ANALYSE DES CONTRAINTES DEVELOPPEES DANS LES CANALISATIONS ENTERREES DANS UN SOL SOUMIS AU GEL

1984

ANALYSE DES CONTRAINTES DEVELOPPEES DANS LES CANALISATIONS ENTERREES DANS UN SOL SOUMIS AU GEL

pour

LA DIRECTION DE LA PHYSIQUE DU GLOBE
MINISTERE DE L'ENERGIE, MINES ET RESSOURCES, CANADA

LABORATOIRES DE SCIENCE GEOTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GEOGRAPHIE
UNIVERSITE CARLETON
OTTAWA, ONTARIO
K1S 5B6

DSS Numéro du contrat : OSU82-00364

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
   - 1.1 Généralités
   - 1.2 Contexte

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES
   - 2.1 Installation expérimentale
   - 2.2 Instrumentation
   - 2.3 Conduite de l'expérimentation
   - 2.4 Modifications apportées avant la seconde période de gel
     - 2.4.1 Instrumentation
     - 2.4.2 Partie mécanique
     - 2.4.3 Etat du sol

3. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PREMIERE PERIODE DE GEL
   - 3.1 Régime thermique
   - 3.2 Déformation de la canalisation
   - 3.3 Gonflement au gel des sols
   - 3.4 Pression totale induite dans le sol

4. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PERIODE DE DEGEL
   - 4.1 Généralités
   - 4.2 Régime thermique
   - 4.3 Déformation de la canalisation
   - 4.4 Consolidation et dilatation du sol
   - 4.5 Pression totale induite dans le sol

5. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - DEUXIEME PERIODE DE GEL
   - 5.1 Généralités
   - 5.2 Régime thermique
   - 5.3 Déformation de la canalisation
   - 5.4 Soulèvement de la surface des sols
   - 5.5 Pression totale induite dans le sol

6. ETUDE DE LABORATOIRE
   - 6.1 Généralités
   - 6.2 Gonflement au gel
   - 6.3 Relation succion-teneur en eau
   - 6.4 Propriétés mécaniques

7. CONCLUSIONS

8. REMARQUES FINALES DU CHEF DE PROJET

AVANT-PROPOS

Le présent document constitue le rapport final relatif au Contrat n° OSU82-00364 du Département des Approvisionnements et Services du Canada (du 1er janvier 1983 au 31 décembre 1983) : "Analyse des contraintes développées dans les canalisations enterrées dans un sol soumis au gel", Chef de projet P.J. WILLIAMS. Ce contrat fut réalisé en utilisant les installations situées au Centre de Géomorphologie (Caen-Normandie), au travers d'un projet de recherche commun franco-canadien : "Comportement des canalisations enterrées soumises à des températures négatives". La poursuite de la participation canadienne dans ce projet commun est basée sur des contrats existant entre les Laboratoires de Science Géotechnique de l'Université Carleton et le Département des Approvisionnements et Services, le numéro de série du dernier contrat étant OSU83-00157 : "Expérimentation sur le gel d'un sol et d'une canalisation enterrée refroidie dans une installation d'essai de grandes dimensions - 3ème phase", Chef de projet P.J. WILLIAMS, Co-chef de projet M.W. SMITH. Le présent rapport est relatif à la seconde année de l'étude des contraintes dans une canalisation enterrée dans un sol soumis au gel et au dégel.

Un rapport provisoire relatif à la présente étude avait été inclus dans le rapport "Expérimentation sur le gel d'un sol et d'une canalisation enterrée refroidie dans une installation d'essai de grandes dimensions - 2ème phase", en date d'août 1983. Le lecteur est invité à se reporter à ce dernier et aux rapports antérieurs (voir la liste de références) relatifs à ce projet, pour trouver une description plus complète de l'installation expérimentale.

Une thèse de Maîtrise de Sciences appliquées de l'Ecole Polytechnique de Montréal de M. Gilles LEMAIRE a été soutenue récemment; cette thèse contient une étude, pour une grande part théorique, des contraintes et déformations d'une canalisation en relation avec le gonflement au gel. Les éléments de cette thèse

...

seront inclus dans les rapports futurs concernant le projet. Une autre thèse est attendue dans le courant de l'année prochaine. L'analyse des résultats présentés dans le présent document doit être développée d'une manière substantielle dans le courant de l'année à venir.

Ce rapport a, pour une grande part, été préparé par Henry CRAWFORD, responsable de projet à Caen, de juillet à novembre 1983 et par Scott DALLIMORE, assisté par Doug FISHER, responsable de projet à Caen, de novembre 1983 à mars 1984. Le professeur W.H. BOWES du Département de Génie Civil de l'Université Carleton et le professeur B. LADANYI du Centre d'Ingénierie Nordique de l'Ecole Polytechnique assurent un rôle de conseil, vis-à-vis de ce projet, pour ce qui concerne le comportement de la canalisation et les propriétés mécaniques des sols gelés respectivement.

La réalisation du projet de recherche commun franco-canadien s'appuie sur une équipe mixte franco-canadienne comportant des scientifiques, des étudiants et des techniciens. L'ensemble du projet est supervisé par un Comité Scientifique et l'affiliation de ses membres donne la liste des organismes impliqués dans le Contrat :

M. Jaime AGUIRRE-PUENTE, Laboratoire d'Aérothermique, Centre National de la Recherche Scientifique

M. Lucien FAUGERES, Centre National de la Recherche Scientifique

M. Michel FREMOND, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

M. Alan JUDGE, Earth Physics Branch, Energy, Mines and Resources - Canada

* M. J.-C. CHANTEREAU, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

M. A. PHILIPPE, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

M. M.W. SMITH, Geotechnical Science Laboratories, Carleton University

** M. P.J. WILLIAMS, Geotechnical Science Laboratories, Carleton University.

* Président, France

** Président, Canada

I - INTRODUCTION

I.1 - Généralités

Ce rapport présente un survol des résultats de la seconde année (du 1er janvier 1983 au 31 décembre 1983) d'une étude des contraintes dans une canalisation refroidie enterrée dans des sols soumis à des conditions de gel et de dégel. Cette étude fait partie d'un projet de recherche commun franco-canadien conduit dans une installation expérimentale à température contrôlée de grandes dimensions, située à Caen, France.

L'essentiel du rapport est constitué par une présentation détaillée de quelques résultats obtenus au cours des différentes phases expérimentales de l'étude. Un bref rappel des travaux exécutés avant le 1er janvier 1983 est également présenté, ainsi qu'une description du travail d'expérimentation et de modification entrepris durant l'année 1983.

I.2 - Contexte

Quand une canalisation de gaz refroidi traverse une zone de transition entre deux sols non gelés de sensibilités au gel très différentes, un soulèvement de la canalisation et du sol environnant peut survenir. La détermination des interactions entre le gonflement des sols et la canalisation présente des difficultés particulières. Il est important de connaître, non seulement les caractéristiques de gonflement des sols, mais également la réaction de l'anneau de sol gelé situé autour de la canalisation, ainsi que la déformation et l'état de contraintes de cette dernière.

Le projet conduit à Caen est une étude pluri-disciplinaire englobant de nombreux aspects du gel-dégel des sols et les effets particuliers relatifs au gel d'un sol comportant une canalisation enterrée refroidie. La détermination des contraintes développées dans une canalisation et des interactions physiques complexes qui apparaissent quand une canalisation refroidie traverse deux sols

de sensibilités au gel différentes, fait partie intégrante de cette étude.

L'objectif principal du projet de Caen est la réalisation d'une expérimentation en grandeur nature avec un contrôle précis des variables physiques, thermiques et hydriques. Cette expérimentation ne prétend pas reproduire une quelconque situation particulière de terrain ou de projet d'établissement d'une canalisation. On s'efforce seulement de reproduire les types de conditions nécessaires à une étude fondamentale des relations entre le soulèvement au gel des canalisations refroidies et divers facteurs, et en particulier de la relation entre le comportement de la canalisation et les phénomènes de gonflement au gel.

2 - CONDITIONS EXPERIMENTALES

2.1 - Installation expérimentale

L'expérimentation est conduite à la Station de Gel située au Centre de Géomorphologie à Caen, France. Pour une description détaillée de cette station et du montage initial de l'expérience, le lecteur est invité à se reporter à un précédent rapport de Burgess et autres (1982).

L'installation consiste en un hangar réfrigéré de 18 mètres de long sur 8 mètres de large avec deux pièces adjacentes destinées à abriter le matériel expérimental et les équipements mécaniques. Le fond de la fosse du hangar a fait l'objet d'un aménagement spécial pour cette expérience afin d'éviter des perturbations du régime thermique et hydraulique, et de pouvoir contrôler soigneusement les conditions expérimentales. Ainsi que le montrent les figures 2.1 et 2.2, deux sols différents, un sable non gélif et un limon gélif, ont été mis en place dans chacune des deux moitiés de la fosse. Une canalisation en acier de 18 m de long et de 273 mm de diamètre, reliée à un système de réfrigération indépendant, a été enterrée dans ces sols à une profondeur de 30 cm au-dessous de la surface.

...

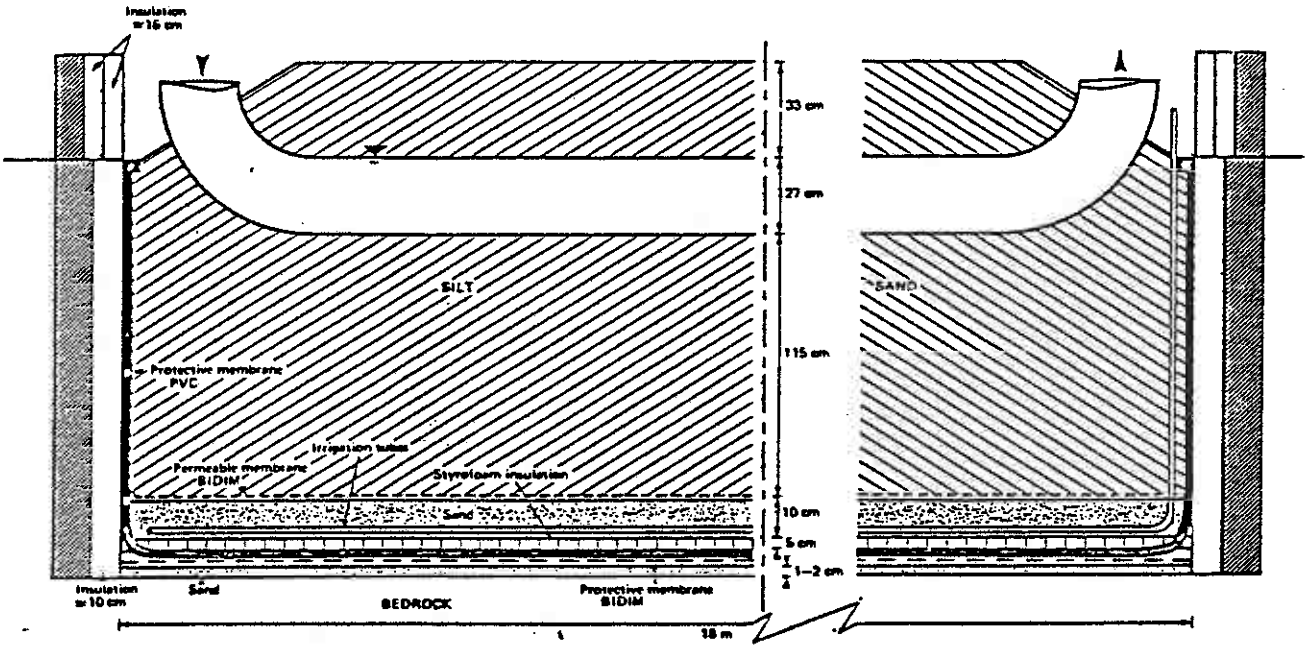

FIGURE 2.1 - COUPE LONGITUDINALE DE LA FOSSE.

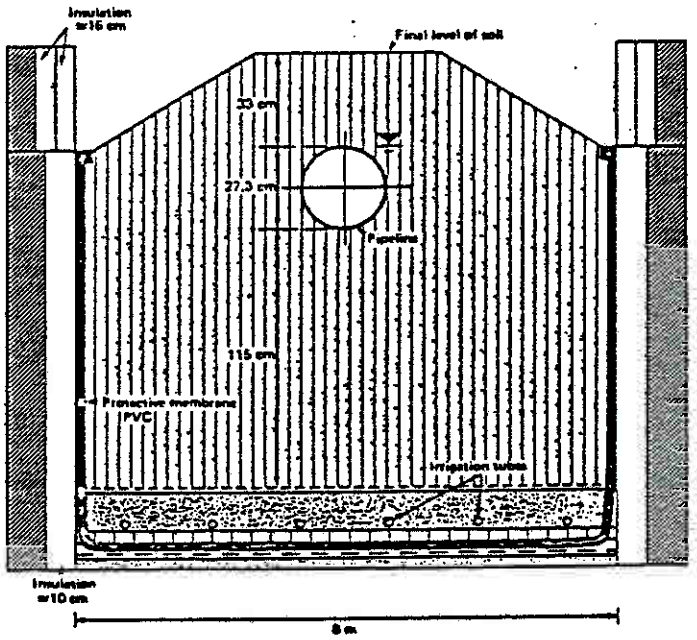

FIGURE 2.2 - COUPE EN TRAVERS DE LA FOSSE.

2.2 - Instrumentation

De nombreux appareils de mesure furent mis en place et un grand nombre de mesures sont prises à cadence régulière (voir Geotechnical Science Laboratories, 1983). Le tableau 1 présente un aperçu des principaux types d'appareils et un sommaire de la fréquence des mesures. Les appareils comprennent des thermocouples et des fluxmètres auscultés automatiquement au moyen d'une centrale d'acquisition de données. Il est procédé également à des relevés manuels de thermistances, de niveau d'eau, du nivellement de surface, de tensiomètres, de capteurs de pression, de tubes télescopiques de gonflement, de tubes indicateurs de profondeur de gel, de sondes de teneur en eau T.D.R., de la déformation, de la courbure et de l'état de contrainte de la canalisation. Il est également procédé à des mesures périodiques, non indiquées sur la table 1, comprenant des profils verticaux de température et de densité dans les sols et des mesures pondérales de teneur en eau. L'ensemble des mesures est, autant que possible, introduit dans un micro-calculateur situé à la Station. Elles sont ensuite transférées sur une bande magnétique qui est expédiée au Canada en vue d'un dépouillement détaillé.

2.3 - Conduite de l'expérimentation

La première période de gel (voir calendrier) débuta le 21 septembre 1982 après préparation de l'installation, mise en place des appareils de mesure, stabilisation des niveaux d'eau dans le massif et refroidissement des deux sols. Les conditions opératoires durant cette période de gel étaient une température de - 0,75 °C de l'air ambiant du hangar et une température moyenne au sein de la canalisation de - 2 °C . La nappe phréatique fut stabilisée à une profondeur approximative de 90 cm en dessous de la surface initiale du sol (initialement, la nappe phréatique avait été maintenue à une profondeur de 30 cm mais, en raison d'un soulèvement excessif de la canalisation et d'une pénétration du gel limitée, cette profondeur fut portée à 90 cm au bout de 3 mois). La première période de gel fut poursuivie pendant $8\frac{1}{2}$ mois jusqu'au 8 juin 1983.

...

Régime	Type de capteur ou de mesure	Nombre	Fréquence des lectures	Commentaires
Thermique	Thermocouples (fer-constantan)	environ 160	toutes les 4 heures	Lecture automatique par centrale d'acquisition de données Solartron Orion.
	Fluxmètres	5	toutes les 4 heures	Lecture effectuée par le même système que les thermocouples.
	Thermistances	25	3 fois par semaine	
	Tubes indicateurs de profondeur de gel	5	3 fois par semaine	Indication de la profondeur de gel par changement de couleur d'un colorant organique.
Hydraulique	Piézomètres	12	chaque jour	Mesures complétées périodiquement par des relevés effectués dans 6 puits de contrôle.
	Tensiomètres	20	3 fois par semaine	
	Addition ou extraction d'eau		chaque jour	L'eau de dégivrage de chacun des trois évaporateurs et du tuyau est recueillie et la quantité en est mesurée. De même, est mesuré le volume d'eau ajouté ou pompé au fond de la fosse.
	Sondes de teneur en eau TDR	28 horizontales 6 verticales	une fois par semaine	Mesure électromagnétique de la teneur en eau non gelée volumique
Déformation de la canalisation	Nivellement (tiges fixées sur le tuyau)	29 tiges	une fois par semaine	Mesure par lunette topographique.
	Rotation (tiges fixées sur le tuyau)	29 tiges	une fois par semaine	Mesure d'angle.

TABLEAU 1 - PLANNING DES MESURES.

Régime	Type de capteur ou de mesure	Nombre	Fréquence des lectures	Commentaires
Déformation de la canalisation (suite)	Courbure (tiges fixées sur le tuyau)	24 points (3 tiges chacun)	une fois par semaine	Jauge de courbure et utilisation d'une approximation par différences finies.
	Jauges de contrainte	22 paires (demi-pont) 2 rosettes (3 jauges chacune)	2 fois par semaine	Les jauges montées en demi-pont mesurent la contrainte de flexion; les jauges montées en rosettes mesurent toutes les composantes de la contrainte.
Mesures physico-mécaniques sur les sols	Nivellement (points repérés sur la surface)	226 points	relevé de l'axe et de deux profils en travers : une fois par semaine; l'ensemble des points : une fois par mois	Tous les points sont rattachés à un repère fixe extérieur.
	Tubes télescopiques (gonflement du sol)	38 niveaux de mesure répartis sur 4 verticales	une fois par semaine	Des tubes télescopiques de différentes longueurs donnent le mouvement relatif des couches de sol.
	Capteur de pression du sol Glotzl	15	3 fois par semaine	
	Sondes gammamétriques	8 profils verticaux sur 2 sections en travers	approximativement tous les 4 mois	Seulement 3 séries de mesures ont été réalisées; elles fournissent les profils de densité humide du sol. Des disques en PVC enterrés servent de repères pour l'estimation du gonflement du sol.

N.B. Pour une description détaillée de la localisation des capteurs et des dispositifs de mesure, voir Burgess et autres (1982) et Geotechnical Science Laboratories (1983).
La cadence des mesures donnée ici est globalement celle utilisée tout au long d'une grande partie de l'expérience. Les mesures furent effectuées à une plus grande fréquence pendant les quelques premières semaines de gel en septembre et octobre 1982, et durant les quelques premières semaines de dégel en juin 1983.

TABLEAU 1 - PLANNING DES MESURES (suite).

CALENDRIER

Evénement	Désignation dans le rapport	Date
ignature du contrat		31 décembre 1981
chèvement de la mise en place de l'expérience t essais préliminaires		21 septembre 1982
EMARRAGE		
empérature de l'air et de la surface du sol -0,75 °C	1ère PERIODE DE GEL	21 septembre 1982
empérature dans la canalisation - 2 °C		8 juin 1983
empérature de l'air et de la surface du ol remontée à + 4 °C	PERIODE DE DEGEL DE SURFACE	8 juin 1983
empérature dans la canalisation - 2 °C		17 octobre 1983
'empérature de l'air et de la surface du ol abaissée à - 0,75 °C	2ème PERIODE DE GEL	17 octobre 1983
'empérature dans la canalisation ıbaissée à - 5 °C		été 1984 ?

Une période de dégel de la surface débuta immédiatement après la première période de gel et fut prolongée pendant 4 mois jusqu'en octobre 1983. Durant cette phase, la température de la canalisation et le niveau de la nappe phréatique furent maintenus aux valeurs précédentes, mais la température de l'air ambiant dans le hangar fut remontée à + 1 °C et un jour après à + 4 °C .

Après plusieurs modifications apportées à l'instrumentation et aux sols à la fin de la période de dégel, une seconde période de gel a commencé le 17 octobre 1983. Les conditions opératoires sont identiques à celles de la première période de gel, à l'exception de la température moyenne au sein de la canalisation qui fut abaissée à - 5 °C dans le but d'augmenter la profondeur de pénétration du gel. La température de l'air dans le hangar fut fixée à - 0,75 °C et le niveau de la nappe phréatique fut maintenu à 90 cm sous la surface du sol.

2.4 - Modifications apportées avant la seconde période de gel

2.4.1 - Instrumentation

Des variations diurnes inattendues des mesures de température furent observées durant la première année d'expérimentation (voir Geotechnical Science Laboratories, 1983). Une étude effectuée pendant l'été de 1983 montra que ces variations ne reflétaient pas de réelles fluctuations de la température dans le sol mais étaient plutôt inhérentes aux variations diurnes de la température de la centrale d'acquisition. Pour corriger ce problème, avant le démarrage de la seconde période de gel, tous les thermocouples furent raccordés à une soudure de référence 0 °C extérieure. Ceci fut réalisé sans perturbation des soudures des thermocouples enfouies dans les sols. Une fois ce raccordement achevé, on put observer immédiatement une modification allant jusqu'à 0,5 °C des mesures de température. De manière à améliorer encore la stabilité des mesures de température, un appareil de chauffage électrique régulé thermostatiquement fut mis en place dans la salle de mesure dans le but de réduire les variations journalières de la température.

...

En raison des problèmes évoqués ci-dessus, la précision escomptée pour la plupart des mesures de température effectuées au cours de la première période de gel ne fut pas obtenue. Ce point a été amélioré de façon significative pour la seconde période de gel.

Avant la seconde période de gel, deux indicateurs de profondeur de gel supplémentaires furent mis en place (voir la description de l'opération dans Burgess et autres, 1982). Ils ont été localisés loin de la zone d'influence de la canalisation, l'un dans le sable, l'autre dans le limon.

Au cours de la période de dégel, survinrent des variations occasionnelles, courtes mais brutales, du niveau de la nappe phréatique. On a supposé qu'un petit trou pouvait s'être formé dans la membrane externe et que ces variations pouvaient correspondre aux variations de la nappe phréatique du sol naturel extérieur. Afin d'étudier ce point, un pluviomètre fut installé à l'extérieur du hangar pour contrôler les précipitations. De plus, des mesures périodiques du niveau de la nappe phréatique du sol naturel furent effectuées en utilisant un puits existant, peu profond, situé au voisinage de la Station.

2.4.2 - Partie mécanique

Avant le début de la seconde période de gel, des améliorations importantes furent apportées au système de réfrigération de la canalisation. Au cours de la réalisation de ces modifications, on veilla à ce que les arrêts du système de réfrigération de la canalisation ne dépassent jamais 2 ou 3 heures, afin de minimiser tout effet néfaste pour l'expérience.

Dans le système précédent de contrôle de la température de la canalisation, le capteur de température était situé dans l'échangeur de chaleur, lequel n'était pas disposé de façon symétrique le long de la partie aérienne de la tuyauterie d'alimentation de la canalisation. Ceci signifiait que, selon le sens de la circulation de l'air, la température à l'entrée de la canalisation enterrée pouvait varier en raison d'échanges de chaleur inégaux avec l'air ambiant du hangar. Cet effet devint plus prononcé au cours du cycle de dégel quand la

...

différence entre la température de l'air ambiant et celle dans la canalisation augmenta. Il fut admis que ce problème prendrait encore plus d'importance durant la seconde période de gel où la température dans la canalisation serait plus basse.

Deux mesures furent adoptées pour remédier à ce problème. Premièrement, une isolation supplémentaire fut apportée à la partie aérienne de la canalisation pour réduire les échanges de chaleur. Deuxièmement, des capteurs de température destinés à réguler la température dans la canalisation furent mis en place à chaque extrémité de la canalisation enterrée de telle sorte que la température de l'air à son entrée dans la canalisation soit la même quel que soit le sens de circulation de l'air.

Durant l'été, pendant les mois chauds de juillet et août, le système de refroidissement de la canalisation travaillait près de sa puissance maximale, et parfois en surcharge s'arrêtait, principalement juste après les cycles de dégivrage. Ces arrêts nécessitaient une remise en route manuelle et, lorsque cela survenait de nuit, ces arrêts pouvaient durer plusieurs heures. Pour améliorer cette situation, un condenseur supplémentaire fut installé en série avec le condenseur existant sur le compresseur du système de réfrigération de la canalisation. L'efficacité du système de dégivrage fut également améliorée afin de réduire la durée des cycles de dégivrage.

2.4.3 - Etat du sol

Au cours de la première période de gel, une légère fissure fit son apparition dans le limon longitudinalement au-dessus de la canalisation. Pendant la période de dégel qui a suivi, la largeur de cette fissure augmenta avec le tassement du sol adjacent. La fissure atteignit une largeur maximale de l'ordre de 30 mm et paraissait s'étendre en profondeur jusqu'à la partie supérieure de la canalisation. Il était à craindre que cette fissure conduise à la formation d'un coin de glace irréaliste au-dessus de la canalisation, au cours de la période de gel suivante. De même, quelques-uns des manchons en PVC protégeant

...

les tiges verticales de mesure en acier situées sur la canalisation avaient été déviés et gênaient le mouvement des tiges.

Afin de remédier à cette situation, les 150 mm supérieurs de limon, situés immédiatement au-dessus de la canalisation, furent remaniés et recompactés à la dame à main jusqu'à une densité uniforme. Dans cette zone, les appareils situés près de la surface ont été remis en place et un relevé du niveau final de la surface a été effectué.

3 - OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PREMIERE PERIODE DE GEL

3.1 - Régime thermique

L'analyse du régime thermique au cours de la première période de gel fut compliquée par l'inexactitude mentionnée précédemment de certaines mesures de températures telles qu'elles furent enregistrées par le système d'acquisition de données. Les figures relatives au régime thermique représentent la meilleure estimation possible à partir de l'ensemble des résultats thermiques disponibles. La précision des mesures de températures a été trouvée de ± 0,25 °C environ seulement.

Les figures 3.1 et 3.2 représentent les variations des gradients thermiques au-dessous de la génératrice inférieure de la canalisation au cours de la première période de gel. Bien que des conditions isothermes voisines de 0 °C aient été désirées au départ, les contraintes de temps ont conduit à limiter le refroidissement des deux sols. Comme le montrent les figures, pour le 22 septembre 1982, les températures dans les deux sols étaient légèrement plus élevées qu'il était voulu et, de plus, le limon était plus chaud que le sable. La progression de l'isotherme 0 °C en dessous de la génératrice inférieure de la canalisation, dans le sable et dans le limon, est donnée sur la figure 3.3. Cette figure montre une progression relativement lente dans le limon et une progression plus rapide dans le sable.

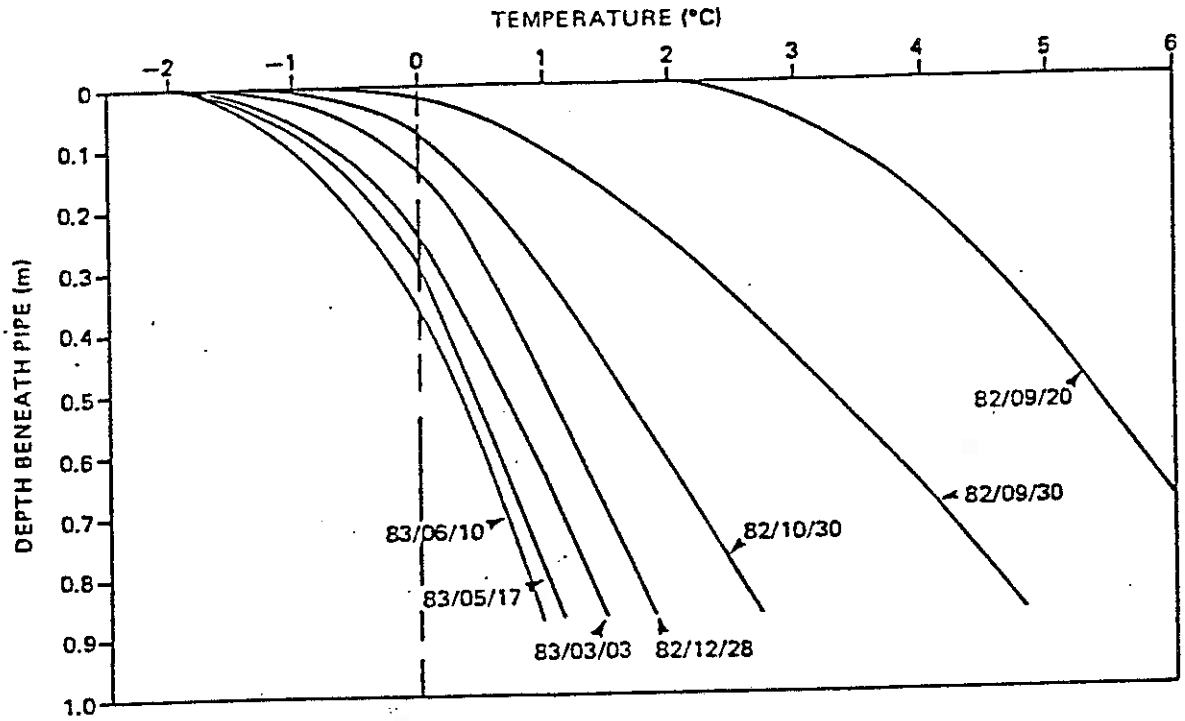

FIGURE 3.1 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA GENERATRICE INFERIEURE DE LA CANALISATION PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE GEL. LIMON SECTION BB.

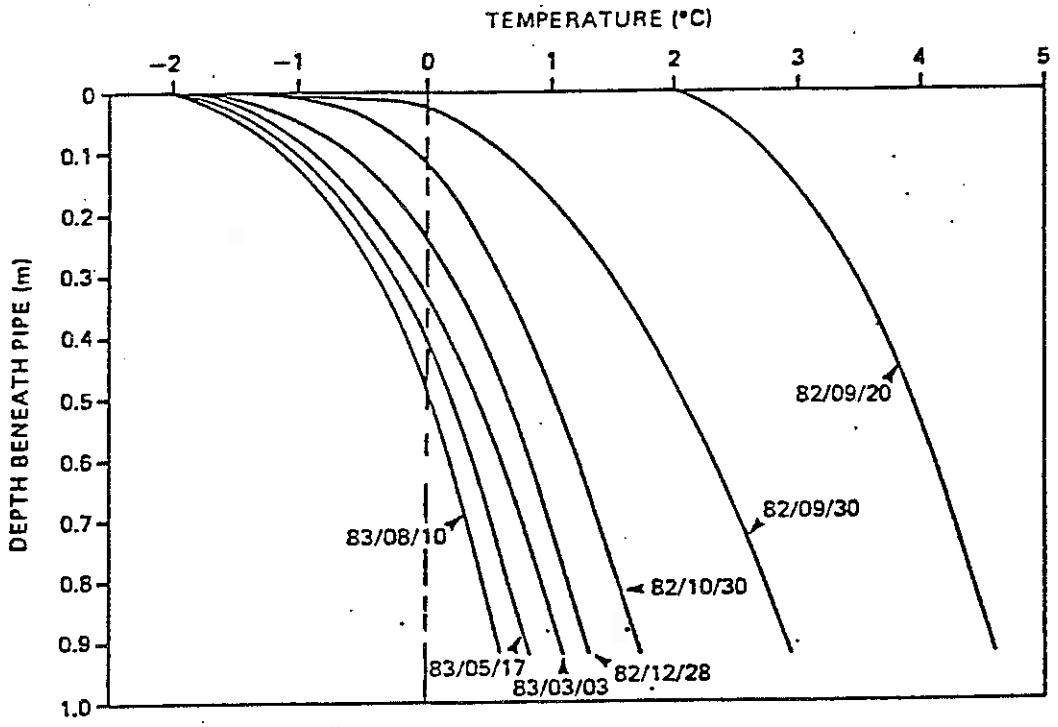

FIGURE 3.2 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA GENERATRICE INFERIEURE DE LA CANALISATION PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE GEL. SABLE SECTION AA.

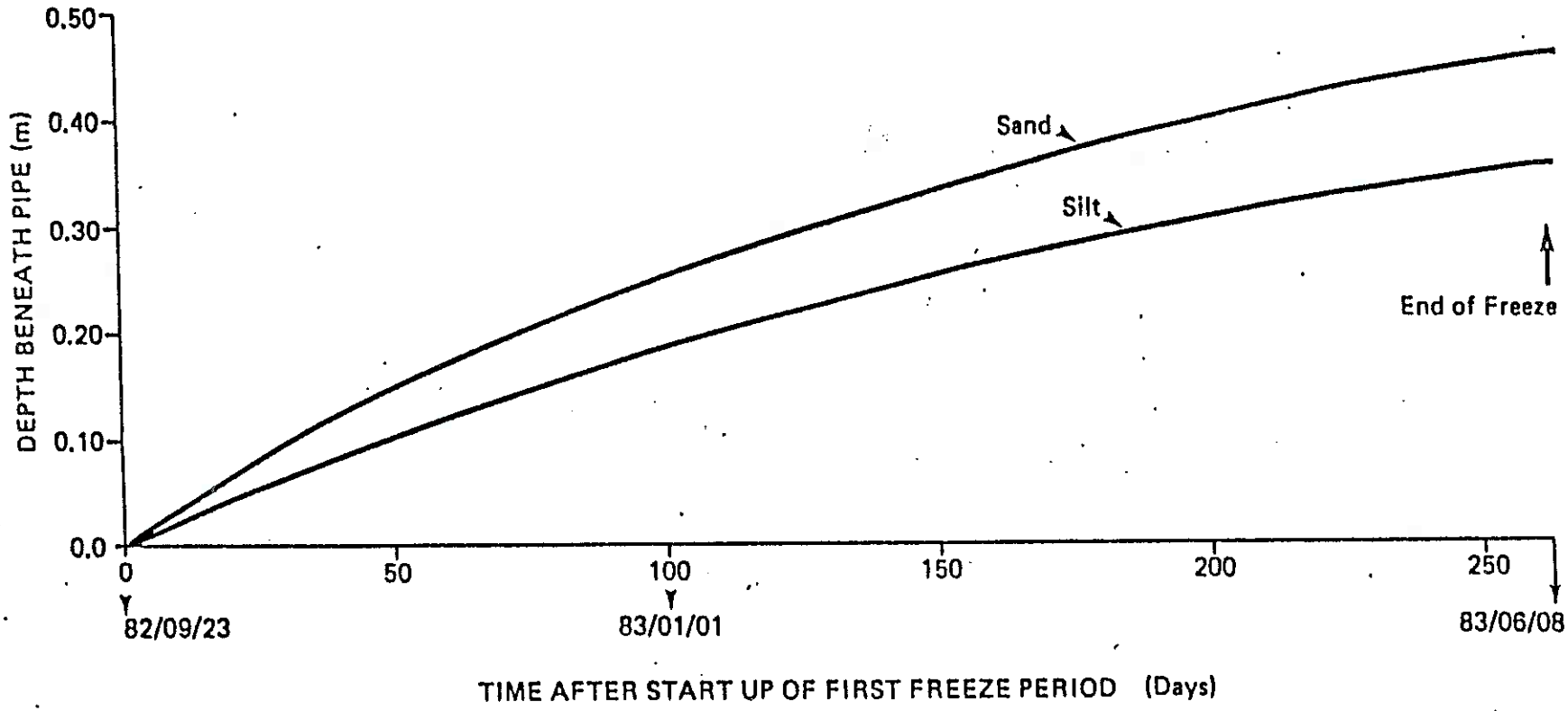

FIGURE 3.3 - EVOLUTION DU FRONT DE GEL SOUS LA GENERATRICE INFERIEURE DE LA CANALISATION PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE GEL.

3.2 - Déformation de la canalisation

La déformation de la canalisation commença durant les premières semaines de la première période de gel lorsqu'un gonflement différentiel entre le limon et le sable commença à apparaître. Comme le montre la figure 3.4, la canalisation a subi un déplacement vers le haut dans les deux sols, avec une déformation apparaissant dans la zone de transition entre les sols.

La détermination de l'état de contrainte au sein de la canalisation a été effectuée par application de la procédure exposée dans le rapport Geotechnical Science Laboratories 1982. La représentation de la contrainte au sein de la canalisation à quatre instants au cours de la période de gel est fournie sur la figure 3.5. Il est estimé qu'une contrainte maximale d'environ 115 MPa, correspondant à 50% de la limite élastique approximativement, a été atteinte au sein de la canalisation vers la fin de la première période de gel. Une analyse préliminaire et une modélisation de la distribution des contraintes dans la canalisation au cours de la première période de gel ont été entreprises dans le cadre d'une thèse (M. Sc.) effectuée à l'Ecole Polytechnique de Montréal (Lemaire, 1983).

3.3 - Gonflement au gel des sols

Le mouvement relatif de la surface des deux sols durant la première période de gel est fourni sur les figures 3.6 à 3.8 qui sont une série de cartes de lignes de niveau fournissant le gonflement réel. Ces graphiques illustrent la forme ondulée prise par la surface des deux sols et font apparaître un gonflement grossièrement symétrique par rapport à l'axe de la canalisation.

Les observations effectuées au moyen des tubes téléscopiques de gonflement montrent que ces derniers ont fonctionné de manière satisfaisante et que les gonflements relevés sont en bonne concordance avec les profondeurs de gel atteintes. La profondeur maximale atteinte par le gel dans le limon ayant été d'environ 35 cm seulement, relativement peu d'observations peuvent être utilisées pour évaluer la contrainte susceptible d'être atteinte dans le sol déjà gelé.

...

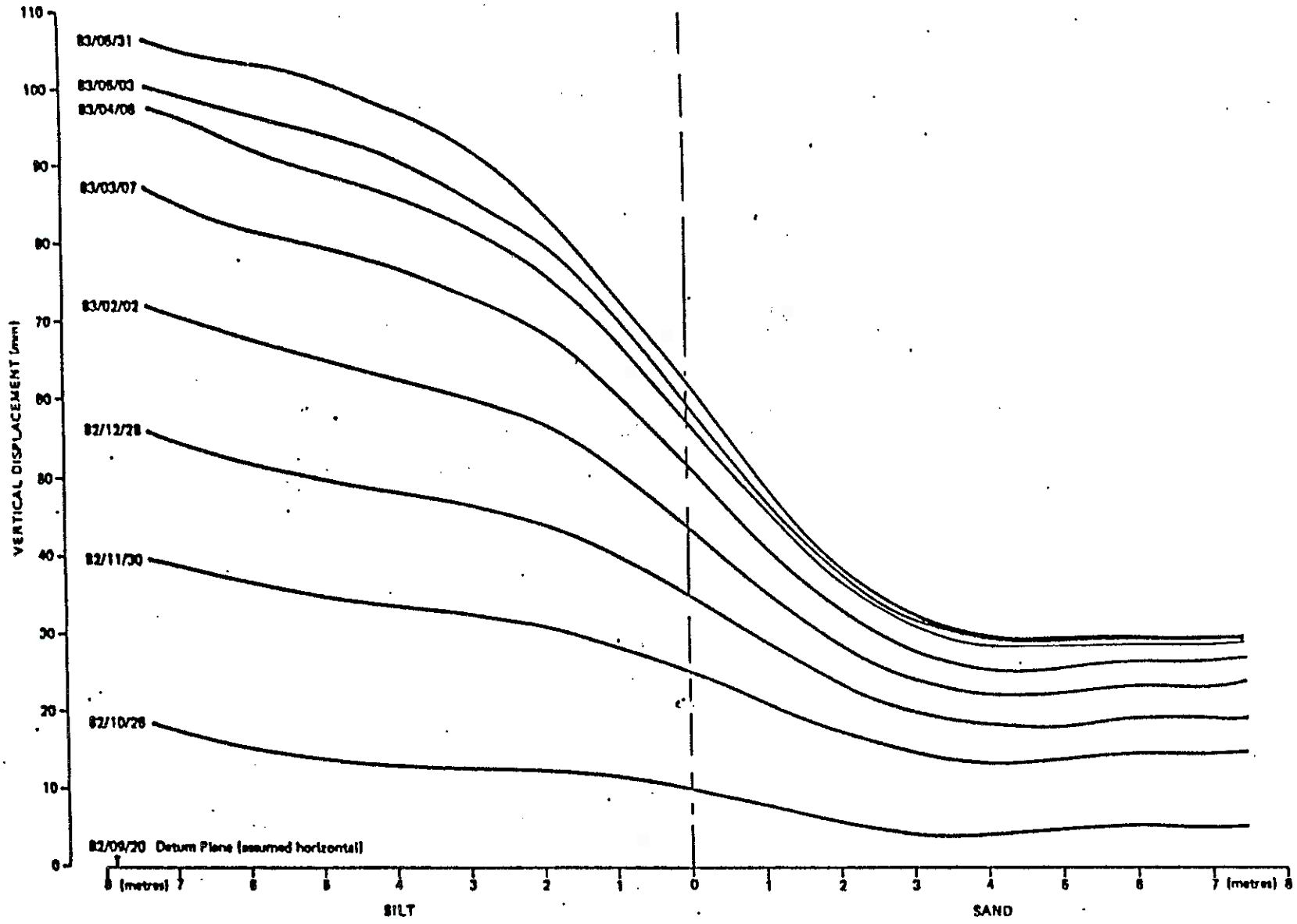

FIGURE 3.4 - DEFORMATION DE LA CANALISATION MESUREE PAR LE DEPLACEMENT DE TIGES FIXEES SUR L'AXE DE LA CANALISATION DU 82/09/20 AU 83/06/07.

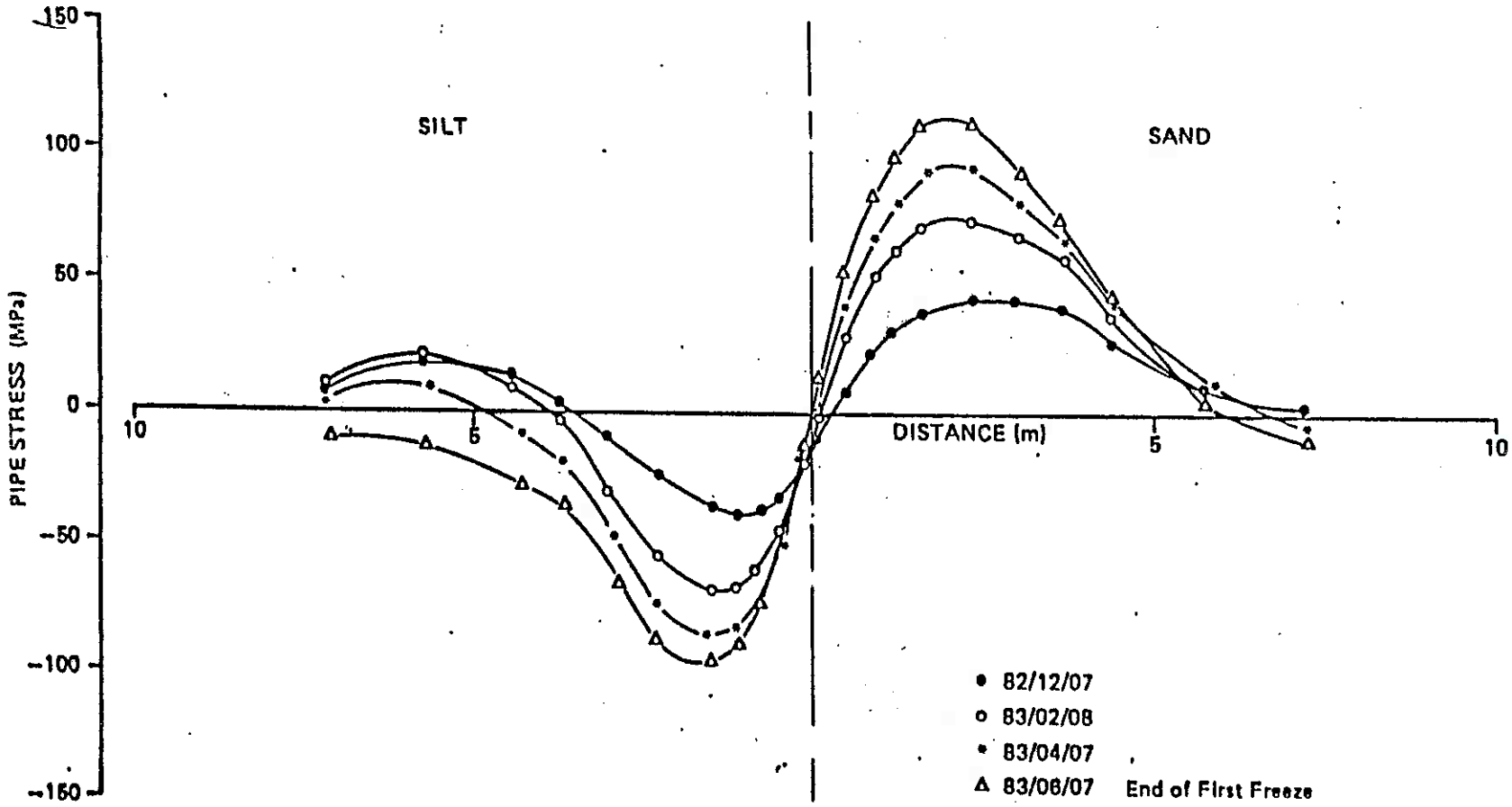

FIGURE 3.5 - DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION DANS LA CANALISATION PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE GEL.
(Calculée d'après les lectures sur les jauges de contrainte).

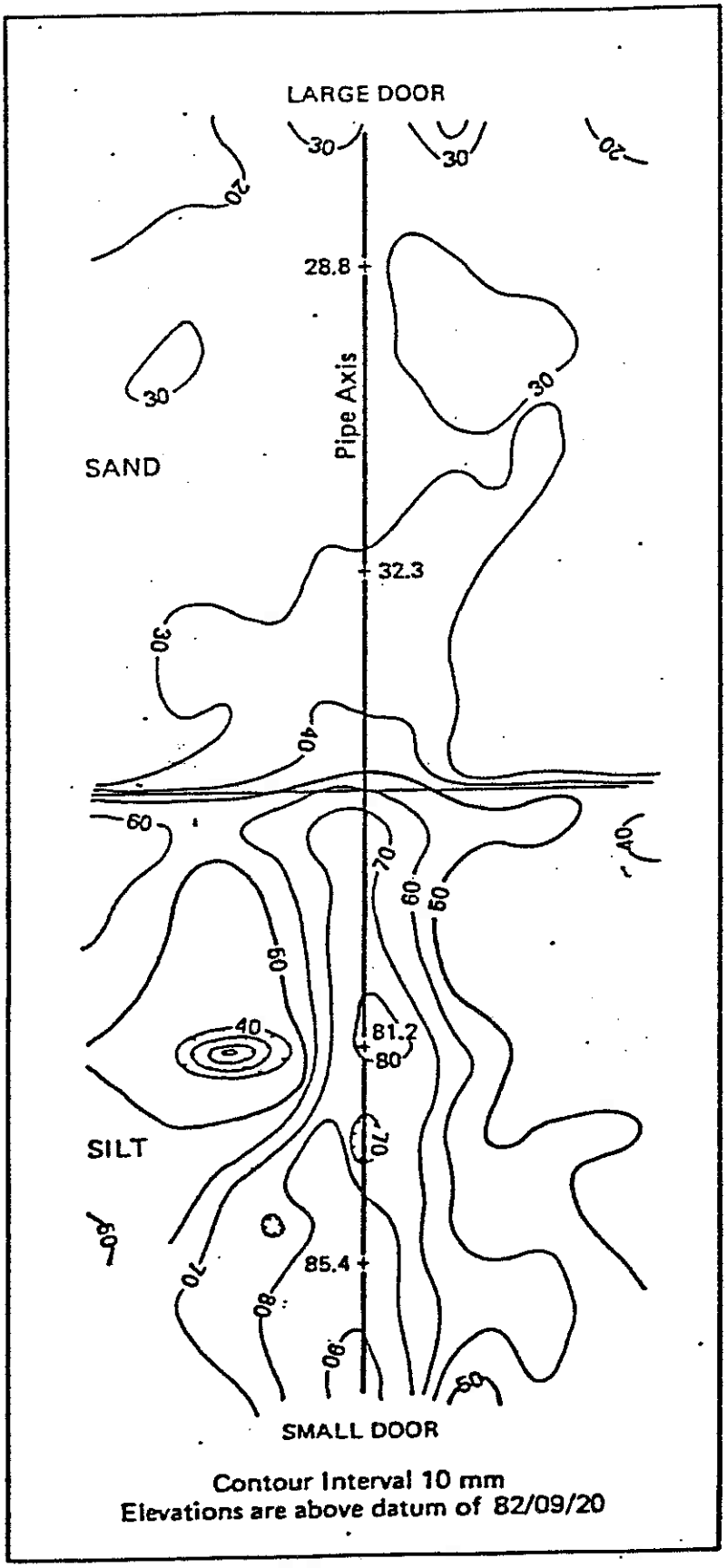

FIGURE 3.6 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL, 83/01/05.

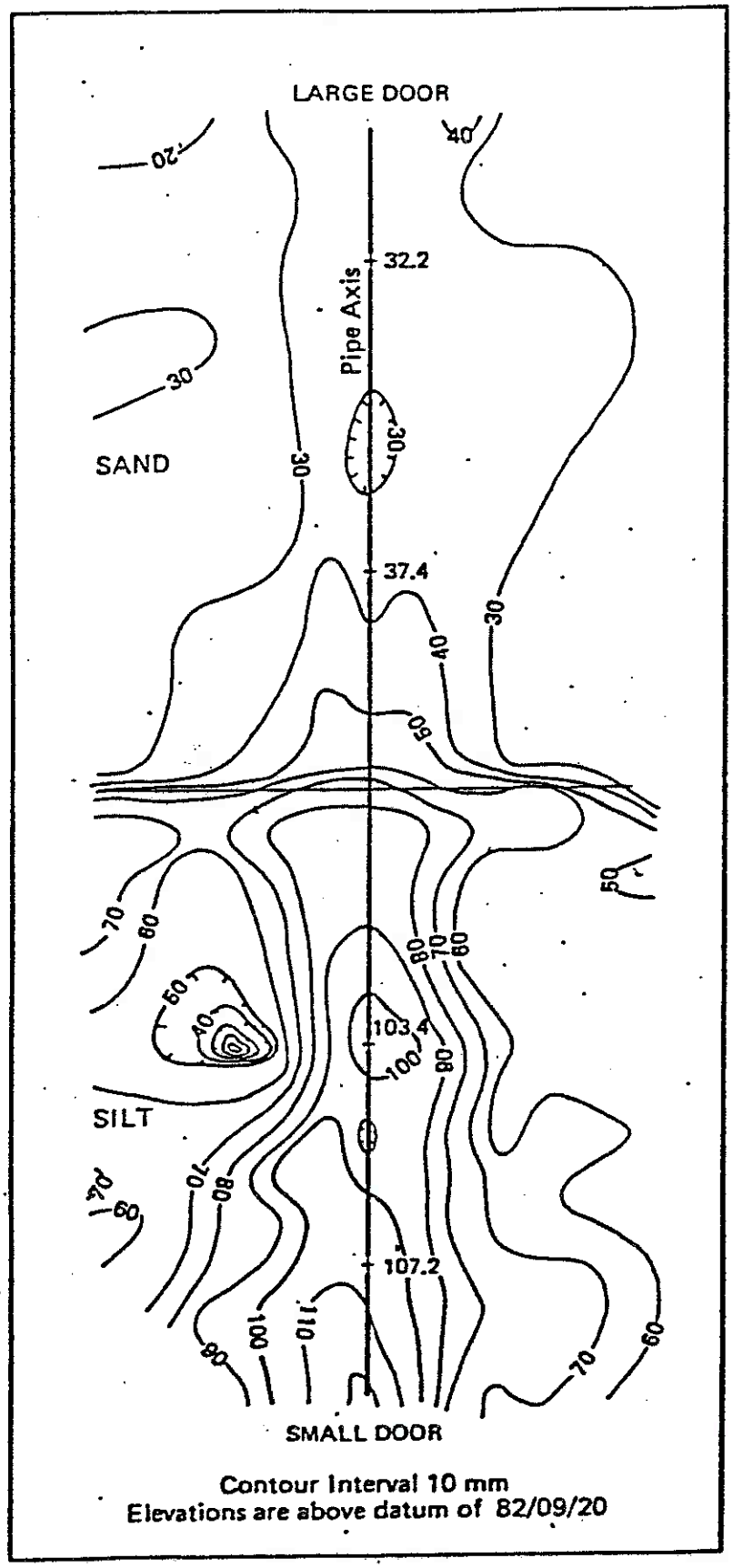

FIGURE 3.7 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL, 83/03/08.

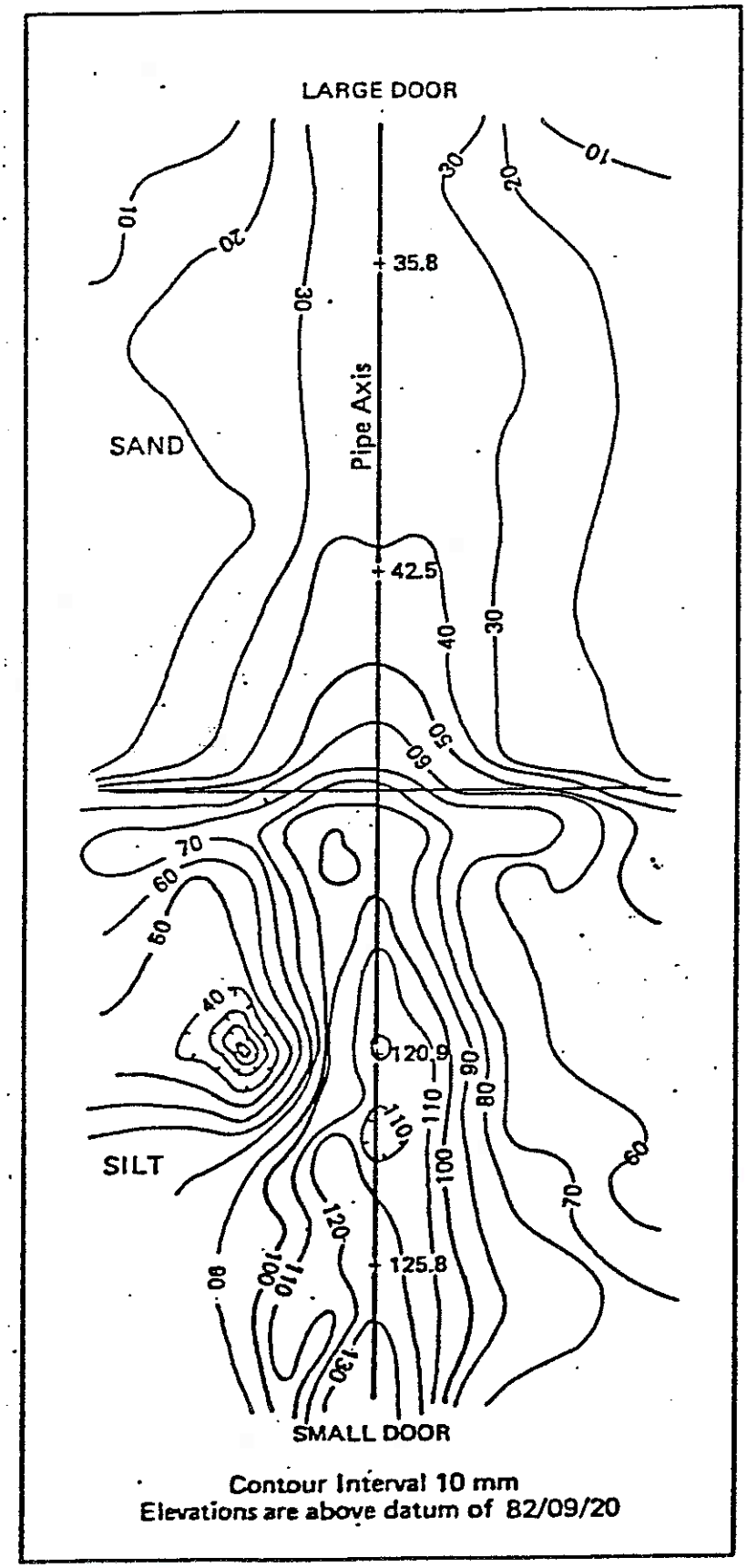

FIGURE 3.8 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL, 83/06/07.
FIN DE LA PREMIERE PERIODE DE GEL.

3.4 - Pression totale induite dans le sol

Une série de cellules de pression Glotzl a permis de suivre l'état de pression totale du sol au voisinage de la canalisation. Les figures 3.9 et 3.10 montrent l'évolution de la composante verticale de la pression totale mesurée au moyen des 6 cellules situées initialement à 46 cm au-dessous de la canalisation. Chaque figure fournit l'état de pression initiale du sol avant gel ainsi que la variation de cette pression illustrée par la zone hachurée. Le profil en long correspondant de la canalisation a été reporté sur ces figures pour aider à l'interprétation.

Théoriquement, l'état de pression initiale sous la canalisation avant le gel devrait dépendre seulement de la charge située au-dessus et devrait être constante le long de l'axe de la canalisation, avec toutefois une petite variation due à la différence de densité entre le sable et le limon. En fait, les valeurs initiales sont quelque peu dispersées, surtout dans le sable. Ceci peut être attribué à l'appareillage ou éventuellement à des petites contraintes de flexion dans la canalisation qui se seraient développées lors de sa mise en place. La pression totale moyenne mesurée sous la canalisation est néanmoins en bon accord avec la pression calculée à partir de la charge située au-dessus.

Après que le gel eut débuté autour de la canalisation, les pressions dans le sol sous la canalisation varièrent progressivement pour atteindre les valeurs données sur la figure 3.10. On voit sur cette figure que la pression maximale de gonflement dans le limon n'a été mesurée par aucune des cellules Glotzl mais que ce maximum a dû se produire tout près de la séparation entre le sable et le limon. De même une diminution de la pression totale se serait produite dans le sable adjacent. Les augmentation et diminution de pression totale sous les extrémités de la canalisation dans le sable et le limon respectivement peuvent être attribuées à la résistance à la flexion de la canalisation d'acier.

...

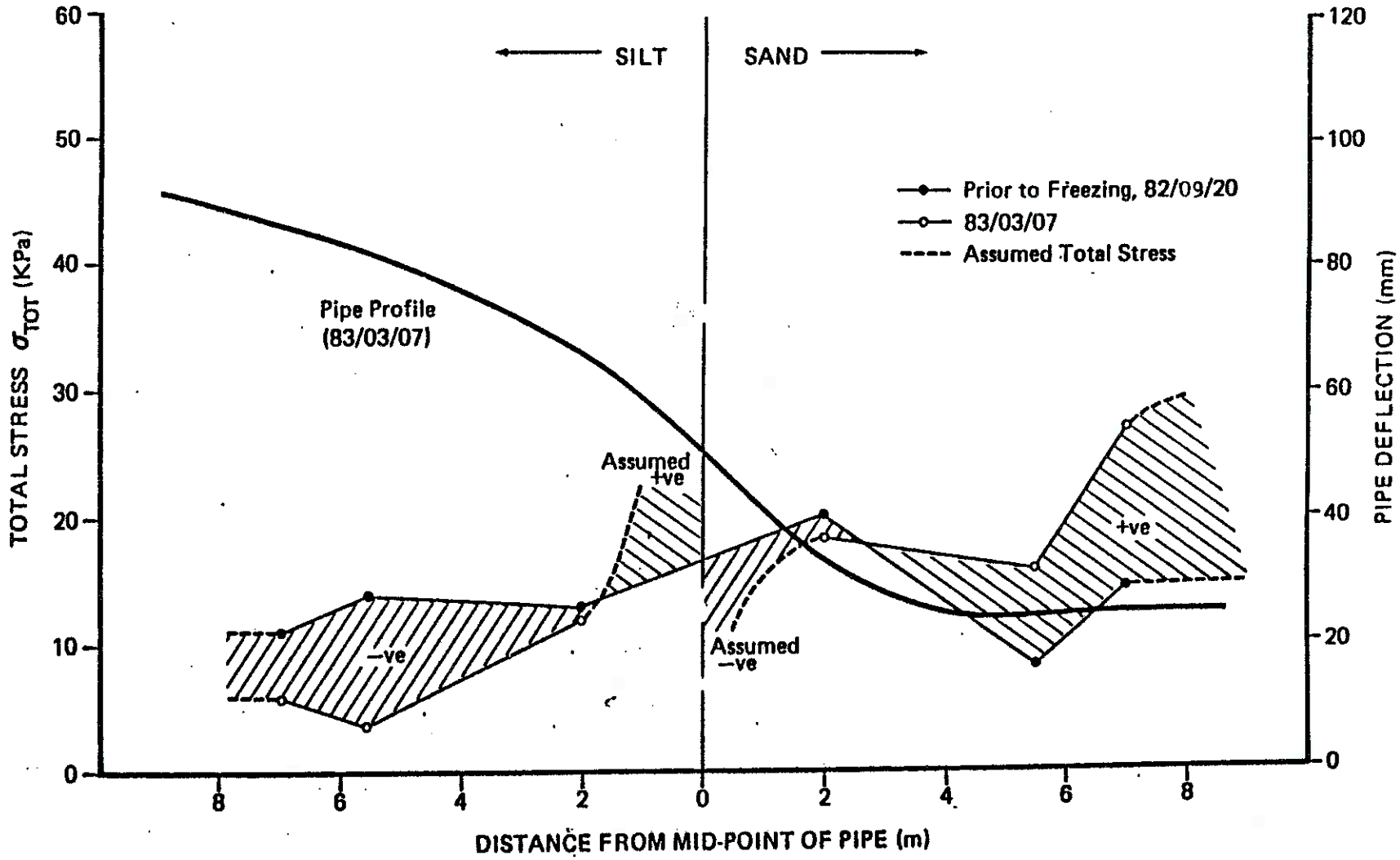

FIGURE 3.9 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE GEL (83/03/07).
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

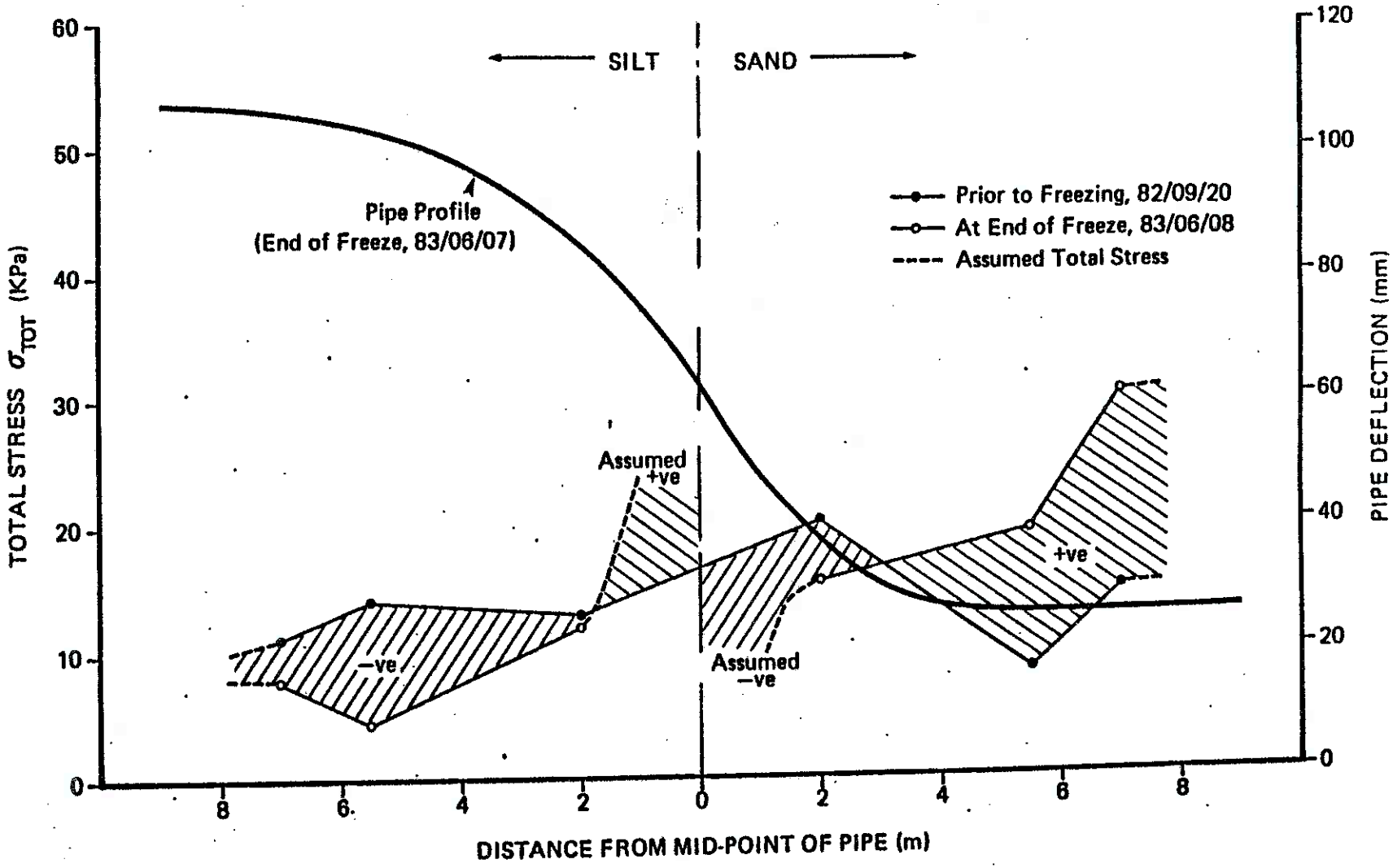

FIGURE 3.10 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION A LA FIN DE LA PREMIERE PERIODE DE GEL (83/06/08).
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

4 - OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PERIODE DE DEGEL

4.1 - Généralités

A partir du début de la période de dégel, la surface du sol devint très molle et boueuse, particulièrement du côté du limon. Des nattes de protection furent posées sur le sol en guise de chemins de circulation dans le but de minimiser la perturbation apportée à la surface au passage. Les thermocouples de surface furent sérieusement malmenés et durent être enlevés temporairement. Au fur et à mesure que le sol dégelait et que l'eau interstitielle antérieurement gelée revenait à l'état liquide, le niveau de la nappe phréatique tendait à remonter. Pour maintenir son niveau, comme prévu, à 90 cm en dessous de la surface, de l'eau fut régulièrement pompée à partir des 6 puits. A certains moments, la quantité d'eau pompée atteignit 240 litres par jour. Des relevés des quantités d'eau ajoutée ou enlevée ont été effectués pendant tout le cours de l'expérience.

4.2 - Régime thermique

Comme indiqué précédemment, la fiabilité d'un certain nombre de mesures thermiques effectuées pendant la période de dégel a été moindre en raison de problèmes avec le système d'acquisition de données. Cependant, les figures 4.1 et 4.2, montrant l'évolution des profils de température sous la canalisation dans le limon et le sable respectivement, ont été établies en faisant appel au faible nombre de thermistances utilisables et en procédant à la correction des anomalies au moyen des mesures par thermocouples. La précision de ces graphiques est probablement de l'ordre de ± 0,25 °C. La remontée de l'isotherme 0 °C sous la canalisation pendant le dégel est fournie sur la figure 4.3. Cette figure met en évidence la diminution de l'enveloppe de sol gelé entourant la canalisation qui est plus rapide dans le sable que dans le limon, en raison d'une teneur en glace plus faible et de la relativement plus grande conductibilité thermique du sable.

...

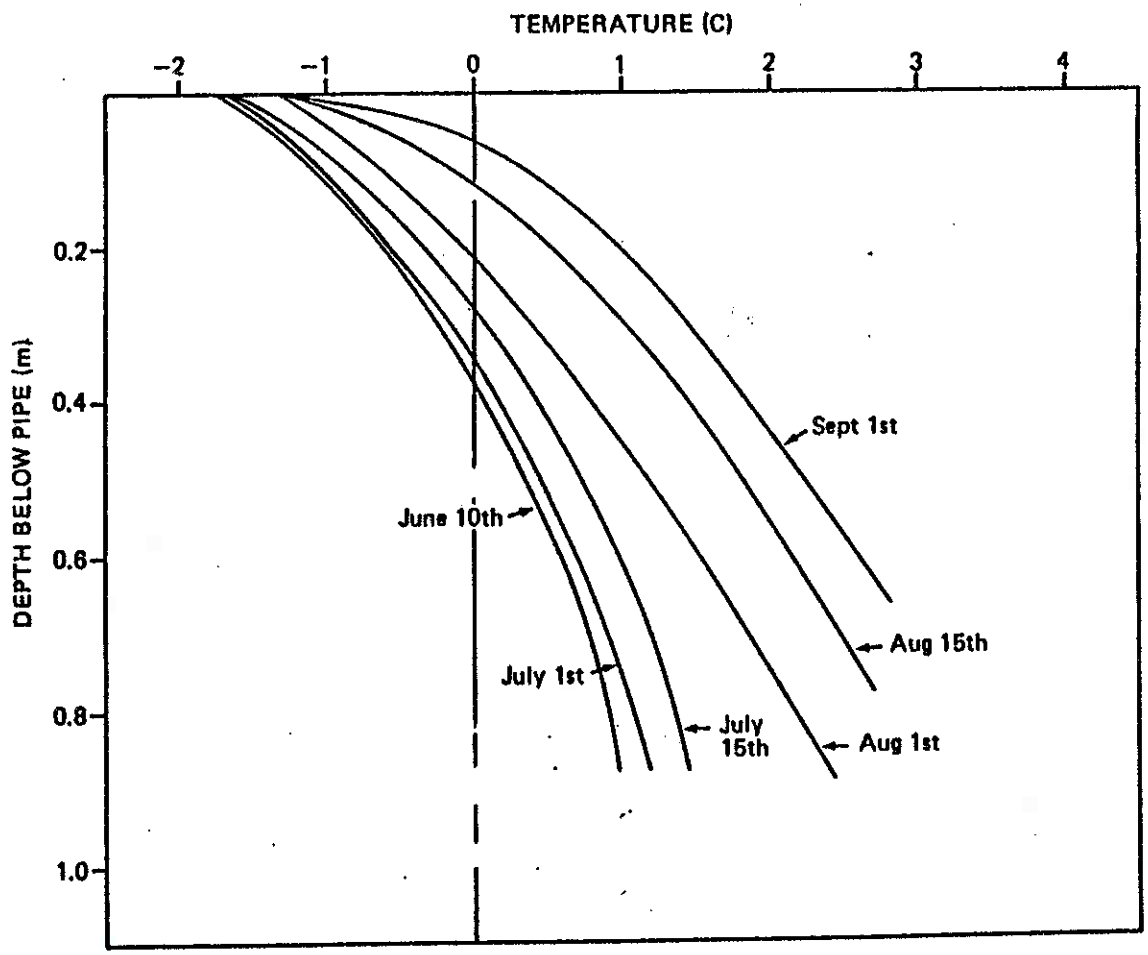

FIGURE 4.1 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE LIMON (SECTION BB) PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983.

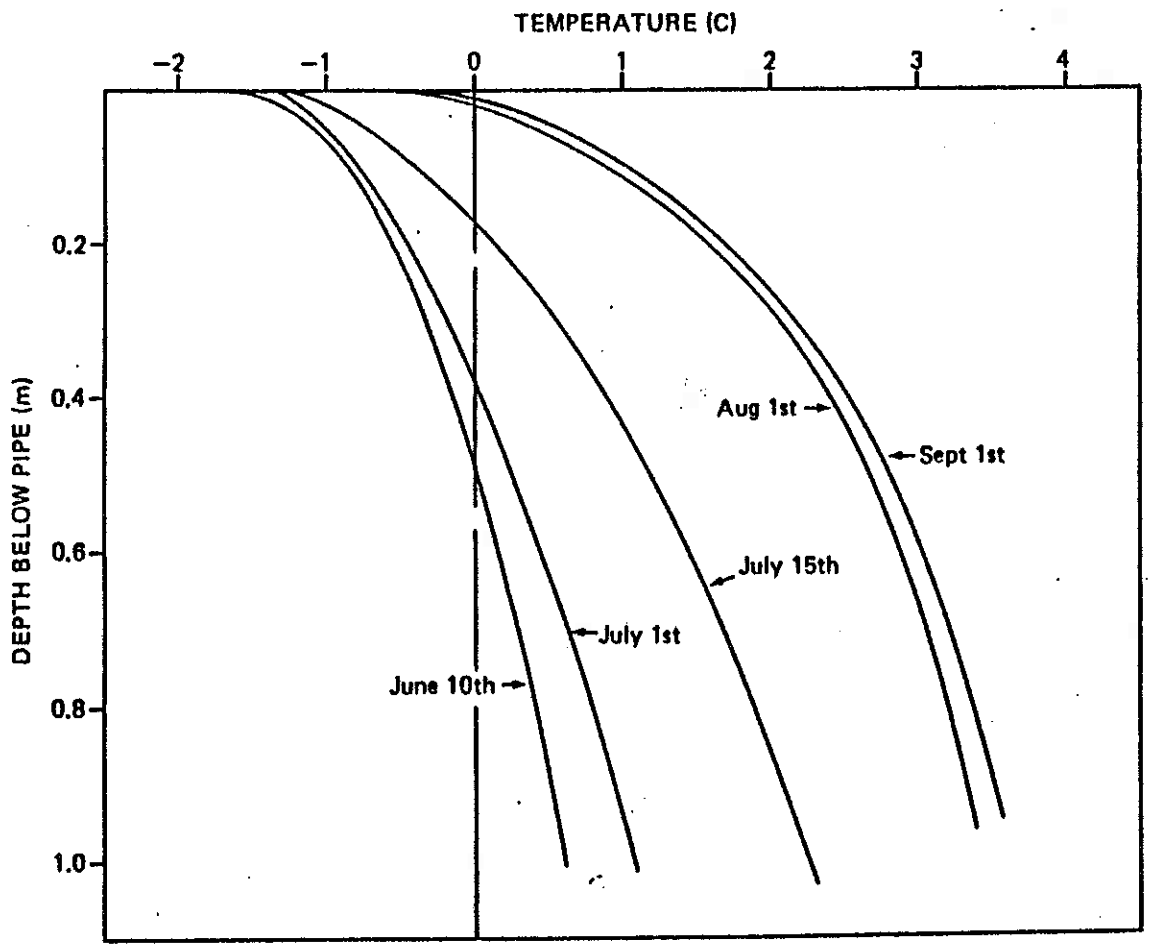

FIGURE 4.2 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE SABLE (SECTION AA) PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983.

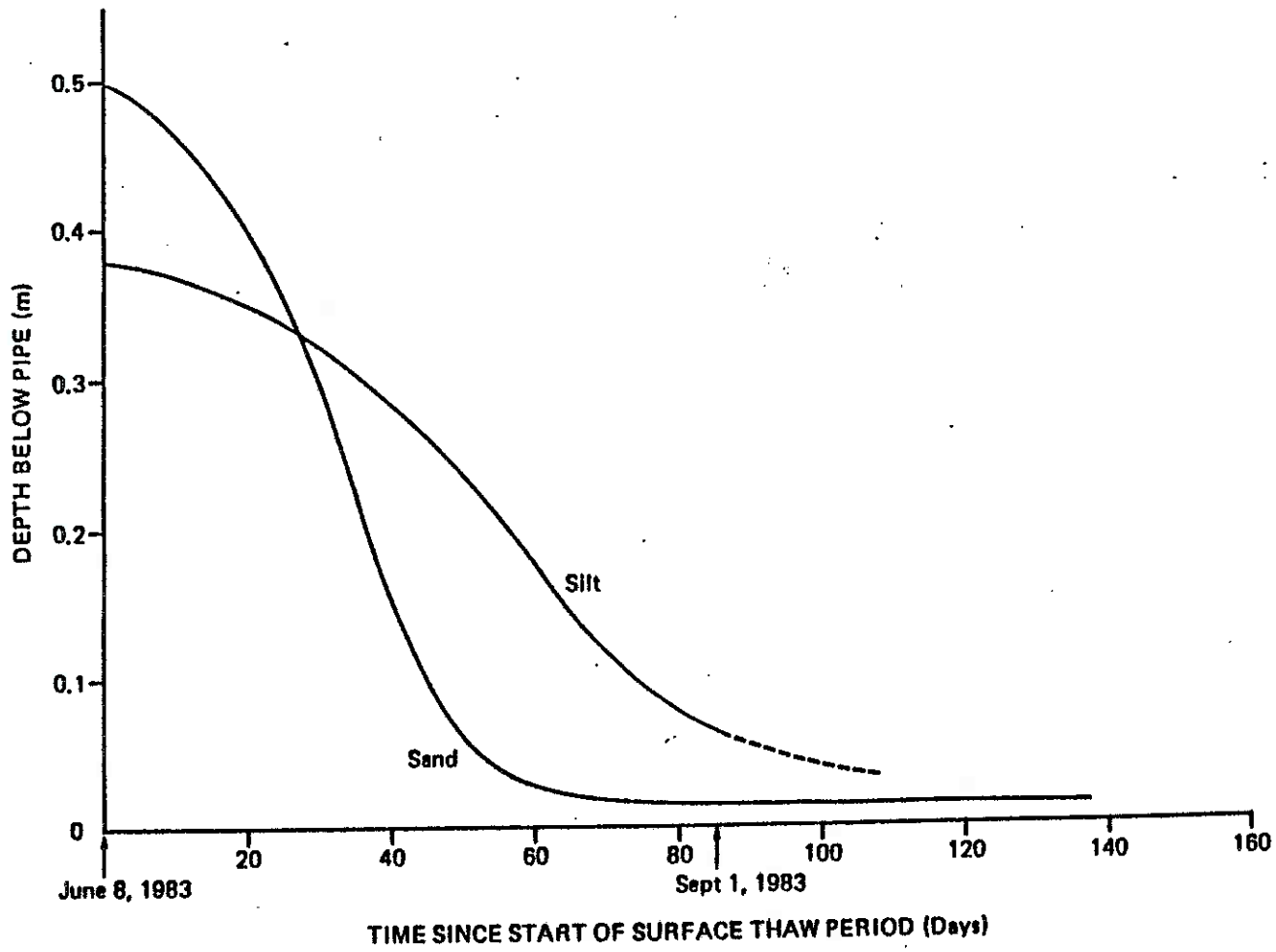

FIGURE 4.3 - RECESSION DU FRONT DE GEL SOUS LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983.

4.3 - Déformation de la canalisation

La figure 4.4 montre l'évolution du profil de la canalisation au cours de la période de dégel de l'expérience. En conformité avec les résultats de la figure 4.3, la vitesse initiale de tassement au dégel de la canalisation est beaucoup plus rapide dans le sable que dans le limon. Le soulèvement résiduel de la canalisation, à la fin de la période de dégel, est approximativement de 10 à 20 mm dans le limon et de 6 à 10 mm dans le sable.

La figure 4.5 montre la décroissance de la contrainte de flexion de la canalisation durant le dégel, mesurée au moyen d'une série de couples de jauges de contrainte montés sur l'extérieur de la canalisation. Un point intéressant à noter est l'inversion de la contrainte de flexion résiduelle entre le 4 et le 30 août 1983. Ceci coïncide avec l'inversion du sens de la courbure de la canalisation que l'on observe sur la figure 4.4 au 30 août 1983.

4.4 - Consolidation et dilatation du sol

Les figures 4.6 à 4.9 fournissent l'évolution de la surface pendant le cycle de dégel. La figure 3.8 montre qu'à la fin du cycle de gel, vers les bords de la station où la canalisation n'a aucun effet, le limon et le sable ont gonflé d'approximativement 60 à 70 mm et 20 à 30 mm respectivement. A la fin du cycle de dégel, la figure 4.9 montre que le limon est redescendu d'environ 0 à 10 mm au-dessous de son niveau d'origine. Ce tassement supplémentaire du limon peut être attribué, d'une part à un compactage de la surface en raison de quelques passages à pied pendant le dégel, d'autre part à une consolidation du limon causée par l'accroissement de contrainte effective engendrée par la pression interstitielle dans le limon gelé et en dessous du front de congélation pendant le gel.

Par contre, le sable a conservé un "gonflement" résiduel d'environ 5 à 10 mm. Ceci signifie que le sable est resté dans un état dilaté après le dégel.

Des mesures périodiques de profils de densité furent effectuées dans le sable et dans le limon au cours de l'expérience, en utilisant un appareillage

...

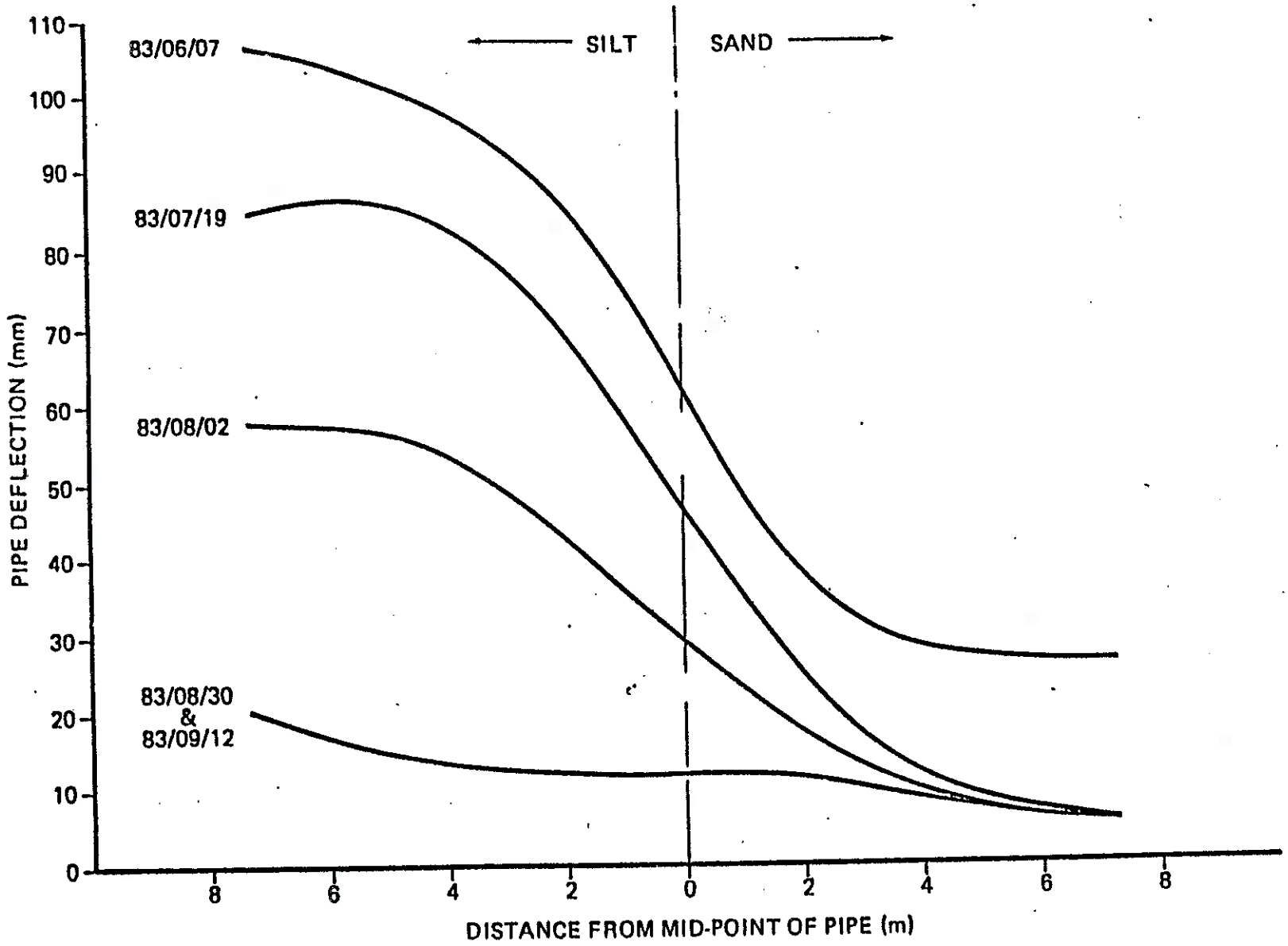

FIGURE 4.4 - EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DE LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE.

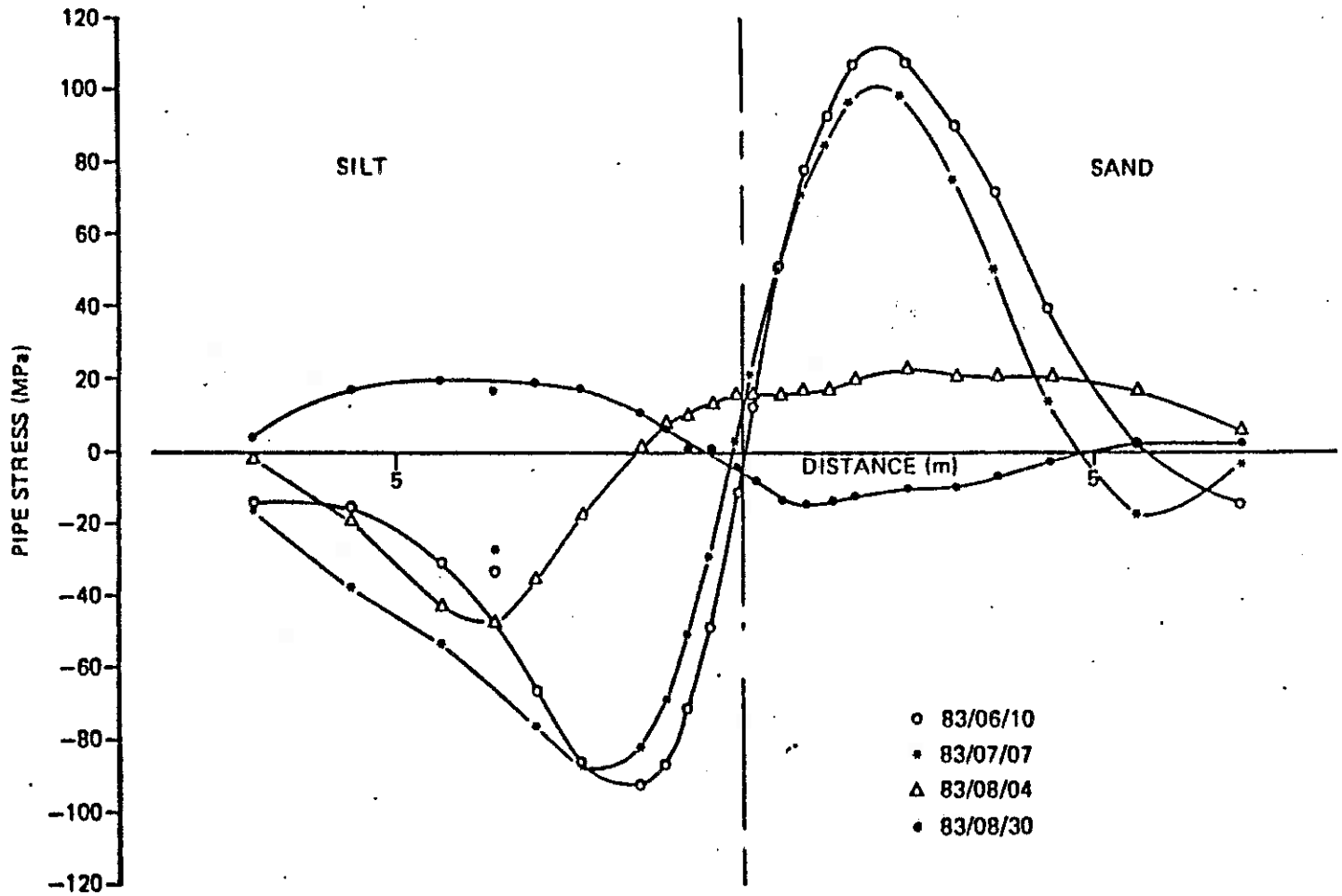

FIGURE 4.5 - DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION DE LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE.
(Calculée à partir des lectures des jauges de contrainte).

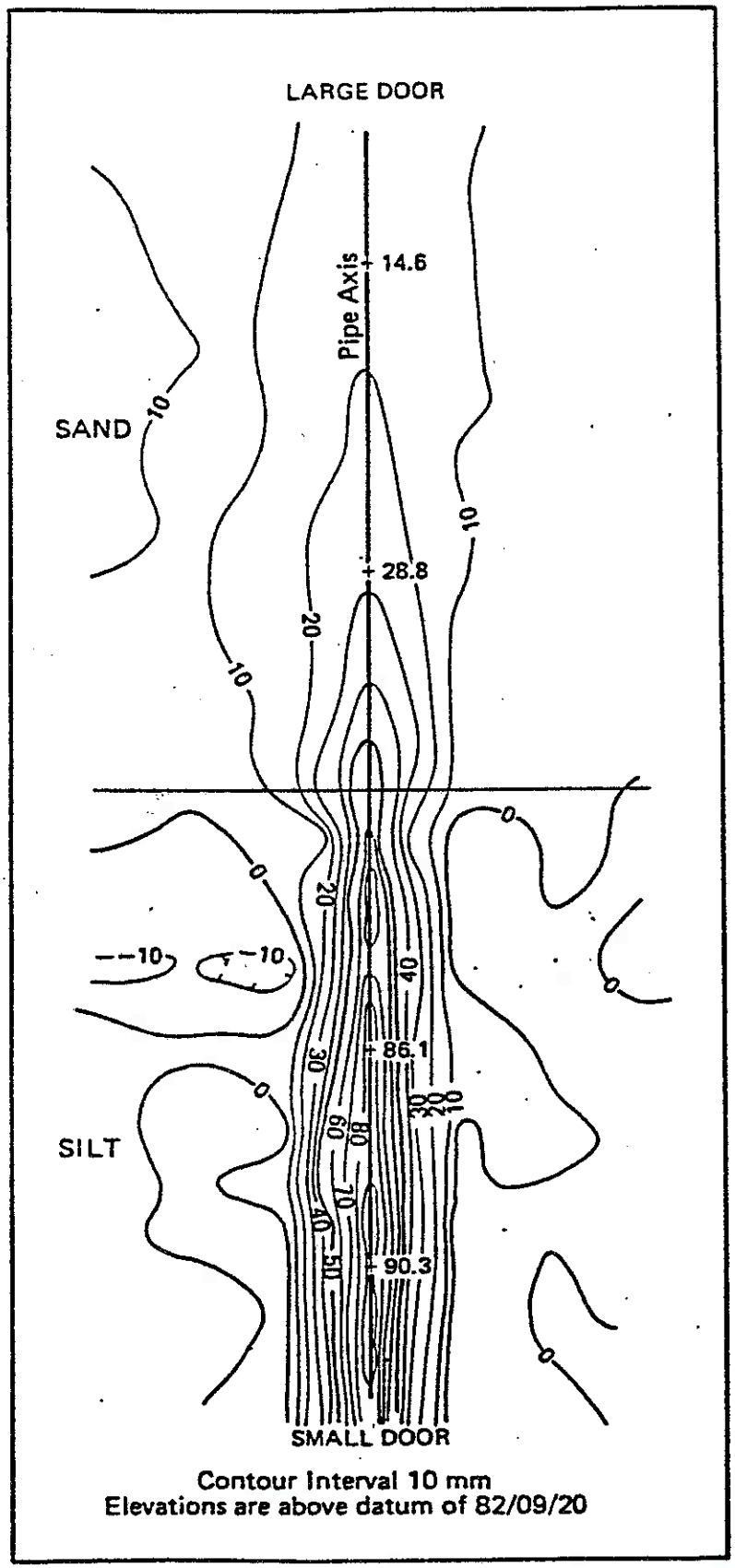

FIGURE 4.6 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
5 SEMAINES APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/07/12.

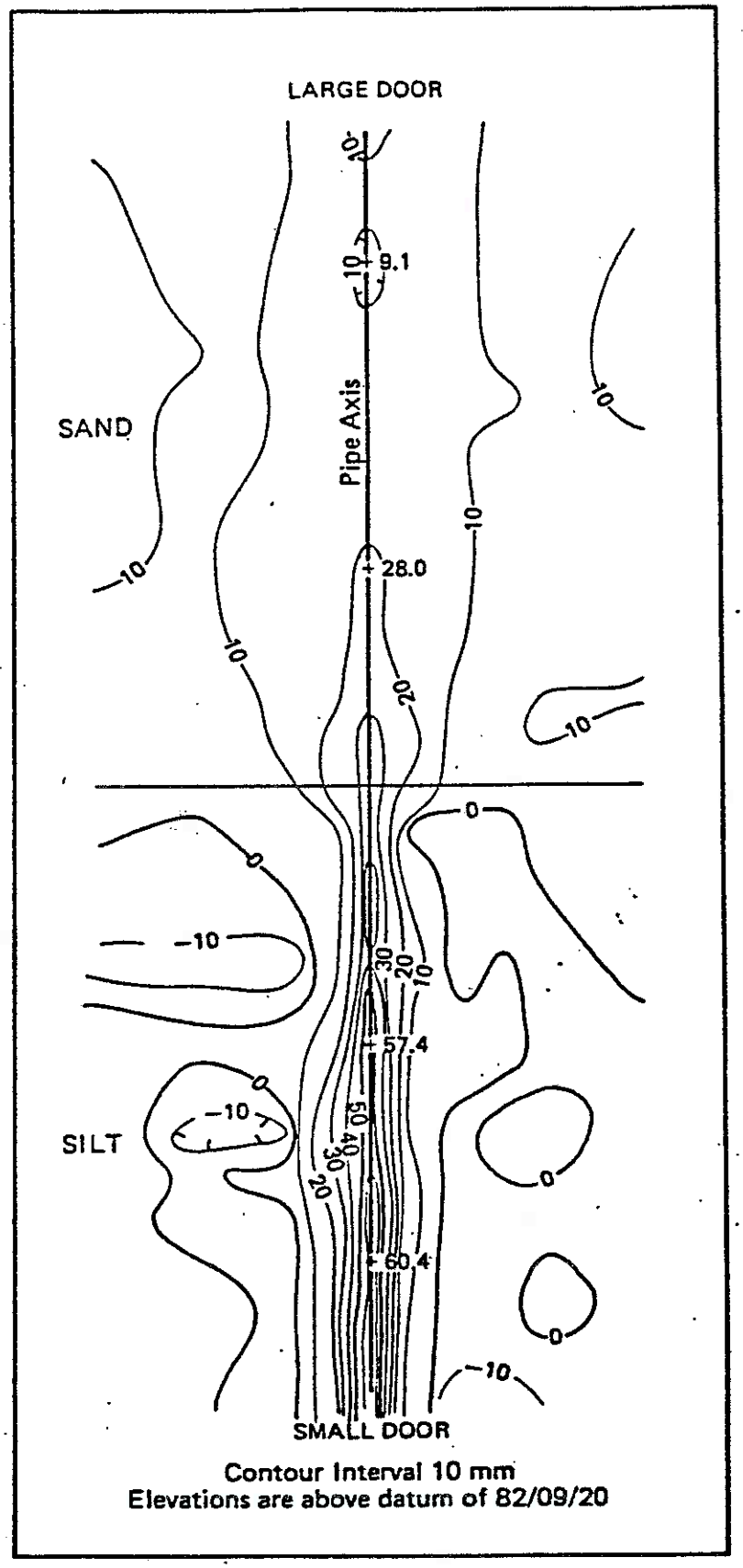

FIGURE 4.7 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
7 SEMAINES APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/07/26.

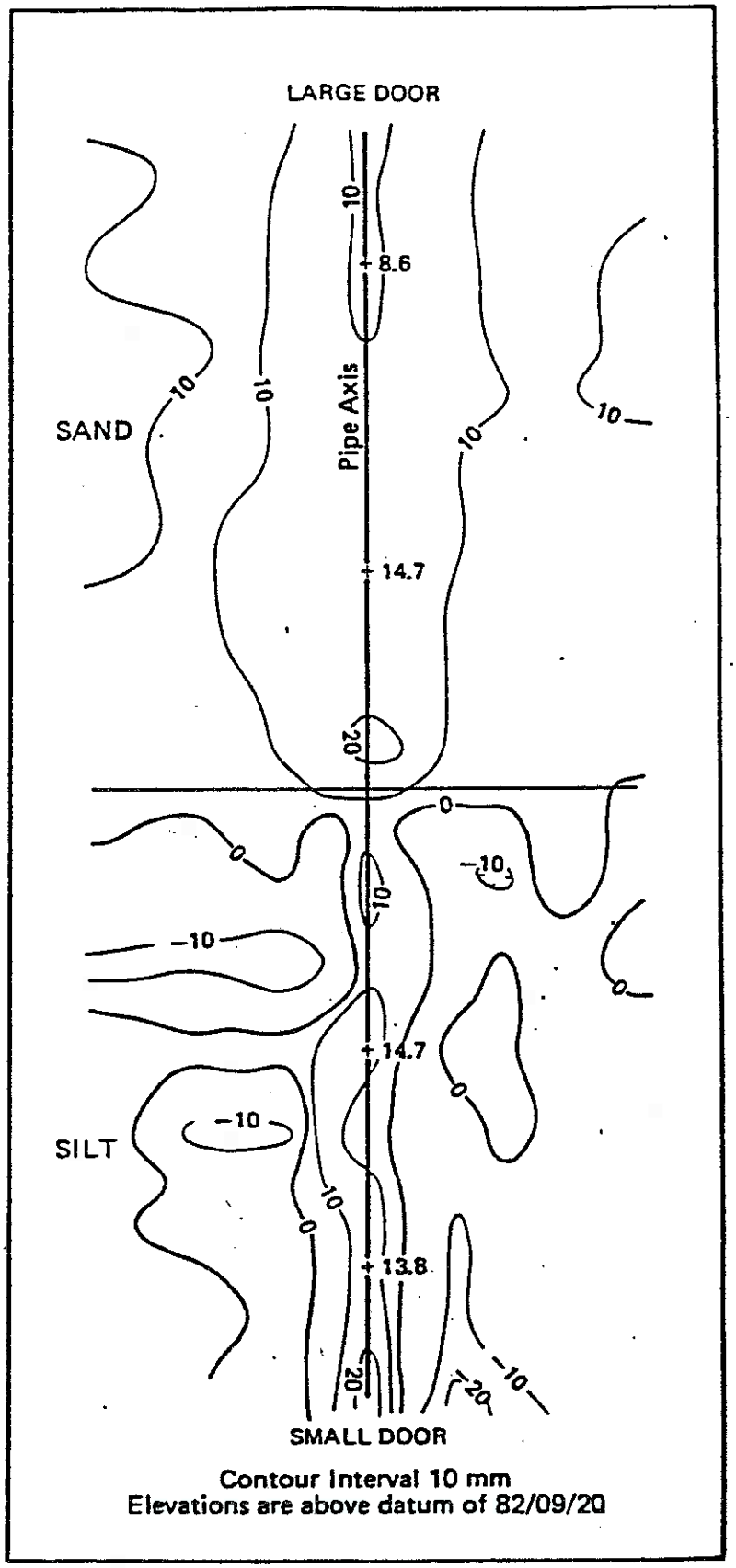

FIGURE 4.8 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
11 SEMAINES APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/08/23.

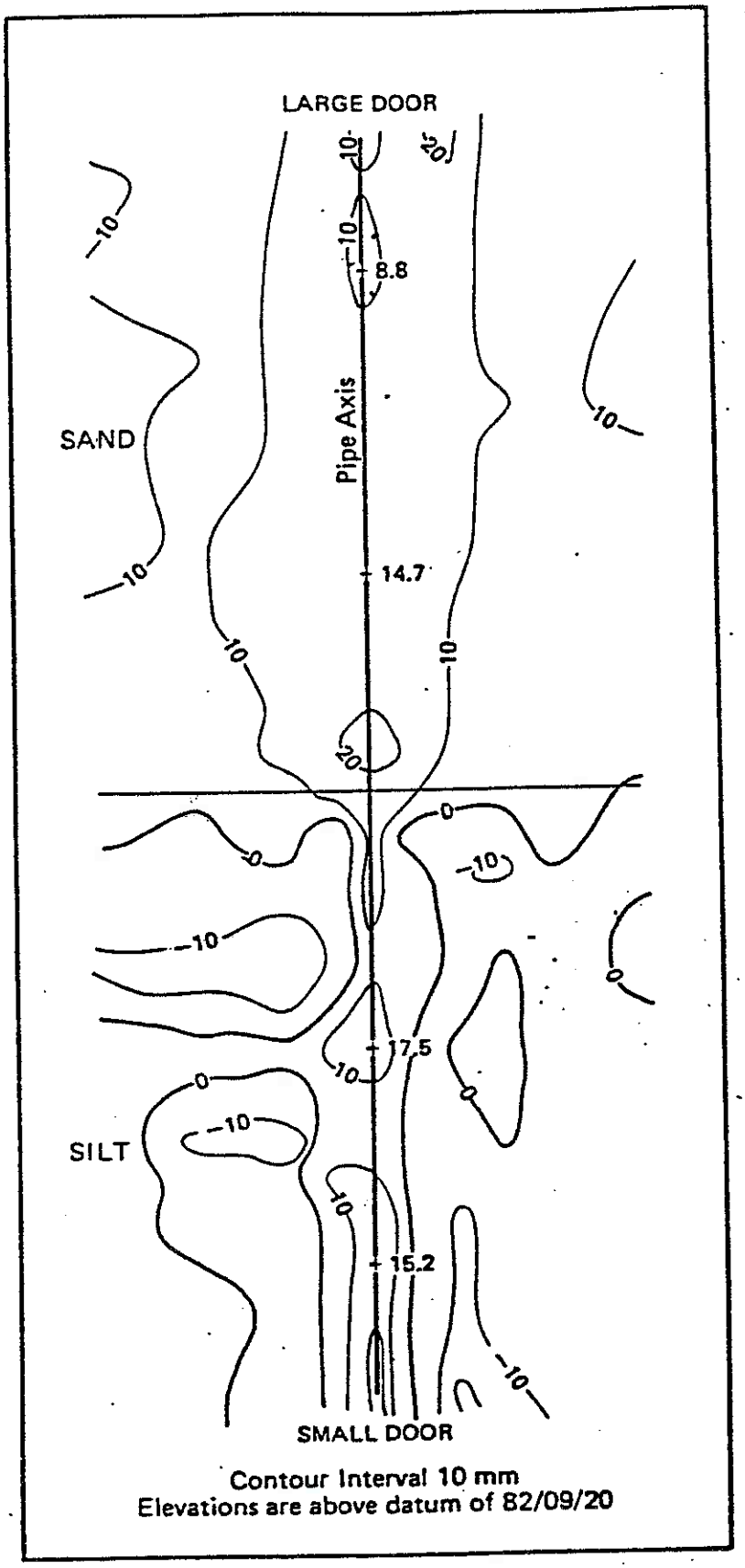

FIGURE 4.9 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
14 SEMAINES APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/09/12.

français à rayonnement gamma désigné sous le nom de "double-sonde". Comme l'ensemble de ces résultats n'a pas encore été dépouillé, ils ne sont pas présentés ici. On espère toutefois que cette information permettra de connaître le degré de consolidation et/ou de dilatation ainsi que les épaisseurs concernées.

4.5 - Pression totale induite dans le sol

L'évolution de la composante verticale de la pression totale dans le sol au cours de la période de dégel est donnée par les figures 4.10 et 4.11. Les valeurs de pression totale ont été déterminées à partir de 6 cellules de pression Glotzl situées initialement à 46 cm en dessous de la canalisation. Ces figures indiquent qu'il y a eu une décroissance générale de la pression totale pendant la période de dégel, ce qui est le reflet de la relaxation de la canalisation. Comme pour les figures fournissant les contraintes de la canalisation, on observe une inversion de la pression totale entre le 15 juillet et le 31 août 1983.

5 - OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - DEUXIEME PERIODE DE GEL

5.1 - Généralités

La seconde période de gel a débuté le 17 octobre 1983 et il est prévu de la poursuivre jusqu'au courant de l'été 1984. Cette phase de l'expérience se déroulant au moment de la rédaction du présent rapport, les résultats présentés dans cette partie ne sont que des résultats préliminaires.

5.2 - Régime thermique

La modification apportée au système d'acquisition de données se révèle avoir accru d'une manière significative la précision des mesures de température dans les sols. L'évolution des profils de température sous la canalisation dans le limon et dans le sable est fournie par les figures 5.1 et 5.2. La profondeur de pénétration de l'isotherme 0 °C est donnée sur la figure 5.3.

...

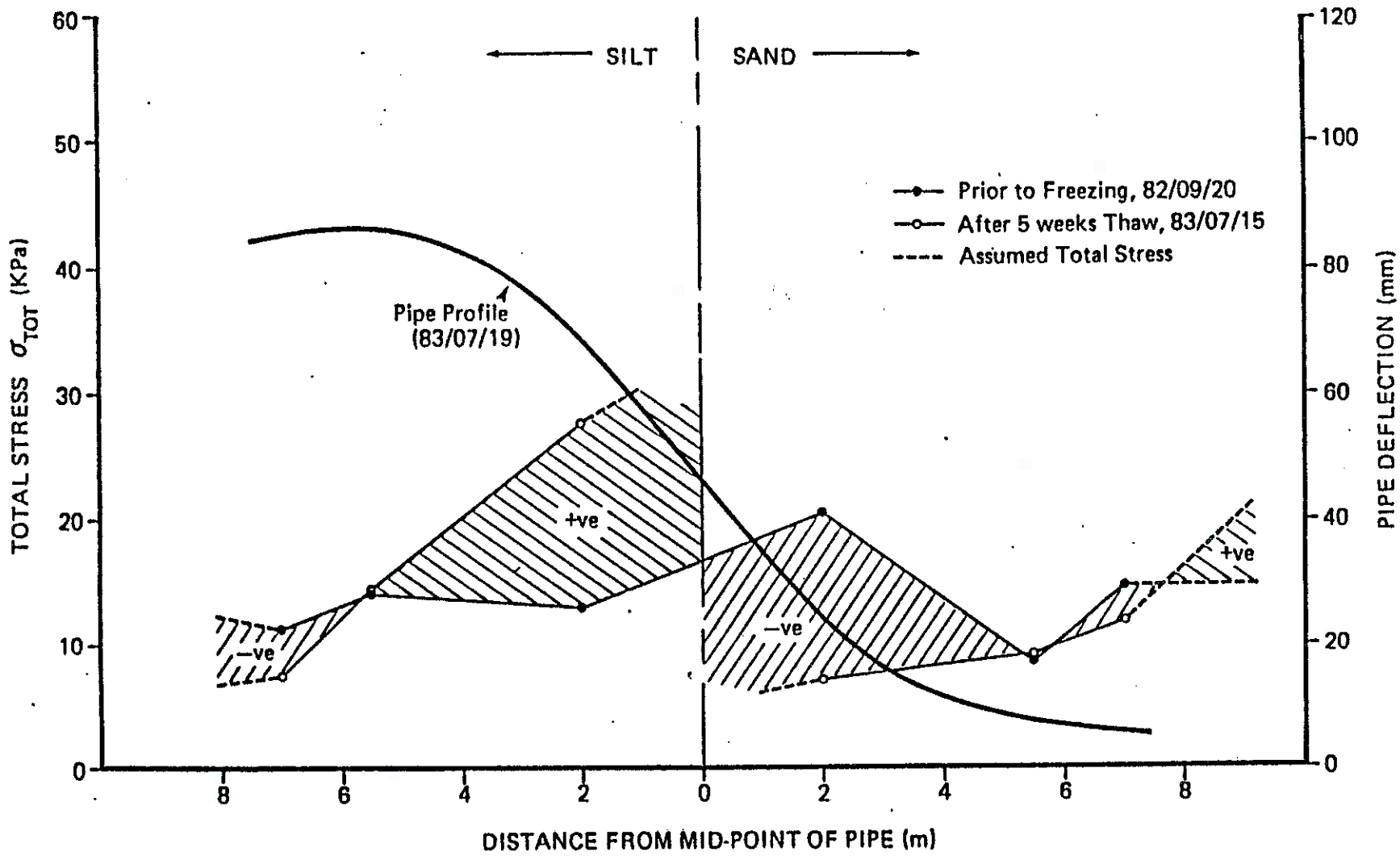

FIGURE 4.10 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION APRES 5 SEMAINES DE DEGEL DE SURFACE
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

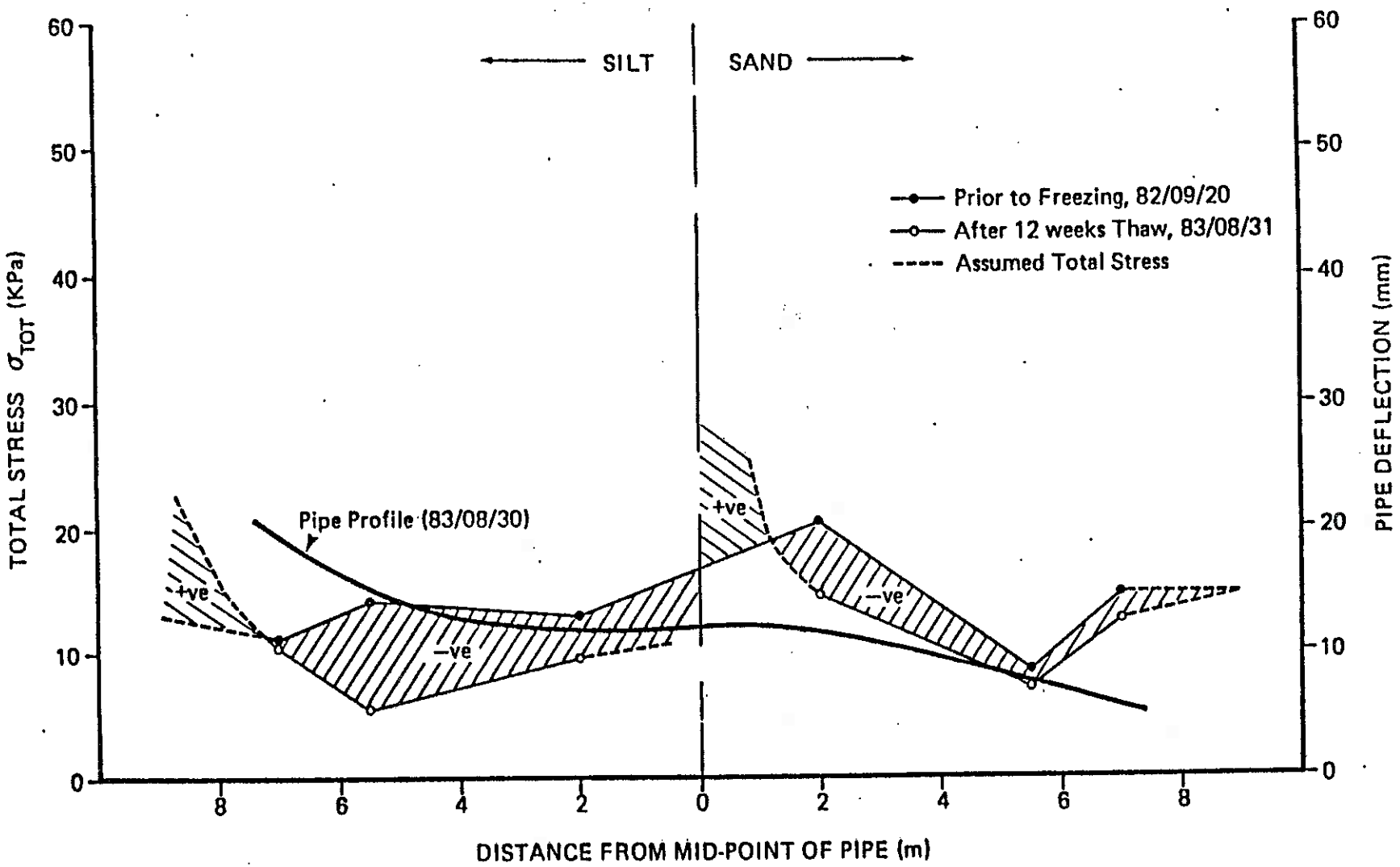

FIGURE 4.11 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION APRES 12 SEMAINES DE DEGEL DE SURFACE.
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

Elle montre que le choix d'une température plus basse de la canalisation, pour le second cycle de gel, a conduit à une augmentation significative de la vitesse de pénétration du front de gel comparée à celle de la première période de gel. En une durée de moins de 60 jours au cours de ce second cycle de gel, avec une température dans la canalisation de - 5 °C , la profondeur atteinte par le front de gel est supérieure à celle obtenue au cours des 250 jours qu'a duré la première période de gel.

5.3 - Déformation de la canalisation

Le déplacement et la déformation de la canalisation se sont produits d'une manière similaire à ce qui a été observé au cours de la première période de gel. Cependant, le taux de gonflement et l'élévation de la contrainte de la canalisation sont plus importants. La figure 5.4 montre l'évolution du profil de la canalisation et la figure 5.5 l'augmentation de la contrainte dans la canalisation depuis le début de la seconde période de gel.

5.4 - Soulèvement de la surface des sols

Le mouvement relatif de la surface des deux sols au cours des premiers mois de la seconde période de gel est donné sur les figures 5.6 et 5.7. Les lignes de niveau tracées sur ces figures fournissent le gonflement obtenu depuis le début de la seconde période de gel.

5.5 - Pression totale induite dans le sol

L'évolution de la composante verticale de la pression totale dans le sol au cours des premiers mois de la seconde période de gel est donnée sur les figures 5.8 et 5.9. Ces résultats ont été obtenus au moyen de 6 cellules de pression Glotzl enterrées dans les deux sols à une profondeur initiale de 46 cm au dessous de la canalisation.

On remarque une tendance similaire à celle observée au cours de la première période de gel. Près de l'interface sable-limon apparaît une pression

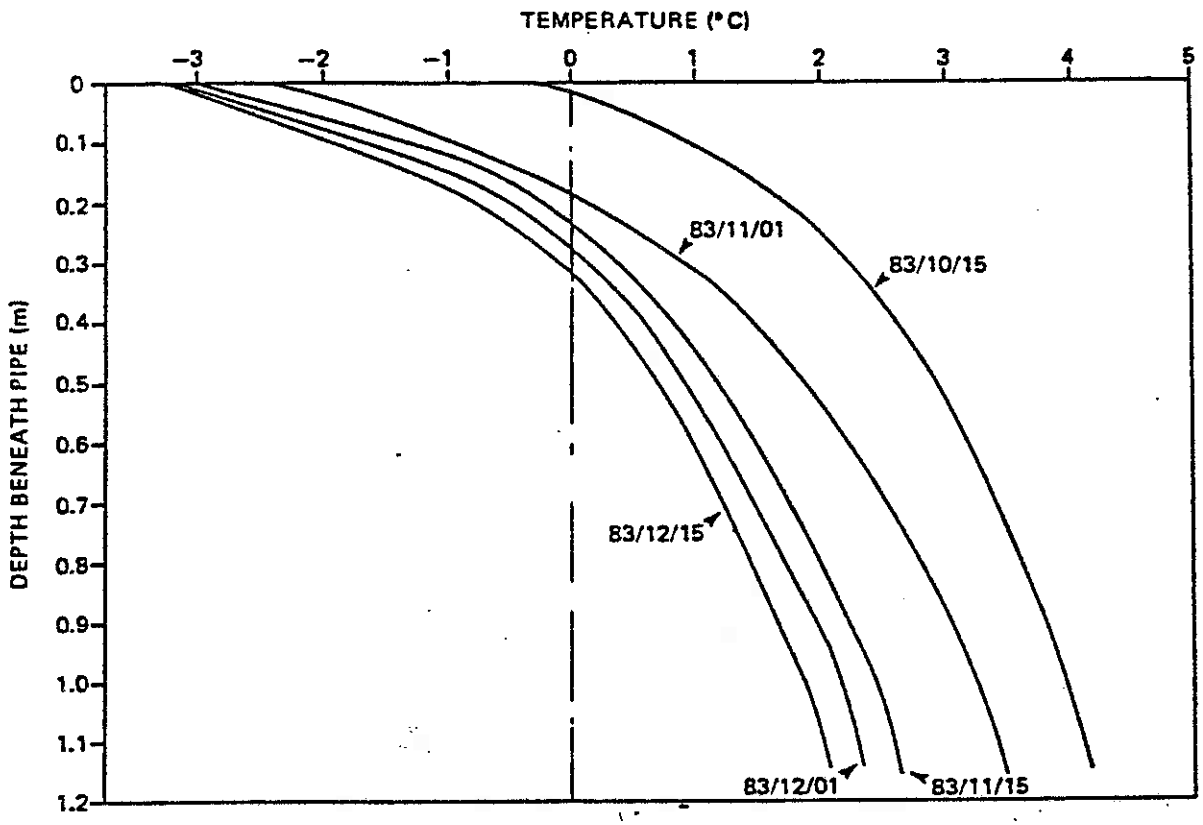

FIGURE 5.1 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE LIMON (SECTION BB) PENDANT LA SECONDE PERIODE DE GEL.

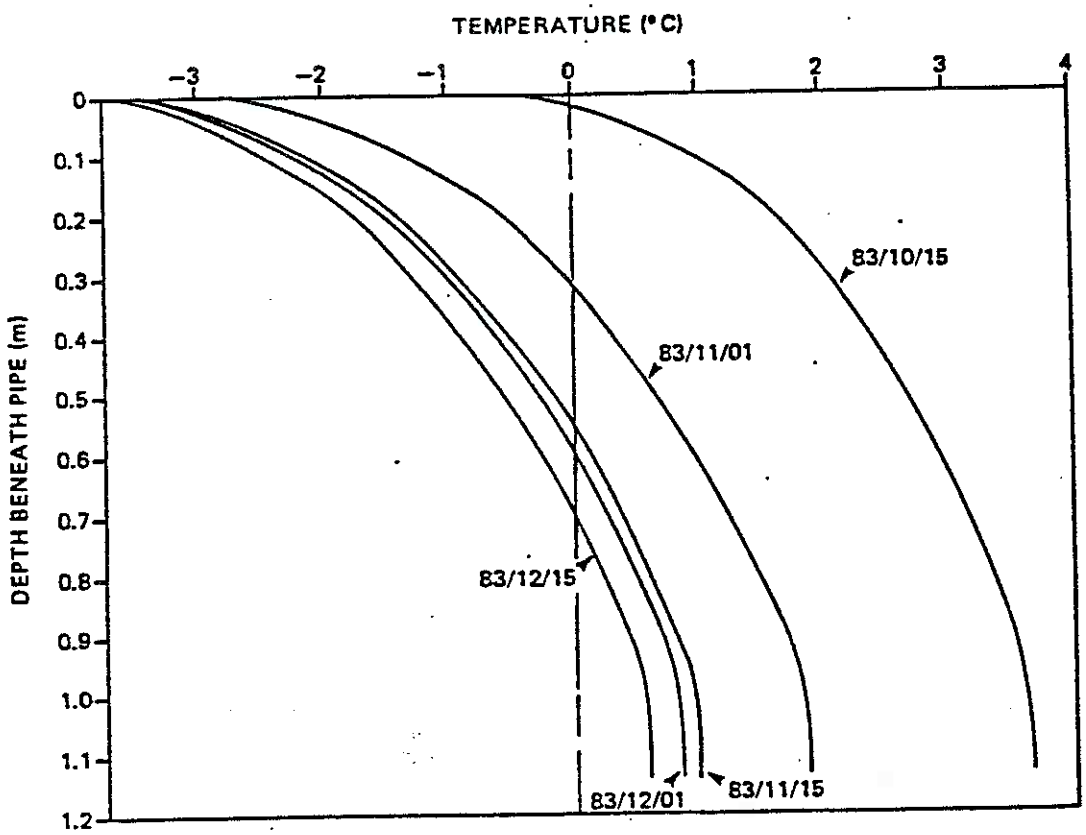

FIGURE 5.2 - PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE SABLE (SECTION AA) PENDANT LA SECONDE PERIODE DE GEL.

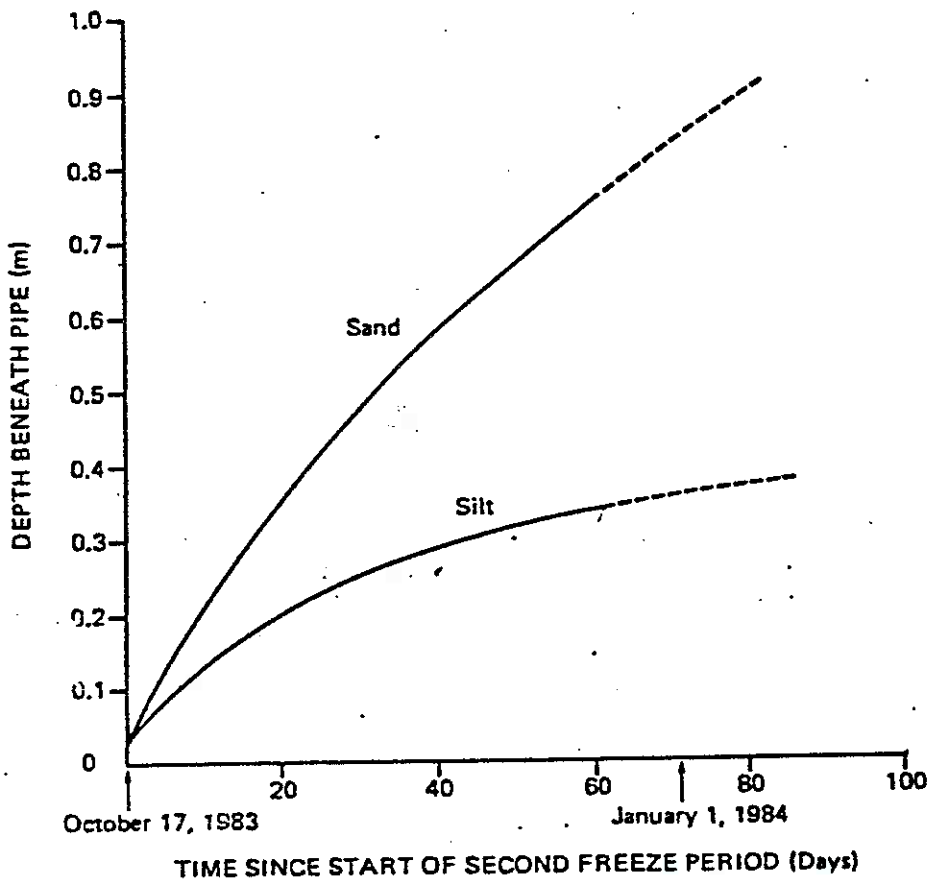

FIGURE 5.3 - PROGRESSION DU FRONT DE GEL SOUS LA CANALISATION PENDANT LA SECONDE PERIODE DE GEL.

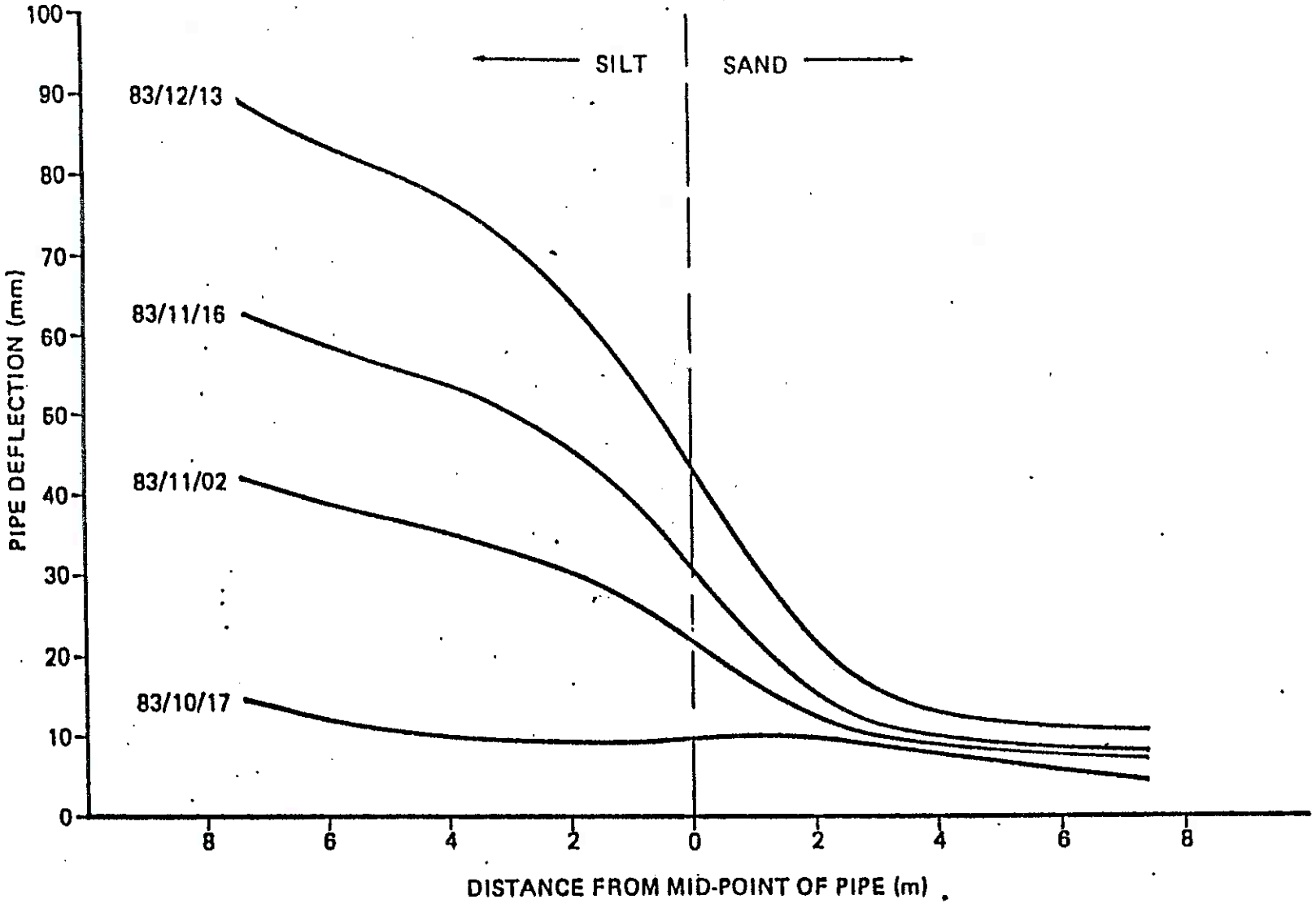

FIGURE 5.4 - EVOLUTION DU PROFIL LONGITUDINAL DE LA CANALISATION PENDANT LA SECONDE PERIODE DE GEL.

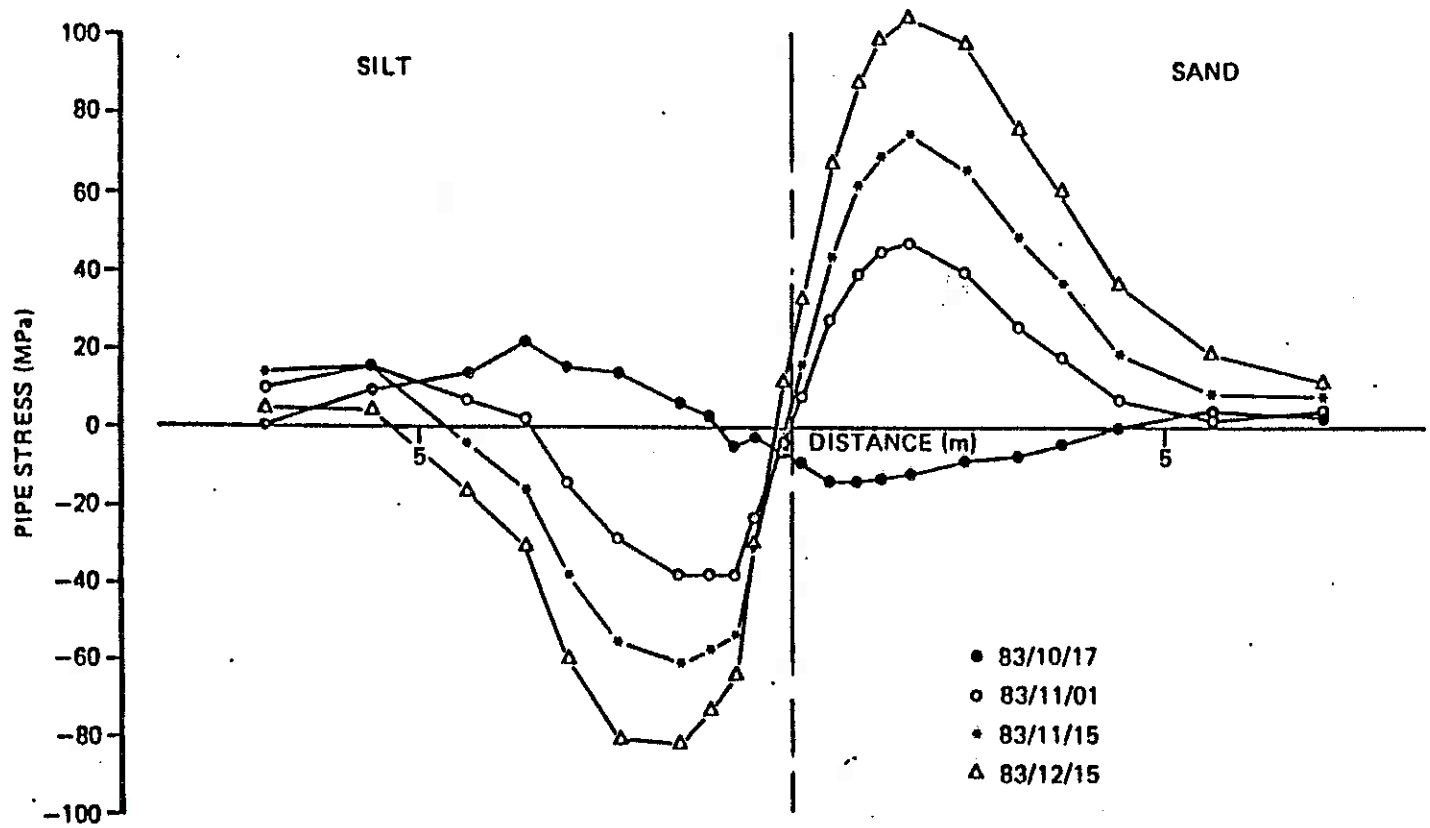

FIGURE 5.5 - DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION DANS LA CANALISATION PENDANT LA SECONDE PERIODE DE GEL.
(calculée à partir des lectures des jauges de contrainte).

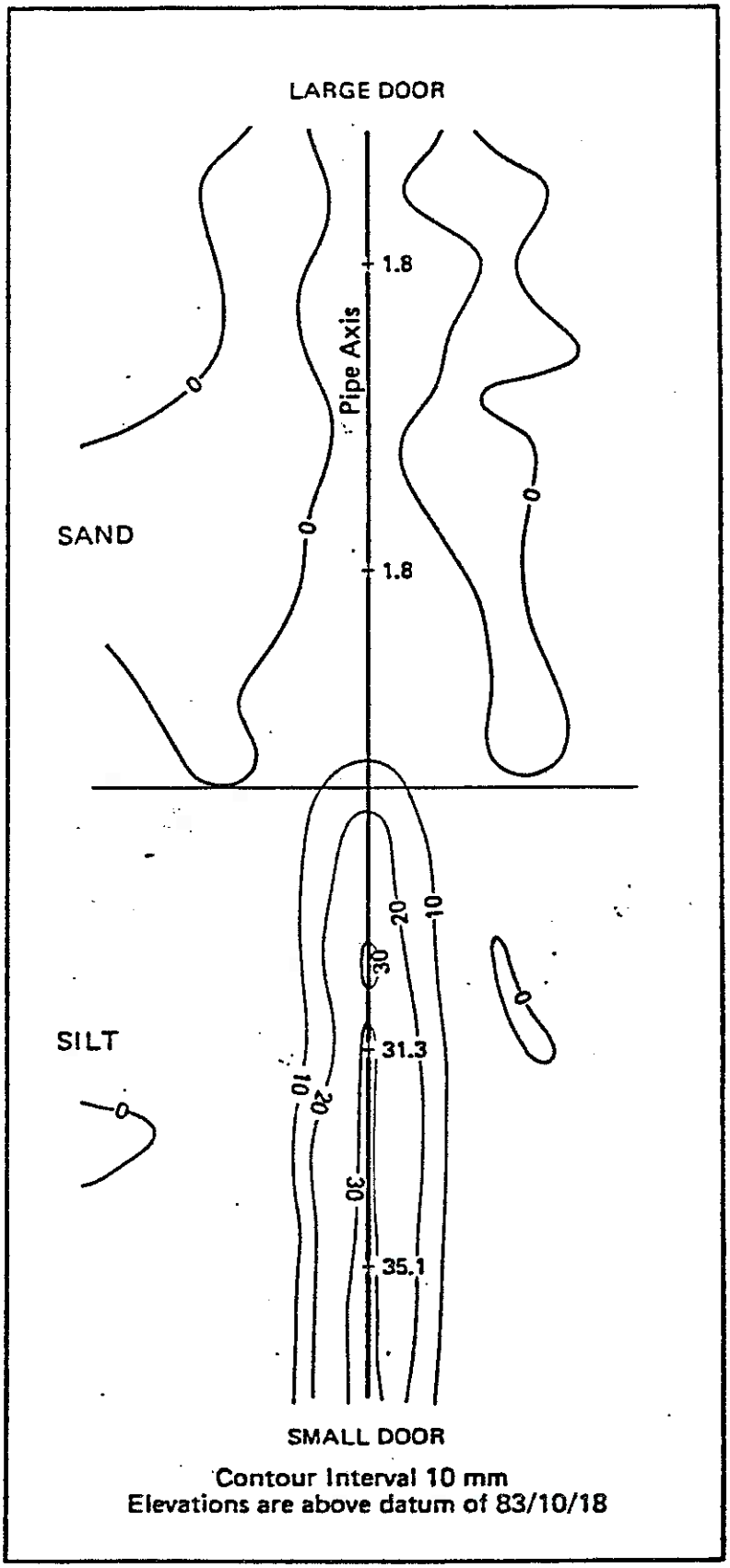

FIGURE 5.6 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL 2 SEMAINES APRES LE DEBUT DU GEL 83/11/02.

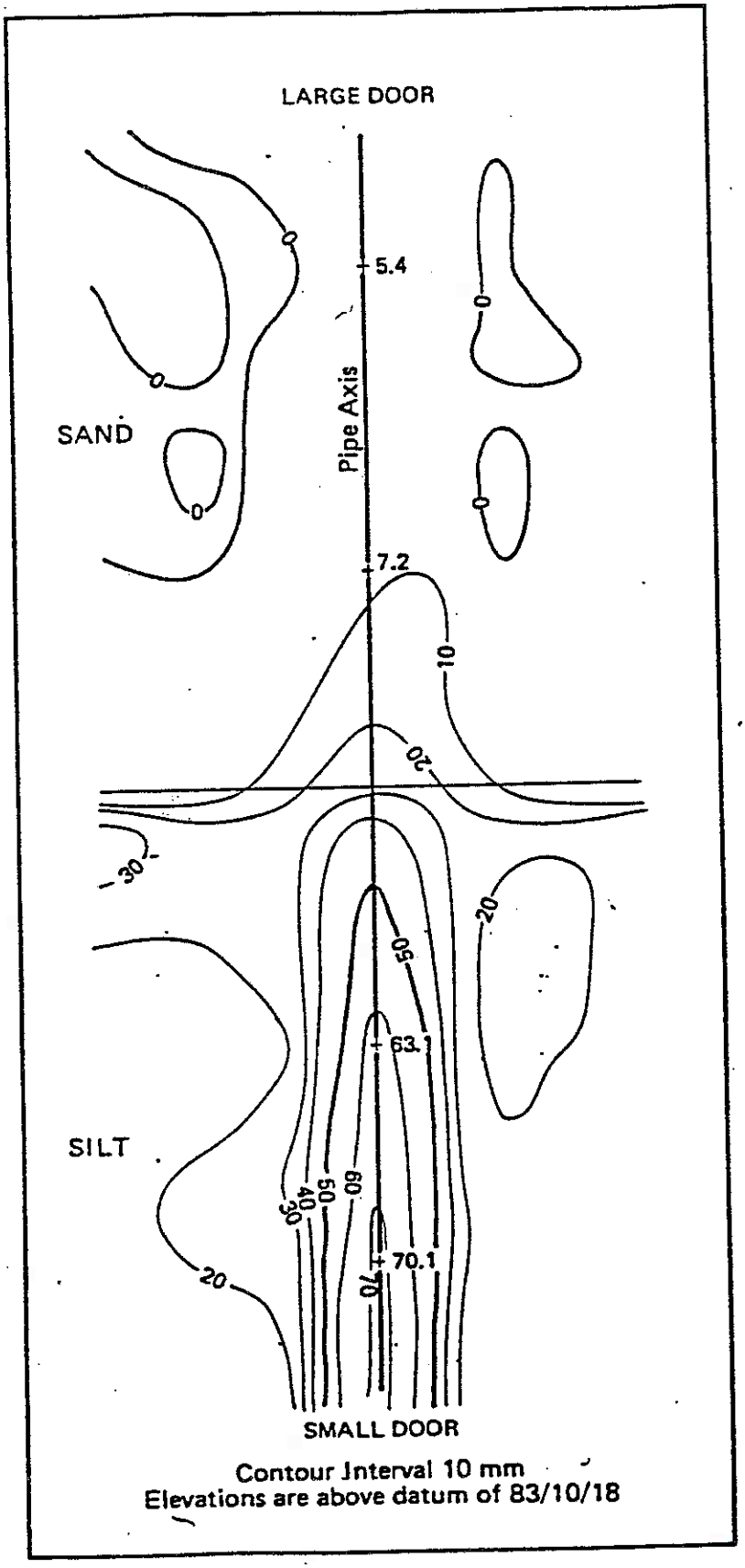

FIGURE 5:7 - TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL 6 SEMAINES APRES LE DEBUT DU GEL 83/12/02.

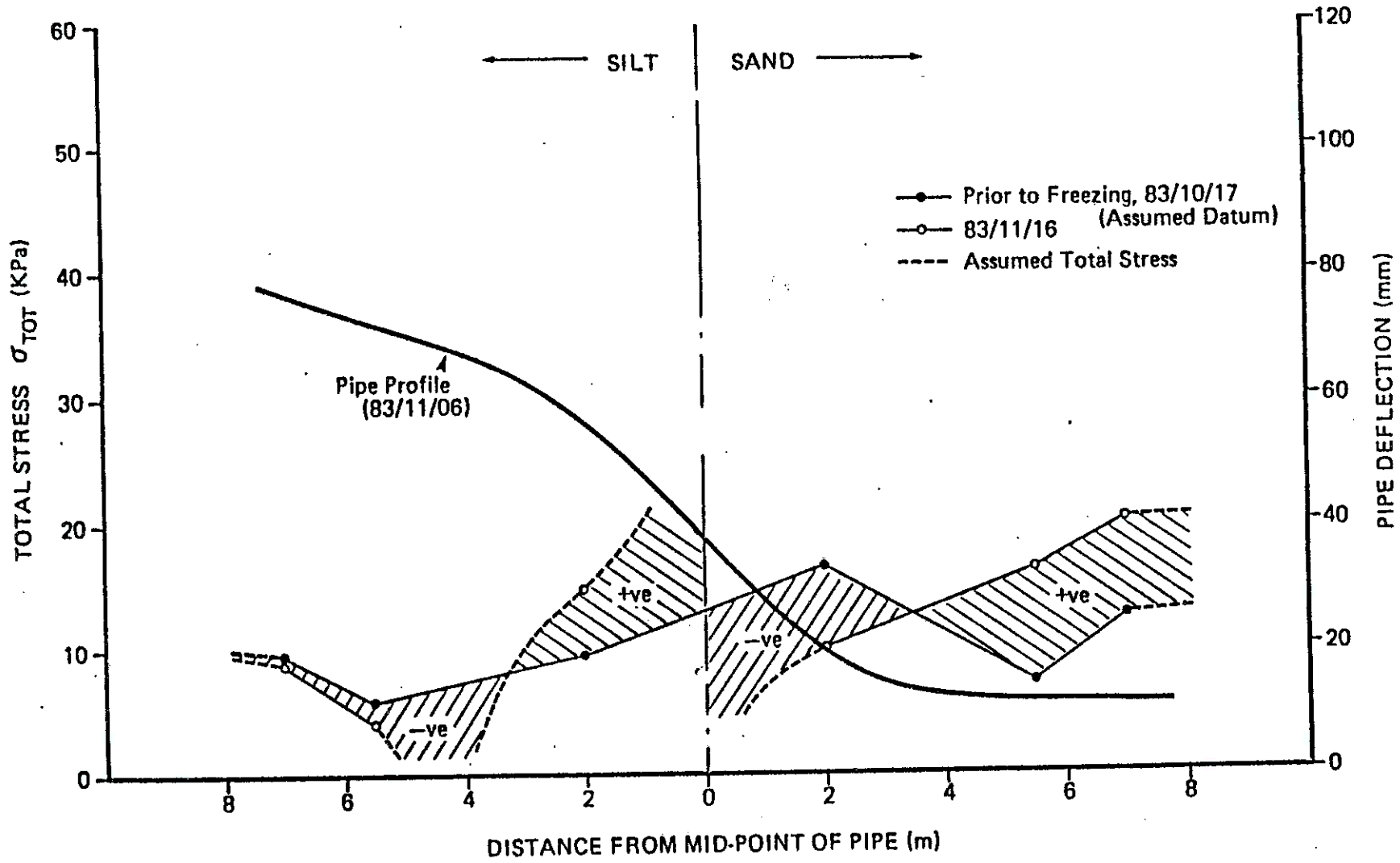

FIGURE 5.8 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION 4 SEMAINES APRES LE DEBUT DE LA SECONDE PERIODE DE GEL.
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

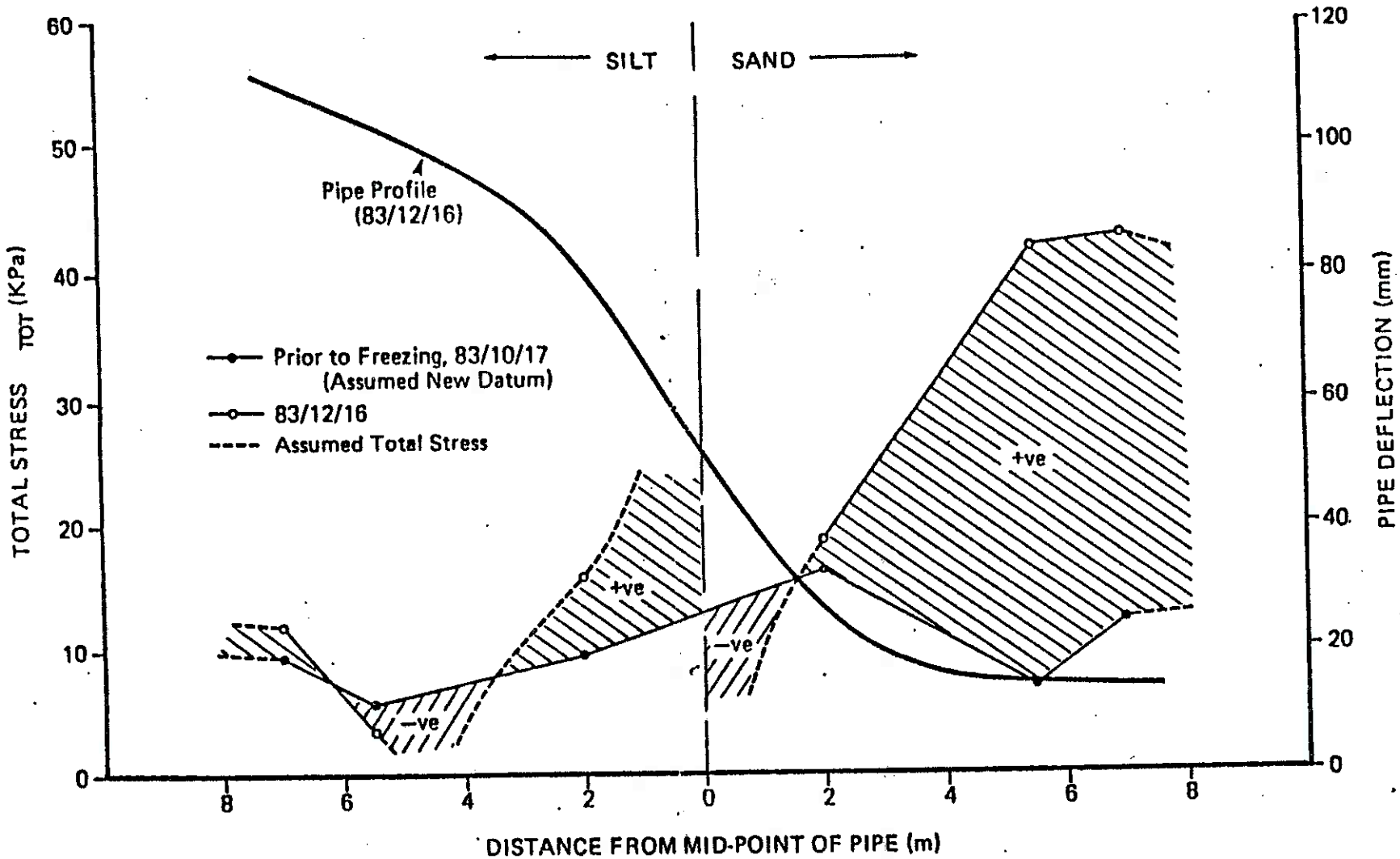

FIGURE 5.9 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION 8 SEMAINES APRES LE DEBUT DE LA SECONDE PERIODE DE GEL.
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

de gonflement positive dans le limon, négative dans le sable. Les valeurs maximales de la pression dans le sol dans cette zone semblent survenir très près de l'interface sable-limon. Une zone de croissance ou de décroissance de la pression totale (par rapport à la valeur supposée au début du gel) apparaît aux extrémités du sable et du limon respectivement.

6 - ETUDE DE LABORATOIRE

6.1 - Généralités

Une importante étude de laboratoire a été conduite sur les deux sols utilisés dans l'expérience, tout au long de la durée du contrat. Cette étude a été effectuée aux Laboratoires de Science Géotechnique de l'Université Carleton et aux laboratoires du Centre d'Ingénierie Nordique de l'Ecole Polytechnique. Cette étude se poursuit, plus particulièrement sur les propriétés mécaniques des sols gelés.

6.2 - Gonflement au gel

Onze essais de gonflement au gel ont été réalisés afin de déterminer les caractéristiques de gonflement d'échantillons remaniés de limon de Caen. Ces essais ont été effectués au moyen d'une cellule modifiée de gonflement au gel à piston de 10 cm de diamètre, fournie par le Docteur B. Ladanyi de l'Ecole Polytechnique.

Les essais réalisés ont fait appel à deux modes de préparation des échantillons. Sept essais furent exécutés sur des échantillons préparés selon une méthode de compactage dynamique du type Proctor. Quatre essais furent exécutés sur des échantillons obtenus par consolidation d'une bouillie de sol à 50% de teneur en eau. Les densités des échantillons, pour l'ensemble des essais, étaient d'environ $1,75 \times 10^3$ kg/m^3. Après préparation, saturation et refroidissement, les échantillons étaient soumis à une température d'environ - 5 °C sur une extrémité et d'environ 1,5 °C sur l'autre. La progression du

...

front de gel était suivie au moyen de thermocouples noyés dans la paroi de la cellule. Le gonflement était mesuré au moyen d'un comparateur à cadran d'une sensibilité de 0,005 mm et la quantité d'eau aspirée à la face chaude au moyen d'une burette.

Les courbes représentatives du gonflement en fonction du temps pour les échantillons compactés et consolidés sont données sur les figures 6.1 et 6.2 respectivement. Les résultats de ces essais et leur utilité à des fins de prévision du gonflement au gel, durant les périodes de gel de l'expérience, seront étudiés plus en détail dans le cadre d'une thèse de Maîtrise de Sciences appliquées actuellement en cours de préparation à l'Université Carleton.

6.3 - Relation succion-teneur en eau

La relation entre la succion et la teneur en eau, pour le limon de Caen et le sable, a été déterminée dans la plage de 0 à 6 000 kPa. Pour cela, on a utilisé une gamme d'appareillages comprenant des plaques de succion, des plaques de pression et un appareil de pression à membrane. La procédure employée pour ces essais est décrite dans le rapport LTR-11 (1979) des Laboratoires de Science Géotechnique.

La relation entre pression de succion appliquée et teneur en eau est représentée, pour chacun des deux sols, sur la figure 6.3. On voit que des quantités d'eau significatives, particulièrement dans le limon, sont présentes dans les sols même pour des pressions de succion très élevées. Il a été montré que la relation entre succion et teneur en eau peut être reliée à la teneur en eau non gelée des sols gelés (Williams, 1983). La raison en est que la cause principale de l'abaissement du point de congélation est la succion (énergie libre) développée dans l'eau lorsque la teneur en eau du sol diminue. Une relation approximative entre teneur en eau et température a été établie à partir des résultats des essais de succion selon la méthode décrite dans le rapport LTR-111 (1979) des Laboratoires de Science Géotechnique. Ce résultat est présenté sur la figure 6.4.

...

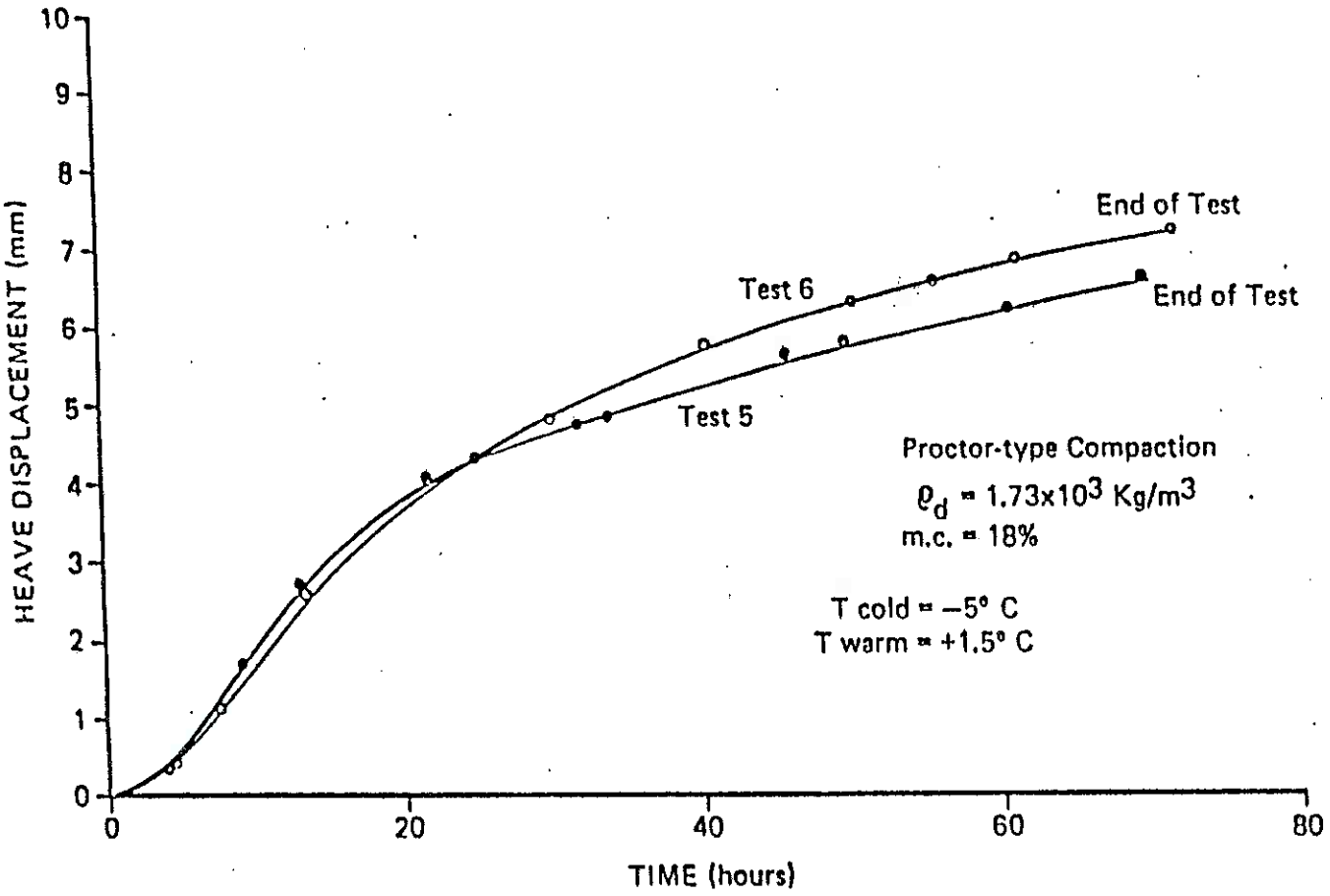

FIGURE 6.1 - GONFLEMENT AU GEL EN FONCTION DU TEMPS POUR LE LIMON DE CAEN COMPACTE EN COUCHES.

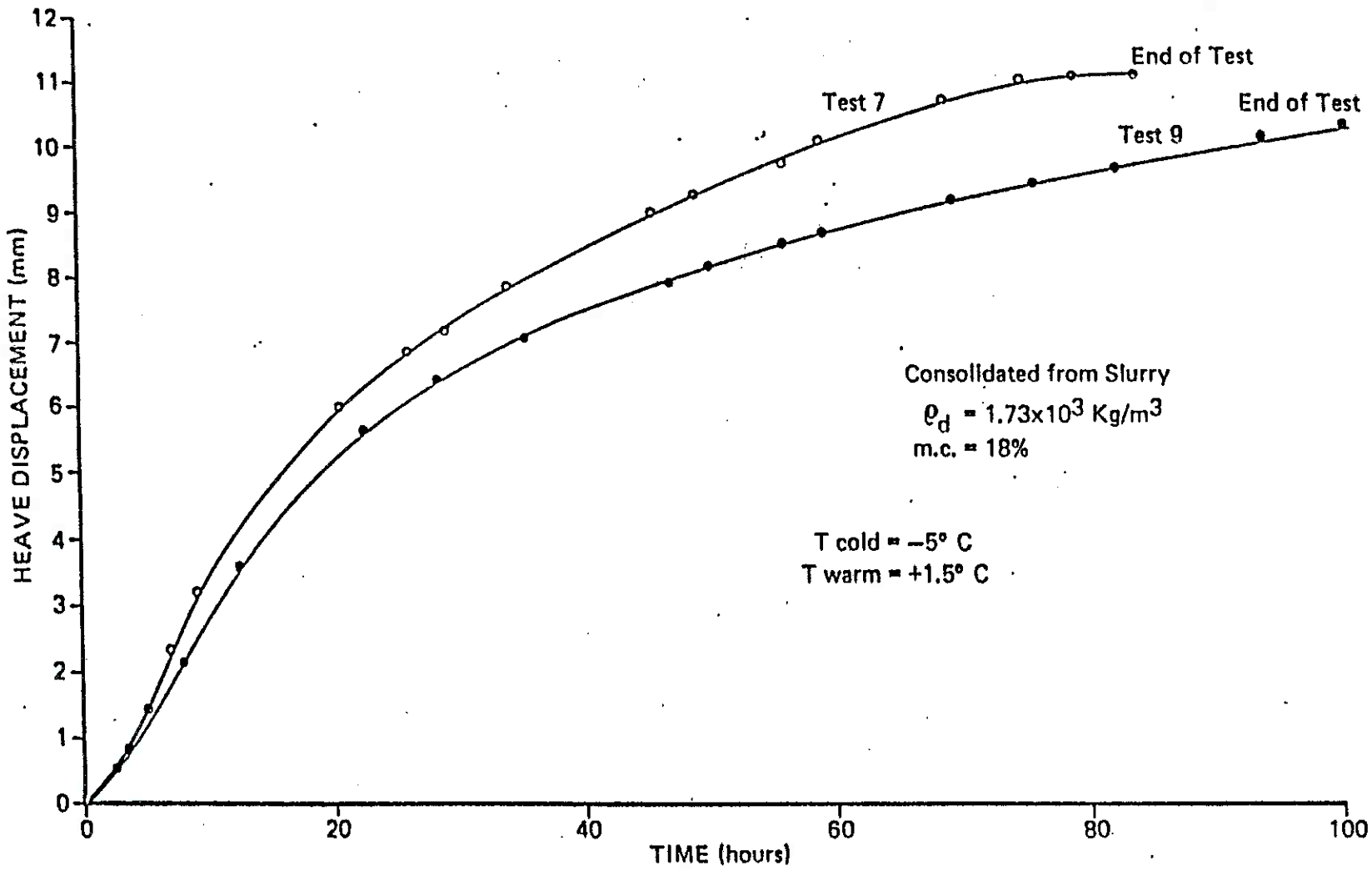

FIGURE 6.2 – GONFLEMENT AU GEL EN FONCTION DU TEMPS POUR LE LIMON DE CAEN CONSOLIDE.

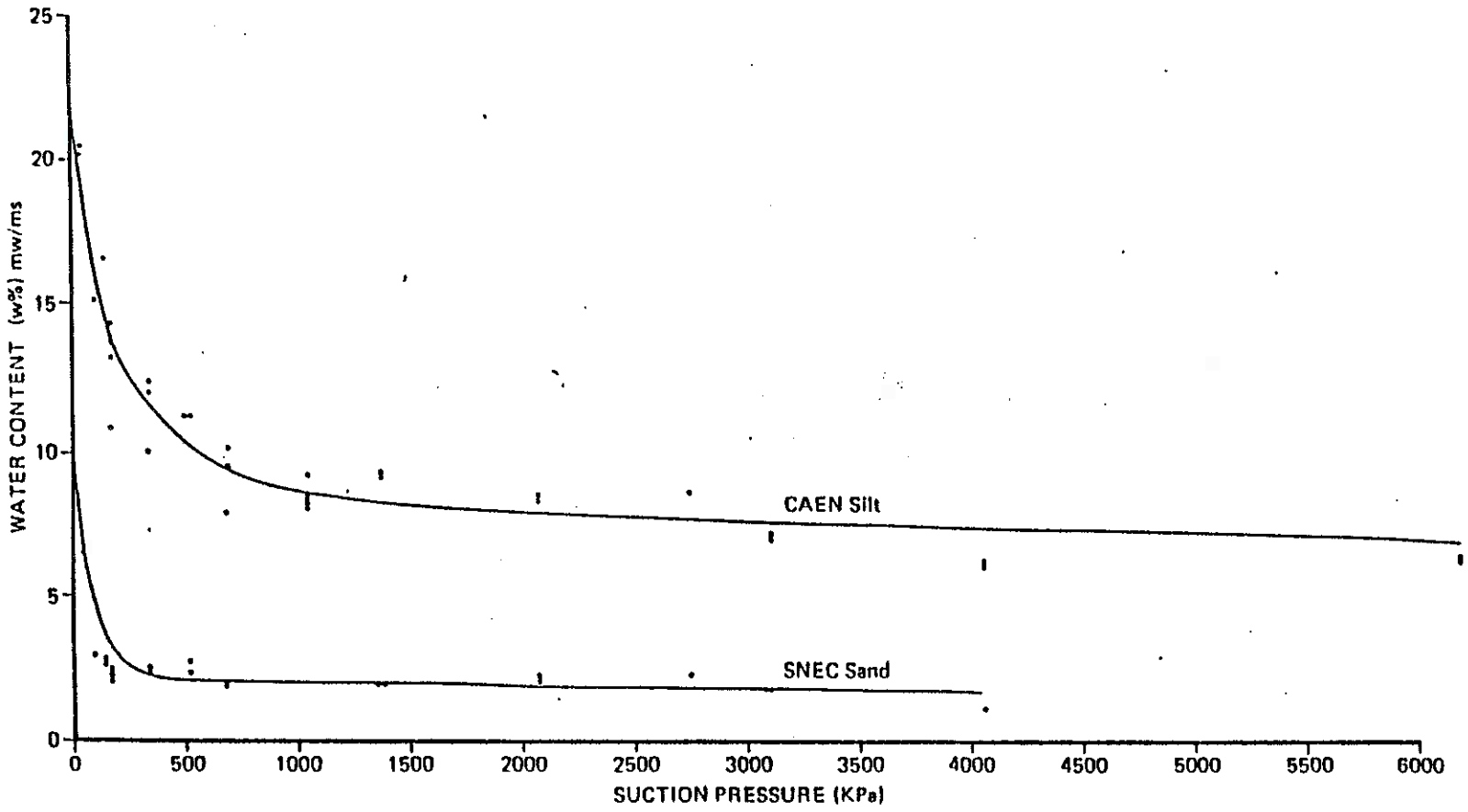

FIGURE 6.3 - COURBES SUCCION-TENEUR EN EAU POUR LE LIMON DE CAEN ET LE SABLE SNEC.

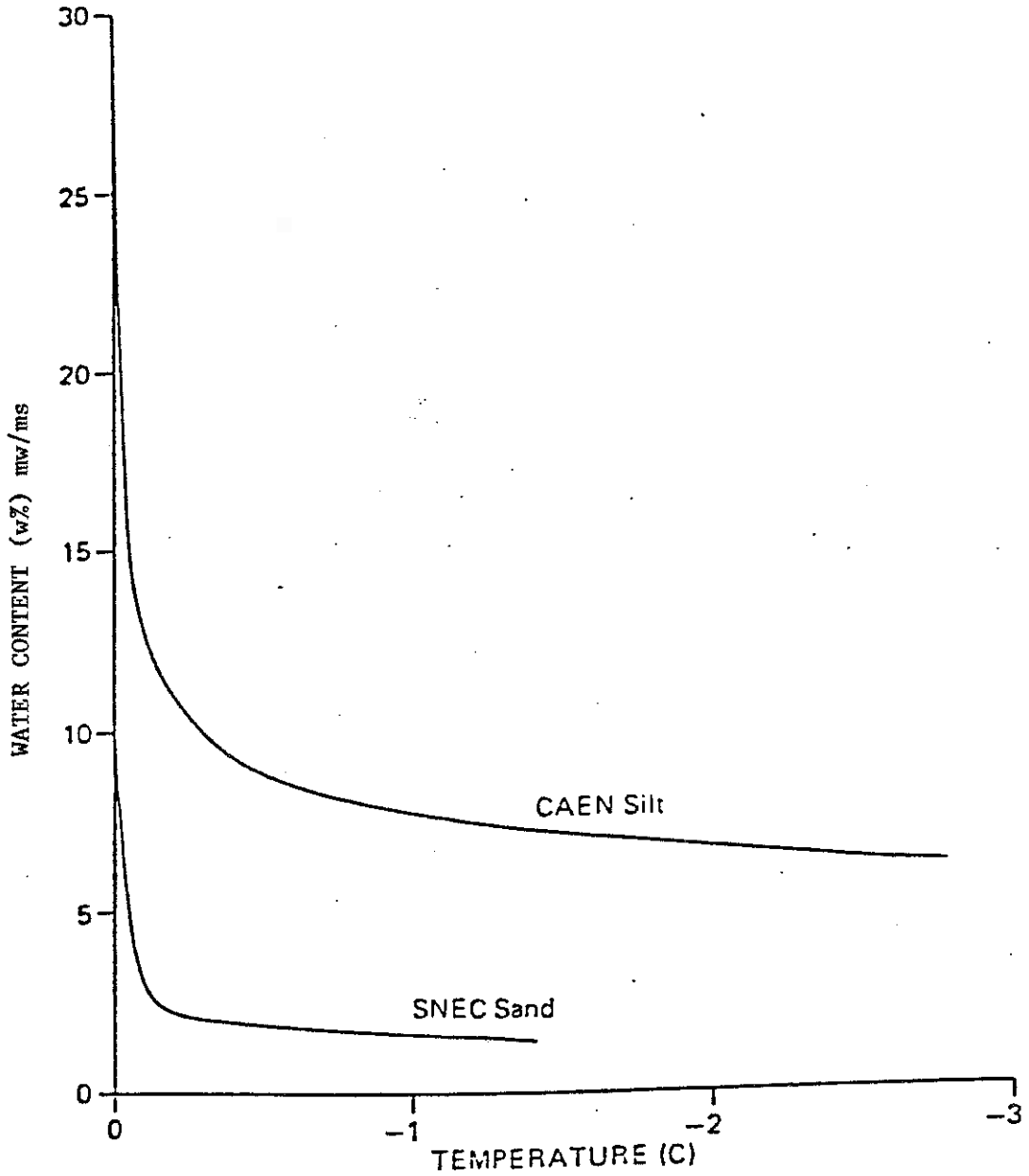

FIGURE 6.4 - TENEUR EN EAU NON GELEE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LE LIMON DE CAEN ET LE SABLE SNEC.
(à partir des courbes succion-teneur en eau).

6.4 - Propriétés mécaniques

Le comportement des sols gelés sous charges est très complexe et dépend d'un grand nombre de paramètres. Des essais ont été effectués dans les chambres froides du Centre d'Ingénierie Nordique afin de déterminer les propriétés mécaniques du sable et du limon gelés. A ce jour, un certain nombre d'essais ont été exécutés avec le pressiomètre Ménard et un programme d'essais complémentaires au moyen d'un appareil triaxial est en cours de réalisation.

Les résultats obtenus au pressiomètre, ainsi que la description de la méthode expérimentale utilisée, ont été décrits dans une thèse de Maîtrise de Sciences appliquées récemment soutenue à l'Ecole Polytechnique (Lemaire, 1983). Les essais étaient réalisés dans une cellule, spécialement construite à cet effet, de 47 cm de diamètre et de 45,5 cm de hauteur et comportant un trou central de 7,4 cm de diamètre. Un pressiomètre Ménard type GC permettant d'appliquer une pression maximale de 10 MPa était disposé dans la cavité centrale. Les échantillons, soigneusement préparés, étaient refroidis à - 10 °C pendant trois jours et ensuite amenés à la température d'essai de - 1,5 °C. Des essais de fluage sous charge constante ont été réalisés sur les échantillons en vue de déterminer l'effet du temps sur le comportement des sols.

Les résultats obtenus au pressiomètre sont représentés, pour diverses contraintes uniaxiales, sur les courbes de la figure 6.5.

7 - CONCLUSIONS

Les travaux accomplis au cours de l'année du contrat peuvent être résumés de la manière suivante :

(1) Le gonflement au gel, la déformation de la canalisation et les contraintes dans cette dernière, ont été déterminés en continu tout au long de la canalisation, au cours de deux périodes de gel et d'une période de dégel.

(2) La pression totale dans le sol, le mouvement de la surface et les paramètres température et humidité du sol, ont été enregistrés concurremment en de nombreux points.

...

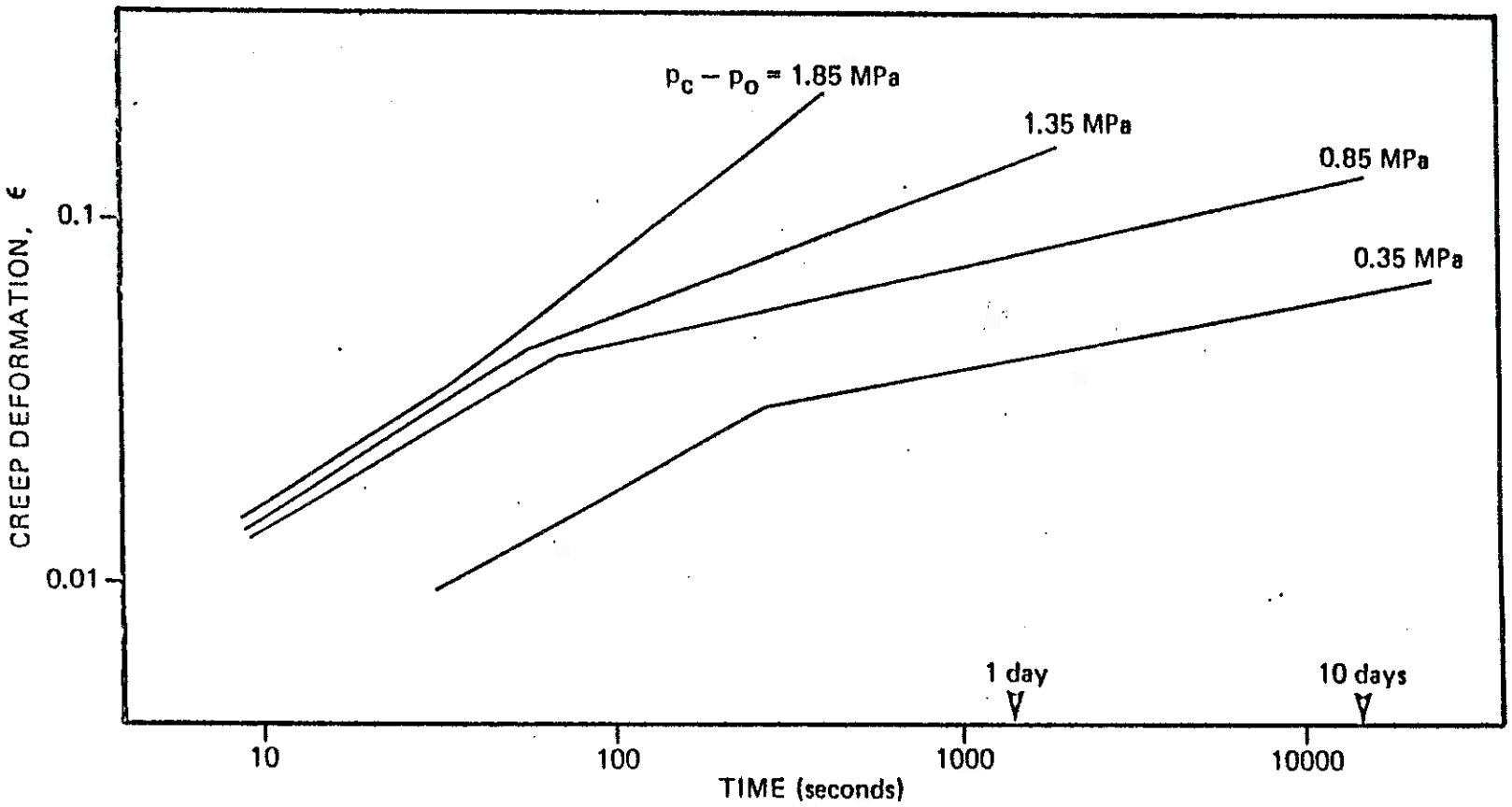

FIGURE 6.5 - ESSAIS DE FLUAGE DE LONGUE DUREE SOUS CHARGE CONSTANTE POUR LE SABLE. (d'après Lemaire, 1983).

(3) Des études de laboratoire (réalisées au Canada) ont fourni des informations sur les propriétés de fluage des sols à l'état gelé, sur leurs caractéristiques de gonflement ainsi que sur leurs relations succion-teneur en eau.

(4) En plus des calculs nécessaires pour obtenir les valeurs des paramètres mentionnés à l'alinéa (1), une attention a également été portée sur la corrélation entre le gonflement et le fluage des sols gelés avec le comportement de la canalisation. Ce problème, de la solution duquel dépend l'établissement de modèles de prévision, s'avère très complexe. Ceci constitue le centre d'intérêt principal du travail en cours, lequel inclut également la poursuite de la collecte de données pendant l'accroissement progressif de l'anneau de sol gelé.

REMARQUES FINALES DU CHEF DE PROJET

Des relations de travail harmonieuses entre toutes les personnes impliquées dans ce projet ont existé pendant toute l'année écoulée. Il résulte de ce projet que maintenant cinq Canadiens ont bénéficié d'un acquis substantiel en passant plusieurs mois à la station expérimentale comme responsables de projet. D'autres ont tiré profit de courtes visites et des études conduites au Canada.

Le projet a connu une large publicité dans la grande presse française et, bien qu'une semblable publicité n'ait pas eu lieu au Canada, le projet devenant de plus en plus connu, le nombre de demandeurs parfaitement qualifiés désirant participer au projet a augmenté d'une manière importante. Il est souhaité que les compétences particulières nécessaires pour les phases d'analyse des résultats du projet continuent d'être disponibles au cours des années à venir. Le texte du contrat prévoit la poursuite de l'expérience jusqu'en décembre 1984, avec la possibilité d'une prolongation.

L'intérêt porté au projet par les compagnies travaillant sur les gazoducs et oléoducs, et par d'autres, a conduit à prévoir l'organisation d'un séminaire de deux journées qui se tiendra à Caen les 25 et 26 avril 1984. Plusieurs courtes publications ont déjà vu le jour, ou doivent paraître, décrivant brièvement le projet; des articles scientifiques plus détaillés sont actuellement en cours de rédaction.

Bien que les résultats expérimentaux soient transmis de France au Canada au moyen de bandes magnétiques, les documents de travail relatifs au présent rapport, les illustrations, etc. ont, en grande partie, été expédiés au moyen des services postaux réguliers. Les échanges de documents par ce moyen ont entraîné un certain retard dans la préparation finale.

Enfin, il est à noter qu'il n'y a pas encore eu de dépassement du coût au cours de cette phase du projet, et ceci en dépit d'une forte inflation en France.

REFERENCES

1) Geotechnical Science Laboratories 1979. Procedure Manual for Determination of Thermal Properties of Soils. Report LTR-11, 113 pp.

2) Burgess, M. et al 1982. Investigation of Soil Freezing in Association with a Buried Chilled Pipeline in a Large-Scale Test Facility : Phase 1, and (Interim Report) Feasibility Study for Stresses in a Pipeline Buried in Freezing Soil. Geotechnical Science Laboratories. Report IR29, 57 pp. (aussi disponible en français).

3) Geotechnical Science Laboratories 1982. Feasibility Study for Stresses in a Pipeline Buried in Freeziong Soil. Report IR-32, 36 pp.

4) Geotechnical Science Laboratories 1983. Investigation of Soil Freezing in Association with a Buried Chilled Pipeline in a Large-Scale Test Facility : Phase 2. Report IR-33. 41 pp.

5) Lemaire, G. 1983. Etude Experimentale d'un Gazoduc Enterré Soumis à des Températures Négatives. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences appliquées (M.Sc.A.), 67 pp.