapport de Laroche (1988) "Il était même possible à certains endroits lors des sondages de la mi-avril, d'insérer sans difficulté un jalon entre la dalle et la couche de fondation granulaire sous-jacente."

# SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S3 (1 octobre 87 au 30 juin 88)

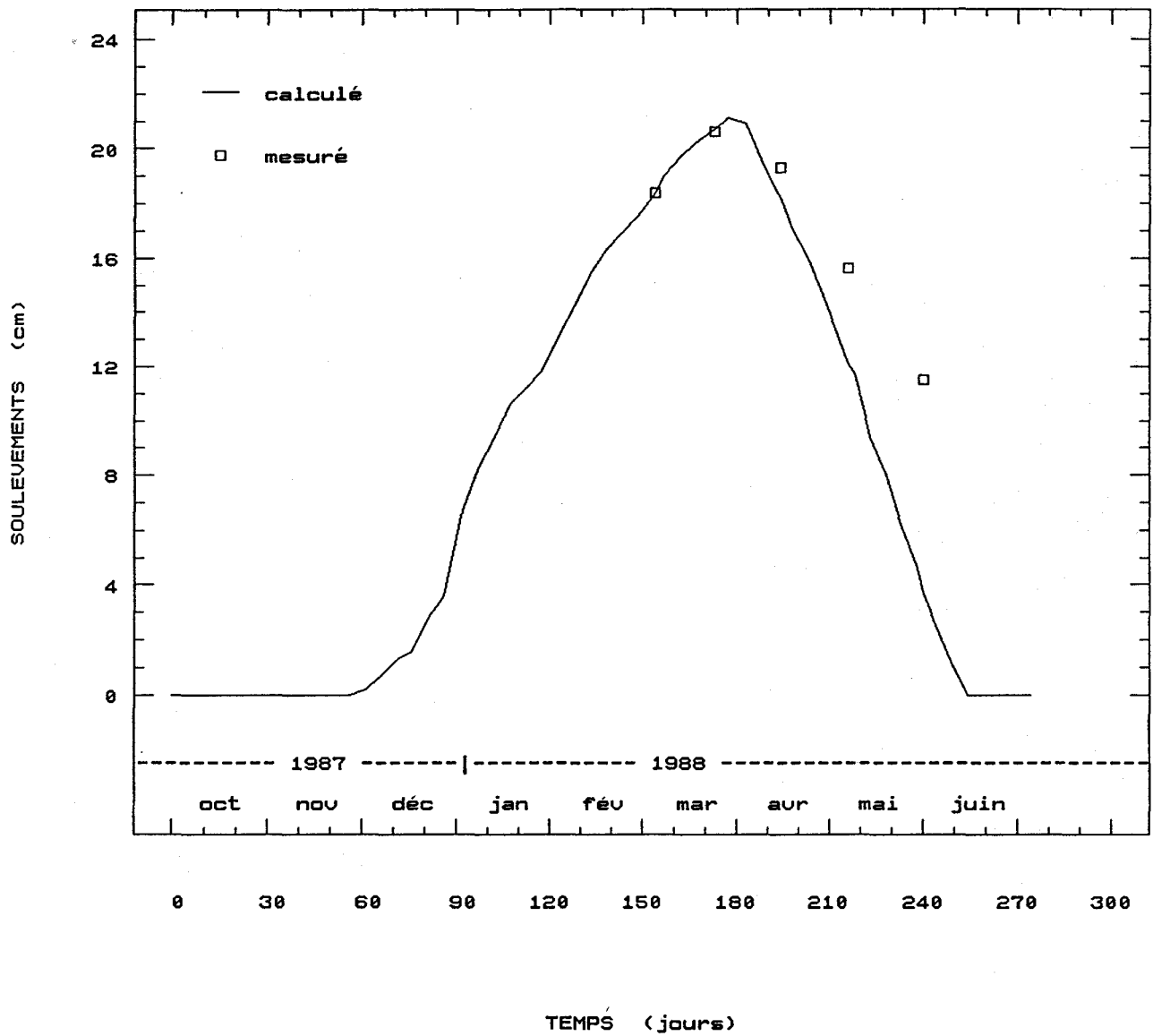


Figure 10: Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 1416 + 75, près du sondage S3, pendant la période hivernale 87-88.

### **5.1.1 Action des sels sur le comportement de la chaussée**

Tel qu'indiqué dans le chapitre précédent, on peut estimer que le sel déversé sur l'autoroute s'infiltré lentement et se distribue aussi avec une certaine homogénéité dans le corps de la chaussée.

Afin d'estimer l'influence des sels déglçants sur le comportement de la chaussée, on a procédé à des simulations où le taux réel d'épandage de sels a été complètement négligé. 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 minimales 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 11). On en conclut que:

- a) les doses de sels actuellement utilisées ne jouent pas un rôle important dans les soulèvements des chaussées enregistrés pendant l'hiver au Québec, et
- b) il serait plutôt insensé, d'un point de vue environnemental, de compter sur une forte augmentation des doses de sels de déglçage pour pallier à la dégradation des chaussées par l'action du gel. Toutefois, on peut envisager une telle augmentation seulement à des endroits très spécifiques, où la chaussée est particulièrement sensible aux soulèvements.

### **5.1.2 Action de l'eau sur le comportement de la chaussée**

La faible infiltration d'eau qui se produit pendant l'hiver ne semble pas affecter grandement le comportement de la chaussée étant donné les caractéristiques des fondations et du sol de support à proximité du sondage S3. À ce propos, le sol de support gélif SC semble posséder des conditions drainantes suffisantes pour empêcher l'accumulation de glace dans la fondation supérieure. Une évidence possible de cette affirmation est le fait que la chaussée commence son affaissement graduel tout juste après que le dégel s'amorce.

Les propriétés physiques estimées pour le sol de support gélif SC sont telles qu'un rabattement de la nappe phréatique de 1.2 cm à 2.5 cm, possible artificiellement, ne semble pas significatif pour réduire le gonflement maximal de la chaussée dû au gel (figure 12). Les caractéristiques et l'épaisseur de la fondation sont telles à cet

SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S3 (1 octobre 87 au 30 juin 88)

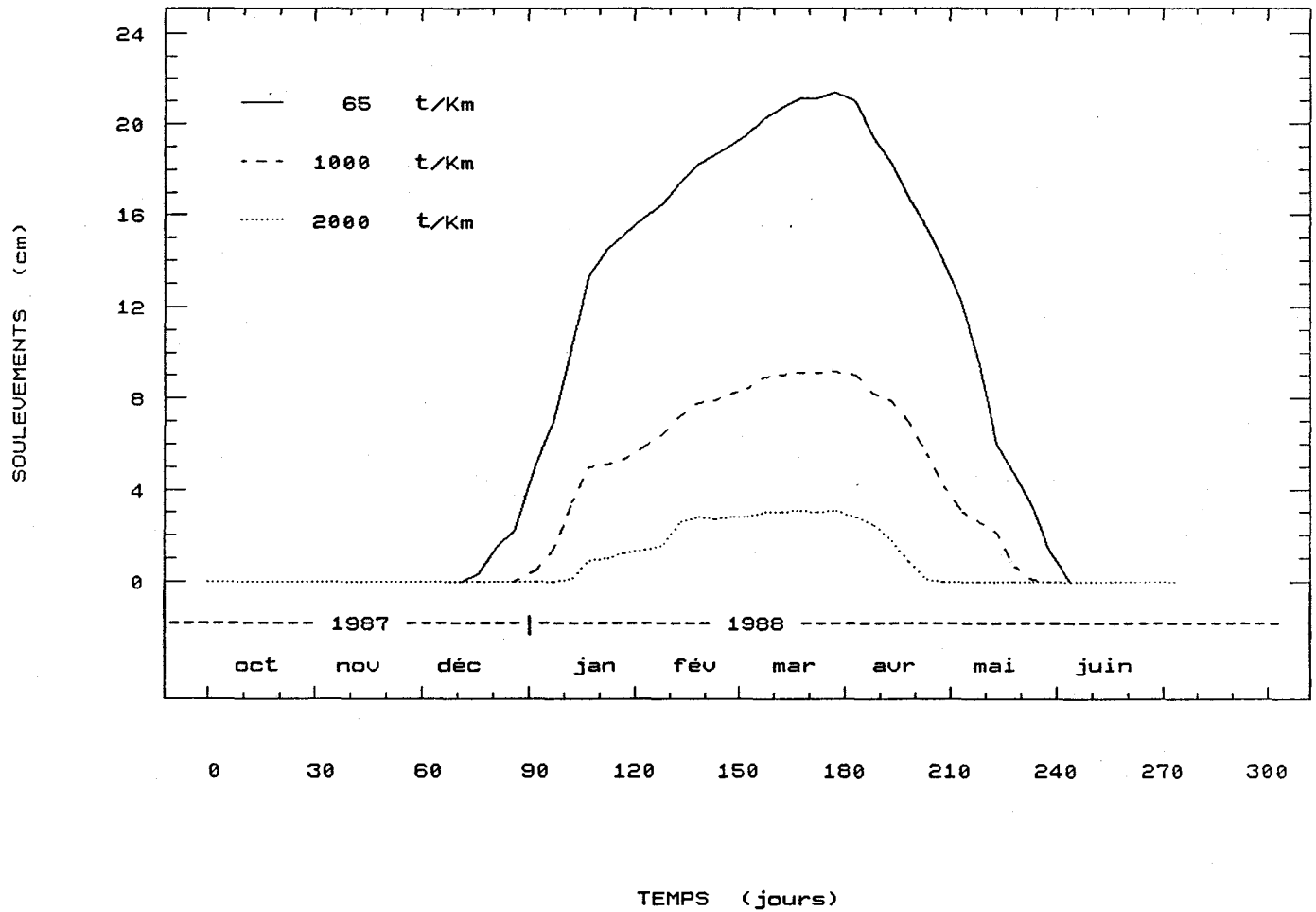


Figure 11: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 pour des doses de sels déglacants différentes.

# SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S3 (1 octobre 87 au 20 mars 88)

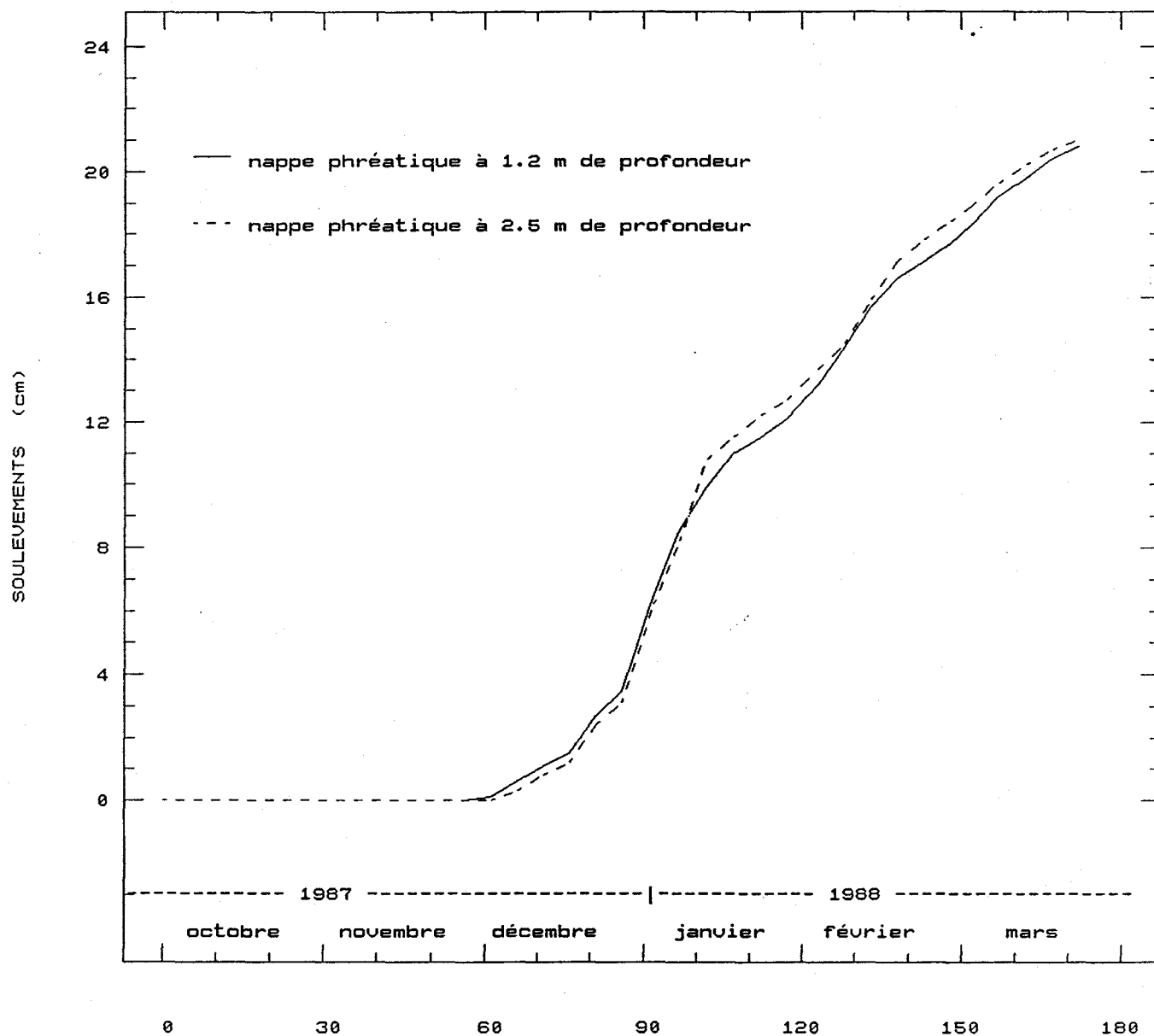


Figure 12: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 lorsque la nappe phréatique se trouve à 1.2 m et à 2.5 m de profondeur.

endroit, que l'on doit s'attendre à un retard dans le gonflement de la chaussée lorsque la nappe devient plus profonde, mais pas nécessairement à une réduction du soulèvement maximal de la chaussée. Des simulations effectuées avec des nappes phréatiques plus profondes montrent encore plus de retard dans les soulèvements, mais finissent par un soulèvement total plus élevé que lorsque la nappe phréatique est moins profonde.

En supposant que les simulations sont correctement effectuées (ce qui devrait être vérifié davantage), on peut conclure que le rabattement artificiel de la nappe phréatique n'est pas une solution adéquate contre le gel lorsque le sol de support est gélif et que l'isolement thermique n'est pas suffisant pour la rigueur de l'hiver québécois.

### **5.1.3 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 13). Il est évident que des mélanges plus isolants avec une structure plus convenable peuvent être envisagés afin de minimiser les soulèvements rencontrés.

## **5.2 RESULTATS DES APPLICATIONS SUR LES SONDAGES S14 ET S15**

Dans le cas des sondages S14 et S15, on a pris en compte les niveaux phréatiques mesurés dans le piézomètre P-4 (Laroche, 1988). C'est ainsi que la profondeur de la nappe phréatique, pendant l'hiver 1987-88, a été estimée à environ 2.8 mètres. Toutefois, des renseignements additionnels de monsieur Jean-Pierre Leroux (Service des sols et chaussées) confirment des niveaux phréatiques de l'ordre de 0.6 mètre de profondeur lors de l'exécution de certains sondages (S13 et S14).

SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S3 (1 octobre 87 au 30 juin 88)

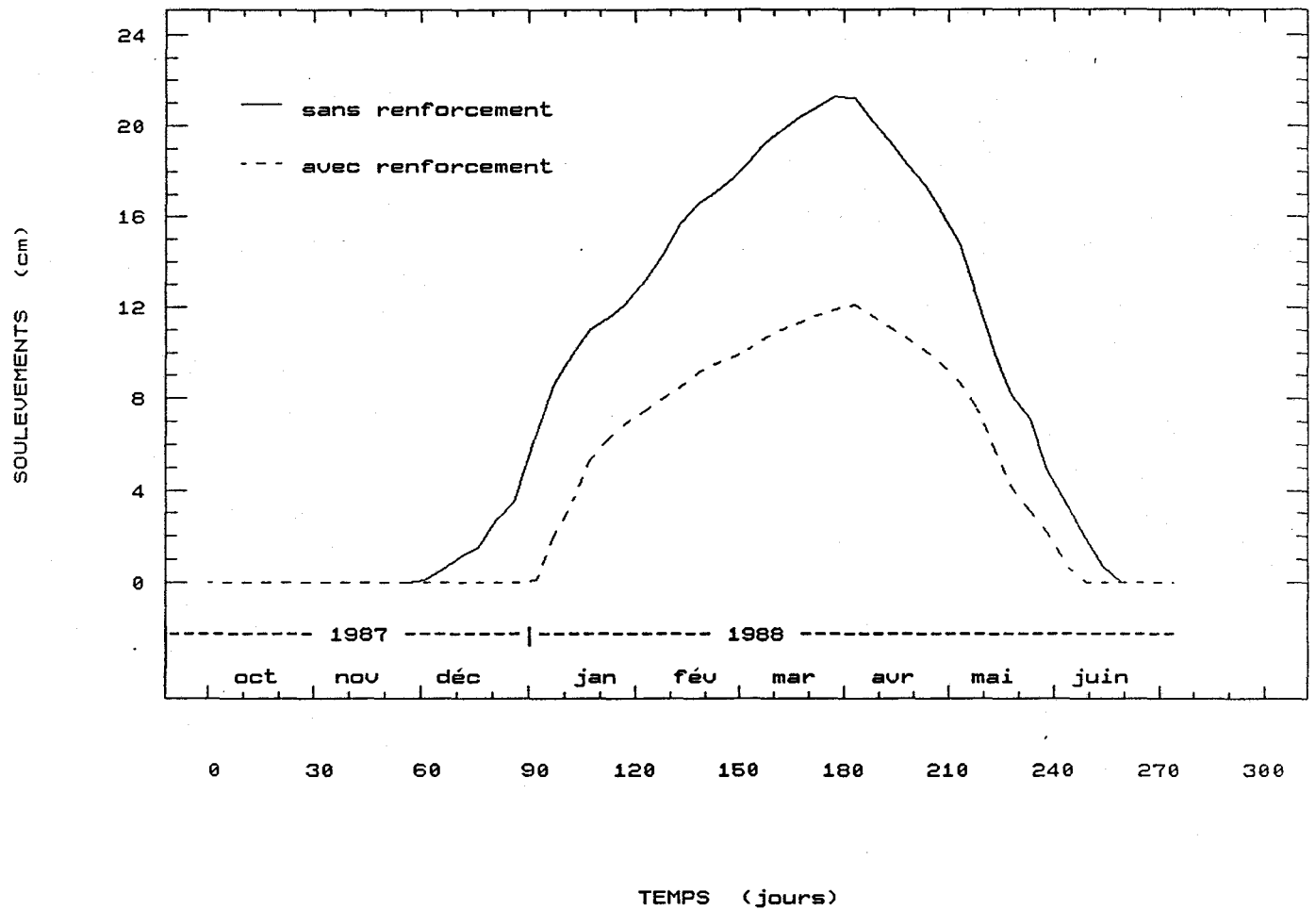


Figure 13: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S3 lorsqu'on utilise ou non un renforcement asphaltique de 20 cm d'épaisseur sur la surface de la chaussée.

Cette inconsistance des données de même que la forme des soulèvements enregistrés à proximité du sondage S14 (commencement de la descente de la surface de la chaussée beaucoup plus tardive que celui de la fonte, figure 14), suggère l'existence d'une nappe phréatique perchée, périodiquement favorisée par les apports d'eau et possiblement par la forme de la surface d'un sol de support très argileux (CL). Dans ces circonstances, on doit s'attendre à ce qu'une bonne partie des fondations de la chaussée soit envahie par la glace dans le secteur des sondages S13 et S14, sans pour autant qu'il y ait des lentilles de glace qui contribuent au soulèvement ou à l'affaissement de la chaussée. L'accumulation de glace dans les fondations de la chaussée, même en l'absence de soulèvements appréciables correspondants, devrait accélérer la dégradation de la route dans ce secteur. Les soulèvements enregistrés au niveau des sondages S14 et S15, bien que de formes assez différentes, seraient produits par la formation de lentilles de glace dans un sol de support (CL) de nature fortement argileuse.

Les circonstances décrites ci-dessus ainsi que l'estimation peu fiable des propriétés physiques de ces matériaux colloïdaux font que les comparaisons effectuées entre les soulèvements simulés et calculées pour le sondage S14 ne sont pas satisfaisantes (figure 14).

D'autres simulations, avec des niveaux phréatiques différents, (-1.0 et -0.6 mètre) ont reproduit l'accumulation de glace dans les fondations de la chaussée, ainsi qu'un retard appréciable de l'affaissement (sondage S14); elles n'ont toutefois pas expliqué complètement le comportement de la chaussée (figure 16). La surestimation de la conductivité thermique des granulats de la fondation, serait une explication plausible de l'incapacité du modèle à reproduire les soulèvements tardifs de la fin avril (figure 14).

Au sondage S15 (figure 15), le sol de support présente également une couche très organique (PT) et une formation inférieure aux caractéristiques peu gélives (SM). Même si la position de la nappe phréatique (environ 2.8 mètres de profondeur) est plus certaine que dans le cas précédent, les soulèvements enregistrés ne semblent pas être reproduits convenablement (figure 15). Bien que les comparaisons soient difficiles avec si peu de données, il semble que l'affaissement de la chaussée se soit arrêté au début mai. Dans ce cas, la comparaison relative des soulèvements serait satisfaisante, tandis que la comparaison absolue indiquerait essentiellement une surestimation de la conductivité thermique des matériaux de la fondation.



SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S14 (1 octobre 87 au 30 juin 88)

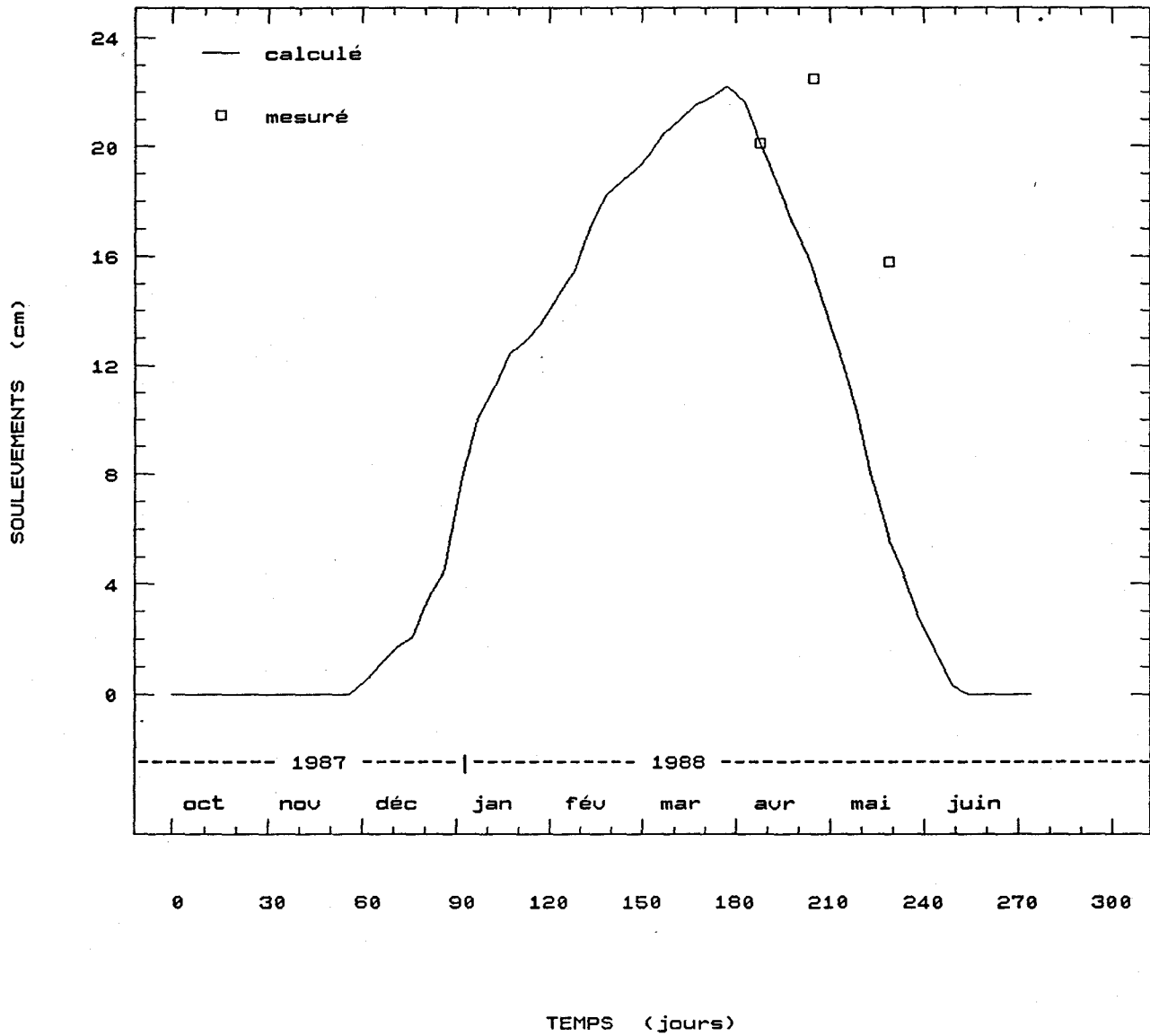


Figure 14: Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 564 + 53, correspondant au sondage S14, pendant la période hivernale 87-88.

SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S15 (1 octobre 87 au 30 juin 88)

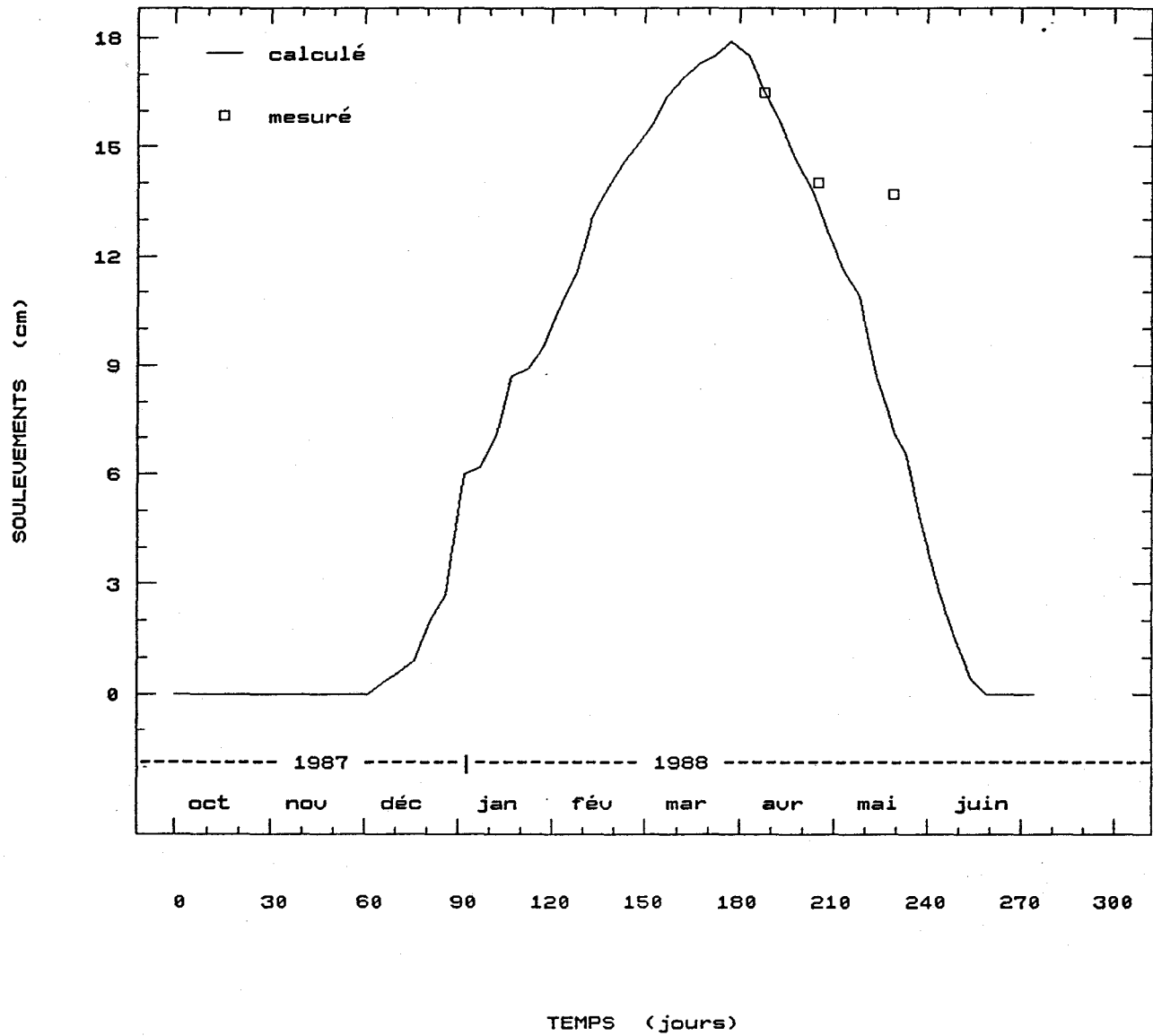


Figure 15: Comparaison des soulèvements calculés et mesurés au chaînage de construction 565 + 00, près du sondage S15, pendant la période hivernale 87-88.

Bien que d'autres simulations aient été effectuées avec des propriétés physiques pour ce sol (CL) différentes de celles jugées comme plus convenables (tableau 1), leur utilisation est difficile à justifier. Etant donné que les propriétés physiques relatives à la gélivité des sols colloïdaux sont encore mal connues dans la littérature (Miller, 1978), une meilleure représentation des interdépendances de ces propriétés ainsi que de leur vérification et calibration avec des essais de laboratoire s'avèrent nécessaires. Plus particulièrement, la relation de dépendance entre la conductivité thermique et la teneur en eau, telle qu'utilisée dans MELEF-3v, n'est pas suffisamment précise. Il faudrait en utiliser une autre relation plus adéquate (Johansen et Frivik, 1980), surtout lorsque la nappe phréatique est très superficielle. Le fait d'avoir possiblement surestimé la conductivité thermique des granulats des fondations est aussi à vérifier.

#### **5.2.1 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 16) 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.

#### **5.2.2 Action du renforcement sur le comportement de la chaussée**

Dans le cas du sondage S14, l'utilisation d'un renforcement bitumineux de 20 cm d'épaisseur sur le revêtement en béton de ciment réduit le soulèvement maximal attendu d'environ 25% (figure 17). Etant donné l'incertitude des paramètres physiques entourant le sondage S14, ces conclusions demeurent donc incertaines. La profondeur moyenne de la nappe phréatique a donc été estimée à 2.8 mètres pour ces simulations.

SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S14 (1 octobre 87 au 30 avril 89)

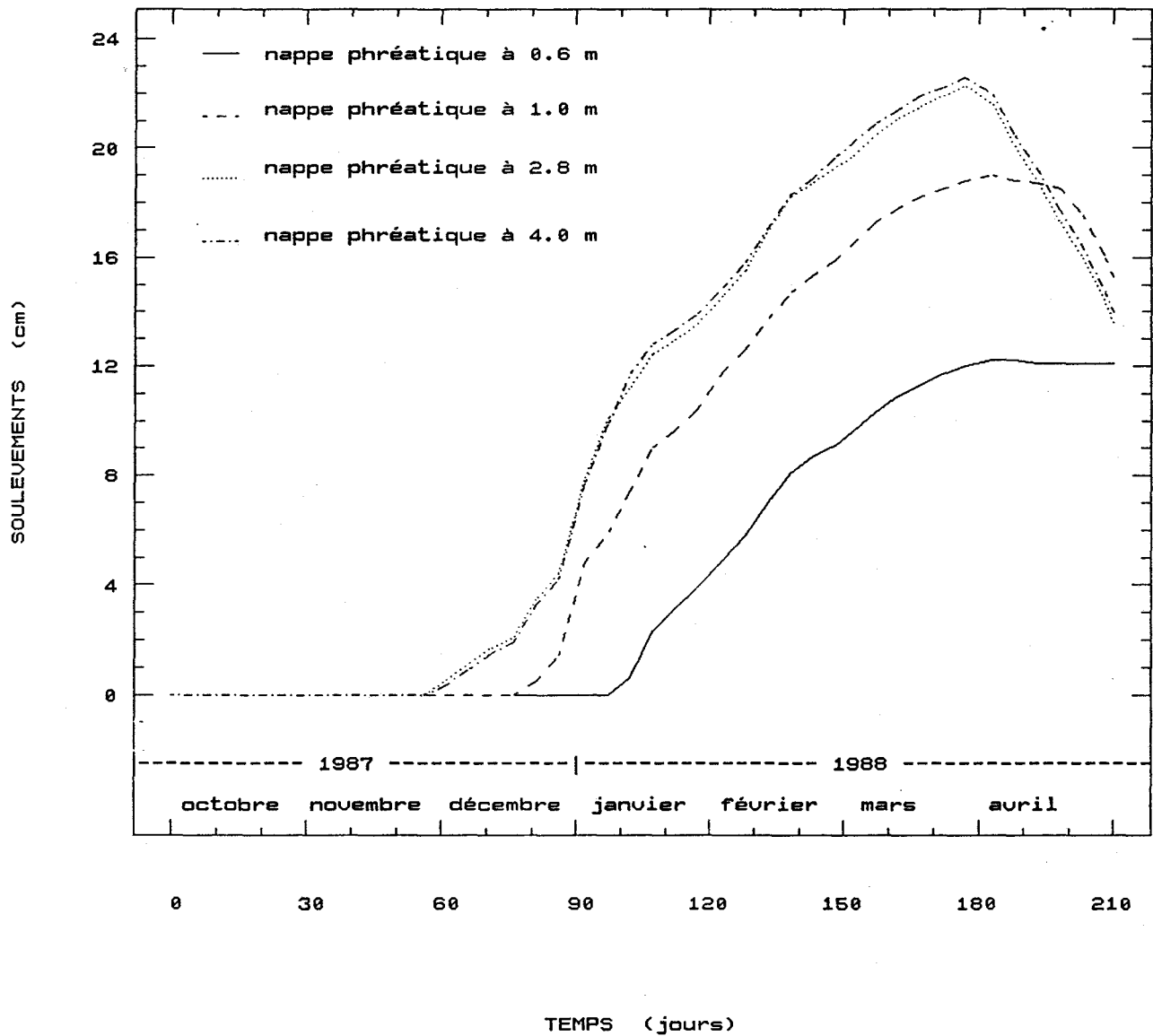


Figure 16: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S14 lorsque la nappe phréatique se trouve à 0.6 m, 1.0 m, 2.8 m et 4.0 m de profondeur.

SOULEVEMENTS A LA SURFACE DE LA CHAUSSEE

Sondage S14 (1 octobre 87 au 20 mars 88)

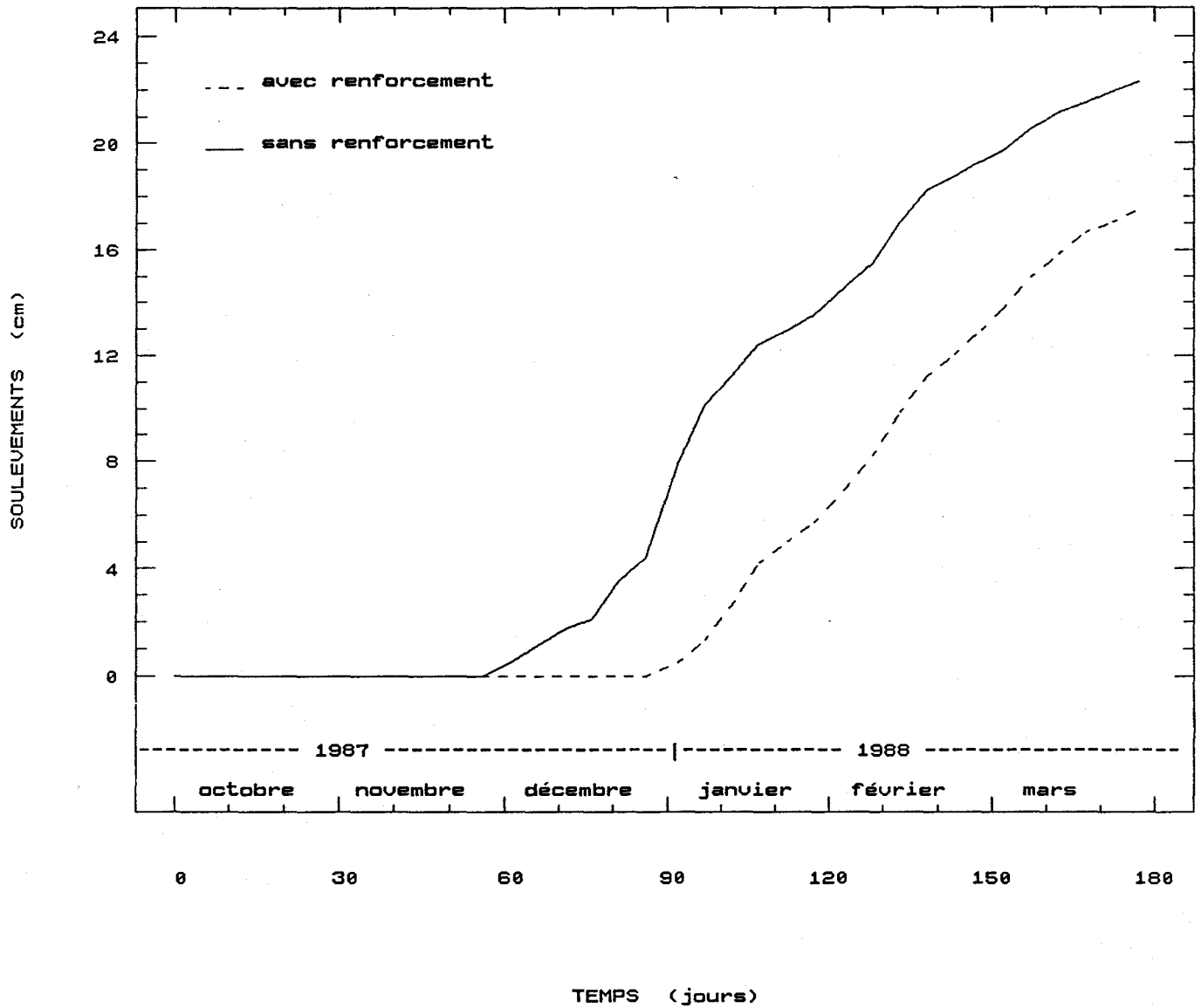


Figure 17: Comparaison des soulèvements de la chaussée calculés à proximité du sondage S14 lorsqu'on utilise ou non un renforcement asphaltique de 20 cm d'épaisseur sur la surface de la chaussée.

## CHAPITRE 6

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

#### 6.1 CONCLUSIONS CONCERNANT LES SIMULATIONS

##### 6.1.1 Phénomènes simulés

On discute ci-dessous des différents phénomènes reliés au comportement de la chaussée et simulés par le programme d'éléments finis MELEF-3v. Selon les cas, ces conclusions pourraient éventuellement être valables pour d'autres chaussées du réseau routier du ministère des Transports.

##### 6.1.1.1 Soulèvements à la surface de la chaussée

- Les soulèvements relatifs de la surface de la chaussée tels que mesurés sur le terrain s'accordent assez bien aux soulèvements simulés par le modèle MELEF-3v, surtout lorsqu'il s'agit d'un sol de support non-colloïdal (Exemple: sol SC). Toutefois, une surestimation globale des soulèvements calculés demeure possible.
- Lorsque le sol de support est plutôt colloïdal (Exemple: sol CL, avec environ 70% de silt et/ou d'argile), les soulèvements simulés se comparent moins bien aux soulèvements enregistrés. Il faut dire toutefois que les données de terrain correspondant à la profondeur de la nappe phréatique semblent inconsistantes dans le secteur du sondage S14.
- Il semble également possible qu'on ait surestimé la conductivité thermique des granulats des fondations. Dans ce cas, les soulèvements calculés seraient aussi surestimés (sondage S15).
- L'affaissement de la surface d'une chaussée rigide (Exemple: béton de ciment) se fait, en général, plus lentement que la réabsorption naturelle des lentilles de glace existantes.
- Les soulèvements observés à la surface de l'autoroute 573 semblent être le résultat de la croissance exclusive des lentilles de glace dans le sol de support gélif. Il s'agit dans ce cas des sols SC et CL.

- La réabsorption des lentilles de glace peut durer jusqu'à deux mois et demi après le commencement du dégel; on doit donc s'attendre selon les cas à des affaissements locaux de la route même pendant le mois de juin.
- Les causes principales des soulèvements et des fissurations rencontrés sur le tronçon en béton de ciment de l'autoroute Henri IV sont, selon cette étude, le non respect des épaisseurs requises par le ministère des Transports pour les fondations en présence de sols gélifs, ainsi que l'utilisation d'un revêtement en béton de ciment dont les propriétés thermiques sont nettement plus défavorables que celles des mélanges bitumineux.

#### 6.1.1.2 Effet des sels déglacants

- Les doses actuelles de sels déglacants affectent très peu les soulèvements et donc les fissurations possibles de la surface de la chaussée à cause du gel.
- Une forte augmentation des doses de sels déglacants peut être envisagée seulement à des endroits très spécifiques, afin de ne pas entraîner une augmentation considérable des sels totaux déversés. Ainsi donc, il serait nécessaire de déverser 30 fois plus de sels à la hauteur du sondage S3 de l'autoroute 573 pour minimiser les risques de soulèvements à cet endroit.
- La migration des sels déglacants dans la zone non-saturée se fait de sorte que la concentration maximale de NaCl, environ 0.03 à 0.04 mole/litre, atteint la nappe phréatique (de 1 à 5 mètres de profondeur) 2 à 3 mois après le début de la fonte.

#### 6.1.1.3 Effet de la nappe phréatique

- Lorsque le sol de support est gélif et que la nappe phréatique est située près des fondations de la chaussée, les soulèvements attendus doivent être substantiellement réduits par rapport à des nappes phréatiques plus profondes. Cela est dû à l'accumulation de glace dans les fondations de nature non-gélive et au retardement du front de gel dans le sol de support gélif.
- Si le sol de support est gélif et que la nappe phréatique est suffisamment profonde pour empêcher l'accumulation de glace dans les fondations, le fait d'appliquer un rabattement artificiel à la nappe phréatique, en dedans des limites praticables, ne devrait pas changer appréciablement les soulèvements observés ou attendus.

- L'accumulation d'eau et/ou de glace dans les fondations de la chaussée due principalement à des niveaux phréatiques peu profonds, ne doit pas être tolérée parce qu'elle pourrait être à l'origine de l'instabilité structurale de la fondation.

#### **6.1.1.4      Effet du renforcement**

- Le renforcement des chaussées dégradées par l'action du gel à l'aide d'un revêtement asphaltique à faible conductivité thermique est sûrement la meilleure technique à utiliser pour la protection et la réhabilitation de ces secteurs.
- Le renforcement utilisé ne doit pas posséder un trop grand pouvoir d'isolation parce que cela favoriserait l'apparition de verglas sur la surface de la chaussée.
- L'effet du renforcement dépend de chaque cas étudié ainsi que de la connaissance des soulèvements absolus à la surface de la chaussée. Les cas étudiés dans ce rapport prévoient de 25% à 45% de réduction des soulèvements observables lorsqu'un renforcement asphaltique de 20 cm d'épaisseur est utilisé sur le béton de ciment existant.

#### **6.1.2      Matériaux simulés**

##### **6.1.2.1      Revêtements**

- Le revêtement en béton de ciment a une conductivité thermique qui peut être de 3 à 4 fois plus élevée que celle d'un mélange asphaltique ordinaire.
- Le manque d'isolement créé par ce revêtement en béton de ciment serait une des causes principales des soulèvements et des fissurations rencontrés sur ce tronçon de l'autoroute 573.

##### **6.1.2.2      Granulats des fondations**

- Le type de déformations observées et les propriétés physiques des granulats des fondations de l'autoroute 573 (GP-GM, SP-SM, SP) laissent croire que ces matériaux ne contribuent pas aux soulèvements de la chaussée.
- Toutefois, ces matériaux seraient susceptibles d'accumuler de la glace dans leurs pores sans qu'un soulèvement appréciable ne se produise, surtout lorsque les



propriétés de drainage du sol de support sont faibles ou que la nappe phréatique est trop superficielle.

- L'accumulation de glace dans les fondations pourrait cependant entraver la stabilité structurale de la chaussée.
- La surestimation des propriétés thermiques de ces matériaux, notamment de la conductivité thermique, pourrait être la cause principale de certaines différences entre les soulèvements calculés et mesurés à proximité des sondages S14 et S15.

#### **6.1.2.3      Sol de support SC (SO-6224)**

- Ce sol, qui est composé d'environ 40% de silt et/ou d'argile, a une sensibilité au gel de moyenne à forte. Il semble faire partie d'un till remanié du quaternaire existant dans la région.
- Les estimations des propriétés physiques de ce type de sol semblent assez adéquates. Toutefois, une vérification de la simulation de son comportement face au gel basée sur des données absolues de laboratoire serait souhaitable. L'utilisation d'autres relations de dépendance, notamment entre la conductivité thermique et la teneur en eau, pourrait être déterminante surtout lors de l'évaluation de l'effet de la profondeur de la nappe phréatique sur la gélivité du sol.

#### **6.1.2.4      Sol de support SM (SO-6213)**

- Ce sol, qui est composé d'environ 20% de silt et/ou d'argile, semble avoir une sensibilité au gel de faible à moyenne. Il s'agirait d'une formation quaternaire de sables et graviers littoraux existant dans la région.

#### **6.1.2.5      Sol de support CL (SO-6211, SO-6212)**

- Ce sol, composé à 70% de silt et/ou d'argile, ferait partie des alluvions récentes de la région. Il serait accompagné occasionnellement de matière organique (PT).
- Cette matière organique (PT) possède un grand pouvoir d'isolation et une très faible perméabilité qui la rendent peu sensible à l'action du gel.
- En général, ce sol est de moyennement à fortement gélif; toutefois, étant essentiellement colloïdal, son comportement est plus difficile à évaluer (Pusch,

1979). La vérification et la calibration de ses propriétés physiques à l'aide de données de laboratoire semblent donc essentielles.

## **6.2 CONCLUSIONS CONCERNANT LES CONDITIONS DES SIMULATIONS**

- Du point de vue de la résolution numérique, le programme d'éléments finis MELEF-3v a fait la preuve de son applicabilité à des cas réels ainsi que de sa stabilité et sa précision.
- Les résultats concernant les soulèvements simulés par le modèle sont encore relatifs et devraient être vérifiés avec des données absolues de laboratoire.
- Indépendamment des soulèvements occasionnés par le gel dans les sols gélifs, ce modèle peut être directement appliqué pour l'estimation des conditions qui empêcheraient la pénétration du front de gel dans un sol de support sensible au gel.
- Les simulations qui ont été effectuées ont permis d'acquérir une expérience numérique importante en ce qui concerne les conditions optimales d'application face à ce genre de problèmes (paragraphe 4.3.3).

## **6.3 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 des conditions optimales qui empêcheraient la pénétration du front de gel dans le sol de support, garantissant ainsi l'immobilité de la route pendant la période de gel. Toutefois, il faudrait s'assurer le plus possible des propriétés physiques des matériaux des fondations de la chaussée.
- b) Les applications peuvent actuellement s'étendre à l'évaluation des soulèvements attendus dans des sols granulaires, faiblement colloïdaux, sous diverses conditions de simulation.
- c) 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.

- d) L'utilisation de relations de dépendance plus précises que celles actuellement utilisées (Padilla et Gélinas, 1988a), notamment entre la conductivité thermique et la teneur en eau (Johansen et Frivik, 1980) ou entre la perméabilité et la teneur en glace (O'Neill et Miller, 1985), pourraient donner des résultats qui expliqueraient plus adéquatement le comportement de certains sols.
- e) Du côté de l'environnement, le programme MELEF-3v peut être actuellement utilisé en toute confiance pour évaluer l'impact de la concentration de l'eau de fonte en sels déglaçants sur la qualité des eaux des aquifères.
- f) 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.
- g) A l'exception des cas où la nappe phréatique pourrait provoquer l'accumulation d'eau et/ou de glace dans les fondations, on suggère un renforcement "thermiquement adéquat" pour minimiser les soulèvements et, conséquemment, les déformations qui se produisent dans des secteurs spécifiques.

## REFERENCES

AKAN, A.O. (1984).

Simulation of runoff from snow-covered hillslopes. Water Resources Research, 20(6): 707-713.

ANDERSON, D.M. et MORGENSTERN, N.R. (1973).

Physics, chemistry and mechanics of frozen ground. A review. Second International Conference on Permafrost, N. Amer. Contribution, Nat. Acad. Sci.: 257-288.

APOSTOPOULOS, MM.C. et SCHNEIDER, W. (1974).

Expériences théoriques et pratiques avec couches d'isolation thermique en Styropor expansé. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 195-200.

AYERS, A.D. et CAMPBELL, R.B. (1951).

Freezing point of water in a soil as related to salt and moisture contents of the soil. Soil Science Society of America Journal, 72: 201-206.

BALDUZZI, M.F. (1974).

Comportement au gel des couches portantes stabilisées au ciment. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 203-208.

BERG, R.L., GUYMON, G.L. et JOHNSON, T.C. (1980).

Mathematical model to correlate frost heave of pavements with laboratory predictions. CRREL Report 80-10, Hanover, N.H., 49 p.

BRUTSAERT, W. et EL-KADI, A.I. (1984).

The relative importance of compressibility and partial saturation in unconfined ground-water flow. Water Resources Research, 20(3): 400-408.

CARY, J.W. (1987).

A new method for calculating frost heave including solute effects. Water Resources Research, 23(8): 1620-1624.

- CARY, J.W., PAPENDICK, R.I. et CAMPBELL, G.S. (1979).  
Water and salt movement in unsaturated frozen soil: principles and field observations. Soil Sc. Am. J., 43: 3-9.
- COCKBURN, D. (1982).  
La cartographie géotechnique de la région de Québec: essai méthodologique. Thèse de maîtrise du département de géologie, Un. Laval.
- DE VRIES, D.A. (1963).  
Thermal properties of soils. In The physics of plant environment. Edité par W.R. Van Wijk. North Holland Publishing Company, Amsterdam, Pays-Bas.
- DINGMAN, S.L. (1975).  
Hydrologic effects of frozen ground: literature review and synthesis. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H., mars, SR 218, 55 p.
- DUNPHY, W.J. (1974).  
Essai d'isolation d'un sol de fondation à Hampden, Maine. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 200-201.
- EATON, R.A. et VAN PERNIS, D.W. (1974).  
Tronçons d'essai de l'USACRREL: Analyse de la première année-hiver 1971-72. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 170-176.
- EISENMANN, M.M.J. et LEYKAUF, G. (1974).  
Cacul et comportement de nouvelles chaussées anti-gel. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 133-138.
- FINN, F.N. (1967).  
Factors involved in the design of asphaltic pavement surfaces. Highway Research Board, National Research Council, Division of Engineering. National Cooperative Highway Research Program, report 39: 112 p.
- FREMOND, M. (1979).  
Gel des sols et des chaussées. Problèmes hydrauliques. Méthodes numériques. Ecole National des Ponts et Chaussées (Paris) Un. de Carleton (Ottawa), octobre.

FUKUDA, M. (1983).

Experimental studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing. Contributions from the Institute of low Temperature Science, Sapporo; Japan, A, 31: 35-91.

GELINAS, P.J. et LOCAT, J. (1987).

Effets des sels déglçants sur la qualité de l'eau de l'aquifère de Trois-Rivières-Ouest. Groupe de recherche en géologie de l'ingénieur, Département de géologie, Université Laval, N° du rapport Transport Québec; RTQ-87-05.

GILPIN, R.R. (1980).

A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. Water Resources Research, 16, 5: 918-930.

GROENEVELT, P.H. et KAY, B.D. (1974).

On the interaction of water and heat transfer in frozen soils. II: The liquid phase. Soil Science Society of America Journal, 38: 400-404.

HANSEN, P.B. et REFSDAL, G. (1974).

Isolation thermique des chaussées. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 189-192.

HARLAN, R.L. (1973).

Analysis of coupled heat fluid transport in partially frozen soil. Water Resources Research, 9, 5: 1314-1323.

HILLEL, D. (1980).

Application of soils physics. Academic Press, N.Y., 384 p.

HOPKE, S.W. (1980).

A model for frost heave including overburden. Cold Regions Science and Technology, 3: 111-127.

HROMADKA, T.V., GUYMON, G.L. et BERG, R.L. (1981).

Some approaches to modeling phase change in freezing soils. Cold Regions Science and Technology, 4: 137-145.

JEUFFROY, G. (1985).

Conception et construction des chaussées. Cours de l'Ecole des Ponts et Chaussées, Editions Eyrolles, Tomes I et II.

JOHANSEN, O. and FRIVIK, P.E. (1980).

Thermal properties of soils and rock materials. 2nd Int. Symp. Ground-Freezing, Trondheim.

KAY, B.D. et GROENEVELT, P.H. (1974).

On the interaction of water and heat transfer in frozen soils. I. Basic theory: the vapor phase. Soil Science Society of America Journal, 38: 395-400.

KNUTSON, A.F (1974).

Protection des chaussées contre le gel au moyen d'une couche d'écorce. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 192-195.

KOOPMANS, R.W.R. et MILLER, R.D. (1966).

Soil freezing and soil water characteristic curves. Soil Science Society of America Journal, 30: 680-685.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (1981).

Régénération des couches de surface de chaussées. Ministère des Transports, Direction générale des transports intérieurs, Paris, France.

LALIBERTE, G.E., COREY, A.T., BROOKS, R.H., COREY, G.L. et MCWHORTER, D.B. (1967).

Similitude for partially saturated flow systems. Soil Moisture. Proceedings of the Hydrology Symposium N° 6, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont., pp. 101-117.

LAROCHE, G. (1988).

Autoroute 573, municipalité de Val-Bélair, comté de Chauveau. Division structures de chaussées. Service des sols et chaussées. Ministère des Transports du Québec. Rapport 0573-01-050(22) 87.

LEUNG, W.S. et CARMICHAEL, G.R. (1984).

Solute redistribution during normal freezing. Water, Air and Soil Pollution, 21: 141-150.

LOCH, J.P.G. (1981).

Stat-of-the-art report. Frost action in soils Engineering Geology, 18: 213-234.

LOWRY, W.P. (1969).

Weather and life. Oregon State University, Academic press, 305 p.

LUNARDINI, V.J. (1981).

Heat transfer in cold climates. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Van Nostrand Reinhold, Hanover, N.H.

MENOT, J.M. (1979).

Equations of frost propagation in unsaturated porous media. Engineering Geology, 13: 101-109.

MILLER, R.D. (1980).

Computation of rate of heave versus load under quasi-steady state. Cold Regions Science and Technology, 3: 243-251.

MILLER, R.D. (1978).

Frost heaving in non-colloidal soils. Proc. Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Canada: 708-713.

MILLY, P.C.D. (1982).

Moisture and heat transport in hysteretic inhomogeneous porous media. A metric head-based formulation and a numerical model. Water Resources Research, 18(3): 489-498.

NIEBER, J.L. (1980).

Evaluation of coefficient matrices of linear triangular elements involving unsaturated soil moisture flow. Dans Finite elements in Water resources. Edité par S.Y. Wang, C.V. Alonso, C.A. Brebbia, W.G. Gray et G.F. Pinder. The University of Mississippi. Rose Printing Company, Inc., Tallahassee, FL. pp. 2260-2269.

NORDAL, R.S. (1974).

Gonflement dû au gel et portance de la route expérimentale de Vormsund lors du dégel de printemps. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 165-170.



NOSS, P.M. (1974).

Rapport entre les facteurs météorologiques et la température de la chaussée. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 21-26.

OGATA, A. et BANKS, R.B. (1961).

A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. United State Geological Survey, Professional paper 411-A: A1-A7.

O'NEILL, K. et MILLER, R.D. (1985).

Exploration of a rigid ice model of frost heave. Water Resources Research, 27,3: 287-296.

O'NEILL, K. (1983).

The physics of mathematical frost heave models: a review. Cold Regions Science and Technology, 6: 275-297.

ORAMA, R. (1974).

Protection thermique des routes en Finlande. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 184-188.

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. Proceedings of the VII International Conference on Computational Methods in Water Resources, MIT, USA, juin 1988, 35: 121-126.

PADILLA, F. (1986).

Analyse théorique de l'infiltration de l'eau à trois phases. Modèle d'application aux sols gelés. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 260 p.

PENNER, E. et UEDA, T. (1977).

A soil frost susceptibility test and basis for interpreting heaving results. Proceedings Third International Conference on Permafrost, Edmonton: 721-727.

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.

PUSCH, R. (1979).

Unfrozen water as a function of clay microstructure. Engineering Geology, 13: 157-162.

RECORDON, E. et DYSLI, M. (1974).

Déformabilité des routes isolées thermiquement. Comptes rendus du Symposium sur l'Action du gel sur les chaussées, Laboratoire Norvégien de la Recherche Routière, Oslo: 201-202.

RUNCHAL, A.K. (1982).

PORFREEZ: a general purpose ground water flow, heat and mass transport model with freezing, thawing and surface water interaction. Analitic and Computational Research Inc., Los Angeles, 25 p.

TAKAGI, S. (1980).

The adsorption force theory of frost heaving. Cold Regions Science and Technology, 3: 57-82.

TAYLOR, G.S. et LUTHIN, J.N. (1978).

A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. Canadian Geotechnical Journal, 15: 548-555.