Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

Earth Physics Branch
Direction de la physique du globe

1 Observatory Crescent
Ottawa Canada
K1A 0Y3

1 Place de l'Observatoire
Ottawa Canada
K1A 0Y3

Geothermal Service of Canada

Service géothermique du Canada

ETUDE DU GEL DES SOLS AUTOUR D'UNE CONDUITE REFROIDIE ENTERREE DANS UNE STATION EXPERIMENTALE - PHASE 1

ET

RAPPORT INTERIMAIRE

FAISABILITE D'UNE ETUDE DES CONSTRAINTES D'UNE CONDUITE ENTERREE DANS UN SOL SOUMIS AU GEL

M. Burgess[1], G. Lemaire[2], M. Smith[1] et P.J. Williams[1]

[1]Geotechnical Science Laboratories
Université Carleton

[2]L'Ecole Polytechnique, Montréal.

Earth Physics Branch Open File Number 82-18
Ottawa, Canada, 1982

67p x photo essay (13p)

Price/Prix: $39.00

NOT FOR REPRODUCTION

Resumé

Le présent rapport décrit une série d'expériences, présentement en cours, dans une chambre d'essai à environnement controllé situé dans le nord de la France. On y trouve une description du modèle expérimental, des caractéristiques des installations, des systêmes de mesure, des conditions de mise eu oeuvre et du systême d'acquisition de données pour la première série d'expériences sur un pipeline à gaz réfrigéré. Le travail de caractérisation géothermique des sols utilisés, effectué au laboratoire géotechnique de l'université de Carleton au Canada, y est aussi présenté.

Abstract

A series of freezing experiments are being conducted in a controlled environment test facility in northern France. This report describes the experimental model, the design of the experimental installations, the measurement systems, the conditions of use and the data acquisition system used in the initial experiments with a chilled pipeline. Supporting geotechnical characterization of the soils used has been conducted in Canada at the Geotechnical Science Laboratories of Carleton University.

ETUDE DU GEL DES SOLS AUTOUR D'UNE CONDUITE REFROIDIE ENTERREE DANS UNE STATION EXPERIMENTALE - PHASE 1

ET

FAISABILITE D'UNE ETUDE DES CONTRAINTES D'UNE CONDUITE ENTERREE DANS UN SOL SOUMIS AU GEL

RAPPORT FINAL

ETUDE DU GEL DES SOLS AUTOUR D'UNE CONDUITE REFROIDIE ENTERREE DANS UNE STATION EXPERIMENTALE - PHASE 1[1]

ET

RAPPORT INTERIMAIRE

FAISABILITE D'UNE ETUDE DES CONTRAINTES D'UNE CONDUITE ENTERREE DANS UN SOL SOUMIS AU GEL[2]

PAR

M. BURGESS, G. LEMAIRE, M. SMITH ET P.J. WILLIAMS

POUR

LE MINISTERE D'ENERGIE, MINES ET RESSOURCES
DIRECTION DE LA PHYSIQUE DU GLOBE

GEOTECHNICAL SCIENCE LABORATORIES
DEPARTEMENT DE GEOGRAPHIE
UNIVERSITE CARLETON
OTTAWA, ONTARIO
K1S 5B6

1. Numéro du dossier MAS: 03SU.23235-1-0798
Numéro de série: 05U81-00260

AOUT 1982

2. Numéro du dossier MAS: 24SU.23235-1-1348
Numéro de série: 05U81-00456

NOTE ADMINISTRATIVE

Le présent volume constitue le rapport final exigé par le contrat numéro 03SU 23235-1-0798 du MAS, Canada, intitulé "Etude du gel des sols autour d'une conduite refroidie enterrée dans une station expérimentale - Phase I" et ayant comme chercheur principal, P.J. Williams et chercheur co-principal, M.W. Smith. Le volume comprend également le rapport intérimaire requis pour le contrat numéro 24SU 23235-1-1348 du MAS: "Faisabilité d'une étude des contraintes d'une conduite enterrée dans un sol soumis au gel", chercheur principal, P.J. Williams. Ces deux contrats représentent la participation canadienne, par l'entremise des Geotechnical Science Laboratories de l'Université Carleton, au projet de recherche conjointe entre la France et le Canada: "Comportement de conduites enterrées soumises à des températures négatives".

Ce projet international rassemble l'expérience particulière et les connaissances scientifiques des deux pays afin d'accélérer la résolution de problèmes reliés aux grands projets de développement d'énergie dans le nord.

Le projet France-Canada est dirigé par le Comité Scientifique:

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

M. Lucien Faugères, Directeur, Centre de Géomorphologie du CNRS, Caen

M. Michel Frémond, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, et l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

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

*M. J. Parey, 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 français

** Président canadien

De plus amples renseignements sur le personnel et sur les établissements qui participent au travail décrit dans ce rapport sont fournis à la fin du texte.

Une collection reliée de photographies accompagne ce rapport comme annexe D.

TABLE DES MATIERES PAGE

NOTE ADMINISTRATIVE i

1. INTRODUCTION 1

2. DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTALE 3

3. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS 4
   3.1 Bâtiment 4

   3.2 Installation frigorifique 6
      3.2.1 Refroidissement de l'air ambiant 6
      3.2.2 Refroidissement de l'air dans le pipe 6

   3.3 Préparation de la fosse 6

4. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION 9
   4.1 Mesure du régime thermique 9
   4.2 Mesure du régime hydraulique 15
   4.3 Mesure de gonflement 18
      4.3.1 Tubes téléscopiques 18
      4.3.2 Double sonde gamma 18
      4.3.3 Nivellement 20

   4.4 Mesure de la pression totale du sol 20

   4.5 Mesure de la déformation du pipe 20
      4.5.1 Jauges de déformation 20
      4.5.2 Tiges à plateaux 23

   4.6 Autres mesures 27

5. REMPLISSAGE DE LA FOSSE 27

6. LECTURE ET ENREGISTREMENT DES DONNEES 32
   6.1 Mesures effectuées dans la salle de mesure 32
      6.1.1 Mesure de la température 32
      6.1.2 Autres mesures 35

   6.2 Mesures effectuées dans la fosse 35

   6.3 Enregistrement des mesures 36

7. TRAVAIL EFFECTUE AU LABORATOIRE GEOTECHNIQUE DE CARLETON . . 36

8. PROGRAMME DE L'EXPERIENCE 37

9. CONCLUSION 37

COMMENTAIRE FINAL DU CHERCHEUR PRINCIPAL 39

REMERCIEMENTS 43

REFERENCES 45

TABLE DES MATIERES (CONT'D) PAGE

ANNEXES

A. Résultats du travail effectué au Geotechnical Science Laboratories. . . . 47

B. Calcul du temps de refroidissement de la fosse avant le démarrage. . . 54

C. Calcul de la pénétration du front de gel. 59

D. Rapport photographique. 62

FIGURES

Figure 1: Plan de la station de gel 5

Figure 2: Schéma du caisson de traitement d'air (Safnor, Caen) 7

Figure 3: Détail des TDR et des thermistances 10

Figure 4: Vue du dessus de la fosse 11

Figure 5: Répartition des thermocouples, sections AA et BB . . 12

Figure 6: Répartition des thermocouples, sections CC,DD,EE et. FF 13

Figure 7: Répartition des fluxmètres,section BB (limon) . . . 14

Figure 8: Coupe en long 16

Figure 9: Répartition des tensiomètres 17

Figure 10: Répartition des doubles sondes gamma 21

Figure 11: Répartition des sondes Glotzl 22

Figure 12a: Position des jauges et des tiges à plateau le long du pipeline (reference numérotation) 24

Figure 12b: Position des jauges et des tiges à plateau le long du pipeline (reference numérotation) 25

Figure 13: Détail des tiges à plateau 26

Figure 14a: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue en long 29

FIGURES (CONT'D) PAGE

Figure 14b: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue en long 30

Figure 14c: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue transversale 31

Figure A1: Analyse granulometrique 49

Figure A2: Teneur en eau non gelée en fonction de la température négative pour des limons 51

Figure A3: Conductivité thermique en fonction de la température, limon de Caen 52

Figure B1: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur, sol initialement à 5°C. 56

Figure B2: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur, sol initialement à 15°C. 57

Figure B3: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur, sol initialement à 20°C. 58

Figure C1: Evolution du front de gel 61

TABLEAUX

Tableau 1 - Dimensions des tubes téléscopiques 19

Tableau 2 - Mode Opératoire pour Jauge de courbure du pipe (Appareil qui mesure le déplacement des tiges à plateaux) 33

Tableau 3 - Feuille type de mesure pour tiges à plateaux et la jauge de courbe 34

Tableau A1 - Propriétés thermique du limon de Caen à 5°C . . . 53

1. INTRODUCTION

Le gonflement dû au gel est un phénomène bien connu des ingénieurs impliqués dans la construction des routes. Cependant dans le cas des gazoducs refroidis, ce phénomène introduit des problèmes tout particuliers liés à la durée de vie et à la sensibilité aux perturbations des tuyaux sous pression de grand diamètre (Berger, 1977). La prédiction des effets liés au gel du sol autour d'un tuyau refroidi nécessite le développement de modèles analytiques. La performance de tels modèles impose une connaissance approfondie des propriétés thermiques et thermodynamiques des sols ainsi qu'une analyse détaillée du comportement mécanique interactif du sol gelé et du pipeline.

Durant les dix dernières années, l'importance de la migration de l'eau dans les sols gelés aux températures proches de zéro a été démontrée. Ceci a conduit à de nouvelles estimations des pressions maximum de soulèvement et des déformations subséquentes du sol(Williams, 1979). La nature récente de ces découvertes, faites surtout en laboratoire, n'a pas permis leur vérification sur la terrain durant des périodes prolongées. La réalisation de modèles de laboratoire s'effectue en adoptant des modifications d'échelle pour certains paramètres, mais il en subsiste certains pour lesquels on est dépourvu de moyens permettant une réduction quelconque (Aguirre Puente, 1979). Il s'est donc avéré

nécessaire de concevoir une expérimentation de grande échelle dans laquelle le nombre des variables serait réduit: par exemple, les différences de régime thermique dûes aux micro-climats et aux différentes natures du sol doivent être éliminées.

Durant les années 60, une station expérimentale de gel, permettant le contrôle des conditions climatiques a été construite au centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen (France) afin d'effectuer différents essais de gel de chaussée. Plusieurs années de collaboration scientifique dans la domaine du gel liant l'Université de Carleton, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le Centre National de la Recherche Scientifique (eg. Gel des sols et des chaussées 1977), un projet de recherche conjoint utilisant les installations de Caen a été conçu. Ce projet consiste en la réalisation d'un modèle expérimental qui permettra d'étudier en détail le gel autour d'une longueur finie de pipeline en contrôlant rigoureusement les conditions expérimentales et en mesurant de façon précise les différentes variables.
Le présent rapport décrit le modèle expérimental en lui-même ainsi que les caractéristiques des installations et des systèmes de mesure, les conditions de mise en oeuvre et le système d'acquisition de données. Il est fait aussi mention du travail effectué au laboratoire géotechnique de l'Université de Carleton.

2. DESCRIPTION DU MODELE EXPERIMENTAL

Pour cette première expérimentation, le modèle est constitué par un pipeline de 273 mm de diamètre traversant 2 sols: le premier, du sable SNEC, est peu gélif, le deuxième, du limon de Caen est fortement gélif. Les sols ont été classés selon leur degré de gélivité déterminé par des essais de gonflement effectués au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy (CETE de l'est).

Les conditions expérimentales ont été fixées comme suit:

- La hauteur de la nappe phréatique est maintenue durant toute la durée de l'essai au niveau de la génératrice supérieure du pipeline, le sol situé au dessous restant donc saturé. On réalise ainsi un système ouvert.
- De l'air à -2°C circule à l'intérieur du pipeline.
- La température ambiante de l'enceinte est maintenue légèrement inférieure à 0°C.
- Le pipeline d'une longueur de 18 m est situé à 30 cm de profondeur.

Plusieurs systèmes ont été envisagés pour retenir les extrémités du pipeline. Puisque ces méthodes en général introduisaient de nouvelles contraintes, les extrémités ont été laissées libres. La longueur est donc supposée suiffisante pour simuler un pipeline de longueur infinie. Au cours de l'essai, un front de gel annulaire se développe autour du

pipeline créant une différence de gonflement entre les deux sols choisis pour leur différente susceptibilité au gel. (Le sable SNEC a été préféré à l'argile proposée initialement à cause du temps trop important nécessaire à la saturation de ce dernier sol.) Le niveau de la nappe phréatique permet de saturer le sol autour du pipeline, la température ambiante légèrement inférieure à 0°C assure un ancrage du pipeline dans le sable gelé peu gélif. Un gonflement important survient dans le limon plus susceptible au gel. Ce gonflement différentiel déforme le pipeline et introduit un champ de contrainte à l'intérieur de celui-ci.

3. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS

3.1 BATIMENT (Philippe et al., 1970)

La station de gel de Caen, construite en 1967, a été utilisée de façon intensive entre 1968 et 1975 pour des expériences concernant l'étude de l'effet du gel sur les chaussées. Cette station est constituée d'un hall de 18 m de long, 8 m de large et d'une hauteur de 5 m construit au dessous d'une fosse de 1.7 m de profondeur. Deux salles annexes abritent l'une les groupes frigorifiques, l'autre les appareillages d'enregistrement des mesures (fig. 1).

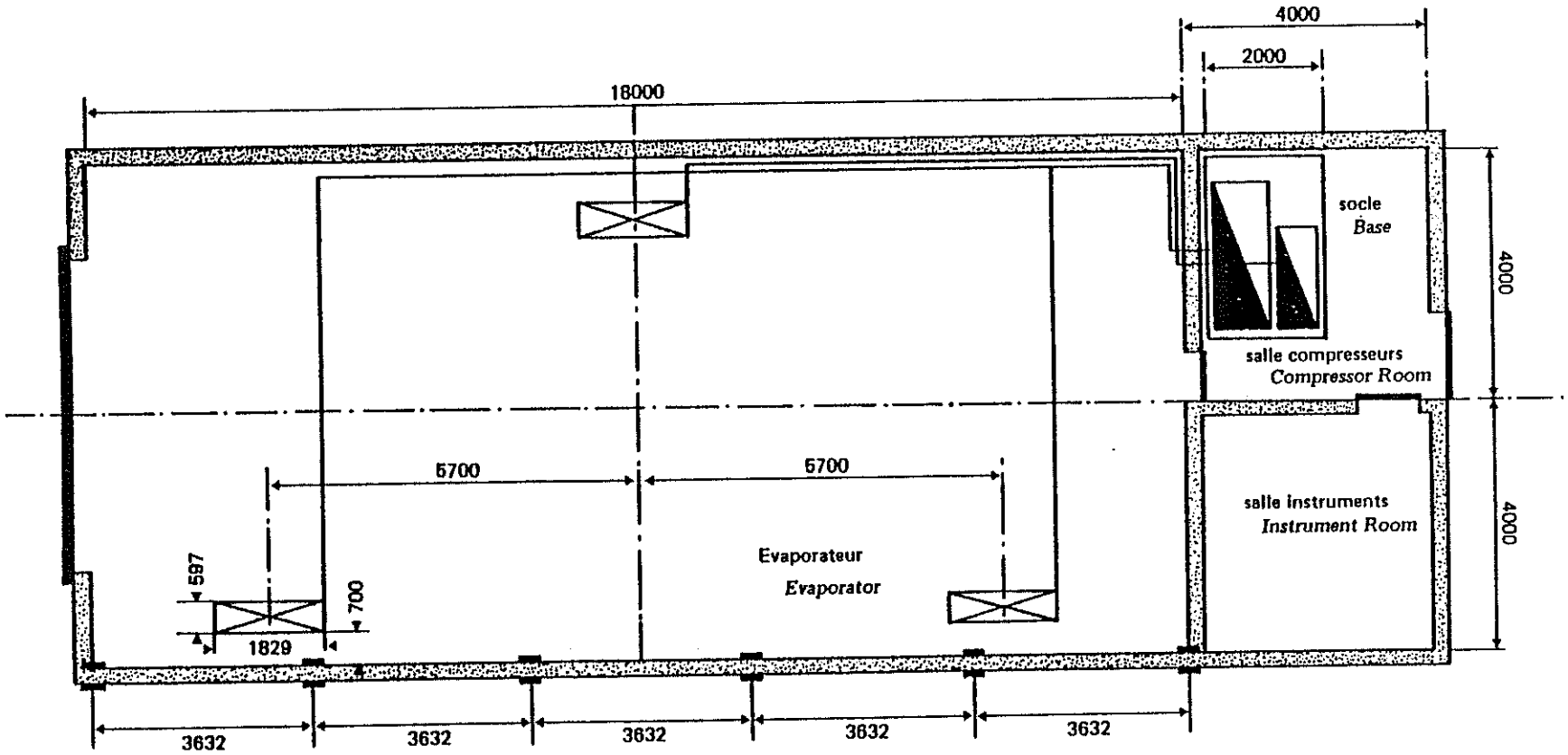


Figure 1: Plan de la station de gel

3.2 INSTALLATION FRIGORIFIQUE

3.2.1 REFROIDISSEMENT DE L'AIR AMBIANT

Deux compresseurs fournissent une puissance de 18000 frigories/heure ce qui pourrait permettre de maintenir une température de -15°C dans le hall quand la température ambiante extérieure est de +22°C (Philippe et al., 1970). Le système permet de maintenir la température désirée avec une précision de ± 2°C à 1 m du sol. D'autre part un dégivrage automatique des 4 ventilateurs placés dans le hall est assuré en cours de fonctionnement.

3.2.2 REFROIDISSEMENT DE L'AIR DANS LE PIPE

Un système de refroidissement indépendant a été conçu et réalisé pour l'expérimentation par l'entreprise SAFNOR à CAEN. Il est constitué d'un compresseur d'une puissance de 3000 frigories/heure, et d'un ventilateur assurant un débit de 2500 m^3 par heure et muni d'un inverseur permettant de faire circuler l'air dans le pipe dans les 2 sens (fig. 2). Une température plus uniforme est ainsi obtenue dans le pipeline.

3.3 PREPARATION DE LA FOSSE

Il a été nécessaire de vider la fosse du sol utilisé lors des précédents essais. L'isolation du hall et des parois de la fosse a été remise à neuf et le système d'irrigation a été remplacé.

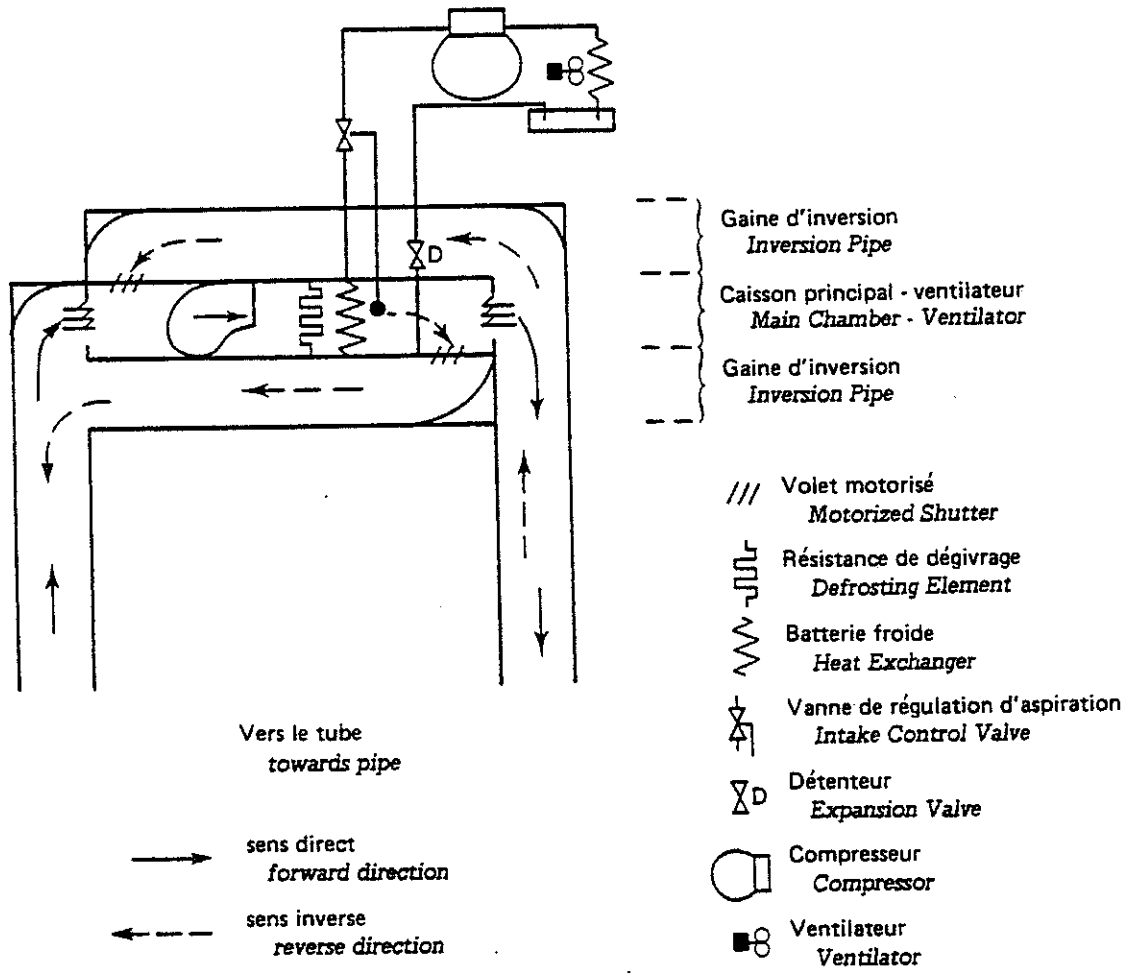


Figure 2: Schèma du caisson de traitement d' air (Safnor, Caen)

Le fond de la fosse constitué par de la roche est recouvert d'une couche de sable afin de l'uniformiser. Une membrane imperméable en plastique fort assure l'étanchéité du fond et des parois de la fosse. Cette membrane repose sur une couche de géotextile (BIDIM) qui la protège de toutes perforations. L'isolation du fond de la fosse est calculée de manière à maintenir le flux de chaleur à la frontière sensiblement égal à celui dans la roche. L'irrigation est constituée par un réseau de 6 tuyaux perforés, de 4 cm de diamètre, répartis le long de la fosse sur la couche d'isolation et noyés dans une couche de sable de 10 cm d'épaisseur. Une crépine de Bidim très perméable enveloppe chaque tuyau afin d'éviter l'obturation de ceux-ci par les grains de sable. Une dernière couche de Bidim empêche le mélange du sable et du sol remplissant la fosse (e.g. SNEC ou LIMON DE CAEN). L'ensemble de ces couches de base occupe 20 cm d'épaisseur (voir Annexe D). Le modèle proprement dit est constitué d'une épaisseur de sol d' 1 m80 dont 1 m50 (niveau supérieur du pipeline) est situé dans la zone étanche (limitée aux deux extrémités de la fosse par les bas des portes fig. 14) et 30 cm formé par un remblai. Cette disposition assure une épaisseur maximum de sol en dessous du pipeline ce qui permet d'éloigner les effets de frontière pendant une durée plus longue de l'essai.

4. DESCRIPTION DE L'INSTRUMENTATION

Un réseau de sondes de mesure, réparti symétriquement dans chacun des 2 sols suivant différentes sections permet de mesurer le comportement propre de chaque sol ainsi que les phénomènes survenant dans la zone de transition et dans les zones frontières.

4.1 MESURE DU REGIME THERMIQUE

Les températures de l'air, du pipeline et des 2 sols sont mesurées à l'aide de thermistances et de thermocouples. Les thermistances (YSI44033 interchangeables avec une précision de $\pm$ 0.05°C) sont fixées le long du cadre des TDR (voir 4.2) (fig. 3). Les thermocouples (cuivre-constantant) sont répartis autour du pipeline suivant différentes sections (fig. 4). Dans les sections AA et BB, la densité de mesure est plus importante de manière à suivre l'évolution du front de gel de façon précise (fig. 5). Dans les sections CC, DD, EE et FF il est prévu d'effectuer des sondages de température sur toute l'épaisseur du sol à l'aide de puits d'observation (fig. 6).

Des indicateurs de profondeur de gel (I.P.G.) placés dans la zone de transition permettent de surveiller l'évolution de l'isotherme 0°C (fig. 4).

Quelques fluxmètres conçus par le Professeur Pierre Thery (U.S.T.L. LILLE FRANCE) seront testés lors de l'expérimentation. Ils devraient permettre de mieux contrôler les conditions frontières dans le limon (fig. 7).

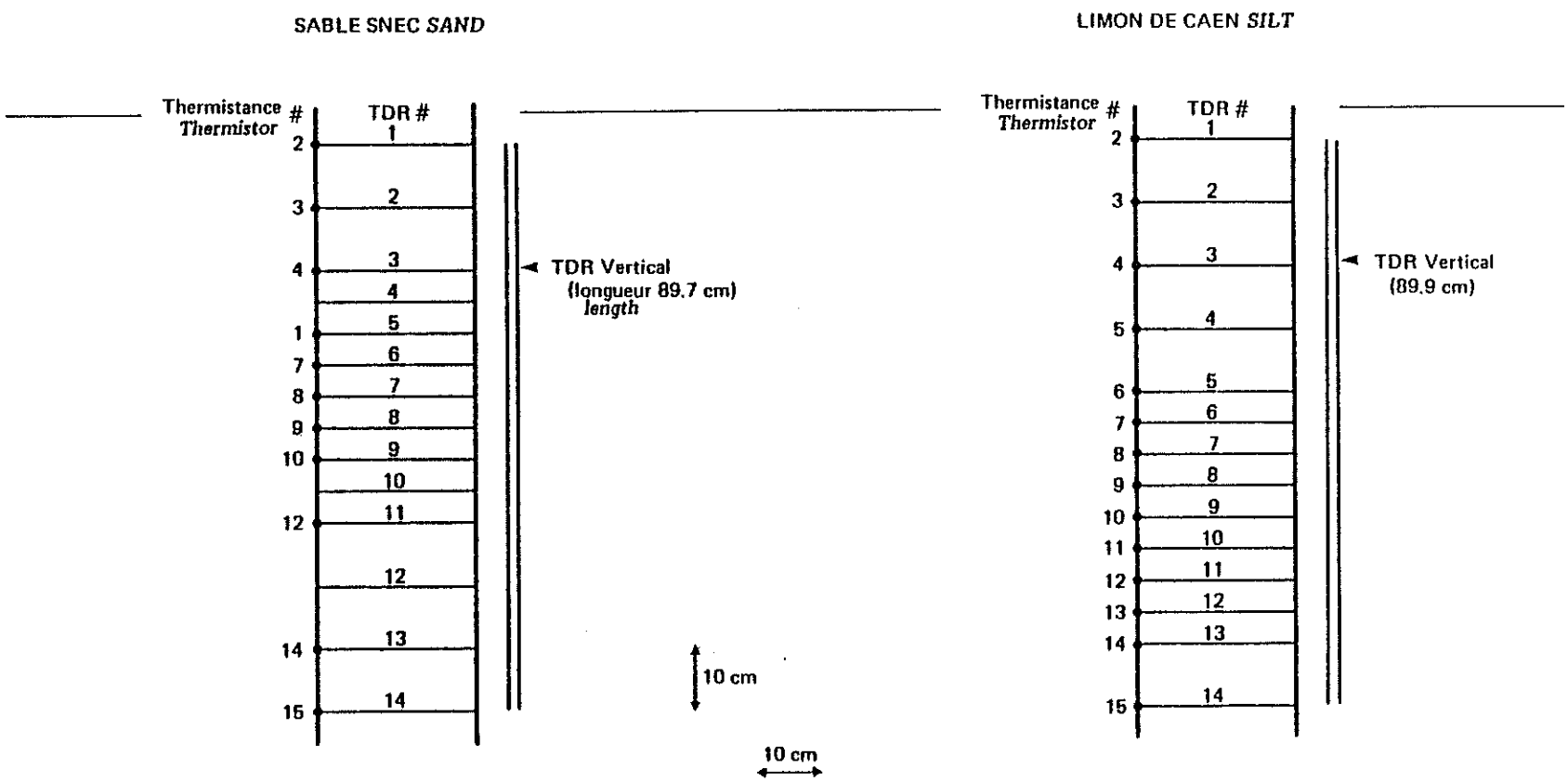


Figure 3: Détail des TDR et des thermistances

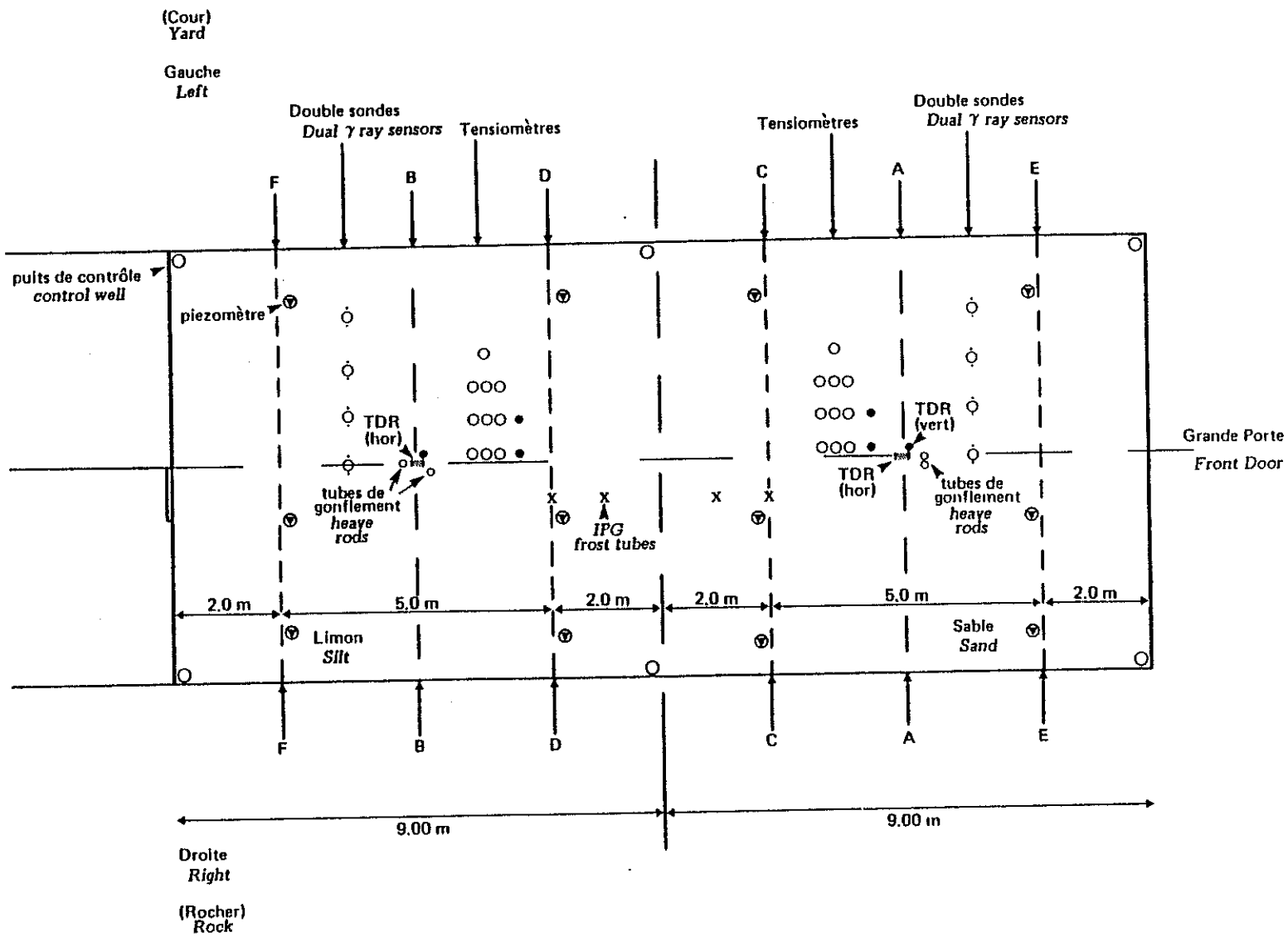


Figure 4: Vue du dessus de la fosse

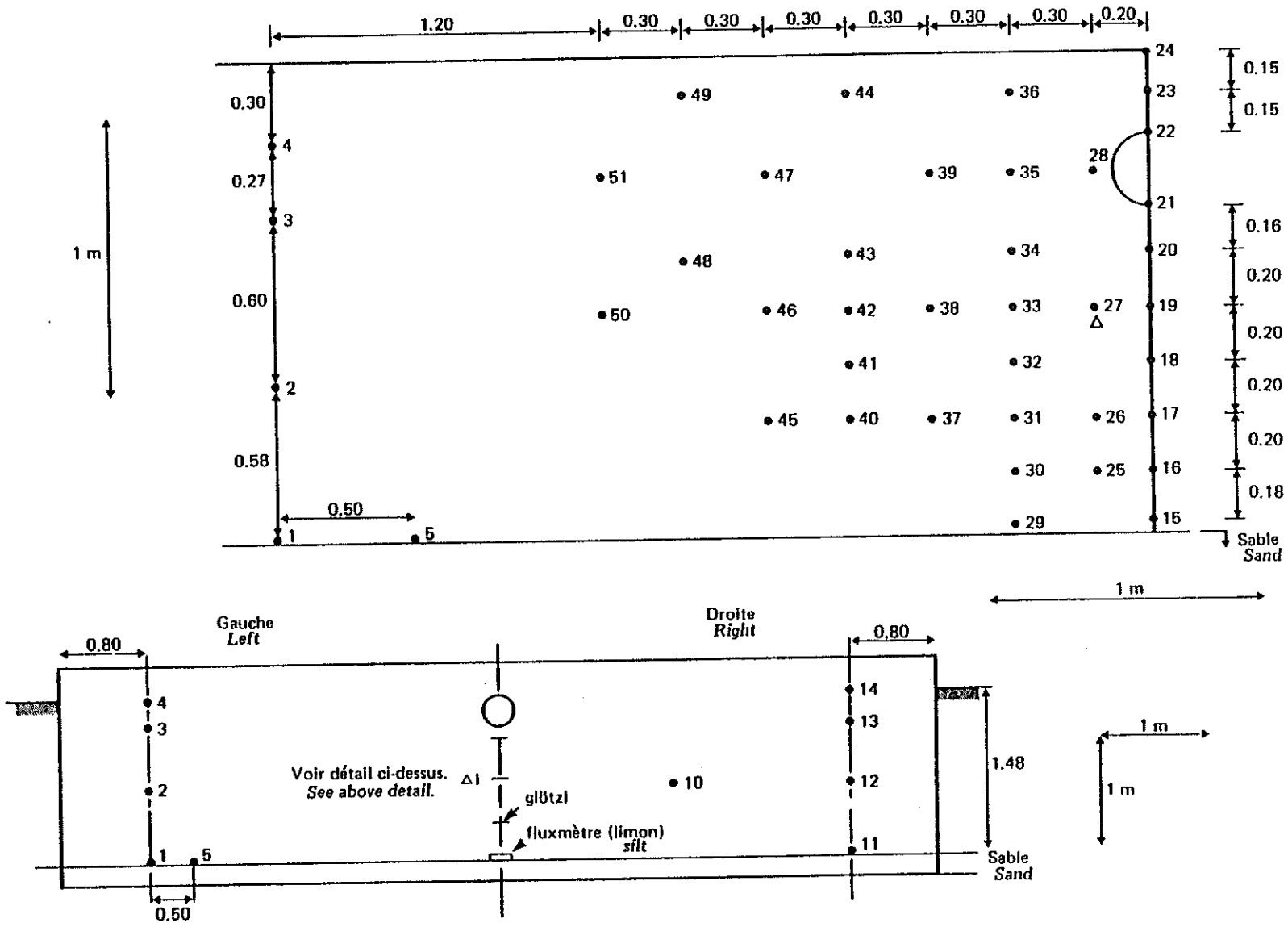


Figure 5: Répartition des thermocouples, sections AA et BB

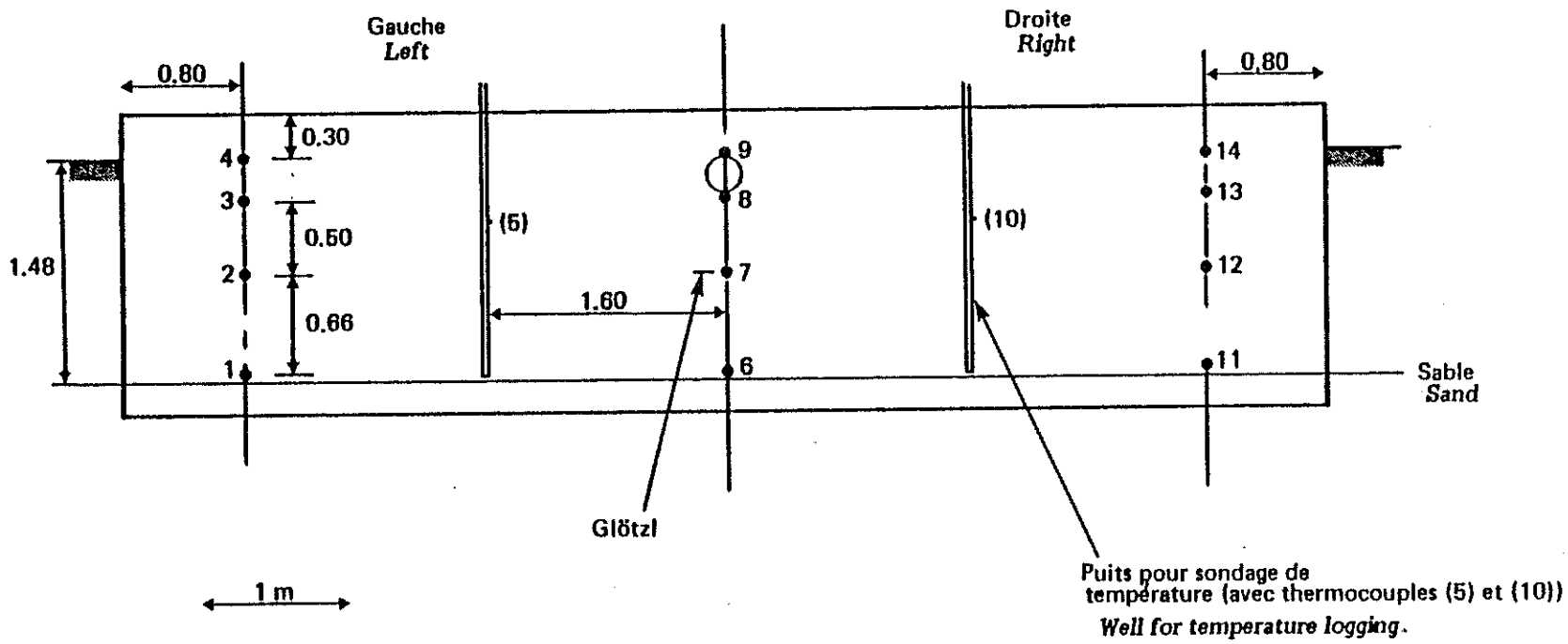


Figure 6: Répartition des thermocouples, sections CC, DD, EE et FF

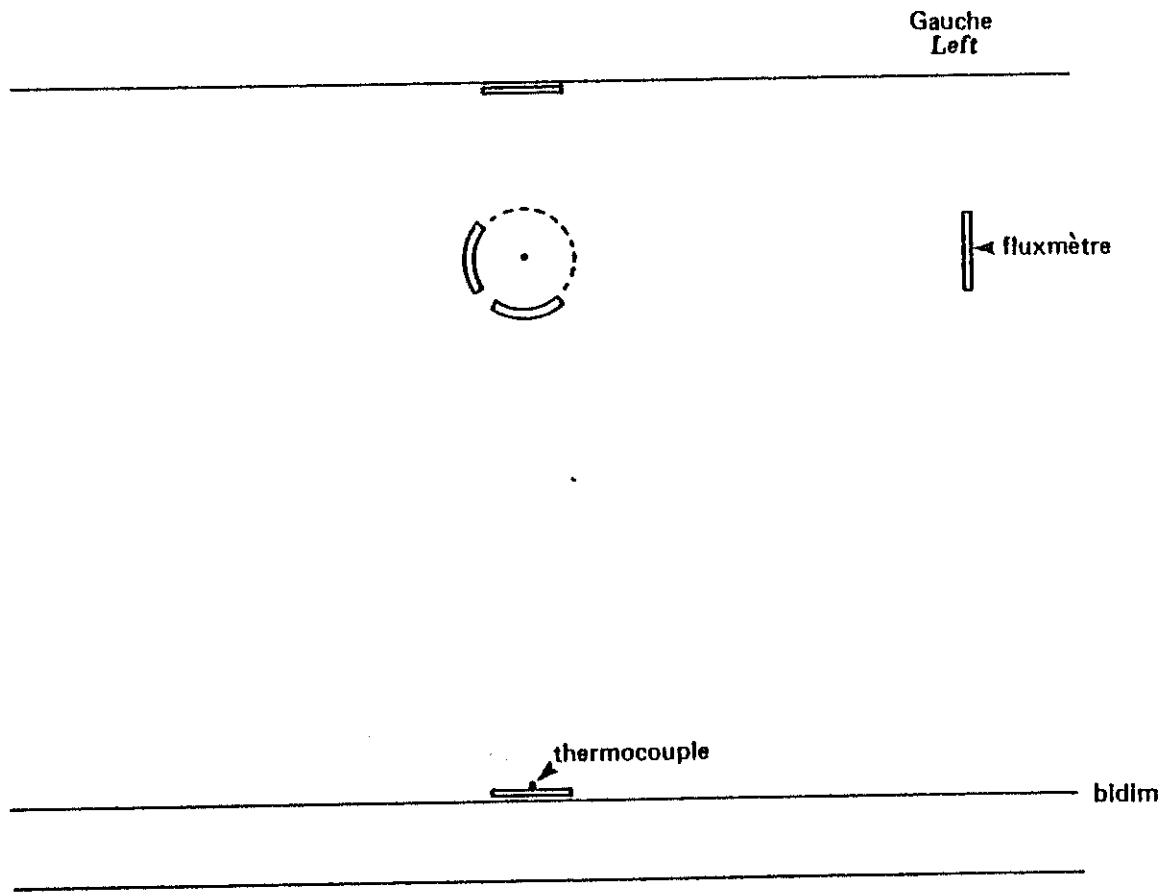


Figure 7: Répartition des fluxmètres, section BB (limon)

4.2 MESURE DU REGIME HYDRAULIQUE

Des sondes T.D.R. utilisant la technique de réflectométrie dans le domaine temporel (Patterson & Smith, 1981) sont installées en dessous de l'axe du pipe afin de mesurer le profil de la teneur en eau et de surveiller la redistribution de l'eau durant le gel du sol. Les mesures T.D.R. donneront aussi des indications sur la teneur en glace, sur la propagation du front de gel et sur la formation des lentilles de glace (Smith & Patterson, 1982). Deux sortes de sondes TDR sont installées dans la fosse: la première, garnie de sondes horizontales (2 lignes de transmission horizontales de 25 cm de longueur), mesure les teneurs en eau à différentes profondeurs, la deuxième constituée d'une seule sonde verticale pourra donner directement le profil de la teneur en eau (fig. 3) grâce à une nouvelle technique en cours de développement (Smith and Patterson, 1982, confidences des chercheurs). 4 sondes de ce dernier type seront également implantées sur le côté du pipe (fig. 4).

2 sondes capacitives (Tran Ngoc Lan et Jallet, 1974), une dans chaque sol, permettent aussi de mesurer la teneur en eau du sol non gelé (fig. 8). Des tensiomètres à bougies poreuses remplis d'eau mesurent la pression de l'eau intersticielle à différentes profondeurs dans le sol non gelé. Cette pression est donnée par le hauteur d'une colonne de mercure. 10 sondes de ce type sont placées dans chaque sol. (fig. 9).

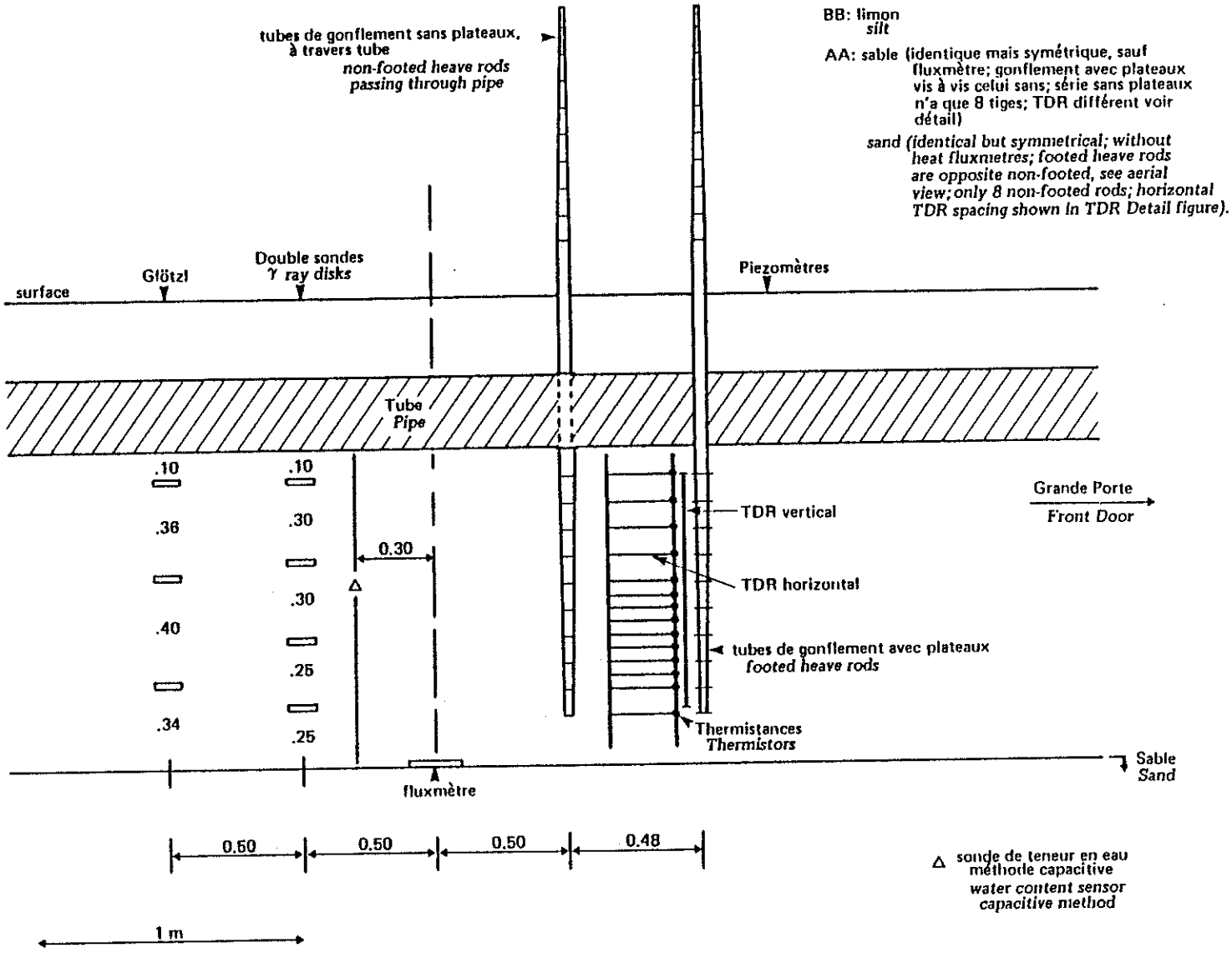


Figure 8: Coupe en long

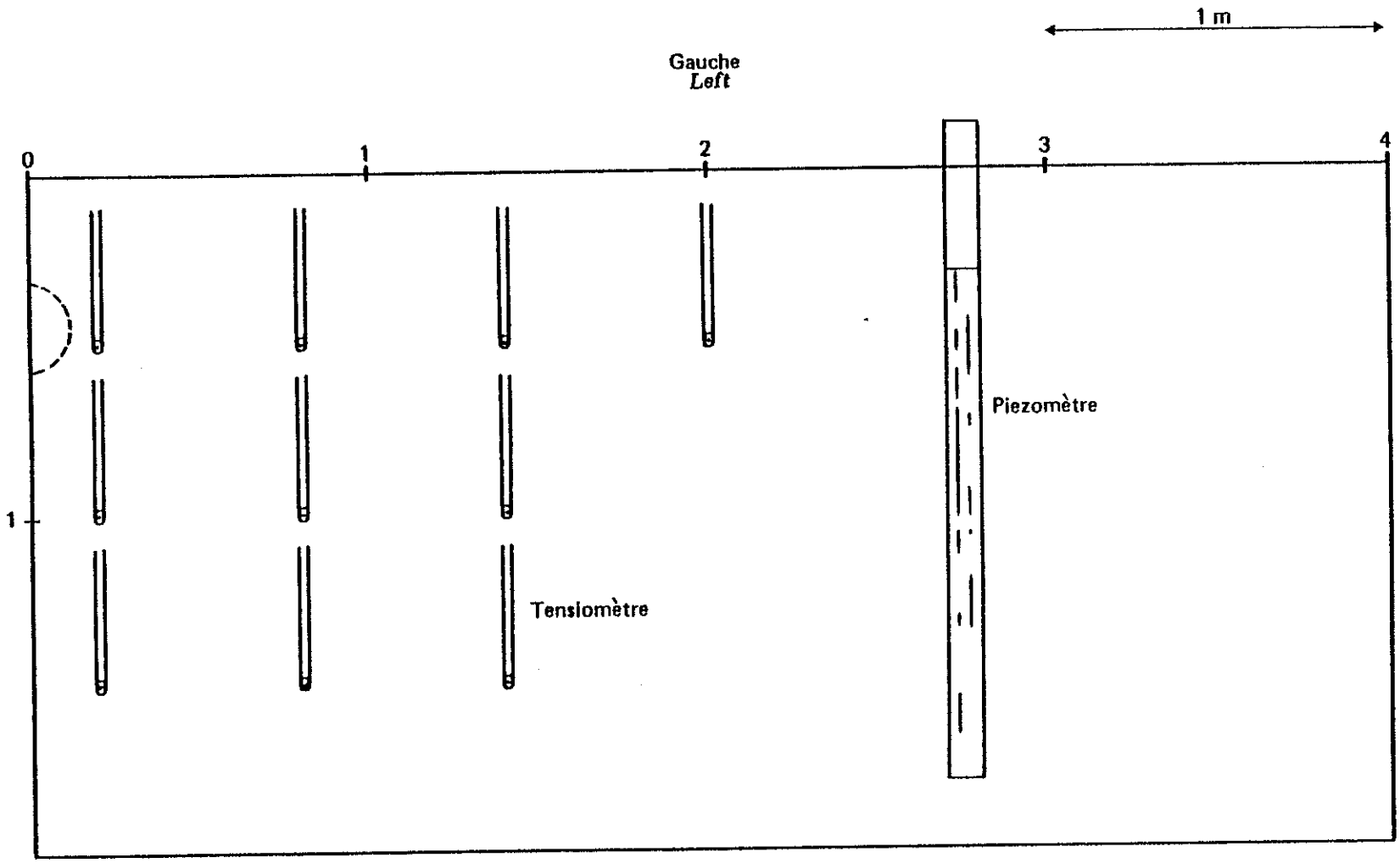


Figure 9: Répartition des tensiomètres

Douze piézomètres et 6 puits de contrôle permettent enfin de vérifier le niveau de la nappe phréatique durant la mise en eau et au cours de l'essai (fig. 4).

4.3 MESURE DU GONFLEMENT

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer les déplacements relatifs dans le sol.

4.3.1 TUBES TELESCOPIQUES

2 séries de tubes téléscopiques en aluminium (tableau 1), construits suivant le modèle de Mackay et al 1979, et de Baracos et Marantz, 1953, sont installées dans chaque sol (fig. 8). La première série, placée sur le côté du pipe possède des plateaux à la base de chaque tube espacés de 10 cm. La 2 ème série sans plateaux passe à travers le pipeline, les tubes étant toujours espacés de 10 cm. Le tube central, le plus profond, descend dans les 2 cas à 1 m sous le pipe. Les tubes téléscopiques sont placés sur l'axe du pipeline ou le plus près possible de celui-ci (fig. 4) afin d'éviter que la composante horizontale du gonflement, nulle sur l'axe, ne perturbe leur mouvement relatif. Celui-ci sera mesuré à la surface.

4.3.2 DOUBLE SONDE GAMMA

La double sonde utilisée pour les mesures de densité des sols (Valeux 1980) est ici employée en association avec une série de

Tableau 1

Dimensions des tubes téléscopiques

Matériel: aluminium .035 pouce d'épaisseur

1) 2 séries avec 10 tubes, positionnées à côté du pipe et avec plateau à la base de chaque tube

	Longueur (m)	Diamètre (Pouces)
tige externe	1.0	1 5/8
	1.2	1 1/2
	1.4	1 3/8
	1.6	1 1/4
	1.8	1 1/8
	2.0	1
	2.2	7/8
	2.4	3/4
	2.6	5/8
tige centrale	2.8	1/2

longueur de l'anneau des plateaux: 1.5 pouce

2) 2 séries, sans plateaux, passant à travers le pipe

La série dans le limon comprend 10 tubes de dimensions telles qu'indiquées ci-dessus.

La série dans le sable comprend 8 tubes seulement, i.e. il n'y en a pas de 5/8 et de 1/2 pouce. La longueur des autres tubes reste telle qu'indiquée ci-dessus.

disques en P.V.C. (ϕ165 cm, ép 1.5 cm) enterrés à différentes profondeurs afin de mesurer les déplacements relatifs du sol. Ce système en traçant le profil de la densité détecte la position des disques et leur déplacement éventuel. Chaque site de mesure est constitué d'un empilement de 4 ou 5 disques entourés de 2 puits opposés: dans l'un descend la source gamma, dans l'autre descend le compteur (fig. 10).

4.3.3 NIVELLEMENT

Le gonflement du sol est aussi mesuré par un nivellement périodique de la surface.

4.4 MESURE DE LA PRESSION TOTALE

La pression totale est mesurée en différents endroits (fig. 11) à l'aide de capteur Glotzl. Ce capteur est constitué d'une membrane double, rempli d'huile, déformable sous l'application d'une pression extérieure. On vient mesurer la pression de l'huile à l'intérieur du capteur en l'équilibrant à une pression d'azote elle-même mesurée dans la salle de mesure.

4.5 MESURE DE LA DEFORMATION DU PIPE

2 systèmes de mesure de la deformée du pipe ont été retenus.

4.5.1 JAUGES DE DEFORMATION

22 stations de mesure de déformation sont réparties le long du pipe

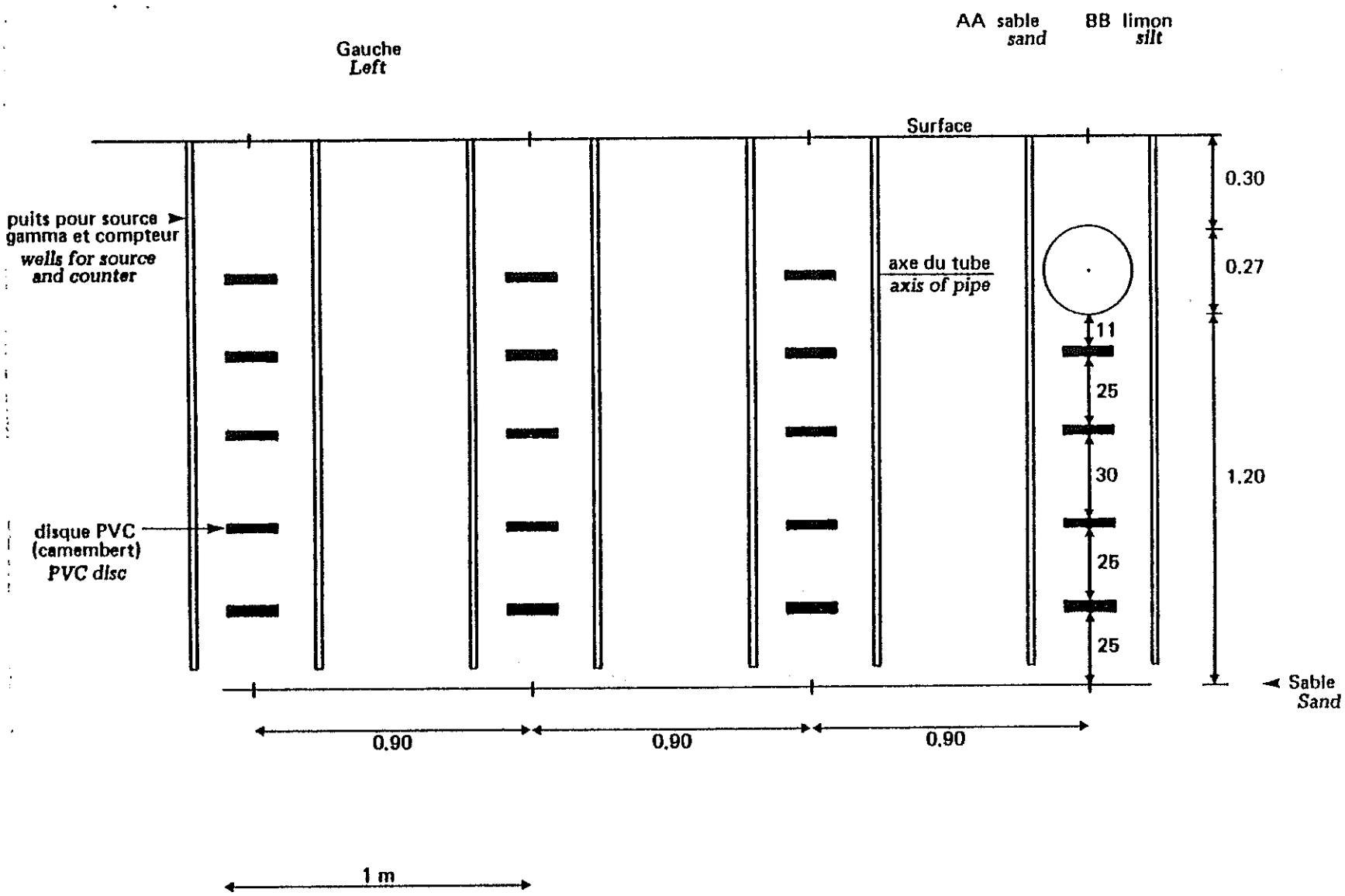


Figure 10: Répartition des doubles sondes gamma

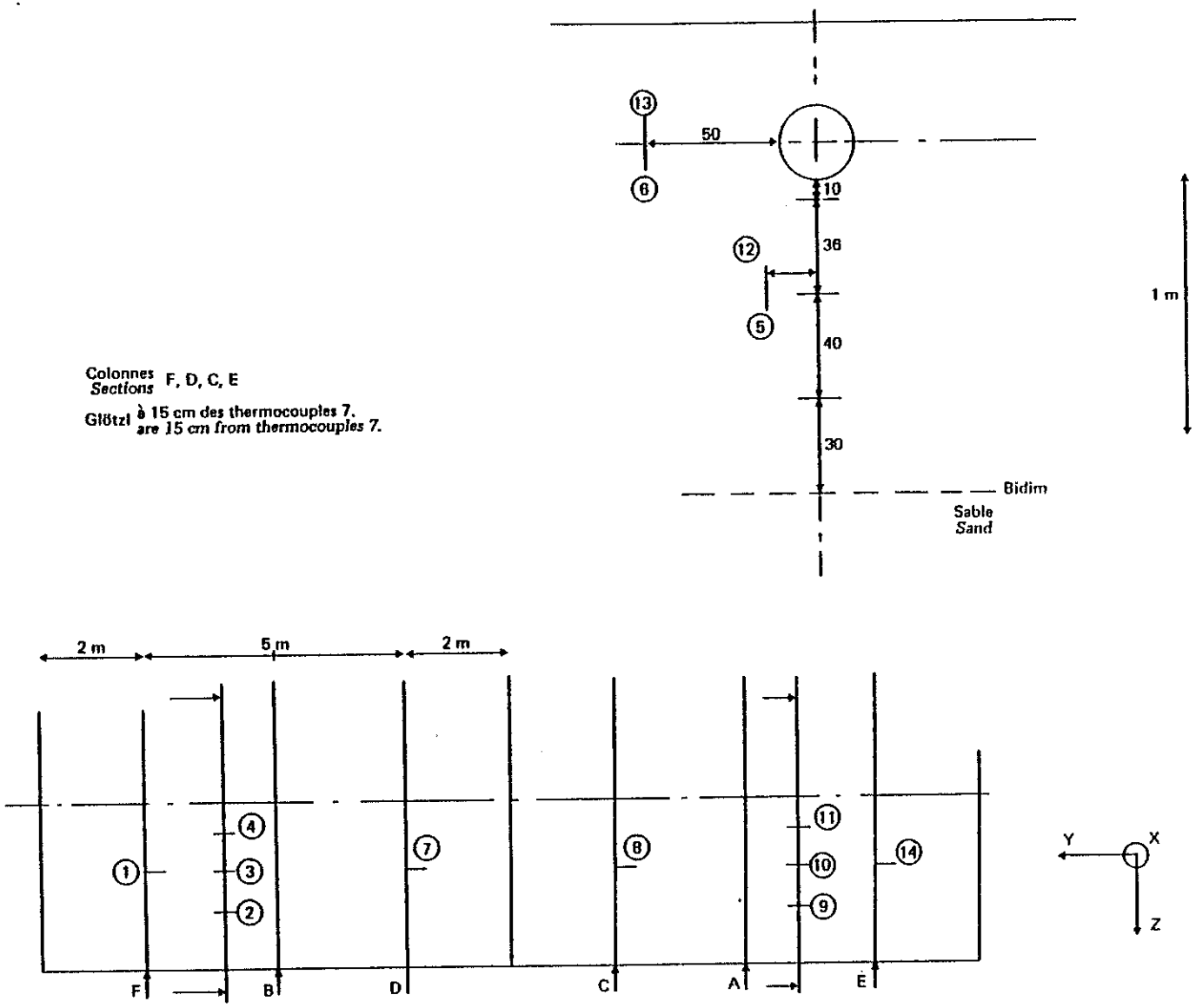


Figure 11: Répartition des sondes Glötzl

(fig. 12). La densité de ces stations est plus importante dans la zone de transition où la déformée devrait être plus importante. Chaque station comprend 2 jauges (Micro Measurement CEA 250 UW) montées en demi-pont, l'une sur la génératrice supérieure et l'autre sur la génératrice inférieure du pipe. Ce montage permet de s'affranchir de la compensation en température et permet une mesure directe de la contrainte de flexion pure. De plus, à 1 m de la limite des 2 sols, dans le SNEC est située une station de mesure complète de l'état de contrainte. Cette station comprend 2 rosettes (Micro Measurement CEA 250 UR) montées de chaque côté du pipe sur les génératrices latérales.

4.5.2 TIGES A PLATEAUX

Ce système permet de mesurer depuis la surface la forme et la position de la génératrice supérieure du pipeline en différents points.

26 tiges terminées par une pointe et munies d'un plateau (fig. 13) sont fixées sur la génératrice supérieure du pipeline tous les 50 cm. Un appareil prenant appui sur 3 tiges consécutives permet de mesurer le déplacement relatif de la tige centrale par rapport à celui des 2 tiges extérieures. Cette mesure permet d'accéder directement à la valeur de la dérivée seconde de la déformée dans la zone de mesure (Bowes 82).

3 autres tiges identiques sont fixés sur le pipe, l'une à la limite des sols et les 2 autres aux extrémités (fig. 12).

Le nivellement de chaque pointe mesure la déformée du pipeline et indique sa position par rapport à un repère fixe.

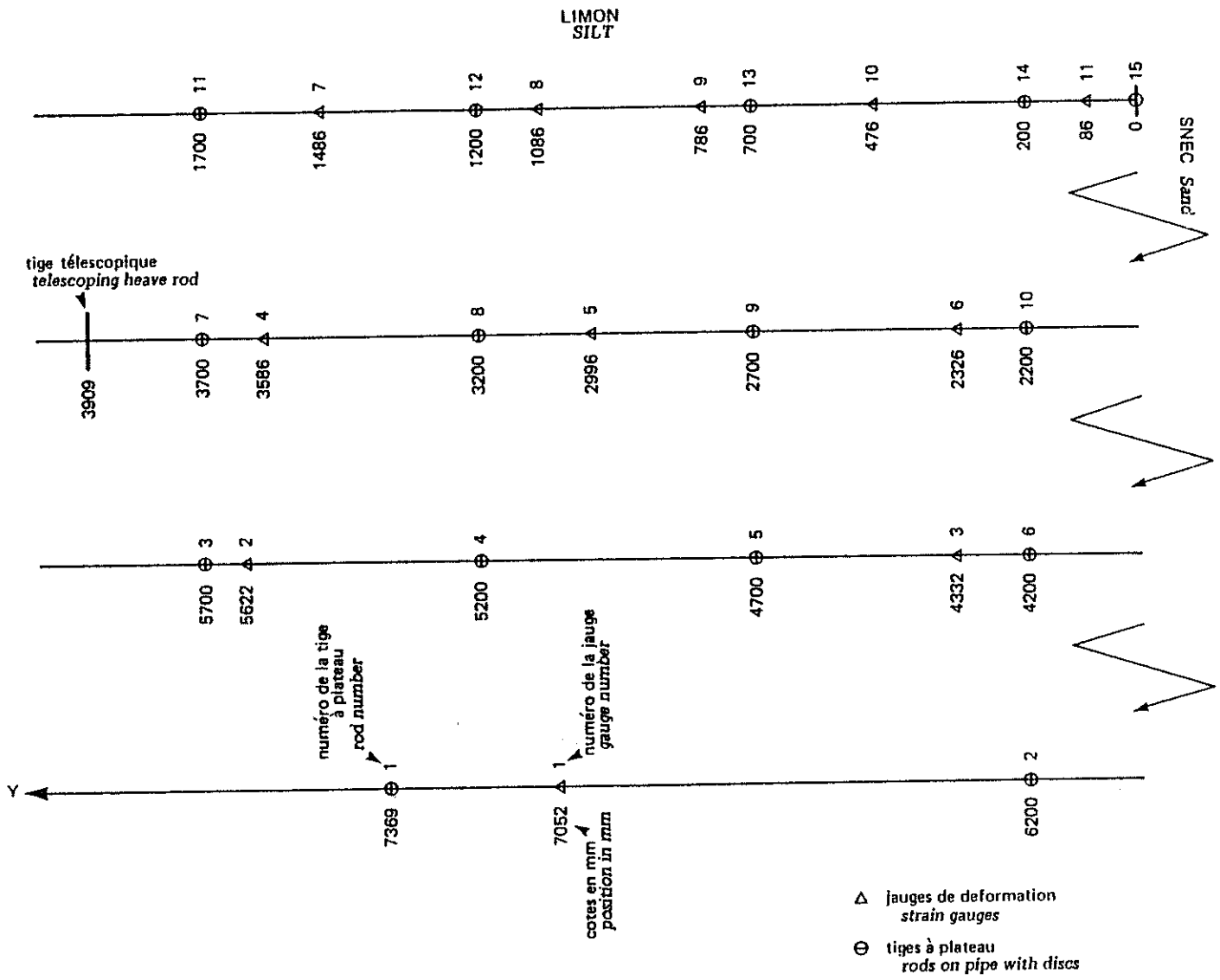


Figure 12a: Position des jauges et des tiges à plateau le long du pipeline (reference numérotation)

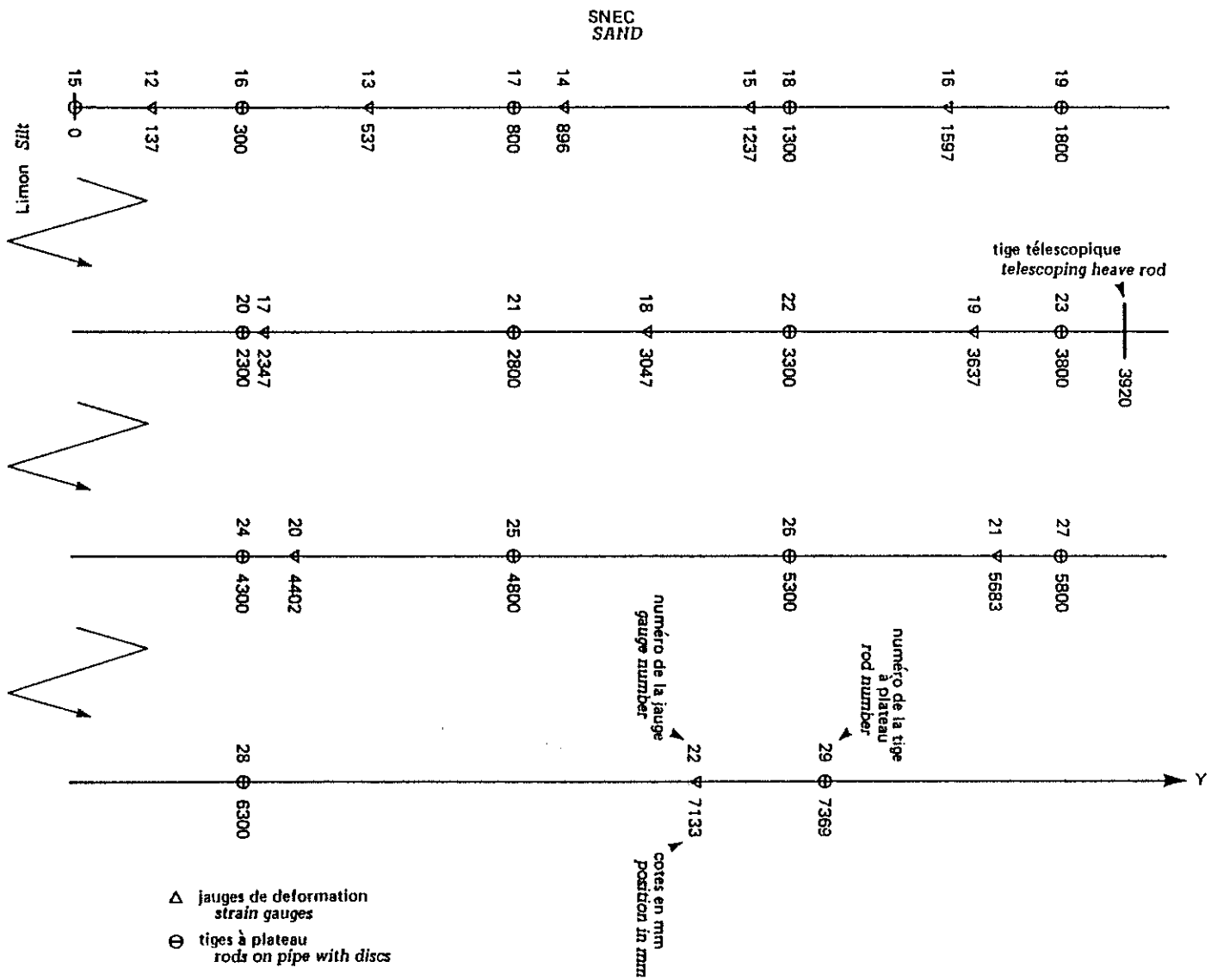


Figure 12b: Position des jauges et des tiges à plateau le long du pipeline (reference numérotation)

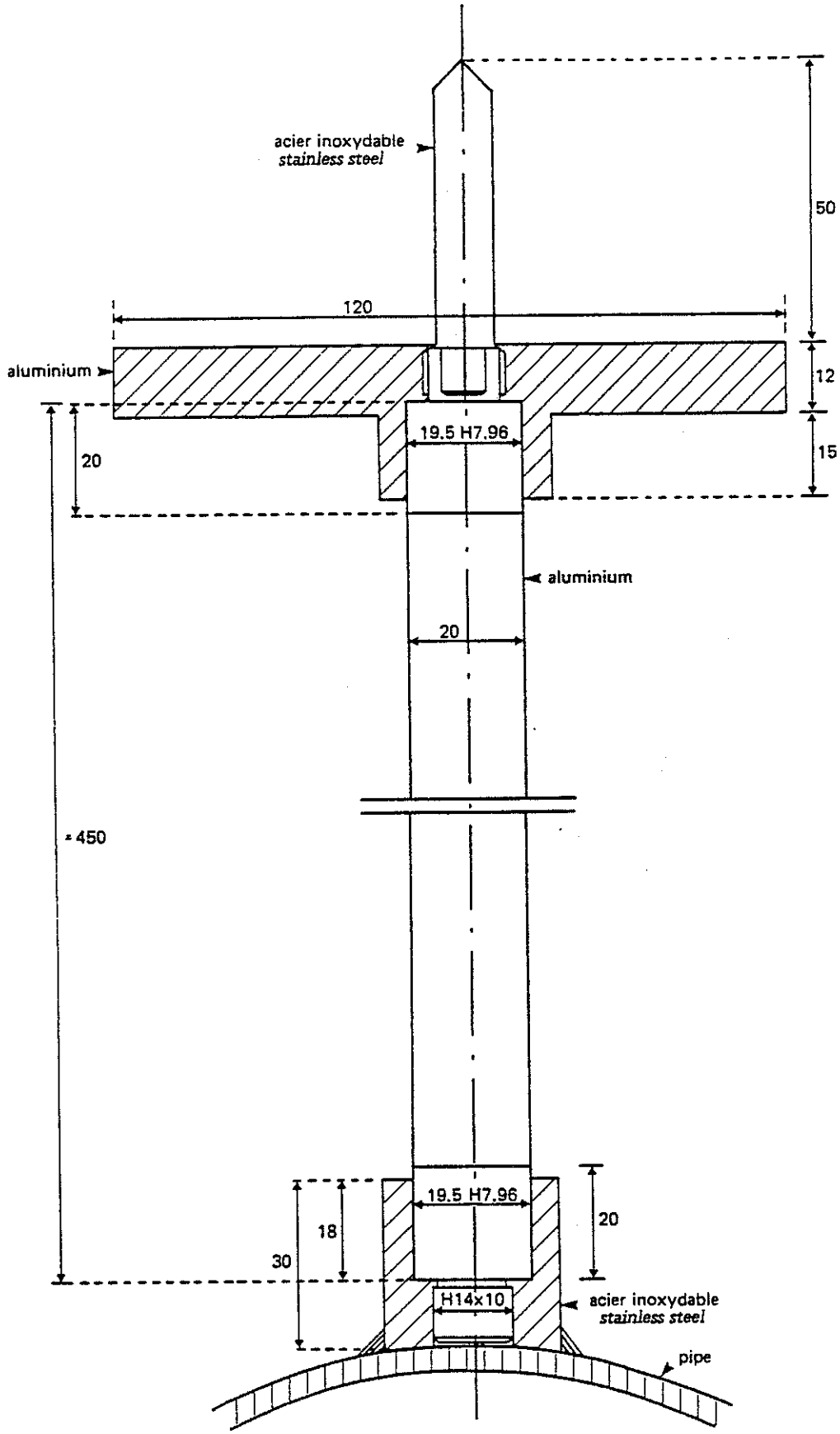


Figure 13: Détail des tiges à plateau

Sur chaque plateau est effectué une mesure d'angle suivant l'axe du pipeline et perpendiculairement à l'aide d'un niveau d'angle de précision. Cette dernière mesure donne quelques indications supplémentaires sur l'allure de la déformée et permet d'estimer une torsion éventuelle du pipeline.

4.6 AUTRES MESURES

Au cours de l'expérimentation, on prélèvera des carottes afin de mesurer directement la teneur en eau et d'étudier le fractionnement des isotopes d'oxygène. Des puits d'observation sont disponibles pour d'autres sondages éventuels.

5. REMPLISSAGE DE LA FOSSE

(Voir Annexe D) Le remplissage de la fosse s'est effectué par couches successives (6) de 30 cm compactées et nivellées, soit environ 40 tonnes de SNEC et 40 tonnes de limon pour chaque couche.

Chaque sol, préparé au C.E.T.E. (Centre d'étude technique de l'équipement) de Rouen, est transporté à la station de gel de Caen par 2 semi remorques (150 km). Il est ensuite introduit progressivement dans la fosse à l'aide d'un buldozer (Deruppé) puis réparti uniformément de façon manuelle. Le compactage est ensuite réalisé à l'aide d'une plaque vibrante et d'un petit rouleau compresseur pour les 2 dernières couches. La densité obtenue après chaque compactage est vérifiée à l'aide d'un gamma densimètre (Valeux, 1979).

Les valeurs moyennes de densité sèche sont les suivantes:

SNEC 1.85 10^3 Kg m^{-3}

LIMON 1.65 10^3 Kg m^{-3}

Les thermocouples, les Glotzl et les disques des doubles sondes sont placés au fur et à mesure en recreusant chaque couche compactée. On rebouche ensuite chaque trou en compactant manuellement.

La 4ème couche étant installée (niveau inférieur du pipeline), 2 trous de $(1m)^3$ sont creusés afin d'installer les TDR et les tubes téléscopiques.

Le pipeline fourni par SOFREGAZ est formé d'une section centrale de 12 m aux extremités de laquelle est soudée une prolongation de 3m. Sur ces dernières sont enfin soudés les coudes permettant de relier le pipeline au système de réfrigération (fig. 14). Ces différents soudages sont effectués in situ par une équipe du C.E.T.E. Le pipeline muni des jauges de déformation est alors mis en place à l'aide d'un portique élévateur.

Les bases des tiges à plateau, démontables, sont soudées sur la génératrice supérieure et protégées.

Le remplissage de la fosse est ensuite complété. Une série de forage est finalement réalisée afin de mettre en place les tensiomètres, les piézomètres, les I.P.G., les puits pour les doubles sondes, les T.D.R. verticaux et les tiges à plateau. Pour ces dernières, les bases sont remises à découvert et l'on vient visser les tiges en position. Les câbles des

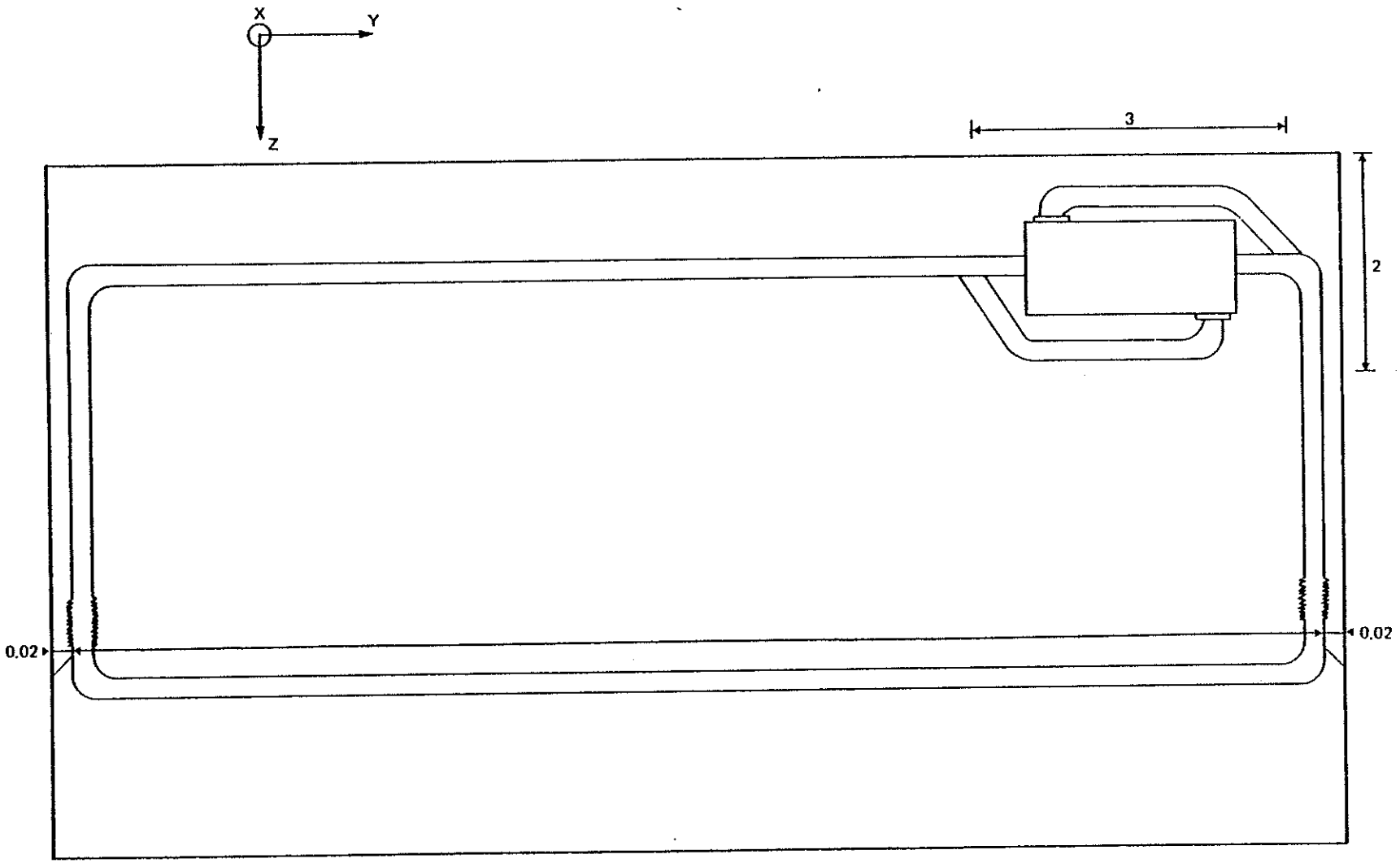


Figure 14a: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue en long

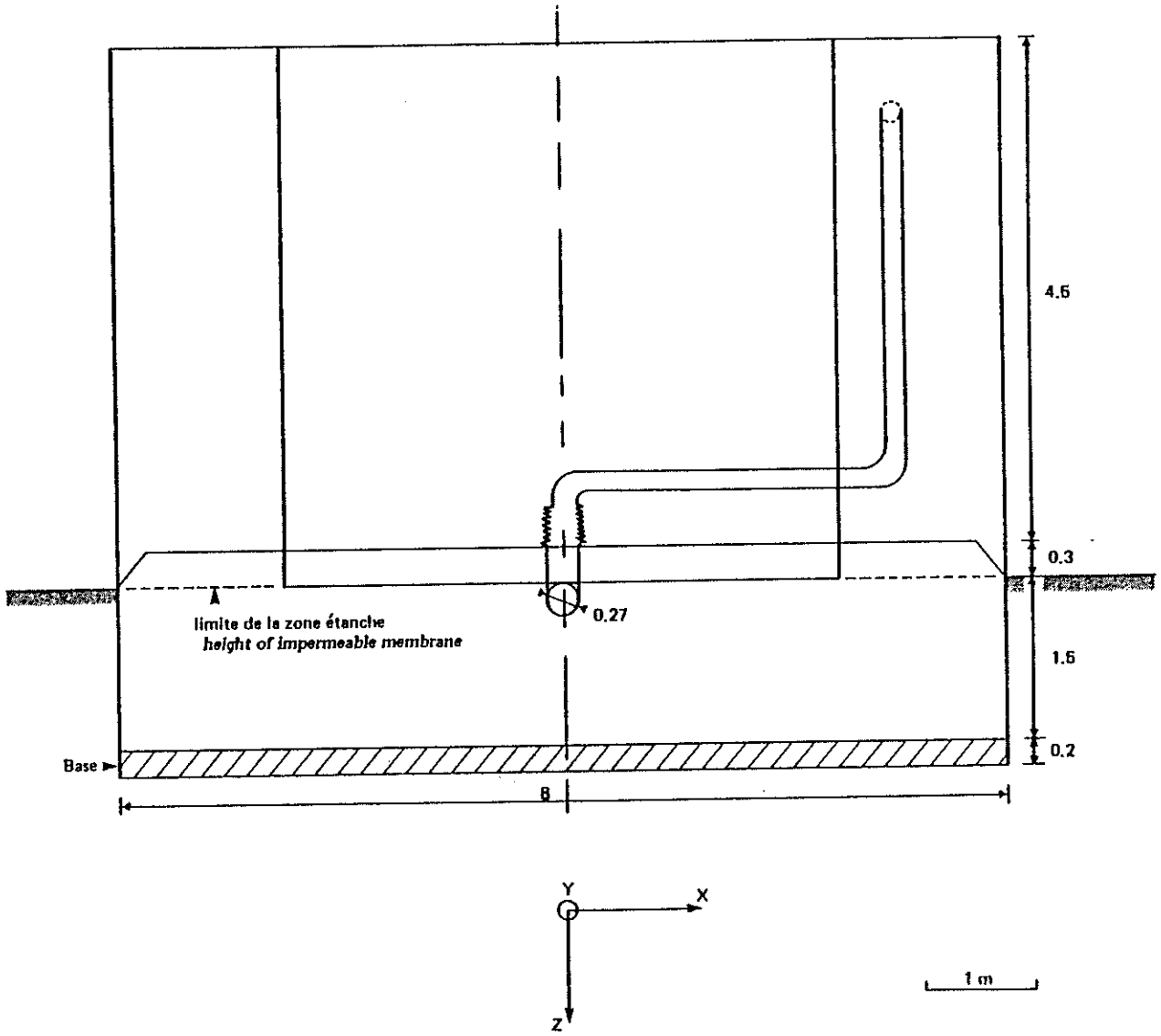


Figure 14b: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue transversale

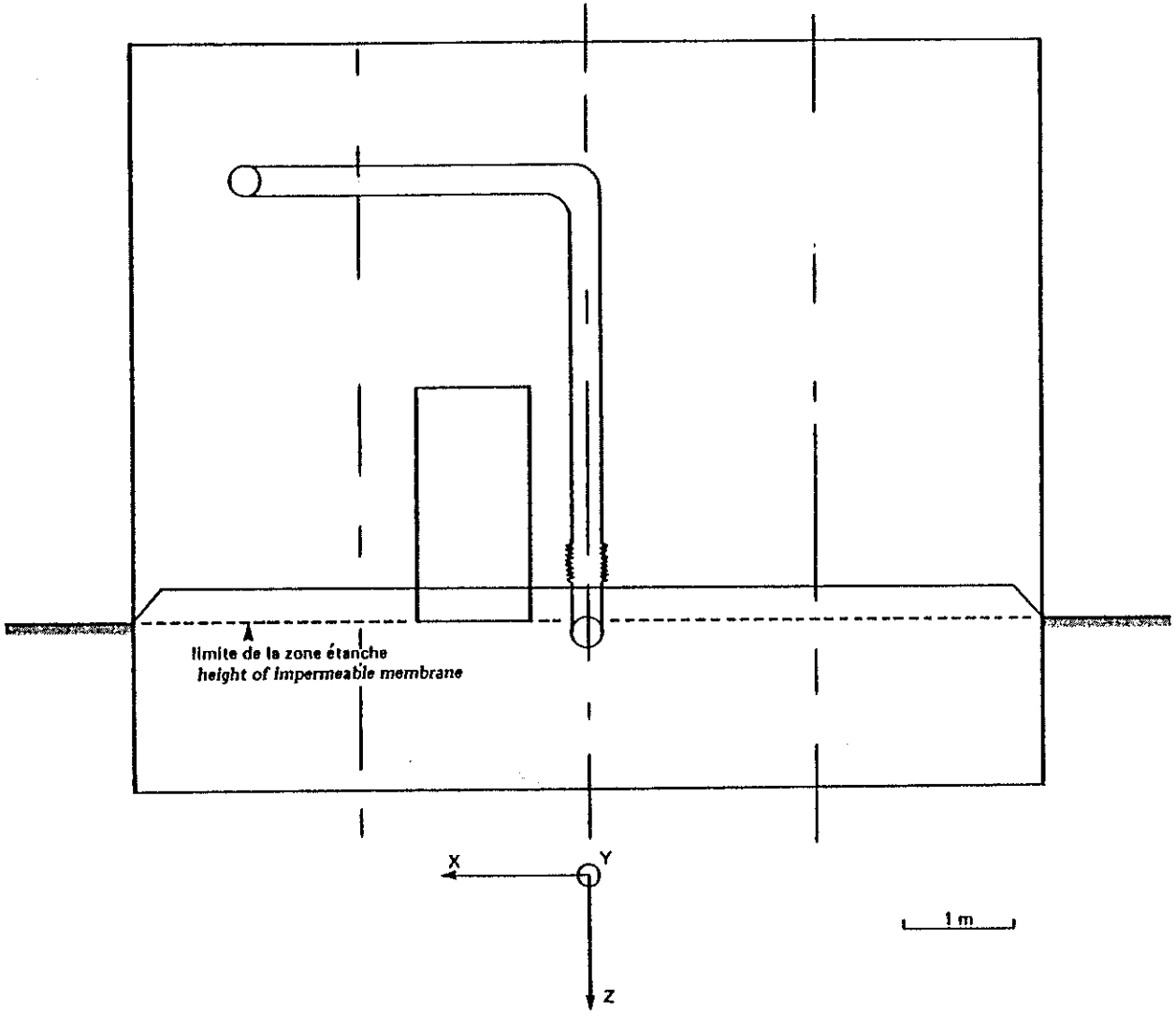


Figure 14c: Système de réfrigération du pipe et son reliage au pipe, vue transversale

thermistances et des thermocouples, des fluxmètres et des jauges de déformation ainsi que les tuyaux reliés aux Glotzl sont amenés sur le côté de la fosse perpendiculièrement au pipeline puis regroupés et acheminés vers la salle de mesure.

Un reportage photographique ainsi qu'un film vidéo ont été réalisés au cours de ces opérations. Un rapport photographique (Annexe D) et un rapport indiquant la cote exacte de chaque sonde sont en cours de réalisation.

6. LECTURE ET ENREGISTREMENT DES DONNEES

A l'exception des mesures de températures faites automatiquement, toutes les autres mesures sont manuelles. Un mode opératoire ainsi qu'une feuille type de mesures ont été conçus pour chaque appareil de mesure afin d'en faciliter l'emploi et d'assurer la reproductibilité des mesures. (Voir exemple: tableaux 2 et 3).

6.1 MESURES EFFECTUEES DANS LA SALLE DE MESURE

6.1.1 MESURE DE LA TEMPERATURE

La mesure des quelques 200 thermocouples et thermistances est effectuée automatiquement à l'aide d'un système d'acquisition de données de type ORION (SOLARTRON-SCHLUMBERGER). Ce système comprend 200 voies programmables dans le temps. Chaque lecture est enregistrée sur une cassette et une imprimante et transmise à un micro-ordinateur GOUPIL chargé du traitement et de la gestion des données.

Tableau 2

Mode Opératoire pour Jauge de courbure du pipe
(Appareil qui mesure le déplacement des tiges à plateaux)

1. Commencez avec les tiges 2,3 et 4.
2. Placez la tige #4 sous le guide à fente.
3. Centrez le bout du micromètre sur la tige #3, en s'assurant que le micromètre ne touche pas la tige.
4. Reposez le disque plat sur la tige #2.
5. A l'aide de la poignée et du niveau à bulle, tenez l'appareil horizontal.
6. Avancez le micromètre jusqu'à ce que le limiteur de torsion glisse.
7. Relevez la mesure sur le micromètre; eg. 5.48 mm.
8. Répétez avec les tiges 3,4 et 5, etc.

N.B. Une révolution du micromètre = 0.5 mm
Lorsque la mesure relevée sur le micromètre est 5.00 mm les trois tiges sont sur un plan.
Gamme du micromètre: 0-10 mm.

Tableau 3

Feuille type de mesure pour tiges à plateaux et la jauge de courbe

Date _____

Numéro de la tige	Mesure au micromètre (4 chiffres+virgule)
1 (LIMON)	XXXXXXX } extrémité; pas de mesure
2	XXXXXXX }
3	
4	
5	
6	eg 5.45 mm
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	XXXXXXX tige centrale
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	XXXXXXX } extremité; pas de mesure
29	XXXXXXX }

6.1.2 AUTRES MESURES

Les jauges de déformation sont reliées à 3 boites de commutation (Vishay SB1K) et mesurées à l'aide d'un pont d'extensiométrie (Vishay P350A).

Un appareil spécial auquel sont reliés les tuyaux contenant l'azote en provenance des sondes Glotzl indique la pression d'équilibrage de ces dernières.

6.2 MESURES EFFECTUEES DANS LA FOSSE

Les autres mesures doivent être effectuées directement sur le site expérimental.

La longueur des câbles reliés aux sondes TDR est réduite afin d'éviter une atténuation trop importante du signal. La mesure s'effectue donc à la surface à l'aide d'un TDR CABLE TESTER (TEKTRONIX 1502) relié à une table traçante. Pour chaque sonde il est nécessaire de tracer 2 courbes afin de permettre l'interprétation de la mesure.

Pour chaque série de mesure des doubles sondes, un appareil de mesure automatique est positionné au dessus de chaque couple de réservation tubée. La tige porte-source et la tige porte-compteur se déplacent grâce à un dispositif électromécanique de descente. Le profil de mesure est relevé sur une imprimante.

Les déplacements relatifs des tubes téléscopiques sont mesurés à l'aide d'un reglet. Le nivellement périodique des tubes centraux indique la position des tubes par rapport à un point

de repère fixe. La position des tiges à plateau est relevée comme indiquée en 4.5.2.

La surface de la fosse est nivellée périodiquement.

La mesure des piézomètres, tensiomètres et des I.P.G. est aussi effectuée dans la fosse.

6.3 ENREGISTREMENT DES MESURES

L'ensemble des mesures effectuées manuellement est rentré sur le clavier d'un micro-ordinateur GOUPIL. Celui-ci assure le traitement de chaque type de mesure et son classement dans un fichier séparé. Chaque fichier stocké sur une diskette est transmis au Canada.

7. TRAVAIL EFFECTUE AU LABORATOIRE GEOTECHNIQUE DE CARLETON

Des échantillons de SNEC et de limon de Caen ont été envoyés au laboratoire géotechnique de l'Université Carleton à Ottawa afin de subir différents examens. Le projet envisage des essais très détaillés pour établir avec précision les propriétés thermiques, thermodynamiques et hydrauliques. Plusieurs méthodes seront utilisées de façon répétitive pour mesurer ces propriétés. Parmi celles prévues, plusieurs sont en cours de réalisation comme: la granulométrie, la mesure de la masse volumique des particules, la mesure de la teneur en sel, l'identification minéralogique des grains par rayon-X, la mesure de la teneur en eau en fonction de la température négative (par TDR) et la mesure des propriétés thermiques (méthode de Riseborough et Smith). Quelques résultats de ces analyses préliminaires sont présentés dans l'annexe A.

8. PROGRAMME DE L'EXPERIENCE

Le démarrage de l'expérience proprement dite est prévu pour le début de septembre 1982. Du fait de la longueur probable de l'humidification du limon, la mise en eau a débuté fin juin. Selon les calculs (Annexe B) mettant en evidence le temps relativement long nécessaire au refroidissement uniforme de la fosse, l'abaissement de la température du hall doit être effectué le plus tôt possible (début août). Les calculs faits par le LCPC et les Geotechnical Science Laboratories, pour plusieurs situations et conditions alternatives indiquent une pénétration du front de gel et une vitesse de propagation satisfaisantes pendant les 4 à 6 mois prévus pour l'essai. Un example des calculs réalisés à partir du modèle de Hwang (1977) est donné dans l'annexe C.

9. CONCLUSION

Au cours de la première année de recherche concernant l'étude des phénomènes survenant lors du gel d'un sol autour d'un pipeline refroidi, la majeure partie des objectifs prévus a pu être remplie. Un modèle expérimental a été conçu, instrumenté et installé à la station de gel de Caen. Pour ce faire deux sols ont été choisis pour leur sensibilité différente au gel: la station expérimentale a été remise en état et toutes les améliorations et transformations nécessaires ont été accomplies afin de l'adapter aux conditions expérimentales; la conception et l'installation d'un réseau de capteurs permet de mesurer l'évolution du régime hydraulique et thermique, le

gonflement des sols et l'état de déformation du pipeline.

Les analyses des sols devant être faites à l'Université Carleton sont en bonne voie.

La première expérimentation commencera au début de septembre 1982.

COMMENTAIRE FINAL DU CHERCHEUR PRINCIPAL:

Le fonctionnement d'un projet international

Ce projet est unique pour les Geotechnical Science Laboratories et pour le moins exceptionel pour les associations qui le subventionnent. Aucune expérience de ce type ou station expérimentale comparable n'existe au Canada. Toutefois le projet ne doit pas être simplement considéré comme l'achat de services ou l'utilisation d'une station non disponibles au Canada. Au contraire c'est une coopération scientifique qui rassemble les connaissances spéciales et les installations des deux pays coopérants afin d'obtenir des résultats supérieurs à ceux que pourraient obtenir chacun des deux pays séparément. L'apport de chaque pays est souvent unique. La station de gel elle-même, les connaissances techniques et la qualité d'équipement spécial, par exemple, sont une contribution française très instructive pour les canadiens. Les connaissances canadiennes, surtout des propriétés thermodynamiques des sols, du phénomène et de la mesure de gonflement dû au gel, et de l'étude des comportements mécaniques du pipeline et des sols sont, nous le croyons, également appréciés par nos collègues français. Dans d'autres domaines les connaissances et les capacités se chevauchent au grand profit de l'analyse scientifique. Ce projet représente une façon particulièrement efficace d'aboutir à des résultats de recherche, ainsi qu'une occasion

pour les étudiants de grade supérieur d'acquérir et de ramener au Canada les connaissances françaises qui nous sont peu familières.

Tous ces avantages coûtent un certain prix, bien que ce ne soit pas un problème financier. Les participants d'un projet de coopération internationale doivent reconnaitre les besoins d'une communication complète entre les équipes ainsi que les délais qu'elle entraine. Au cours de cette année, plusieurs réunions ont eu lieu afin d'établir des démarches qui faciliteraient le fonctionnement du projet. Le Comité Scientifique maintient son rôle de coordinateur. Dans un projet de ce genre qui regroupe plusieurs associations, de telles réunions sont non seulement indispensables mais aussi très profitables. Les contraintes qui inévitablement surviennent sont compensées par les avantages scientifiques et financiers. De fait le coût du projet s'élève à moins de la moitié du coût d'un projet entièrement réalisé au Canada. Il est à noter que la contribution française apparaît, à plusieurs égards, plus importante (et probablement donc plus coûteuse) que celle prévue à l'origine.

En dépit de toutes ces considérations, la somme allouée par le MAS au contrat pour la première phase n'a été dépassée que de 2%. L'inflation, les changements de personnel, ainsi que les avantages évidents d'une présence canadienne plus importante à Caen suggère une certaine augmentation du budget pour la seconde année du contrat.

L'accord de base international porte quatre signatures: l'Université Carleton et trois institutions françaises: la Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et le Centre National de la Recherche Scientifique. De plus Carleton est responsable envers le ministère de l'Energie, des mines et des ressources par le biais de l'autorité scientifique et le ministère d'Approvisionnements et services.

Divers délais dans la formulation et la signature (31 décembre 1981) de l'accord international n'ont pas permis aux parties de progresser dans leur travail avant cette date. Néanmoins, l'installation a été essentiellement achevé à la mi-juin. Une première expérience de gel n'a finalement pas pu être réalisée puisque les calculs ont démontré que la stabilisation thermique et hydraulique des sols nécessitaient plusieurs mois. En ce qui concerne les autres exigences du contrat, tout le travail a été accompli sauf un aspect. Le Geotechnical Science Laboratories a commencé ses analyses et poursuivra son travail surtout en tenant compte des conditions qui surviendront lors de l'expérience.

La qualité de l'installation expérimentale en place et de la disposition des instruments est particulièrement remarquable. Ce projet a suscité l'intérêt de l'industrie du pipeline au Canada. Quoique le projet ne constitue pas une étude de prototypes techniques, les problèmes scientifiques étudiés

auront un impact considérable sur le développement de l'expertise technique canadienne relié à l'expansion industrielle du Grand Nord.

REMERCIEMENTS

PARTICIPATION CANADIENNE

Ont participé à la réalisation de l'expérimentation durant cette première année de recherche:

- Geotechnical Science Laboratories (Université Carleton):
  L. Boyle, M. Burgess, C. Lewis, D. Patterson, M.W. Smith et P.J. Williams

- Département de Génie Civil (Université Carleton): W.H. Bowes

- Ecole polytechnique (Montreal): B. Ladanyi, G. Lemaire

PARTICIPATION FRANCAISE

Nous tenons à remercier le Comité Scientifique et les différents organismes français qui participent également à ce projet de coopération scientifique:

- Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris)

- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paris)

- Centre d'Etude Technique de l'Equipement (Rouen)

- Centre National de la Recherche Scientifique

- Centre de Géomorphologie du CNRS (Caen)

- Sofregaz

Nous tenons à remercier le service scientifique de l'Ambassade de France à Ottawa, J. Wilson pour la dactylographie et C. Earl pour la réalisation des différents plans et figures.

REFERENCES

Aguirre-Puente, J. 1979. Recherches en laboratoire et simulation. dans: Gels des sols et des chaussées, Ottawa 17 au 21 octobre 1977 - Compte-rendu du séminaire, sous la direction de Frémond et Williams, Paris, Editeur: Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 21-23.

Baracos, A. et Marantz, O. 1953. Vertical ground movements, Sixth Canadian Soil Mechanics Conference (Winnipeg); National Research Council of Canada, Tech. Mem. 17, pp. 29-36.

Berger, T.R. 1977. Northern Frontier-Northern Homeland - The Report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry: Volume One. Ministry of Supplies and Services, Canada, 213 pp.

Bowes, W.H. 1982. Frost-heave Experiment - Memorandum (Carleton University) to P.J. Williams.

Gel des sols et des chaussées. Ottawa 17 au 21 octobre 1977. Compte-rendu du séminaire sous la direction de Frémond et Williams, Paris. Editeur Association Amicale des Ingenieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 82 pp.

Hwang, C.T. 1977. On quasi-static solutions for buried pipes in permafrost. Can. Geotech. J., 14, pp. 180-192.

Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. and Ingersoll, A.C. 1954 Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications. Univ. of Wisconsin Press, U.S.A., 325 pp.

Mackay, J.R., Ostrick, J., Lewis, C.P. et Mackay, D.K. 1979. Frost heave at ground temperatures below 0°C, Inuvik, Northwest Territories, Current Research Part A, Geol. Surv. Can., Pap. 79-1A, pp. 403-405.

Patterson, D.E. and Smith, M.W. 1981. The measurement of unfrozen water content by time domain reflectometry. Results from laboratory tests. Can. Geotech. J., 18, 1, pp. 131-144.

Philippe, A., Aguirre-Puente, J. et Bertouille H. 1970. La Station de Gel de Caen. Présentation-Première expérimentation. Rapport LCPC-CNRS, France, Sept. 1970.

Riseborough, D. and Smith, M.W. 1981. Development of a thermal conductivity probe for use in frozen soils. Geotechnical Science Laboratories, Carleton University, Ottawa, unpublished report.

Smith, M.W. and Patterson, D.E. 1982. Investigation of freezing soils using Time Domain Reflectometry. Final report to the Department of Energy, Mines and Resources Geotechnical Science Laboratories, Carleton University.

Tran Ngoc Lan et A. Jallet. 1974. Mesure par capacité électrique de la teneur en eau des sables sur bande transporteuse. Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 71, pp. 109-115.

Valeux, J.C. 1980. Double sonde gamma et dispositif de forage associé. Rapport du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Centre d'Expérimentation Routière, Rouen, Ministère de l'environnement et du cadre de vie, France, 12 pp.

Valeux, J.C. 1979. Matériels de contrôle du compactage. Rapport du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Rouen, Centre d'Expérimentation Roùtière, Ministère de l'environnement et du cadre de vie, France, 11 pp.

Williams, P.J. 1979. Pipelines and Permafrost. Longman, 108 pp.

ANNEXE A

Résultats du travail sur les sols effectué au
Geotechnical Science Laboratories

1. LIMON DE CAEN:

Deux échantillons (chacun d'environ 10 Kg) de limon de Caen ont été envoyés à l'Université Carleton ou analyses en laboratoire. Le premier a été obtenu lors du vidange de la fosse est le deuxième, lors de son remplissage. Les analyses ont surtout été faites avec l'echantillon #1, sauf indication contraire.

Granulométrie: (figure A1)

30.4% sable
56.5% limon
13.1% argile

Masse volumique des particules:

2.665 ± 0.007 ($\pm$ 0.3%) gcm^{-3}

Minéralogie (rayon-X):

quartz avec un peu de chlorite et calcite

Teneur en sel (Radiometer: CDM 83 Digital conductivity meter)

échantillon #1: équivaut à 0.73-0.95g NaCl/L saturé
échantillon #2: équivaut à 0.37-0.50g NaCl/L saturé

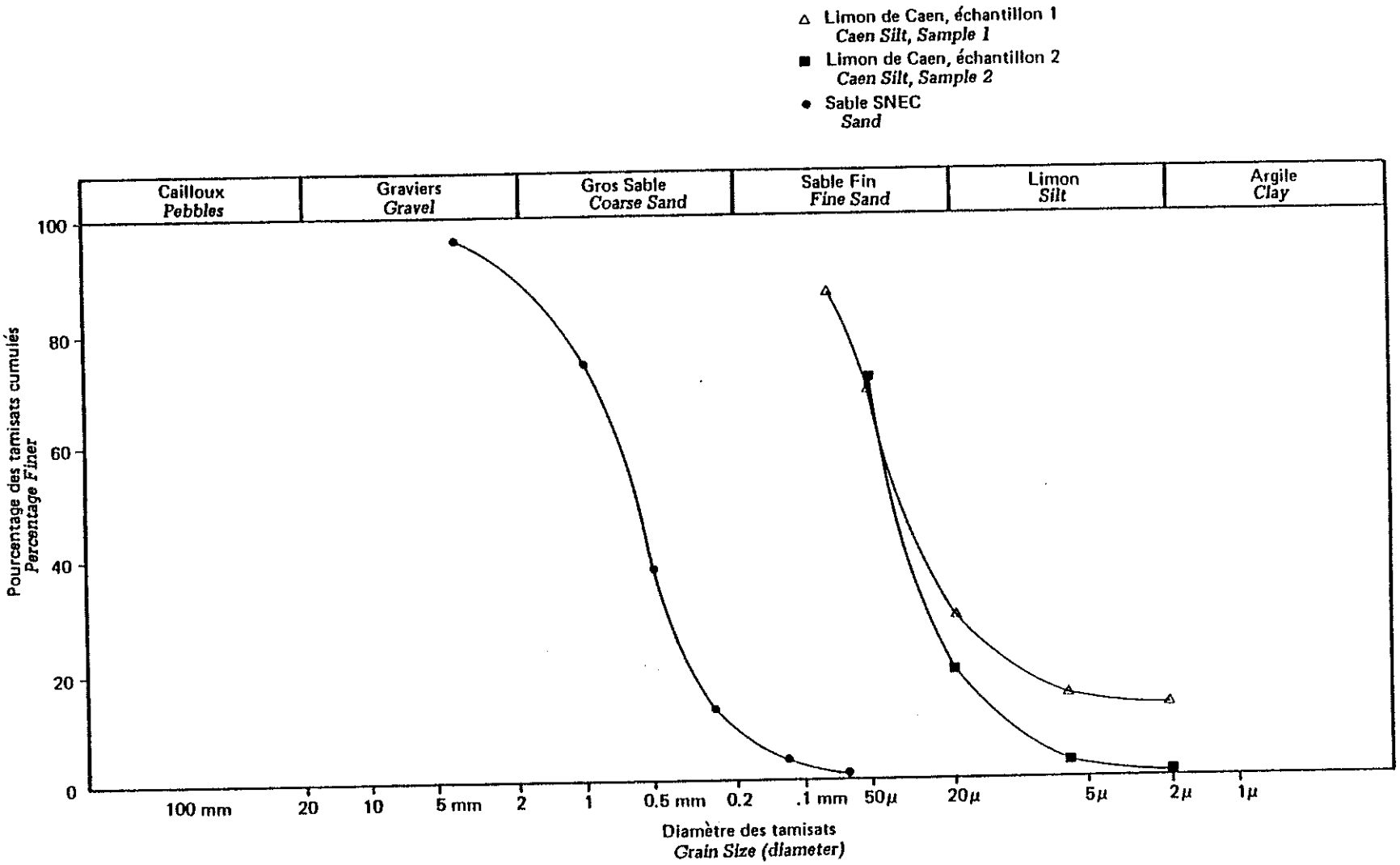


Figure A1 : Analyse granulometrique

Teneur en eau non gelée en fonction de la température négative (méthode TDR)

La teneur en eau non gelée a été mesurée par la méthode TDR sur des échantillons avec une densité sèche entre 1.504 et 1.514 et un pourcentage de saturation entre 88.2 et 94. (Pour cette densité la teneur en eau volumique pour le sol saturé est de 37.8 à 40.3%).

Les résultats sont présentés dans la figure A2 et comparés avec les courbes pour d'autres limons. La teneur en eau non gelée plus élevée pour le limon de Caen est sans doute dû à sa teneur en sel elevée (voir Smith et Patterson, 1982 pour mesures par TDR de teneur en eau non gelée en fonction de la teneur en sel).

Propriétés thermiques

Une sonde de type aiguille chauffante en cours de développement au Geotechnical Sciences Laboratories (Riseborough et Smith, 1982) a été utilisée pour la mesure de propriétés thermiques (conductivité thermique, diffusivité et capacité calorifique).

Les valeurs de ces propriétés à 5°C pour 10 essais différents sont indiquées dans le tableau A1. La conductivité thermique en fonction de la température négative est tracée dans la figure A3.

SABLE SNEC (figure A1)

10.2% gravier	par tamisage sec
89.3% sable	
0.5% limon et argile	
92.7% gravier+sable	par méthode de pipette avec

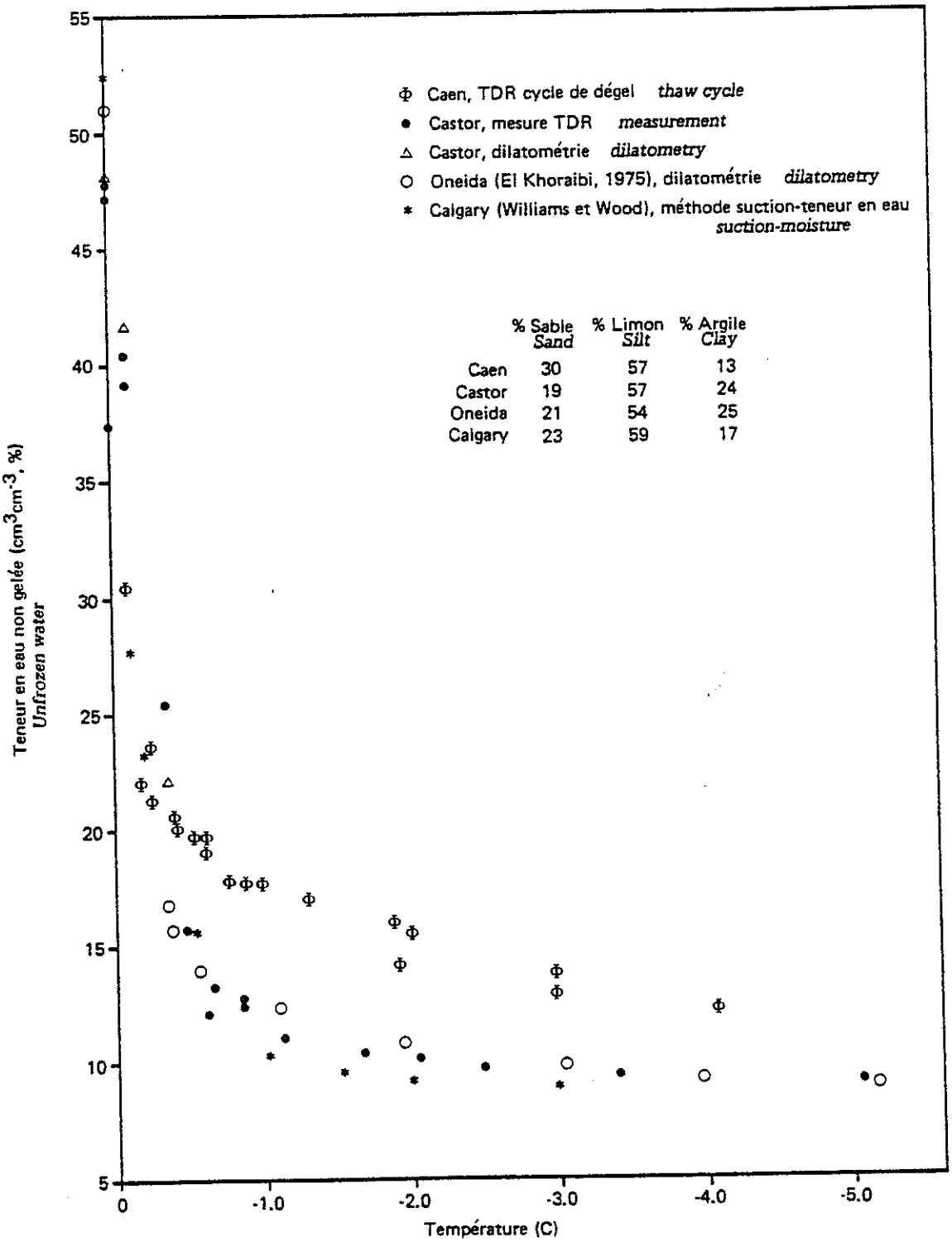


Figure A2: Teneur en eau non gelée en fonction de la tempèrature négative pour des limons

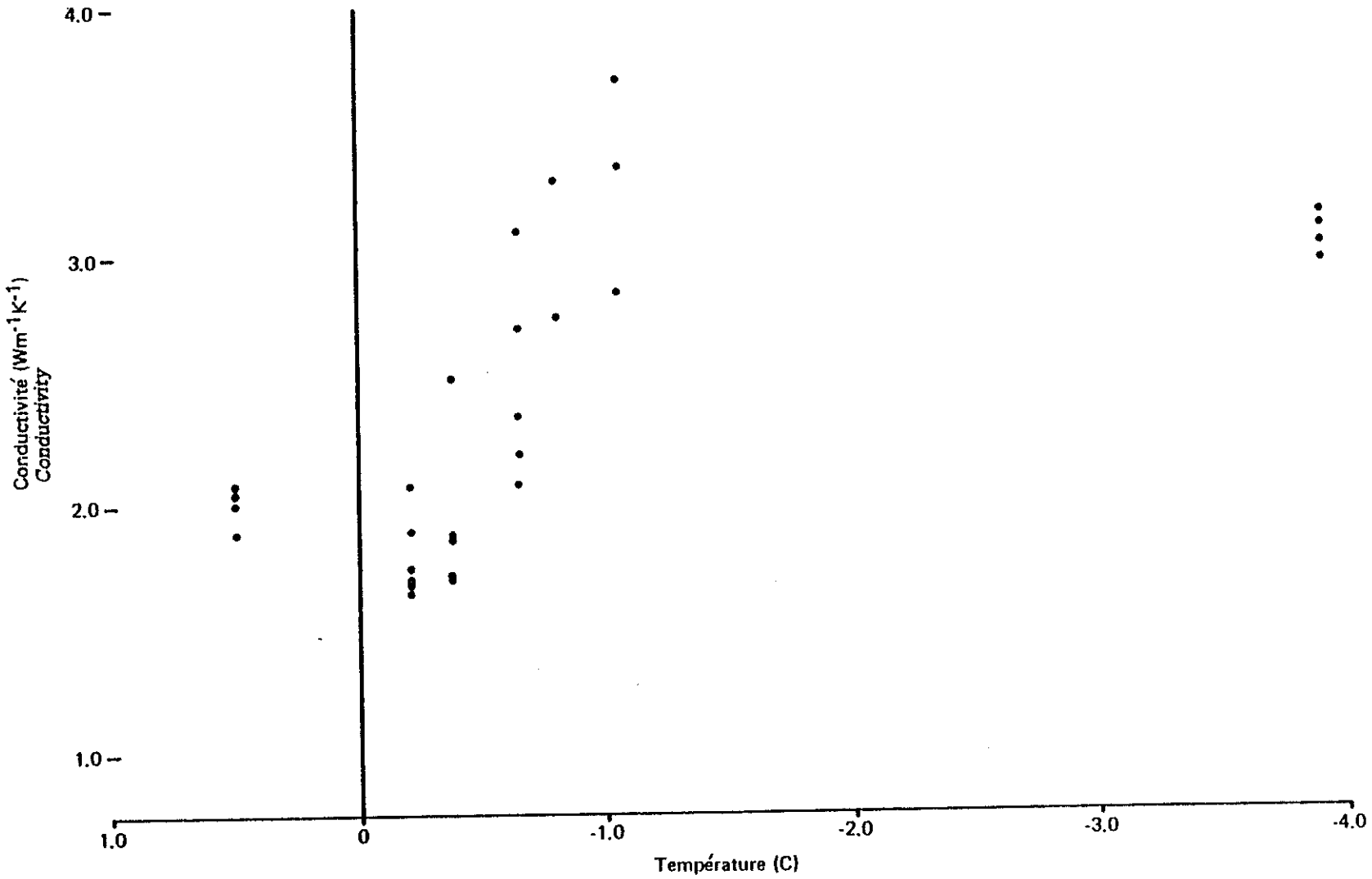


Figure A3: Conductivité thermique en fonction de la température, limon de Caen

Tableau A1

Propriétés thermique du limon de Caen à 5°C

Essai#	Conductivité thermique $Wm^{-1}\ K^{-1}$	Diffusivité $(x\ 10^{-6})$ m^2s^{-1}	Capacité Calorifique $(x\ 10^7)$ $Jm^{-3}\ K^{-1}$
1	2.106	1.045	.2015
2	1.900	.5502	.3453
3	2.099	.7950	.2640
4	1.770	.5874	.3013
5	1.978	.7676	.2576
6	1.983	.7972	.2488
7	2.008	.8083	.2640
8	1.879	.5963	.2482
9	1.954	.6307	.3098
10	2.000	.6500	.3007
Majeune	1.97	.723	.272

Mesures obtenues utilisant une technique spéciale d'aiguille chauffante (Riseborough et Smith).

ANNEXE B

Calcul du temps de refroidissement de la fosse avant le démarrage

Le calcul du refroidissement de la fosse suit la méthode d'Ingersoll et al (1954) établie pour les problèmes de flux de chaleur linéaire dans un solide semi-infini avec une surface plane de température constante et une température initiale interne connue. Lorsque la température à la surface est de 0°C et la température initiale du milieu est To, la température interne T est fonction du temps (t), de la profondeur (z) et de la diffusivité (α)

$$T = To\ \Phi\ (z,t,\alpha)$$

où

$$\Phi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int e^{-\beta^2} d\beta$$

Les calculs du refroidissement de la fosse, lorsque la température de l'enceinte descend à 0°C, supposent qu'il n'y a pas de changement de phase (et donc pas de chaleur latente): conditions voulues au début de l'expérience où le refroidissement et non le gel des sols est souhaitable. Les calculs sont pour un sol saturé avec une constante de diffusivité de .0076 cm^2s^{-1}.

Trois cas de température initiale ont été calculés: 5°, 15° et 20°C. Les profils de température en fonction de la profondeur à 10,20,30,60 et 120 jours après le refroidissement sont présentés sur les figure B1,B2 et B3.

Ces calculs indiquent que le gradient thermique dans la fosse sera loin d'être isothermique après un mois de refroidissement, quelque soit la température initiale.

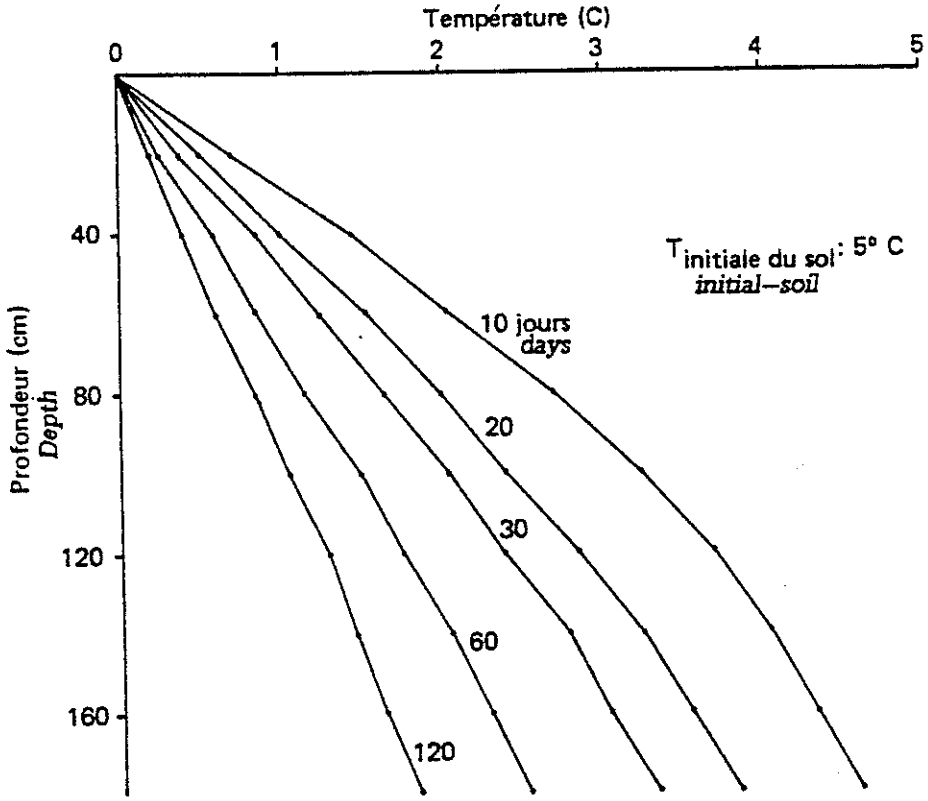


Figure B1: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur,

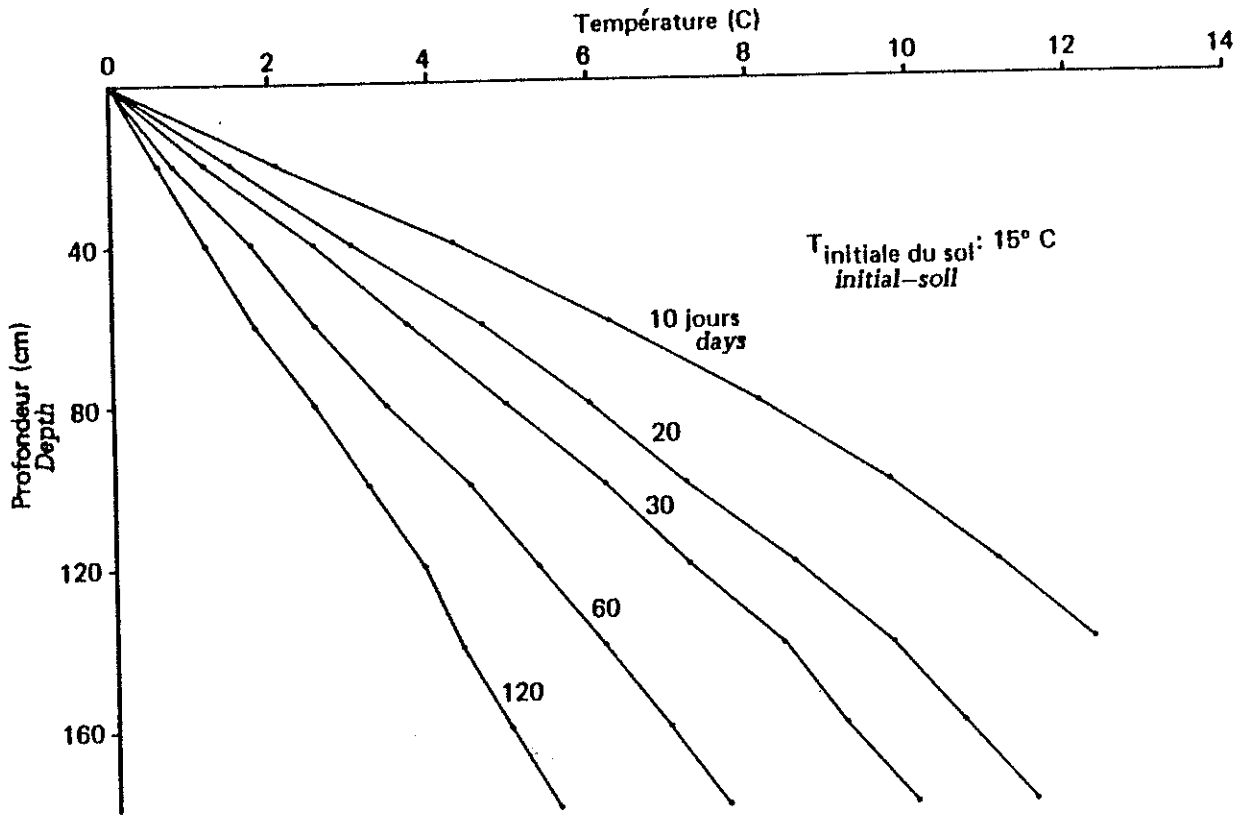


Figure B2: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur, sol initialement à 15° C

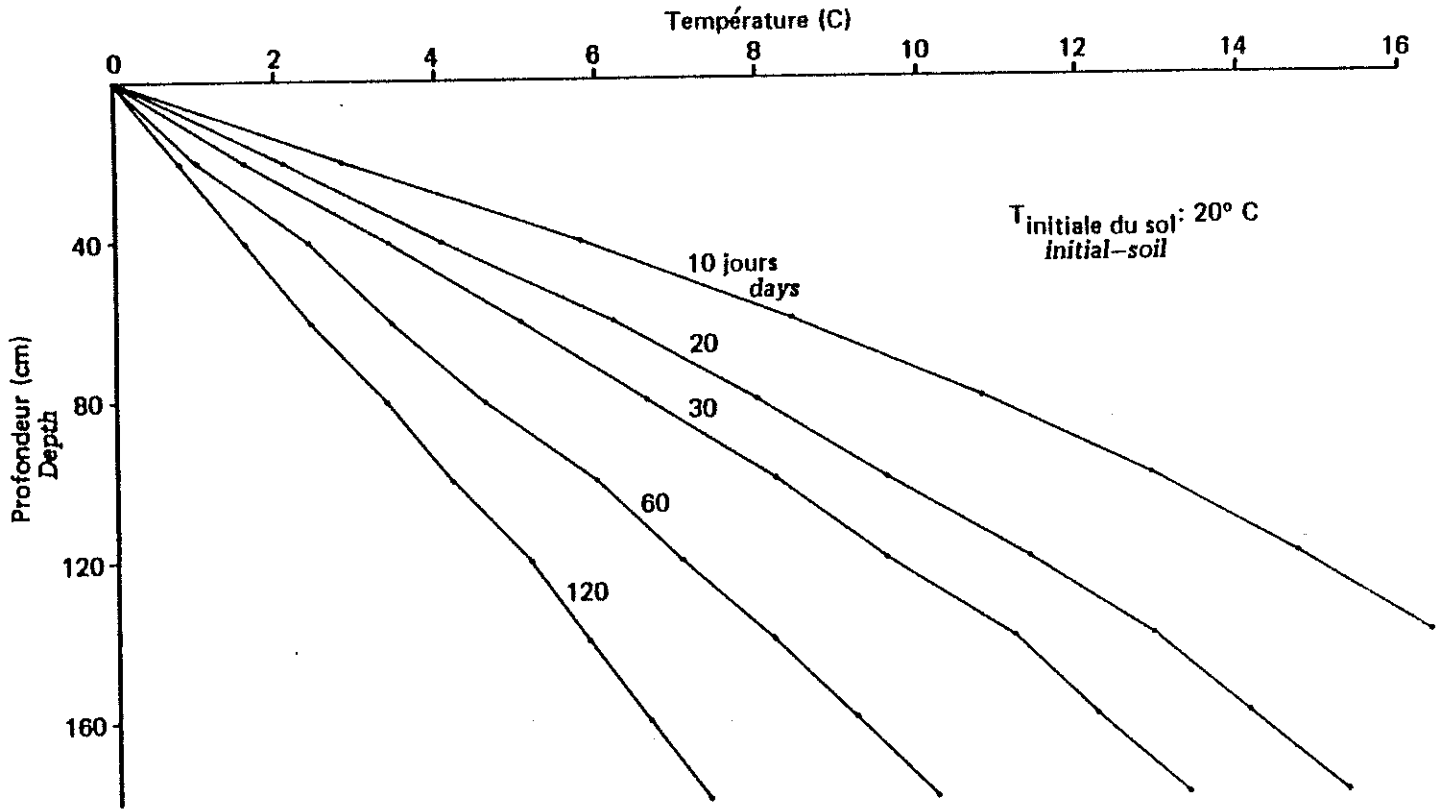


Figure B3: Refroidissement de la fosse, température vs profondeur, sol initialement à 20° C

ANNEXE C

Calcul de la pénétration du front de gel

La profondeur du front de gel au cours de l'expérience a été calculée pour trois sols différents (un limon, un sable et une argile) en utilisant la méthode de Hwang (1977).

Les propriétés thermiques choisies pour les sols sont les suivants:

Sol	Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$) non gelé	gelé	Chaleur latente (10^6 Jm^{-3})
limon	1.3	2.4	120
sable	2.0	3.4	100
argile	1.1	1.7	200

Les calculs sont faits pour les conditions suivantes:

rayon du pipe: 15 cm.
profondeur d'enterrement du pipe: 30 cm jusqu'au sommet
température du pipe: -2^oC
température du sol: 0^oC
température de gel: 0^oC

temps après début de refroidissement du pipe:
10,30,60,90,120,180,210 jours

La figure C1 indique l'évolution du front de gel en fonction du temps. Quelques vitesses de propagation du front de gel sont présentées dans le tableau ci-dessus.

Période	Vitesse de propagation (mm/jour) limon	sable	argile
0-10 jours	22.5	28.5	15.0
10-30	6.8	8.3	4.5
90-120	2.8	4.0	2.0
180-210	2.0	2.5	1.0

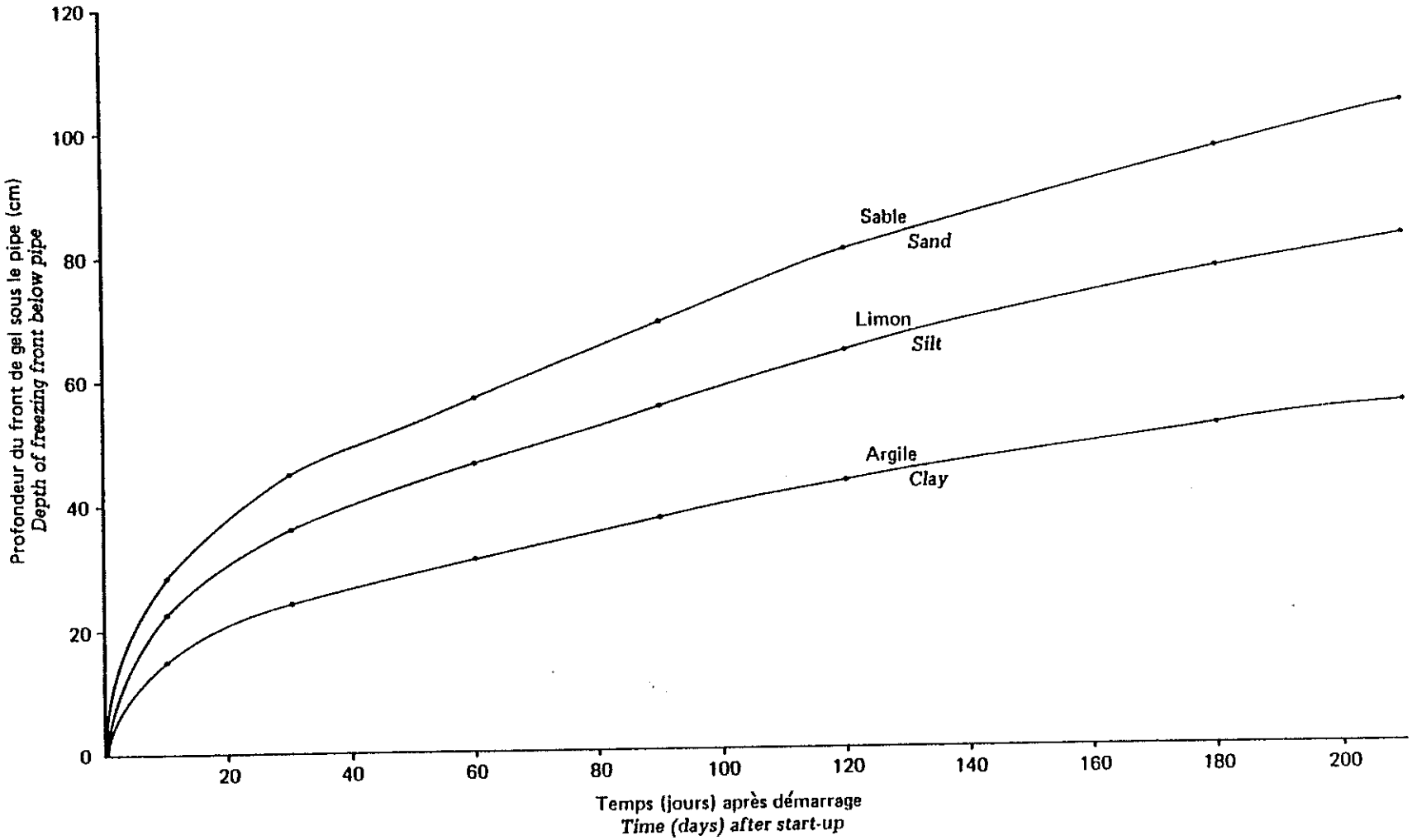


Figure C1 : Evolution du front de gel

ANNEXE D

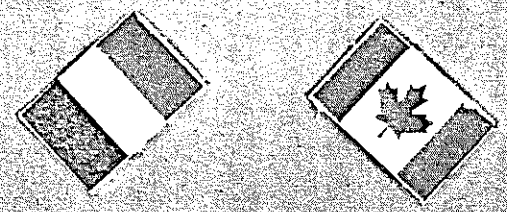
Rapport photographique

'ON UNIVERSITY

NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES



CONTRAT FRANCO CANADIEN

"COMPORTEMENT DES CONDUITES ENTERREES SOUMISES A DES TEMPERATURES NEGATIVES"

REALISATION DU MODELE EXPERIMENTAL

A LA STATION DE GEL DE CAEN

I UNIVERSITY – Geotechnical science laboratories (CARLETON)

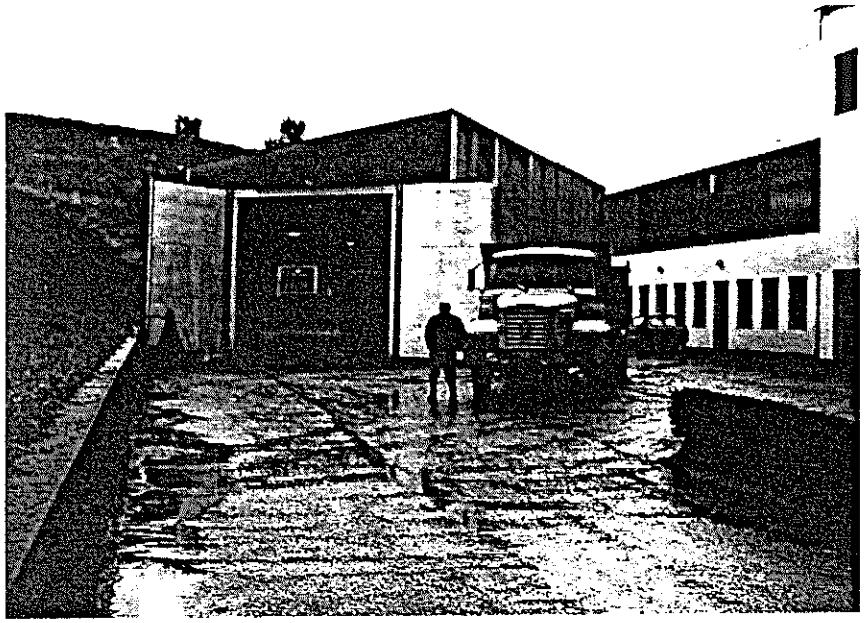
LYTECHNIQUE – Centre d' ingenierie nordique (MONTREAL)

: DE L' ENERGIE , MINES ET RESSOURCES (CANADA)

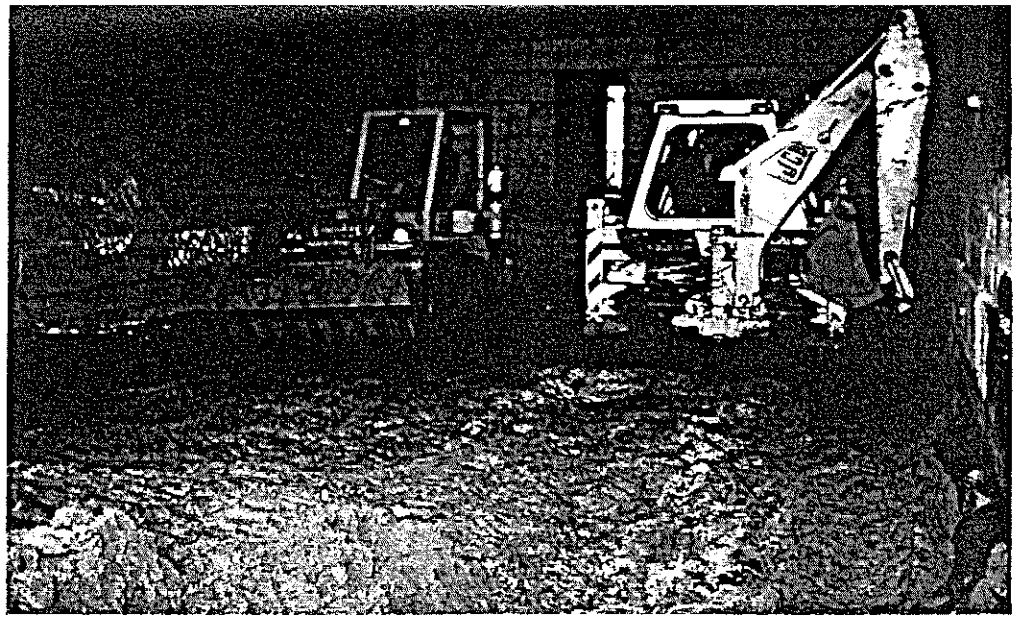
- CENTRE DE GEOMORPHOLOGIE DU C.N.R.S. (CAEN)
- CENTRE D' ETUDES TECHNIQUES DE L' EQUIPEMENT (Normandie - Centre)

  CENTRE D'EXPERIMENTATIONS ROUTIERES (ROUEN)

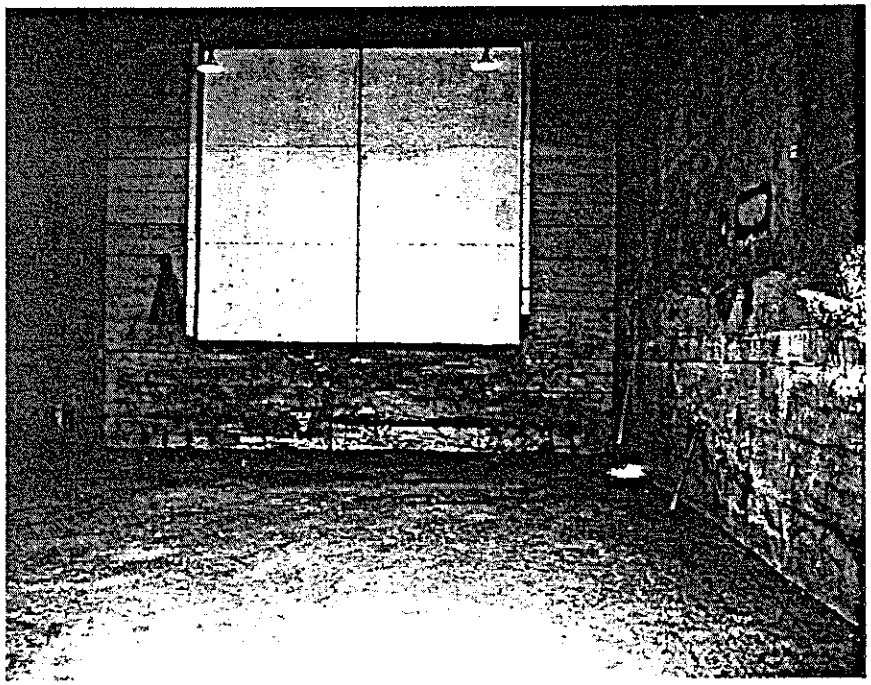
  CENTRE D' ETUDES ET DE CONSTRUCTION DE PROTOTYPES (ROUEN)
- LABORATOIRE D' AEROTHERMIQUE DU C.N.R.S. (MEUDON)
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (PARIS)



ue extérieure de la station de gel de Caen



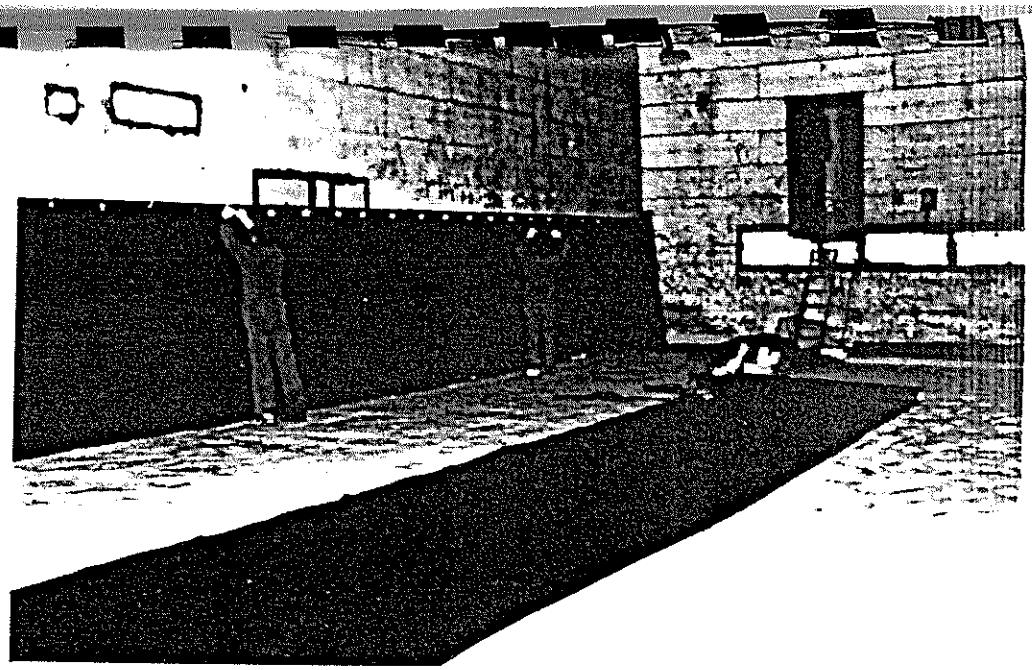
2. Préparation de la fosse - Vidange des matériaux



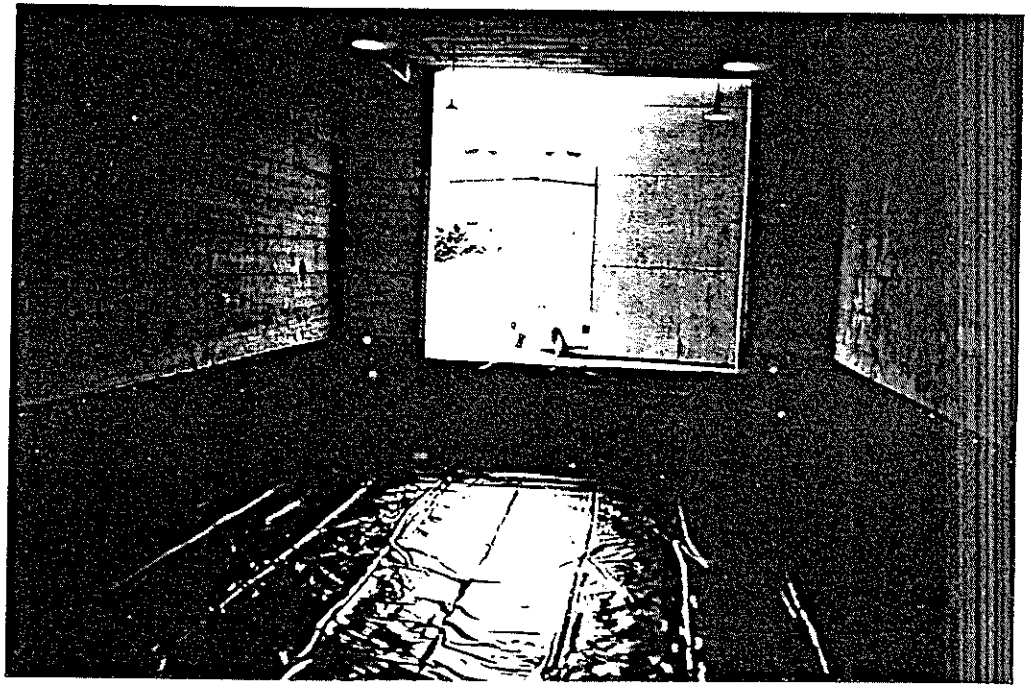
ue intérieure de la fosse après vidange et démontage
le l'ancienne membrane

4. Réparation de l'isolation des murs de la fosse

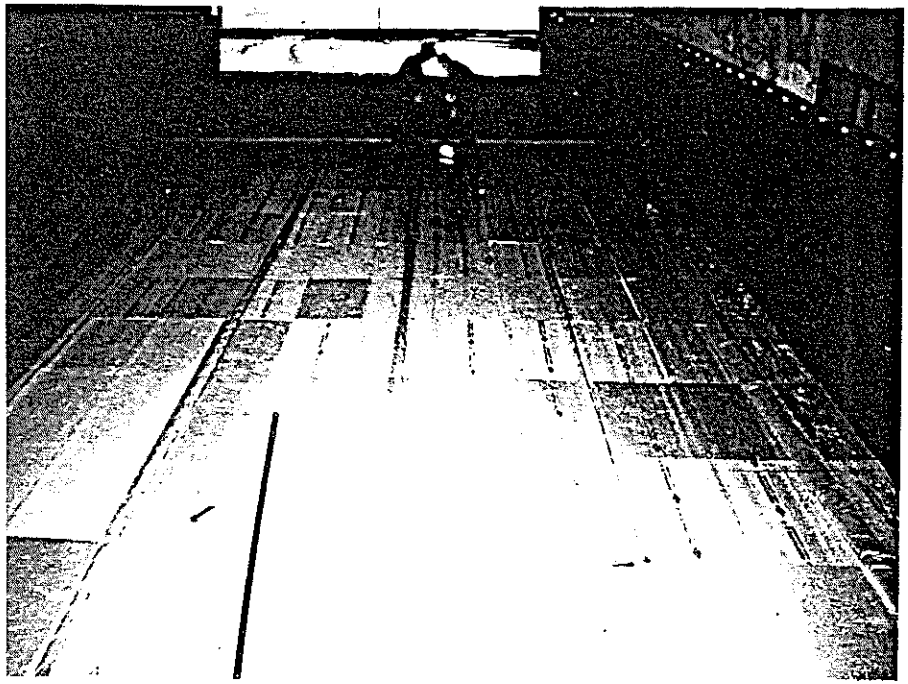
'ose d'une nappe de textile non tissé sur le fond de fosse
our protéger la nouvelle membrane des risques de
oinçonnement



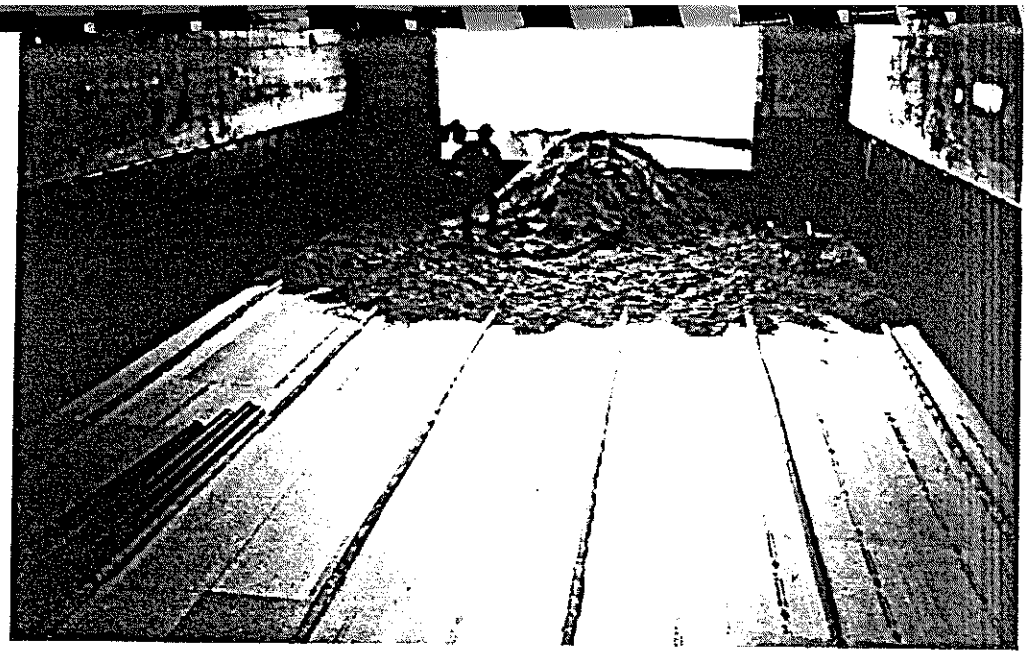
6. Pose de la nouvelle membrane (P.V.C. 10/10ème)
Accrochage des joues latérales sur les parois de la fosse



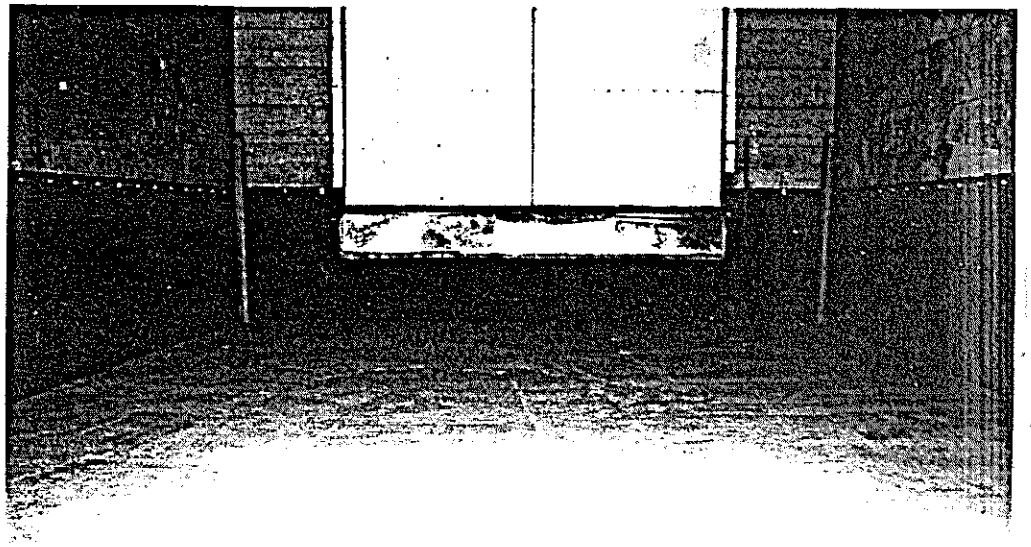
7. Vue intérieure de la fosse - Membrane d'étanchéité
terminée



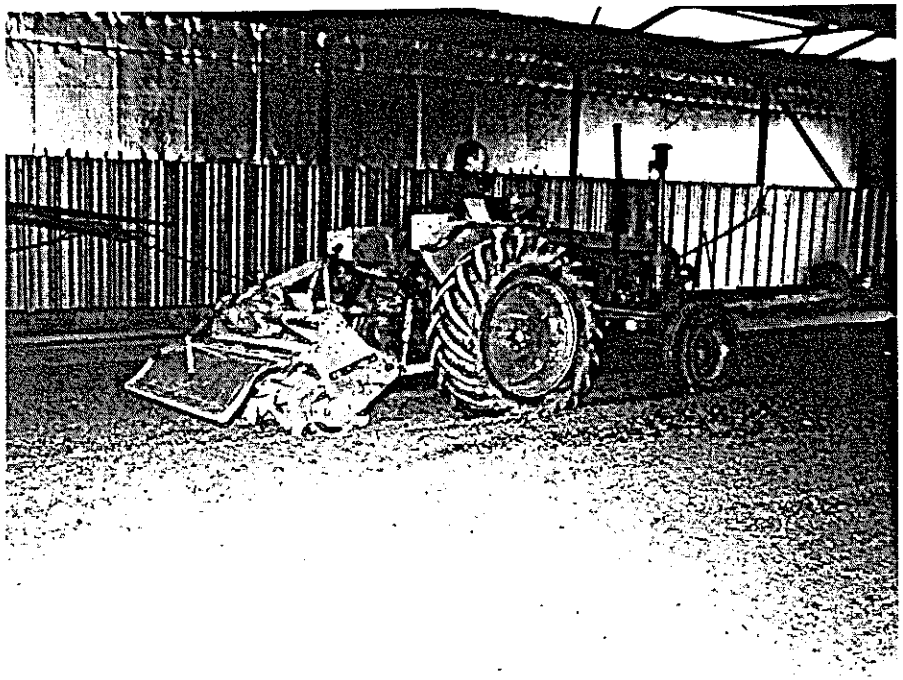
Pose d'un plancher d'isolation sur le fond de la membrane et du circuit d'irrigation. Les tubes d'irrigation sont enveloppés de chaussettes en textile pour éviter le colmatage des trous d'arrivée d'eau



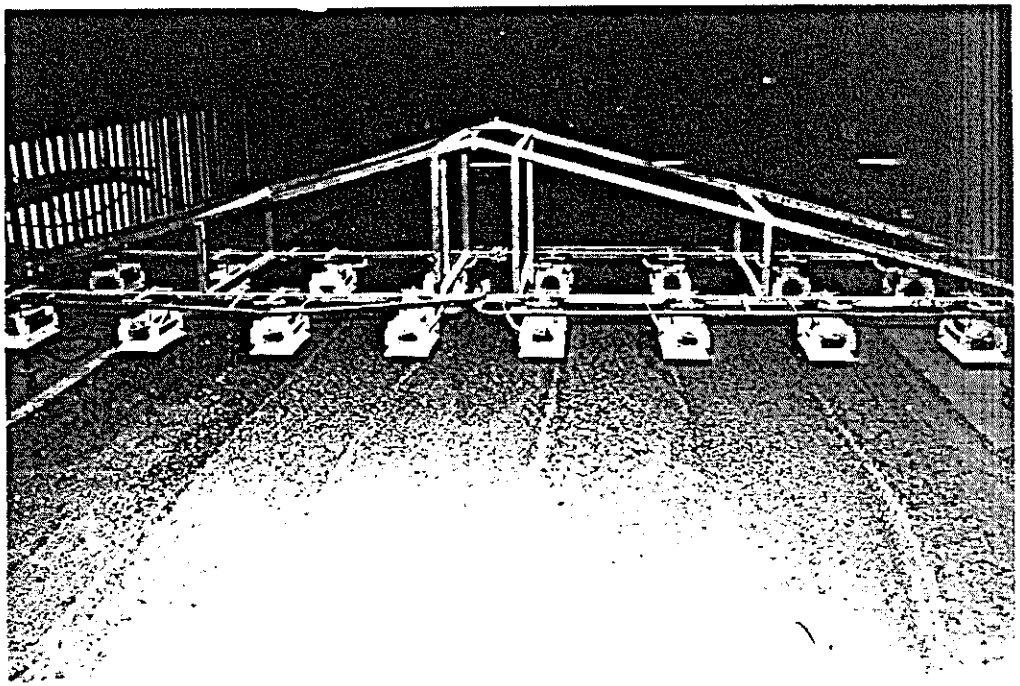
9. Mise en oeuvre de la couche de sable drainant sur le plancher isolant et sur les tubes d'irrigation



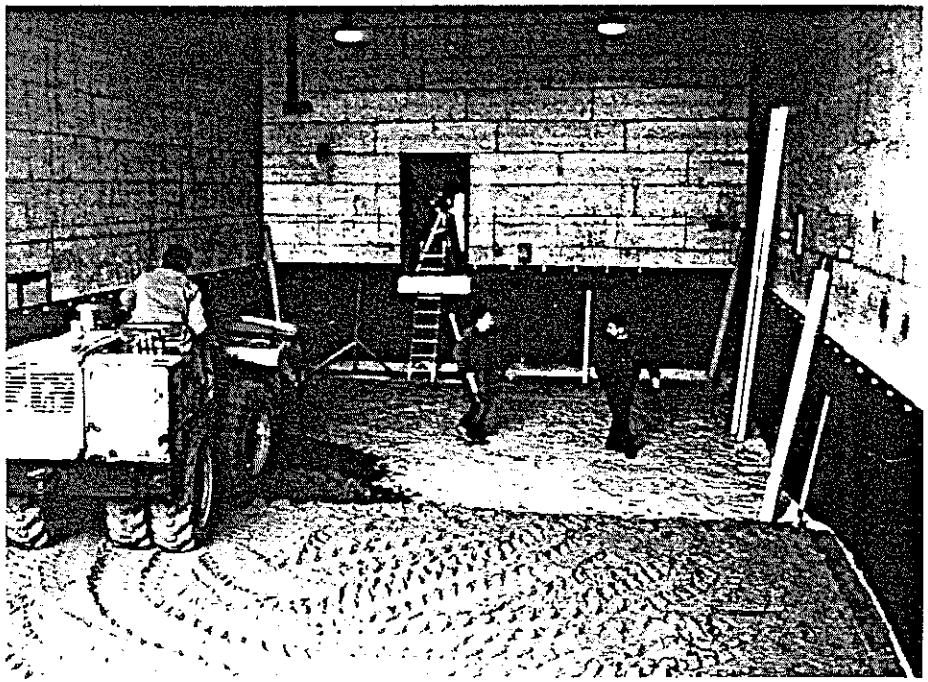
10. Vue de la couche de sable drainant après mise en oeuvre et compactage. On remarque dans les angles les puits de contrôle de niveau d'eau et le tube d'évent à droite de la grande porte



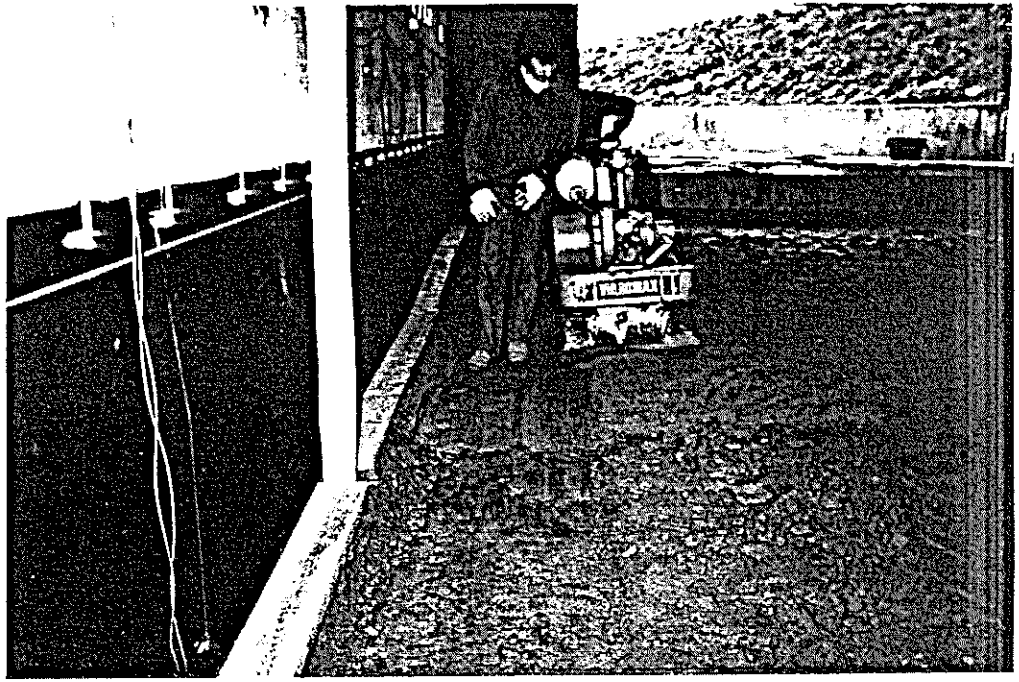
En même temps au C.E.R. de Rouen : préparation des matériaux destinés à la station de gel de Caen - Rotavatage pour aération et élimination des mottes



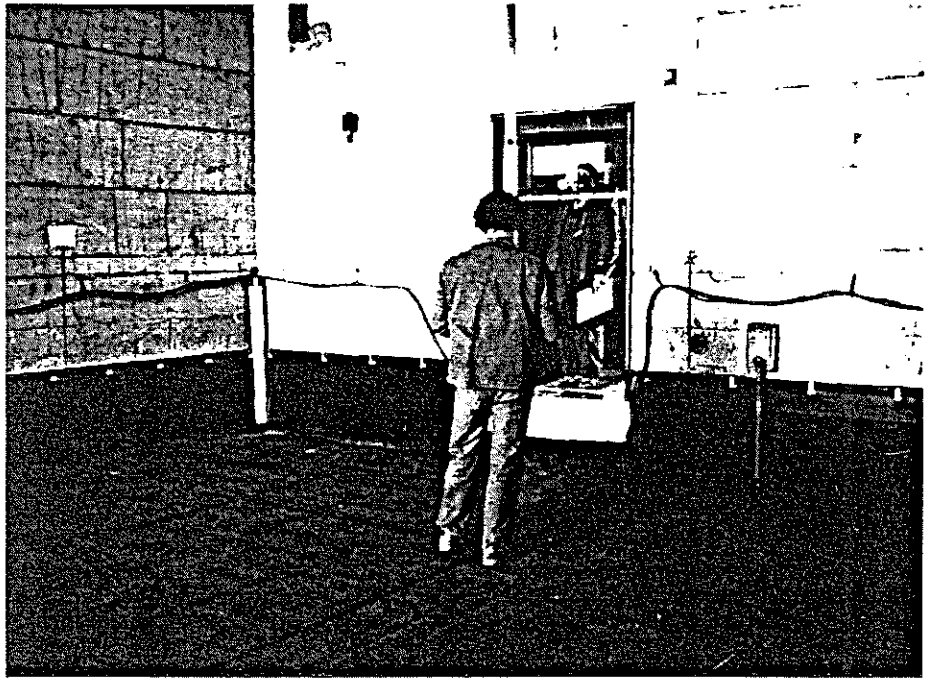
12. *Séchage après rotavatage à la rampe à gaz pour diminuer la teneur en eau initiale des matériaux au C.E.R. de Rouen*



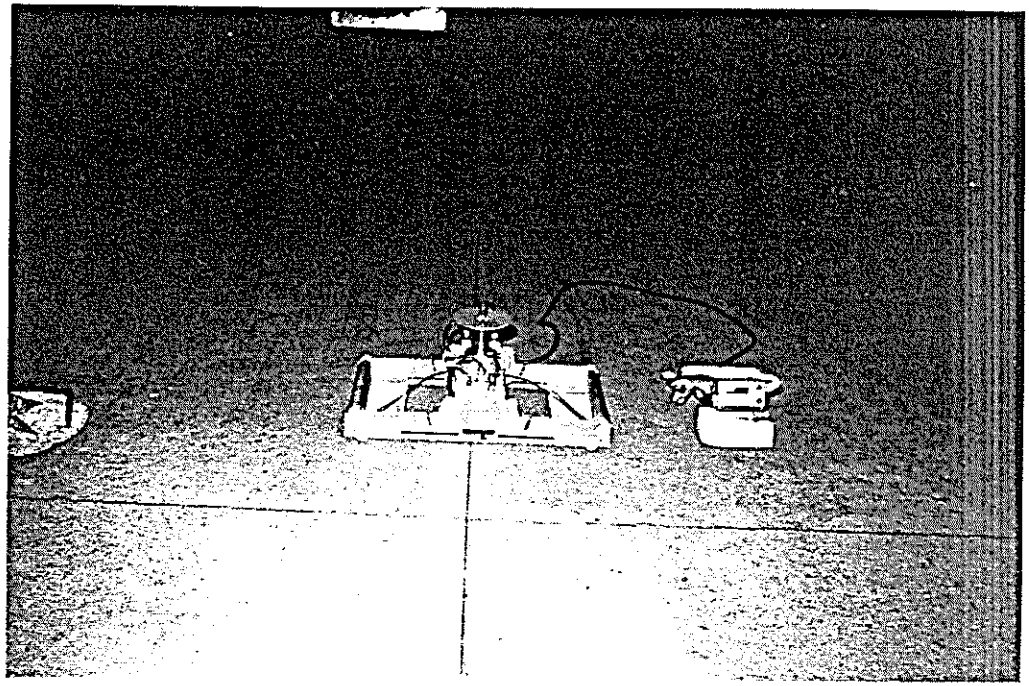
Mise en oeuvre de la 1ère couche de limon sur la 2ème moitié de la fosse. Au premier plan, vue de la 1ère couche de sable



14. Compactage des différentes couches de matériau à la plaque vibrante. Noter les puits de contrôle de hauteur d'eau et les bastaings de protection de la membrane



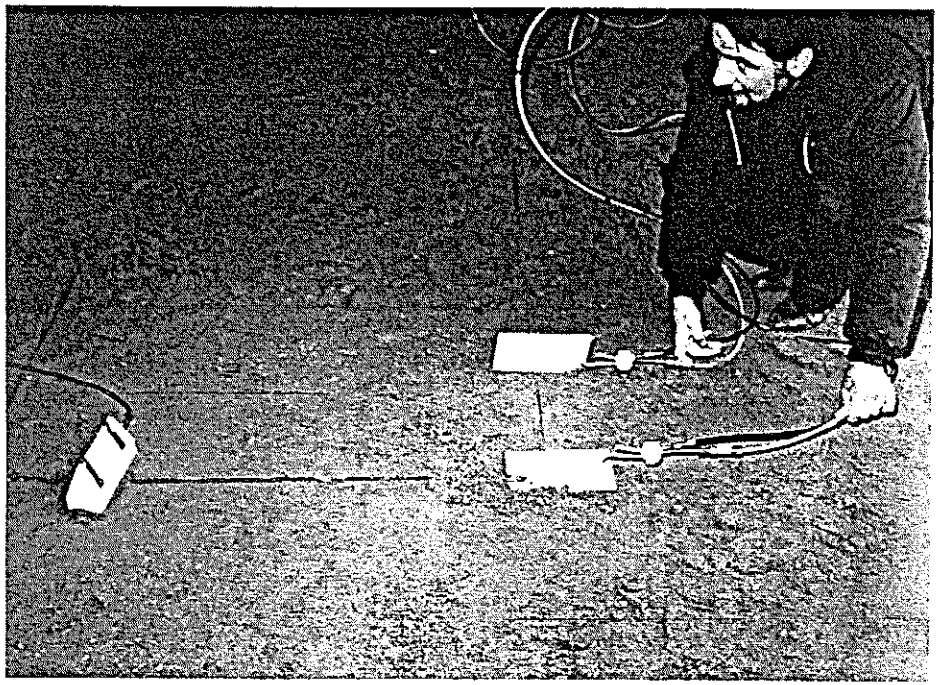
Contrôle de l'épaisseur des couches mise en oeuvre par nivellement



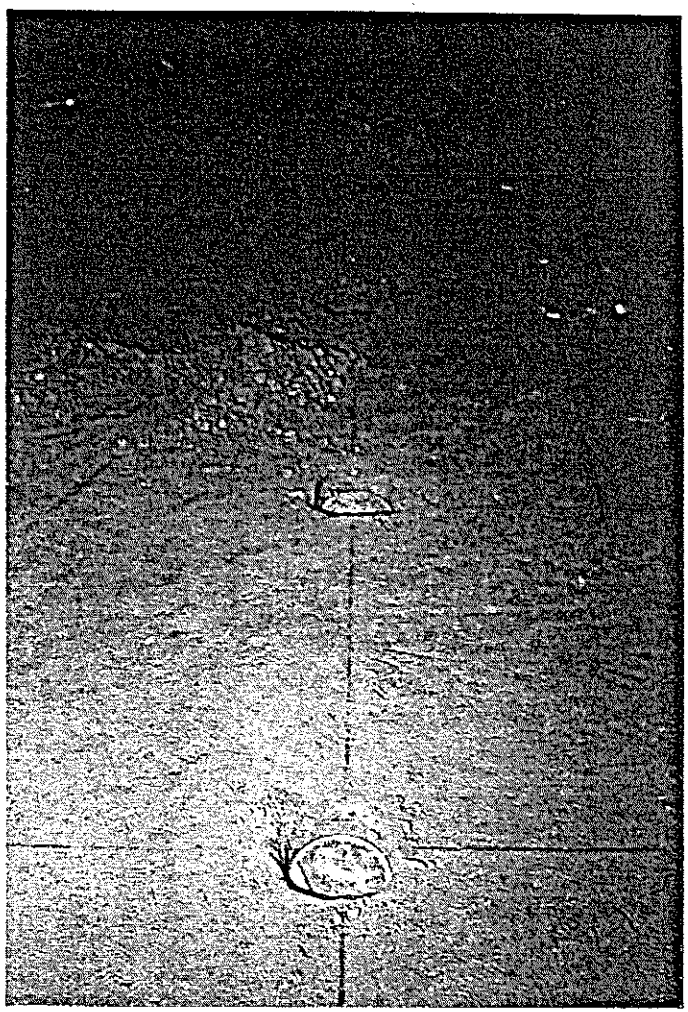
16. Contrôle des densités après compactage au gammadensimètre G.P.V. 20/40

Après contrôle des épaisseurs des couches par nivellement et des densités in situ. Mise en place des jauges dans les réservations

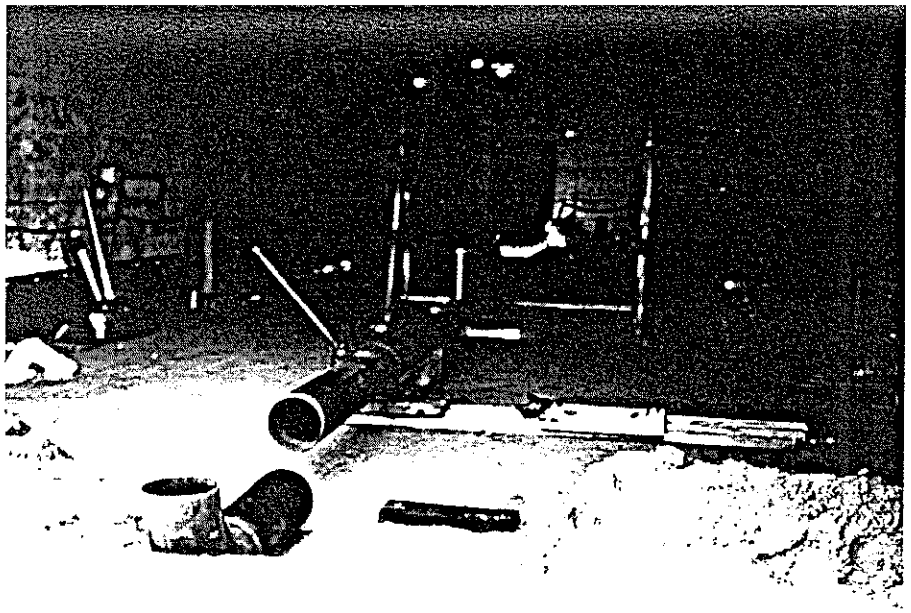
18. Contrôle par nivellement de la profondeur des capteurs dans les réservations



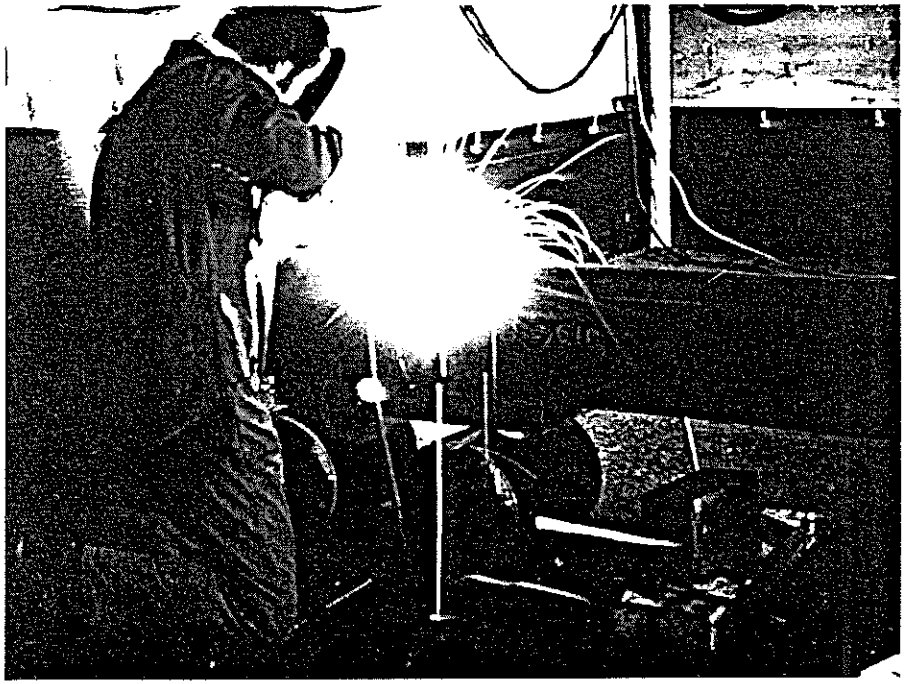
Positionnement des capteurs de pression totale et de la cellule capacitive de mesure de teneur en eau



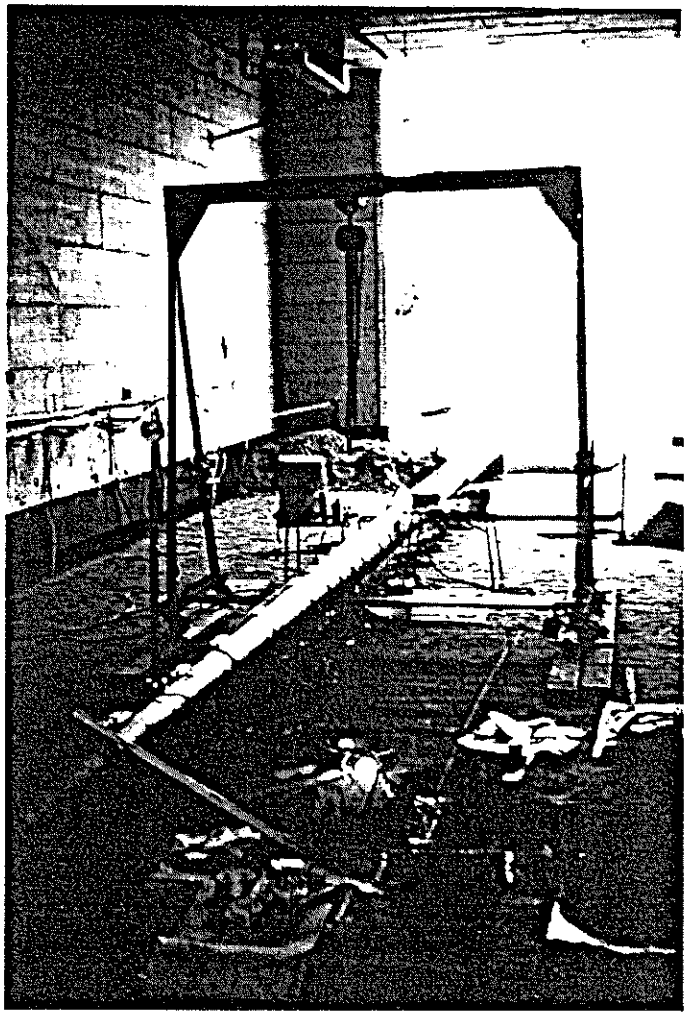
20. Mise en place des témoins de gonflement dans la structure pour suivre leur déplacement à l'aide d'une double sonde à rayonnement gamma



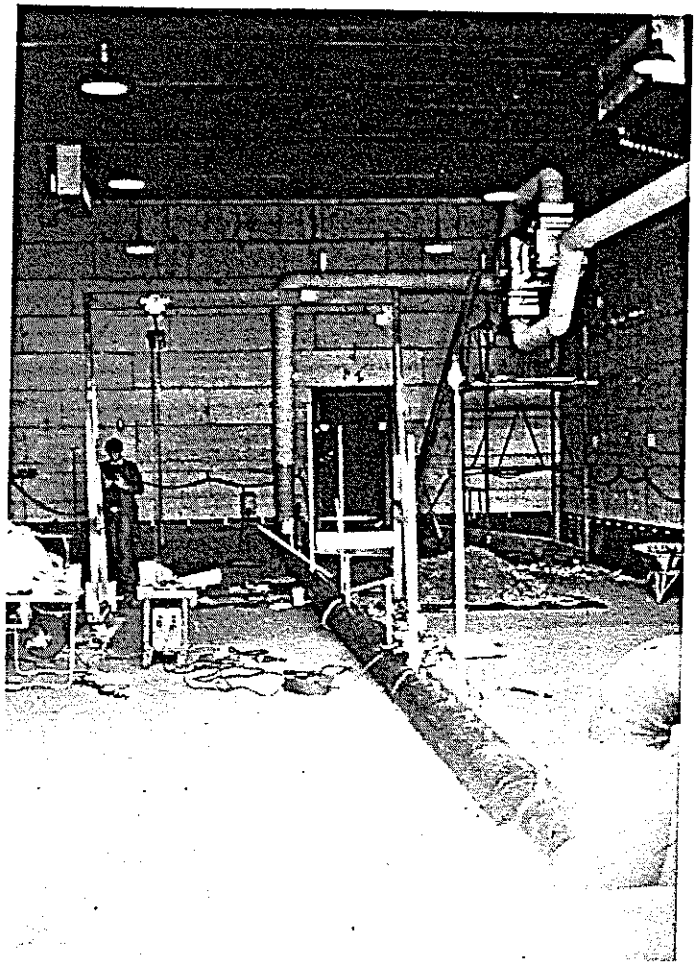
Pose du pipe dans la fosse



Soulage des extrémités coudées par le C.E.C.P. de Rouen

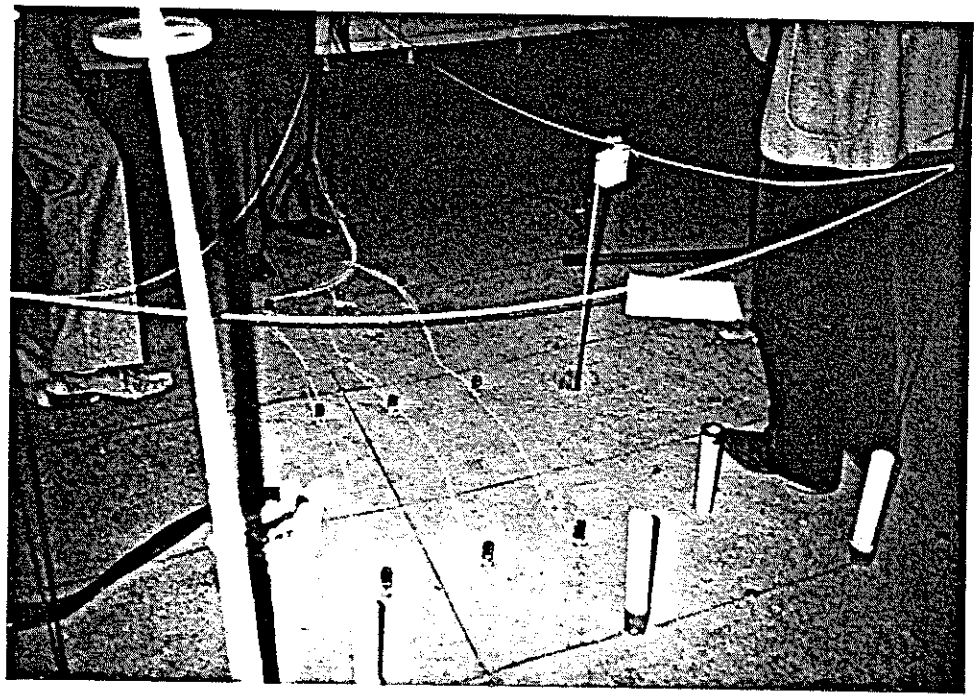


23. Instrumentation du pipe (jauges de contraintes, témoins de déformations...)

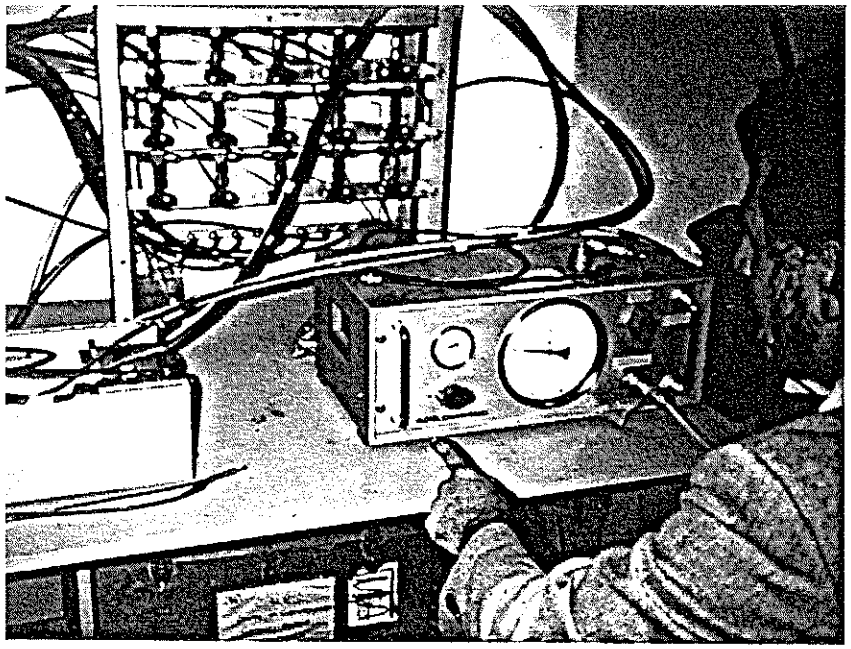


Pipeline mis en place sur le sol et relié au système de réfrigération.

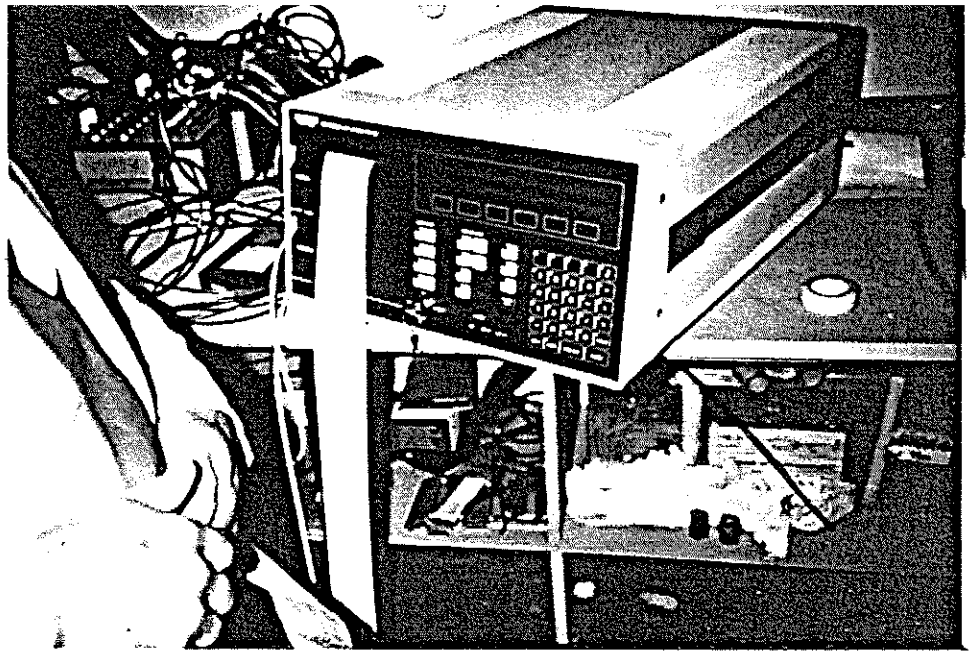
Fosse remplie et instrumentation terminée.



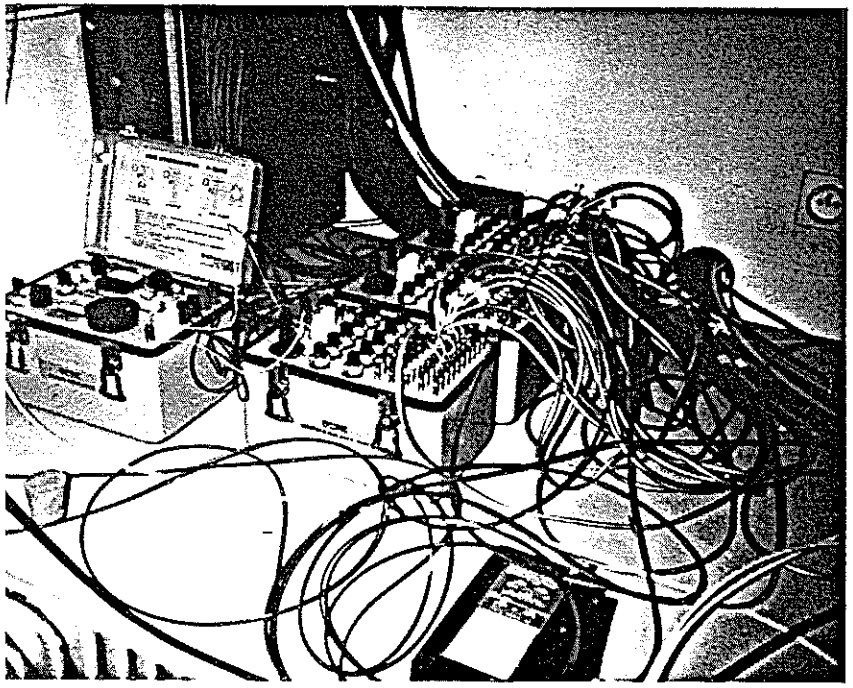
Réseau de tensiomètres en arrière plan; tubes télescopiques et manchons des tiges à plateau au premier plan.



eil pour mesurer la pression des Glötzl.



Système d'acquisition de données ORION.



s de commutation et pont d'extensiométrie pour
e des jauges de déformation.

Micro - ordinateur GOUPIL.