"Expérimentation sur le gel d'un sol et d'une canalisation enterrée et refroidie dans une installation d'essai de grandes dimensions, 3e phase"

septembre, 1984

RAPPORT FINAL

"Expérimentation sur le gel d'un sol et d'une canalisation enterrée et refroidie dans une installation d'essai de grandes dimensions, 3e phase"

Pour

Le Ministère d'Energie, Mines et Ressources
Direction de la Physique du Globe

Geotechnical Science Laboratories
Université Carleton
Ottawa, Ontario
K1S 5B6

Numéro de série: OSU83-00157
Numéro du dossier MAS: 03SU.23235-3-1059

septembre, 1984

Avant-Propos

Ce document donne un compte rendu du travail effectué durant la troisième année d'un projet continu de recherche commun franco-canadien: "Comportement des canalisations enterrées soumises à des températures négatives" et constitue le rapport final relatif au Contrat n° OSU83-00157: "Expérimentation sur le gel d'un sol et d'une canalisation enterrée et refroidie dans une installation d'essai de grandes dimensions - 3e phase", Chef de projet, P.J. Williams, et Co-chef de projet M.W. Smith. Ce rapport comprend également le rapport provisoire pour le Contrat n° OST 83-00364 qui se termine le 31 décembre 1984: "Analyses des contraintes développées dans les canalisations enterrées dans un sol soumis au gel", Chef de projet P.J. Williams.

Au cours de l'année commençant le 1er juillet 1983 et prenant fin 1er juillet 1984, l'expérience fut poursuivie en pleine activité. Premièrement, une période de dégel et de tassement de la canalisation fut lancée, suivie d'une deuxième période de gel accompagnée d'une déformation considérable de la canalisation. A Caen, Paris, Ottawa et Montréal, l'analyse en laboratoire et des études théoriques continuent, ainsi que la période actuelle de gel qui se poursuivera au moins jusqu'a l'année prochaine.

Le lecteur interessé aux étapes antérieures de projet est invité à se reporter aux rapports précédents: Burgess et al 1982: Geotechnical Science Laboratories, 1982, 1983a, 1983b, relatifs à ce projet.

Ce rapport a, pour une grande partie, été préparé par Andre Guichaoua de l'Ecole Polytechnique de Montréal, par les Laboratoires de Science Géotechnique, à l'Université Carleton. A la fin de ce rapport,

on trouvera de plus amples renseignements sur le personnel canadien impliqué et sur des activités de dissémination d'informations relatives au projet.

L'ensemble du projet de recherche commun franco-canadien est supervisé par un Comité Scientifique: l'affiliation de ses membres donne la liste des organismes impliqués dans le sommaire d'entente sur ce projet de recherche commun, daté du 31 décembre 1981 et prolongé le 21 décembre 1983.

M. Jaime Aguirre-Puente, Laboratoire d'Aerothermique,
Centre National de la Recherche Scientifique

M. J.P. Lautridou, Centre National de la Recherche Scientifique

M. Michel Frémond, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Dr. Alan Judge, Section Physique de la Terre, Ministère de
l'Energie, Mines et Ressources

M. Chantereau, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

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

M. M.W. Smith, Laboratoires de Science Géotechnique,
Université Carleton.

P.J. Williams
Chef de Projet
septembre, 1984

TABLE DE MATIERES

1. INTRODUCTION 1

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES 1

2.1 Installation expérimentale 1
2.2 Instrumentation 2
2.3 Conduite de l'expérience 7
2.4 Modifications apportées avant la seconde période de gel 7
2.4.1 Instrumentation 7
2.4.2 Partie mécanique 10
2.5 Modifications apportées pendant la seconde période de gel 11

3. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PERIODE DE DEGEL 13

3.1 Généralités 13
3.2 Etat de la surface 13
3.3 Régime thermique 13
3.4 Déformation de la canalisation 15
3.5 Consolidation et dilatation du sol 21
3.6 Pression totale induite dans le sol 27

4. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - DEUXIEME PERIODE DE GEL 27

4.1 Généralités 27
4.2 Régime thermique 27
4.3 Régime hydraulique 33
4.4 Déformation de la canalisation 37
4.5 Paramètres physiques du sol 39
4.6 Pression totale induite dans le sol 51
4.7 Performances des appareils 53

5. CARACTERISATION DU GONFLEMENT DES SOLS DU LIMON DE CAEN EN LABORATOIRE 57

5.1 Généralités 57
5.2 Essais sur le gonflement des sols 58
5.3 Les facteurs touchant le caractère du gonflement du limon de Caen 59

Remarques administratives 65

BIBLIOGRAPHIE 68

LES FIGURES

		Page
Figure 2.1	Coupe Longitudinale de la Fosse	3
Figure 2.2	Coupe en Travers de la Fosse	4
Figure 2.3	Un Dessin Detaille de l'Installation du Système Magnetique pour Mesurer le Gonflement du Sol	12
Figure 3.1	Vue du Dessus de la Fosse	14
Figure 3.2	Profils de Temperature sous la Canalisation dans le Limon (Section BB) Pendant le Dégel de Surface, 1983	16
Figure 3.3	Profils de Temperature sous la Canalisation dans le Sable (Section AA) Pendant le Dégel de Surface, 1983	17
Figure 3.4	Recession du Front de Gel sous la Canalisation Pendant le Dégel de Surface, 1983	18
Figure 3.5	Evolution du Profil en Long de la Canalisation Pendant le Dégel de Surface	19
Figure 3.6	Distribution de la Contrainte de Flexion de la Canalisation Pendant le Dégel de Surface (Calculée à Partir des Lectures des Jauges de Contrainte)	20
Figure 3.7	Topographie de la Surface du Sol après le Fin de la Première Période de Gel 83/06/07	22
Figure 3.8	Topographie de la Surface du Sol après le Debut du Dégel 83/07/12	23
Figure 3.9	Topographie de la Surface du Sol après le Debut du Dégel 83/07/26	24
Figure 3.10	Topographie de la Surface du Sol après le Debut du Dégel 83/08/23	25
Figure 3.11	Topographie de la Surface du Sol après le Debut du Dégel 83/09/12	26
Figure 3.12	Pression Totale dans le Sol sous la Canalisation après 5 Semaines de Dégel de Surface (Les Cellules de Pression sont Situées Initialement à 46 cm sous la canalisation).	28
Figure 3.13	Pression Totale dans le Sol sous la Canalisation après 12 Semaines de Dégel de Surface. (Les Cellules de Pression sont Situées Initialement à 46 cm sous la Canalisation	29
Figure 4.1	Evolution des Profils de Température sous la Canalisation (Deuxième Période de Gel)	30
Figure 4.2	Evolution des Profils de Température sous la Canalisation (Deuxième Période de Gel)	31
Figure 4.3	Progression du Front de Gel sous la Canalisation Pendant le Deuxième Période de Gel	32
Figure 4.4	Bilan D'Eau Cumulatif Pendant la Deuxième Période de Gel. .	34
Figure 4.5	Teneur en Eau dans le Limon (Près de L'Axe de la Conduite) en Fonction de la Profondeur	35
Figure 4.6	Teneur en Eau non Gelée Pendant la Deuxième Période de Gel (Section B-B)	36
Figure 4.7	Evolution du Profil en Long de la Canalisation Pendant la Deuxième Période de Gel	38

Page

Figure 4.8 Distribution de la Contrainte de Flexion de la Canalisation Pendant le Dégel de Surface 40
Figure 4.9 Topographie de la Surface du Sol après le Début du Gel 83/11/02 41
Figure 4.10 Topographie de la Surface du Sol après le Début du Gel 83/12/02 42
Figure 4.11 Topographie de la Surface du Sol 84/02/01 43
Figure 4.12 Topographie de la Surface du Sol 84/04/03 44
Figure 4.13 Topographie de la Surface du Sol 01/06/84 45
Figure 4.14 Soulèvement de Surface du Sable 46
Figure 4.15 Soulèvement de Surface du Limon 46
Figure 4.16 Le Gonflement Total des Tubes Téléscopiques 47
Figure 4.17 Le Soulèvement Differential en Profondeur dans le Sol . . . 48
Figure 4.18 Evolution de L'Inclinaison des Plateaux sur la Canalisation 52
Figure 4.19 Pression Totale dans le Sol sous la Canalisation 4 Semaines après le Début de la Séconde Période de Gel (Les Cellules de Pression sont Situées Initialement à 46 cm sous la canalisation) 54
Figure 4.20 Pression Totale dans le Sol sous la Canalisation 8 Semaines après le Début de la Séconde Période de Gel 55
Figure 4.21 La Pression Totale sous la Canalisation dans le Limon (Section B-B) 56

Figure 5.1 Caracterisation du gonflement des sols du limon de Caen en laboratoire 61

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente une vue d'ensemble des résultats de la troisième année (du 1er juillet 1983 au 30 juin 1984) d'une étude pluridisciplinaire des contraintes dans une conduite refroidie enterrée dans le sol. Cette étude fait partie d'un projet de recherche commun être le Canada et la France conduit dans une installation expérimentale à température contrôlée de grandes dimensions, située à Caen, France.

L'essentiel du rapport est constitué d'une présentation détaillée de données choisies et obtenues au cours des différentes périodes expérimentales de l'année du contrat. Le lecteur sera prié de se référer aux premiers rapports des mêmes auteurs (Geotechnical Science Laboratories 1982, 1983 etc.) pour obtenir de plus amples explications du lancement de l'essai et pour les résultats expérimentaux de la première période de congélation. De plus, le compte rendu du séminaire "Gazoducs et Oléoducs en milieu arctique" qui est en préparation en ce moment, présente des explications plus détaillées de différents aspects du projet accompagné d'interprétations, d'une description des objectifs et d'un exposé raisonné de la part de l'équipe du projet.

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES (1er juillet 83 au 30 juin 84)

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.

2.2 Instrumentation

Pendant le déroulement de l'expérience, un grand nombre de mesures furent prises à cadence régulière. 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, des anneaux magnétiques, 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 1.1 , 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

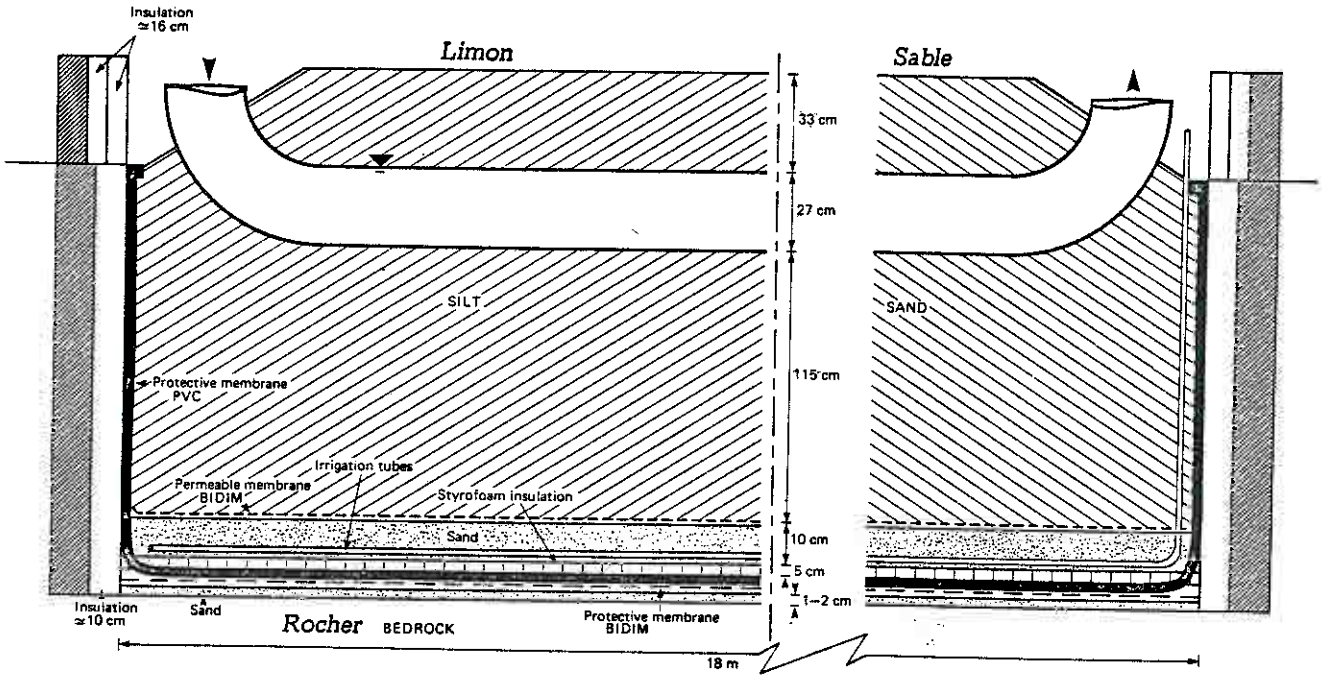

FIGURE 2.1 COUPE LONGITUDINALE DE LA FOSSE

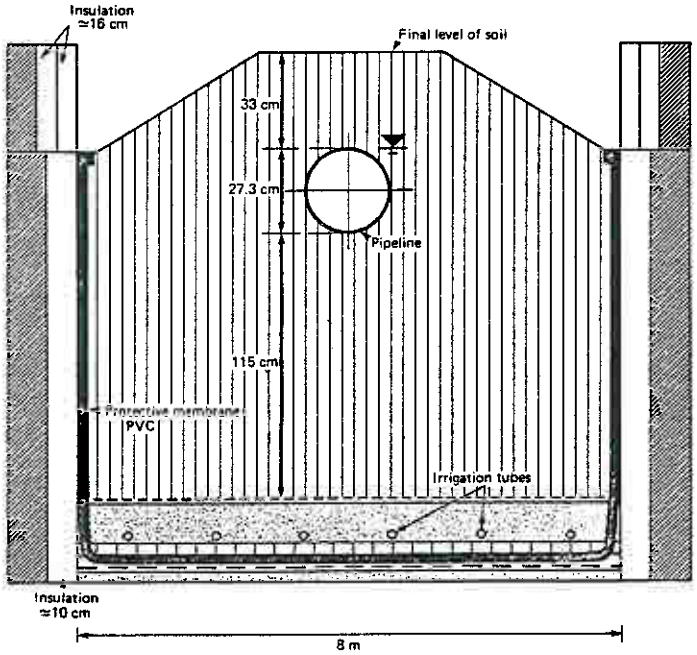

FIGURE 2.2 COUPE EN TRAVERS DE LA FOSSE

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 hor. 6 vert.	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 1.1 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 flexions 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.
	Anneaux magnétiques (gonflement du sol)	13 anneaux magnétiques sur 2 verticales	une fois par semaine	Des anneaux magnétiques suivent le mouvement du sol à differents niveaux
	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 durant les quelques premières semaines de dégel en juin 1983.

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'expérience

La première période de gel se termina le 8 juin 1983. La nappe était maintenue à 90 cm en dessous de la surface initiale du sol. L'air ambiant du hangar était maintenu à -0,75°C et l'air circulant dans la conduite était à -2°C. 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

CALENDRIER

Evénement	Désignation dans le rapport	Date
Signature du contrat		31/12/81
Achèvement de la mise en place de l'expérience et essais préliminaires		21/09/82
DEMARRAGE		
Température de l'air et de la surface du sol -0,75°C	1ère PERIODE DE GEL	21/09/82
Température dans la canalisation -2°C		08/06/83
Température de l'air et de la surface du sol remontée à + 4°C	PERIODE DE DEGEL DE SURFACE	08/06/83
Température dans la canalisation -2°C		17/10/83
Température de l'air et de la surface du sol abaissée à -0,75°C	2ème PERIODE DE GEL	17/10/83
Température dans la canalisation abaissée à - 5°C.		

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.

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 occasionelles, 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 pouvait être 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.

2.5 Modifications apportées pendant la seconde période de gel

Des anneaux magnétiques, permettant de mesurer le gonflement du sol à différents niveaux, furent mis en place à la fin du mois d'avril.

Les anneaux magnétiques sont placés à différents niveaux le long d'un tube de teflon. Une bouillie est placée entre les anneaux et compactée. Un appareil de mesure (réalisé au Geotechnical Science Laboratories de l'université Carleton) est placé sur le tube et on peut mesurer la profondeur des différents anneaux. Ceci est montré à la figure 2.3.

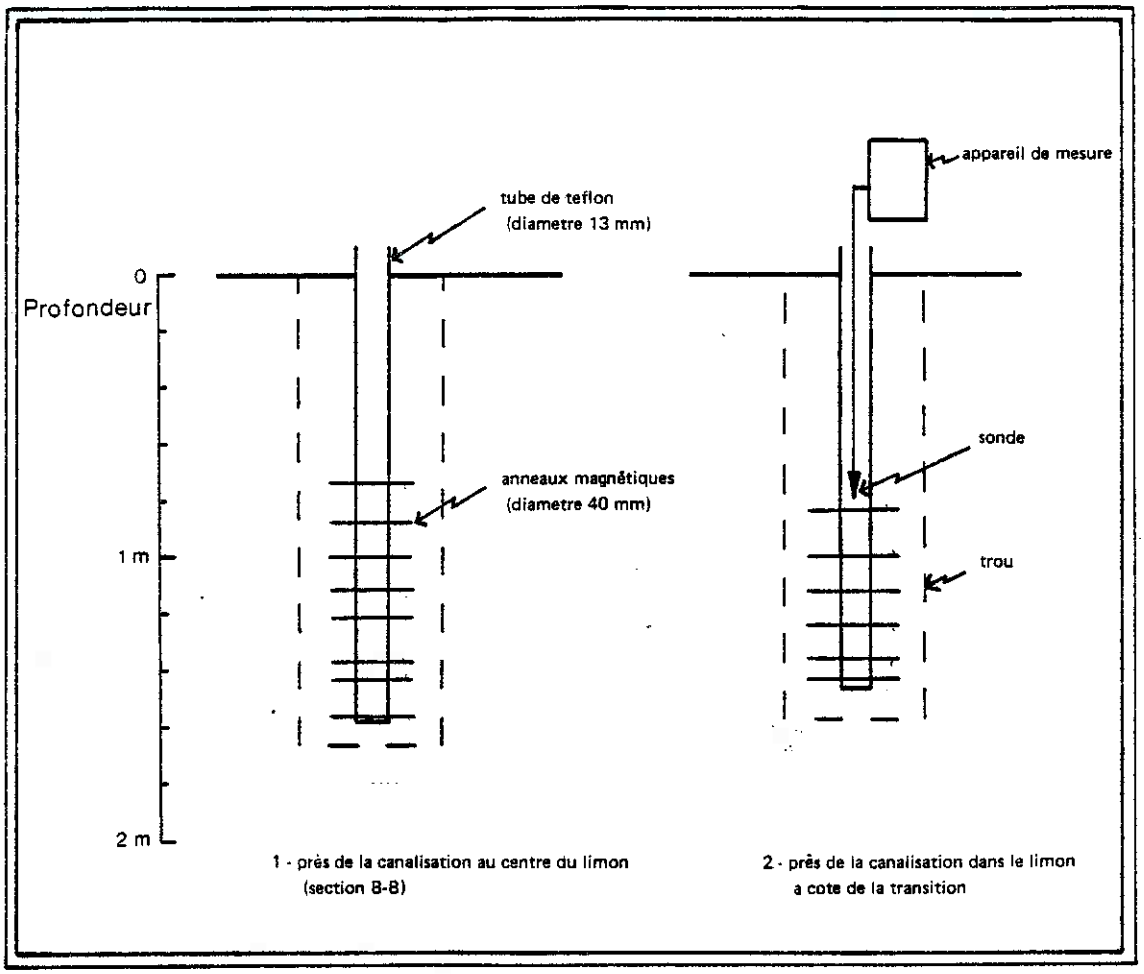

FIGURE 2.3 - UN DESSIN DETAILLE DE L'INSTALLATION DU SYSTEME MAGNETIQUE POUR MESURER LE GONFLEMENT DU SOL

3.0 OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - PERIODE DE DEGEL

3.1 Généralités

Les données présentées dans cette section ont été choisies pour illustrer certains résultats expérimentaux importants, pendant la période de dégel du 8 juin 83 au 17 octobre 83. La période couvrant le deuxième gel est présentée à la section suivante.

Une vue d'ensemble de l'emplacement des appareils est montrée à la figure 3.1.

3.2 Etat de la surface

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.

3.3 Régime thermique

Comme indiqué précédemment, la fiabilité d'un certain nombre de

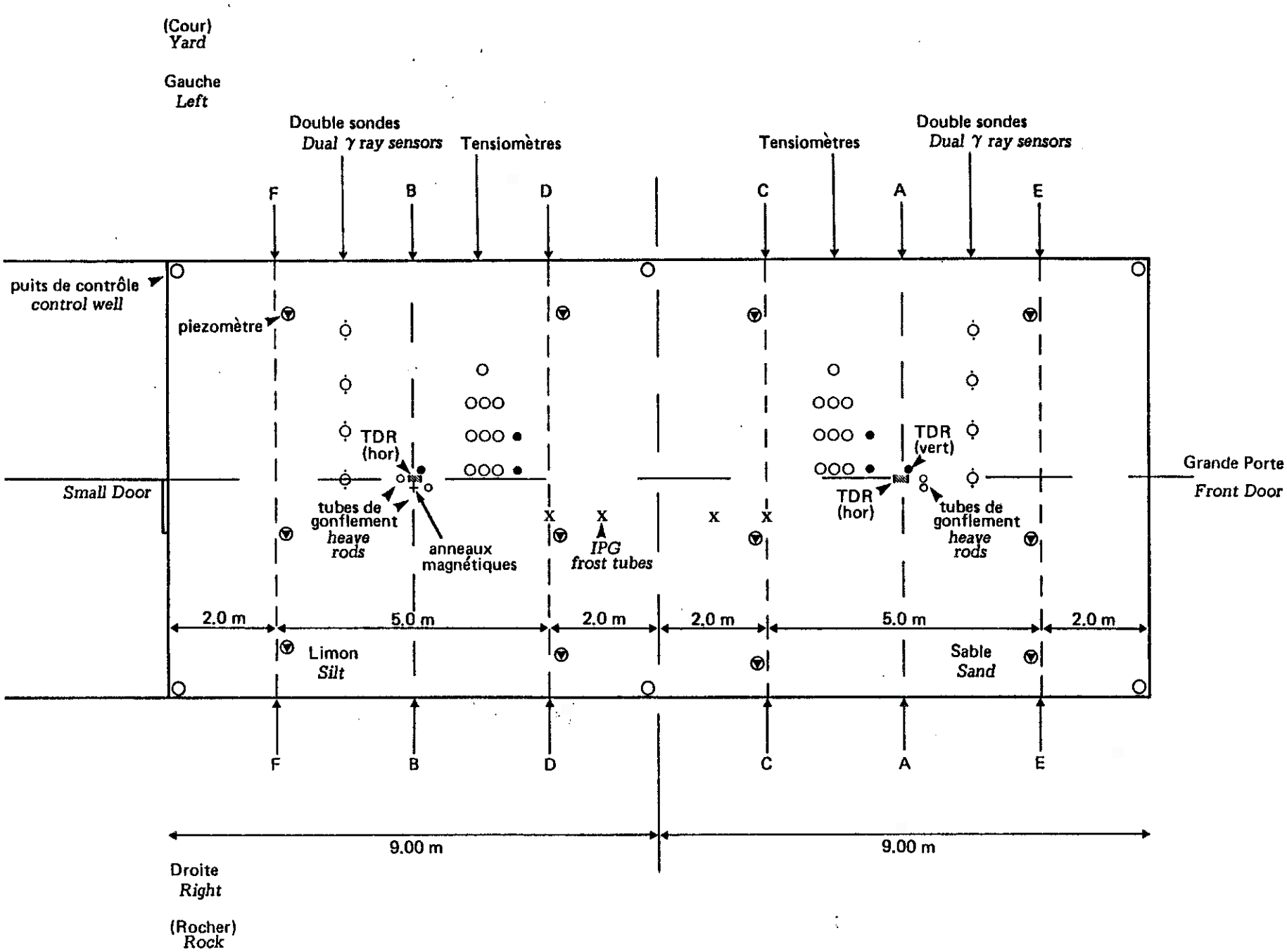

FIGURE 3.1 VUE DU DESSUS DE LA FOSSE

mesures thermiques effectuées pendant la période de dégel a été moindre en raison de problèmes avec le systeme d'acquisition de données. Cependant, les figures 3.2 et 3.3 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 $\pm 0{,}25°C$. La remontée de l'isotherme 0°C sous la canalisation pendant le dégel est fournie sur la figure 3.4. 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.

3.4 Déformation de la canalisation

La figure 3.5 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 3.4, 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 3.6 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

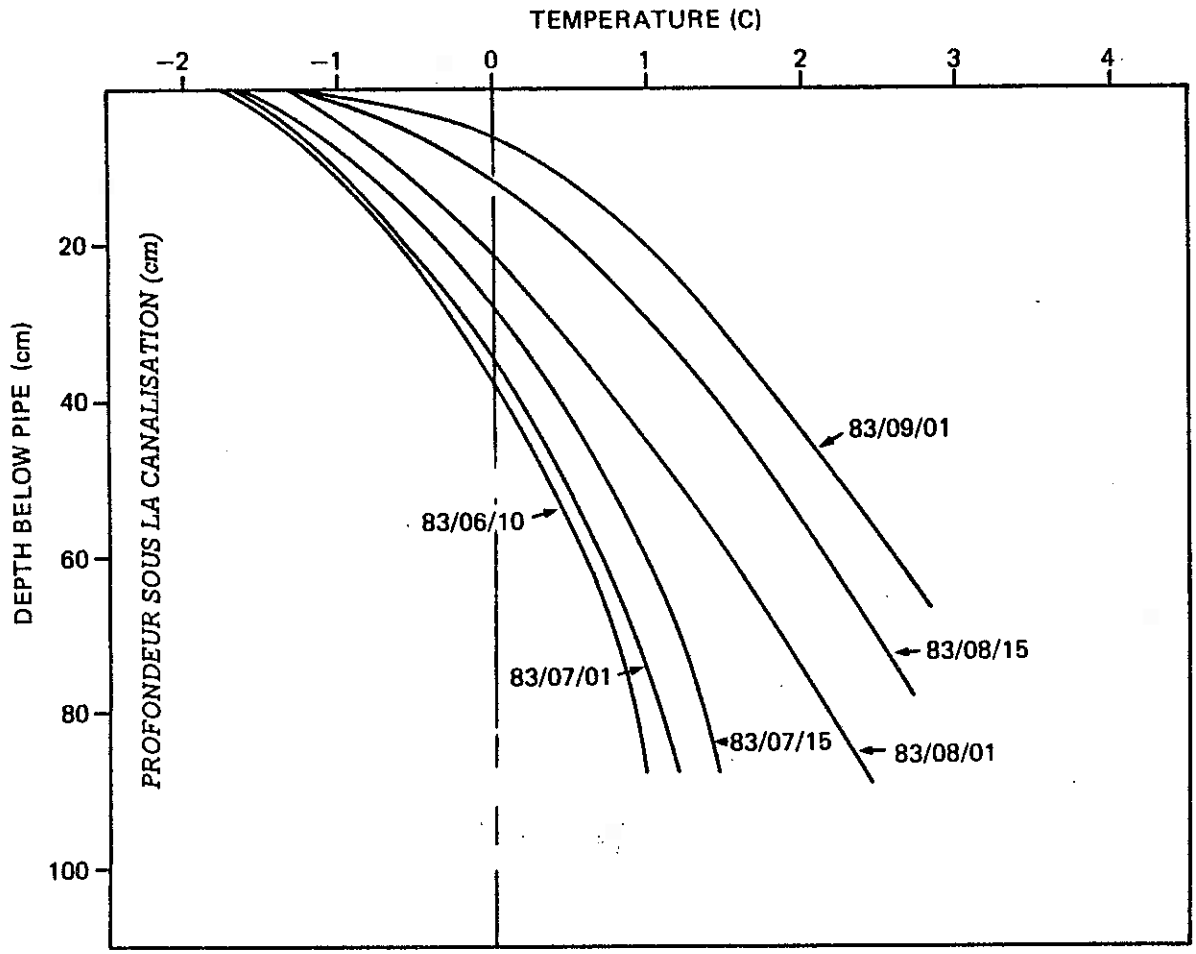

FIGURE 3.2 PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE LIMON (SECTION BB) PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983.

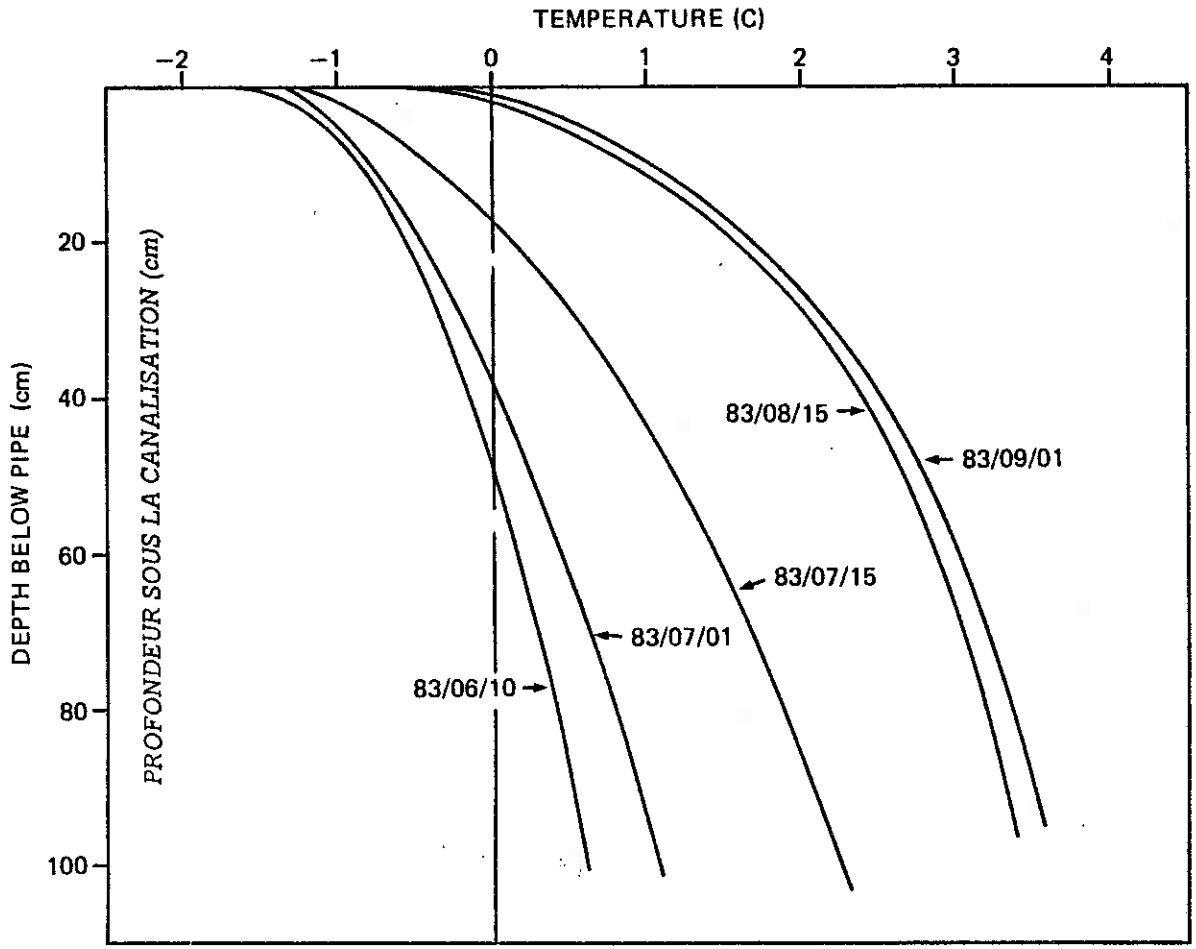

FIGURE 3.3 PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION DANS LE SABLE (SECTION AA) PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983.

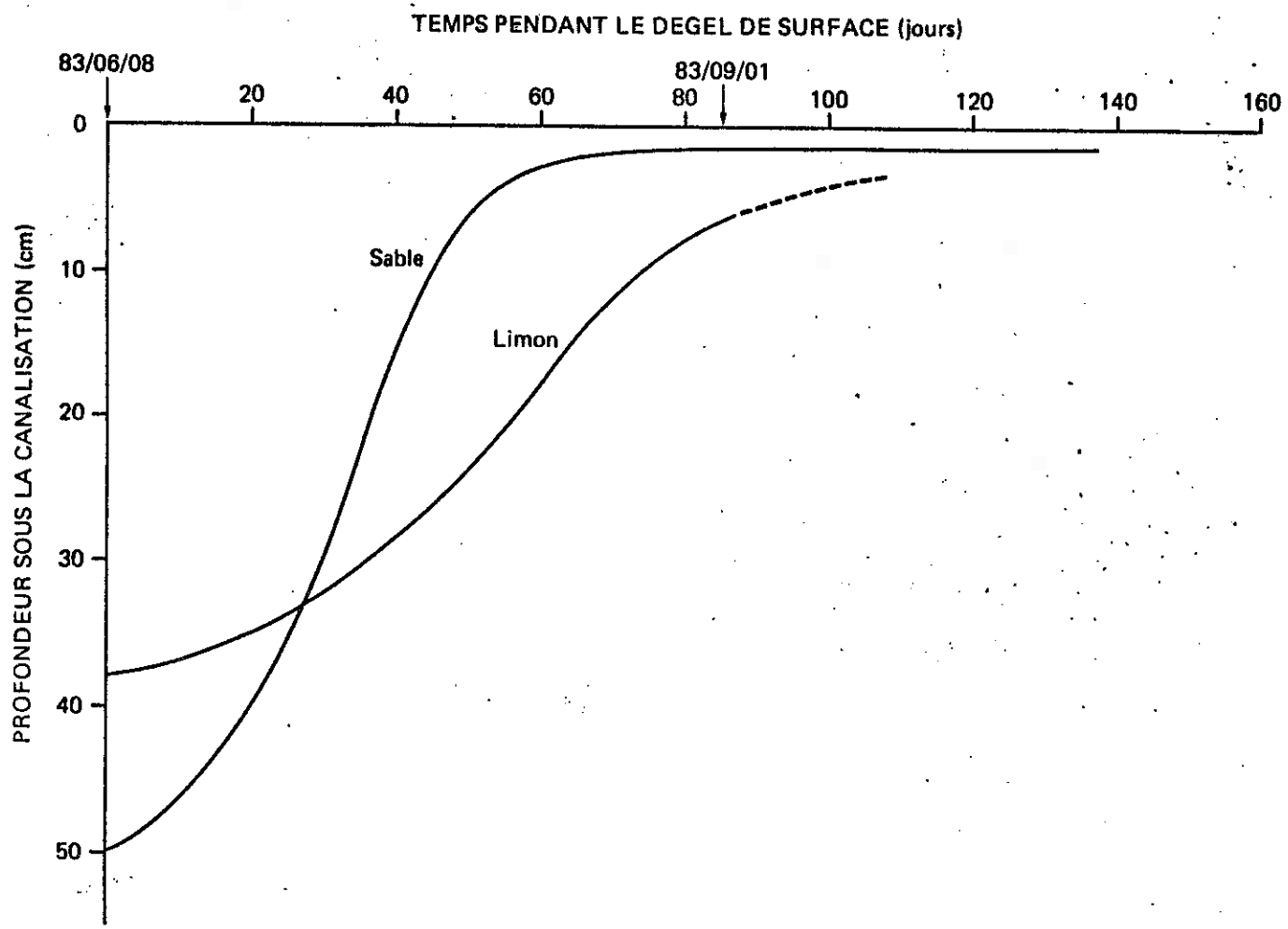

FIGURE 3.4 RECESSION DU FRONT DE GEL SOUS LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE, 1983

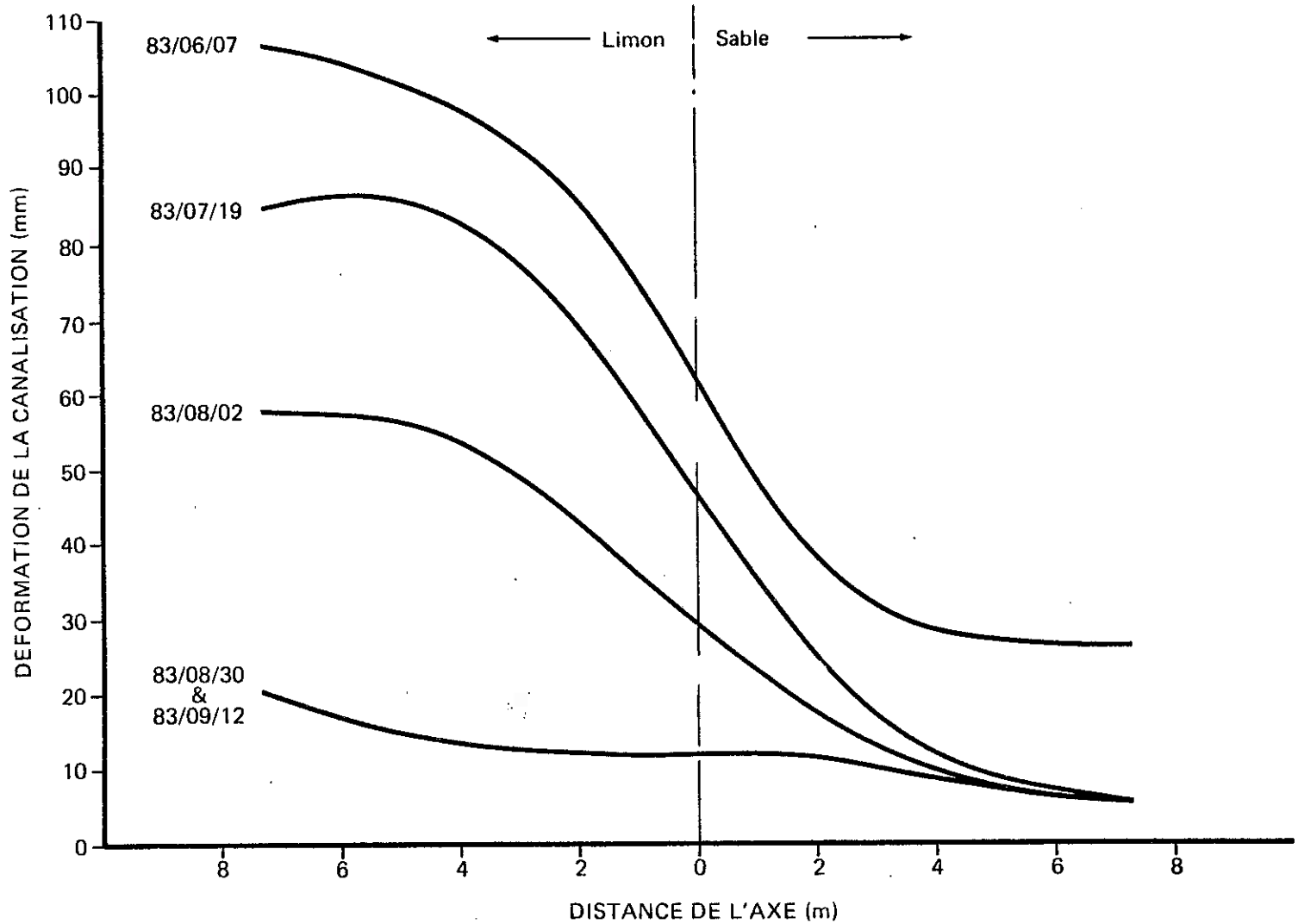

FIGURE 3.5 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DE LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE

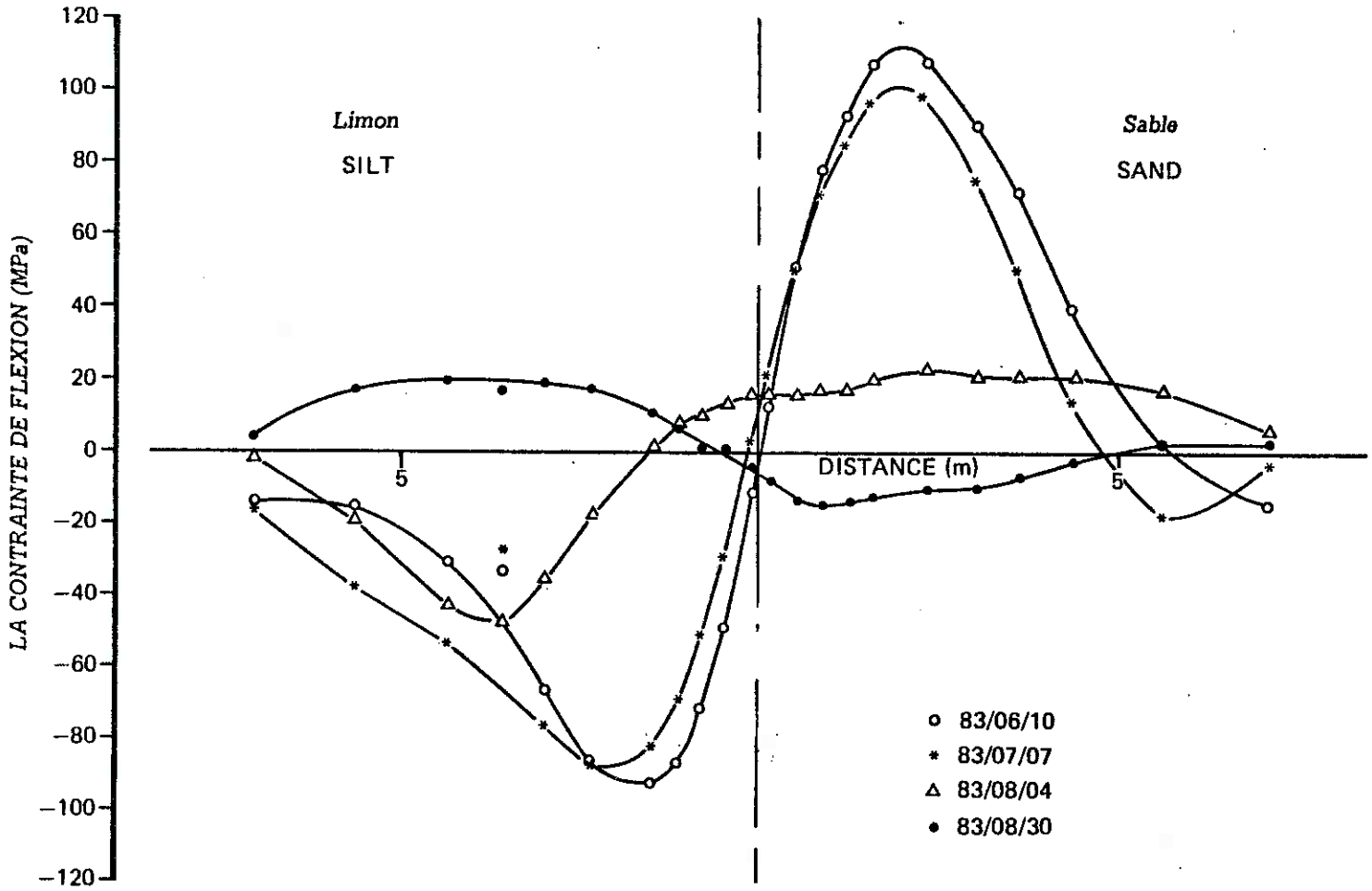

FIGURE 3.6 DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION DE LA CANALISATION PENDANT LE DEGEL DE SURFACE (CALCULEE A PARTIR DES LECTURES DES JAUGES DE CONTRAINTE)

contrainte de flexion résiduelle entre le 4 et le 30 août 1983. Ceci coincide avec l'inversion du sens de la courbure de la canalisation que l'on observe sur la figure 3.5 au 30 août 1983.

3.5 Consolidation et dilatation du sol

Les figures 3.7 à 3.11 fournissent l'évolution de la surface pendant le cycle de dégel. La figure 3.7 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 3.11 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 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.

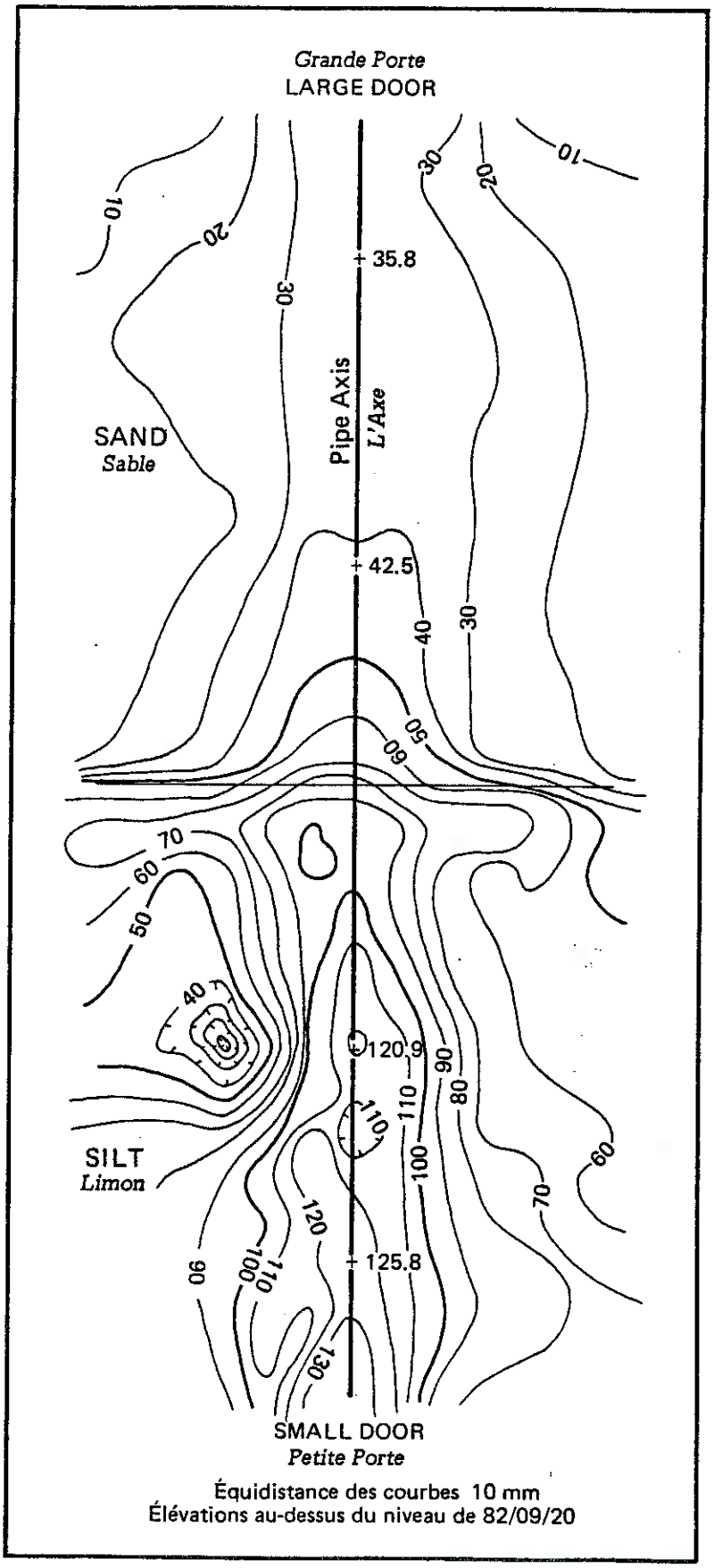

FIGURE 3.7 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE FIN DE LA PREMIERE PERIODE DE GEL 83/06/07

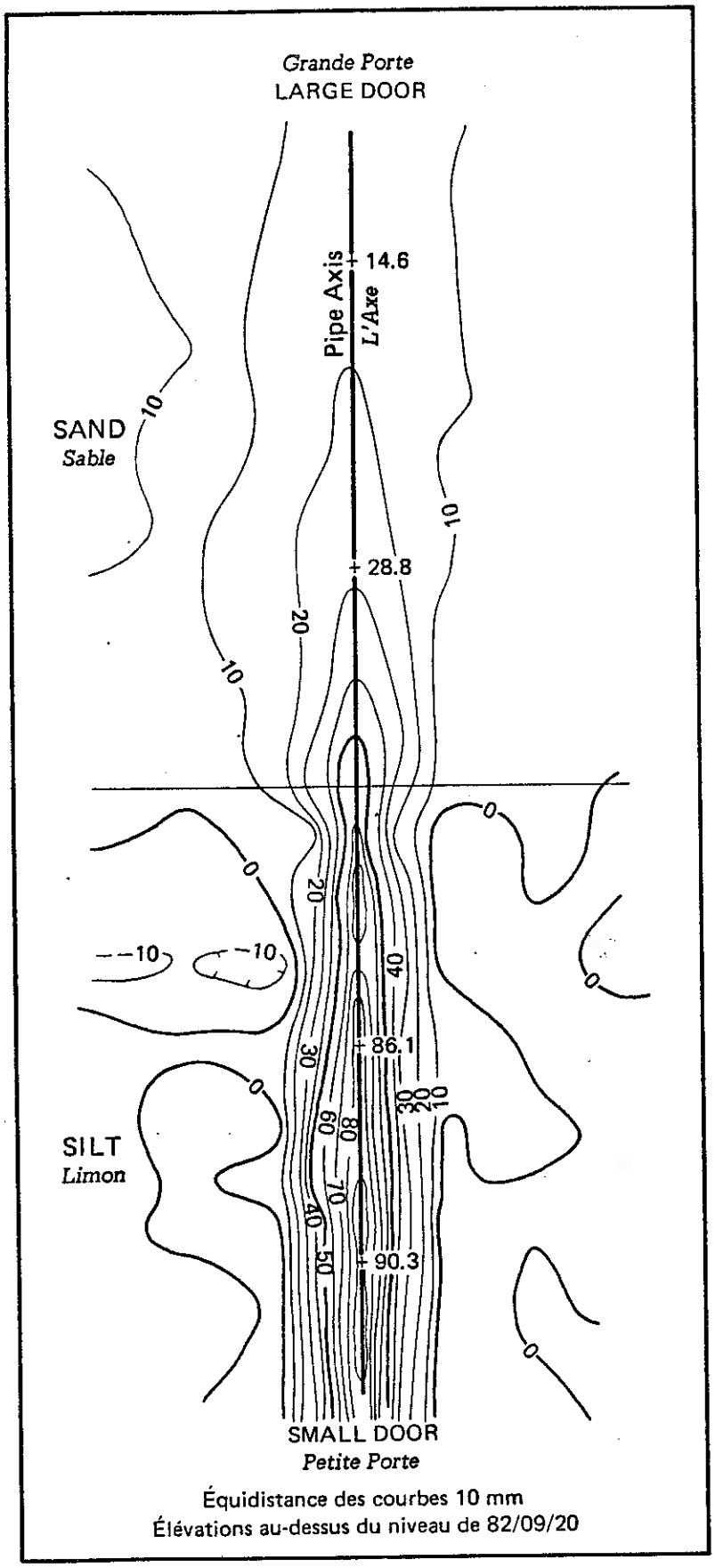

FIGURE 3.8 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/07/12

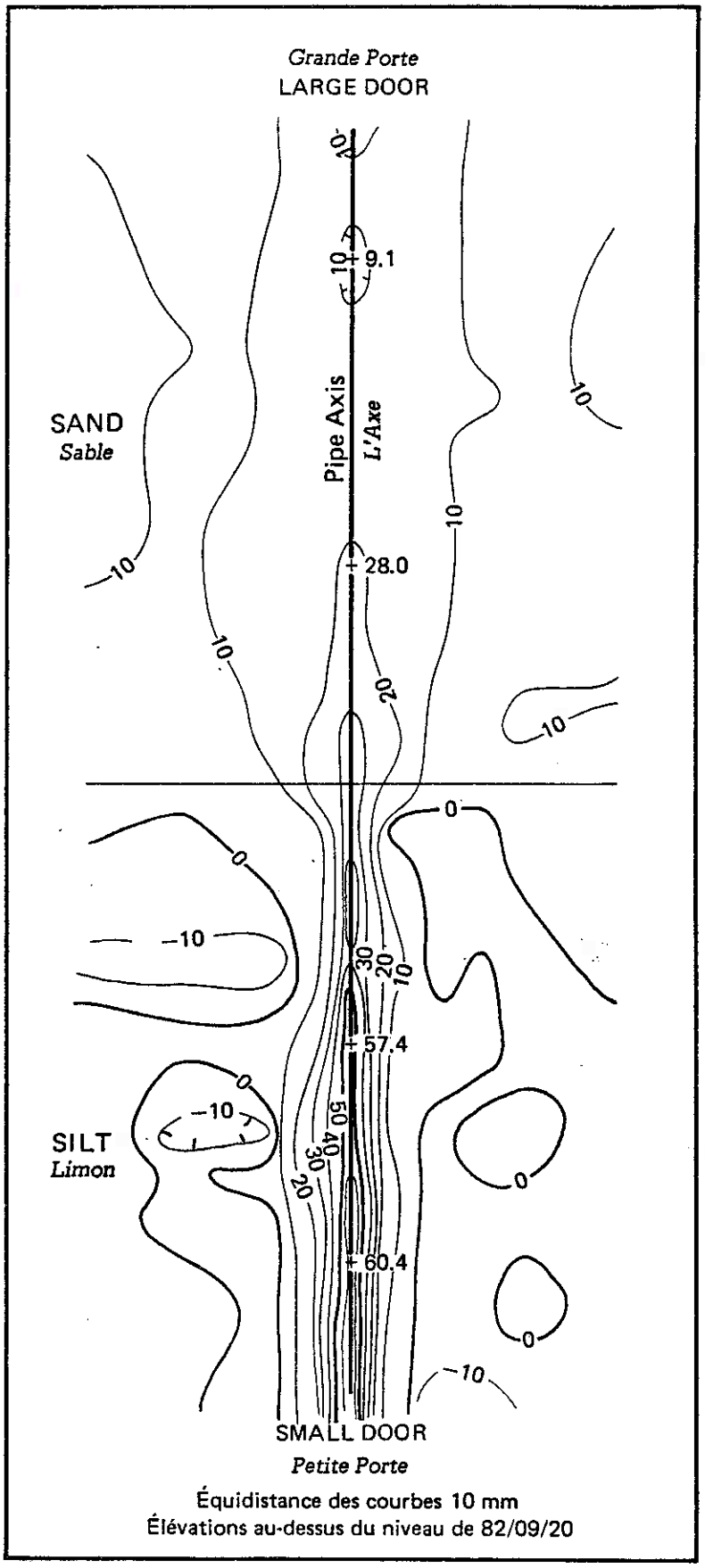

FIGURE 3.9 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/07/26

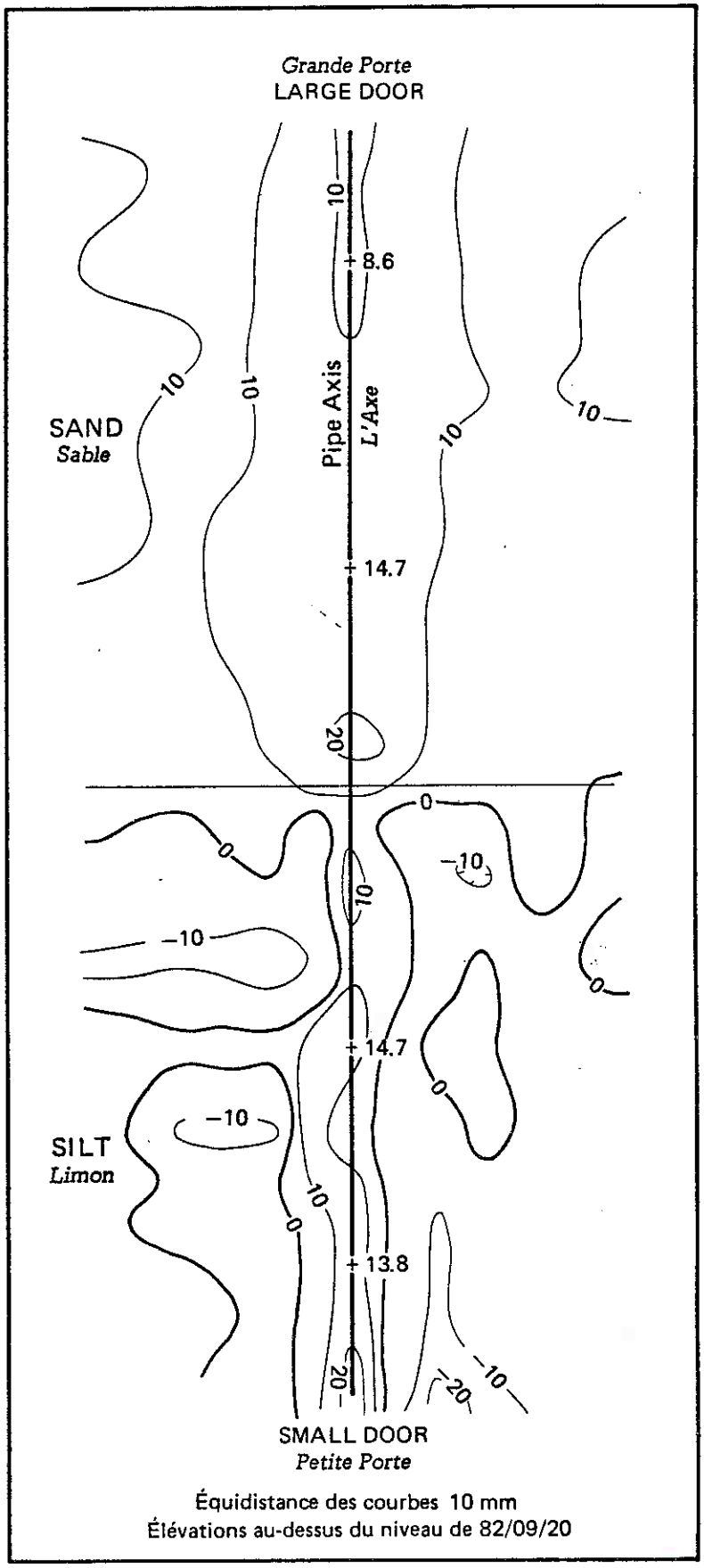

FIGURE 3.10 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/08/23

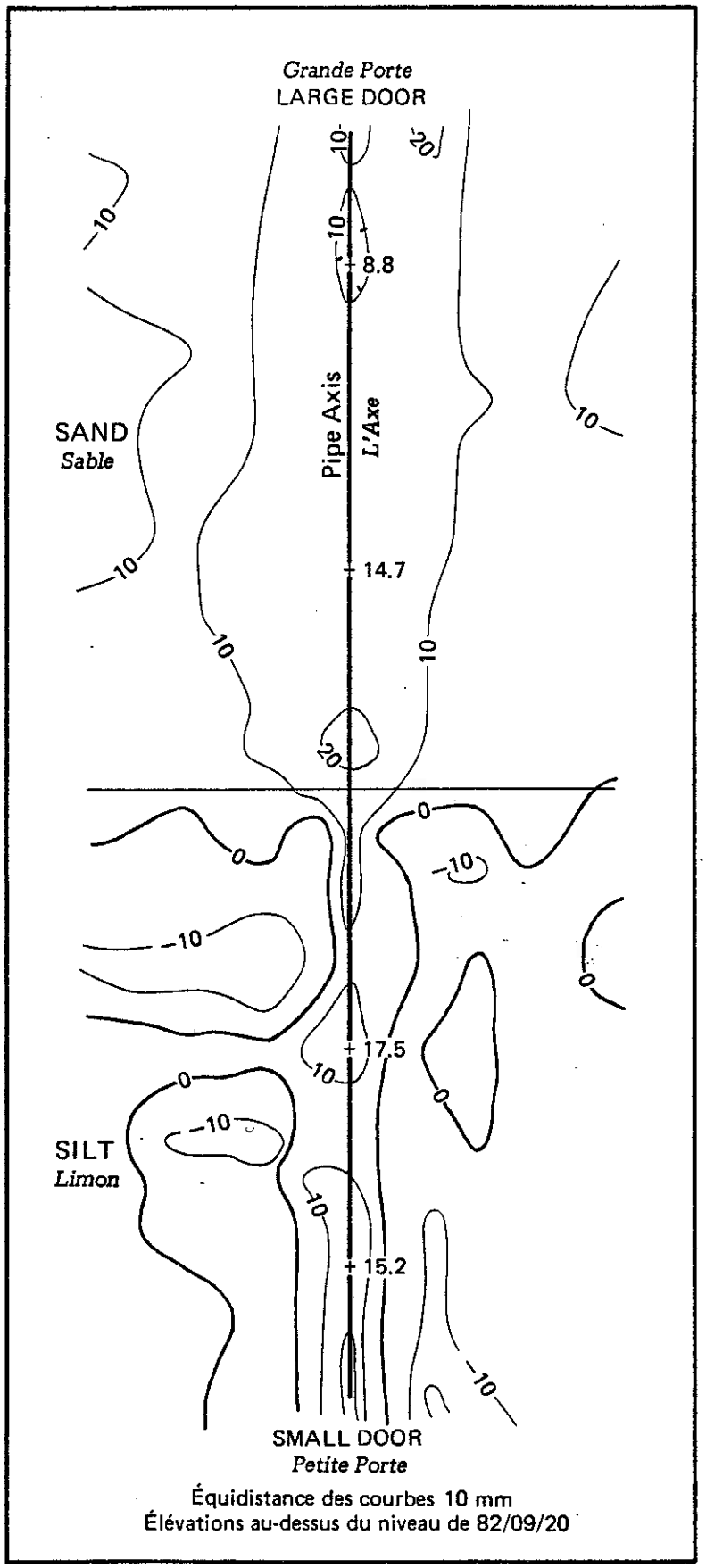

FIGURE 3.11 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU DEGEL 83/09/12

3.6 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 3.12 et 3.13. 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.

4. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES - DEUXIEME PERIODE DE GEL

4.1 Généralités

La seconde période de gel a débuté le 17 octobre 1983 et il est prévu de la poursuivre jusqu'à décembre 1984. La température de l'air ambiant du hangar est maintenue à -1°C et l'air circulant dans la conduite est à -5°C.

4.2 Régime thermique

La modification apportée au système d'acquisition de données a 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 4.1 et 4.2. La profondeur de pénétration de l'isotherme 0°C est donnée sur la figure 4.3.

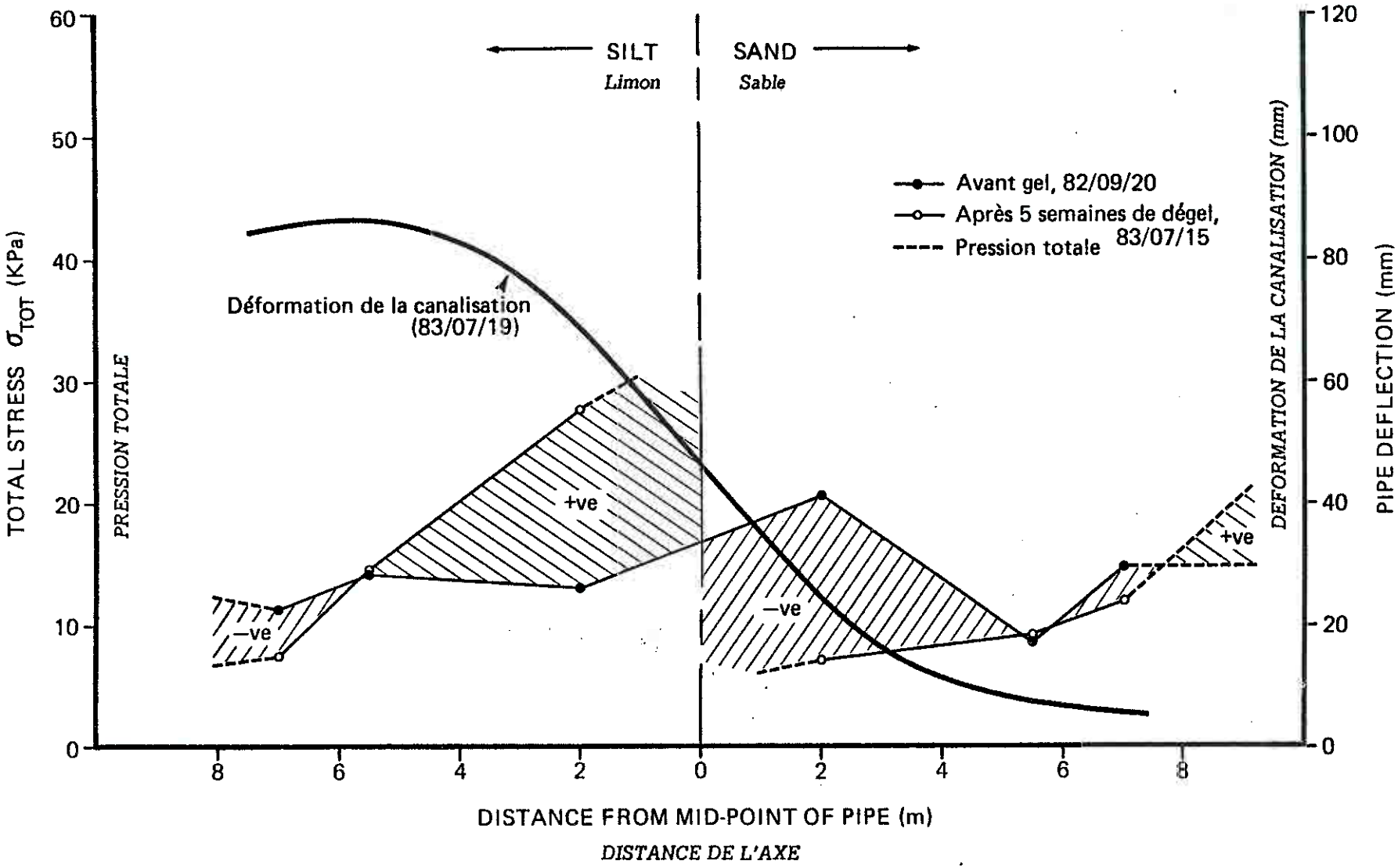

FIGURE 3.12 PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION APRES 5 SEMAINES DE DEGEL DE SURFACE
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

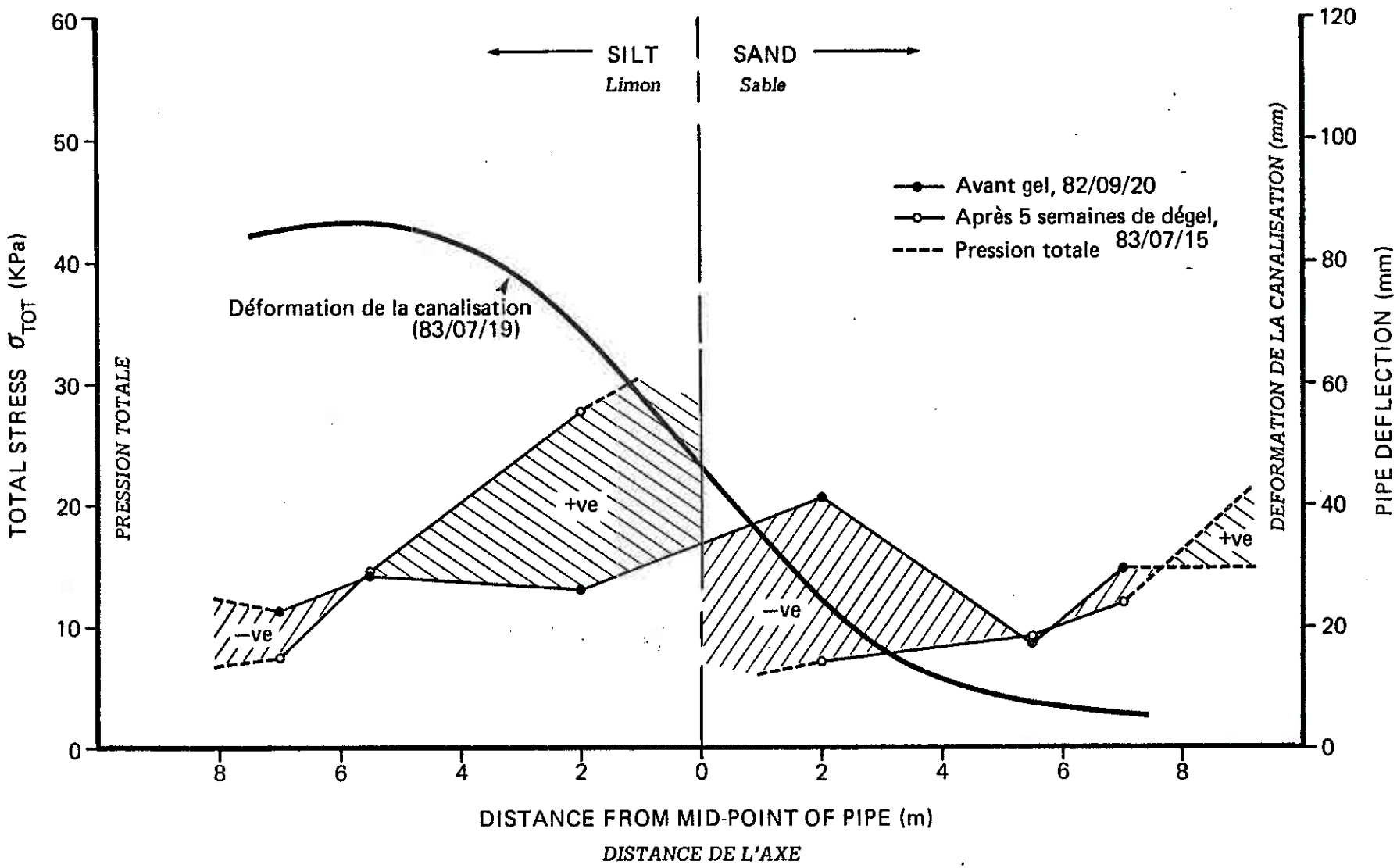

FIGURE 3.13 PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION APRES 12 SEMAINES DE DEGEL DE SURFACE.
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

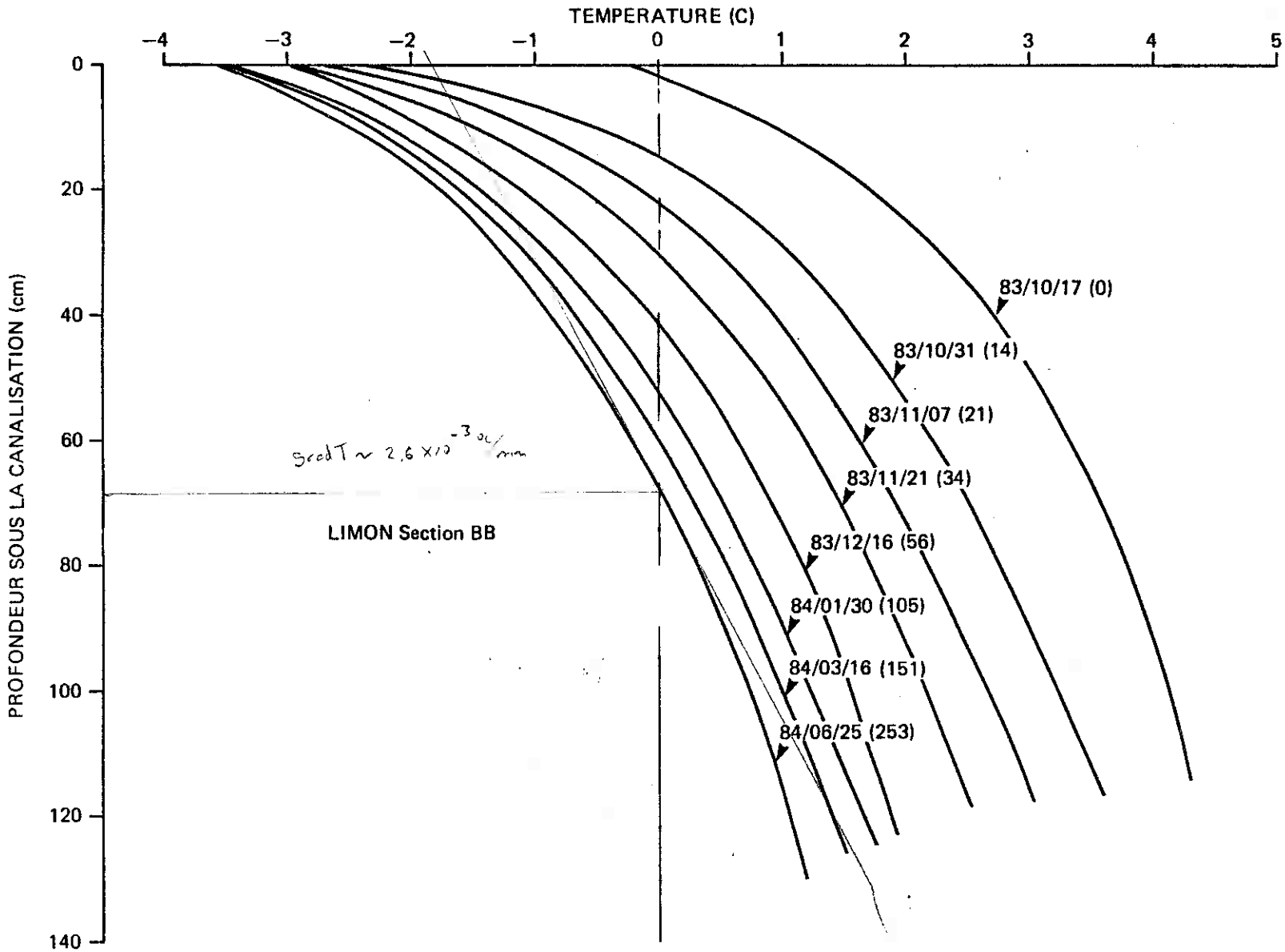

FIGURE 4.1 EVOLUTION DES PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION (DEUXIEME PERIODE DE GEL)

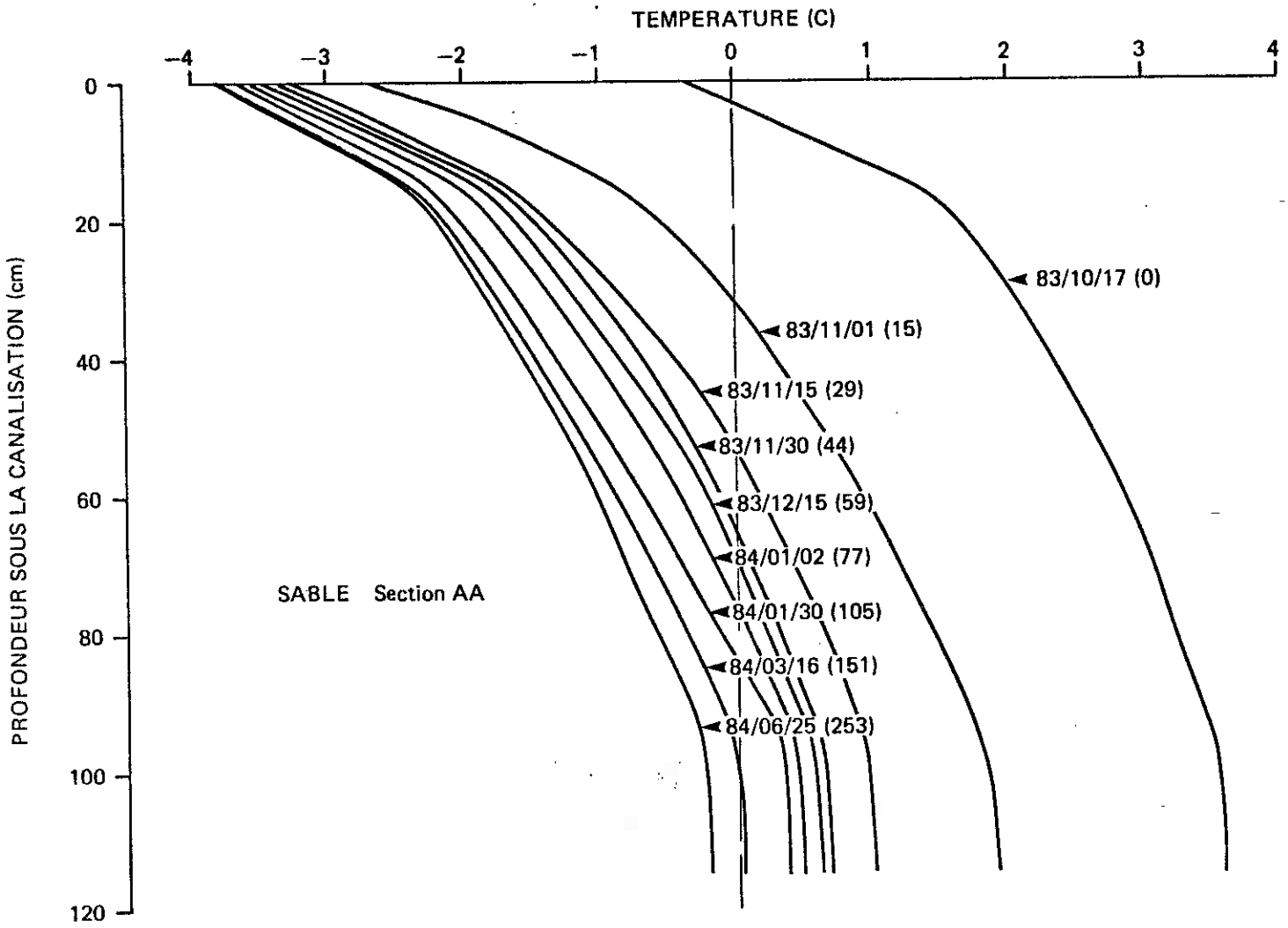

FIGURE 4.2 EVOLUTION DES PROFILS DE TEMPERATURE SOUS LA CANALISATION (DEUXIEME PERIODE DE GEL)

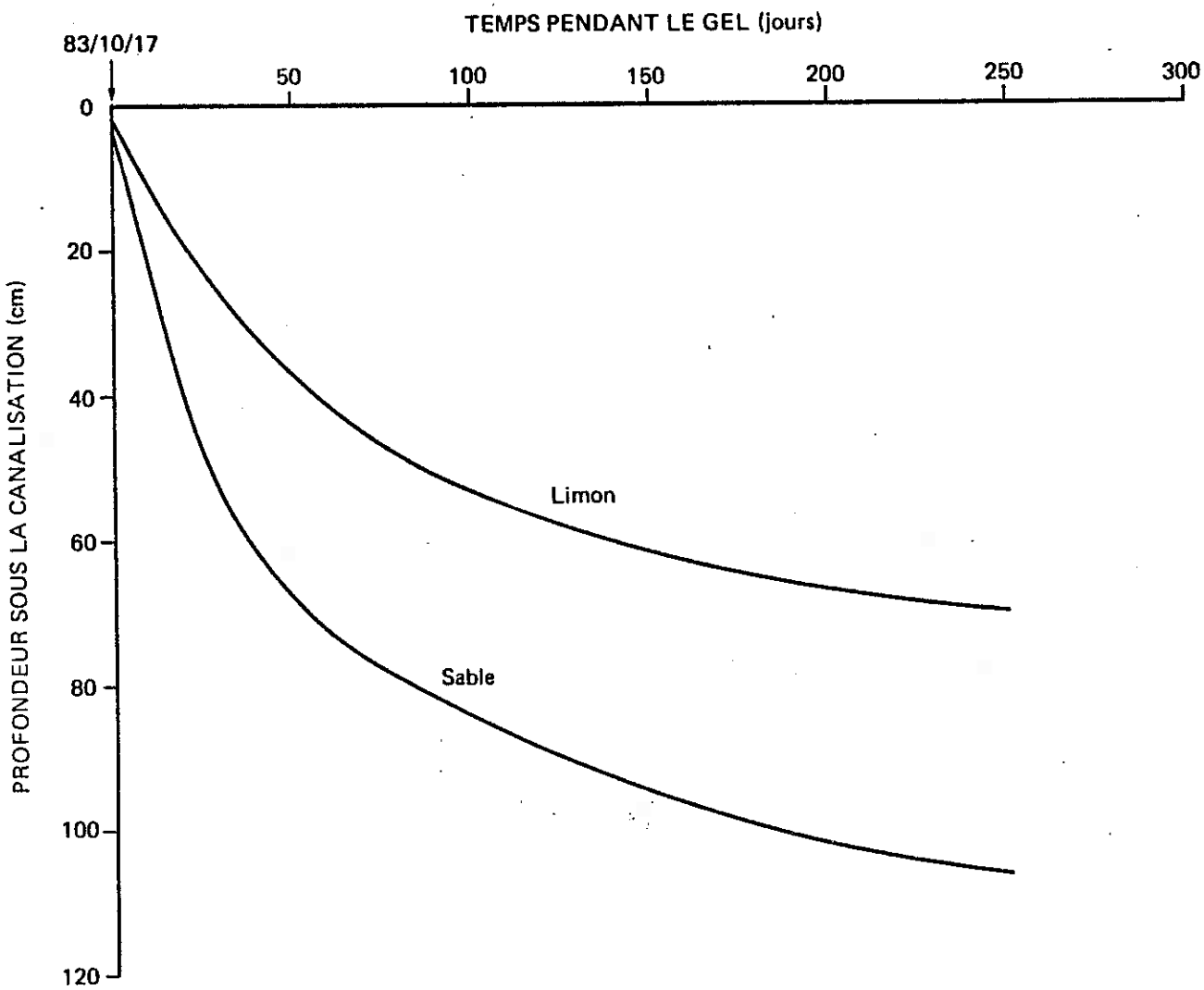

FIGURE 4.3 PROGRESSION DU FRONT DE GEL SOUS LA CANALISATION PENDANT LE DEUXIEME PERIODE DE GEL

4.3 Régime hydraulique

Des relevés des quantités d'eau ajoutée ou enlevée ont été effectués quotidiennement depuis le début de l'expérience.

La figure 4.4 montre le bilan d'eau cumulatif pour la deuxième période de gel. La courbe tend à se stabiliser, ce qui correspond à la diminution du taux de gonflement du sol.

Deux trous fuient faits, à l'aide d'une tarière manuelle, l'un au centre du limon, l'autre dans le limon, près de la transition avec le sable. La figure 4.5 donne les profils de teneur en eau totale pour les deux forages.

Teneur en eau non gelée:

A l'aide des sondes "Time Domain Reflectometry" (T.D.R.) on a mesuré la teneur en eau du sol à des profondeurs différentes au-dessous de la canalisation. La littérature technique rend compte, dans une large mesure, de l'emploi des sondes T.D.R. pour la détermination de la teneur en eau du sol. Deux montures furent installées directement au-dessous de la canalisation dans le sable et dans le limon aux emplacements B-B et A-A. Chaque monture tient 14 sondes espacées à des intervalles de 5 ou 10 cm. Ces sondes ont fourni des données sûres pendant toute la durée de l'expérience.

Les données volumétriques de la teneur en eau à l'état liquide dans le limon à des dates choisies pendant la deuxième période de gel, sont présentées à la figure 4.6. La même figure indique également la pénétration de l'isotherme 0°C pendant la période de gel telle que déterminée par les données du thermocuple. On a supposé que la monture

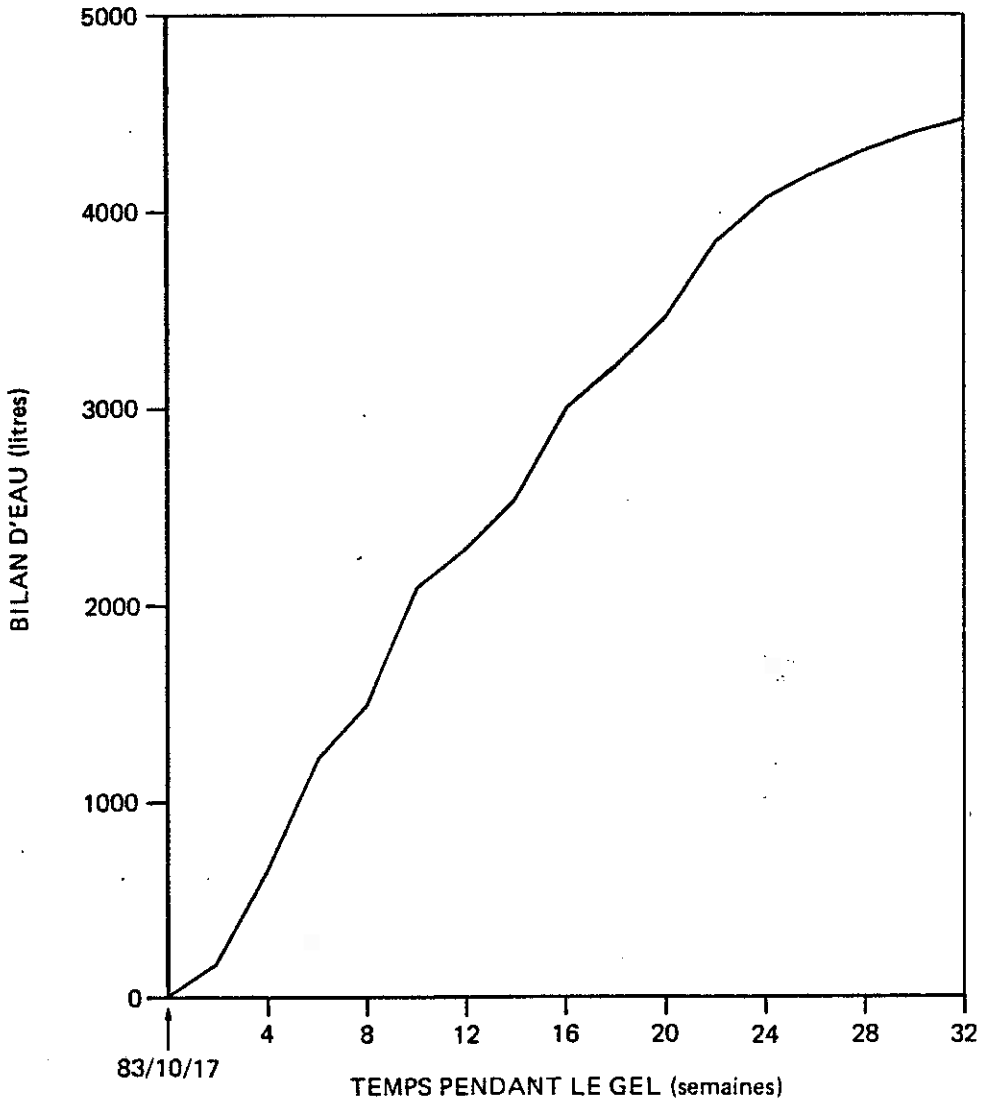

FIGURE 4.4 BILAN D'EAU CUMULATIF PENDANT LA DEUXIEME PERIODE DE GEL

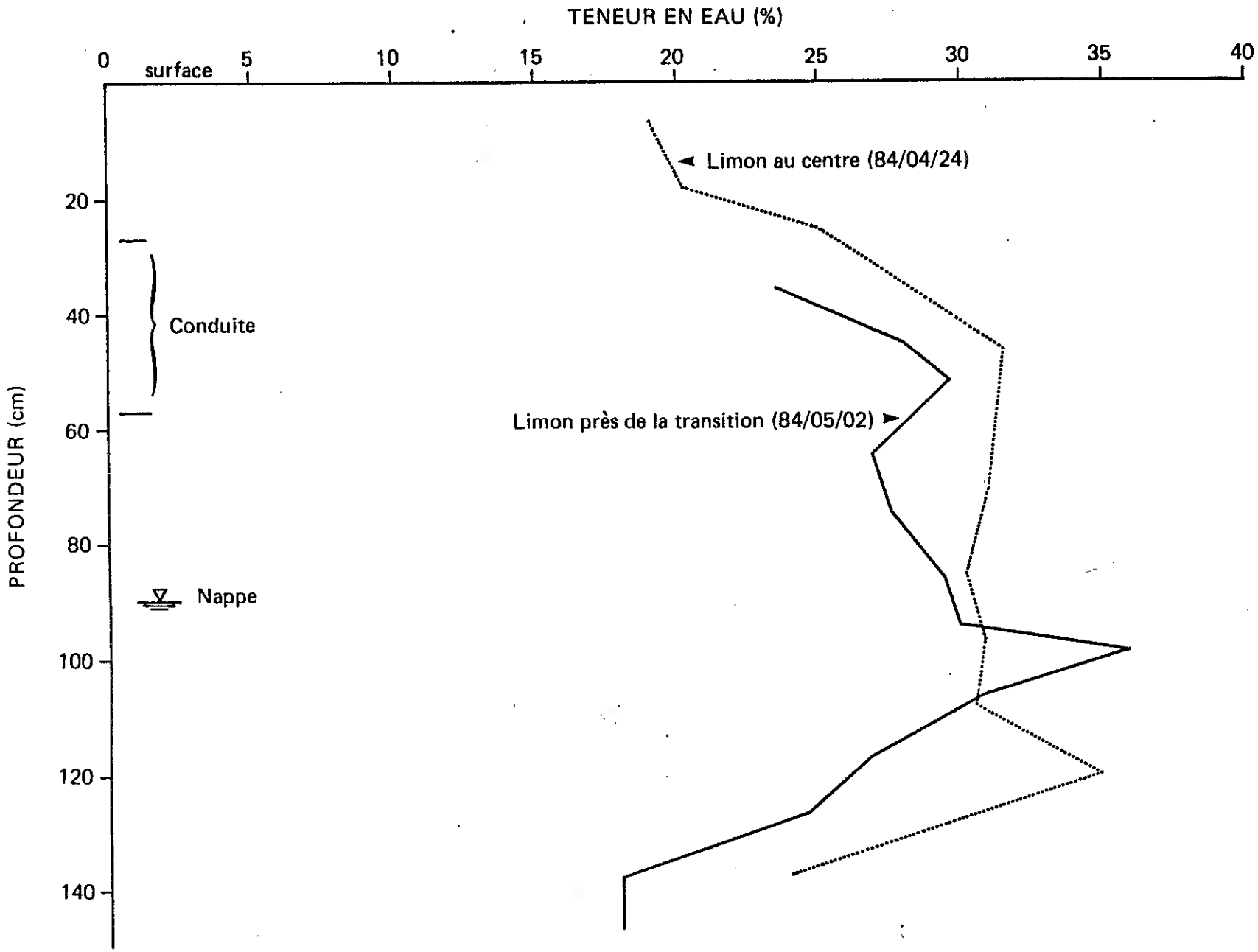

FIGURE 4.5 TENEUR EN EAU DANS LE LIMON (PRES DE L'AXE DE LA CONDUITE) EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

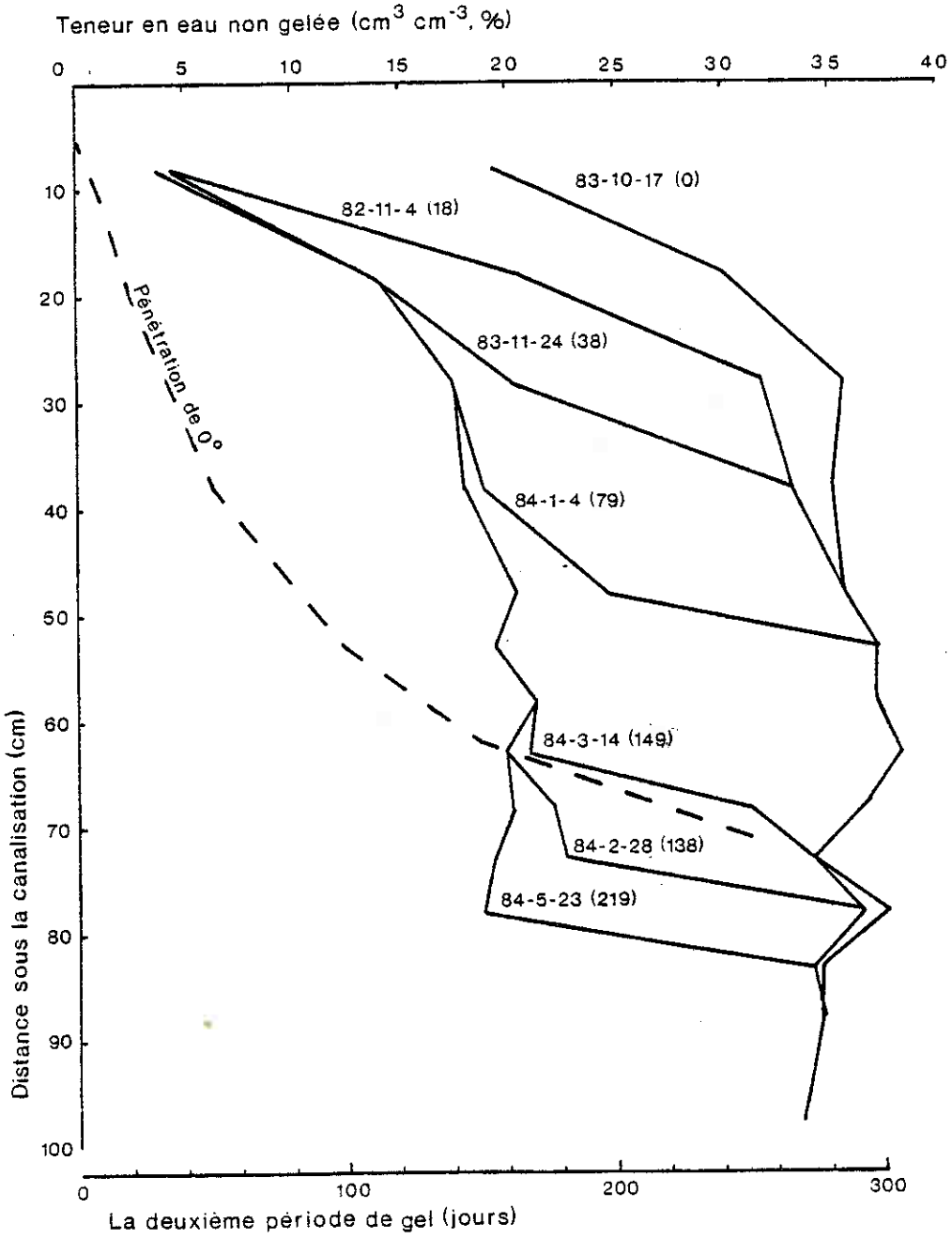

FIGURE 4.6 - TENEUR EN EAU NON GELEE PENDANT LA DEUXIEME PERIODE DE GEL (SECTION B-B)

de la sonde T.D.R. se dilate au même taux que le canalisation.

Au début de la deuxième période de gel (83/10/17), l'isotherme 0°C se trouvait entre 5 à 10 cm au-dessous de la canalisation. Cela se manifeste également dans les données du T.D.R. comme présentées par la réduction de la teneur en eau à l'état liquide à une profondeur de 8 cm. Tandis que le front de gel avançait à travers le sol, la diminution successive de la teneur en eau à l'état liquide a été notée dans les données du T.D.R. En général, les données du thermocouple et du T.D.R., qui indiquent la posiion du front de gel, s'accordent bien jusqu'au 150e jour. Après cette date, elles révèlent une divergence croissante de la position interprétée de l'isotherme 0°C. Au 219e jour, par exemple, les données du T.D.R. indiquent une diminution de la teneur en eau à l'état liquide entre 78 et 83 cm au-dessous du tuyau. Cependant, les données du thermocouple suggèrent que l'isotherme 0°C se trouvait à une profondeur de 68 cm. Il se peut que la divergence évidente dans la situation du front de gel soit attribuable ou à des erreurs dans les données du thermocuple ou à des incertitudes dans l'emplacement des montures du T.D.R. ou bien, à une dé-saturation du sol à l'avance du front de gel.

4.4 Déformation de la canalisation

A la fin de la seconde période de gel, la canalisation avait repris, à peu de chose près, sa position initiale.

Lors de la seconde période de gel, la canalisation se déforma, ceci étant dû au gonflement différentiel entre le sable et le limon. Comme le montre la figure 4.7, la canalisation a subi un déplacement

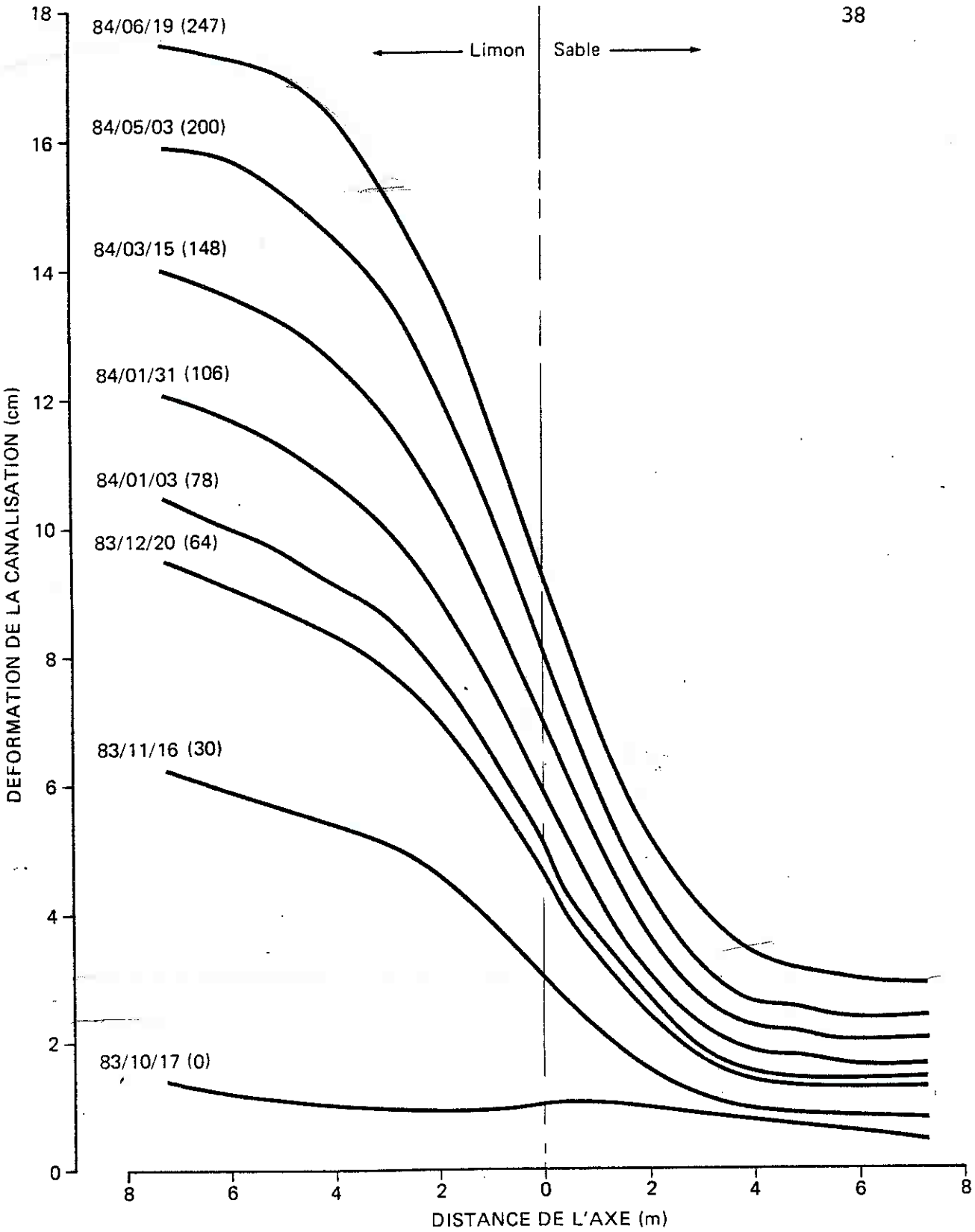

FIGURE 4.7 EVOLUTION DU PROFIL EN LONG DE LA CANALISATION PENDANT LA DEUXIEME PERIODE DE GEL

vers le haut dans les 2 sols. Ce déplacement est d'environ 16 cm dans le limon tandis qu'il n'est que de deux cm dans le sable. Nous voyons aussi que la déformation de la canalisation s'est produite dans la zone de transition entre les deux sols.

La détermination de l'état des contraintes dans la canalisation a été effectuée à l'aide des jauges de déformation. La figure 4.8 donne la représentation de l'état de contrainte dans la conduite, depuis le début de la seconde période de gel. Après 250 jours de gel, une contrainte maximum de plus de 160 MPa a été atteinte, c'est 80% de la limite élastique de la conduite.

4.5 Paramètres physiques du sol

Le soulèvement relatif de la surface des deux sols, depuis le début de la seconde période de gel, est donné aux figures 4.9 à 4.13. Les lignes de niveau tracées sur ces figures fournissent le gonflement obtenu.

Les figures 4.14 et 4.15 montrent le soulèvement du sable (profil AA et du limon (profil BB) le long de deux profils. Ces figures font apparaître un gonflement symétrique par rapport à l'axe de la canalisation.

Des observations au moyen des tubes télescopiques montrent un fonctionnement satisfaisant, et la valeur du soulèvement total concorde étroitement avec celle du nivellement (fig. 4.16). Le soulèvement différentiel en profondeur dans le sol (fig. 4.17) montre, avec la pénétration du front de gel, l'arrivée du soulèvement à un niveau progressivement plus profond (à cause d'une zone gelée résiduelle autour

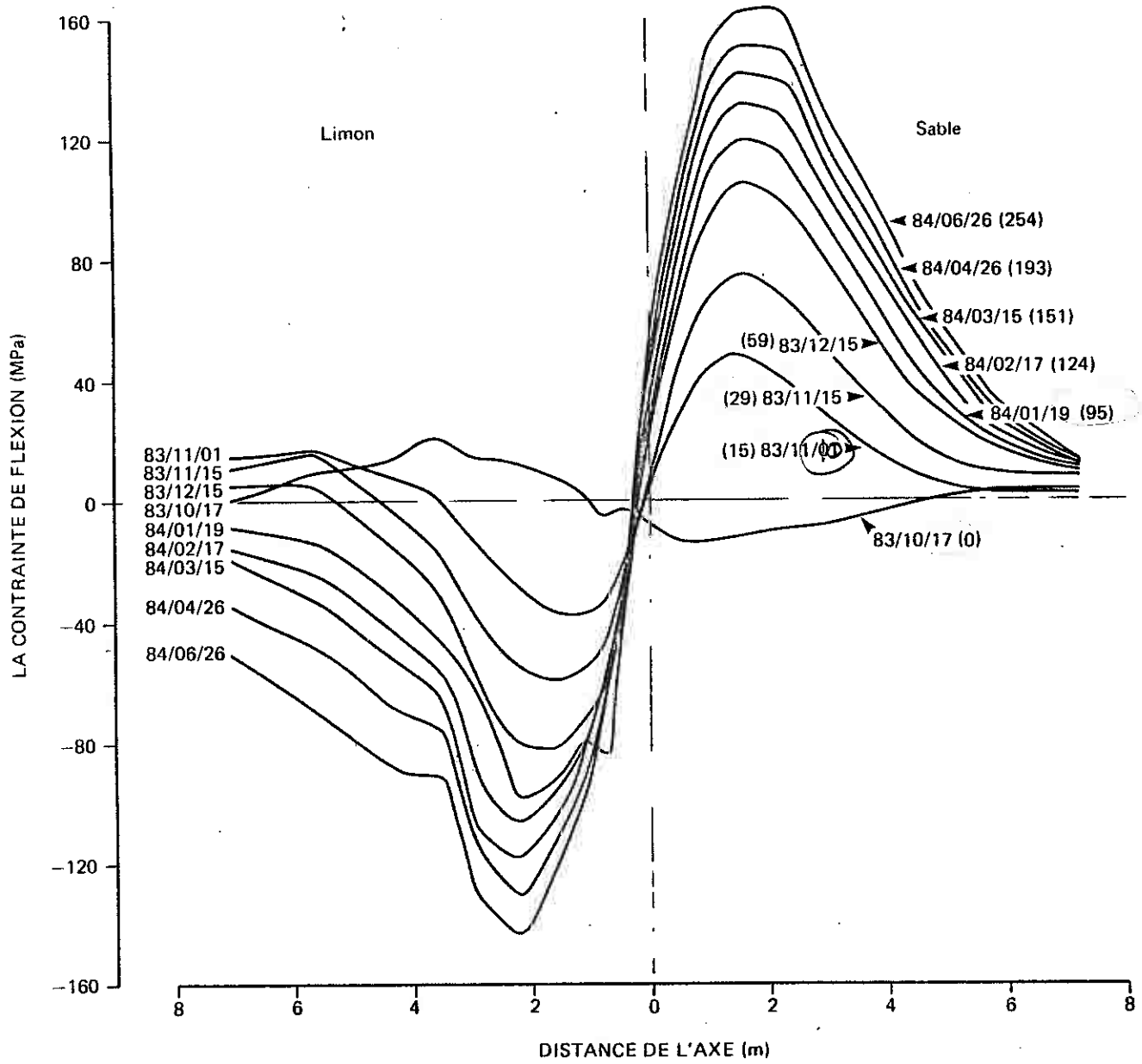

FIGURE 4.8 DISTRIBUTION DE LA CONTRAINTE DE FLEXION DE LA CANALISATION PENDANT LE ~~DEGEL DE SURFACE~~ Deuxième période de gel.

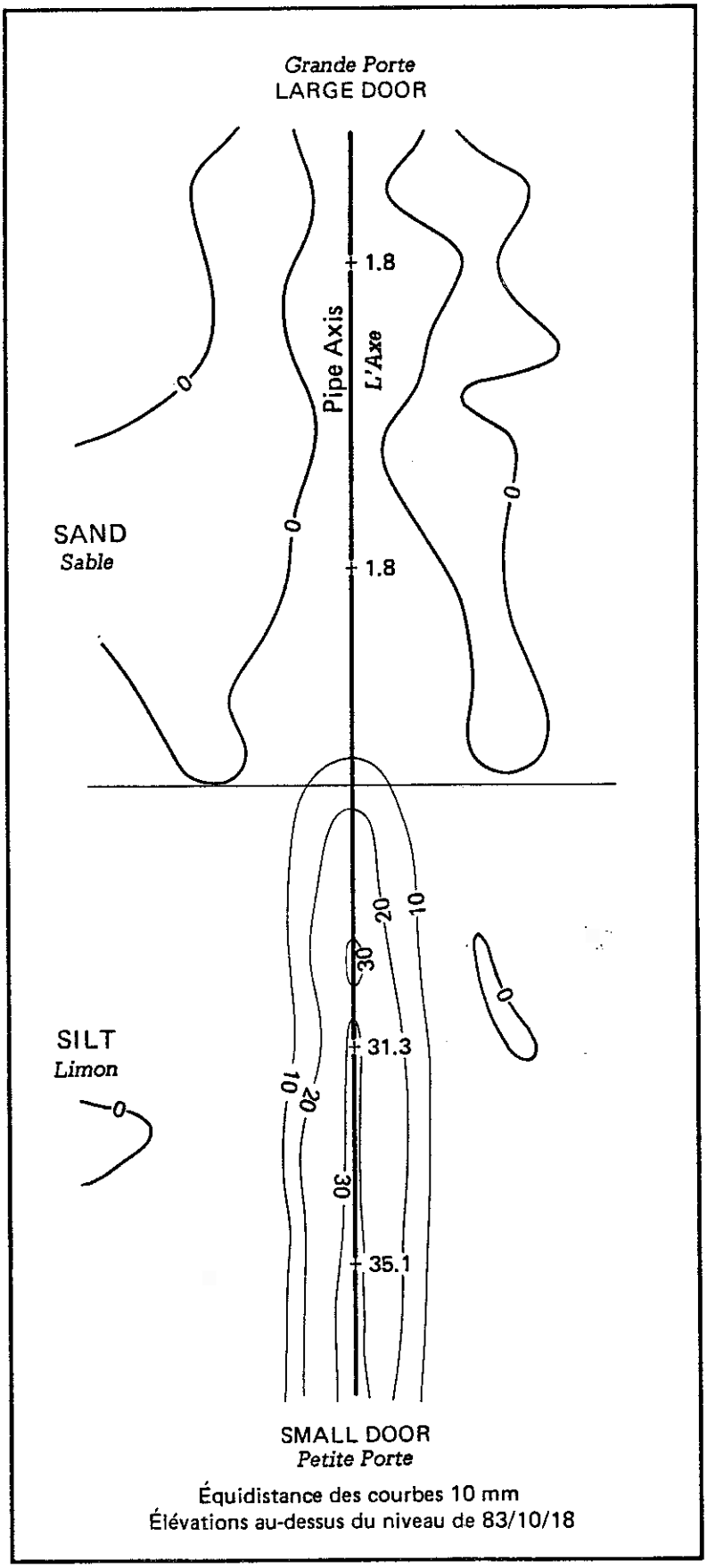

FIGURE 4.9 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU GEL 83/11/02

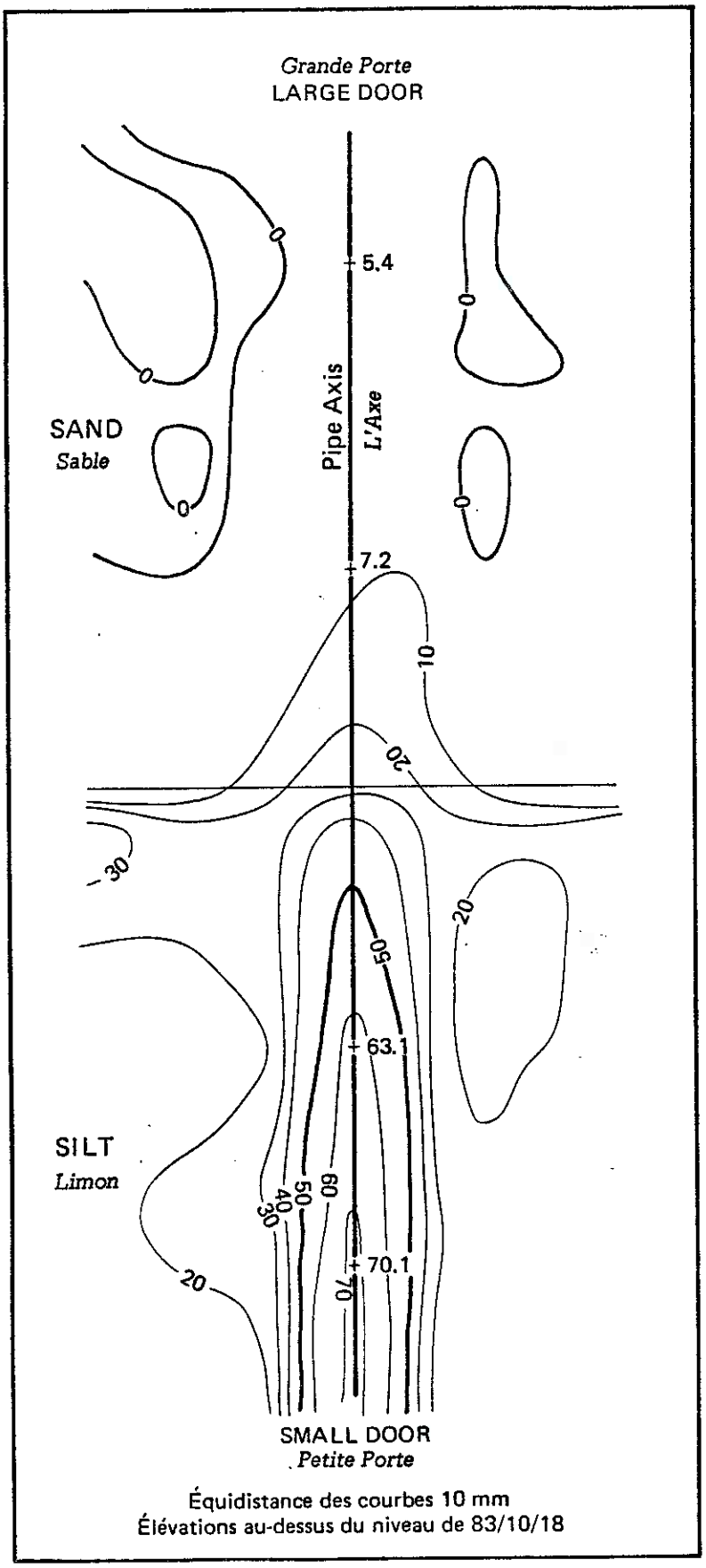

FIGURE 4.10 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL APRES LE DEBUT DU GEL 83/12/02

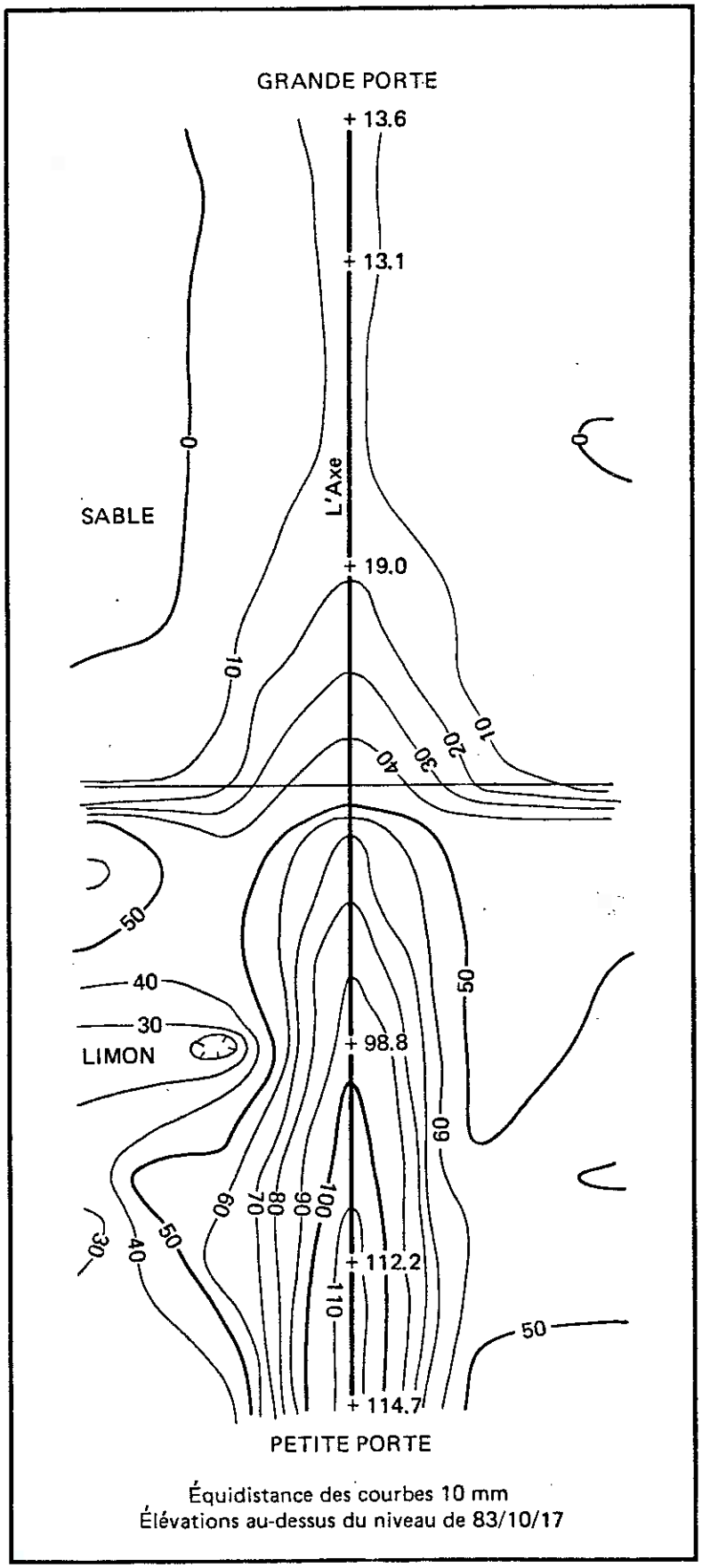

FIGURE 4.11 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
84/02/01

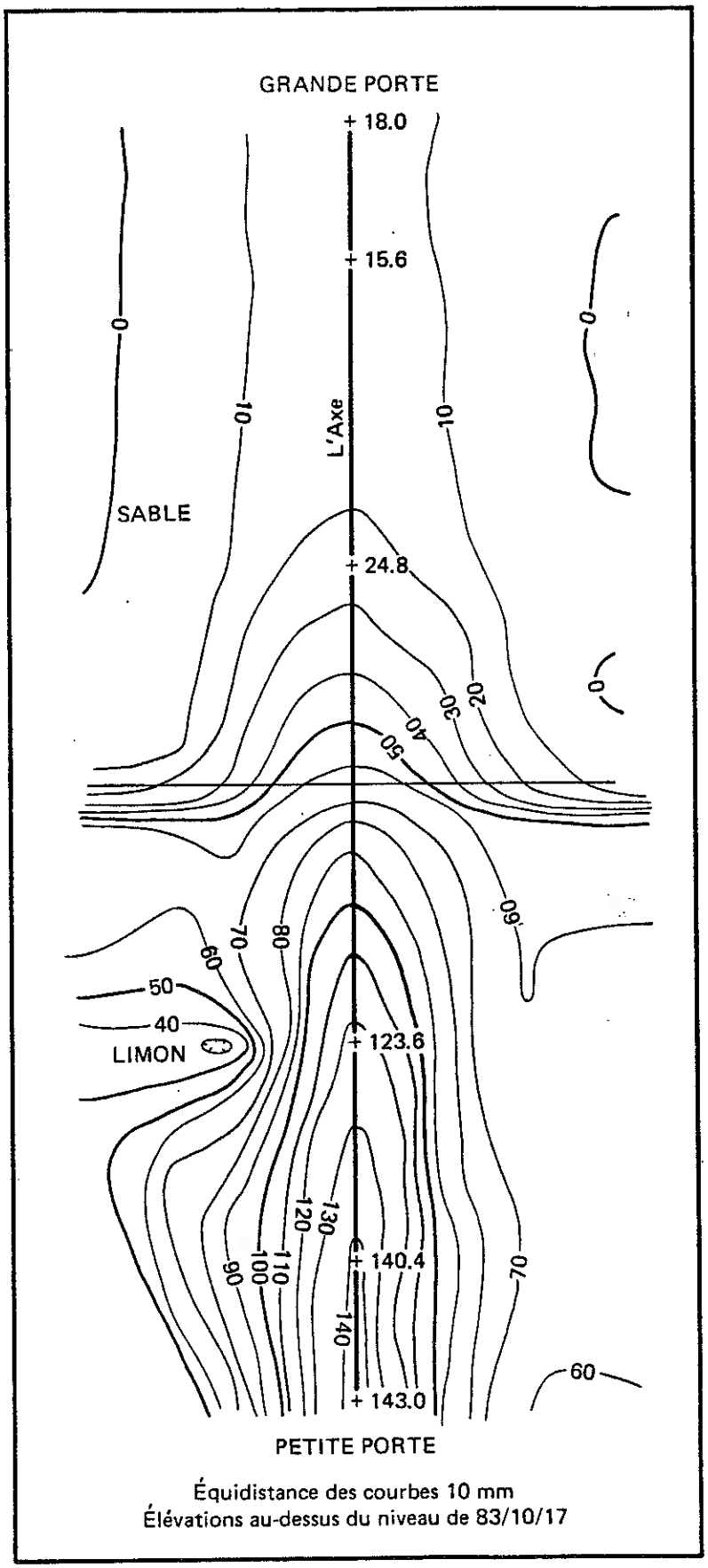

FIGURE 4.12 TOPOGRAPHIE DE LA SURFACE DU SOL
84/04/03

FIGURE 4.14 SOULEVEMENT DE SURFACE DU SABLE

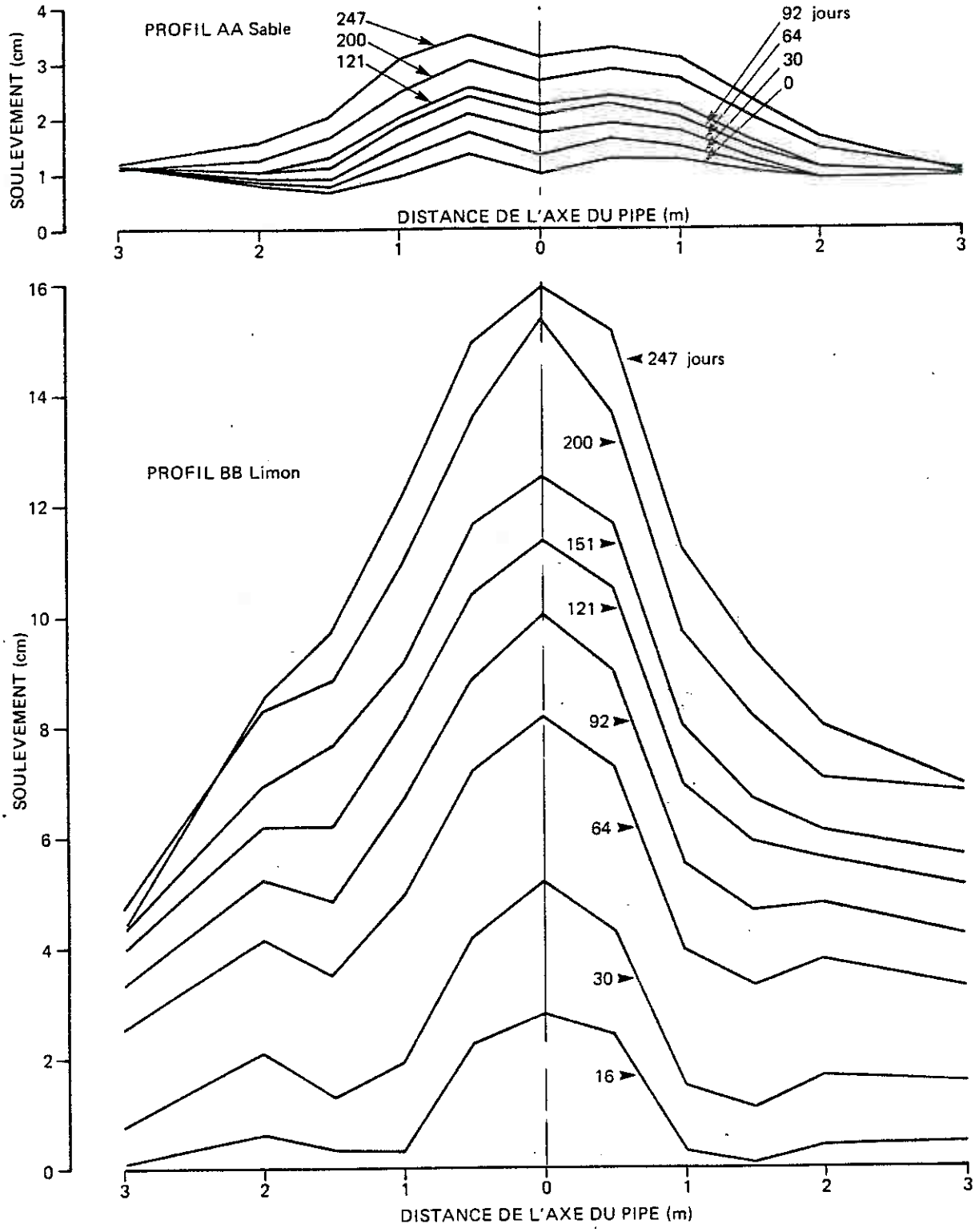

FIGURE 4.15 SOULEVEMENT DE SURFACE DU LIMON

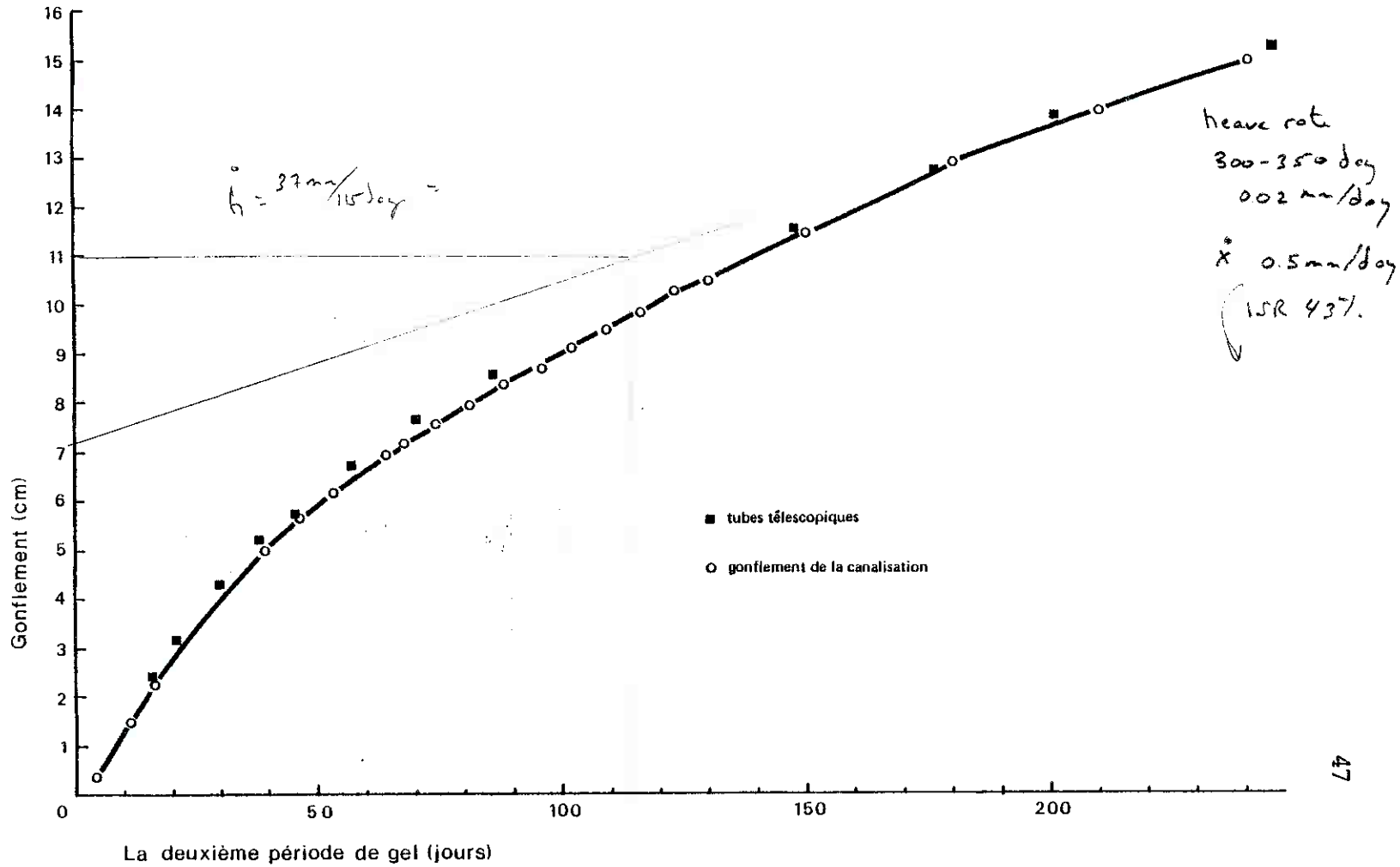

FIGURE 4.16 - LE GONFLEMENT TOTAL DES TUBES TELESCOPIQUES

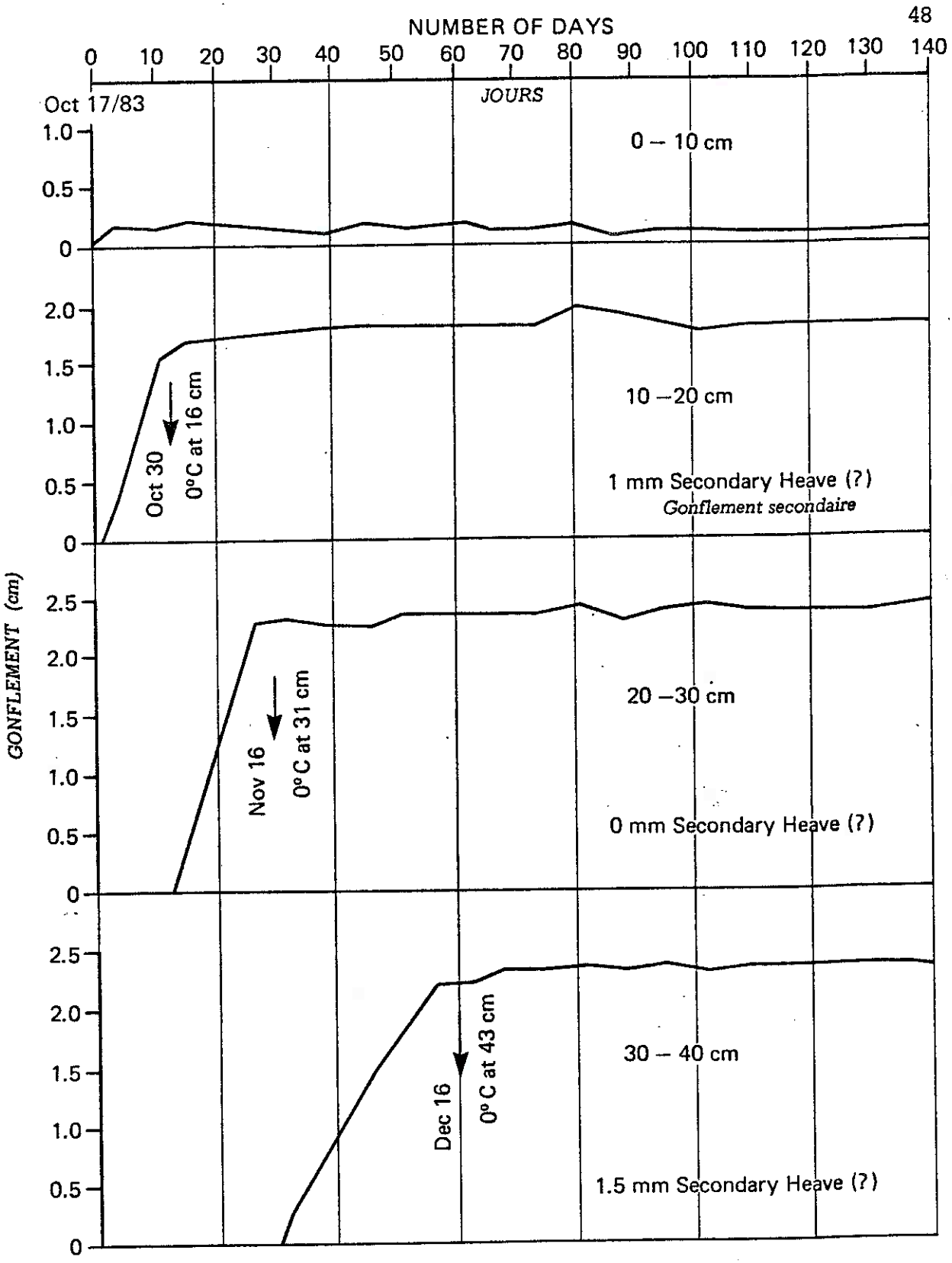

FIGURE 4.17- LE SOULEVEMENT DIFFERENTIAL EN PROFONDEUR DANS LE SOL

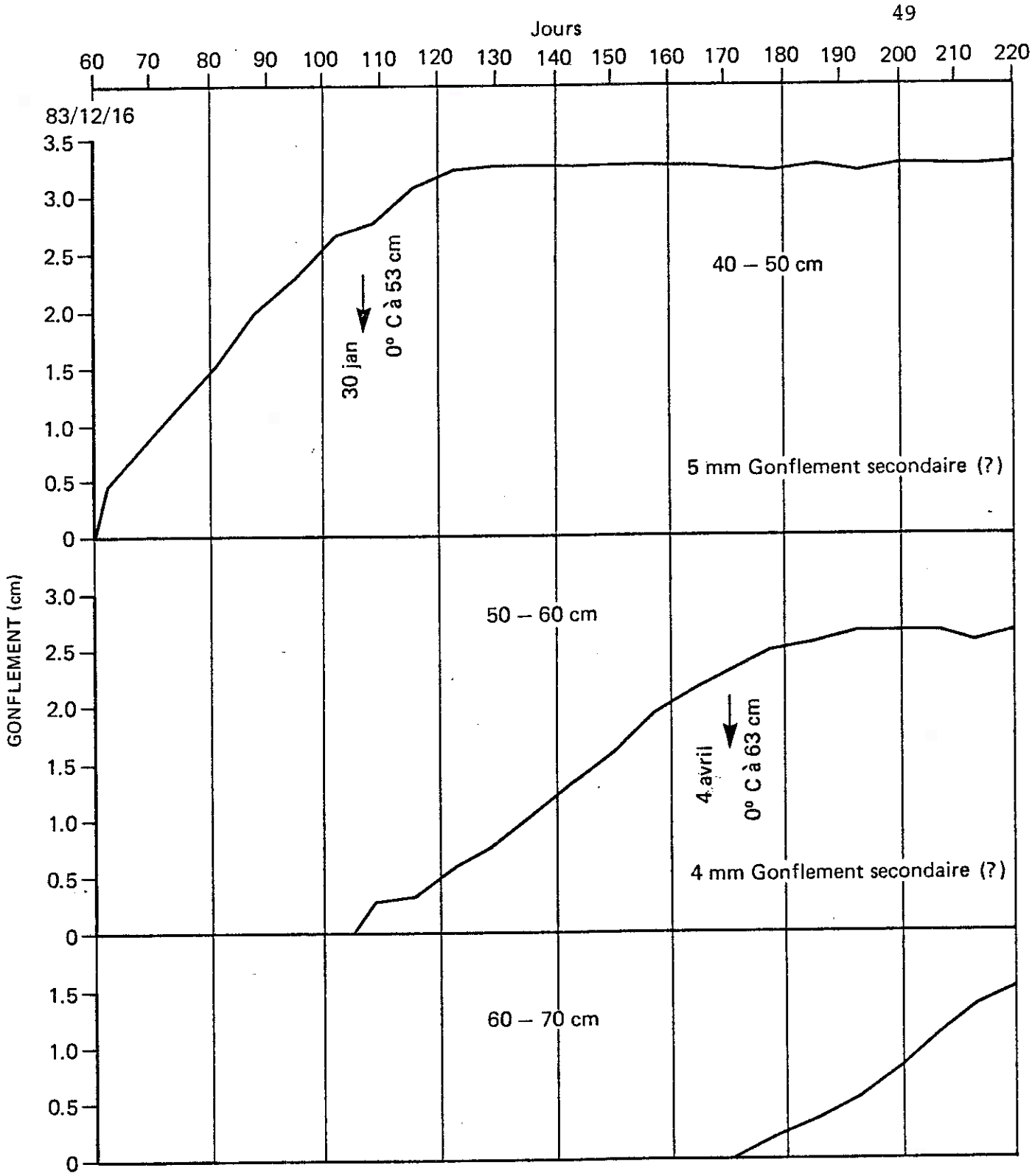

FIGURE 4.17 (cont.)-
LE SOULEVEMENT DIFFERENTIAL EN PROFONDEUR DANS LE SOL

du tuyau, qui provient du premier gel, la couche de 0 à 10 cm était déjà gelée en grande partie et ne montrait pas beaucoup de soulèvement lors du deuxième cycle de gel).

Avec le temps, le front de gel descend au-dessous du tuyau, mais à un taux décroissant (fig. 4.16). Au début, dans les couches de sol supérieures, le taux du gonflement (H) était assez élevé, mais il a diminué graduellement avec le temps (fig. 4.16 et 4.17). Cependant, le rapport entre le taux de soulèvement et le taux de pénétration du gel, H/X, a graduellement augmenté. Cela indique que la chaleur extraite du sol dérive, à un degré augmentant, du développement de la glace de ségrégation.

Quant aux deux couches inférieures (voir fig. 4.17), apparemment un gonflement différentiel se produit simultanément. Dans le cas de la couche de 40 à 50 cm, le gonflement doit se produire entièrement à l'intérieur du sol gelé. Dans les couches supérieures, un gonflement secondaire n'est pas si évident.

Des fissures sont apparues, principalement dans le limon, le long de l'axe de la conduite ainsi qu'aux environs des tensiomètres. Certaines fissures ont une longueur de 250 cm, leur largeur maximale est de 12 mm et leur profondeur est supérieure à 18 cm.

Des profils de densité ont été effectués à l'aide de la double sonde gamma mais les résultats ne sont pas encore dépouillés.

Jusqu'à présent quatre forages ont été effectués dans le limon. Deux de ces forages ont été réalisés avec une tarière manuelle. Les profils de teneur en eau de ces forages sont présentés à la figure 4.5. Les deux autres forages ont été effectués avec une foreuse rotative et

un carothier de 80 mm de diamètre. Les échantillons ainsi obtenus contenaient plusieurs lentilles de glace, d'une épaisseur de plusieurs millimètres. Ces lentilles étaient horizontales et, quelques-unes, verticales. Une étude de l'orientation des lentilles de glace, à partir de lames minces prélevées sur les carottes, est présentement en cours.

Des essais scissométriques ont été realisés sur la partie non gelée du sol, à l'intérieur des trous de forages. Ces essais ont permis de détecter une couche compactée sous le front de gel, suivie d'une couche plus molle. Cette couche compactée peut être due à la consolidation provoquée par la migration de l'eau vers le front de gel.

D'autres forages sont prévus dans les semaines à venir. Les anneaux magnétiques se sont révélés une façon simple et efficace de suivre le mouvement du sol à différentes profondeurs. A cause de leur implantation récente, trop peu de résultats sont maintenant disponibles pour évaluer le déplacement à différentes profondeurs. La mesure de l'inclinaison des tiges de la conduite s'est révélée fiable. La figure 4.18 représente l'évolution de l'inclinaison des tiges, depuis le début de la seconde période de gel.

En général, une bonne précision a été obtenue sur les mesures thermiques et, malgré certaines périodes de chaleur, aucune panne n'est survenue aux systèmes de réfrigérations de la chambre froide et de la conduite.

4.6 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

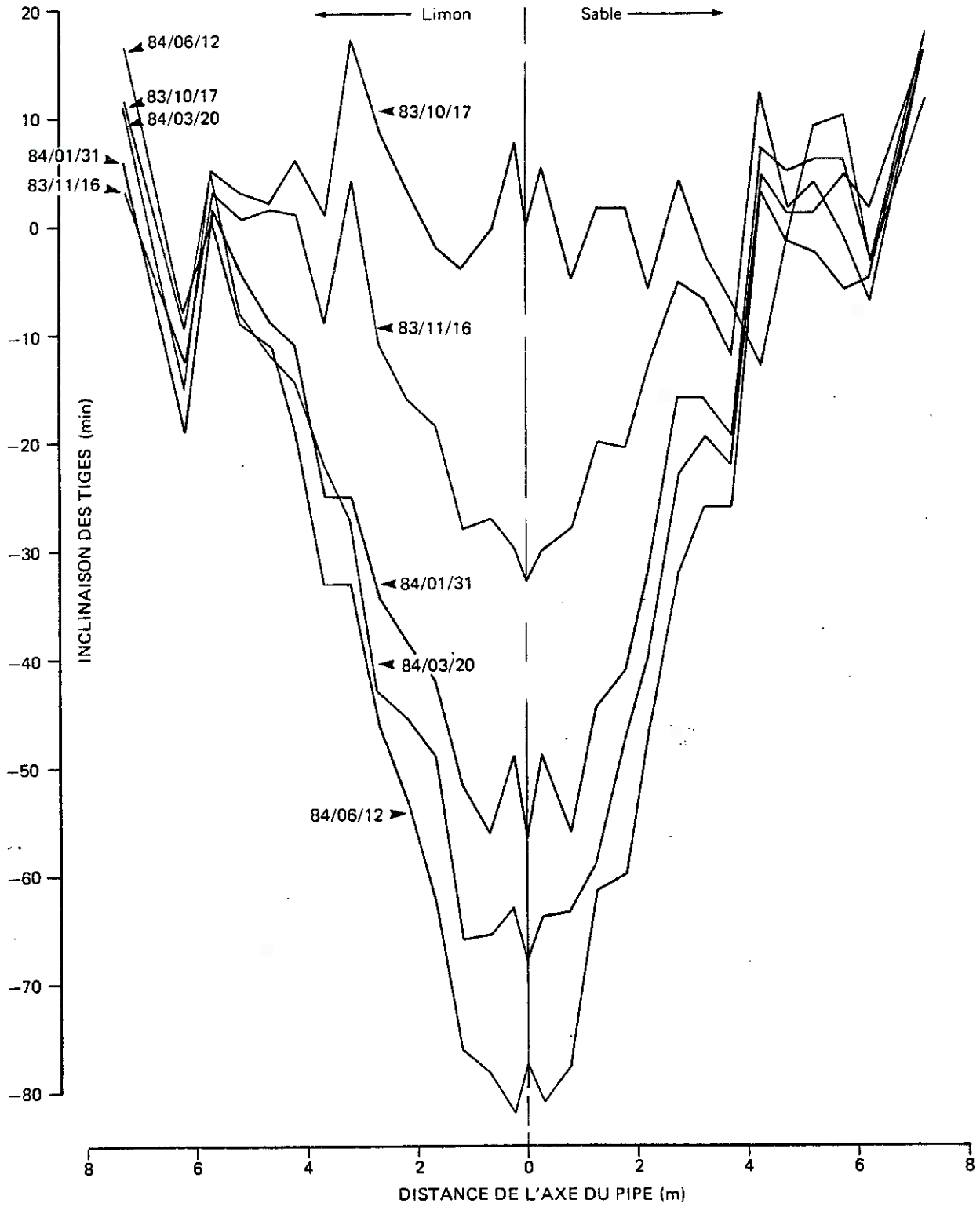

FIGURE 4.18 EVOLUTION DE L'INCLINAISON DES PLATEAUX SUR LA CANALISATION

donnée sur les figures 4.19 et 4.20. 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.

Près de l'interface sable-limon apparaît une pression 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.

On a observé une particularité intéressante dans les données pour les cellules Glotzl enterrées à des profondeurs différentes au-dessous de la canalisation dans le limon. Comme le montre la figure 4.21, il paraît que la contrainte totale change d'une manière spectaculaire lorsque la cellule s'incorpore dans le sol gelé. La pression dans la cellule établie dans le sol augmente tandis que la pression totale dans le sol inférieur non gelé reste invariable. Cela suggère que l'anneau de sol gelé autour de la canalisation a une mode de contrainte différente du sol non gelé qui l'entoure. Dans ce cas, les contraintes à l'intérieur de l'anneau gelé seraient produites en association avec la température. Une telle interprétation est soutenue par le travail qui est en voie d'exécution aux Laboratoires de Science Géotechnique à Ottawa.

4.7 Performances des appareils

Les indicateurs de profondeur de gel (IPG) donnent une bonne

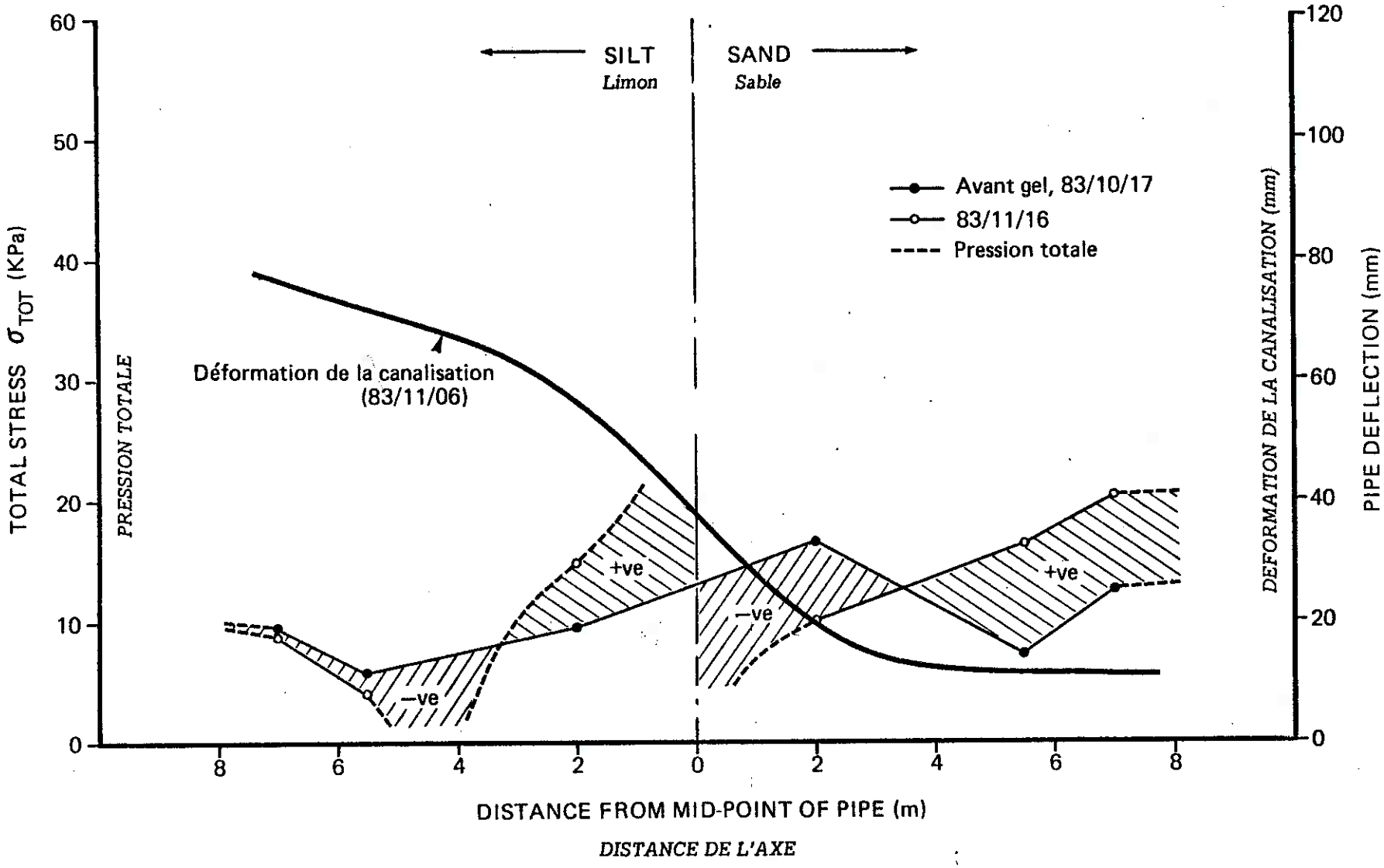

FIGURE 4.19 PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION 4 SEMAINES APRES LE DEBUT DE LA SECOND PERIODE DE GEL
(Les cellules de pression sont situées initialement à 46 cm sous la canalisation).

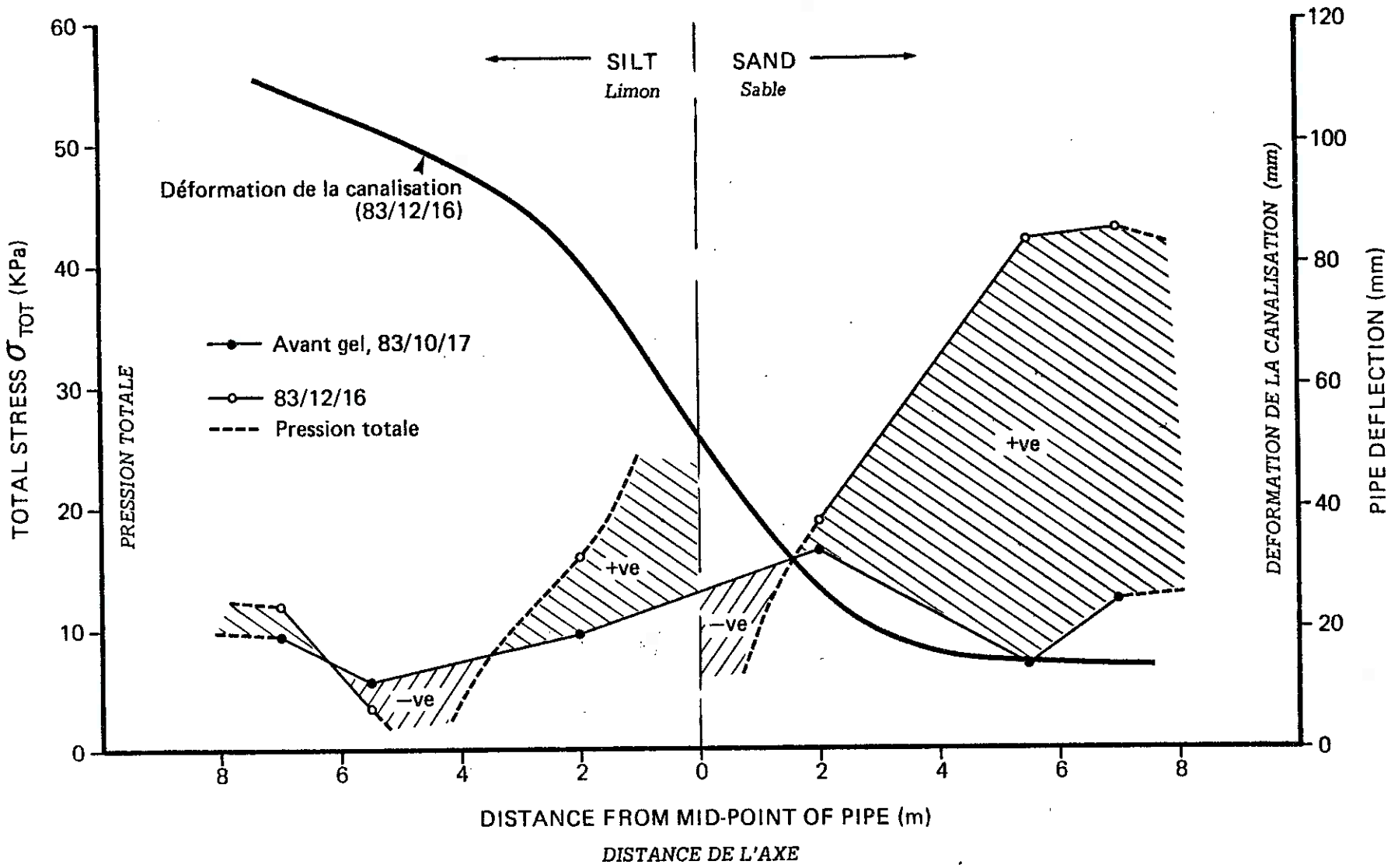

FIGURE 4.20 - PRESSION TOTALE DANS LE SOL SOUS LA CANALISATION 8 SEMAINES APRE LE DEBUT DE LA SECONDE PERIODE DE GEL.

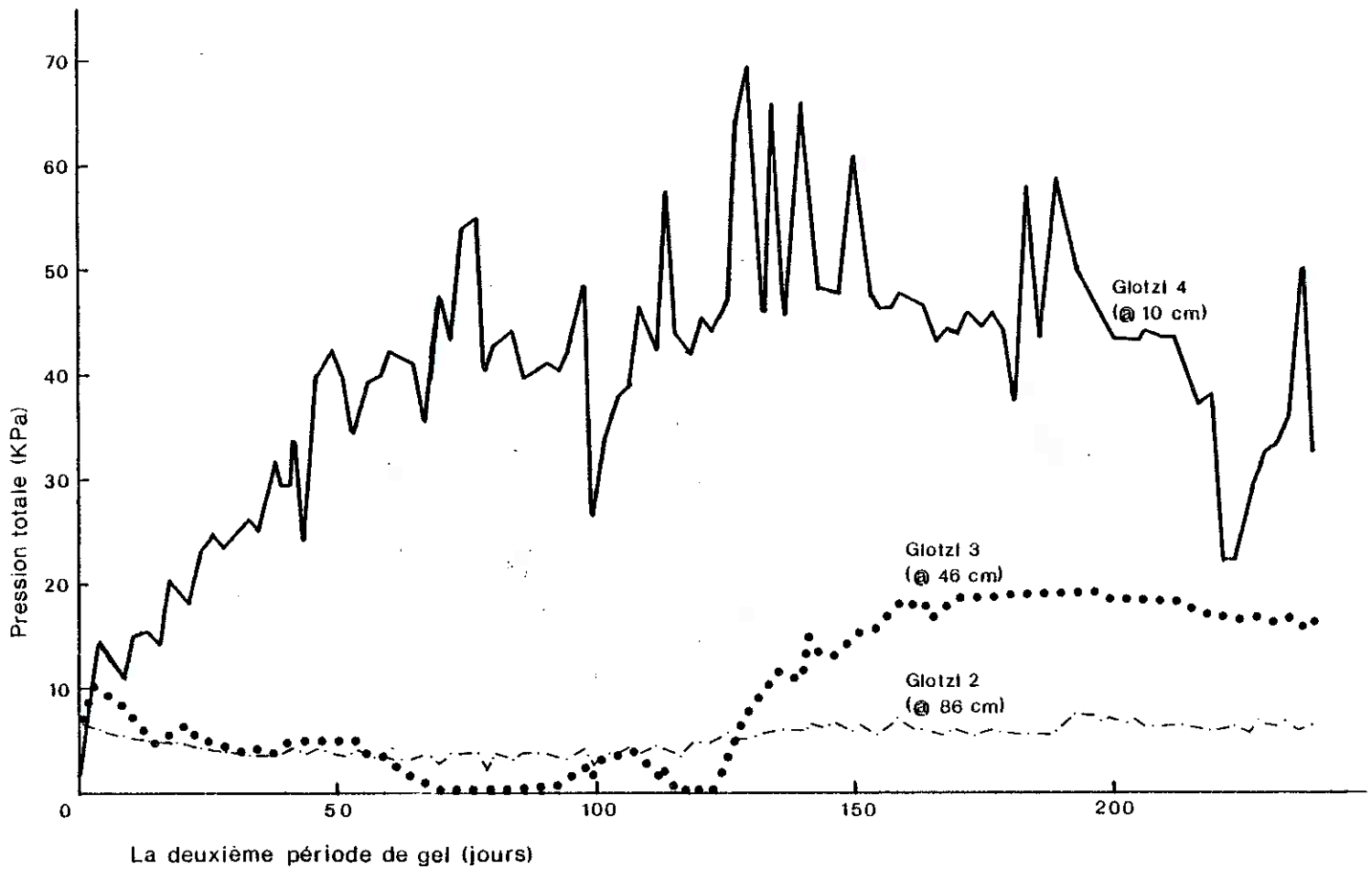

FIGURE 4.21 - LA PRESSION TOTALE SOUS LA CANALISATION DANS LE LIMON (SECTION B-B)

indication de la pénétration du gel dans le sol. Cependant, lorsque le front de gel se rapproche de l'extrémité du tube de l'IPG, la solution se concentre et son changement de coloration ne s'effectue plus à 0°C. C'est ce qui se produit présentement près de la canalisation.

Les observations effectuées au moyen des tiges télescopiques 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.

5. CARACTERISATION DU GONFLEMENT DES SOLS DU LIMON DE CAEN EN LABORATOIRE

5.1 Généralités

L'évaluation des méthodes de predictions du gonflement du sol pour l'expérience de Caen fait partie intégrante du projet en cours!

Un programme rigoureux d'essais portant sur le gonflement du sol est actuellement réalisé à partir des échantilleur de limon remoulés de Caen. On a mis l'accent sur l'influence des procédures d'essais en laboratoire et sur d'autres facteurs de la détermination des divers paramètres du gonflement. Les laboratoires de Science Géotechnique de l'Université Carleton se sont chargés, dans une large mesure, d'entreprendre ce programme d'essais. En plus, les données d'essais supplémentaires effectués au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, au Département des Travaux Publics à l'Université d'Aston et par Hardy Associates Ltée (1978) sont disponibles.

5.2 Essais sur le gonflement des sols

La cellule d'essai du gonflement du sol telle qu'utilisée à Carleton est une version modifiée d'une conception par le Service d'Ingénierie Nordique (Northern Engineering Service). Comme le montre la figure 1, la cellule peut contenir des échantillons cylindriques de sol d'une longueur de 110 mm et de 102 mm de diamètre. Les échantillons de limon de l'essai de Caen, constitués d'une bouillie de 50% de sol et d'eau, sont consolidés sur place dans la cellule, ou bien ils sont compactés manuellement en plusieurs couches. Dans l'essai, une densité d'environ $1{,}73 \times 10^3$ kg/m^3, semblable à celle de l'essai à Caen, est utilisée.

Après le compactage de l'échantillon de sol, la cellule d'essai est refroidie dans une chambre à température contrôlée afin d'acquérir une condition isotherme initiale. La congélation est lancée en soumettant l'une des deux extrémités de l'échantillon à une température négative stable, tandis qu'une température positive stable est gardée à l'autre extrémité. Pour réduire la résistance au gonflement au minimum, la congélation est imposée avec extrémité supérieure. Un accès libre à l'eau est fourni à l'extrémité chaude au moyen d'un tube d'irrigation. Le déplacement du piston sous l'effet du soulèvement est mesuré au moyen d'un comparateur à cadran d'une sensibilité de 0,005 mm. La plupart des essais furent effectués sans aucune pression sur le piston; cependant, quelques-uns en furent exécutés avec une pression statique appliquée par une grenaille de plomb. Au cours de l'essai les conditions thermales sont contrôlées au moyen des thermistances enfoncés au sein de la

cellule d'essai.

Les données des essais sur le gonflement du sol ont été analysées en fonction du soulèvement total, du taux de gonflement (H), du rapport du taux de gonflement sur le taux de la pénétration du gel (H vs X) et du paramètre du Potentiel de Ségrégation (PS) (Konrad et Morgenstern, 1981). Une attention toute particulière a été prêtée à l'évaluation des paramètres du gonflement des sols lors du commencement de la soi-disante lentille finale de glace. Normalement, ce point a été déterminé soit en sectionnant les échantillons après les essais et en le déduisant de l'épaisseur de la lentille finale de glace, soit en contrôlant l'établissement de l'équilibre thermal à la ligne du gel (i.e. lorsque le taux de la pénétration de gel égale le taux du gonflement).

5.3 Les facteurs touchant le caractère du gonflement du limon de Caen

Jusqu'ici, les résultats indiquent qu'en laboratoire le comportement du gonflement des échantillons du limon remanié de Caen peut varier considérablement d'un essai à l'autre, même dans des conditions d'essai apparemment semblables. Quelques-uns des facteurs touchant le gonflement sont rattachés à des procédures spécifiques d'essais en laboratoire et d'autres sont le résultat des propriétés intrinsèques du sol qui portent un effet sur le comportement du gonflement.

Spécification des cellules d'essais

A part des essais sur le gonflement du sol effectués à l'Université de Carleton, au moins 18 essais de gonflement du sol ont

également été exécutés à partir du limon de Caen avec 3 autres cellules de gonflement. Le tableau 5.1 donne un compte rendu de quelques-uns des résultats d'essais, accompagnés des particularités des conditions individuelles d'essai et des conceptions des cellules. Les plus grandes valeurs du gonflement total, de H, de H vs. X et du PS ont été enregistrées au moyen d'une cellule d'essai constituant une unité de contrôle du gonflement (UCG) à l'Université d'Aston, Birmingham, Angleterre. Les gonflements totaux les plus petits ont été enregistrés au moyen de l'appareil du gonflement tel qu'utilisé au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Nancy, France. Cette cellule contient un échantillon de sol plus long que celui des autres cellules et, comme résultat, le temps nécessaire pour atteindre des conditions d'un état stable est beaucoup plus long.

Le comportement suscité par le gel

Des essais répétés de gel et de dégel ont démontré que le comportement suscité par les cycles de gel peut avoir un effet énorme sur les traits caractéristiques du gonflement du limon de Caen. A la suite du premier gel, l'échantillon d'essai a été re-consolidé pour atteindre à peu près la même densité de l'état original non gelé. Ensuite, des cycles supplémentaires de gel ont été effectués dans les conditions d'essais semblables. On a trouvé que, dans chaque essai répété de gel et de dégel, le caractère du gonflement change au cours de la deuxième période. On a relevé que le gonflement total (H), H, H vs X et le PS du limon ont tous augmenté lors du deuxième cycle de gel par la suite.

Table 5.1 Caracterisation du gonflement des sols du limon de Caen en laboratoire

ESSAI	Compactage Pd(Kg/m^3)		Longeur (mm)		Côté Froid-Chaud	Pression Appliquée KPa	Temps hr.	Gonflement Total @30 hr	@60 hr	@ EOT (mm)	Lentille finale de glace Temps hr.	Grad T °C/mm	H mm/sec	SP mm^2/sec°C
Carleton														
SRD 5	PR.	1.76×10^3	115	102	-5°C,1.5°C	0	71	4.7	6.2	6.6	32	0.05	1.73×10^{-5}	35×10^{-5}
SRD 6	"	1.76×10^3	115	102	-5°C,1.5°C	0	73	4.9	6.8	7.3	41	0.048	2.0×10^{-5}	42×10^{-5}
SRD 7	CONS.	1.72×10^3	90	102	-5°C,1.5°C	0	93	7.2	10.1	10.9	46	0.046	2.5×10^{-5}	54×10^{-5}
SRD 8	"	1.76×10^3	110	102	-5°C,1.75°C	0	68	13	17.5	17.8	62	0.047	2.7×10^{-5}	58×10^{-5}
SRD 9	"	1.76×10^3	110	102	-5°C,1.8°C	0	100	6.6	7.6	10.0	31	0.048	2.8×10^{-5}	59×10^{-5}
SRD 10a	"	1.76×10^3	110	102	-3.0°C,1.0°C	0	67.5	6.7	9.8	10.42	40	0.031	3.2×10^{-5}	101×10^{-5}
SRD 10b	TR-C.	1.73×10^3	108	102	-3.0°C,1.0°C	0	65.5	15.8	23.4	24.4	49	0.028	5.8×10^{-5}	208×10^{-5}
SRD 10c	"	1.76×10^3	110	102	-3.0°C,1.0°C	0	53	15.2	-	21.1	48	0.026	5.1×10^{-5}	194×10^{-5}
SRD 10d	"	1.76×10^3	110	102	-3.0°C,1.0°C	20 KPa	61	9.6	15.2	16.37	47	0.028	5.1×10^{-5}	183×10^{-5}
SRD 10e	"	1.76×10^3	110	102	-3.0°C,1.0°C	30 KPa	62.5	6.4	10.3	10.5	40	0.028	3.8×10^{-5}	138×10^{-5}
SRD 11	CONS.	$1.65\times1.7\times10^3$	105	102	-1°C, 1.0°C	0	47	4.7	-	6.0	40	0.021	2.0×10^{-5}	94×10^{-5}
SRD 12	"	1.73×10^3	112	102	-4.9°C,0.9°C	0	49	9.5	-	13.3	26	0.043	7.1×10^{-5}	163×10^{-5}
SRD 12b	TR-C.	1.73×10^3	112	102	-4.9°C,0.9°C	0	65.5	9.9	13.2	12.6	30	0.037	8.55×10^{-5}	231×10^{-5}

Map: -

PR. - Proctor
CONS. - Consolidés
TR-C. - Consolidés après dégel
DUR. - Temps
INIT. - Initiation

Table 5.1 (continué)

ESSAI	Compactage Pd(Kg/m^3)	Longeur (mm)		Côté Froid-Chaud	Pression Appliquée KPa	Temps hr.	Gonflement Total @30 hr	@60 hr	@ EOT (mm)		Lentille finale de glace Temps hr.	Grad T °C/mm	H mm/sec	SP mm^2/sec°C
SRD 12c	TR-C. 1.73x10^3	112	102	-7.4°C,0.95°C	0	44	11.1	-	14.8	18	0.058	1.17x10^{-4}	202x10^{-5}
Hardy Assoc. FR-1a	CONS. 1.8x10^3	110	102	-5°C,1.5°C	29.6	42	7.8	-	9.0	22	0.06	3.5x10^{-5}	57x10^{-5}
FR-1b	TR-C. 1.8x10^3	110	102	-1.0°C,0.5°C	29.6	47.5	6.4	-	6.9	36	0.014	1.8x10^{-5}	126x10^{-5}
FR-1c	" 1.8x10^3	110	102	-1.0°C,0.5°C	100	60	1.3	2.1	2.2	48	0.014	5.7x10^{-6}	41x10^{-5}
FR-1d	" 1.8x10^3	110	102	-1.0°C,0.5°C	200	47.5	0.45	-	0.66	40	0.014	3.5x10^{-6}	25x10^{-5}
FR-2a	PROC. 1.83x10^3	110	102	-5.9°C,1.0°C	20.7	25	-	-	3.5	21	0.06	2.1x10^{-5}	33x10^{-5}
FR-2b	TR-C. 1.83x10^3	110	102	-0.9°C,0.1°C	20.7	52.5	2.85	-	3.8	42	0.013	9.8x10^{-6}	77x10^{-5}
FR-2c	" 1.83x10^3	110	102	-1.05,0.5°C	69	80	1.1	1.75	2.1	58	0.013	3.7x10^{-6}	28x10^{-5}
FR-2d	" 1.83x10^3	110	102	-1.08,0.5°C	200	72	0.17	0.41	0.5	55	0.013	1.34x10^{-6}	15.2x10^{-5}
FR-2e	" 1.73x10^3	112	102	-1.08,0.5°C	20.7	69	3.45	5.1	5.4	65			

Map: -

PR. - Proctor
CONS. - Consolidés
TR-C. - Consolidés après dégel

Table 5.1 (Continué)

ESSAI	Compactage Pd(Kg/m^3)	Longeur (mm)		Côté Froid-Chaud	Pression Appliquée KPa	Temps hr.	Gonflement total @30 hr	@60 hr	@ EOT (mm)	Lentille finale de glace Temps. hr.	Grad T °C/mm	H mm/sec	SP mm^2/sec°C
LRPC													
82/000	#1 PR. 1.73	260	70	-5.7°C,+1°C	0	157	0.5	1.7	4.2	120	0.011	6.46×10^{-6}	59×10^{-5}
	#2 " "	"	"	" , "	0	142	0.2	2.2	-	100	0.01	6.94×10^{-6}	66×10^{-5}
	#3 " "	"	"	" , "	0	214	0.5	1.6	5.0	90	0.012	8.4×10^{-6}	70×10^{-5}
906/81	#3 " 1.73	"	"	-5.7°C,+1°C	0	267	0.2	5.5	-	115	0.016	9.0×10^{-6}	57×10^{-5}
	#4 " "	"	"	" , "	0	230	0.5	1.6	10.8	160	0.016	1.2×10^{-6}	72×10^{-5}
	#5 " "	"	"	" , "	0	267	0.2	5.5	-	150	0.017	8.0×10^{-6}	47×10^{-5}
	#6 " "	"	"	" , "	0	235	0.2	9.0	-	150	0.016	1.2×10^{-6}	73×10^{-5}
U. of Aston													
1	" 1.73	110	102	-4.8,0.5°C	0	170	15.8	21.5	33	70	0.039	4.1×10^{-5}	105×10^{-5}
2	" "	152	102	-7.0,4.0°C	0	250	8.0	14.0	38	-	-	-	-

PR = Proctor

Notes: Hardy Associates testing - freezing from below, sample incorporated in a greased membrane to reduce side wall friction. Test results after Nixon, 1984.
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy testing - freezing from above, sample incorporated in a greased foam rubber tube to reduce friction. Test results after Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy, 1982 and 1983.
University of Aston testing - freezing from above, sample placed in a series of tufnol rings to reduce side wall friction. Test results after McCabe, 1983.

On a trouvé qu'après le premier cycle de gel et de dégel, la pression nécessaire pour re-consolider l'échantillon était considérablement moins grande. Cela indique qu'une certaine consolidation du sol se produit au cours du gel. On a également observé que la perméabilité verticale moyenne des échantillons dégelés et re-consolidés, a en fait augmenté d'environ 8×10^{-8} cm/sec à environ 3×10^{-7} cm/sec. Un sectionnement détaillé des parties gelées et non gelées de l'échantillon suggère que l'augmentation de la perméabilité moyenne se produisait, dans une large mesure, due à une augmentation dans la partie gelée de l'échantillon pendant l'essai. Cela découle raisonnablement de la présence de discontinuités verticales laissées par les lentilles de glace. On a noté que la perméabilité du sol non gelé a diminué.

Compactage de l'échantillon

On a relevé que les échantillons de sol compactés en couches selon la procédure de compactage du type Proctor présentent des différents traits caractéristiques du gonflement en comparaison avec ceux consolidés d'une bouillie de sol et d'eau et d'une densité semblable. Dans tous les essais, les valeurs du gonflement total, de H, de H vs. X et du PS pour les échantilleurs compactés étaient inférieurs à ceux des échantilleurs consolidés. Cela suggère qu'il y existe une différence fondamentale dans la structure des échantillons de sol, étant donné que la différence des traits caractéristiques du gonflement persistait même à la suite de plusieurs cycles de gel et de dégel.

La pression appliquée

Un grand nombre d'essais du gonflement des sols ont été effectués avec l'application d'une pression sur le piston du déplacement. La comparaison des résultats du gonflement, après une première période de gel et de dégel, indique que chacun des paramètres d'essais est réduit lors de l'application d'une surcharge. Cependant, un gonflement considérable se produit dans la gamme de 0 à 50 KPa de pression et un gonflement mesurable se produit lors des pressions aussi fortes que 200 KPa.

Par rapport au Potentiel de Ségrégation du sol, il semble que la relation à la pression appliquée, dans la gamme de 0 à 200 KPa, ne concorde pas avec une relation semi-logarithmique, telle que relevée pour d'autres sols à grain fin par Konrad et Morgenstern (1982). Nixon (1983) a suggéré que la relation peut en fait être bilinéaire; cependant, des essais supplémentaires à Carleton suggèrent que des recherches additionnelles est encore nécessaire avant qu'une relation exacte ne puisse être établie.

Remarques administratives

Pendant toute l'année couverte par ce rapport, des résultats d'essais se sont constamm nt accumulés - quelques-uns parmi eux d'un intérêt et d'une importance exceptionnels pour l'interprétation fondamentale du comportement du sol gelé. Cette année a été marquée par une augmentation de la dissémination des résultats du projet et par un intérêt marqué de la part de la communauté des scientifiques en général.

Cet intérêt a été mis en lumière par le séminaire "Gonflement du sol et des pipelines" qui a eu lieu à la station de Caen en avril 1984. On avait l'intention d'organiser le séminaire sous forme d'une discussion à table ronde de quelque vingt-cinq spécialistes de plusieurs pays. En fait, plus de 80 personnes se sont inscrites et la rencontre a comporté encore plus de sessions formelles accompagnées de communiqués par des représentants supérieurs du gouvernement et de l'industrie. Le projet expérimental à Caen a fourni des données de base pour des discussions simultanées en table ronde qui ont couvert tout un champ de matériel industriel et scientifique. Un "compte rendu" de la conférence sera publié et paraîtra dans peu de temps. Il présentera une revue d'actualité de nombreux aspects du problème des canalisations et de la congélation du sol - ce qui evidemment ne constitue pas seulement l'intérêt de ceux oeuvrant dans les régions arctiques.

Il y a eu une augmentation marquée des demandes d'exemplaires des rapports du contrat. Un article sur ce projet, par MM. M. Blanchard et Frémond (1984), traitant les méthodes de calcul du flux de la chaleur et de l'humidité dans les sols gelés, sera publié dans le compte rendu de la conférence canadienne sur les systèmes d'ordinateurs industriels. Des articles additionnels par des participants canadiens seront publiés dans le compte rendu de l'Association Internationale des Ponts et Chaussées et celui de la conférence spéciale de la Société américaine des travaux publics.

Ce projet a de nouveau fourni aux Canadiens des occasions exceptionnelles d'acquérir une expérience pratique dans cette espèce de

travail: le poste de directeur de projet au chantier à Caen a été tenu successivement par H. Crawford (ingénieur diplomé de genie civil à l'Université de Western Ontario), par D. Fisher (géographe-conseil ayant une expérience considérable dans les terrains nordiques), et par André Guichaoua (étudiant diplomé de l'Ecole Polytechnique, CINEP, Montréal). Tous les trois ont accompli leur fonction d'une manière exemplaire. Scott Dallimore (ancien directeur de projet au chantier) a fait fonction de directeur à Ottawa pendant qu'il poursuivait des études de deuxième cycle sur le sujet du gonflement du sol dans les canalisations. Le professeur W.H. Bowes (Genie Mecanique, Carleton) et le professeur B. Ladanyi (CINEP, Montréal) continueront à servir comme conseiller.

Le projet a donc abouti à un noyau de compétence canadienne avec des personnes compétentes, ce qui nous a permis de nous associer à la minorité de spécialistes ayant de l'expérience en ces problèmes ailleurs dans le monde. En même temps, l'importance étendue et le besoin d'études assez fondamentales sont même devenus plus évidents comme l'ont relevé les rencontres, discussions et échanges de l'année dernière. Le Canada est le pays occidental affecté le plus directement par les conséquences économiques du gel du sol. Nous espérons qu'à cet égard, ce projet modeste et les développements qui en résultent joueront on rôle particulièrement considérable.

BIBLIOGRAPHIE

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 IR-29, 57 pp. (aussi disponible en Francais).

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

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.

Lemaire, G. 1983. Etude Experimentale d'un Gazoduc Enterré Soumis à des Temperatures Negatives. Memoire présente en vue de l'obtention du grade de Maitre des Science Appliquées (M.Sc.A.), 67 pp.

Williams, P.J. 1982. The Surface of the Earth: An Introduction to Geotechnical Science. Longman. 212 pp.

Frémond, M. et D. Blanchard 1984 Comportment des gazoducs froid et succion cryogenique. Conf. Can. L'Informatique Industrielle, Ottawa.

Geotechnical Science Laboratories 1984. Analysis of Stresses Developed in Pipelines Buried in Freezing Ground. Rept. IR-36, 59 pp.