

**Zeitschrift:** IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH  
Kongressbericht

**Band:** 12 (1984)

**Artikel:** Comportement des sols et des structures en zone arctique

**Autor:** Blanchard, Dominique / Fremond, Michel / Williams, Peter J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-12122>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 03.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## **Comportement des sols et des structures en zone arctique**

Verhalten von Baugrund und Bauwerken in der arktischen Zone

Behaviour of Soils and Structures in Arctic Regions

### **Dominique BLANCHARD**

Laboratoire Central des  
Ponts et Chaussées  
Paris, France

### **Michel FREMOND**

Laboratoire Central des  
Ponts et Chaussées  
Paris, France

### **Peter J. WILLIAMS**

Director  
Carleton University  
Ottawa, ON, Canada

### **RESUME**

Les effets du gel du sol autour d'un gazoduc de 18 mètres de long ont été observés au cours d'une expérience comportant de nombreuses mesures. Le gonflement, les déplacements du sol et les contraintes dans le tube sont continuellement enregistrés. Les expérimentations sont par ailleurs comparées avec des modèles numériques. L'un d'entre eux est décrit ici. Il tient compte des aspects thermique, hydraulique et mécanique. Il permet en particulier de calculer le gonflement.

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Die Auswirkungen der Vereisung des Bodens im Bereich einer 18 Meter langen Gastransportleitung wurden beobachtet und eine Vielzahl von Messungen durchgeführt. Die Hebungen und Verschiebungen des Bodens sowie die Dehnungen im Rohr werden fortwährend registriert. Die Daten werden mit numerischen Modellrechnungen verglichen. Ein Modell wird in diesem Beitrag beschrieben. Es berücksichtigt die thermischen, hydraulischen und mechanischen Aspekte und erlaubt, im besonderen die Hebungen rechnerisch zu erfassen.

### **SUMMARY**

The effects of frozen ground around an 18 m long pipeline have been observed during a test involving numerous measurements. The soil movements and the stresses in the pipe have been continuously monitored. Tests have been compared with numerical models, one of which is described in the article. This model considers thermal hydraulic and mechanical aspects. It allows, in particular, to calculate the ground heave.



## 1 – INTRODUCTION

Le trait essentiel des problèmes de géotechnique nordique est la présence constante d'eau et de glace dans les sols. Un oléoduc chaud fait fondre la glace présente en quantité largement supérieure au volume normal des vides dans le pergélisol. Des subsidences parfois dommageables pour les structures en résultent. A titre de remède on pourrait envisager d'utiliser un tube froid. En fait la congélation qui en résulterait induirait des problèmes encore plus complexes. De plus le pergélisol est souvent discontinu : des sols gelés alternent sur de courtes distances avec des sols dégelés. Comme il est impossible de maîtriser la température des tubes sur de tels intervalles, la connaissance des effets du froid sur les sols est capitale [14].

Les ingénieurs civils, en particulier les ingénieurs routiers [8], connaissent bien les effets du gel, surtout ceux dus au gonflement des sols et à leur perte de portance au dégel. Tous ces phénomènes sont influencés par la vitesse et l'intensité de la congélation, le type de sol et son humidité et quantité d'autres facteurs.

Les effets dus à l'eau sont prépondérants. Le confinement de l'eau dans les pores, la proximité et la nature des parois des pores provoquent :

- un abaissement progressif de la température de congélation de l'eau au fur et à mesure que l'eau liquide se transforme en glace. Les sols gelés contiennent donc de l'eau liquide à des températures inférieures de quelques degrés à 0°C ;
- une perméabilité notable de la zone gelée en raison de la présence de cette eau [2] ;
- un potentiel (relié à l'énergie libre de Gibbs) pour l'eau du sol gelé plus faible que celui de l'eau du sol non gelé voisin [5], [15] il en résulte,
- un important déplacement d'eau vers les parties les plus froides du sol gelé provoquant un gonflement notable du sol [13].

Les ingénieurs civils sont confrontés à cette mouvance du sol. La protection du réseau routier français contre l'action du gel [8], les projets de gazoducs [3], [14] dans le grand nord canadien ont montré l'importance de ces problèmes et l'intérêt d'études scientifiques de base. Les ingénieurs doivent en effet comprendre et maîtriser le gonflement qui peut infliger des déformations destructrices aux structures.

Une étude rationnelle de l'aspect mécanique du gel des sols devait donc être entreprise.

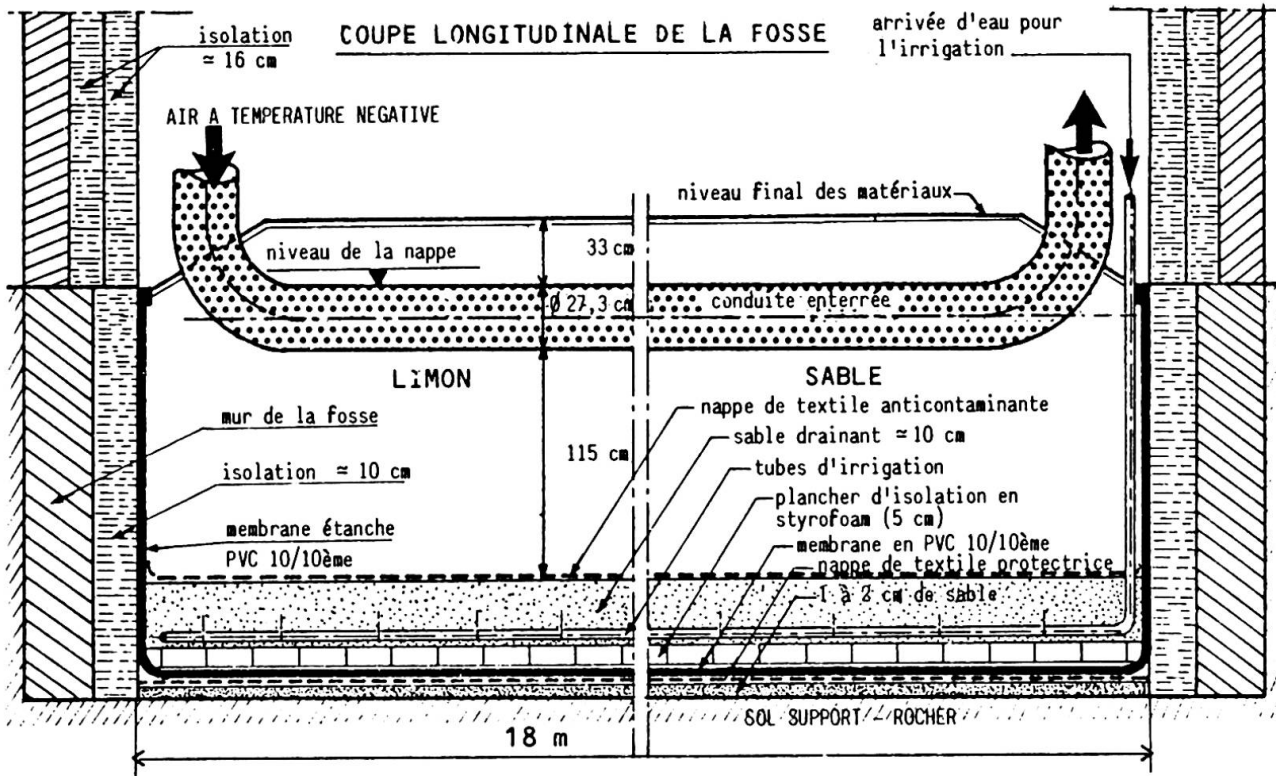


Fig. 1 – Expérience franco-canadienne. Coupe longitudinale

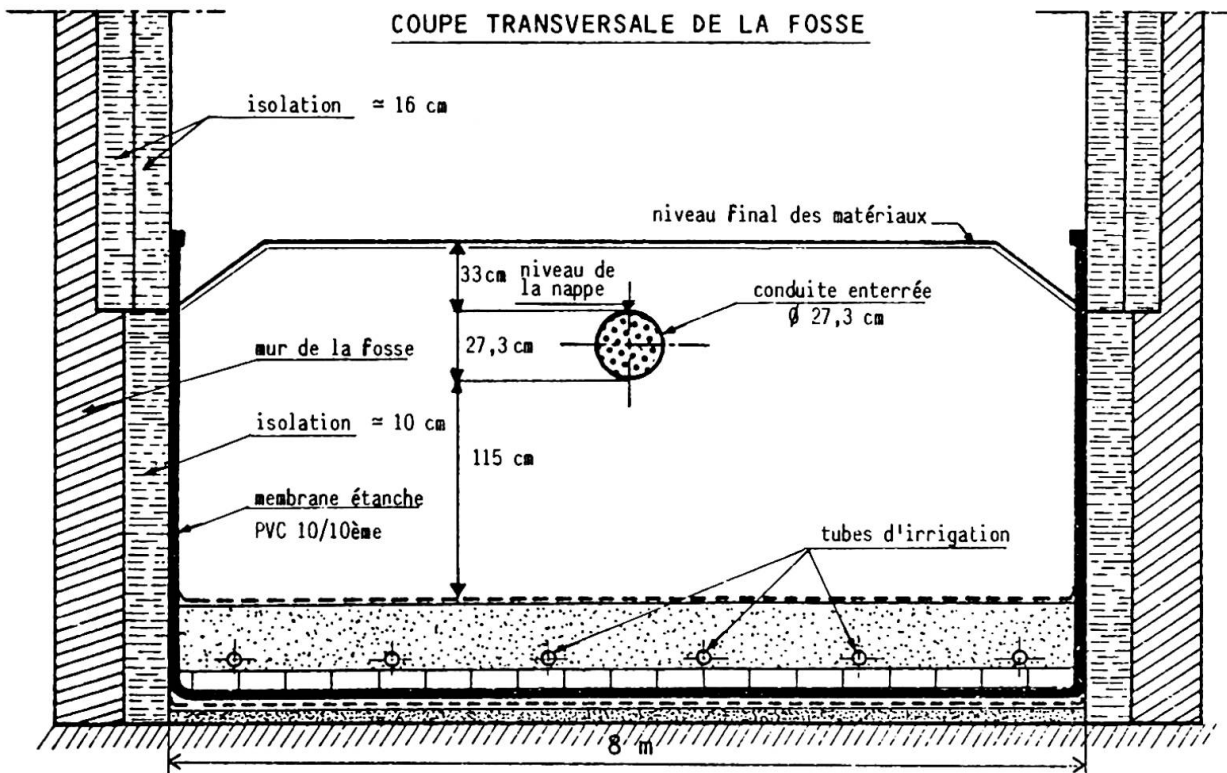


Fig. 2 – Expérience franco-canadienne. Coupe transversale.

Les ingénieurs civils sont confrontés à cette mouvance du sol. La protection du réseau routier français contre l'action du gel [8], les projets de gazoducs [3], [14] dans le grand nord canadien ont montré l'importance de ces problèmes et l'intérêt d'études scientifiques de base. Les ingénieurs doivent en effet comprendre et maîtriser le gonflement qui peut infliger des déformations destructrices aux structures.

Une étude rationnelle de l'aspect mécanique du gel des sols devait donc être entreprise.

## 2 – UNE ETUDE SCIENTIFIQUE

En 1980 on commença une expérience franco-canadienne [6], [7] (voir remerciements) de congélation de sols dans un environnement contrôlé. Une fosse (18 m x 9 m x 2 m) contenant deux sols différents préparés avec soin (sable et limon) est traversée par un gazoduc froid dont on maîtrise la température (figure 1).

La température de l'air ambiant est  $+0,75^{\circ}\text{C}$ , celle de l'air circulant dans le tube  $-6^{\circ}\text{C}$  dans l'expérience actuelle. La nappe phréatique est maintenue 30 cm sous le tube de diamètre 273 mm lui-même recouvert de 30 cm de sol. L'expérience est menée de manière scientifique : les divers paramètres sont parfaitement maîtrisés et enregistrés. Ils ne sont pas soumis aux variations erratiques imposées par la nature. Leur influence peut donc être quantifiée de meilleure façon.

Les modèles du gonflement décrits plus loin demandent une bonne connaissance des lois de comportement mécanique, hydraulique et thermique. L'expérience ainsi que des essais en laboratoire au Canada et en France donnent les renseignements nécessaires par l'intermédiaire de nombreux instruments de mesure. Par exemple, la tendance remarquable des sols gelés au fluage est étudiée en fonction de la température et de la composition (en particulier en fonction des teneurs en eau et glace) [9].

Les déformations dans le tube lui-même sont continuellement enregistrées par l'intermédiaire de jauges de déformation et d'un appareil spécial évaluant la courbure du tube mesurée à partir des mouvements de tige en acier soudées sur le tube. Des méthodes optiques conventionnelles sont aussi utilisées. Des déplacements et des efforts dans le tuyau sont présentés sur les figures 3 et 4.

## 3 – LES MODELES

La physique et les observations décrites ci-dessus impliquent qu'une description rationnelle de la congélation des sols doit inclure à la fois les aspects thermique, hydraulique et mécanique.

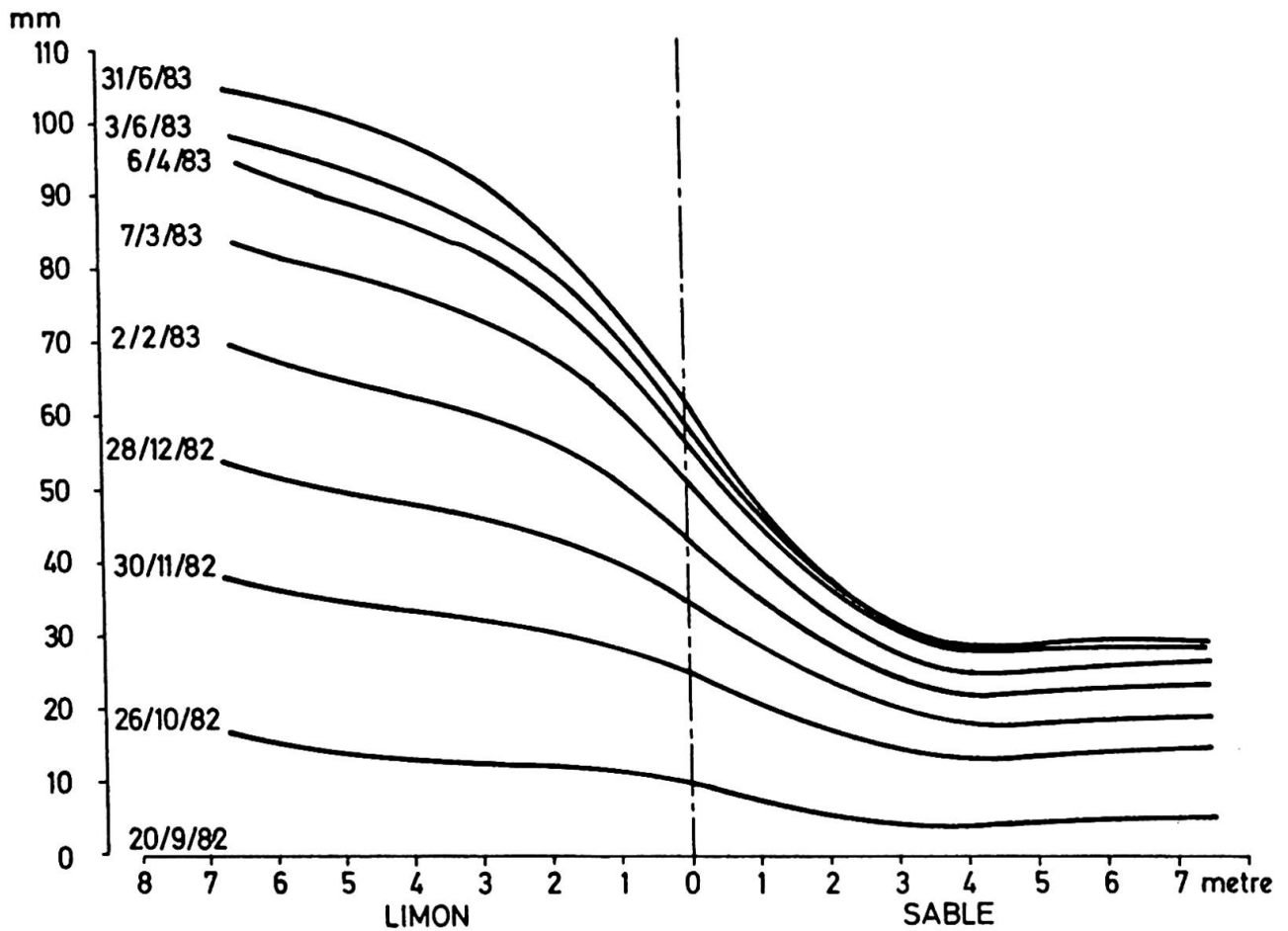


Fig. 3 – Déplacement du tube provoqué par le gonflement du limon et du sable.

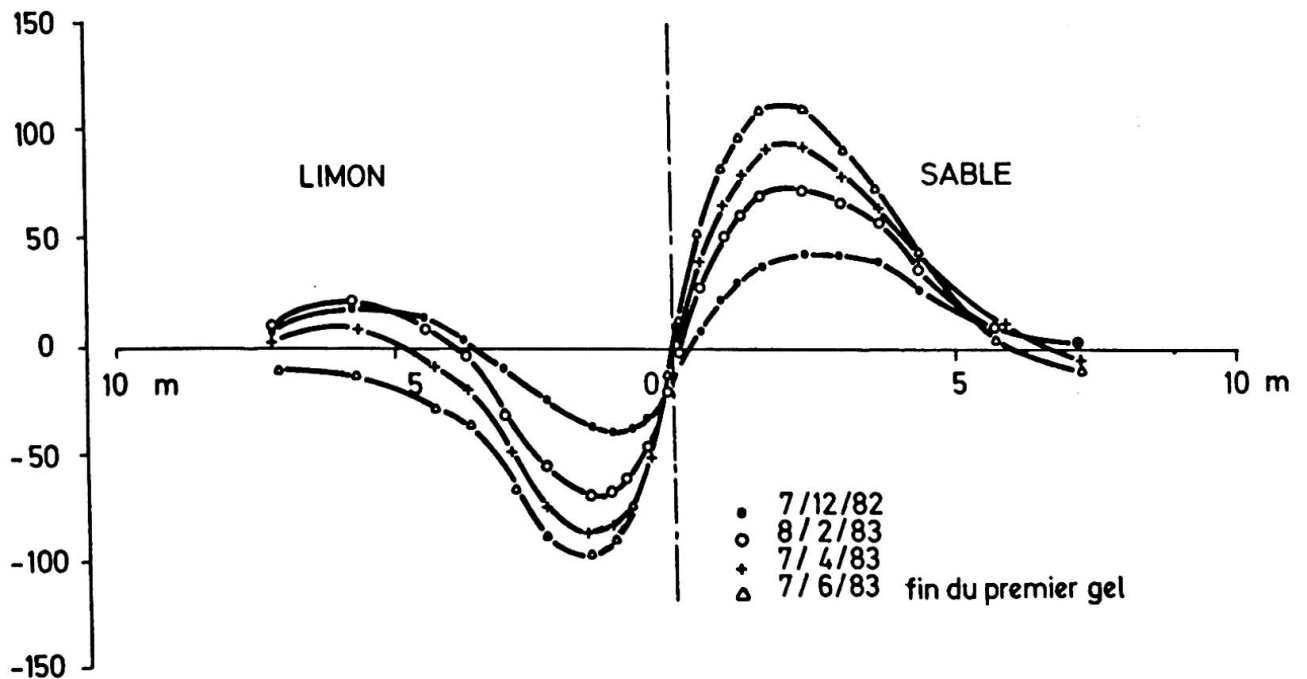


Fig. 4 – Effort dans le tube dû à la flexion provoquée par le gonflement

Les modèles thermiques sont maintenant classiques [4]. Les modèles liant les aspects thermique et hydraulique sont moins nombreux [1], [5] [12]. Des modèles plus spécialisés décrivant l'interaction sol gazoduc enterré ont aussi été mis au point [10], [11]. Le modèle le plus complet que nous présentons maintenant inclut les trois effets thermique, hydraulique et mécanique.

Les équations sont obtenues en utilisant — les lois de conservation :

- (a) de la masse de l'eau et de la glace ;
- (b) de l'énergie du milieu poreux ;
- (c) de la quantité de mouvement du milieu poreux pour les effets mécaniques ;

— les lois de comportement :

- (a) loi de Darcy avec une mobilité fonction de la température ;
- (b) loi de Fourier avec une conductivité thermique fonction de la température ;
- (c) conformément au point a du paragraphe 1, on tient compte de la présence d'eau liquide à des températures strictement inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$ . La teneur en eau liquide apparaît naturellement comme une fonction décroissante de la température ;
- (d) on suppose que le sol est visco-élastique dans sa partie gelée, le fluage étant du type Norton-Hoff.

On suppose par ailleurs que le sol est saturé et que sa porosité est connue. Les données du modèle sont les caractéristiques des sols et les actions extérieures thermique, hydraulique et mécanique. Les résultats de la simulation numérique sont l'évolution de la température, de la charge hydraulique et des contraintes dans le sol en fonction du temps.

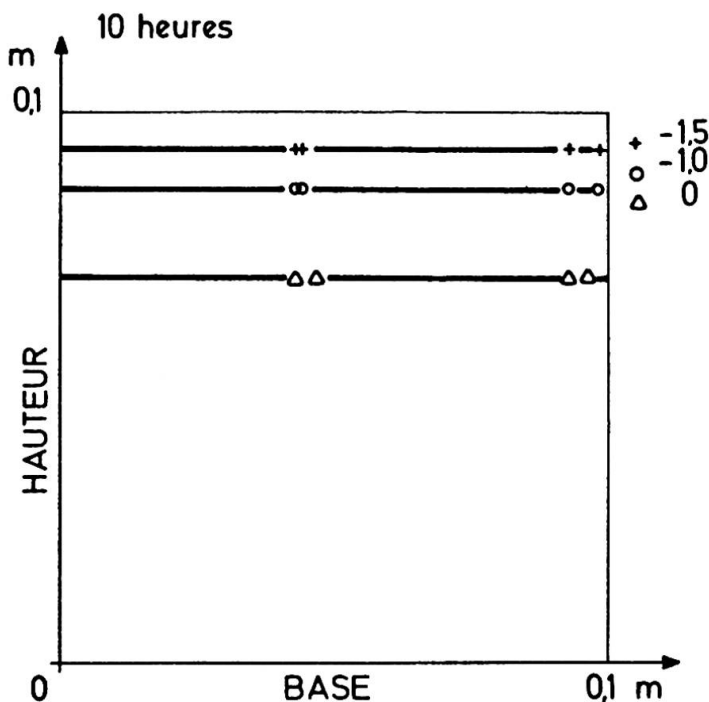


Figure 5 — Isothermes dans un sol congelé en surface.

A titre d'exemple, on examine l'évolution d'un sol non chargé congelé par le maintien d'une température négative ( $-2^{\circ}\text{C}$ ) à sa surface. La figure 5 représente les isothermes de température dix heures après le début de la simulation. La figure 6 représente la charge hydraulique en fonction de la profondeur. On note la forte diminution du potentiel dans la zone gelée provoquant le drainage de l'eau de la partie non gelée vers les zones les plus froides.

La figure 7 représente le déplacement du sol. On y constate un gonflement matérialisé par les flèches dont la longueur est proportionnelle au gonflement. Le gonflement maximal est de quelques millièmes de millimètre, ce qui est raisonnable dans la situation présente.

On doit remarquer qu'aucune action mécanique n'a été exercée sur le sol dont le gonflement ne résulte que de la congélation. On modélise donc bien un des aspects essentiels de l'action du froid sur les sols. Le modèle peut être utilisé par les ingénieurs pour simuler l'évolution des structures qu'ils projettent. Ces simulations numériques contribuent au dimensionnement rationnel des structures et permettent de prendre en compte les impératifs de sécurité attachés aux conditions extrêmes que l'on rencontre en milieu nordique.

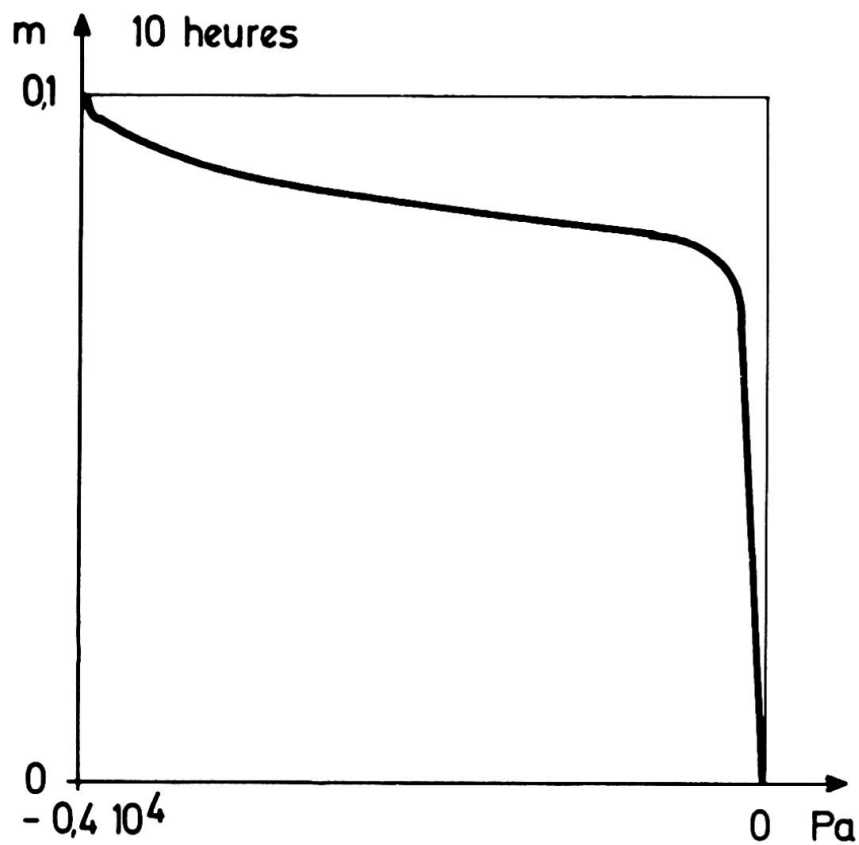


Figure 6 – Charge hydraulique en fonction de la profondeur. Noter la grande dépression due au gel.

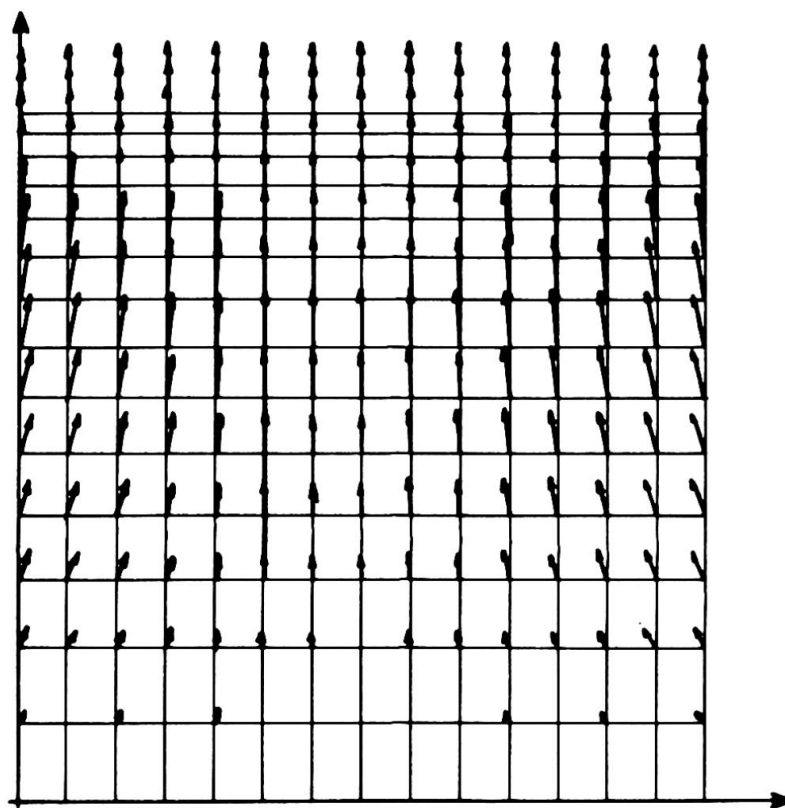


Figure 7 – Gonflements du sol. Noter qu'ils ne sont dus qu'à la congélation.

#### 4 — CONCLUSION

Les expériences telles que celles qui sont menées à Caen clarifient les relations fondamentales gouvernant l'action du gel sur les sols. Elles permettent d'apprécier les données nécessaires à l'utilisation des modèles et par la suite de les valider.

Notons que dès maintenant l'aspect qualitatif du gel des sols est maîtrisé dans la plupart des situations usuelles. La méthode scientifique constamment utilisée, a permis de mettre en lumière les paramètres régissant les phénomènes. L'identification des relations qui les lient conduit aux modèles prévisionnels. Ceux-ci permettent un dimensionnement plus fiable et plus économique de structures civiles, par exemple les gazoducs, dans les régions nordiques.

#### 5 — REMERCIEMENTS

L'expérience Franco-Canadienne a lieu à Caen au Centre de Géomorphologie du Centre National de la Recherche Scientifique. La participation française regroupe le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, le Centre d'Expérimentation Routière et le Centre d'Etude et de Construction des Prototypes du Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (Rouen), le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, le Laboratoire d'Aérothermique (Meudon) et le Centre de Géomorphologie du Centre National de la Recherche Scientifique.

La participation canadienne est subventionnée par le Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada, par l'intermédiaire d'un contrat avec les Géotechnical Sciences Laboratories de l'Université Carleton. Les participants sont des membres du Corps Professoral du Geography Department, du Ottawa-Carleton Geoscience Centre (M.W. Smith — P.J. Williams) et du Department of Civil Engineering (W.H. Bowes), de l'Université Carleton ; du Centre d'Ingénierie Nordique de l'École Polytechnique (B. Ladanyi). Les participants sont aussi des étudiants diplômés : A. Guichoua, G. Lemaire (École Polytechnique) ; M. Burgess (également au Ministère de l'Énergie des Mines et des Ressources) ; S. Dallimore (Geotechnical Science Laboratories) ; D. Halliwell (actuellement à l'Université Mac Master) ; H. Crawford (Université de Western Ontario) ; D. Fisher. Le professeur visitant R. Kettle (Université d'Aston, U.K.) , G. Boyle, technicien (Geotechnical Sciences Laboratories) et beaucoup d'autres participent de façon significative.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [ 1 ] AGUIRRE-PUENTE, J. ; FREMOND, M. — Propagation du gel dans les milieux poreux. Joint I.U.T.A.M., I.M.U. Symposium on applications of methods of functional analysis to problems of mechanics. Marseille 2-6 Septembre 1975.
- [ 2 ] AGUIRRE-PUENTE, J. ; GRUSSON, J. — Measurement of permeabilities of frozen soils. Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, 1983.
- [ 3 ] BERGER, T.R. — Northern Frontier, Northern Homeland, 1977.
- [ 4 ] BLANCHARD, D. ; FREMOND, M. — The Stefan problem. Computing without the free boundary. Intern. J. Num. Method in Engineering, vol. 20, 757-771, 1984.
- [ 5 ] BLANCHARD, D. ; FREMOND, M. — La succession cryogénique dans la congélation des sols : un modèle macroscopique. Note aux C.R.A.S. Série II, t. 294, pp. 1-4 (4 Janvier 1982).
- [ 6 ] Bulletin 27 du Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. Expérience — Expérimentation — Modélisation — Simulation. Chap. IV. Expérience franco-canadienne, 1983.
- [ 7 ] BURGESS, M. ; LEMAIRE, G. ; SMITH, M. and WILLIAMS, P.J. — Investigation of soil freezing in association with a buried chilled pipeline in a large-scale test facility : Phase 1. Rept. to Energy, Mines and Ressources, Canada, Earth Physics Branch, 1982 (disponible en français).
- [ 8 ] GEL et DEGEL des CHAUSSEES. Note technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Janvier 1975.
- [ 9 ] LADANYI, B. — Mechanical Behaviour of Frozen Soils in Mechanics of Structured Media. PT. B. A.P.S. Selvadurai (Ed.). Elsevier, 500 pp., 1981.
- [ 10 ] LEMAIRE, G. — Etude expérimentale d'un gazoduc enterré soumis à des températures négatives. Mémoire de Maîtrise ès-Science Appliquée. École Polytechnique, Montréal, 1983.
- [ 11 ] RAULIN, Ph. — Communication personnelle.



- [12] RUNCHAL, A.K. – Porfreez : A general purpose ground water flow, heat and mass transport model with freezing, thawing and surface water interaction. A.C.R.I. Technical Note T.N-005, 1982.
- [13] SMITH, M.W. – à paraître 1984.
- [14] WILLIAMS, P.J. – Pipelines and Permafrost. Longman, London and New York, 1979.
- [15] WILLIAMS, P.J. – The surface of the earth. An introduction to geotechnical science. Longman, London and New York, 1982.