

Canada

Québec

**FIELD EVALUATION OF THE
EFFECTIVENESS OF
ENGINEERED SOIL COVERS FOR
REACTIVE TAILINGS**

Volume 2: University Contracts

MEND Project 2.21.2

This work was done on behalf of MEND and sponsored by
the Centre de recherches minérales (CRM) and
the Ministère de l'Énergie et des ressources du Québec.

November 1993

**FIELD EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS
OF ENGINEERED SOIL COVERS
FOR REACTIVE TAILINGS**

**Final Report, Volume 2:
UNIVERSITY CONTRACTS**

**Ministère de l'Énergie et des Ressources
Centre de recherches minérales
2700 rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8**

Submitted to the MEND (Mine Environment Neutral Drainage) Program

November 1993

EXECUTIVE SUMMARY

Between July 1990 and April 1993, several research contracts were negotiated between Centre de recherches minérales (CRM) of Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec and McGill University and École Polytechnique to participate in the Waite Amulet Covers Project. Other technical and financial partners in the project were Noranda Technology Centre (NTC), on behalf of Noranda Minerals Inc., and Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET). Overall project management was provided by NTC. The project was conducted under the auspices of the MEND (Mine Environment Neutral Drainage) program. The principal objective was to design, construct and evaluate the effectiveness of soil covers and a plastic or geomembrane cover in reducing acid generation in reactive mine tailings.

The objectives of the CRM-University contracts were to fulfil specific technical scopes of work defined under the project. In particular, the Geotechnical Research Centre (GRC) of McGill University was requested to provide design and pre-construction geotechnical characterization of cover materials and tailings. Parameters that were measured included baseline grain size distribution, compaction parameters and moisture drainage and retention characteristics. The GRC mandate was extended during the second and third years of the project to include an assessment of the effects of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and moisture retention characteristics, the effect of acid leaching on the stability of cover materials and the long term stability of a high density polyethylene (HDPE) used as a cover.

The Geotechnical Group at École Polytechnique was contracted to measure the uncovered tailings hydraulic properties and conduct flow modelling. The purpose of the modelling was to confirm the water balance on covered and uncovered tailings.

The Department of Geological Sciences, McGill University, investigated the possible effects of sulphide oxidation on the composition of sulphur-bearing gases such as COS, CS₂ and SO₂.

The GRC studies found that the varved clay soil used as the impermeable cover in the composite cover system consisted of about 80% clay and 20% silt size materials. Compaction parameters, obtained from modified Proctor compaction, were 23.5 % for the optimum moisture content and 1.66 Mg/m³ for the maximum dry density. Moisture retention data indicated that clay can withstand significant moisture losses and remain saturated at suctions of up to 10 m of water.

Two cases of water availability were investigated during laboratory freeze-thaw studies on the clay. The first adopted a positive water head to assess maximum water damage to the clay cover and the second used a negative water head to simulate field condition in the autumn. The results indicated that the integrity of the clay was reduced more (the increase in hydraulic conductivity, K, was greater) under positive head of water. A maximum increase of 2.5 orders of magnitude was observed in K (that is, from 1×10^{-9} cm/s to 5×10^{-7} cm/s) after one freeze-thaw cycle. This was

attributed to: 1) aggregation of clay particles; 2) chemical interactions between the generated acidic solutions and heavy metals from the tailings, and the clay residence pore fluid, causing a reduction of the thickness of the double layer and an increase in the tendency of flocculation of the clay particles (hence, an increase in permeability); 3) reduction in the buffering capacity of the clay due to reduced pH values. The K remained essentially constant in subsequent freeze-thaw cycles. Under negative water head, the integrity of the clay was only slightly reduced (K increased by only 0.5 order of magnitude) due to: 1) limited amount of water intake during freezing; 2) limited chemical interaction; however, the residence pore fluid cations in the clay were reduced as a result of further leaching. The thickness of the double layer increases as does the tendency for clay dispersion, which in turn reduces the permeability of the clay cover to water. The negative water head used in the study, nevertheless, was much greater than the negative head at the air entry value of the clay obtained from soil suction experiments. Thus the clay was unsaturated. The results suggest that the case of a positive water head would be more applicable to field conditions. Thus physical structure of the clay layer would require monitoring.

The final part of the GRC contract evaluated the compatibility of the 80 mil HDPE as a function of cyclic freeze-thaw and acidic leachate. The HDPE did not experience any changes in its physical and chemical properties within the experimental time frame. The moisture drainage characteristics of the clay were greatly influenced by leaching and cyclic freeze-thaw, due to aggregation and, hence, significant pore space readjustment. When the clay soil was subjected to leaching, air permeability decreased by 1-2 orders of magnitude and oxygen concentration dropped to about zero. It was postulated that the difference in oxygen content, between samples saturated with distilled water and those with acidic leachate, probably occurred due to the difference in oxygen solubility in both liquids.

The laboratory results at École Polytechnique indicated that the Waite Amulet tailings vary considerably in gradation and hydraulic properties over short distances. In the central part of the tailings area, specific gravities ranged from 3.21 at a depth of 4.90 m to 3.55 at 5.60 m. The average particle size represented by D_{10} (the particle size at which 10% of the tailings are finer) is about 0.01 mm. The tailings in this area are sandy silts, with non-plastic clay-size particles ranging from 2% to 10%.

Laboratory and field (piezometer) permeability tests gave hydraulic conductivity values in the range of $1.3-2.0 \times 10^{-3}$ cm/s for tailings located below the test plot area. Field permeability tests gave values in the range of $1.0-3.0 \times 10^{-5}$ cm/s for the clay cover material outside the test plot (testing was not allowed in the test plot).

The variable-head test results in six piezometers of the test plot area have shown that two of them were hydraulically short-circuited: therefore the measurements for head, gradient, and water quality parameters are questionable. The installation of the four other piezometers was considered successful. These piezometers indicated a vertical downward seepage in the tailings with a gradient

close to 12%. Other piezometers close to the test plot area were not tested for hydraulic conductivity and potential hydraulic short-circuiting. However their water levels helped with the computer flow modelling work. Interestingly, several piezometers have shown that there was an inversion of the vertical seepage (upward to downward) between May and June.

In the flow modelling work, École Polytechnique used two hydraulic conductivity values of 10^{-5} and 10^{-7} cm/s for the clay cover, and computer generated (not measured) curves for undrained properties of tailings and clay. The K value of 10^{-5} cm/s was measured outside the test plot where the clay had been compacted and deliberately left without any protective layer (sand and gravel) to evaluate freeze-thaw effects. The initial K value for the clay was measured at 10^{-7} cm/s by NTC at the end of construction. Field measurements made by NTC in the second year did not indicate any change in K for this clay covered by 0.30 m of sand and gravel. It is therefore possible, based on the GRC laboratory tests, that freeze-thaw had increased the K value of the unprotected clay by two orders of magnitude after one winter cycle.

Other parameters used in the flow modelling were the efficient infiltration of either 200 mm/y (NTC estimate) or 500 mm/y (Polytechnique estimate), and the K_H value of either 6×10^{-4} or 2×10^{-3} cm/s for the tailings. The hydraulic conductivity anisotropy ratio for the tailings was used as a variable with the objective to find which ratio gave the best results with the hydraulic head values measured below the test plots.

The use of a K value of 10^{-5} or 10^{-7} cm/s for the clay cover in the flow model (École Polytechnique) has not changed significantly the vertical infiltration of water into the tailings, mainly because most of the water appeared to laterally bypass the test plot. To match the registered hydraulic head values, it was necessary to use an anisotropy ratio K_H/K_V of 50 to 280 with an average value of 80. École Polytechnique has confirmed the results of its computer flow model with a study of water mean annual budget in vertical and horizontal directions. The average anisotropy value of 80 corresponds roughly to the estimated value of 100 that was obtained in a previous study by NTC for tailings located in the south-end of the impoundment.

Later flow modelling conducted by NTC (as reported in Volume 1) used a K value of 10^{-7} cm/s for the clay cover. Measured material properties for the tailings and the clay and the incorporation of the geomembrane lining on the cover slopes was also taken into account. The results gave more realistic percolation rates that were similar to lysimeter data.

The research conducted by the Department of Geological Sciences, McGill University, aimed at improving the understanding of the role of sulphur-bearing gases during oxidation of sulphidic tailings. The consisted of field sampling of tailings pore gas for analysis of CO_2 and sulphur bearing gases (COS , CS_2 , H_2S and SO_2). It was postulated that the effectiveness of the covers in reducing sulphide oxidation could be evaluated by examining pore gas concentrations over time. One of the functions of the composite covers was to provide an impermeable barrier to meteoric waters and

therefore minimize the production of acid waters. A quantitative analysis of pore gas was, therefore, considered a more comprehensive and sensitive indication of the extent and rates of sulphide oxidation and hence cover performance. In addition to the pore gas analysis, a limited evaluation of the geochemical evolution of water samples collected from covered and uncovered test plots was also conducted.

Analysis of sulphur-bearing gases did not yield any H₂S and SO₂. Previous studies by other researchers had indicated that SO₂ was detectable only over completely dry sulphide minerals. Given relatively high solubilities of H₂S and SO₂ in water and the relatively humid conditions at Waite Amulet, it was concluded that any H₂S or SO₂ produced by sulphide oxidation would likely be dissolved in water.

Stable isotope analysis for δ¹³C and δ¹⁸O in CO₂ intended to identify the source of CO₂ did not produce conclusive results. It was, however, inferred that sources of CO₂ could include (1) oxidation of organic matter, (2) dissolution of carbonate minerals in tailings, (3) dissolution of carbonate minerals in limestone added during revegetation, and (4) trapped air.

SOMMAIRE

Plusieurs contrats de recherche ont été négociés de juillet 1990 à avril 1993 entre le Centre de recherches minérales (CRM) du ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, l'Université McGill et l'École Polytechnique concernant la participation au projet des recouvrements de Waite Amulet. Parmi les autres partenaires techniques et financiers qui participent au projet, mentionnons notamment le Centre de technologie Noranda (CTN), au nom de Noranda Minerals Inc. et le Centre canadien de technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET). La gestion globale du projet a été assurée par le CTN. Le projet a été réalisé dans le cadre du programme NEDEM (Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier). L'objectif principal du projet était de concevoir, aménager et évaluer un recouvrement géologique et un recouvrement constitué d'une membrane de plastique (géomembrane) qui permettraient de réduire la production d'acide dans les parc à résidus miniers réactifs.

Les contrats entre le CRM et les universités visaient à assurer le bon déroulement de certains aspects techniques particuliers des travaux définis dans le projet. Il a été demandé notamment au Centre de recherches géotechniques (CRG) de l'Université McGill de définir la caractérisation géotechnique des matériaux de couverture et des résidus en vue de leur conception et de leur aménagement préalable. Les paramètres à mesurer comprenaient notamment la granulométrie, les paramètres de compaction et de drainage, ainsi que les propriétés de rétention. Le mandat du CRG s'est prolongé pendant les deuxième et troisième années du projet en vue de procéder à une évaluation des effets du gel et du dégel sur les caractéristiques de la conductivité hydraulique et de la rétention d'humidité, de l'effet de la lixiviation des effluents acides sur la stabilité des matériaux de couverture et de la stabilité à long terme d'un recouvrement de polyéthylène haute densité.

Le Groupe géotechnique de l'École Polytechnique a été mandaté pour mesurer les propriétés hydrauliques des résidus non recouverts et réaliser la modélisation des écoulements afin de vérifier le bilan hydrique des résidus recouverts et non recouverts.

Le département des sciences géologiques de l'Université McGill a étudié les effets possibles de l'oxydation des sulfures sur les gaz sulfureux tels que le COS, le CS₂ et le SO₂.

Les études réalisées par le CRG ont permis de déterminer que le sol d'argile varvée employé comme couverture imperméable dans le recouvrement composite était constitué de particules dont la distribution granulométrique était d'environ 80 % d'argile et 20 % de silt. Les paramètres de compaction, obtenus de la compaction Proctor modifiée, étaient de 23,5 % pour la teneur optimale en humidité et de 1,66 Mg/m³ pour la masse volumique sèche maximale. Les données relatives à la rétention d'humidité ont indiqué que l'argile peut supporter des pertes importantes d'humidité et demeurer saturée à des pressions négatives pouvant correspondre à 10 m d'eau.

On a étudié deux cas d'hydraulicité dans le cadre des études en laboratoire portant sur le cycle gel-dégel de l'argile. Dans le premier cas, on utilisait une charge hydraulique positive dans le but d'évaluer les dommages causés par l'eau à la couverture d'argile et, dans le second cas, une charge hydraulique négative pour simuler les conditions sur le terrain à l'automne. Les résultats ont indiqué que l'intégrité de la couverture d'argile était davantage réduite (l'augmentation de la conductivité hydraulique, K, était plus grande) dans le cas de la charge hydraulique positive. Une

augmentation maximale d'environ 500 fois a été observée pour K (en effet, la valeur de K est passée de 1×10^{-9} cm/s à 5×10^{-7} cm/s) après un cycle de gel-dégel. Ce phénomène s'explique par 1) l'agrégation de particules d'argile; 2) les interactions chimiques entre les solutions acides produites et les métaux lourds présents dans les résidus et le fluide interstitiel de résidence dans l'argile, causant une réduction de l'épaisseur de la couche double et une augmentation de la tendance à la floculation des particules d'argile (ce qui entraîne une augmentation de la perméabilité); 3) la réduction du pouvoir tampon de l'argile causée par un pH moins élevé. La valeur K demeure essentiellement constante pendant les cycles de gel-dégel subséquents. Dans le cas d'une charge hydraulique négative, l'intégrité de l'argile n'a été réduite que légèrement (la valeur de K a augmenté de seulement 5 fois) d'un apport limité en eau pendant le gel; 2) du nombre limité d'interactions chimiques. Cependant, le nombre de cations de résidence du fluide interstitiel dans l'argile a diminué par suite de la lixiviation. L'épaisseur de la couche double a augmenté tout comme la tendance à la dispersion de l'argile, qui à son tour diminue la perméabilité de la couverture d'argile. Néanmoins, la charge hydraulique négative employée dans l'étude était beaucoup plus grande que la charge hydraulique négative pour la pression à l'entrée d'air de l'argile obtenue lors des expériences sur les sols faisant intervenir une pression négative. Donc, l'argile n'était pas saturée. Les résultats laissent croire que la charge hydraulique positive s'appliquerait mieux aux conditions sur le terrain. Ainsi, il faudrait surveiller la structure physique de la couche d'argile.

Dans la dernière partie de son contrat, le CRG devait évaluer la compatibilité du recouvrement de polyéthylène haute densité de 80 mils avec les cycles de gel-dégel et avec le lixiviat acidifié. On a observé aucun changement dans les propriétés physiques ou chimiques du polyéthylène haute densité dans le cadre de l'échéancier des expériences. Les caractéristiques du drainage de l'argile étaient largement influencées par la lixiviation et les cycles de gel-dégel, en raison de l'agrégation et, par conséquent, d'un rajustement important des espaces interstitiels. Lorsque le sol argileux a été assujéti à la lixiviation, la perméabilité à l'air a diminué de 10 à 100 fois et les concentrations d'oxygène ont baissé à près de zéro. On suppose que la différence de teneur en oxygène entre les échantillons saturés d'eau distillée et les échantillons saturés de lixiviat acide dépend probablement de la différence de solubilité de l'oxygène dans les deux liquides.

Les résultats obtenus en laboratoire à l'École Polytechnique ont indiqué que la granulométrie et les propriétés hydrauliques des résidus de Waite Amulet varient considérablement sur de courtes distances. Dans la partie centrale du parc à résidus, les densités se situaient entre 3,21, à une profondeur de 4,90 m, et 3,55, à une profondeur de 5,60 m. La taille moyenne des particules est représentée par D_{10} (taille des particules pour laquelle la granulométrie de 10 % des résidus est plus fine) est d'environ 0,01 mm. Dans cette zone, les résidus sont constitués de limon sableux, avec la taille des particules d'argile non plastiques qui varie entre 2 % et 10 %.

Lors des essais de perméabilité en laboratoire et sur le terrain (piézomètre), on a obtenu des valeurs de conductivité hydraulique se situant dans l'intervalle de $1,3$ à $2,0 \times 10^{-3}$ cm/s pour les résidus situés sous l'emplacement d'essai. Lors des essais de perméabilité sur le terrain, on a obtenu des valeurs se situant dans l'intervalle de $1,0$ à $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s pour l'argile servant de matériau de couverture à l'extérieur de l'emplacement d'essai (ces essais n'étaient pas permis à l'emplacement d'essai).

Les résultats des essais de charge hydraulique variable obtenus à l'aide de six piézomètres placés dans la zone des emplacements d'essai indiquent que deux d'entre eux subissaient une interruption hydraulique; par conséquent, les mesures de la charge, du gradient et des paramètres de qualité de l'eau sont discutables. L'installation des quatre autres piézomètres a été réalisée avec succès. Ces piézomètres indiquaient un suintement vertical vers les bas dans les résidus dont le gradient était de près de 12 %. Pour les autres piézomètres à proximité de l'emplacement d'essai, la conductivité hydraulique et l'interruption hydraulique possible n'ont pas été vérifiées. Toutefois, les niveaux d'eau qu'ils indiquaient ont servi dans le cadre des travaux informatisés de la modélisation. Fait intéressant, plusieurs piézomètres indiquaient une inversion du suintement vertical (vers le haut, puis vers le bas) entre mai et juin.

Au cours des travaux de modélisation de l'écoulement, l'École Polytechnique s'est servie de deux valeurs de conductivité hydraulique de 10^{-5} et de 10^{-7} cm/s pour la couverture d'argile et de courbes produites par ordinateur (non mesurées) pour ce qui est des propriétés non saturées des résidus et de l'argile. La valeur K de 10^{-5} cm/s a été mesurée à l'extérieur de l'emplacement d'essai où l'argile avait été compactée et laissée délibérément exempte de couche protectrice (sable et gravier) pour évaluer les effets du gel et du dégel. La valeur initiale de K pour l'argile a été mesurée à 10^{-7} cm/s par le CTN à la fin de l'aménagement. Les mesures prises sur le terrain par le CTN pendant la deuxième année n'indiquent aucun changement de la valeur K pour l'argile recouverte par 0,30 m de sable et de gravier. Par conséquent, il est possible que le gel-dégel ait augmenté la valeur K de l'argile non recouverte de 100 fois sa valeur initiale après un cycle hivernal, d'après les essais en laboratoire du CRG.

Parmi les autres paramètres employés dans la modélisation de l'écoulement, mentionnons notamment l'infiltration efficace de 200 mm/a (estimations du CTN) ou de 500 mm/a (estimations de l'École Polytechnique), ainsi qu'une valeur de K_H égale à 6×10^{-4} ou à 2×10^{-3} cm/s pour les résidus. Le rapport anisotrope de la conductivité hydraulique pour les résidus a été employé comme variable dans le but de déterminer quel rapport donnait les meilleurs résultats concernant les valeurs de la charge hydraulique mesurée sous les emplacements d'essai.

L'utilisation d'une valeur K de 10^{-5} ou 10^{-7} cm/s pour la couverture d'argile dans le modèle d'écoulement (École Polytechnique) n'a pas modifié de façon importante l'infiltration verticale d'eau dans les résidus, surtout en raison du fait que la majeure partie de l'eau semblait contourner l'emplacement d'essai. Afin d'établir une concordance entre les valeurs hydrauliques enregistrées, il a été nécessaire d'employer un rapport anisotrope K_H/K_V de 50 à 280 ayant une valeur moyenne de 80. L'École Polytechnique a confirmé les résultats de son modèle d'écoulement informatisé en réalisant une étude du bilan hydrique moyen annuel à la verticale et à l'horizontale. La valeur anisotrope moyenne de 80 correspond à peu près à la valeur estimée de 100 qui a été obtenue dans une étude antérieure du CTN pour les résidus se trouvant à l'extrémité sud du parc à résidus.

D'autres modèles d'écoulement effectués par le CTN (voir Volume 1) avaient une valeur de K de 10^{-7} cm/s pour la couverture d'argile. Il a également été tenu compte des propriétés des matériaux mesurées pour les résidus et l'argile et de la mise en place du revêtement (géomembrane) sur les pentes de la couverture. Les résultats donnent des taux d'infiltration plus réalistes qui étaient semblables à ceux obtenus à l'aide des données du lysimètre.

Les travaux de recherche effectués par le Département des sciences géologiques de l'Université McGill visaient à améliorer la compréhension que nous avons du rôle des gaz sulfureux pendant l'oxydation des résidus sulfurés. Ils consistaient à prélever sur le terrain des échantillons de gaz interstitiels dans les résidus à des fins d'analyses visant à déterminer la teneur en CO₂ et en gaz sulfureux (COS, CS₂, H₂S et SO₂). On a supposé qu'on pourrait évaluer l'efficacité des recouvrements dans la réduction de l'oxydation des sulfures en examinant périodiquement les concentrations des gaz interstitiels. L'une des fonctions des recouvrements composites était de servir de barrière imperméable aux eaux de précipitation et, par conséquent, de réduire la production d'eaux acides. Une analyse quantitative visant à déterminer la présence de gaz interstitiels était alors considérée comme plus globale et représentative de l'étendue et des taux d'oxydation des sulfures, donc davantage représentative du rendement du recouvrement. Outre l'analyse des gaz interstitiels, on a effectué une évaluation restreinte de l'évolution géochimique des échantillons d'eau prélevés dans les emplacements d'essai recouverts et non recouverts.

Lors de l'analyse visant à détecter la présence de gaz sulfureux, aucune trace de H₂S ni de SO₂ n'a été trouvée. Des études réalisées antérieurement par d'autres chercheurs avaient indiqué que le SO₂ n'était détectable que dans des minéraux sulfurés complètement secs. Étant donné la solubilité relativement élevée du H₂S et du SO₂ dans l'eau et les conditions relativement humides qui prévalent à Waite Amulet, on a conclu que tout H₂S ou SO₂ produit par oxydation des sulfures sera probablement dissous dans l'eau.

L'analyse visant à déterminer la présence des isotopes stables $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans le CO₂ et qui devait déterminer la nature de la source de CO₂ n'a pas donné de résultats concluants. Toutefois, on en a déduit que les sources de CO₂ pourraient comprendre 1) l'oxydation de la matière organique, 2) la dissolution de minéraux du groupe des carbonates dans les résidus, 3) la dissolution de minéraux du groupe des carbonates dans la roche calcaire ajoutés pendant la restauration de la couverture végétale et 4) l'air piégé.

TABLE OF CONTENTS

Participation à l'évaluation sur le terrain de recouvrement géologique	École Polytechnique
The Effectiveness of Engineered Soil Covers on Reactive Mine Tailings at Waite Amulet, Québec	McGill University
L'Étude d'échantillonnage de gaz de Waite Amulet	Université McGill
Field Evaluation of the Effectiveness of Engineered Soil Covers for Reactive Tailings: Compatibility Evaluation	McGill University
Chemical Interaction and Cyclic Freeze Thaw Effects on the Integrity of the Proposed Soil Cover System	McGill University
Field Evaluation of the Effectiveness of Engineered Soil Covers for Reactive Tailings	McGill University

-- RAPPORT FINAL --

PARTICIPATION À L'ÉVALUATION SUR LE
TERRAIN DE RECOUVREMENTS
GÉOLOGIQUES

préparé pour

CENTRE DE RECHERCHES MINÉRALES
2700, rue Einstein
Ste-Foy, (Québec)
G1P 3W8

Mars 1992

Projet C.D.T P1538

RAPPORT FINAL

**PARTICIPATION À L'ÉVALUATION SUR LE TERRAIN
DE RECOUVREMENTS GÉOLOGIQUES**

préparé pour

**CENTRE DE RECHERCHES MINÉRALES
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec)
G1P 3W8**

a/s M. Jean-Marc Robert, ing.

par

**Robert P. Chapuis, ing.
Département de Génie minéral
ÉCOLE POLYTECHNIQUE**

soumis par

**LE CENTRE DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
Campus de l'Université de Montréal
Case Postale 6079, Succursale A
Montréal, (Québec) H3C 3A7**

Mars 1992



**Robert P. Chapuis, ing.
Directeur de projet**

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	DÉROULEMENT DES TRAVAUX RÉALISÉS	3
3.	LISTE DES TRAVAUX RÉALISÉS	4
4.	ESSAIS DE LABORATOIRE	5
5.	ESSAIS DE TERRAIN	7
6.	MODÉLISATION ET ANALYSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS	9
6.1	Écoulements au voisinage de la zone d'essais	9
6.2	Analyse des écoulements dans la coupe AA'	10
6.3	Analyse des écoulements dans la coupe CC'	11
6.4	Analyse des écoulements par bilan régional, coupe BB'	12
7.	CONCLUSION	15

Annexe A - Résultats des essais de laboratoire

Annexe B - Résultats des essais sur le terrain

Annexe C - Résultats des études par ordinateur et par bilan

PROJET WAITE-AMULET
Contrat de recherche CT 170100
Réfs : STM 89TE17 et Polytechnique P-1538

Participation à l'évaluation sur le terrain de recouvrements géologiques

Dans le cadre du projet NEDEM, le CRM a octroyé un contrat de recherche à l'École Polytechnique, afin qu'elle participe à l'évaluation sur le terrain d'un projet de recouvrements géologiques sur les résidus miniers de Waite-Amulet.

Les travaux de l'École Polytechnique comprennent des essais en laboratoire, sur le terrain, et des analyses des écoulements souterrains par éléments finis.

Les principaux résultats sont les suivants :

1. Le dépôt de résidus miniers est très hétérogène. Les échantillons testés présentaient sur de courtes distances, des variations verticales de granulométrie et des propriétés hydrauliques.
2. Les essais de perméabilité au laboratoire, et ceux réalisés dans les piézomètres s'accordent pour donner aux résidus une conductivité hydraulique horizontale moyenne de 1.3 à 2×10^{-5} m/s, dans la zone des recouvrements.
3. Les analyses par éléments finis confirment que l'anisotropie de perméabilité, à grande échelle, est élevée et de l'ordre de 80 dans les résidus miniers.
4. D'après les valeurs de perméabilité et de gradient relevées sur le terrain, une partie importante des eaux infiltrées depuis la surface est évacuée verticalement à travers le terrain naturel sous-jacent aux résidus, dans le secteur des recouvrements.

Participation in field evaluation of geologic covers

Within the frame of the MEND project, CRM has given a research contract to École Polytechnique, for having its participation in a field evaluation of a project of geologic covers over the mine tailings of Waite-Amulet.

The works of École Polytechnique include laboratory tests, field tests and analyses of ground water flow by the finite element method.

The principal results are the followings:

1. The mine tailings deposit is very heterogeneous. Samples tested in the laboratory have indicated vertical variations in gradation and hydraulic properties over short distances.
2. Permeability tests, in the laboratory and in the piezometers, agree to give to the mine tailings an average horizontal hydraulic conductivity of 1.3 to 2×10^{-5} m/s, in the area of the instrumented covers.
3. The finite element analyses confirm that the permeability anisotropy ratio, at a large scale, is high and close to 80 in the mine tailings.
4. According to the values of permeabilities and hydraulic gradient as obtained in the field, a large portion of water infiltrated from the surface is evacuated vertically through the natural ground underlying the mine tailings in the area of the geologic covers.

École Polytechnique de Montréal

PROJET WAITE-AMULET

Contrat de recherche CT 170100

Réfs : STM 89TE17 et Polytechnique P-1538

RAPPORT FINAL

31 mars 1992

Participation à l'évaluation sur le terrain de recouvrements géologiques

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet NEDEM (Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier), le CRM (Centre de Recherches minérales du ministère de l'Énergie et des Ressources) a accordé en septembre 1990 un contrat de recherche à l'École Polytechnique, afin qu'elle participe à l'évaluation sur le terrain d'un projet de recouvrements géologiques sur les résidus miniers de Waite-Amulet.

La participation, en termes de travaux à réaliser par l'École Polytechnique, était décrite par les "Termes du mandat pour l'évaluation sur le terrain de l'efficacité des recouvrements géologiques sur des résidus miniers", préparés par le CRM et datés de juillet 1990.

Plus spécifiquement, les travaux étaient les suivants :

- 1) Participation dans la conception finale des parcelles d'essais sur le terrain.
- 2) Consultation au sujet de la conception et l'installation des systèmes de contrôle (des piézomètres, des tensiomètres et des dispositifs de surveillance des gaz).
- 3) Échantillonnage des résidus miniers.
- 4) Conductivité hydraulique en laboratoire des résidus miniers (4 essais).
- 5) Conductivité hydraulique sur le terrain des résidus miniers et des recouvrements de sol complétés (5 essais).
- 6) Mesures sur le terrain de la teneur en eau et de la densité des recouvrements de sol compactés, pour s'assurer de la qualité des travaux exécutés (4 essais).
- 7) Modélisation de l'écoulement de l'eau au travers des recouvrements de sol et des résidus miniers sous-jacents.
- 8) Mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques incluant le pH, la conductivité et le potentiel redox (25 mesures).
- 9) Analyse des données hydrogéochimiques.
- 10) Interprétation des résultats et rédaction du rapport.

Les travaux décrits ci-dessus devaient être complétés entre juillet 1990 et mars 1991, selon la proposition initiale.

2. DÉROULEMENT DES TRAVAUX RÉALISÉS

Nos travaux n'ont pas progressé selon le calendrier prévu pour diverses raisons, qui sont décrites dans le rapport chronologique qui suit, et qui ont impliqué des délais hors du contrôle des responsables du projet.

Les discussions techniques avec Noranda relatives à ce projet ont débuté en novembre 1989. Dans les premiers échanges d'informations, il était question que Noranda octroie un contrat à Polytechnique. Nous avons appris ensuite que c'était le STM qui donnerait un contrat de recherche à Polytechnique pour un projet sous le contrôle scientifique de Noranda. Suite à une définition du mandat par Noranda, une proposition de travail leur a été soumise (au Dr. E.K. Yanful, en anglais, le 29 juin 1990). Avec l'accord de Noranda, cette proposition a été acheminée au CRM (à Mme P. Friedrich, en français, le 05 juillet 1990).

Suite à diverses discussions entre le CDT et le CRM, le contrat était finalement signé le 18 septembre 1990. Le projet a donc débuté avec plusieurs mois de retard sur l'échéancier initial qui prévoyait que tous les travaux de terrain seraient complétés durant l'été 1990.

L'équipe de Polytechnique n'a donc pas pu participer aux travaux prévus pendant l'été 1990, à savoir les étapes 3 et 6. Ces travaux ont été réalisés avant la signature du contrat, par des firmes privées, et sous la surveillance technique du personnel de Noranda. Les factures relatives à ces travaux ont été envoyées à l'École Polytechnique, qui les a payées à même son contrat de recherche avec le CRM.

Par ailleurs, les étapes 5 et 8 des travaux sur le terrain ne pouvaient pas être réalisées en hiver : ils ne pouvaient être entrepris qu'à partir de mai 1991, quand les sols auraient dégelé. Enfin, l'étape 7 de "Modélisation" nécessitait les résultats de terrain : elle ne pouvait donc être réalisée qu'après l'été 1991.

En conséquence, dans notre premier rapport trimestriel, nous avons demandé de réviser l'échéancier. Dans notre lettre du 20 mars 1991, nous demandions au CRM de conserver dans son prochain exercice financier les fonds requis pour compléter le projet pendant l'année financière 1991-1992.

Par l'avenant No.1 au contrat STM-89TE17, daté 17 octobre 1991, l'article 11 était modifié pour se lire : "L'École s'engage à respecter l'échéancier contenu dans les termes du mandat et à terminer les travaux pour le 31 mars 1992."

3. LISTE DES TRAVAUX RÉALISÉS

En reprenant les termes du mandat, les travaux réalisés furent les suivants :

- 1) Participation dans la conception finale des parcelles d'essais sur le terrain : notre contrat ayant débuté après la conception et la construction de ces parcelles, il est probable que ce soit pour cette raison que l'équipe scientifique de Noranda ne nous ait pas consultés sur cette conception.
- 2) Consultation au sujet de la conception et l'installation des systèmes de contrôle (des piézomètres, des tensiomètres et des dispositifs de surveillance des gaz) : comme pour l'item précédent, l'équipe de Noranda ne nous a pas consultés sur cette conception, mais nous avons vérifié sur le terrain la qualité de l'installation de six piézomètres installés dans les parcelles d'essais.
- 3) Échantillonnage des résidus miniers : cet échantillonnage a été fait par une firme privée pendant l'été 1990, avant la signature de notre contrat. Les coûts de ces travaux ont été réglés par Polytechnique.
- 4) Conductivité hydraulique en laboratoire des résidus miniers (4 essais prévus) : ces essais ont été réalisés pendant l'hiver et le printemps 1991, sur les échantillons récupérés (étape 3). Pour compenser notre faible participation dans les étapes 1 et 2, nous avons fait huit essais de perméabilité en laboratoire au lieu de quatre. De plus, nous avons effectué les essais suivants : deux essais de consolidation oedométrique, treize analyses granulométriques complétées par treize sédimentométries et treize déterminations de la densité des particules solides.
- 5) Conductivité hydraulique sur le terrain des résidus miniers et des recouvrements de sol complétés (5 essais prévus) : ces travaux ont été réalisés en juin 1991. Pour compenser notre faible participation dans les étapes 1 et 2, nous avons effectué 16 essais au lieu des 5 prévus, soit 4 essais dans le matériau argileux ayant servi au recouvrement, et 12 essais à niveau variable (6 à niveau descendant et 6 à niveau ascendant) dans les 6 piézomètres R2-1, R2-2, R3-1, R3-2, R4-1 et R4-2, installés dans les parcelles d'essais.
- 6) Mesures sur le terrain de la teneur en eau et de la densité des recouvrements de sol compactés, pour s'assurer de la qualité des travaux exécutés (4 essais) : ces mesures ont été faites par deux firmes privées pendant l'été 1990, avant la signature de notre contrat. Les coûts de ces travaux ont été réglés par Polytechnique.
- 7) Modélisation de l'écoulement de l'eau au travers des recouvrements de sol et des résidus miniers sous-jacents : ces travaux ont été réalisés pendant l'automne 1991 et l'hiver 1991-92, à l'aide du logiciel PC-Seep.
- 8) Mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques incluant le pH, la conductivité et le potentiel redox (25 mesures prévues) : deux séries de relevés ont été faites

sur le terrain en mai et en juin 1991. Nous avons d'abord mesuré 68 niveaux d'eau dans les piézomètres du site en mai 1991. En juin 1991, les relevés suivants ont été faits : 74 niveaux d'eau dans les piézomètres, 65 mesures du pH sur place, 24 mesures de conductivité électrique. D'autre part, nous avons mesuré au laboratoire le potentiel redox et le pH de 16 échantillons d'eau ramenés du site.

- 9) Analyse des données hydro-géo-chimiques : cette analyse des données a été réalisée pendant l'été et l'automne 1991.
- 10) Interprétation des résultats et rédaction du rapport : ces travaux ont été complétés durant la fin de l'année 1991, pour produire le présent rapport final.

Les résultats de notre contrat de recherche ont été regroupés en trois catégories qui constituent les chapitres suivants de ce rapport :

- informations fournies par les essais de laboratoire;
- informations fournies par les essais de terrain;
- informations fournies par les travaux de modélisation et l'analyse des données.

4. ESSAIS DE LABORATOIRE

Les travaux de laboratoire ont été réalisés par MM. Antonio Gatién, technicien, et Marc L'Écuyer, étudiant à la maîtrise, à partir de janvier 1991. Les essais ont été effectués sur des échantillons récupérés sous la supervision du Centre de Technologie Noranda pendant leur campagne de terrain de l'été 1990, à laquelle l'équipe de Polytechnique n'a pas pu participer (le contrat était en cours de négociation). Les échantillons ont été prélevés de façon continue, par une foreuse à tarière creuse, à l'intérieur de tubes en résine acrylique. Ces échantillons furent stockés en chambre humide à température ambiante, extraits des tubes échantillonneurs dans notre laboratoire d'hydrogéologie et environnement minier où ils ont subi les essais.

Huit essais de perméabilité ont été réalisés dans des cellules oedométriques qui permettent de reconstituer l'état des contraintes agissant *in situ* sur l'échantillon. Nous avons ainsi mesuré la conductivité hydraulique de 8 échantillons, pour des conditions de contraintes effectives encadrant les valeurs *in situ*. Les essais ont été effectués à différence de charge hydraulique variable. Les résultats sont présentés à l'Annexe A. Sept échantillons ont été testés dans la direction verticale, et un échantillon dans la direction horizontale.

Deux essais complets de consolidation oedométrique ont été effectués. Les échantillons testés ont indiqué un certain degré de remaniement, ce qui ne permet pas de les qualifier d'intacts. Selon les critères de mécanique des sols, seuls les échantillons provenant de blocs taillés, ou d'échantillonneurs à piston stationnaire de 75 mm et plus, peuvent donner des échantillons de bonne qualité, qu'on peut qualifier d'intacts, pour des essais mécaniques (tassement et résistance au cisaillement). Le degré de remaniement

constaté sur les échantillons n'a cependant que très peu d'influence sur les conductivités hydrauliques mesurées. Les résultats des deux essais de consolidation sont présentés sous forme graphique à l'Annexe A. Les deux échantillons testés étaient faiblement compressibles, comparés à une argile.

Nous avons constaté que les échantillons reçus pouvaient présenter, sur de courtes distances, des variations verticales de granulométrie et donc des propriétés hydrauliques. On peut supposer qu'il existe aussi des variations latérales à plus grande échelle, dues au mode de mise en place des résidus. Les échantillons 1 et 2 (voir le Tableau de l'Annexe A) sont distants de 5 cm environ. Leurs essais donnent des valeurs K dans un rapport de 25 environ. À petite échelle, les straticules apparaissent à peu près isotropes en perméabilité. Cependant, la stratification horizontale des résidus peut donner une forte anisotropie de perméabilité quand on considère les problèmes d'écoulement à grande échelle (par exemple dans une simulation par ordinateurs ou dans un calcul de bilan).

Afin d'étudier plus en détail la variabilité du dépôt de résidus, nous avons effectué treize analyses granulométriques complétées par treize sédimentométries et treize déterminations de la densité des particules solides. Les résultats de ces essais sont présentés à l'Annexe A.

Suite aux essais de laboratoire, les résidus miniers analysés peuvent être caractérisés de la manière suivante :

- conductivité hydraulique verticale (6 essais) :

moyenne K_v	=	2×10^{-5} m/s
maximum	=	5×10^{-5} m/s
minimum	=	4×10^{-9} m/s

- Notes :
1. La valeur moyenne obtenue par les essais de laboratoire pour la zone des parcelles instrumentées, diffère donc de la valeur moyenne obtenue par Noranda pour l'ensemble des résidus miniers, et qui est de 6×10^{-6} m/s.
 2. Compte tenu de la stratification subhorizontale des résidus, la moyenne arithmétique obtenue sur petits échantillons sensiblement isotropes correspond à la conductivité hydraulique horizontale moyenne à grande échelle. La connaissance de la conductivité hydraulique verticale moyenne à grande échelle, plus difficile à obtenir, nécessiterait un vaste programme d'investigations et d'essais, qui sortirait du cadre de la présente étude.

- conductivité hydraulique horizontale (1 essai) :

K_h	=	4×10^{-5} m/s
-------	---	------------------------

- pourcentage de particules plus petites que 80 - 30 - 10 - 2 μ m (13 essais) :

	F_{80}	F_{30}	F_{10}	F_2
moyenne	= 73	38	14	2.5
maximum	= 96	58	38	12
minimum	= 47	10	3	0

- densité des particules solides (13 mesures) :
 - moyenne = 3.377
 - maximum = 3.648
 - minimum = 3.010

- masse volumique humide (8 mesures) :
 - moyenne = 2180 kg/m³
 - maximum = 2360 kg/m³
 - minimum = 2050 kg/m³

- teneur en eau, w (11 mesures) :
 - moyenne = 24.7 %
 - maximum = 36.1 %
 - minimum = 16.4 %

L'ensemble de ces résultats fait ressortir la grande variabilité du dépôt selon la direction verticale, aux deux sondages WA-15 et R3-1.

5. ESSAIS DE TERRAIN

Les travaux de terrain ont été réalisés par M. Rodolfo Crespo, auxiliaire de recherche, et M. Antonio Gatien, technicien.

Dès que la température s'est radoucie en 1991, MM. Crespo et Gatien ont mesuré les niveaux d'eau dans les piézomètres, ainsi que le pH et la conductivité électrique de plusieurs échantillons d'eau prélevés dans ces piézomètres.

Les relevés suivants ont été faits en mai 1991 : 68 niveaux d'eau dans les piézomètres du site. Les relevés suivants ont été faits en juin 1991 : 74 niveaux d'eau dans les piézomètres du site, 65 mesures du pH sur place, 24 mesures de conductivité électrique.

Nous avons prévu utiliser une sonde multiple de terrain pour mesurer en place simultanément le pH, la conductivité et le potentiel redox. Notre sonde multiple est logée dans un cylindre d'environ 1 m de longueur et 75 mm de diamètre. Elle peut être utilisée dans des puits de plus de 4 pouces de diamètre intérieur, mais elle ne pouvait pas entrer dans les tuyaux piézométriques du site. Par conséquent, des appareils portatifs de pH et conductivité ont été utilisés sur le terrain, et 16 échantillons d'eau ont été ramenés du site, pour mesurer au laboratoire leur potentiel redox et leur pH.

Au mois de juin, on a également effectué 16 essais de perméabilité en place. Dans un secteur désigné par Noranda, et situé à l'extérieur des parcelles d'essais en vraie grandeur de couverture sèche, on a déterminé à quatre emplacements la conductivité hydraulique du matériau argileux utilisé comme matériau couverture sèche. Par ailleurs, on a réalisé dans les résidus 12 essais de perméabilité à niveau variable, 6 à niveau descendant et 6

à niveau ascendant, dans les piézomètres R2-1, R2-2, R3-1, R3-2, R4-1 et R4-2 situés dans la zone d'essais des couvertures sèches.

Les résultats des travaux de terrain sont présentés à l'Annexe B :

- Tableaux (3 pages) des niveaux d'eau, pH et conductivités mesurés sur place;
- Tableau des pH et des potentiels redox mesurés au laboratoire sur les échantillons d'eau récupérés;
- Schéma de la zone instrumentée pour couvertures sèches, avec localisation des piézomètres et de la zone d'essais de perméabilité dans la couverture argileuse (coin sud-ouest);
- Illustration des essais de perméabilité dans l'argile;
- Tableau des conductivités hydrauliques dans l'argile;
- Tableau des relevés effectués dans les piézomètres des cellules instrumentées;
- Tableau des résultats des essais de perméabilité in situ, à niveau descendant et à niveau ascendant, dans les piézomètres R2-1 à R4-2 (calculs par le graphique des vitesses, vérification du niveau piézométrique et contrôle de la valeur K par le graphique de $\ln(H_i)$; voir la norme BNQ-2501-135).

Les conductivités hydrauliques mesurées dans l'argile varient de 1.15 à 3.07×10^{-7} m/s. Les quatre valeurs sont donc très voisines. Elles sont relativement élevées par rapport à celles d'une argile compactée selon les règles de l'art, puis maintenue en tout temps humide et à l'abri du gel. Ces valeurs relativement élevées sont attribuables aux effets du gel sur la couche d'argile pendant l'hiver 1990-91.

On rappelle cependant que les essais n'ont pas été faits directement dans la couverture argileuse d'une parcelle, conformément à la directive de Noranda. Selon des informations verbales de Noranda, cette couverture aurait conservé son imperméabilité et sa conductivité hydraulique de 10^{-9} m/s.

Dans le cas des piézomètres, la méthode du graphique des vitesses (BNQ 2501-135) a été utilisée pour vérifier si le niveau statique de l'eau dans le tuyau était réellement un niveau piézométrique, et si l'installation physique du piézomètre avait été réussie.

Quatre piézomètres (R2-1, R2-2, R3-1, R3-2) implantés dans les résidus ont donné des corrections piézométriques H_0 très faibles, inférieures à 9 cm. Leur installation est considérée comme réussie. Chaque groupe de deux piézomètres indique un gradient vertical, de 0.125 environ, avec un écoulement descendant. Les deux groupes indiquent un gradient horizontal de 0.011 environ.

Deux piézomètres (R4-1, R4-2) ont donné des corrections piézométriques H_0 élevées, jusqu'à 30 cm. Leur installation est considérée comme étant manquée. Ces piézomètres sont victimes de circulations d'eau privilégiées (courts-circuits hydrauliques) dans leur voisinage, par suite soit d'un remaniement des sols en place, soit d'un défaut de scellement. Les niveaux d'eau statiques dans les tuyaux ne sont pas les vrais niveaux piézométriques dans le terrain, mais le résultat d'une installation défectueuse avec un écoulement parasite.

Sur le tableau des résultats (Annexe B), on note que les valeurs K données par les essais ascendant et descendant dans les piézomètres R4-1 et R4-2 sont très différentes, c'est-à-dire dans un rapport de 17 pour R4-1 et de 110 pour R4-2. Dans le cas des quatre piézomètres R2-1 à R3-2, ce rapport est compris entre 1.03 et 4.8.

La différence entre les deux valeurs K peut avoir deux origines : un mauvais scellement de l'instrument, et un "développement" incomplet. Ce dernier provoque un colmatage partiel de la crépine ou de la zone filtre pendant l'essai à niveau ascendant, et on constate cet effet pour tous les piézomètres. On constate aussi, de façon générale, que plus la valeur H_0 est élevée (effet du mauvais scellement), plus la différence entre les deux valeurs K est élevée.

La conductivité hydraulique des résidus fournie par les quatre piézomètres fiables (R2-1 à R3-2), est comprise entre 3.2×10^{-6} et 6.0×10^{-5} m/s. La moyenne arithmétique de 1.3×10^{-5} m/s et la valeur maximale de 6.0×10^{-5} m/s correspondent bien aux valeurs fournies par les essais de perméabilité en laboratoire, soit 2×10^{-5} et 5×10^{-5} m/s respectivement. Par contre, on n'a pas trouvé sur le terrain de valeur minimale aussi faible que celle de 4×10^{-9} m/s fournie par l'échantillon 4 testé en laboratoire.

6. MODÉLISATION ET ANALYSE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

La modélisation informatique par éléments finis des écoulements souterrains a été effectuée par M. Rodolfo Crespo. Tous les résultats des essais de laboratoire et de terrain obtenus dans la zone instrumentée ont été utilisés afin de simuler les écoulements dans ce secteur, à l'aide du logiciel PC-Seep de Geo-Slope International.

6.1. Écoulements au voisinage de la zone d'essais

Une vue en plan du parc à résidus de Waite-Amulet est fournie au début de l'Annexe C. Le secteur instrumenté pour les essais de couvertures géologiques (barrières sèches) est représenté par un rectangle. Pour étudier les conditions d'écoulement souterrain dans ce rectangle, nous avons établi trois profils P1 à P3. Pour chacun d'eux, on présente un tableau des données hydrauliques relevées en mai et juin 1991, ainsi qu'une coupe approximative.

On a constaté que, dans le secteur instrumenté, l'écoulement des eaux souterraines à travers les résidus se fait à peu près perpendiculairement à la coupe P1, dans la direction Est, conformément à l'étude hydrogéologique du Centre de Technologie Noranda. Plusieurs groupes de piézomètres indiquent qu'une composante de l'écoulement est verticale descendante dans les résidus. On constate aussi que le groupe WA-10 (situé au sud et à proximité du secteur d'essais) indique un écoulement vertical ascendant en mai 1991 et descendant en juin 1991.

6.2. Analyse des écoulements dans la coupe AA'

La géométrie de la barrière composite est illustrée par les vues en coupe AA' et BB' de l'Annexe C. La position de ces coupes est fournie sur la vue en plan.

Les écoulements souterrains dans la coupe AA' sont verticaux, la coupe AA' étant perpendiculaire à la composante horizontale de la vitesse d'écoulement régional. Les écoulements ont été modélisés par le logiciel PC-Seep. On a retenu comme valeurs de conductivités hydrauliques celles fournies par nos essais. En conditions de pression interstitielle négative, on a défini des fonctions K (pression) conformément aux modèles suggérés par PC-Seep pour des matériaux semblables à ceux de la barrière composite et aux résidus (voir l'Annexe C).

À partir des relevés piézométriques R2-1 à R3-2, dans les résidus miniers, on a tracé un graphique de la charge hydraulique en fonction de l'élévation (voir l'Annexe C). Ce graphique a permis de trouver la position moyenne de la nappe (charge = élévation) sous les planches d'essais, ainsi que la charge hydraulique moyenne au fond des résidus, au contact avec les matériaux naturels. Cette valeur de charge a été utilisée comme condition frontière sous la couche des résidus.

L'Annexe C fournit la grille des éléments finis, des isocontours de pression interstitielle, et des vecteurs vitesses de l'eau pour deux cas de recharge annuelle, soit 1000 mm/an et 10 000 mm/an, en supposant que les résidus miniers ont une conductivité hydraulique isotrope ($r_k = K_H/K_V = 1$).

Ces valeurs très élevées de recharge annuelle ne correspondent pas aux conditions climatiques de la région. On doit cependant aller à une valeur très élevée de recharge (de l'ordre de 26 m/an), pour que le logiciel trouve la nappe phréatique à sa position rencontrée *in situ*. Ce problème est inhérent au type de modélisation, quelle que soit la valeur du coefficient d'anisotropie de perméabilité dans les résidus miniers. En effet, le logiciel PC-Seep travaille en deux dimensions, et il ne tient pas compte des apports d'eau par l'amont dans la troisième dimension. Pour en tenir compte, on présentera dans la section 6.3 une étude par éléments finis dans la section CC', et dans la section 6.4 une étude par bilan local dans la section BB' qui englobe la section CC'.

L'étude par ordinateur a cependant mis en évidence les points suivants :

- a) La couverture d'argile n'a que peu d'influence sur les infiltrations verticales de l'eau. On a vérifié que ceci est indépendant de la valeur de K attribuée à la couverture argileuse, qu'elle soit de 2×10^{-7} m/s d'après les quatre essais concordants réalisés dans le carré d'argile du coin sud-ouest du secteur d'essais, ou qu'elle soit de 10^{-9} m/s selon l'information reçue de Noranda.
- b) Les résidus miniers sont relativement perméables, et l'infiltration maximale possible y est élevée. Conformément aux observations faites en mai et juin pendant les plus grands apports d'eau à la nappe, il n'y a pas traces de ruissellement sur ce site horizontal, ailleurs qu'à proximité des pentes extérieures du parc à résidus.

Pour cette raison, dans la deuxième étude par éléments finis, selon la coupe CC', on a retenu deux valeurs pour le taux annuel d'infiltration : d'une part 200 mm/an selon une évaluation de Noranda pour l'ensemble du parc à résidus, et d'autre part 500 mm/an, qui correspond à la recharge annuelle en l'absence de ruissellement, le site des parcelles ayant une capacité d'infiltration supérieure à cette dernière valeur.

6.3. Analyse des écoulements dans la coupe CC'

Les écoulements souterrains dans la coupe CC' sont entièrement situés dans ce plan, qui est celui de la vitesse d'écoulement régional. Compte tenu de la symétrie géométrique du problème, le vecteur vitesse de l'eau n'a pas de composante perpendiculaire au plan CC'.

Les écoulements ont été modélisés par le logiciel PC-Seep. Pour la conductivité hydraulique de l'argile de couverture, on n'a retenu que la valeur de 10^{-9} m/s selon l'information reçue de Noranda. Pour la conductivité hydraulique horizontale K_H des résidus, on a retenu d'une part la valeur de 2×10^{-5} m/s, qui correspond à notre moyenne sur le site des parcelles (tant pour les essais de laboratoire que pour les essais de terrain), et d'autre part la valeur de 6×10^{-6} m/s, qui correspond à la moyenne de Noranda pour l'ensemble des résidus de Waite-Amulet. La conductivité hydraulique verticale est définie à partir de la valeur de conductivité hydraulique horizontale et du rapport d'anisotropie des perméabilités, $r_K = K_H/K_V$.

On a également retenu deux valeurs de taux annuel d'infiltration, soit 200 mm/an selon une évaluation de Noranda pour l'ensemble du parc à résidus, et 500 mm/an, qui correspond à la recharge annuelle en l'absence de ruissellement, le site des parcelles ayant une capacité d'infiltration supérieure à cette dernière valeur. Ces paramètres combinés entre eux définissent les quatre cas No.1 à 4, qui ont été étudiés par éléments finis (voir le tableau de l'Annexe C).

Pour les conditions de pression interstitielle négative, on a défini des fonctions K (pression) conformément aux modèles suggérés par PC-Séep pour des matériaux semblables à ceux de la barrière composite et aux résidus (voir l'Annexe C). On a utilisé les relevés piézométriques R2-1 à R3-2 dans les résidus miniers, pour définir par extrapolation les conditions de charge aux frontières latérales et à la frontière du fond, comme indiqué précédemment pour la coupe AA'.

Dans chacun des quatre cas analysés, pour que le logiciel attribue aux piézomètres R3-1 et R3-2 des charges égales à celles mesurées, il faut introduire la "bonne" valeur du coefficient d'anisotropie. On a donc réalisé une étude paramétrique de l'influence de cette anisotropie, pour chacun des quatre cas analysés.

À l'annexe C, on trouvera successivement :

- la grille des éléments finis,
- le tableau des paramètres retenus pour les quatre cas étudiés,
- les réseaux d'écoulement pour chacun des cas, selon que le coefficient d'anisotropie est de 1 ou de 100 dans les résidus miniers (8 figures),
- les figures permettant de trouver par interpolation les valeurs du coefficient d'anisotropie r_k qui permettent de prédire la valeur expérimentale de la charge en R3-1, ou en R3-2, respectivement (8 figures),
- un tableau récapitulatif des valeurs r_k pour les quatre cas et les deux piézomètres R3-1 et R3-2.

De l'ensemble des résultats, on constate qu'un coefficient d'anisotropie de 50 à 170 est requis pour prédire correctement les niveaux piézométriques rencontrés, et qu'une valeur moyenne de 80 environ rend bien compte des charges mesurées par les piézomètres R3-1 et R3-2, avec une précision acceptable, pour l'ensemble des quatre cas analysés.

6.4. Analyse des écoulements par bilan régional, coupe BB'

L'étude par éléments finis a été faite à deux dimensions selon les coupes AA' et CC' pour lesquelles on disposait d'un certain nombre d'informations géométriques et hydrogéologiques.

Sachant que dans les résidus, l'écoulement horizontal se produit approximativement selon le grand axe BB' du secteur d'essais, et que la ligne de partage des eaux se situe à environ 100 m des piézomètres R3, on peut faire une étude de bilan régional des eaux afin de contrôler les calculs par éléments finis (Référence : Chapuis, 1991. *Contrôle de la qualité dans la détermination des paramètres d'écoulement souterrain*. Proc., 1st Canadian Conf. on Environmental Geotechnics, Montreal, pp.345-356).

On utilise les deux vues en plan et en coupe fournies au début de l'Annexe C. On considère une bande de un mètre de largeur, délimitée par des lignes d'écoulement horizontal, entre le point B de partage des eaux, et le centre de la parcelle d'essais No.3. La recharge annuelle en eau, W (précipitations moins évapotranspiration) fournit un débit Q_{efficace} , qui après infiltration donne un débit $Q_{\text{latéral}}$ à travers les résidus, et un débit Q_{vertical} à travers le fond des résidus.

Le calcul du bilan procède alors de la manière suivante, avec les informations disponibles :

- a) La recharge annuelle W maximale est d'environ 500 mm/an selon les statistiques météorologiques. Elle ne donne que des infiltrations dans le secteur considéré. Le débit d'apport est donc :

$$Q_{\text{efficace}} = 100 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m/an} = 50 \text{ m}^3/\text{an}$$

- b) Sous la parcelle d'essais No.3, l'eau qui circule horizontalement, au-dessous de la nappe, traverse une section verticale de 3.1 m de hauteur par 1 m de largeur, avec un gradient horizontal de 0.011 et une conductivité hydraulique horizontale moyenne K_h de 2×10^{-5} m/s. Le débit évacué latéralement est donc :

$$\begin{aligned} Q_{\text{latéral}} &= \text{section} \times \text{vitesse de Darcy} \\ Q_{\text{latéral}} &= 3.1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.011 \times 2 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 21.5 \text{ m}^3/\text{an} \end{aligned}$$

Dans ce calcul, on suppose que les résidus sont formés de strates horizontales superposées. Chaque strate est isotrope. Les strates ont des conductivités hydrauliques différentes, et il en résulte une anisotropie de perméabilité pour l'ensemble de la couche de résidus. La moyenne arithmétique des essais de laboratoire sur des petits échantillons isotropes, ainsi que la moyenne arithmétique des essais dans les piézomètres donnent accès à la conductivité hydraulique moyenne horizontale dans ces conditions.

- c) Le débit évacué verticalement à travers le fond des résidus est alors :

$$Q_{\text{vertical}} = 28.5 \text{ m}^3/\text{an}$$

On ne sait pas précisément de quelle façon, ni dans quels secteurs ce débit est évacué, parce qu'on ne dispose pas des informations hydrogéologiques requises pour une évaluation précise. On peut cependant faire un calcul moyen, en supposant que le gradient vertical de 12.5% (moyenne des groupes de piézomètres R2 et R3) existe partout sur les cent mètres de la distance considérée. Le débit vertical correspond alors à une valeur moyenne K_v dans les résidus, telle que :

$$Q_{\text{vertical}} = 100 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.125 \times K_v = 28.5 \text{ m}^3/\text{an}$$

ce qui donne :

$$K_v = 7.23 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

- d) Le calcul par bilan permet alors d'évaluer le coefficient moyen d'anisotropie de perméabilité, r_k :

$$r_k = (K_h / K_v) \text{ à grande échelle} = 277$$

obtenu en supposant précédemment que les conditions de gradient vertical et de perméabilité ne changent pas sur 100 m de distance.

Pour contrôler les résultats des quatre cas analysés par éléments finis dans la section CC', il suffit de prendre dans les calculs précédents du bilan les valeurs de conductivités hydrauliques de chacun des cas pour les résidus, ainsi que la recharge annuelle de chacun de ces cas. Les résultats des étapes successives de calcul sont présentés dans le tableau ci-après.

TABEAU 1 : Paramètres des études de bilan et coefficient d'anisotropie de perméabilité r_k déduit pour les résidus miniers. Comparaison avec les valeurs r_k obtenues par éléments finis.

PARAMÈTRE	CAS No.1	CAS No.2	CAS No.3	CAS No.4
K_h résidus (m/s)	6×10^{-6}	2×10^{-5}	6×10^{-6}	2×10^{-5}
Recharge (m/an)	0.200	0.200	0.500	0.500
Q_{efficace} (m^3/an)	20.0	20.0	50.0	50.0
$Q_{\text{latéral}}$ (m^3/an)	6.45	21.5	6.45	21.5
Q_{vertical} (m^3/an)	13.55	- 1.5	43.55	28.5
K_v résidus (m/s)	3.44×10^{-8}	impossible gradient inversé	1.10×10^{-7}	7.23×10^{-8}
$r_k = K_h / K_v$	175		54	277
r_k (éléments finis)	50 - 75	50 - 170	70	70 - 100

D'une façon générale, l'étude par bilan confirme à peu près l'étude par éléments finis, parce que ces deux études fournissent des valeurs comparables pour l'anisotropie de conductivité hydraulique dans les résidus.

De façon plus spécifique, l'étude par bilan fait ressortir deux phénomènes. On remarque d'abord que l'étude de bilan pour le cas 2 conduit à une inversion du sens de l'écoulement vertical, c'est-à-dire que les matériaux situés sous les résidus fourniraient de l'eau aux résidus, ce qui est contraire aux observations sous les parcelles instrumentées. On remarque ensuite que les études de bilan pour les cas 1, 3 et 4 indiquent un important écoulement de fuite verticale dans le secteur des parcelles d'essais. Le rapport du débit de fuite verticale sous les résidus au débit horizontal dans les résidus est de 1.36 dans le cas 4 (paramètres tirés de nos essais), de 2.10 pour le cas 1 (paramètres moyens de Noranda pour le site), et de 6.75 dans le cas 3 (valeurs mixtes des paramètres).

7. CONCLUSION

Le Tableau 2 ci-dessous permet de comparer les paramètres hydrogéologiques tirés de notre étude locale avec les paramètres moyens du Centre de Technologie Noranda pour l'ensemble du parc à résidus.

TABLEAU 2 : Comparaison des paramètres hydrogéologiques

PARAMÈTRE localisation	POLYTECHNIQUE parcelles d'essais	CENTRE TECH. NORANDA ensemble du site
ARGILE K	2.0×10^{-7} m/s gel ?	selon information verbale 10^{-9} m/s
RÉSIDUS MINIERS	mesures de Poly	rapport Noranda avril 1990 (fig.6.2, et pages 58, 59)
Gradient horizontal	1.1 %	1 à 5 % (plat, pente)
Gradient vertical	12.5 %	0.2 à 6 %
Porosité	35 %	27 %
K horizontal	2×10^{-5} m/s	5×10^{-8} à 2×10^{-6} m/s
K vertical	2.5×10^{-7} m/s	$K_h / 100$
anisotropie K_h / K_v	env. 80	100 supposé
VITESSES DE DARCY		
Horizontale	2.2×10^{-7} m/s	5×10^{-10} à 1×10^{-7} m/s
Verticale	3.1×10^{-8} m/s	1×10^{-12} à 1.2×10^{-9} m/s
VITESSES APPROXIMATIVES DE L'EAU		
Horizontale	21 m/an (plat)	0.06 à 12 m/an
Verticale	3 m/an	0.1 mm à 0.14 m/an

On note des différences significatives sur les gradients verticaux, les conductivités hydrauliques, et surtout les vitesses de l'eau souterraine, horizontale et verticale.

Il était donc justifié de faire, pour le secteur des couvertures géologiques, une étude hydrogéologique plus détaillée que celle qui avait été menée pour l'ensemble du site.

Cette étude par éléments finis avec le logiciel PC-Seep a été restreinte au secteur instrumenté des parcelles d'essais où l'on disposait des informations géométriques et hydrogéologiques. Cette étude, limitée par son caractère bidimensionnel, a été complétée par une étude simplifiée de bilan des eaux sur un cycle annuel moyen, pour tenir compte de la troisième dimension, et vérifier les résultats par éléments finis.

De l'ensemble de l'étude ressortent les points suivants :

- a) Les essais de perméabilité au laboratoire, et ceux réalisés dans les piézomètres, s'accordent pour attribuer aux résidus une conductivité hydraulique moyenne de $1.3 \text{ à } 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, dans le secteur des parcelles instrumentées.
- b) L'anisotropie de perméabilité, à grande échelle, résulte principalement de la stratification horizontale des résidus. Le nombre d'essais en laboratoire et sur le terrain est très insuffisant pour évaluer cette anisotropie.
- c) Les essais de perméabilité effectués dans l'argile utilisée comme matériau de couverture ont donné une valeur K moyenne de $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. Cette valeur, relativement élevée, est attribuable à l'action du gel pendant l'hiver 1990-91. Comme les essais n'ont pas été faits directement dans la couverture argileuse d'une parcelle, conformément à la directive de Noranda, on a retenu pour les analyses par éléments finis la valeur de 10^{-9} m/s que, selon les informations verbales de Noranda, cette couverture aurait conservée.
- d) Six piézomètres ont été testés dans le secteur d'essais des couvertures géologiques. On considère que quatre d'entre eux donnent des résultats fiables (niveaux piézométriques et conductivités hydrauliques). Les deux autres sont considérés défectueux.
- e) D'après les valeurs de gradient et de perméabilité relevées sur le terrain, une partie importante des eaux infiltrées depuis la surface est évacuée verticalement à travers le terrain naturel sous-jacent aux résidus, dans le secteur d'essais des couvertures géologiques.
- f) Une étude sommaire par bilan annuel permet de confirmer les analyses par éléments finis, et en particulier que l'anisotropie de perméabilité, à grande échelle, est élevée et de l'ordre de 80 dans les résidus miniers. Il est nécessaire de poser quelques hypothèses, par manque d'informations hydrogéologiques, pour obtenir cette valeur estimée.

Fin du rapport

ANNEXE A

RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRE

SITE WAITE-AMULET

Caractéristiques des échantillons soumis aux essais de perméabilité

ECH. No.	SONDAGE No.	PROFONDEUR (m)	K_h ou K_v	ρ_{sat} (g/cm ³)	W avant (%)	W après (%)	W retailles (%)	σ_v ESTIMÉE (kPa)
1	WA-15	1.5 - 3.0 *	K_v	2.35	16.4	15.7	19.7	≤ 52
2	WA-15	1.5 - 3.0 *	K_v	2.36	22.4	-	18.5	≤ 52
3	WA-15	4.70	K_v	2.18	23.9	25.0 ?	-	≤ 100
4	R3-1	1.20	K_v	2.05	36.1	29.5	31.3	≤ 24
5	R3-1	3.15	K_h	2.15	26.5	21.3	-	≤ 66
6	R3-1	3.40	K_v	2.18	19.4	16.5	-	≤ 73
7	R3-1	3.50	K_v	2.05	32.5	28.4	-	≤ 71
8	R3-1	3.60	K_v	2.14	24.5	22.0	-	≤ 76

* Distance verticale de 5 cm entre les échantillons 1 et 2

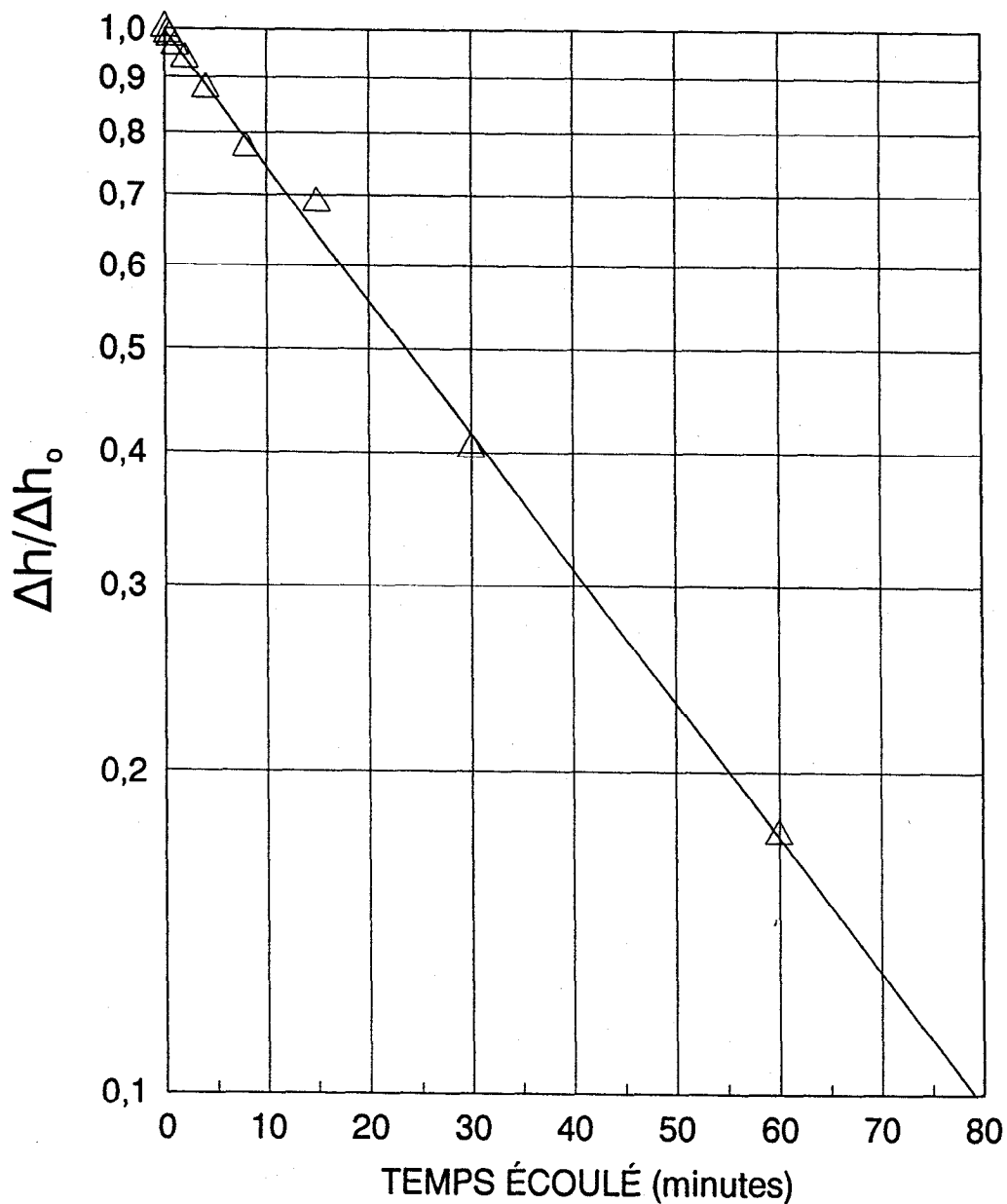
SITE WAITE-AMULET

Résultats des essais de perméabilité en cellule oedométrique

ECH. No.	σ'_v (1) (kPa)	K (1) à σ'_v (1) (m/s)	σ'_v (2) (kPa)	K (2) à σ'_v (2) (m/s)	REMARQUE
1	26.9	2.4×10^{-7}	53.7	2.2×10^{-7}	
2	26.9	6.4×10^{-6}	53.7	4.8×10^{-6}	
3	76.7	1.7×10^{-5}	119.3	1.8×10^{-5}	problème de fuite="colmatage" puis "decolmatage"
4	17.1	4.1×10^{-9}	34.1	3.8×10^{-9}	
5	51.2	5.0×10^{-5}	76.8	3.4×10^{-5}	
6	51.1	5.3×10^{-5}	76.9	7.5×10^{-5}	fuite décelée lors du démontage
7	51.2	-	76.8	6.4×10^{-5}	fuite probable
8	51.2	1.6×10^{-5}	76.8	1.2×10^{-5}	

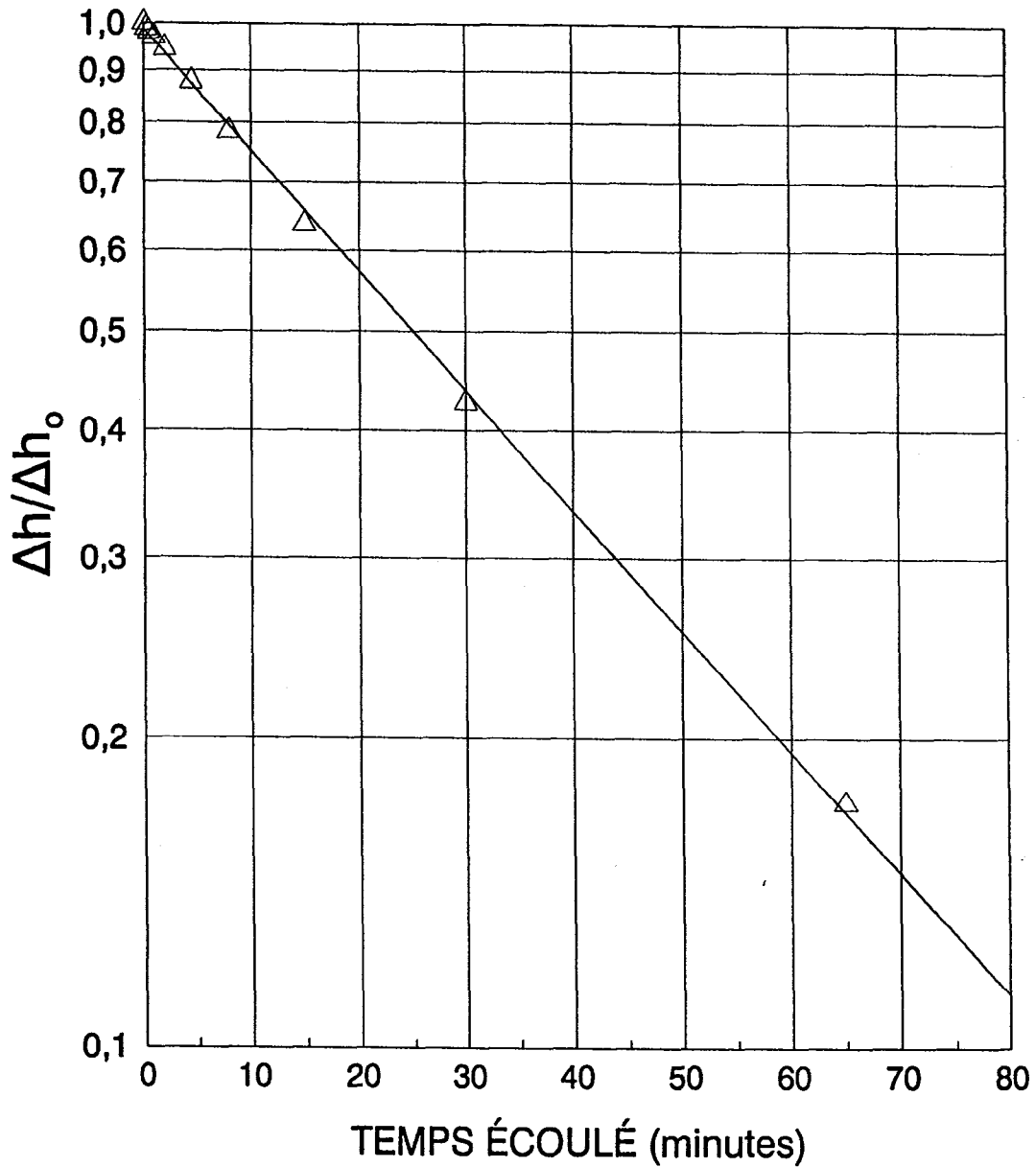
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE

sondage WA-15, profondeur= entre 1,50 et 3,00 m



Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 26,9 KPa
 $k = 2,4 \times 10^5$ cm/s

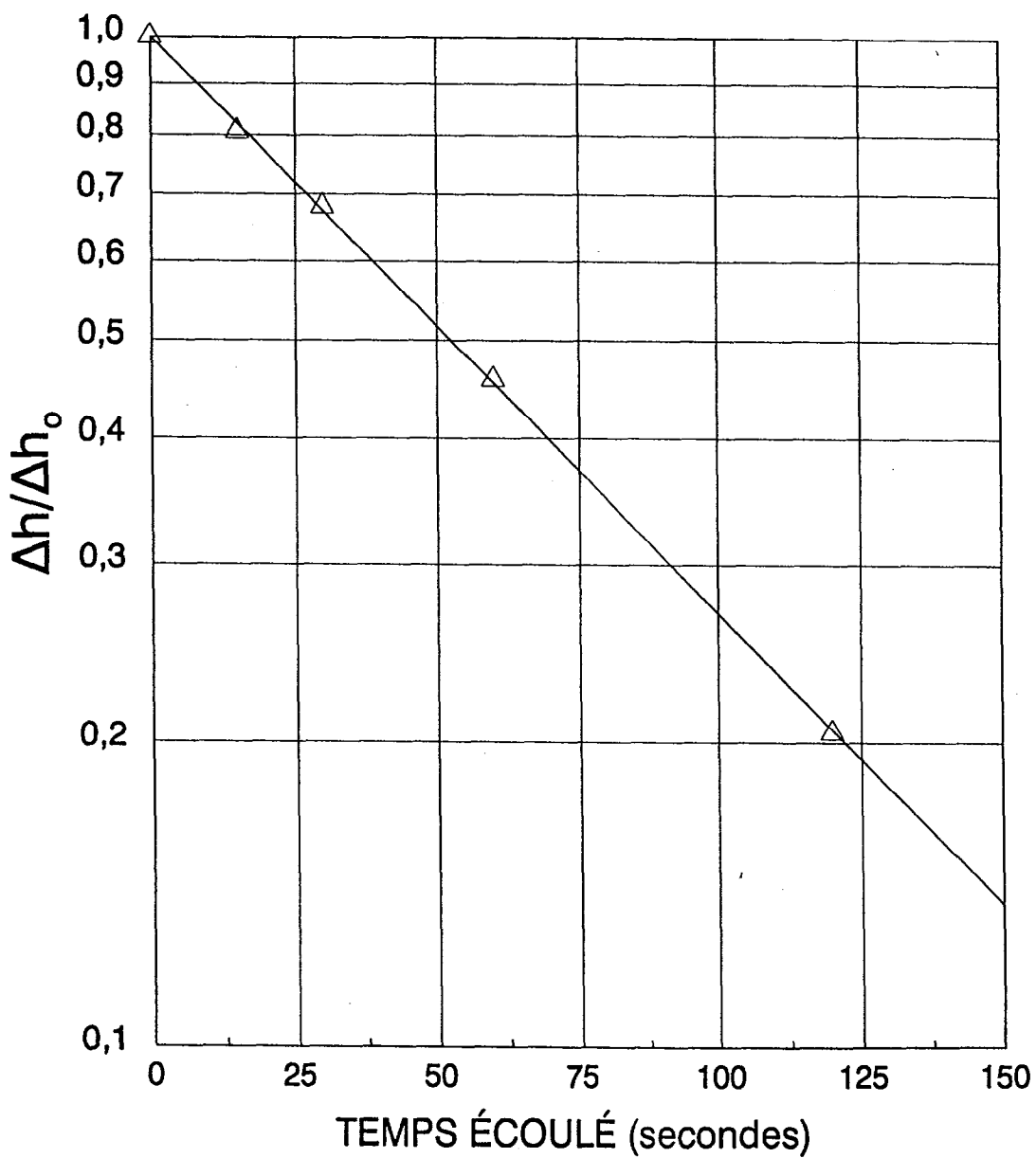
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage WA-15, profondeur = entre 1,50 et 3,00 m



Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 53,7 KPa
 $k = 2,2 \times 10^{-5}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE

sondage WA-15, profondeur = entre 1,50 et 3,00 m

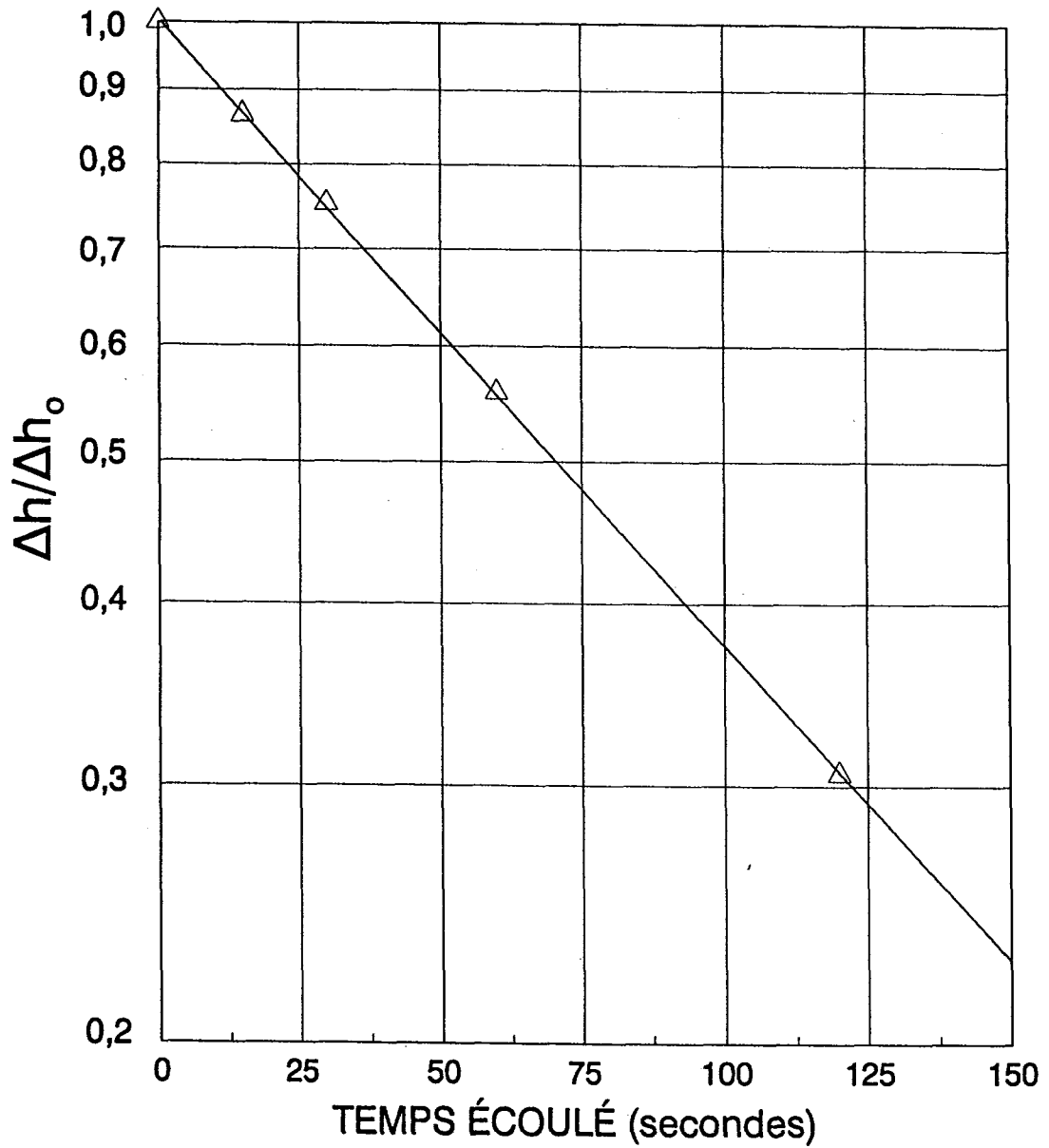


Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 26,9 KPa

$$k = 6,4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

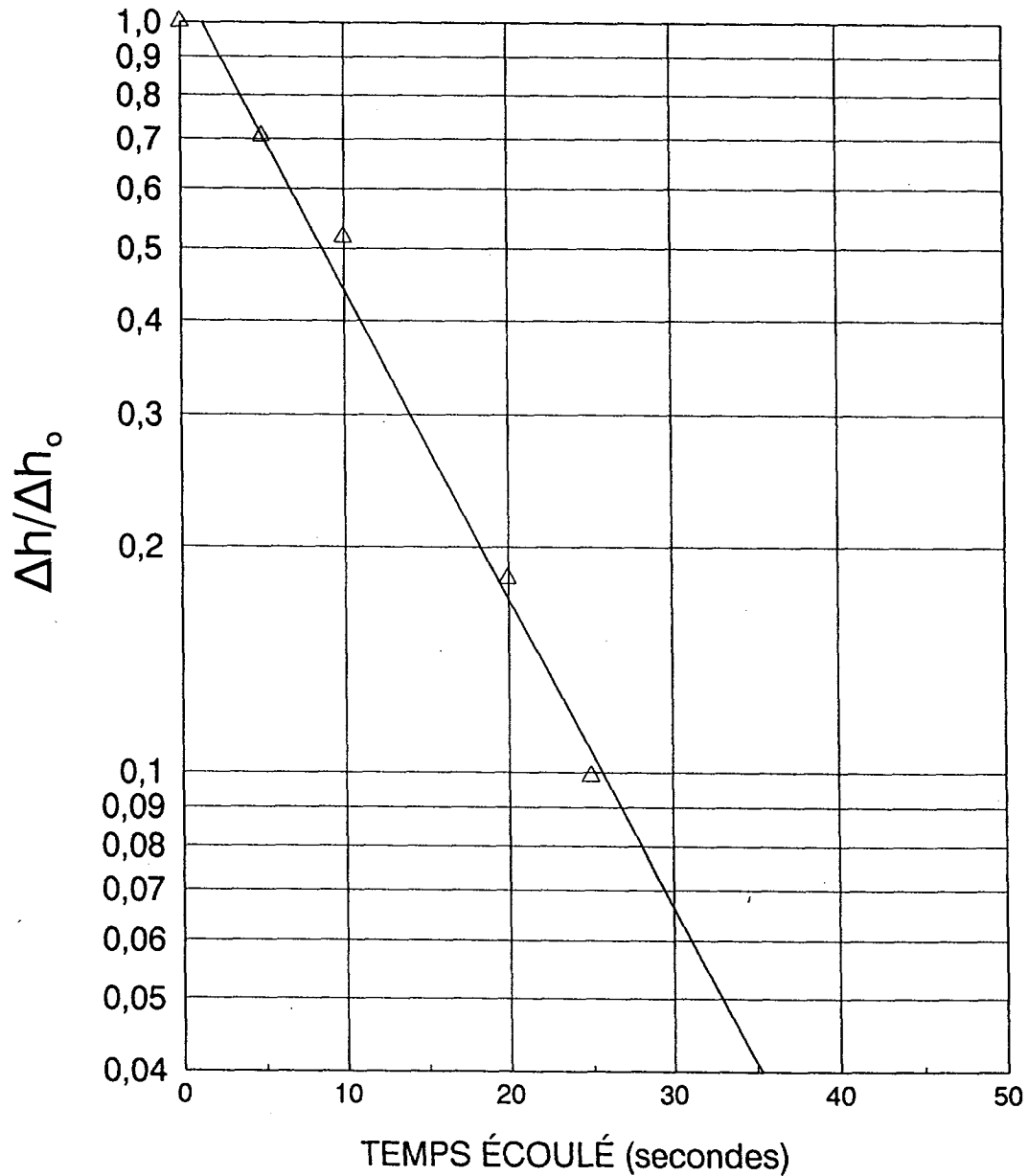
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE

sondage WA-15, profondeur = entre 1,50 et 3,00 m



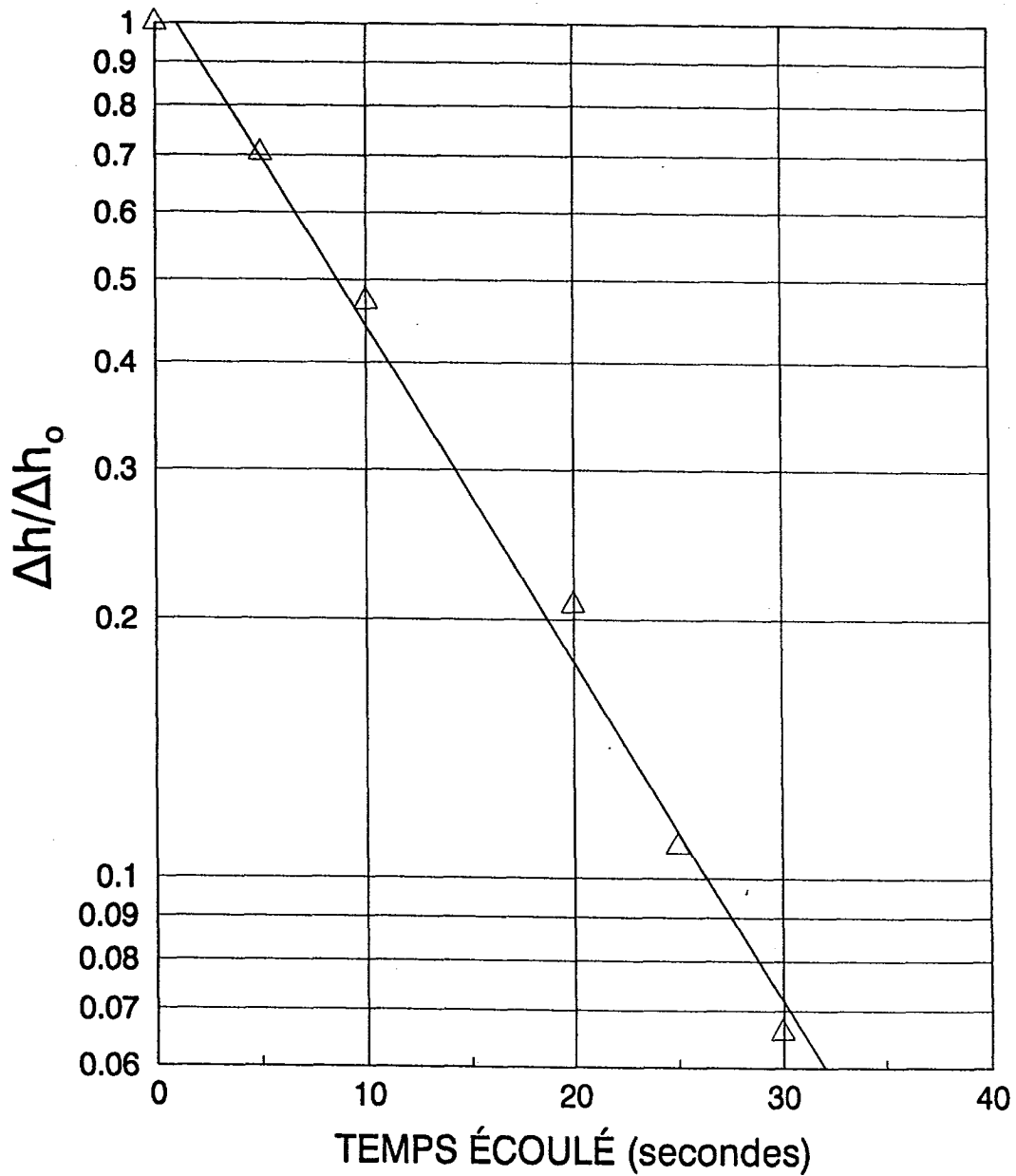
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 53,7 KPa
 $k = 4,8 \times 10^{-4}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage WA-15, profondeur= 4,70 m



Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 119,3 KPa
 $k = 1,8 \times 10^3 \text{ cm/s}$

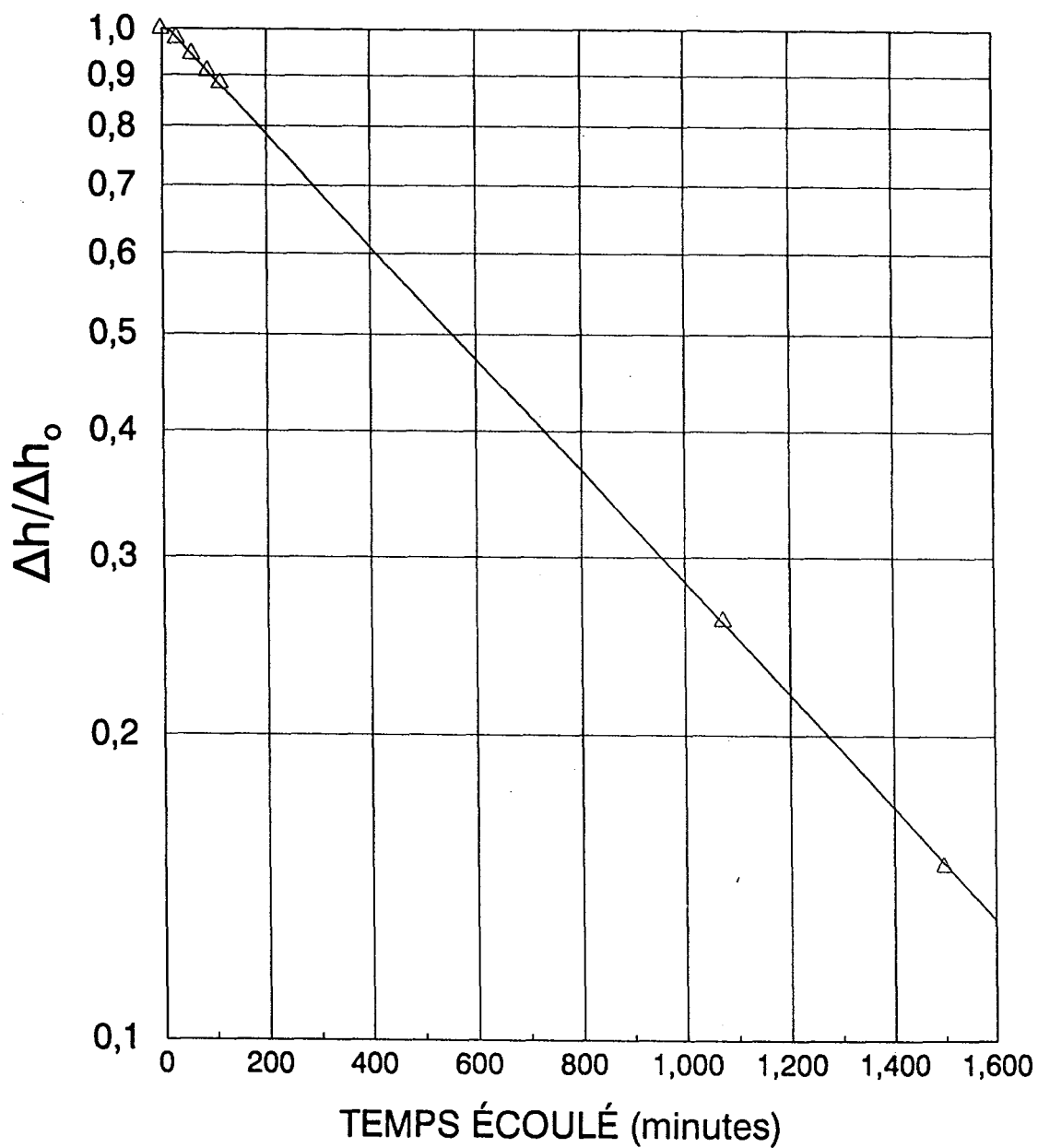
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage WA-15, profondeur = 4,70 m



Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 76,7 KPa
 $k = 1,7 \times 10^{-3}$ cm/s

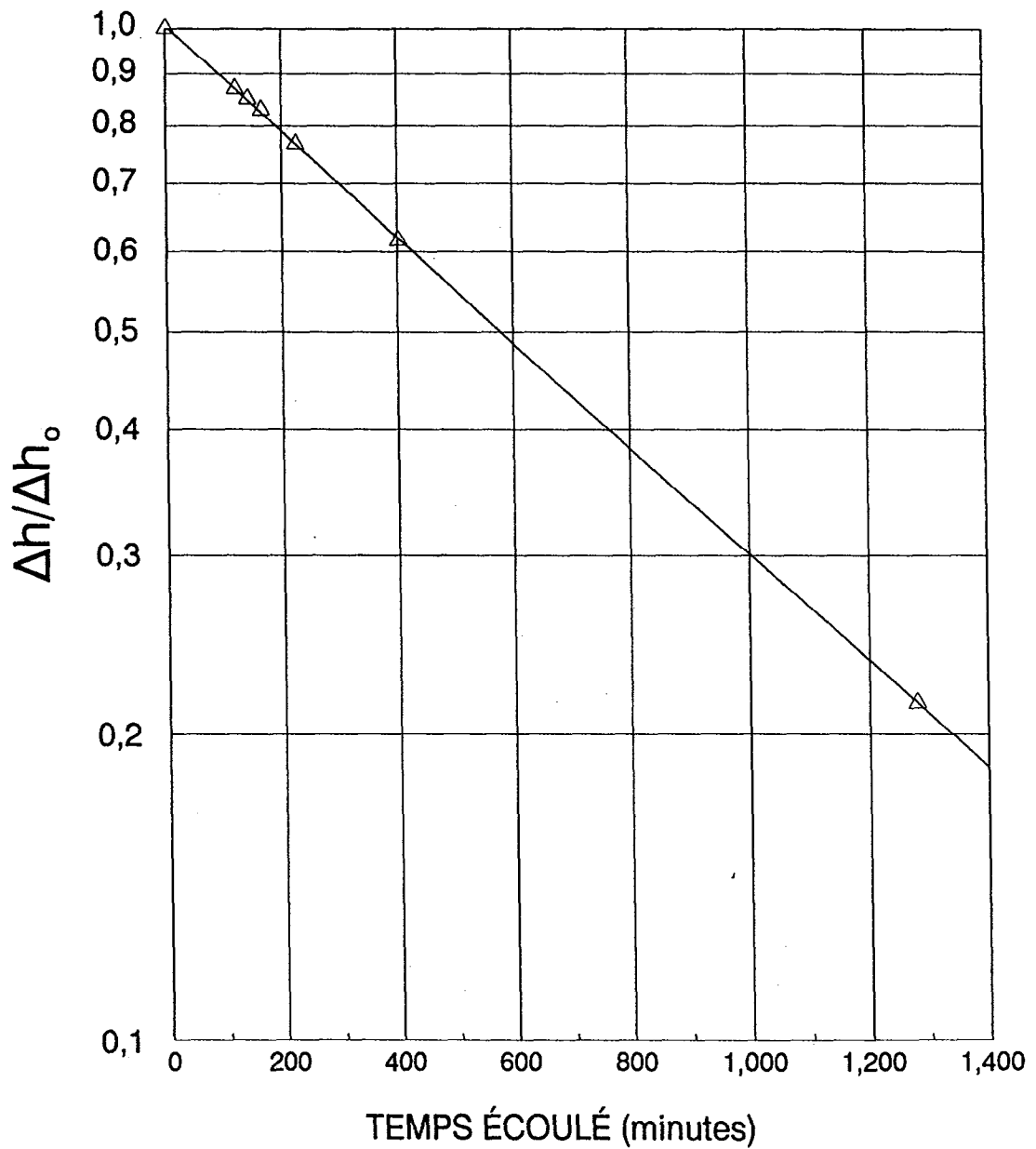
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE VARIABLE

sondage R3-1, profondeur= 1,20 m



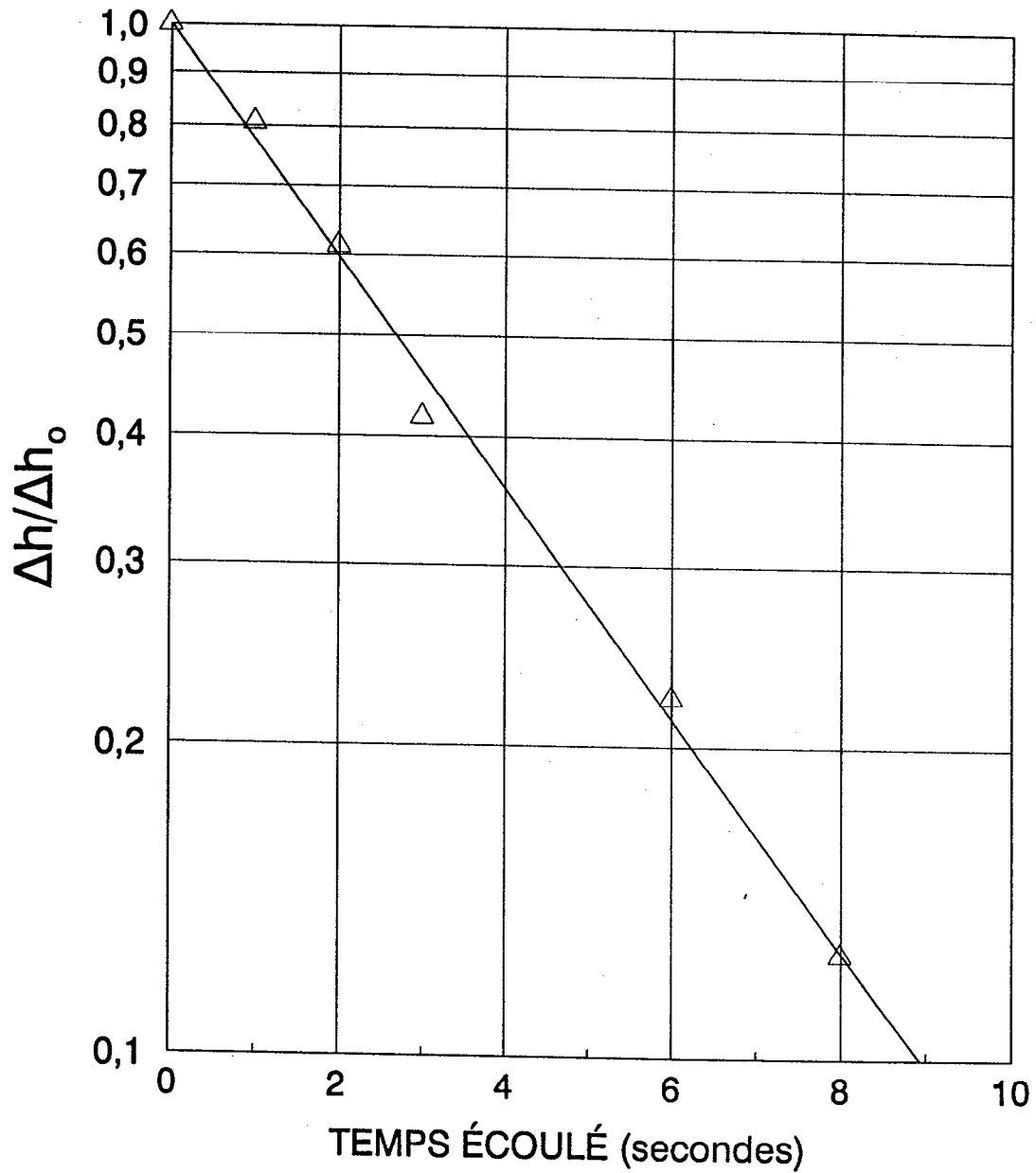
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 17,1 KPa
 $k = 4,1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage R3-1, profondeur= 1,20 m



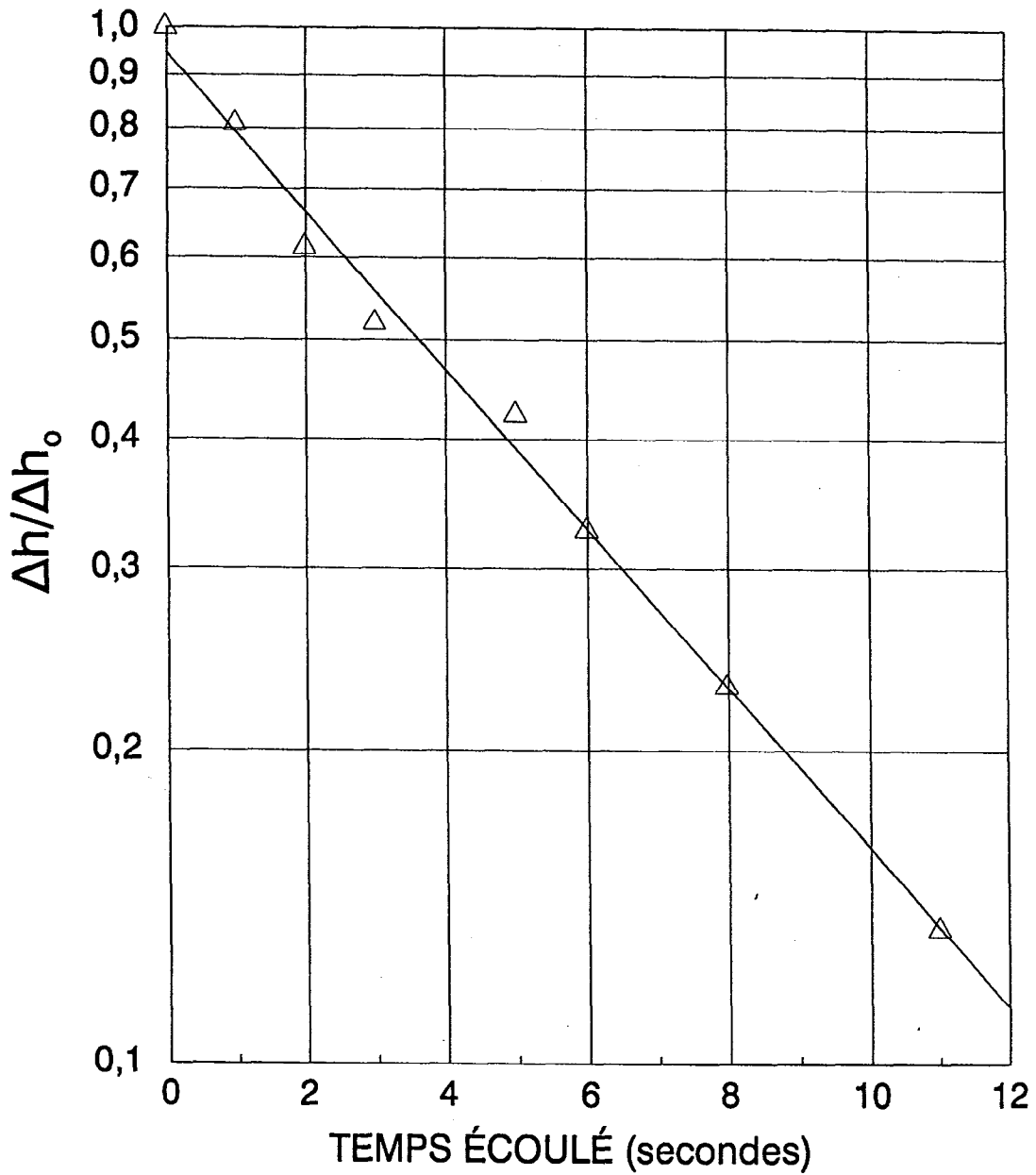
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 34,1 KPa
 $k = 3,8 \times 10^{-7}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage R3-1, profondeur = 3,15 m



Mesure de la perméabilité horizontale
contrainte verticale = 51,2 KPa
 $k = 5,0 \times 10^{-3}$ cm/s

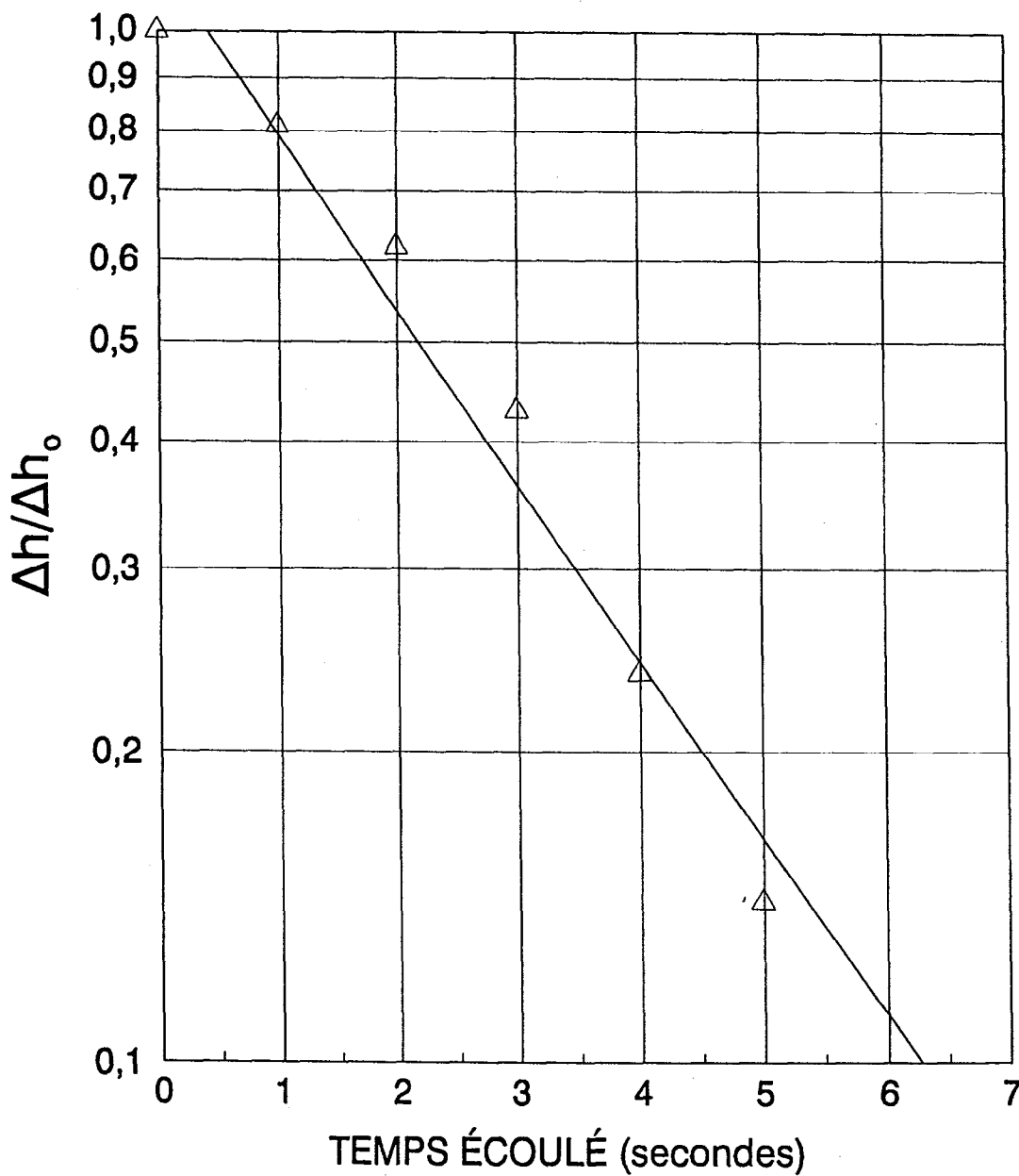
**ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE**
sondage R3-1, profondeur = 3,15 m



Mesure de la perméabilité horizontale
contrainte verticale = 76,8 KPa
 $k = 3,4 \times 10^{-3}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE

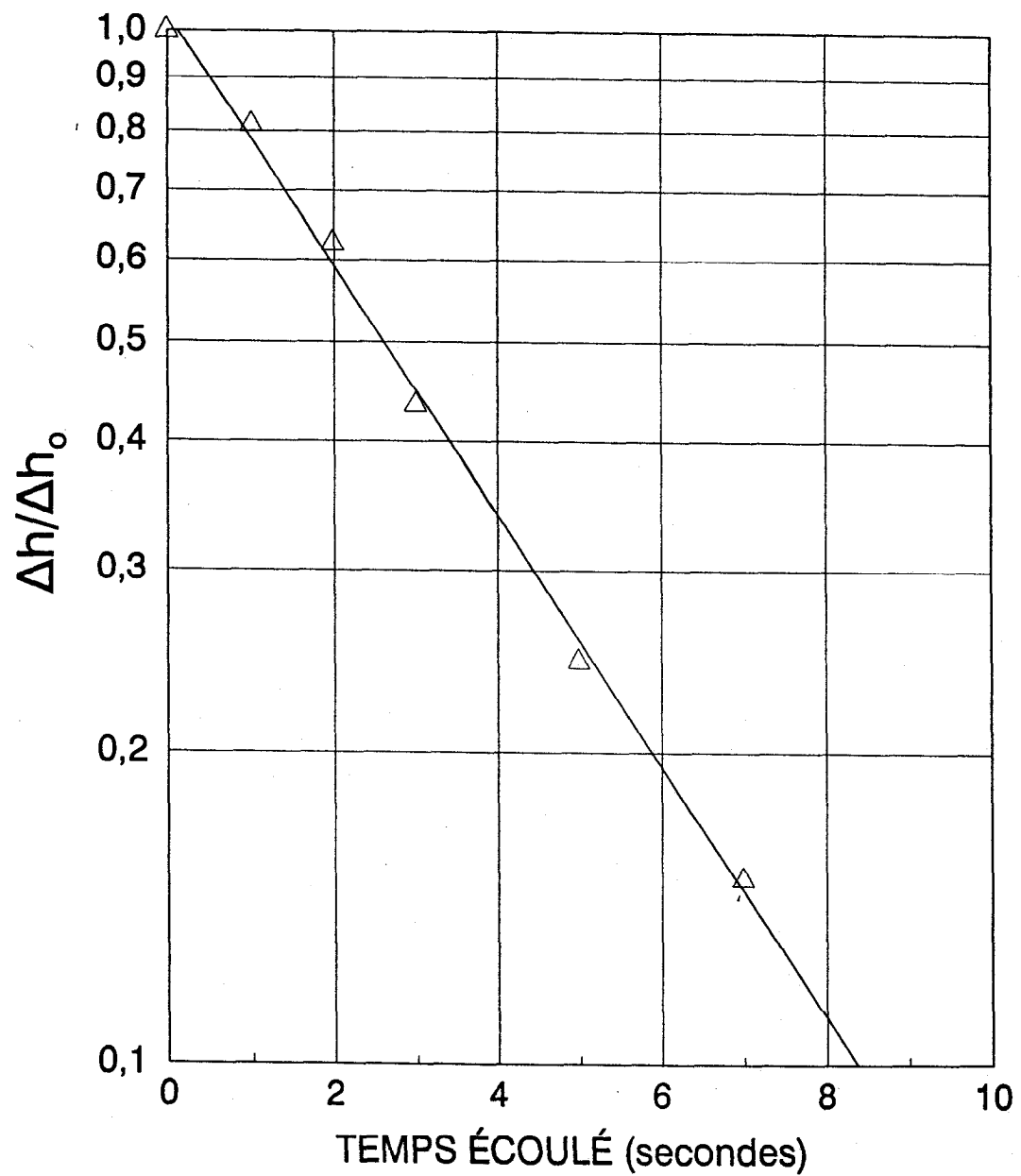
sondage R3-1, profondeur = 3,40 m



Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 76,9 KPa
 $k = 7,5 \times 10^{-3}$ cm/s

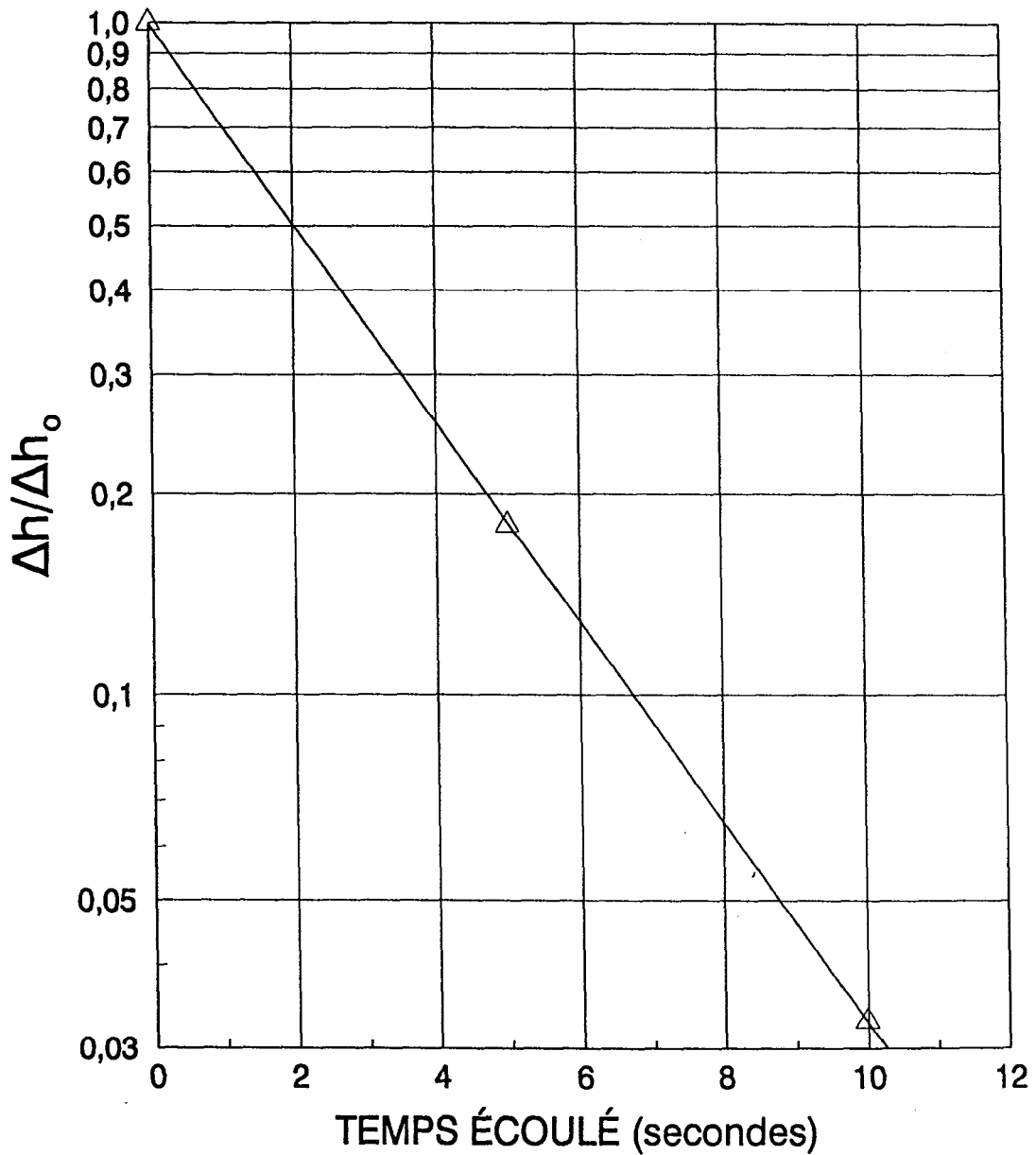
ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE

sondage R3-1, profondeur= 3,40 m



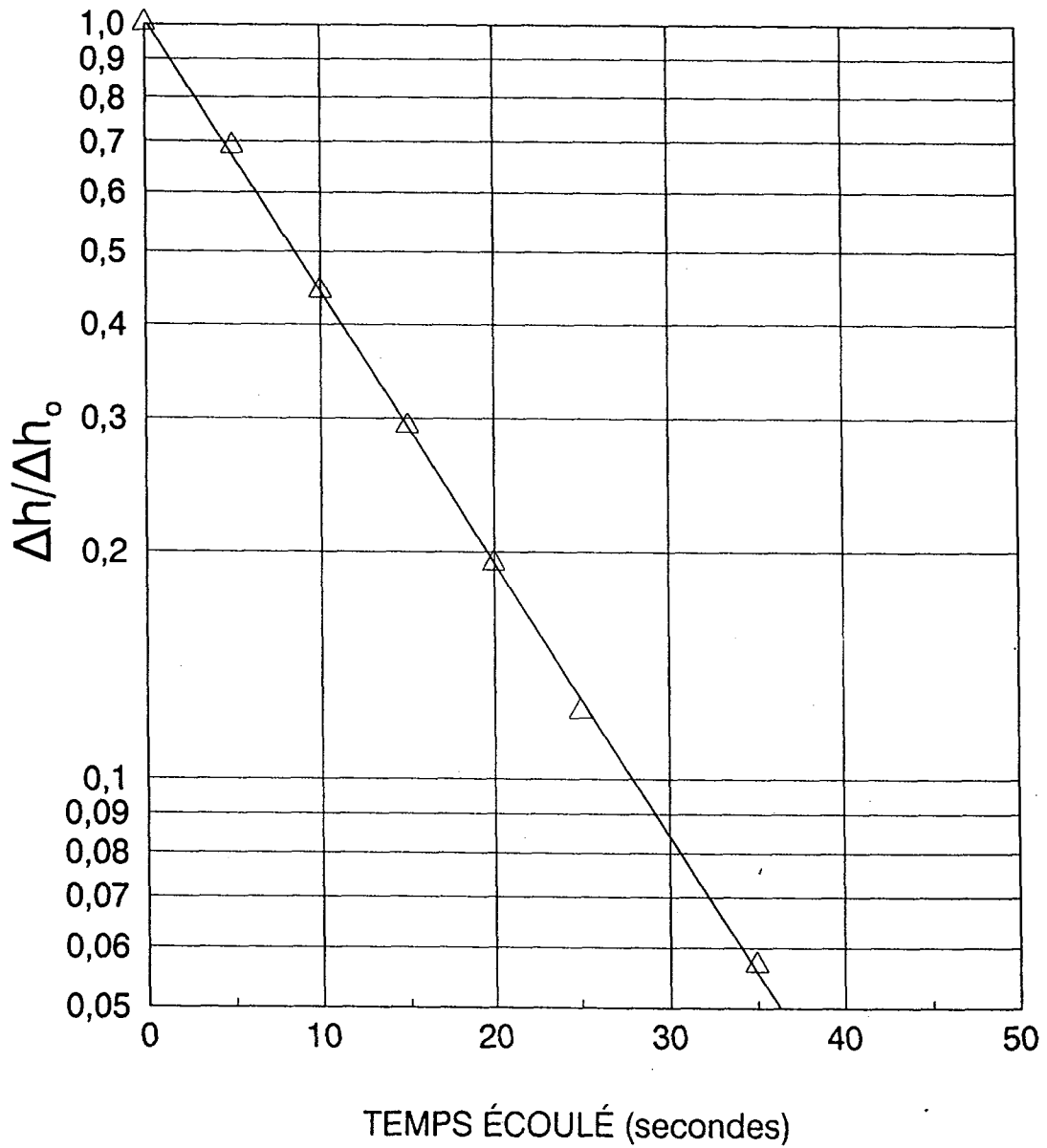
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 51,1 KPa
 $k = 5,3 \times 10^{-3}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage R3-1, profondeur = 3,50 m



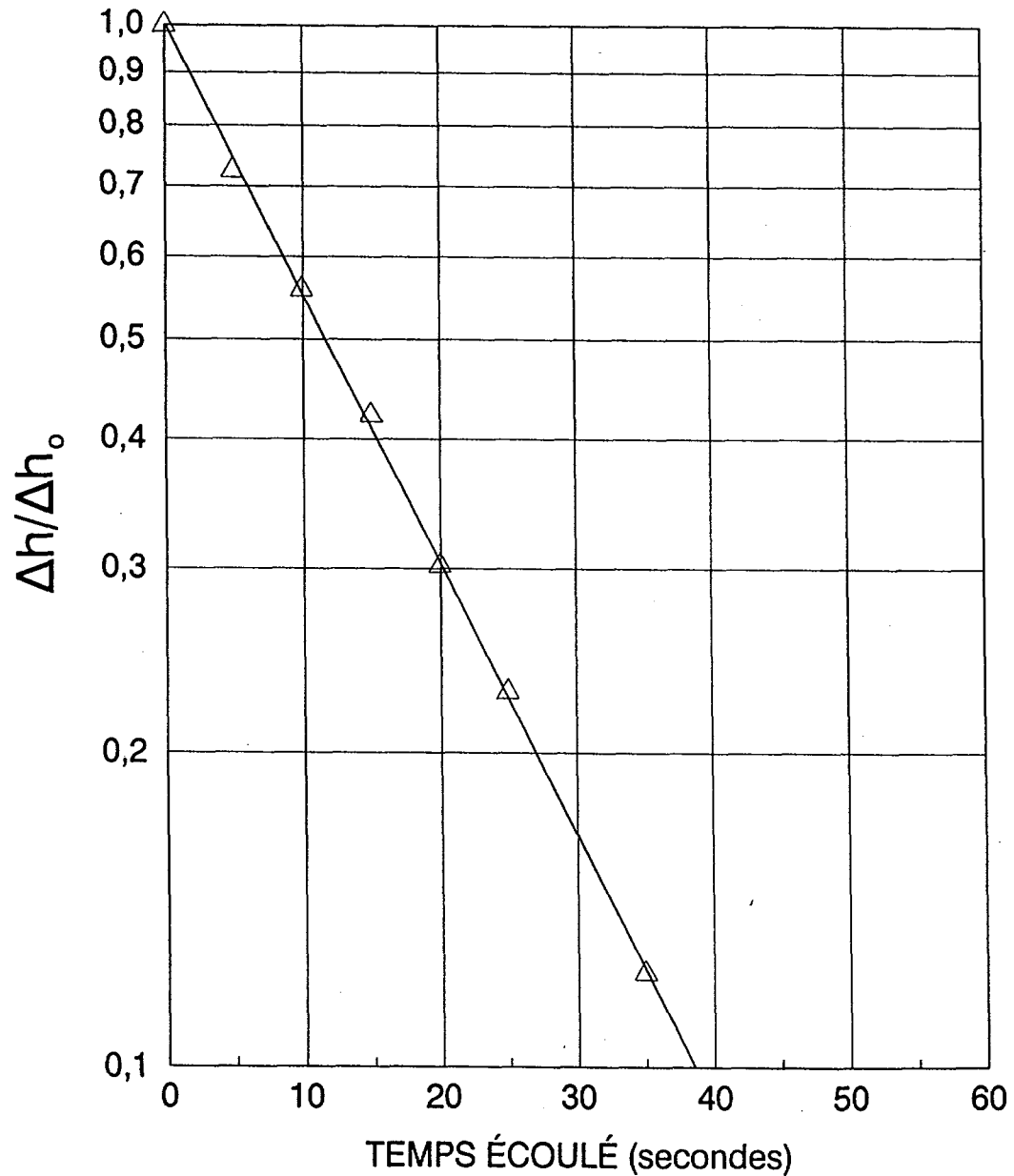
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 76,8 KPa
 $k = 6,4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage R3-1, profondeur = 3,60 m



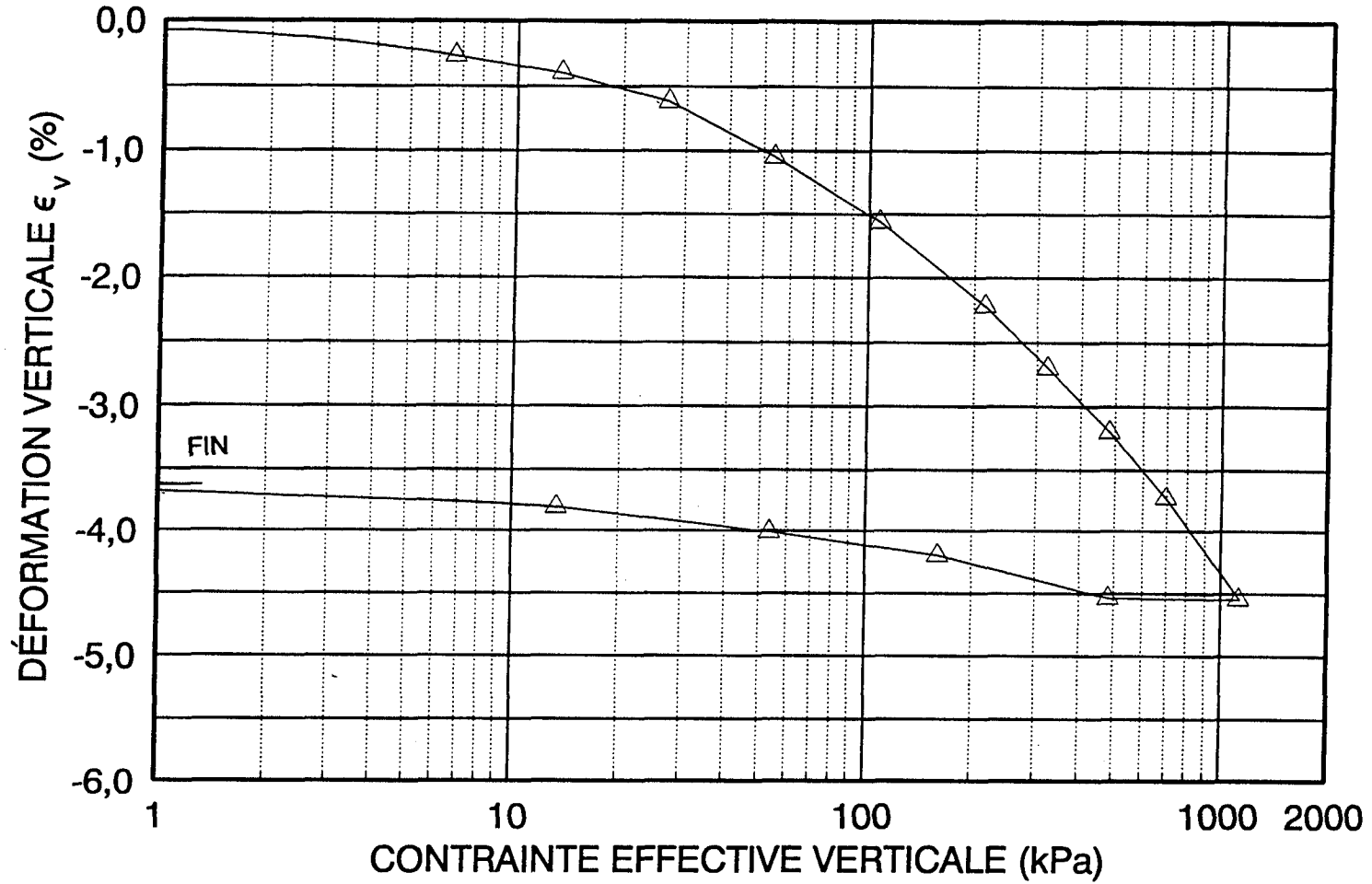
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 51,2 KPa
 $k = 1,6 \times 10^{-3}$ cm/s

ESSAI DE PERMÉABILITÉ À DIFFÉRENCE DE CHARGE
VARIABLE
sondage R3-1, profondeur= 3,60 m



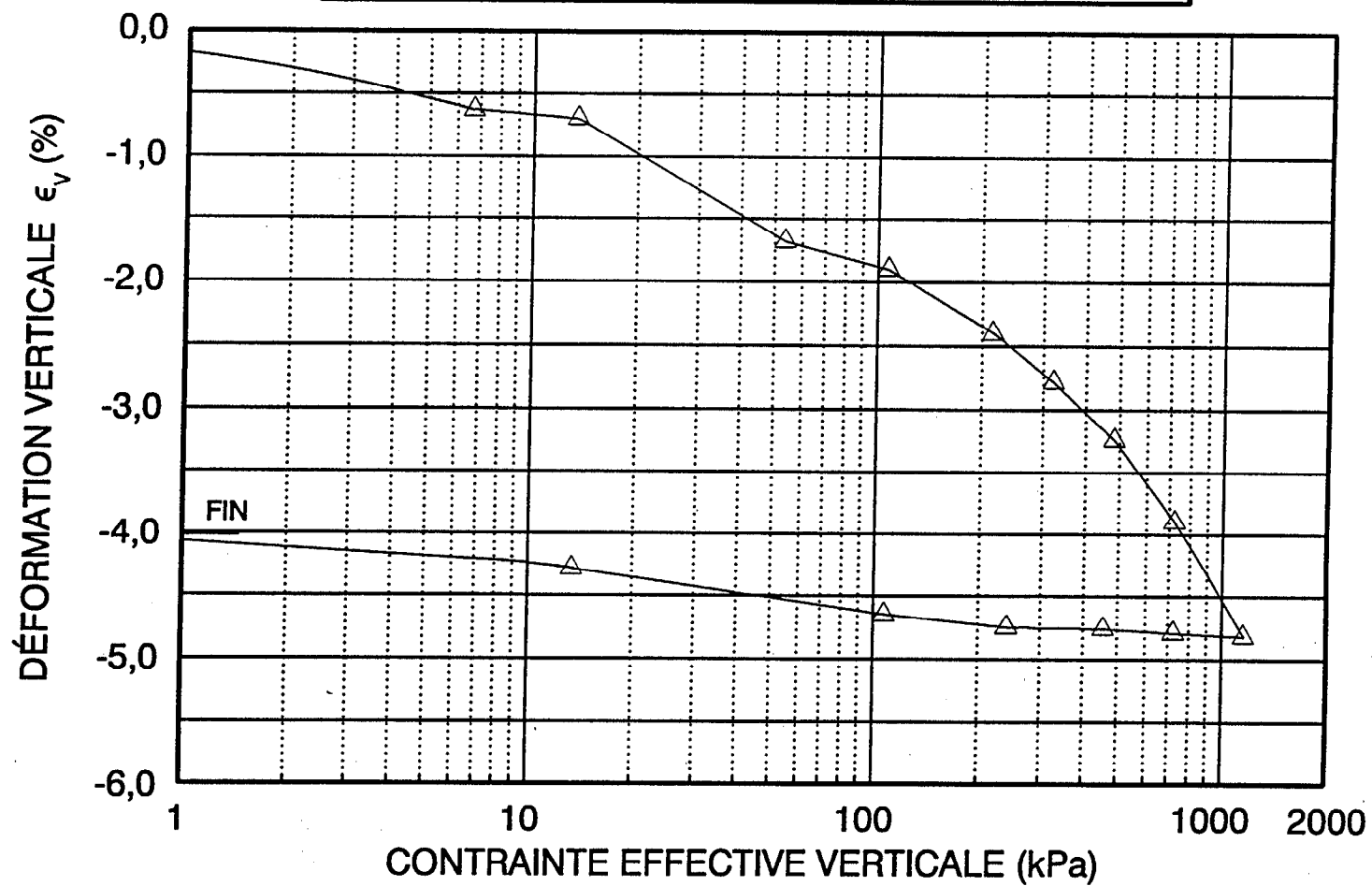
Mesure de la perméabilité verticale
contrainte verticale = 76,8 KPa
 $k = 1,2 \times 10^{-3}$ cm/s

DÉFORMATION VERTICALE EN FONCTION DE
LA CONTRAINTE EFFECTIVE VERTICALE
Site Waite-Amulet, sondage WA-15, prof.: entre 1,50 et 3,00 m



DÉFORMATION VERTICALE EN FONCTION DE LA CONTRAINTE EFFECTIVE VERTICALE

Site Waite-Amulet, sondage WA-15, prof.: de 1,50 à 3,00 m
(à 5 cm d'écart de l'échantillon précédent)



Valeurs de la densité (Gs) et du diamètre efficace (D_{10})mesurées en laboratoire pour WAITE-AMULET

FORAGE (No)	PROFONDEUR (m)	DENSITÉ Gs des solides (-)	D_{10} (mm)
R3 - 1	1.20	3.161	0.0052
	3.40	3.010	0.0080
WA - 15	4.90	3.210	0.0018
	5.15	3.298	0.011
	5.40	3.478	0.011
	5.60	3.554	0.030
	6.20	3.364	0.012
	6.30	3.408	0.010
	6.40	3.412	0.011
	6.60	3.382	0.011
	6.90	3.485	0.0083
	7.10	3.485	0.0051
7.20	3.648	0.0082	

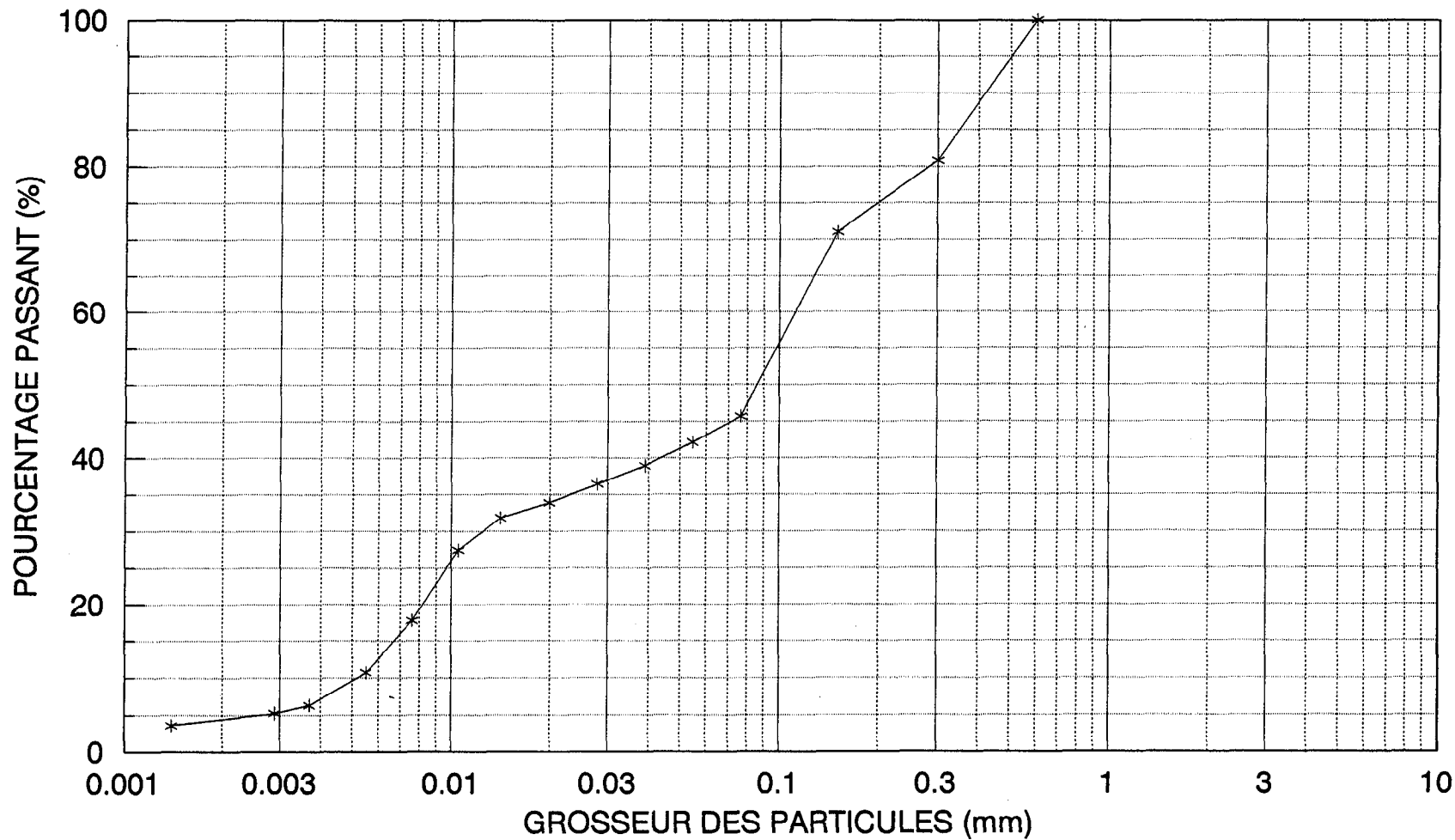
SITE WAITE-AMULET

Pourcentage de particules plus petites que 80,30,10 et 2 μm

FORAGE No	PROFONDEUR (m)	F _{80μm} (%)	F _{30μm} (%)	F _{10μm} (%)	F _{2μm} (%)
WA15	4.90	63	47	38	12
WA15	5.15	83	28	9	1
WA15	5.40	96	58	9	1
WA15	5.60	64	10	3	0
WA15	6.20	73	26	8	1
WA15	6.30	76	34	10	0
WA15	6.40	60	32	10	2
WA15	6.60	75	30	9	2
WA15	6.90	75	52	13	1
WA15	7.10	70	49	25	4
WA15	7.20	70	42	13	2
R3-1	1.20	47	37	26	4
R3-1	3.40	93	50	12	3

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

R3-1, profondeur: 1,20 m



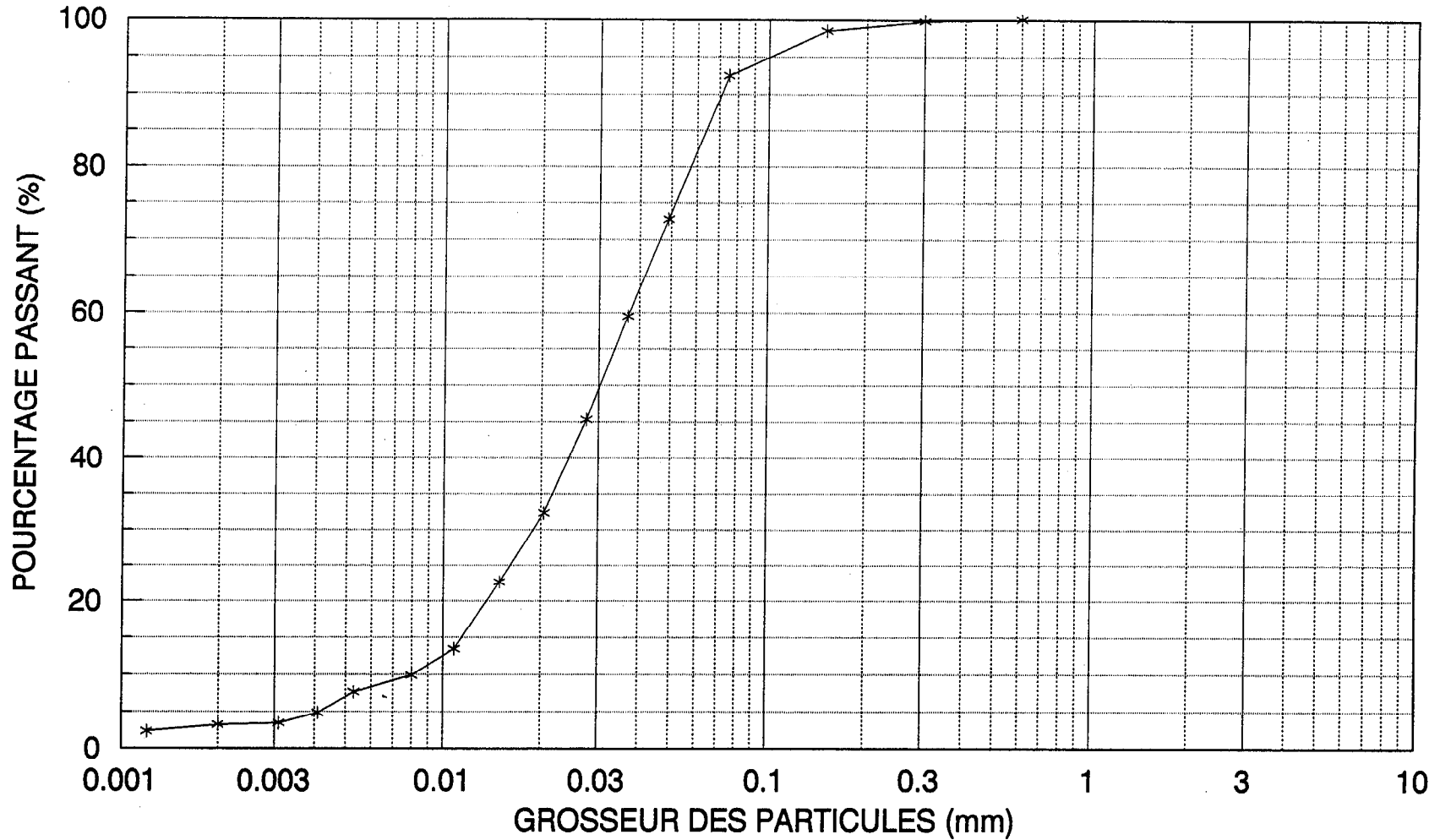
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

R3-1, profondeur: 3,40 m



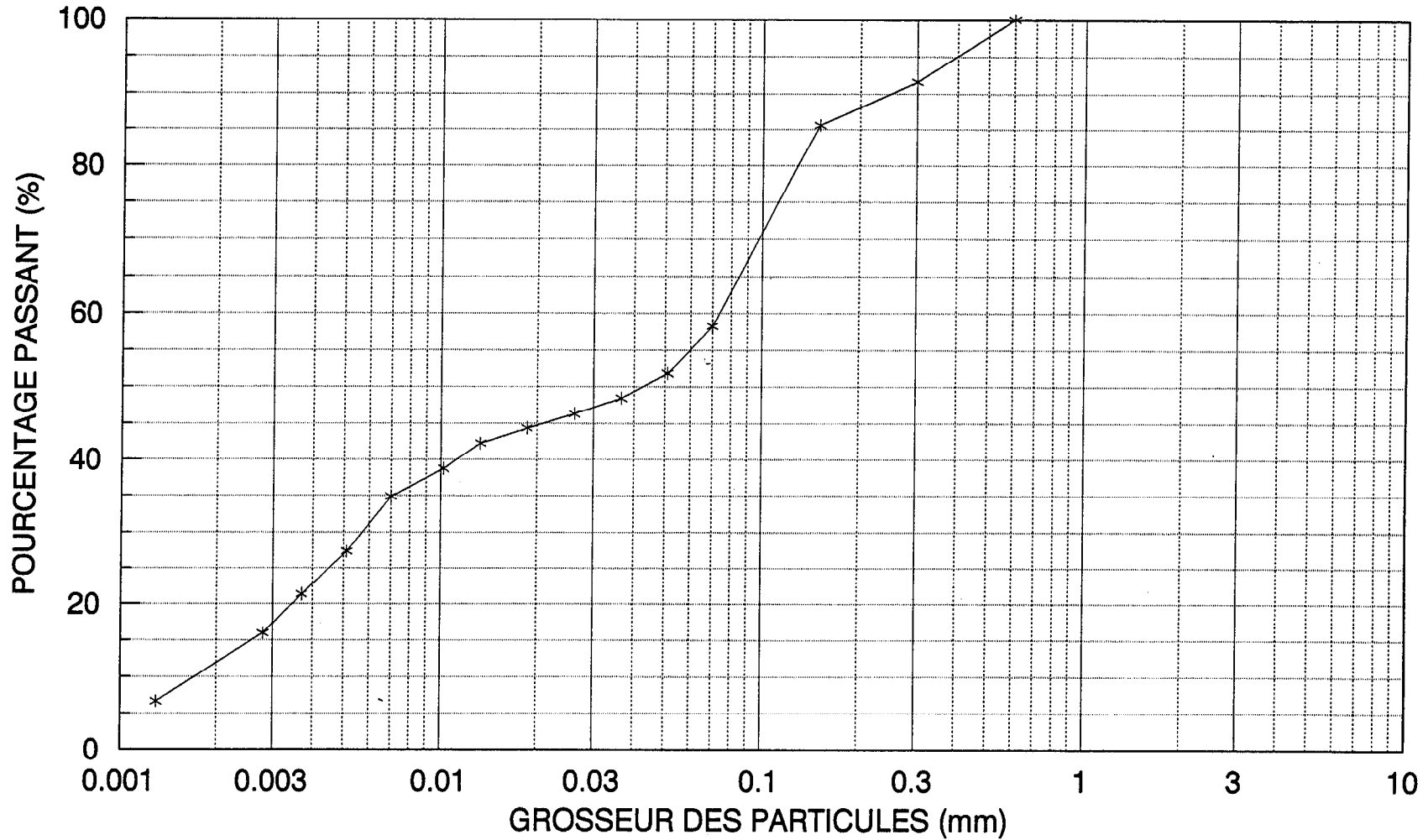
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 4,9 m



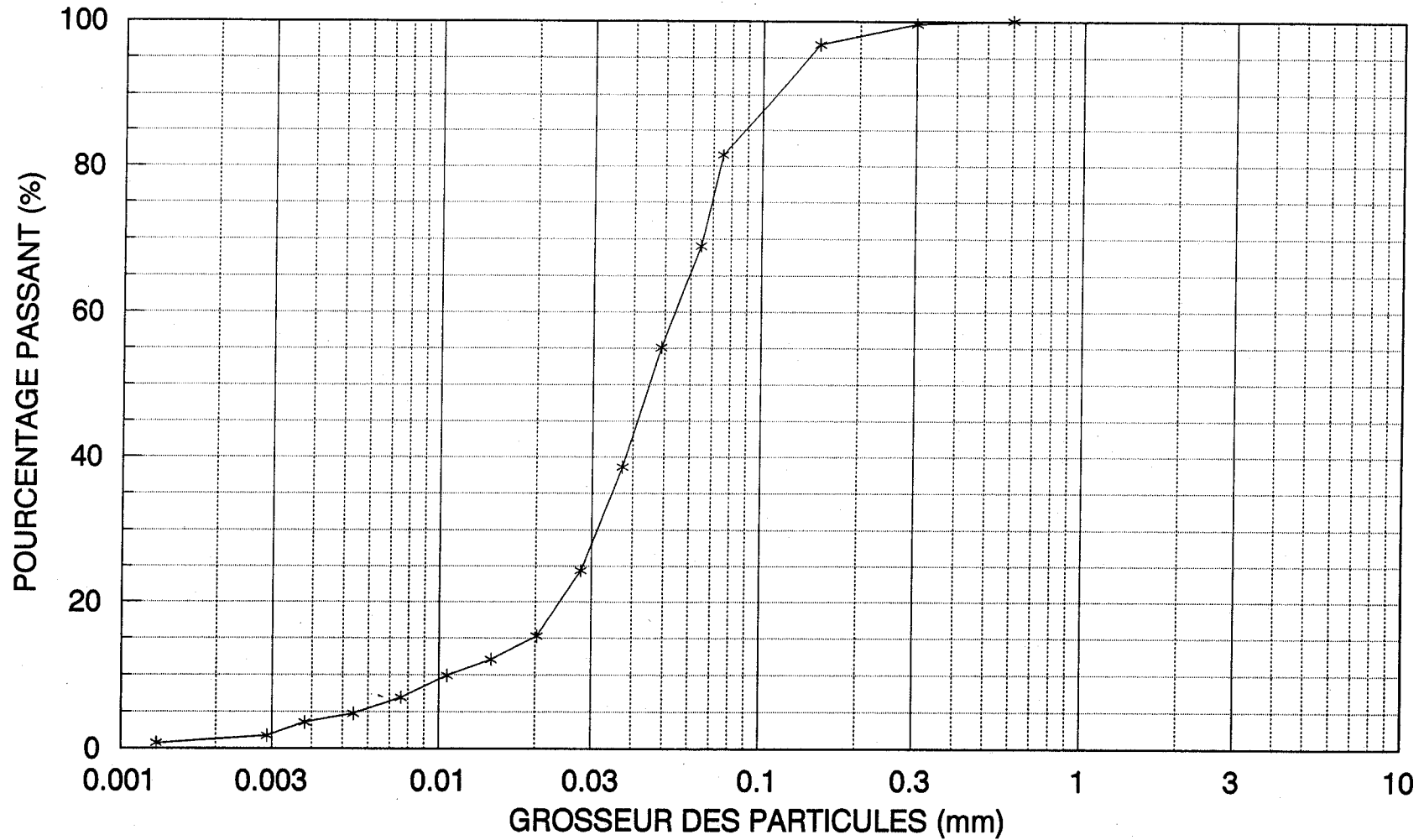
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 5,15 m



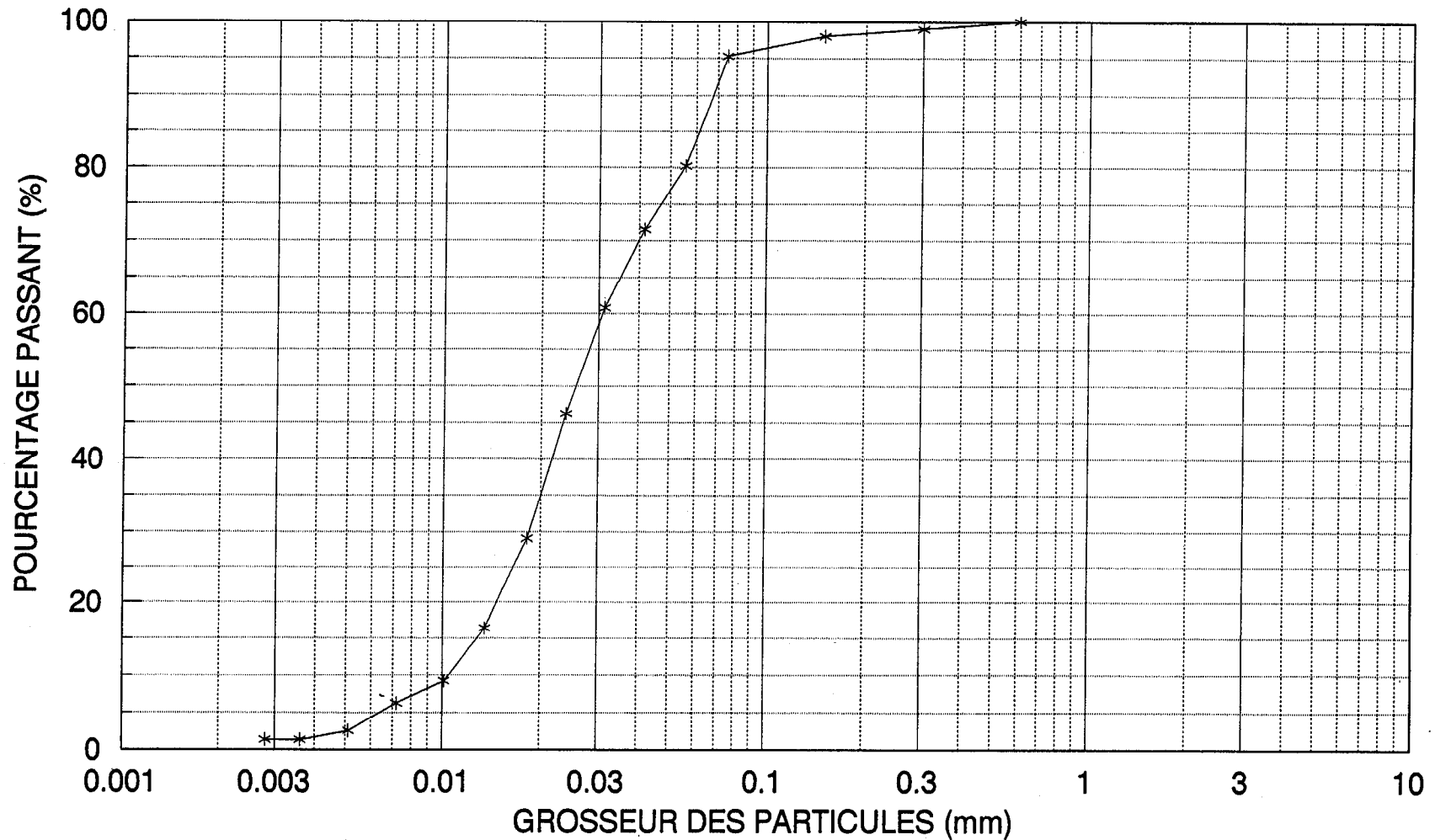
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 5,40 m



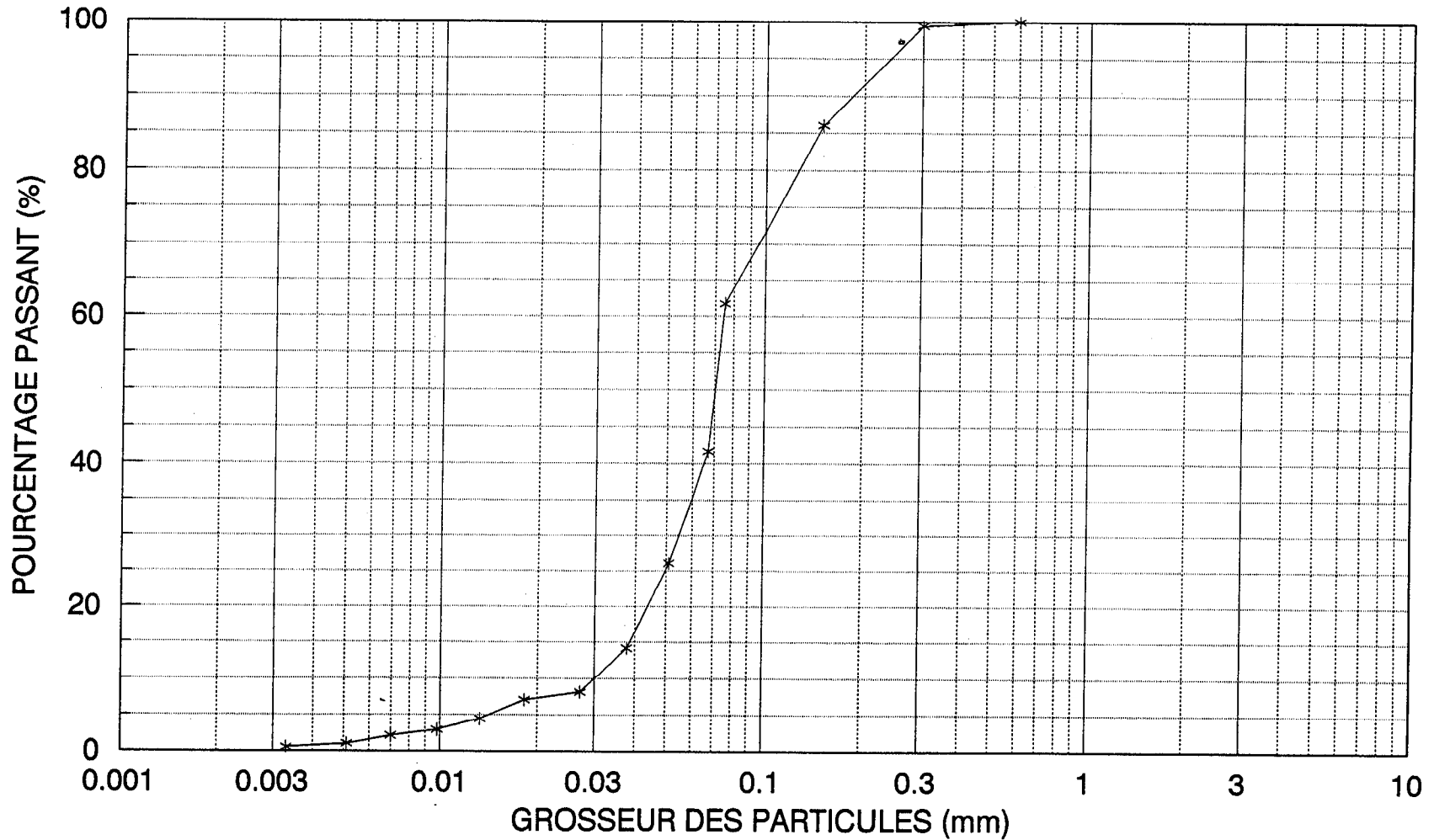
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 5,60 m



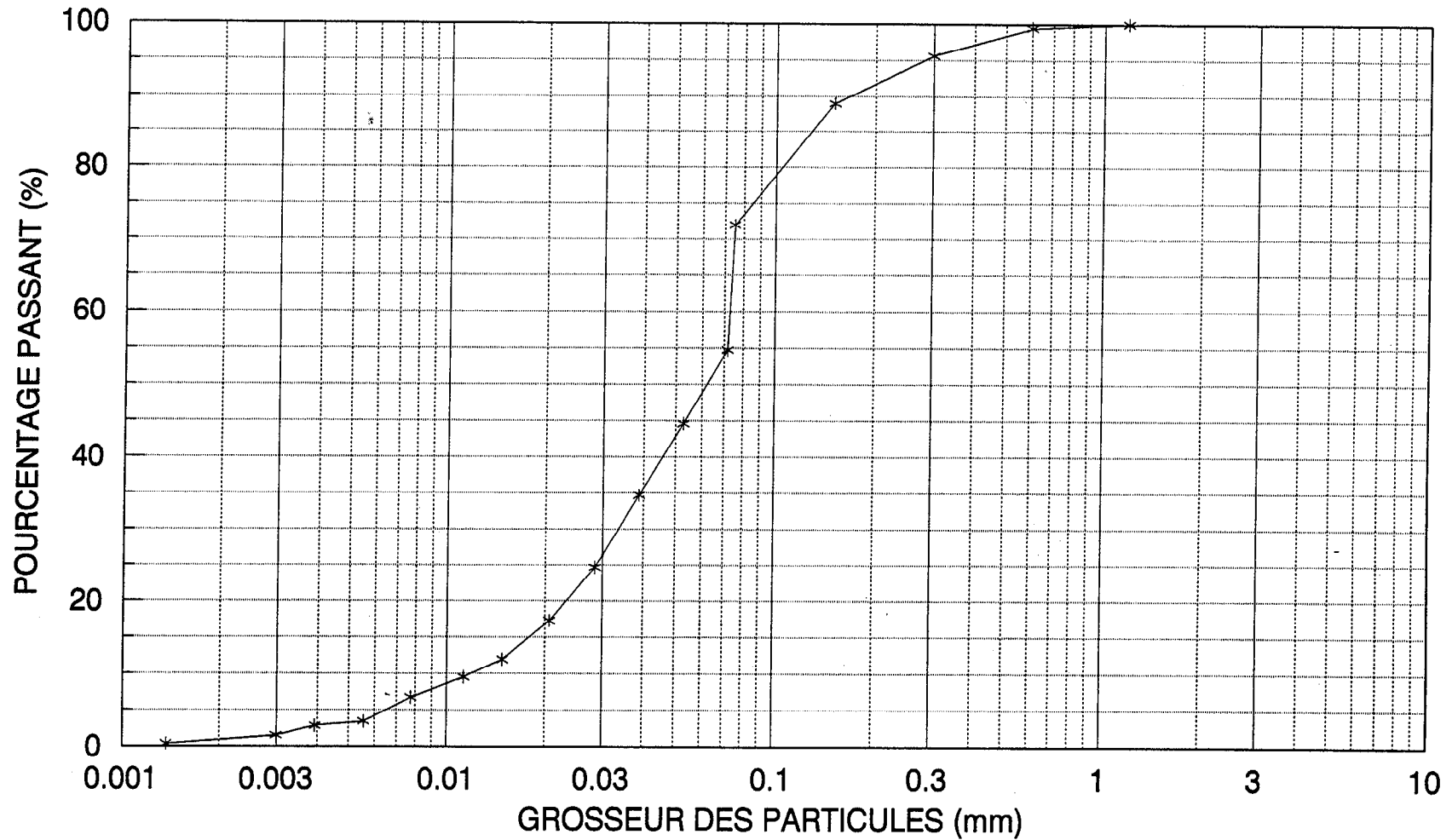
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 6,20 m



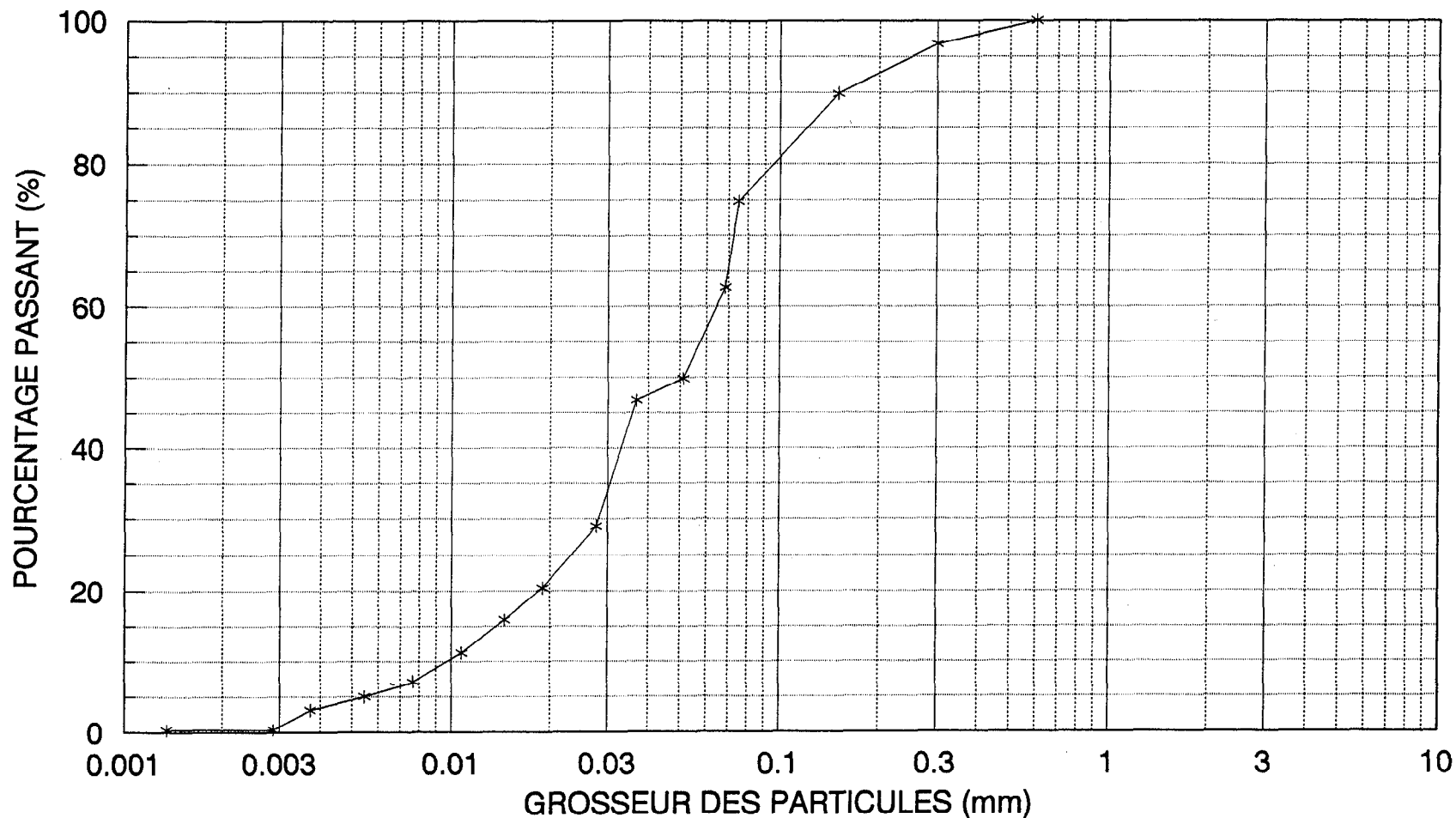
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 6,30 m



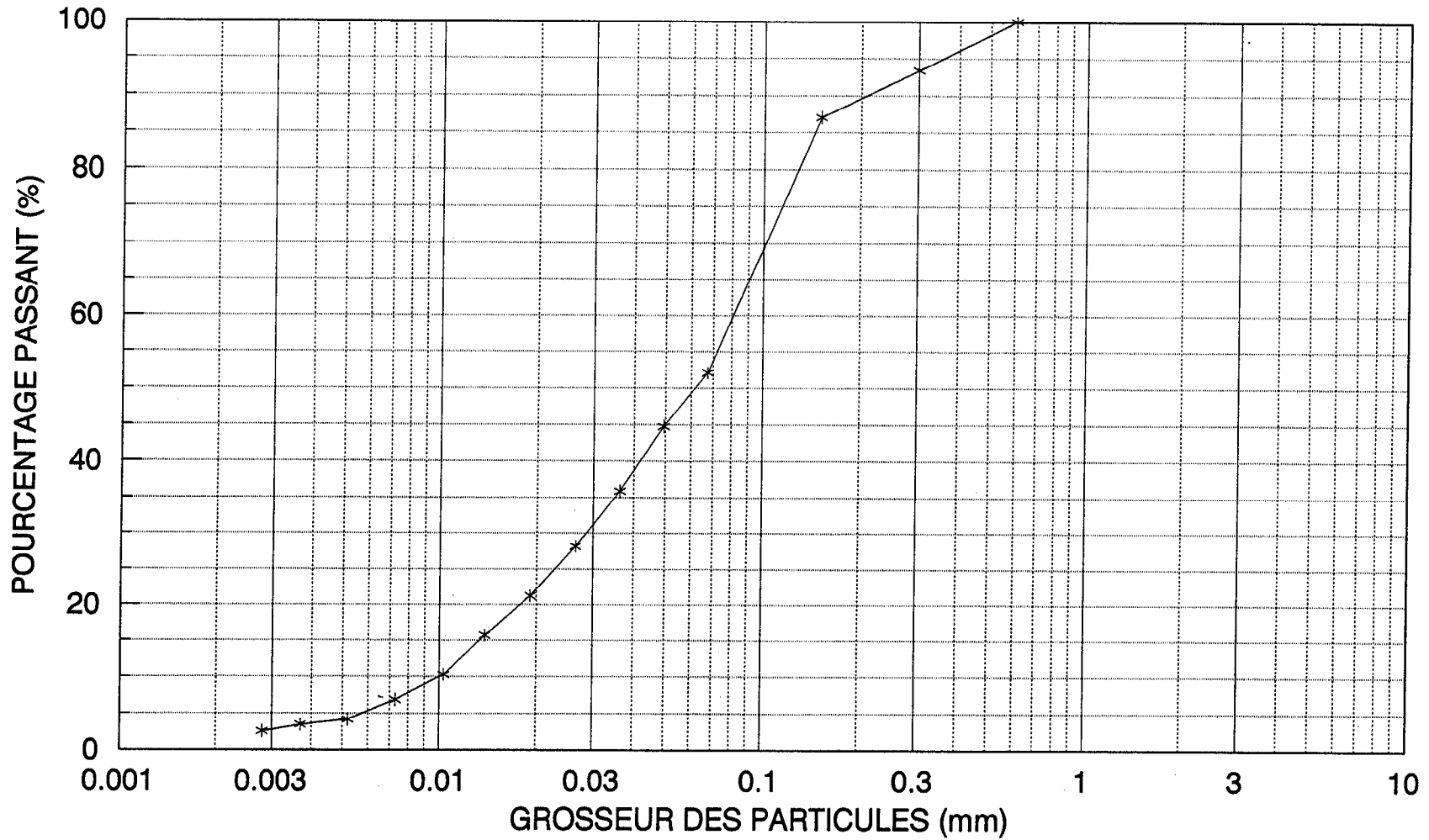
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 6,40 m



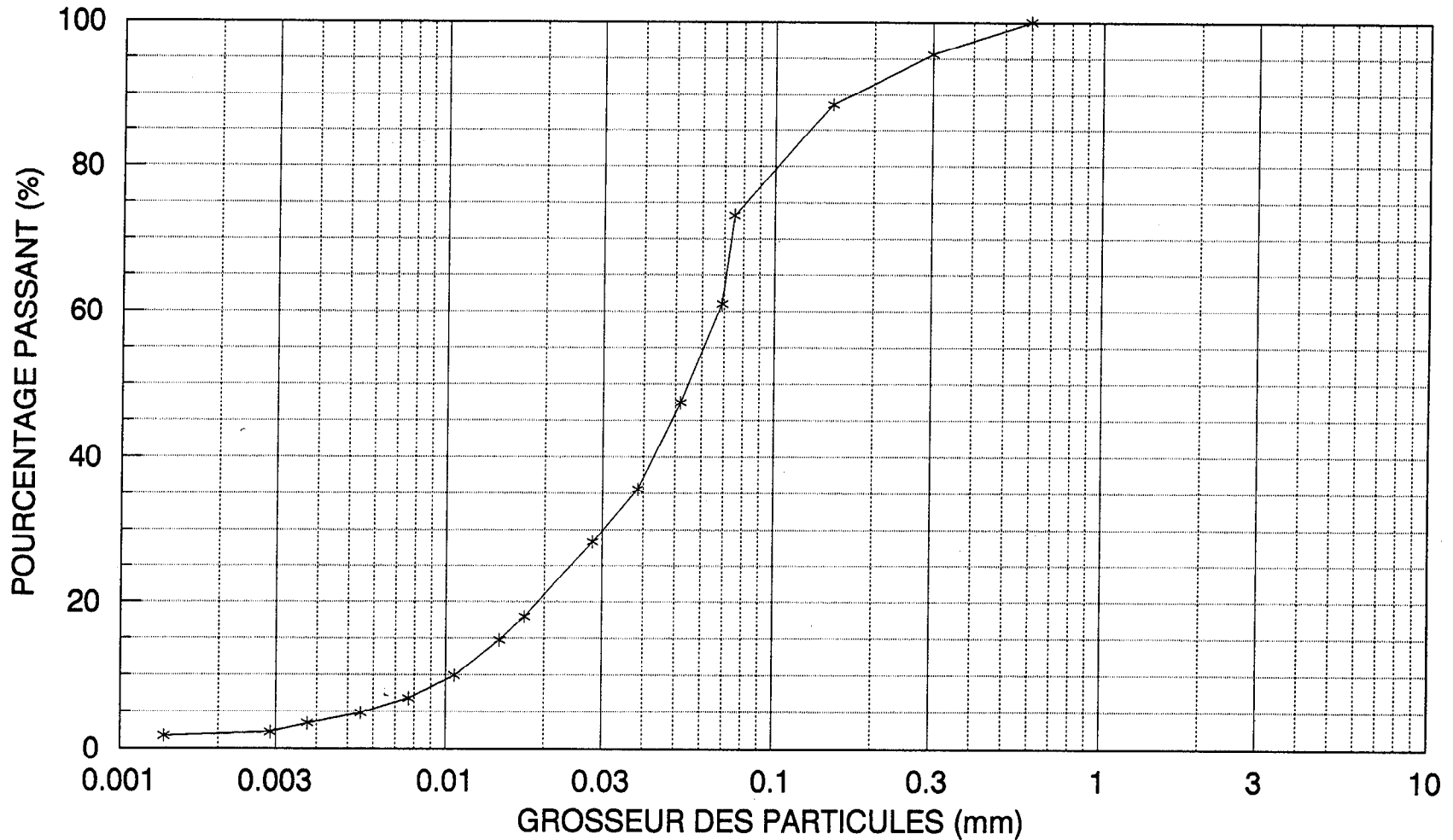
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 6,60 m



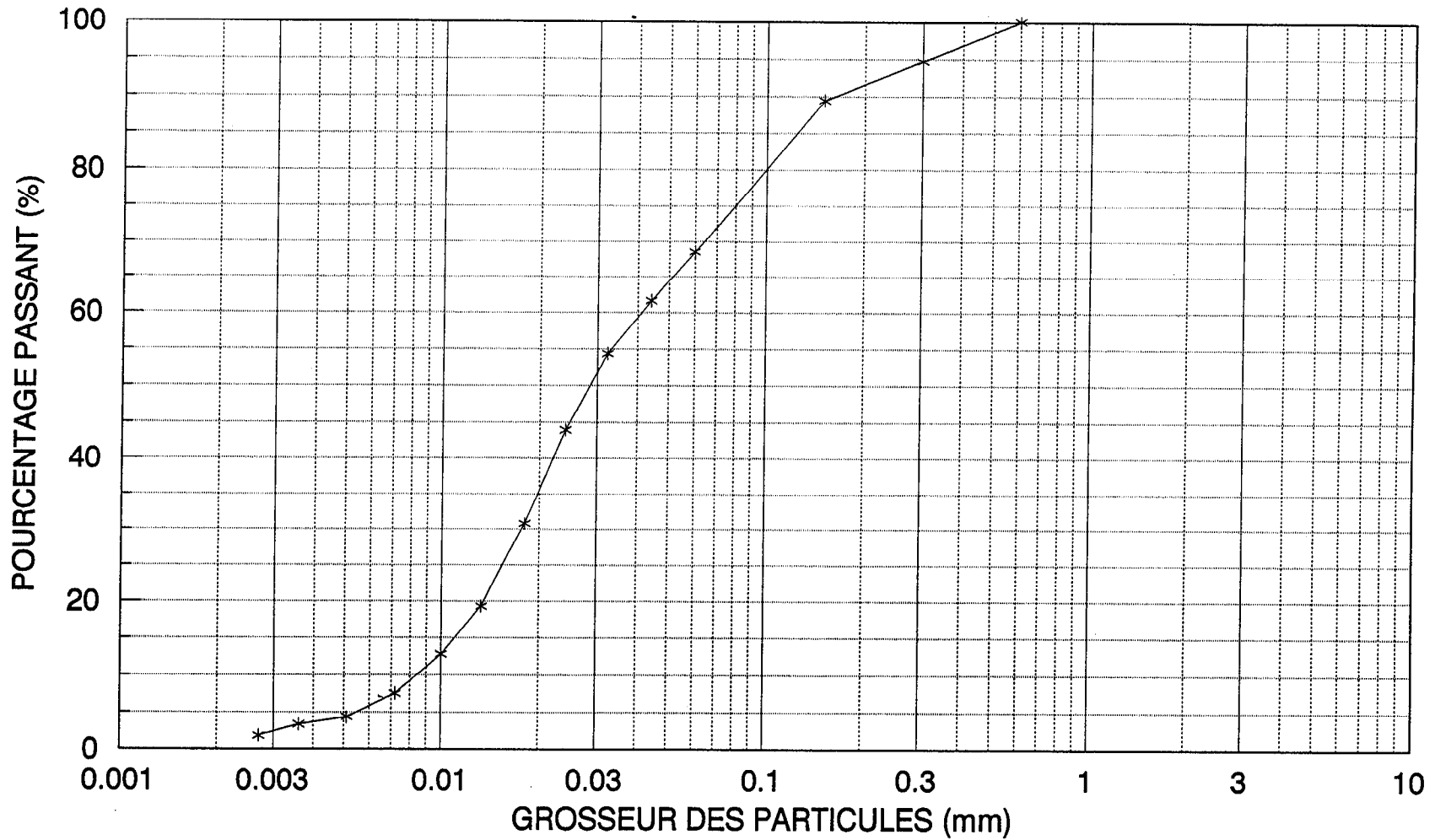
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 6,90 m



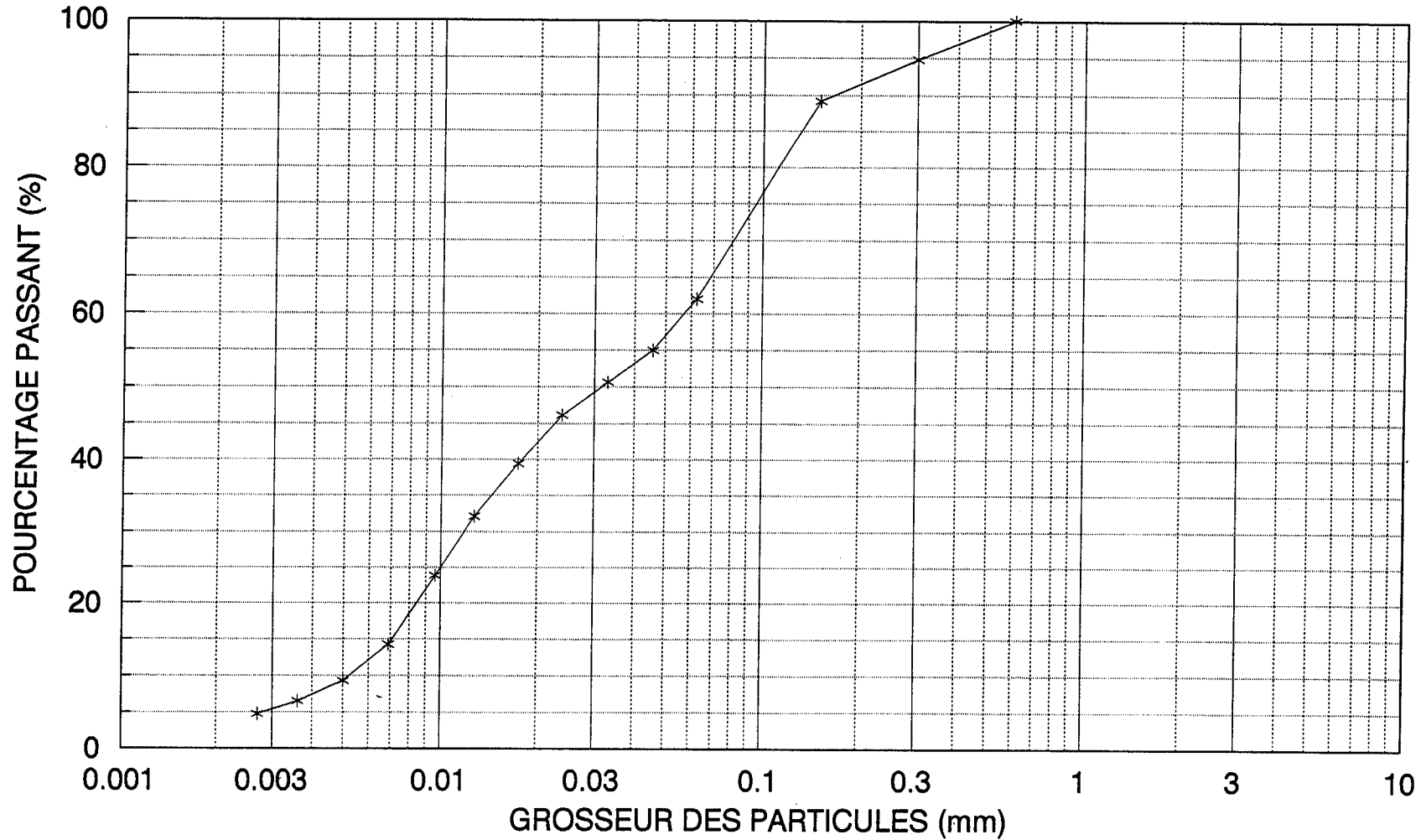
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 7,10 m



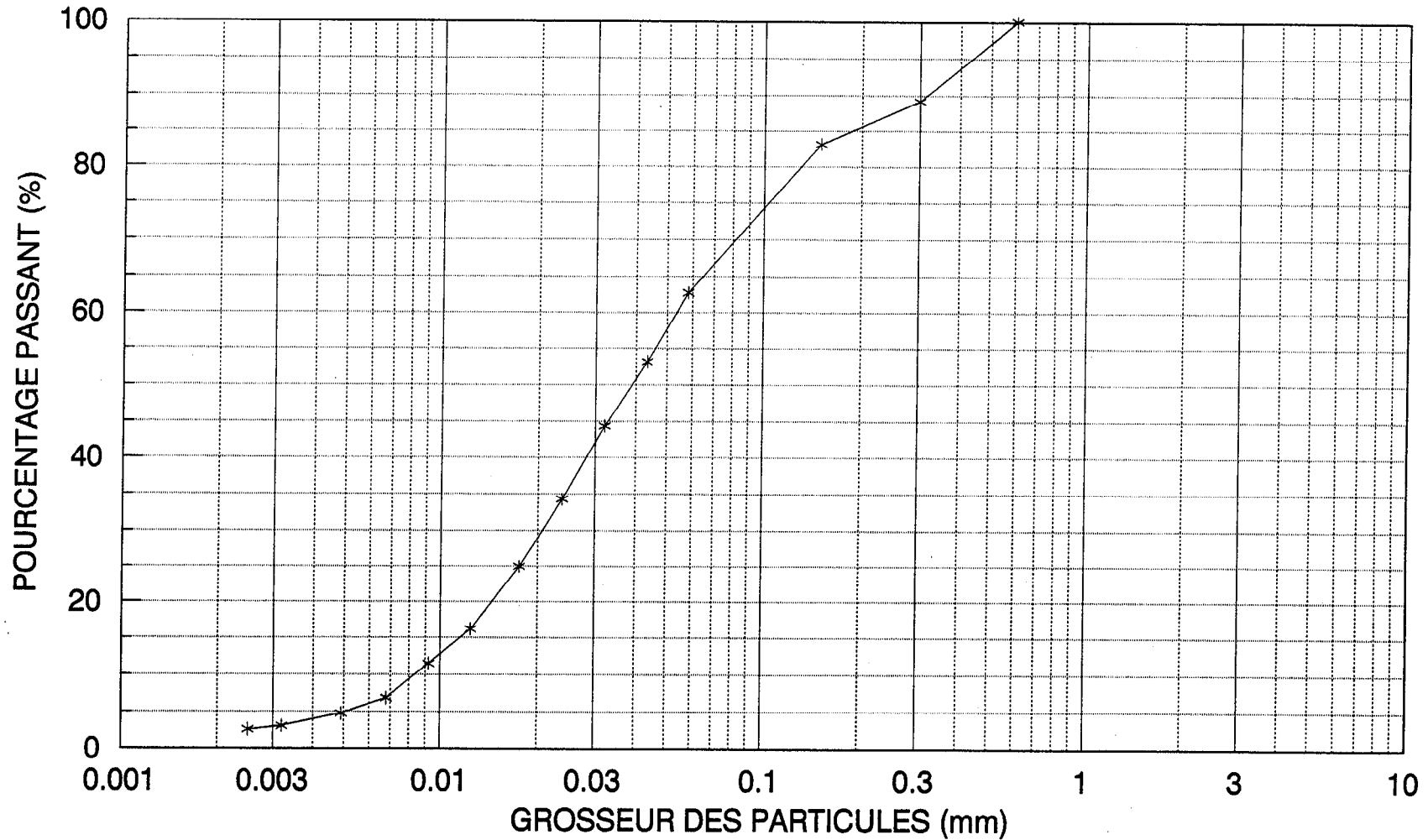
Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

COURBE GRANULOMÉTRIQUE

WA-15, profondeur: 7,20 m



Argile < 0,002 mm, 0,002 mm < silt < 0,08 mm

Sable: 0,08 mm < fin < 0,13 mm

Sable: 0,13 mm < moyen < 1,10 mm

ANNEXE B

RÉSULTATS DES ESSAIS SUR LE TERRAIN

Relevés effectués dans les piézomètres a Waite-Amulet
Mois de Mai et Juin / 1991.

PIÉZO No.	Prof. (m) indiquée (anneau)	pH (10-14)-06-91	Cond. élect. (μ mho/cm)	PROF.(m) EAU 10-14 Juin /91	PROF.(m) EAU 10 Mai /91	Hauteur Tuyau p/r sol(m)
WA 1-1	7.9	6.7	1130	2.36	2.27	1.18
WA 1-2	2.4	3.7	910	1.37	1.24	0.55
WA 2-1	5.9	7.5		3.34	3.07	0.93
WA 2-2	1.5	3.5		1.39	1.08	0.76
WA 2-3	4.5	6.0		2.70	brisé	brisé
WA 2-4	3.0	6.5		3.09	2.79	0.89
WA 2-5	7.8	6.7		4.34	4.06	0.91
WA 3-1	5.0	6.3		2.62	2.08	1.12
WA 3-2	2.0	4.1		2.41	1.65	1.18
WA 4-1	2.7				1.74	1.10
WA 4-2	1.4				1.78	0.72
WA 4-3					1.95	0.71
WA 4-4					1.85	0.73
WA 5-1	4.9	6.4		2.45	2.45	1.33
WA 5-2	1.7	6.5		2.53	2.45	1.35
WA 6-1	2.1				1.34	0.89
WA 7-1	2.4				1.40	0.64
WA 8-1	5.9	6.8		2.24	2.04	1.69
WA 8-2	1.5	6.7		1.95	1.58	1.53
WA 9-1	6.6	7.0		2.98	3.23	1.08
WA 9-2	1.5	5.9		2.23	2.10	1.06
WA 9-3	5.0	7.3		2.78	3.22	1.07
WA 9-4	3.5	7.5		2.45	2.58	1.025
WA 9-5	2.5	7.4		2.56	1.73	1.08
WA 9-6	7.9	7.3		3.62	3.18	1.20
WA 9-7					3.10	1.10
WA 10-1	7.3	5.9		2.15	1.85	0.75
WA 10-2	1.5	5.8		1.81	2.22	0.77
WA 11-1	8.2	8.2		4.57	2.54	0.94

PIÉZO No	Prof.(m) indiquée (anneau)	pH (10-14)-06-91	Cond.élec. (μ mho/cm)	PROF.(m) EAU 10-14 Juin / 91	PROF.(m) EAU 10 Mai / 91	Hauteur Tuyau p/r sol(m)
WA 11-2	5.2	5.2		3.11	3.00	0.95
WA 11-3	3.0	3.0		2.69	3.59	0.99
WA 14-1	1.5	4.8	110	1.87	1.83	1.59
WA 15-1	6.4	6.2		5.58		1.21
WA 15-2	3.7	6.1		4.56	brisé	brisé
WA 15-3					4.74	0.74
WA 15-4					5.15	0.87
WA 16-1	6.1			7.13	7.26	1.45
WA 17-1	7.6	6.7	1650	3.60	3.67	0.77
WA 17-2	6.0	6.7	660	3.46	3.53	0.75
WA 17-3	4.5	3.2	1080	3.41	3.47	0.74
WA 17-4	3.0	3.6	850	3.43	3.49	0.81
WA 17-5	5.54	5.8	850	3.45	3.52	0.70
WA 17-6	14.6	6.4	220	7.32		0.73
WA 18-1	14.9	7.2	487	8.21	8.23	1.04
WA 18-2	11.0	3.7	1240	5.85	6.08	0.97
WA 18-3	9.5	3.2	1650	5.85	6.04	0.95
WA 18-4	7.9	6.5	1520	5.83	6.08	1.07
WA 18-5	6.4	6.7	1050	5.79	6.07	1.09
WA 20-1	4.9			3.08	3.18	1.17
WA 20-2	2.4			3.12	3.14	1.24
WA 21-1	4.9	4.0		3.30	3.09	1.03
WA 21-2	2.9	3.8		3.08	2.97	0.88
WA 22-1	11.0	6.8		5.65	5.83	0.60
WA 22-2	9.5	5.8		5.64	5.82	0.59
WA 22-3	7.9	3.8		5.54	5.72	0.48
WA 22-4	6.4	3.7		5.66	5.83	0.60
WA 24-1	11.0	8.6	300	4.0	4.16	0.77
WA 24-2	9.1	7.7	980	3.79	3.96	0.74

PIÉZO No	Prof.(m) indiquée (anneau)	pH (10-14)-06-91	Cond.élect. (μ mho/cm)	PROF.(m) EAU 10-14 Juin / 91	PROF.(m) EAU 10 Mai / 91	Hauteur Tuyau p/r sol(m)
WA 24-3	7.8	7.5	1770	3.35	3.50	0.47
WA 24-4	6.5	6.5	1640	3.23	3.29	0.60
WA 24-5	4.9	4.9	860	2.84	2.85	0.45
WA 25-1	6.4	6.4		5.80	5.65	0.86
WA 25-2	4.8	4.8		5.43	5.61	0.88
WA 26-1	11.1			5.96	6.03	0.91
WA 26-2	9.1	3.4		4.92	4.99	0.0
WA 27-1	9.4	4.3		2.73	3.65	0.82
WA 27-2	4.6	6.2		2.88	2.70	0.78
WA 33-1	9.03			4.58	4.71	0.80
WA 33-2	5.57			4.55	4.66	1.01
WA 33-3	4.04			brisé	brisé	brisé
WA 34-1	8.20			6.59	6.68	0.79
WA 34-2	4.73			brisé	brisé	brisé
WA 35-1					1.02	0.71
WA 24A-1	2.70	5.9		1.73		1.20
WA 24A-2	1.40	3.6		1.75		0.75
WA 24A-3	2.30	5.7		1.90		0.72
WA 24A-4	3.0	5.6		1.90		0.72
WA 26-4	5.2	3.8		5.17	4.26	0.92

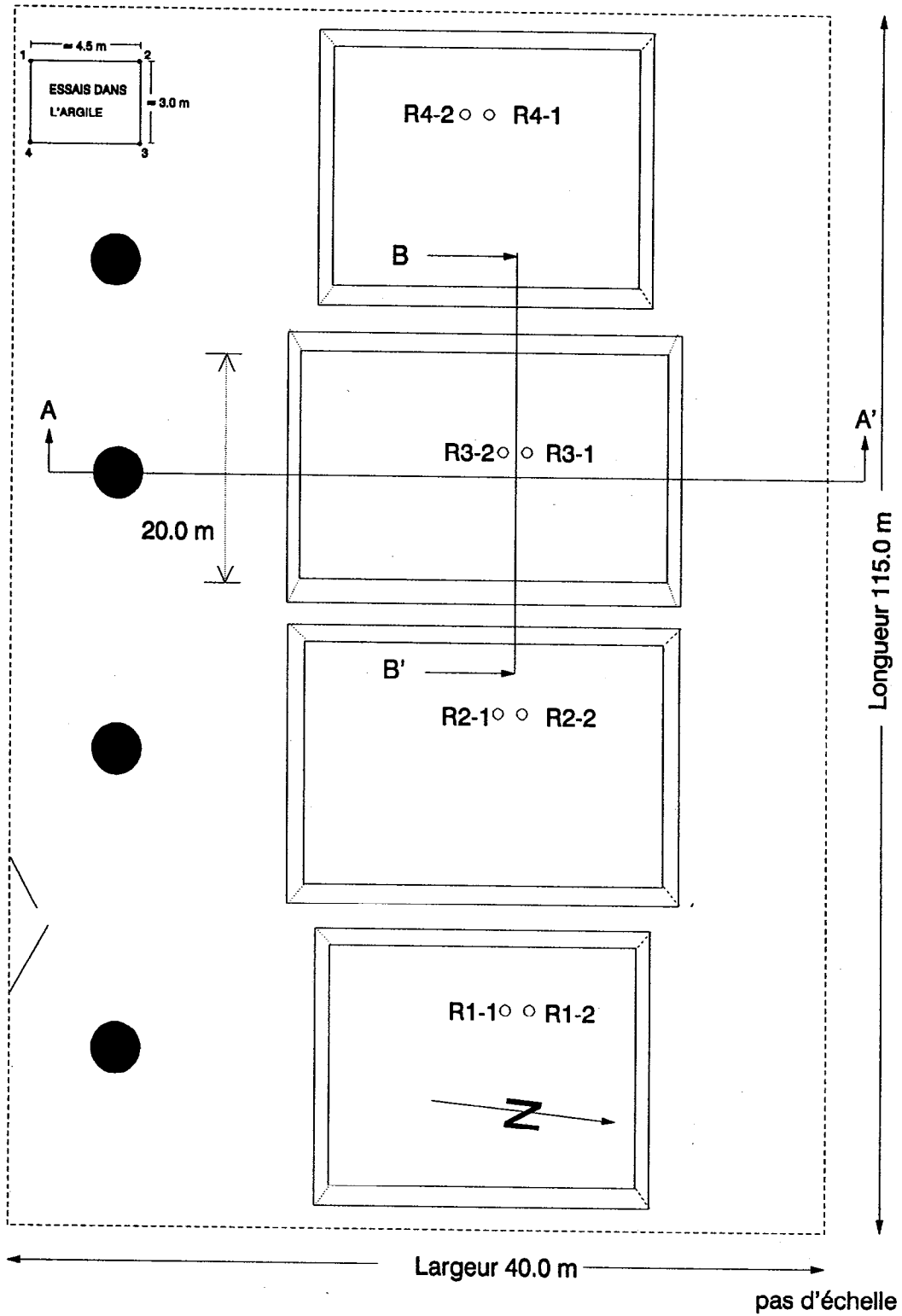
Mesures de pH et du potentiel d'oxydo-réduction
pour quelques échantillons d'eau interstitielle
Site Waite-Amulet

PIÉZO No	pH (mesuré sur le terrain)	pH ° (mesuré au laboratoire)	potentiel d'oxydo- réduction (mV) *
WA 18-2	3.7	4.4	136
WA 18-3	3.2	4.7	94
WA 24-1	8.6	7.3/6.7	-120/-150
WA 24A-3	5.7	3.7	210
WA 24A-4	5.6	3.9	163
WA 27-1	4.3	5.3	83
WA 27-2	6.2	5.7	-40
R1-1	—	2.7	433
R1-2	—	3.5	248
R2-1	6.4/6.8	6.4/5.5	165/49
R2-2	6.8/7.1	6.3	149
R3-1	6.6/6.9	6.6/6.9	118/135
R3-2	4.5	2.6	498
R4-1	6.9/7.2	5.7	175
R4-2	3.8	2.6/2.6	350/382
ST-1	—	5.9	260

* Ces valeurs ont été mesurées après échantillonnage d'eau interstitielle contenue dans les piézomètres. Ces analyses ont été effectuées par la suite à l'École Polytechnique de Montréal. Ce délai de mesure a pu entraîner des variations d'ordre physico-chimique dans les échantillons.

Site Waite-Amulet

Schéma des parcelles instrumentées pour les essais de couvertures sèches

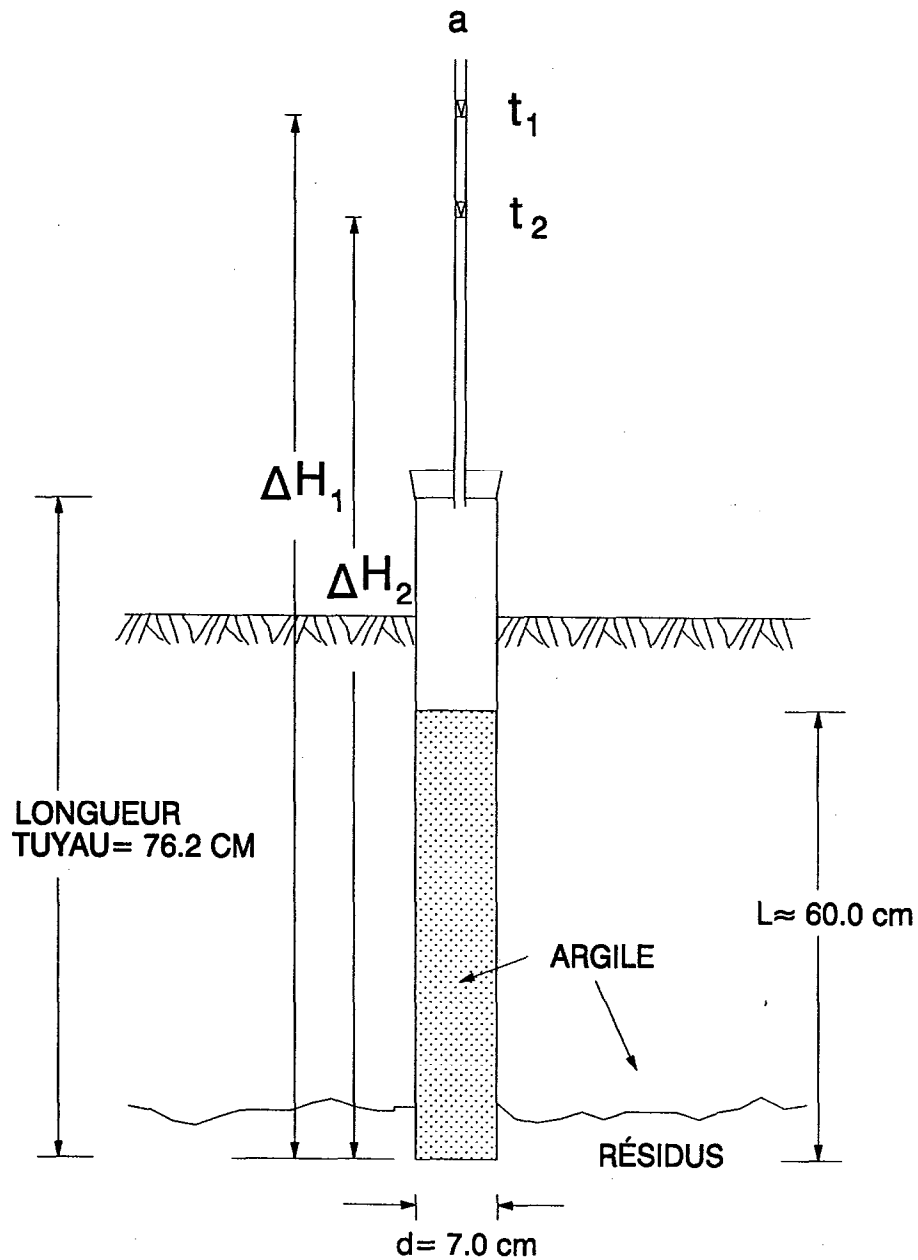


SITE WAITE-AMULET

RELEVÉS EFFECTUÉS DANS LES PIÉZOMÈTRES DES CELLULES
INSTRUMENTÉES

PIÉZO No	Prof.(m) indiquée (anneau)	pH Juin / 91	Cond.élec. (μ mho/cm)	PROF.(m) EAU Juin / 91	Hauteur Tuyau p/r sol
R1-1	3.82			2.27	1.13
R1-2	1.86			2.42	1.18
R2-1	3.28	6.4/6.8	640	2.28	0.02
R2-2	5.23	6.8/7.1		2.53	0.06
R3-1	5.12	6.6/6.9	1990	2.51	0.23
R3-2	3.12	4.5	1340	2.24	0.21
R4-1	4.36	6.9/7.2	1990	1.85	0.38
R4-2	2.45	3.8	1400	1.61	0.29

SITE WAITE-AMULET

ILLUSTRATION DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ
DANS LA COUVERTURE D'ARGILE

$$k = \frac{a}{A} \frac{L}{t_1 - t_2} \ln \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$$

pas d'échelle

SITE WAITE-AMULET**RÉSULTATS DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE**
DANS LA COUVERTURE D'ARGILE

ARGILE	COND.HYDRAUL. K(m/s)
ESSAI No. 1	1.83×10^{-7}
ESSAI No. 2	1.15×10^{-7}
ESSAI No. 3	3.07×10^{-7}
ESSAI No. 4	1.41×10^{-7}

MOYENNE ARITHM. DES 4 ESSAIS : 1.8×10^{-7} m/s \approx 2.0×10^{-7} m/s

SITE WAITE-AMULET
RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERMÉABILITÉ IN SITU A NIVEAU ASCENDANT ET DESCENDANT
DANS LES PIÉZOMÈTRES INSTALLÉS DANS LES RÉSIDUS

PIEZO No	ASCENDANT	k (m/s)	DESCENDANT	k (m/s)	♣ PROF. (m)	Ho (cm)
R4-1	1.8 x 10 ⁻⁷ *	1.5 x 10 ⁻⁷ +			1.85	- 23
R4-1			2.8 x 10 ⁻⁶ *	2.8x10 ⁻⁶ +	2.0	30
R4-2			1.12x10 ⁻⁴	1.18x10 ⁻⁴	2.31	16.5
R4-2	1.02 x 10 ⁻⁶	1.05 x 10 ⁻⁶			1.61	- 6

R3-1	3.86 x 10 ⁻⁶	3.75 x 10 ⁻⁶			2.51	- 2.5
R3-1			3.9 x 10 ⁻⁶	3.9 x 10 ⁻⁶	2.51	0
R3-2	4.8 x 10 ⁻⁶	4.8 x 10 ⁻⁶			2.24	- 2.5
R3-2			8.1 x 10 ⁻⁶	8.5 x 10 ⁻⁶	2.24	1.0

R2-1	3.18 x 10 ⁻⁶	3.15 x 10 ⁻⁶			2.28	- 5.0
R2-1			5.56 x 10 ⁻⁶	5.84 x 10 ⁻⁶	2.35	7.5
R2-2	1.21x10 ⁻⁵	1.25x10 ⁻⁵			2.53	- 2.5
R2-2			5.8 x 10 ⁻⁵	6.1 x 10 ⁻⁵	2.60	9.0

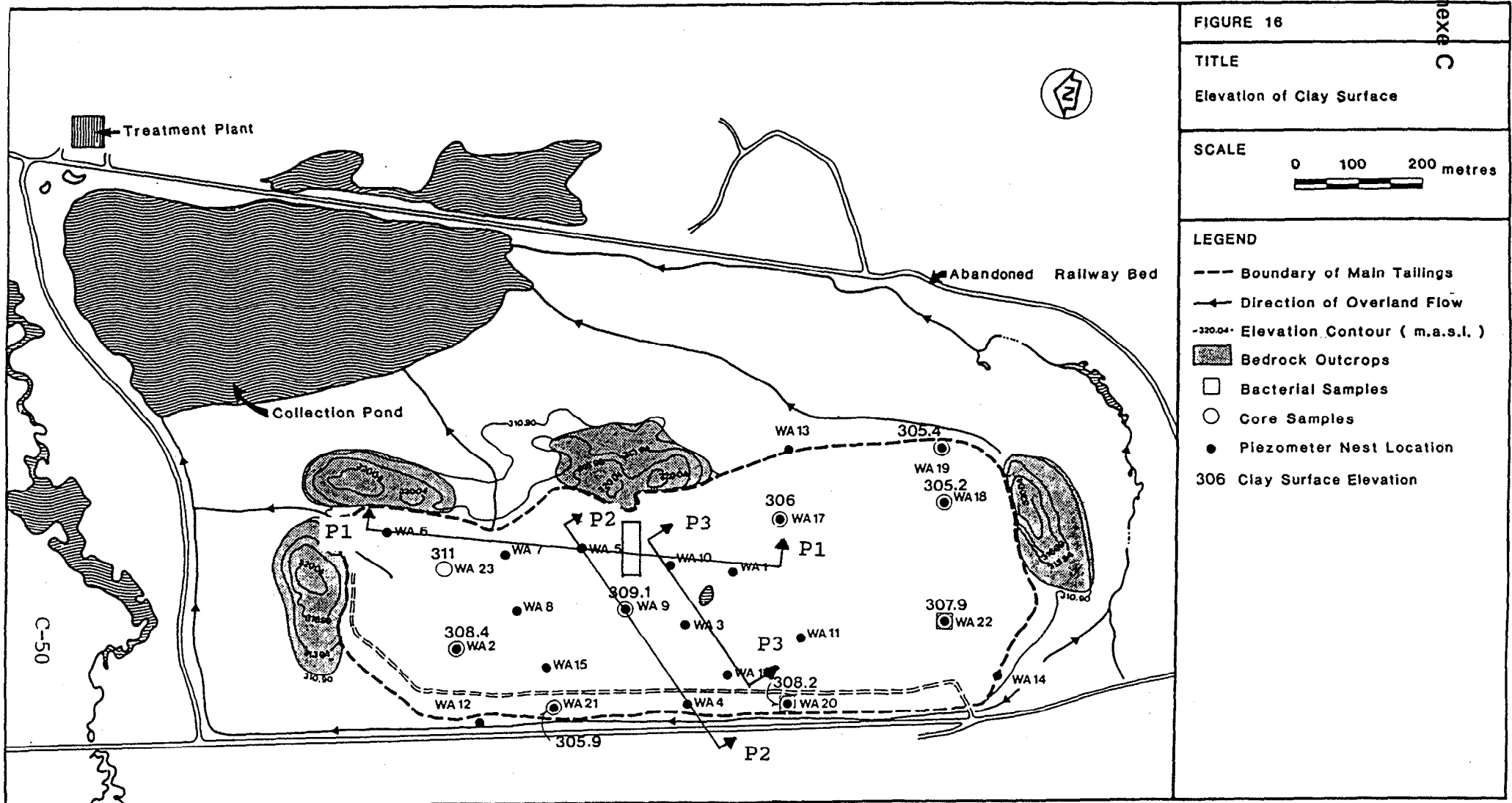
*CALCUL DE k PAR LA MÉTHODE DES VITESSES

+ VÉRIFICATION DE k PAR $\ln[Hr=(H-H_0)]$

♣ PROFONDEUR INITIALE DE L'EAU À PARTIR DU SOMMET

ANNEXE C

RÉSULTATS DES ÉTUDES PAR ORDINATEUR ET PAR BILAN



Vue en plan du parc à résidus de Waite-Amulet avec le secteur instrumenté (rectangle) et les trois coupes P-1, P-2 et P-3 utilisées pour l'analyse des écoulements souterrains dans le secteur instrumenté

Polytechnique - Waite-Amulet

COUPE P1

Piézomètres WA6 - WA7 - WA10 -WA1

Écoulement dans résidus à peu près \perp à la coupe P1, direction Est, dans la zone d'essais

Installation

Relevés de Mai

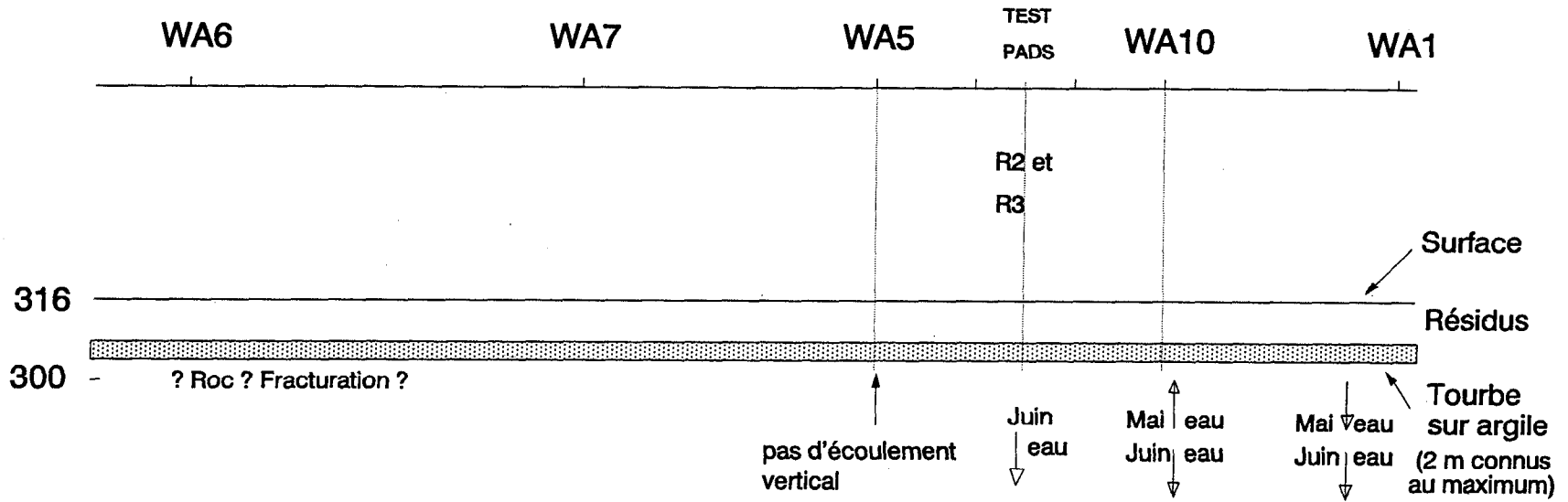
Relevés de Juin

PIÉZO No	ÉLEV(m) terrain	ÉLEV.(m) crépine	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a
WA 6-1	316.0	313.9	0.45	315.55	10-05-91	-	-	12-06-91
WA 7-1	315.6	313.2	0.76	314.84	10-05-91	-	-	"
WA 5-1	316.0	311.1	1.12	314.88	"	1.12	314.88	"
5-2	-	314.3	1.10	314.90	"	1.18	314.82	"
WA 10-1	316.0	308.7	1.10	314.90	"	1.40	314.60	"
10-2	316.0	314.5	1.45	314.55	"	1.04	314.96	"
WA 1-1	317.0	309.1	1.09	315.91	"	1.18	315.82	"
1-2	317.0	314.6	0.69	316.31	"	0.82	316.18	"
R3 - 1*	316.1	310.98	-	-	-	2.28	313.82	10-06-91
R3 - 2*	316.1	312.98	-	-	-	2.03	314.07	"
R2 - 1*	316.1	312.82	-	-	-	2.26	313.84	"
R2 - 2*	316.1	310.87	-	-	-	2.47	313.63	"

* Zone d'essais de couvertures sèches

Polytechnique - Waite-Amulet

COUPE P1



Echelle horizontale = échelle verticale

Polytechnique - Waite-Amulet

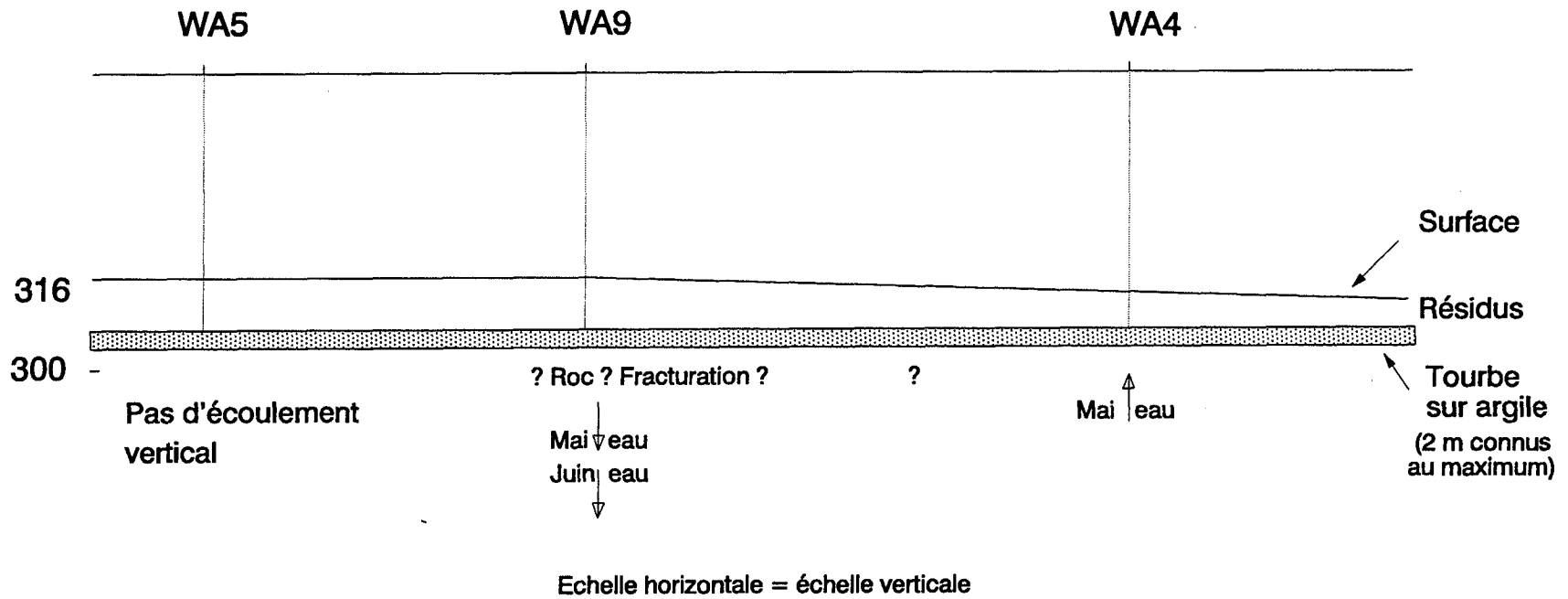
COUPE P2

Piézomètres WA5 - WA9 - WA4

Installation			Relevés de Mai			Relevés de Juin		
PIÉZO No	ÉLEV(m) terrain	ÉLEV(m) crépine	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a
WA 5-1	316.0	311.1	1.12	314.88	10-05-91	1.12	314.88	12-06-91
5-2	316.0	314.3	1.10	314.90	"	1.18	314.82	"
WA 9-1	316.0	309.4	2.15	313.85	"	1.90	314.10	"
9-2	316.0	314.5	1.04	314.96	"	1.17	314.83	"
9-3	316.0	311.0	2.15	313.85	"	1.71	314.29	"
9-4	316.0	312.5	1.55	314.45	"	1.43	314.57	"
9-5	316.0	313.5	0.65	315.35	"	1.48	314.52	"
9-6	316.0	308.1	1.98	314.02	"	2.42	313.58	"
9-7	316.0	inconnue	2.00	314.0	"	-	-	-
WA 4-1	312.0	309.3	0.64	311.36	"	-	-	-
4-2	312.0	310.6	1.06	310.94	"	-	-	-
4-3	312.0	inconnue	1.24	310.76	"	-	-	-
4-4	312.0	inconnue	1.12	310.88	"	-	-	-

Polytechnique - Waite-Amulet

COUPE P2



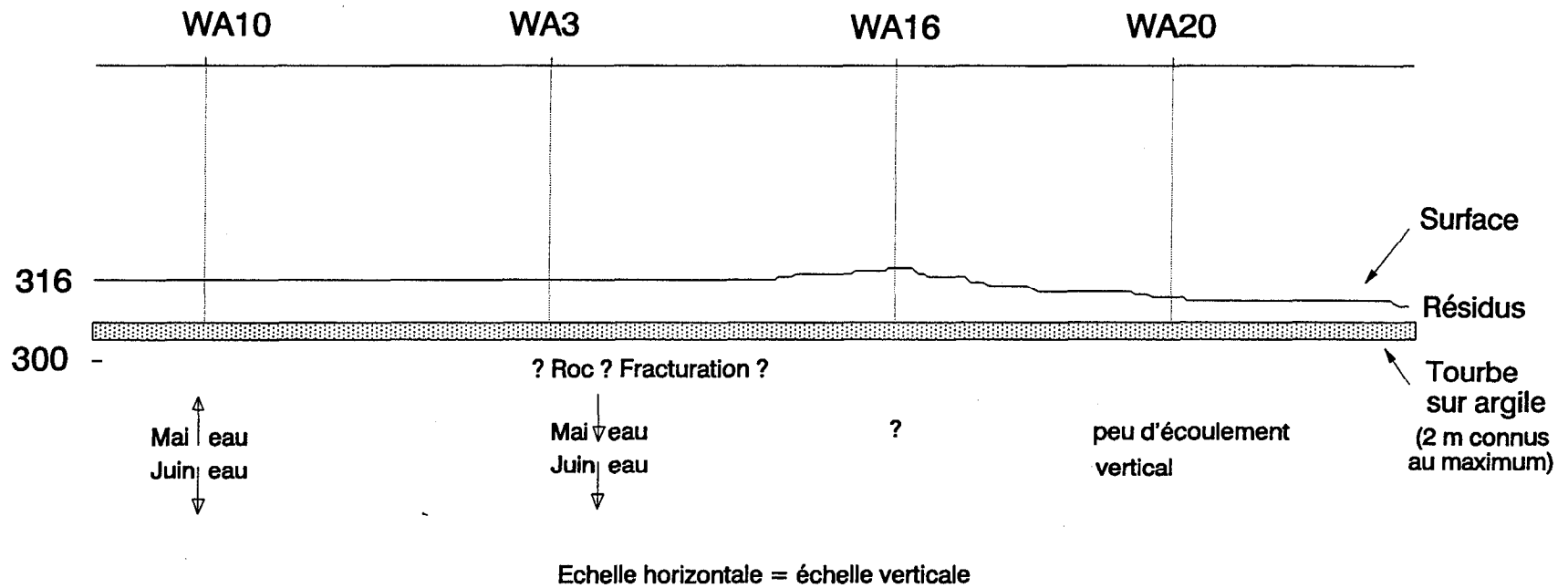
COUPE P3

Piézomètres WA10 - WA3 - WA16 - WA20

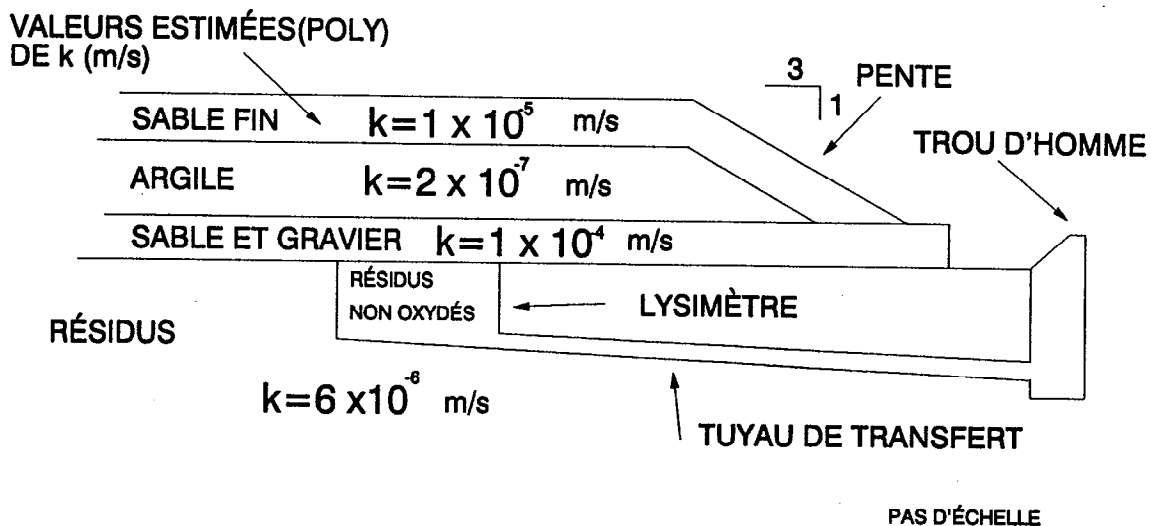
Installation			Relevés de Mai			Relevés de Juin		
PIÉZO No	ÉLEV(m) terrain	ÉLEV(m) crépine	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a	Prof.eau a/c terrain	Charge Hydrau- lique	Date m-j-a
WA 10-1	316.0	308.7	1.10	314.90	10-05-91	1.40	314.60	12-06-91
10-2	316.0	314.5	1.45	314.55	"	1.04	314.96	"
WA 3-1	316.8	311.8	0.96	315.84	"	1.50	315.30	"
3-2	316.8	314.8	0.47	316.33	"	1.23	315.57	"
WA 16-1	317.0	310.9	5.81	311.19	"	5.68	311.32	"
WA 20-1	312.8	307.9	2.01	310.79	"	1.91	310.89	"
20-2	312.8	310.4	1.90	310.90	"	1.88	310.92	"

Polytechnique - Waite-Amulet

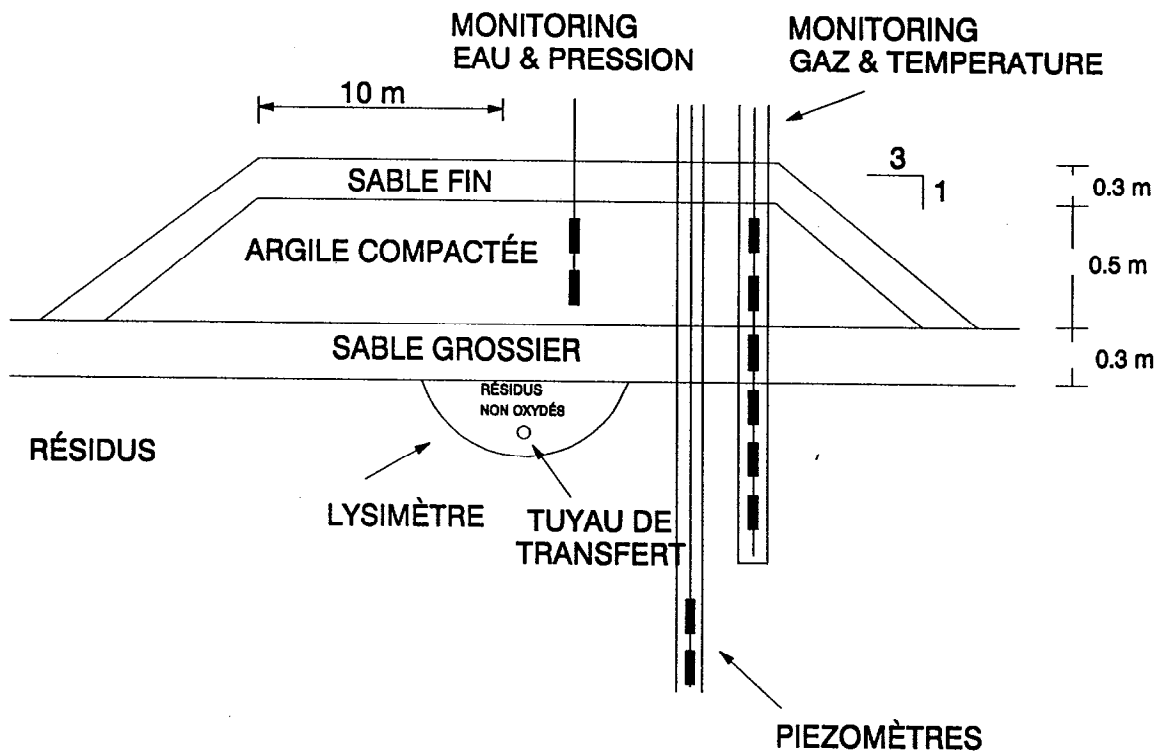
COUPE P3



WAITE-AMULET



COUPE AA' À TRAVERS LA BARRIÈRE COMPOSITE

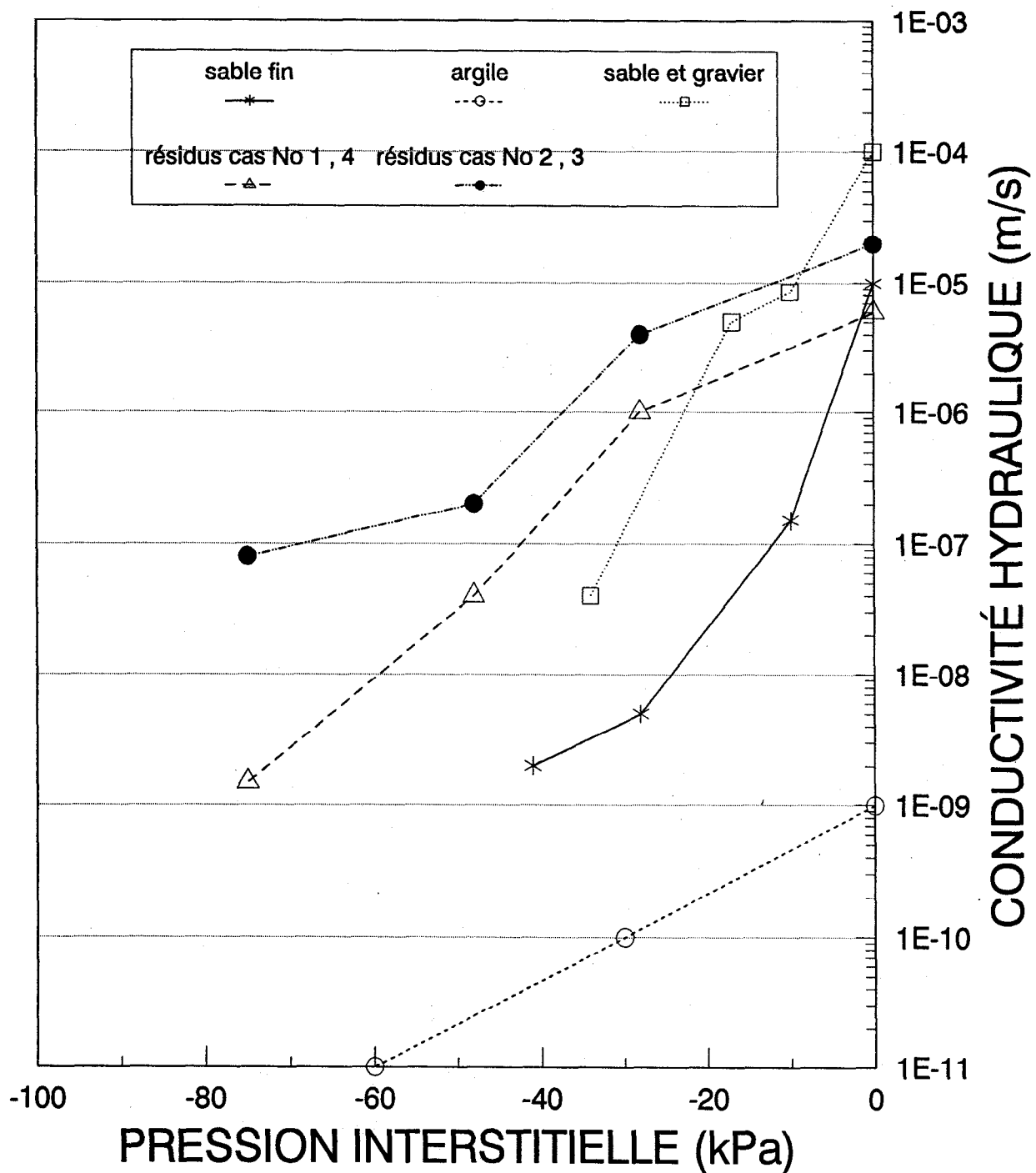


COUPE BB' À TRAVERS LA BARRIÈRE COMPOSITE

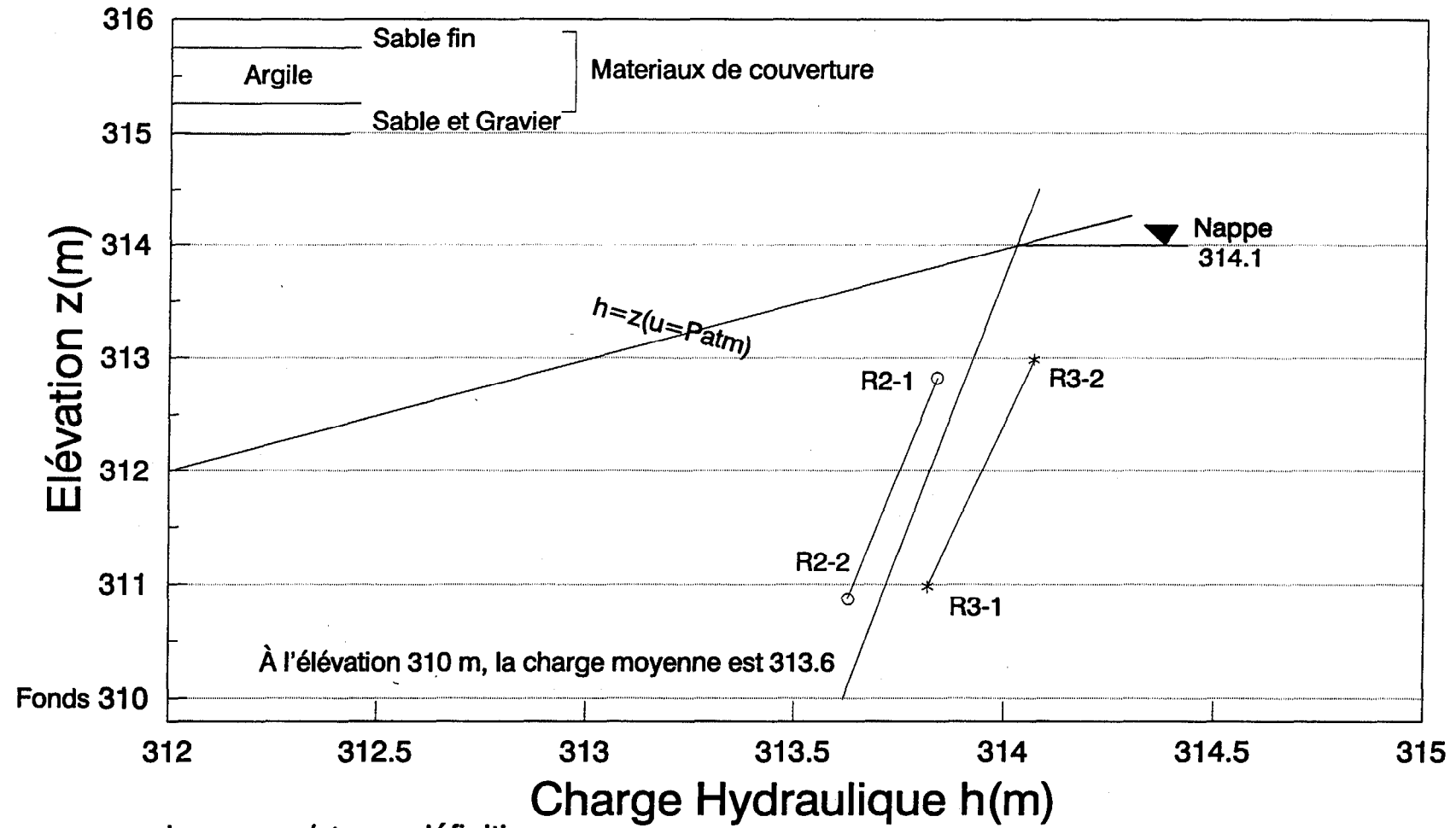
PAS D'ÉCHELLE

WAITE AMULET

MODÈLES DE CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE RETENUS DANS LE PROGRAMME PC-SEEP



WAITE-AMULET - Planches d'essai Conditions d'écoulement mesurées en juin 1991



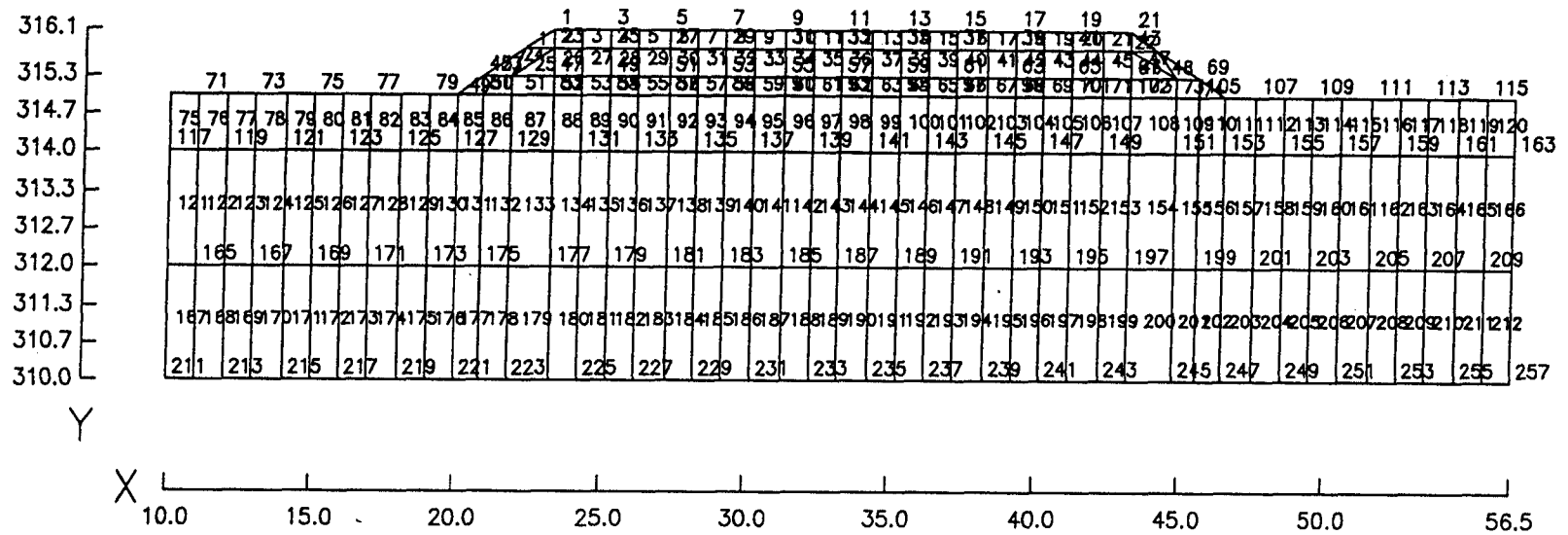
$h = z + u/\gamma_w$ par définition
 Si $h = z$, alors $u =$ pression atmosphérique
 La nappe phréatique est le lieu où $h = z$

FINITE ELEMENT MESH

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE AA K(Argile) = 2×10^{-7} m/s ou 1×10^{-9} m/s

Date : 20 OCTOBRE 1991

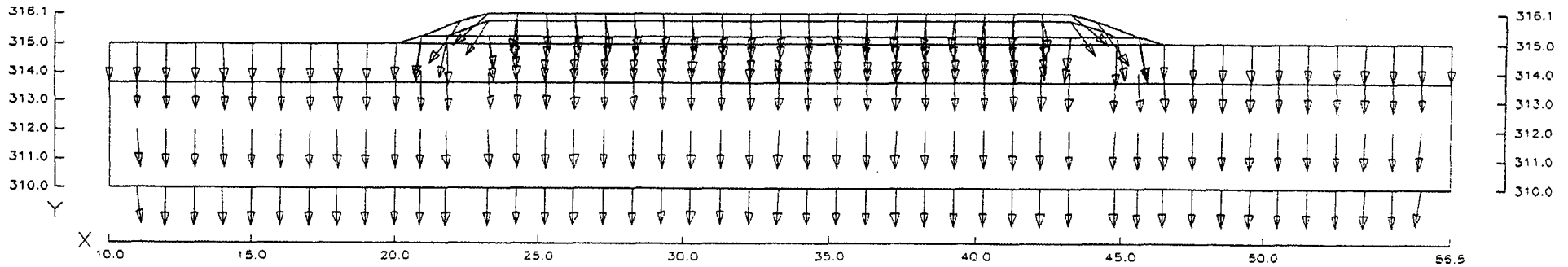


VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE AA (Recharge 1000 mm/an)- K(Argile)= 2×10^{-7} m/s

Date : 20 OCTOBRE 1991

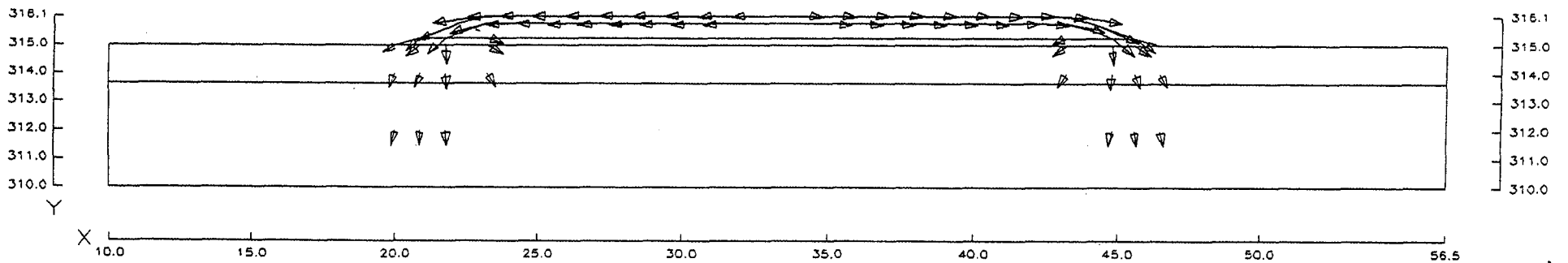


VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE AA (Recharge 1000 mm/an)- K(Argile)= 1×10^{-9} m/s

Date : 20 OCTOBRE 1991

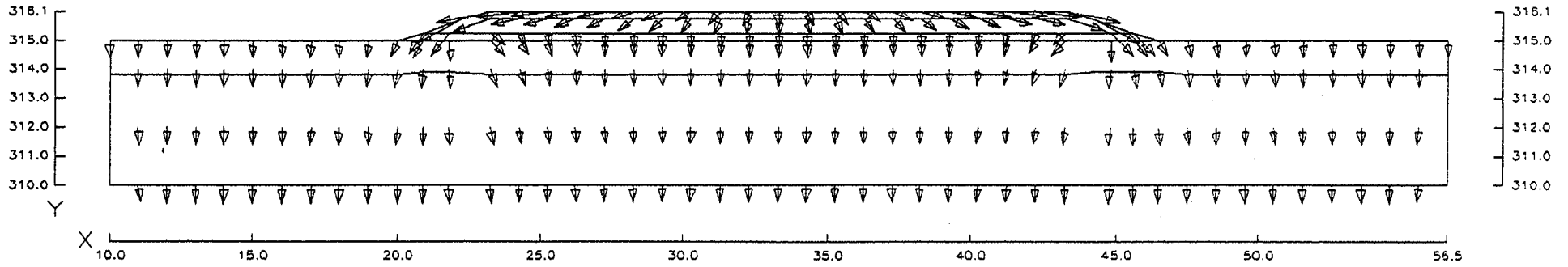


VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE AA (Recharge 10000 mm/an)-K(Argile)= 2×10^{-7} m/s

Date : 25 OCTOBRE 1991



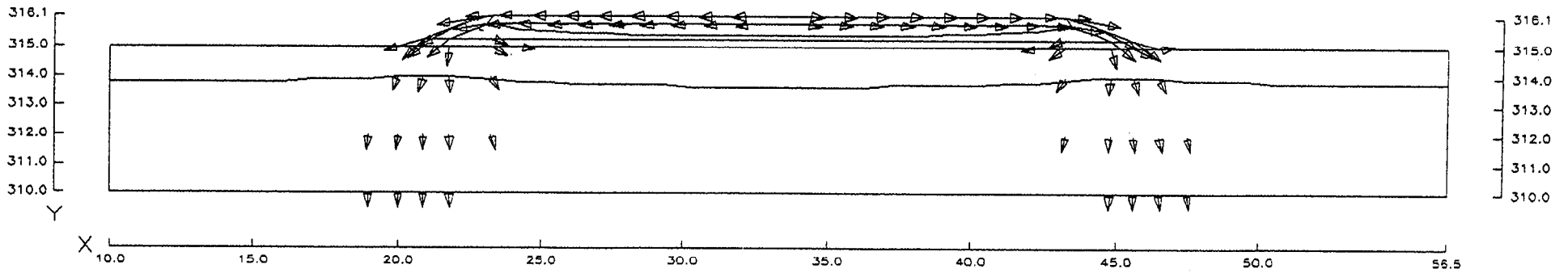
Annexe C

VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE AA(Recharge 10000 mm/an)-K(Argile)= 1×10^{-9} m/s

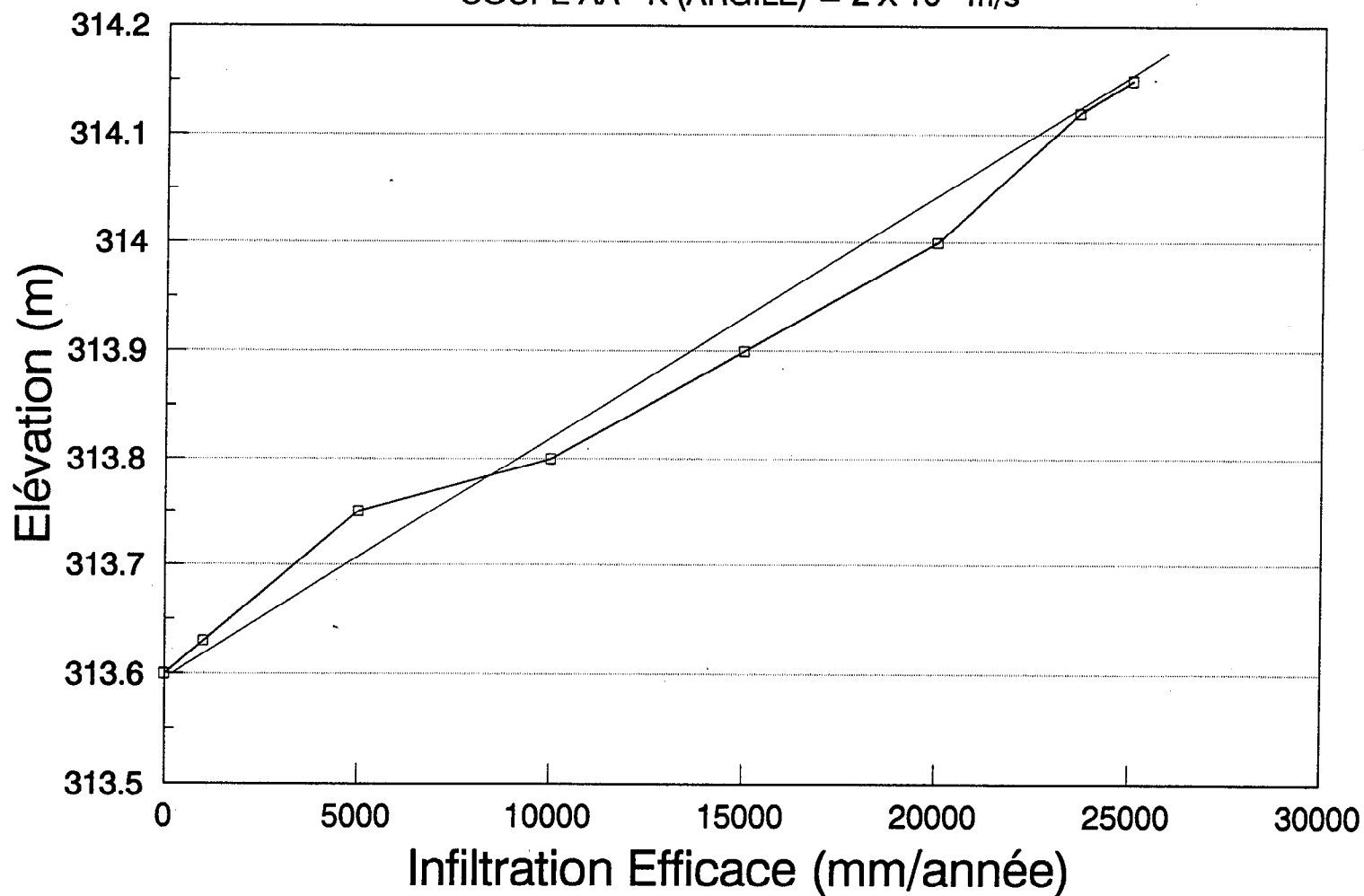
Date : 25 OCTOBRE 1991



WAITE-AMULET

VARIATION DE L'ÉLÉVATION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE PAR RAPPORT À L'INFILTRATION EFFICACE

COUPE AA - K (ARGILE) = 2×10^{-7} m/s



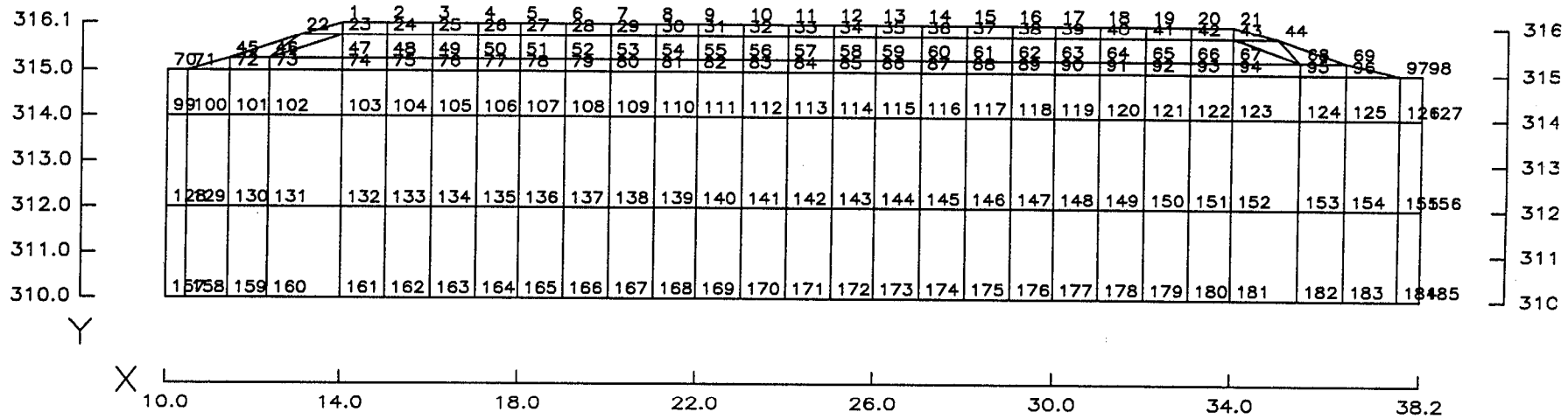
FINITE ELEMENT MESH

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - MAILLE DES NOEUDS

Date : 27 MARS 1992

Annexe C



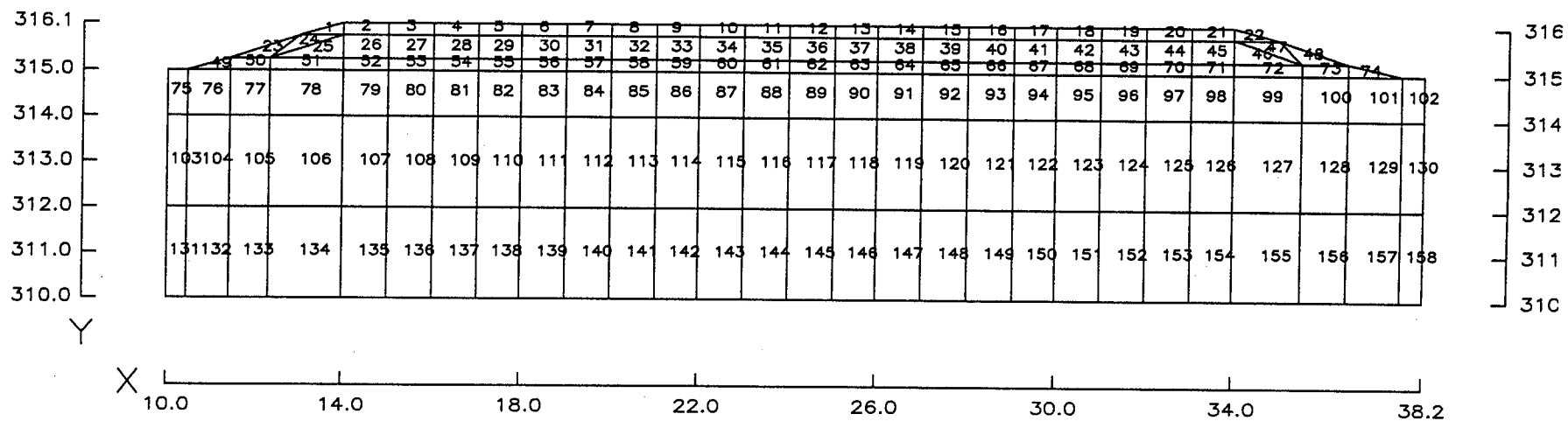
FINITE ELEMENT MESH

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - MAILLE DES ELEMENTS

Date : 27 MARS 1992

Annexe C



WAITE AMULET - COUPE CC - ÉLÉMENTS FINIS
CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX (m/s)
DANS LA PLANCHE D'ESSAIS

MATÉRIAUX	CAS No 1	CAS No 2	CAS No 3	CAS No 4
Sable Fin	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Argile	1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-9}	1×10^{-9}
Sable et Gravier	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
Résidus	6×10^{-6}	2×10^{-5}	6×10^{-6}	2×10^{-5}
Recharge (mm/année)	200	200	500	500

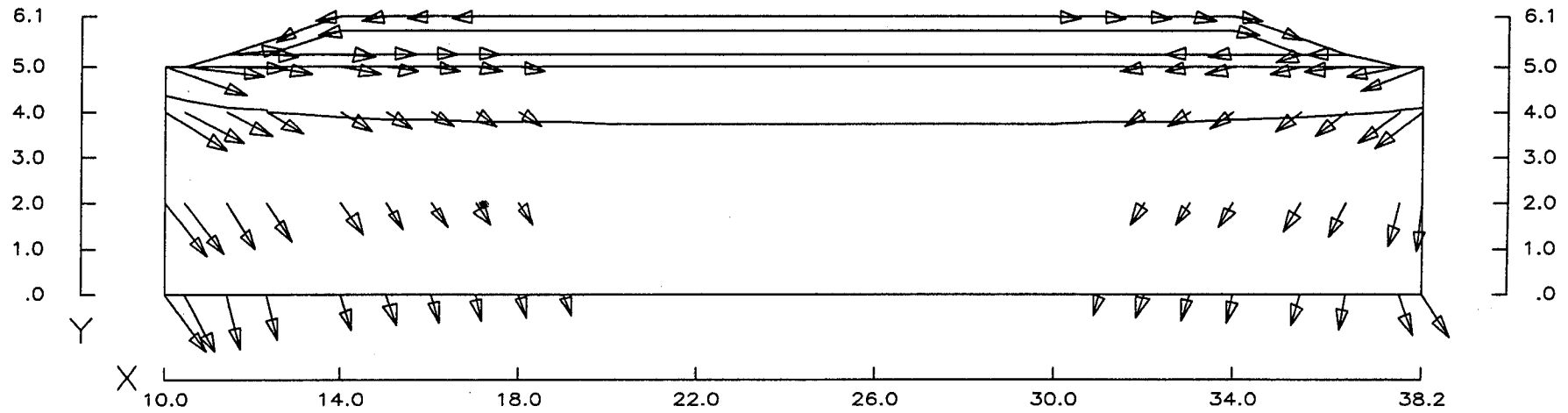
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 1 TOL: .5% CHARGE - kh/kv = 1

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



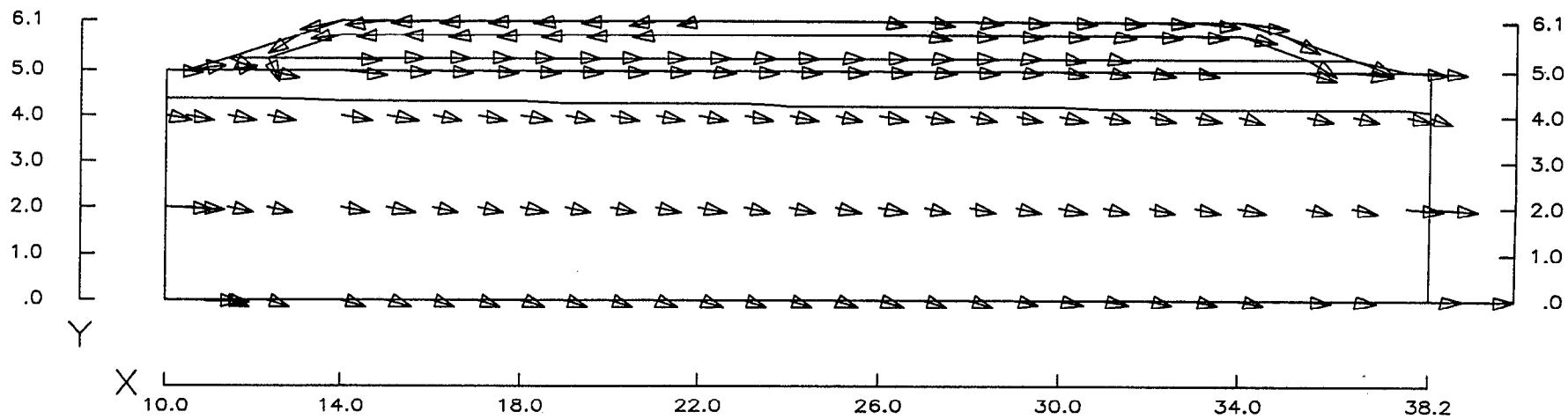
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 1 TOL:.5% CHARGE - $k_h/k_v = 100$

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



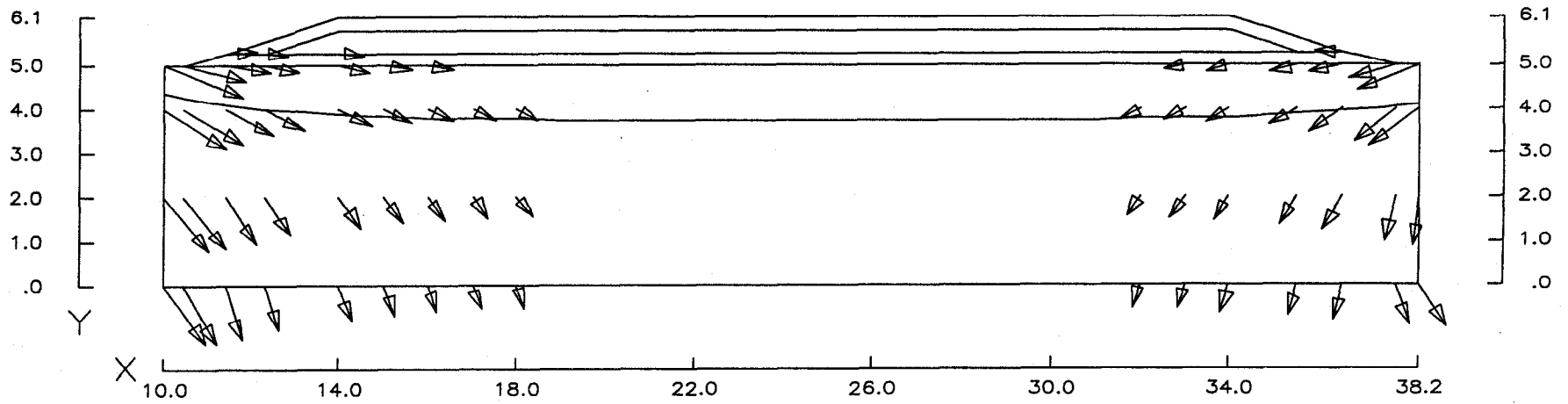
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 2 TOL:.5% CHARGE - kh/kv = 1

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



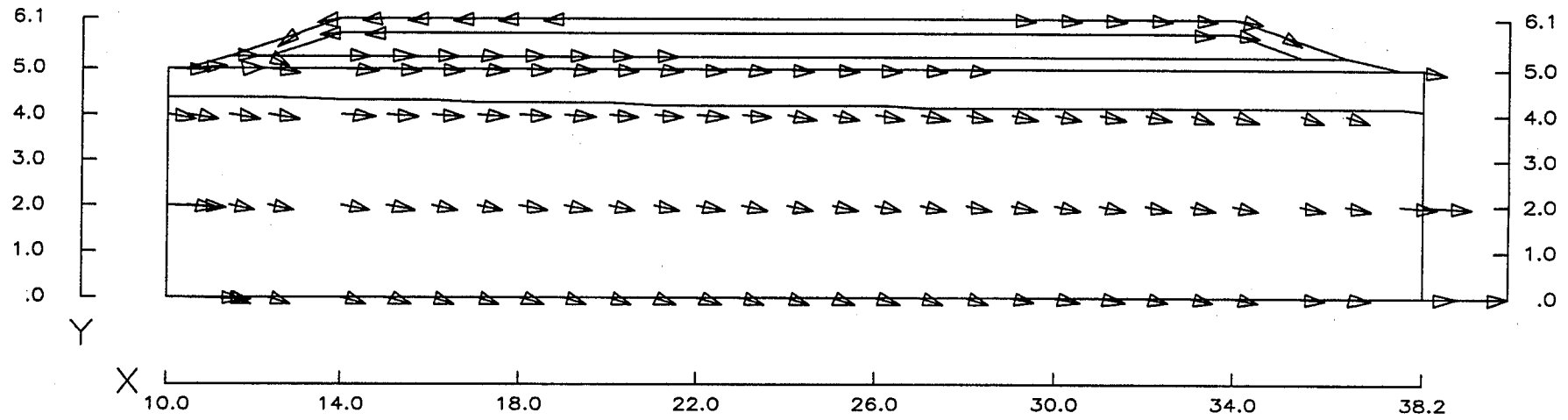
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 2 TOL: .5% CHARGE - kh/kv = 100

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



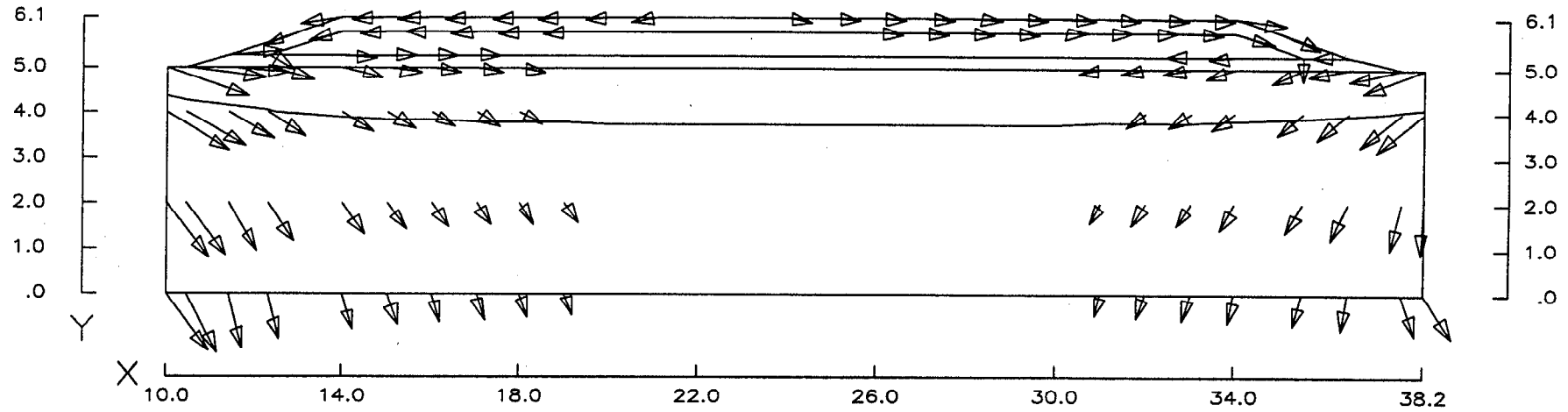
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 3 TOL: .5% CHARGE - kh/kv = 1

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



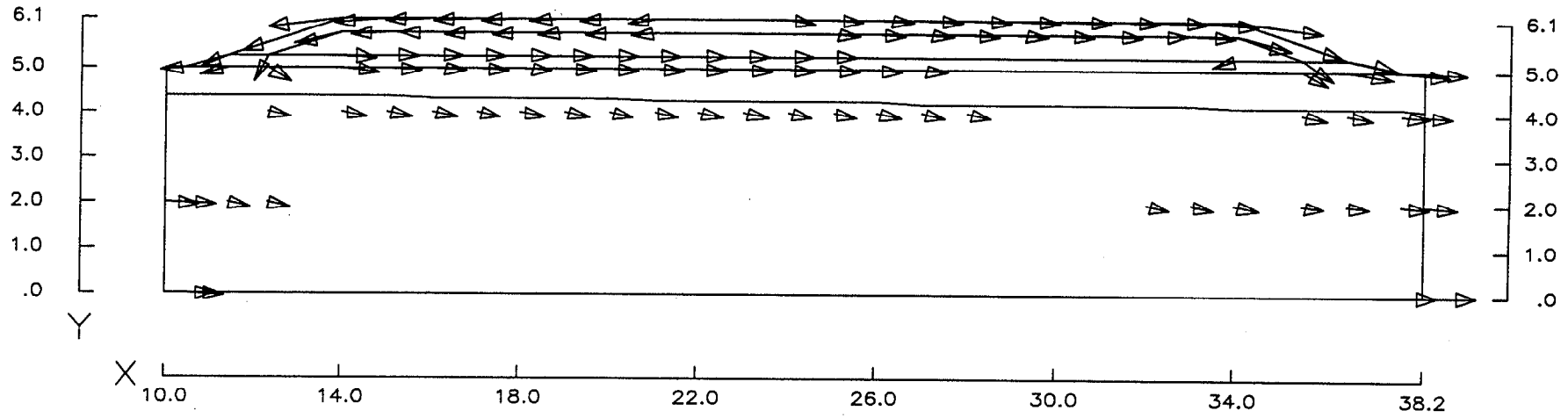
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 3 TOL.:.5% CHARGE - kh/kv = 100

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



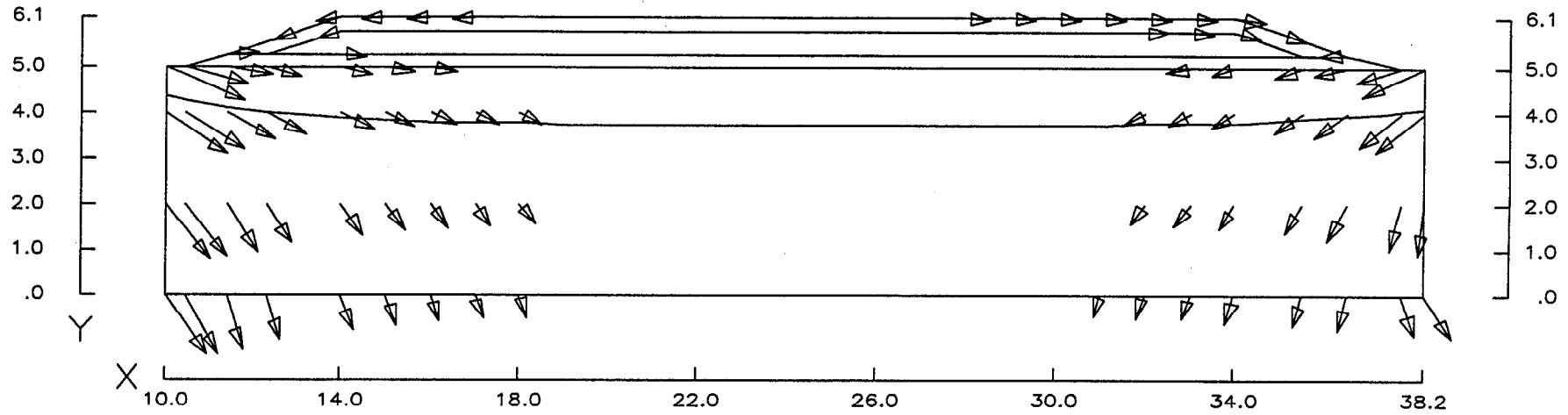
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

Comment : COUPE CC - CAS # 4 TOL: .5% CHARGE - $k_h/k_v = 1$

Date : 20 MARS 1992

Annexe C



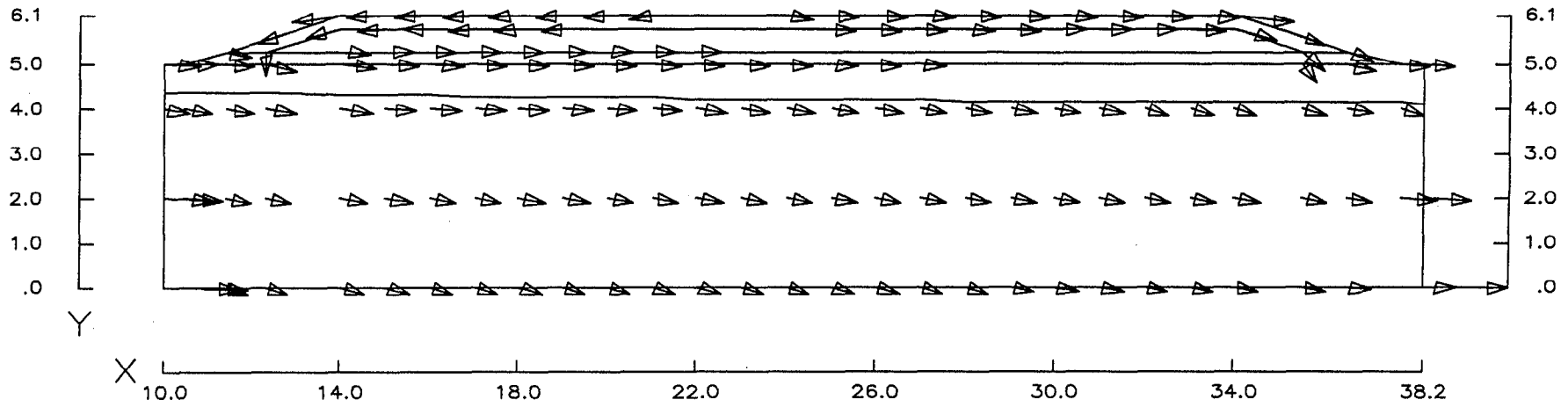
VELOCITY VECTOR PLOT

Project : WAITE AMULET

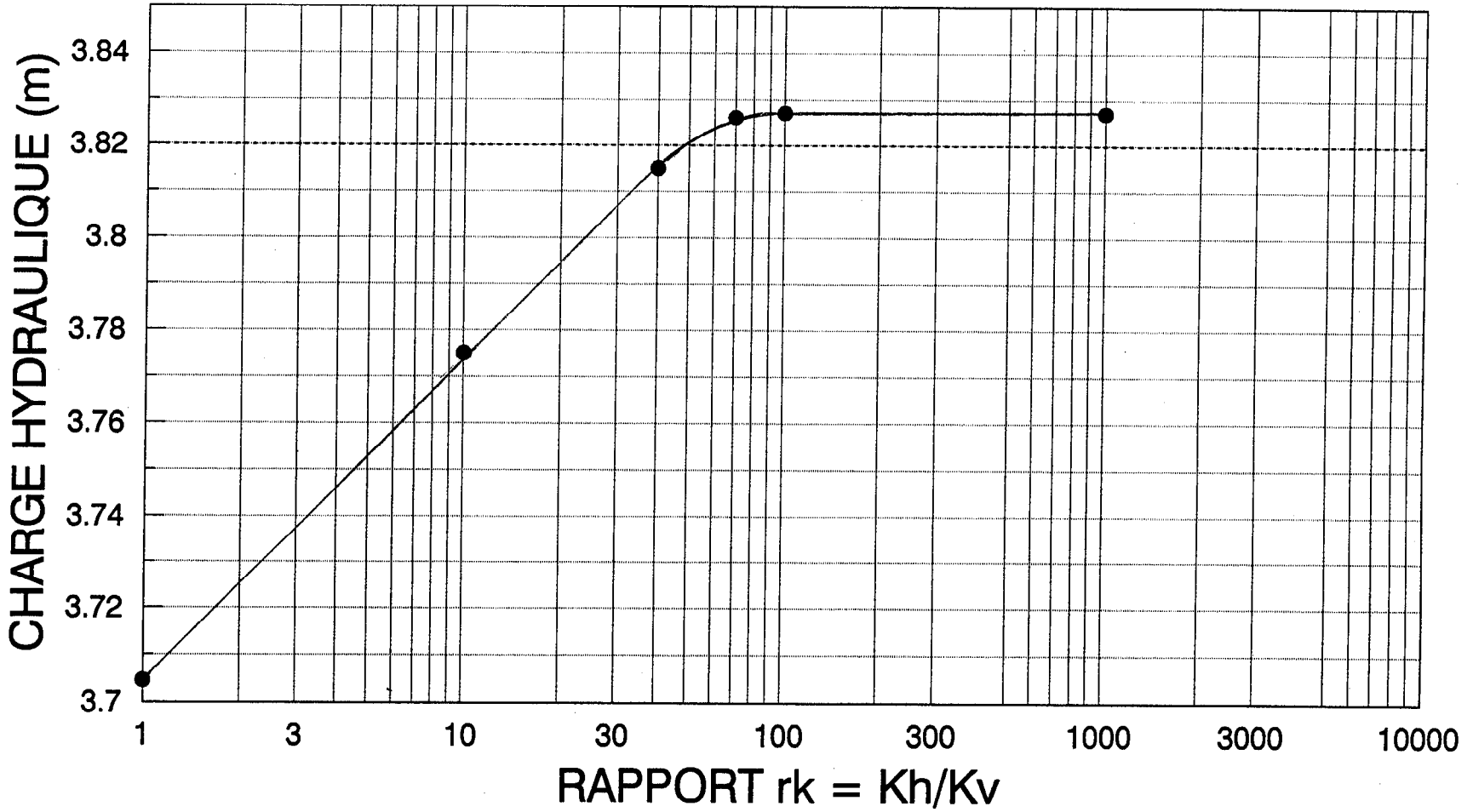
Comment : COUPE CC - CAS # 4 TOL: .5% CHARGE - kh/kv = 100

Date : 20 MARS 1992

Annexe C

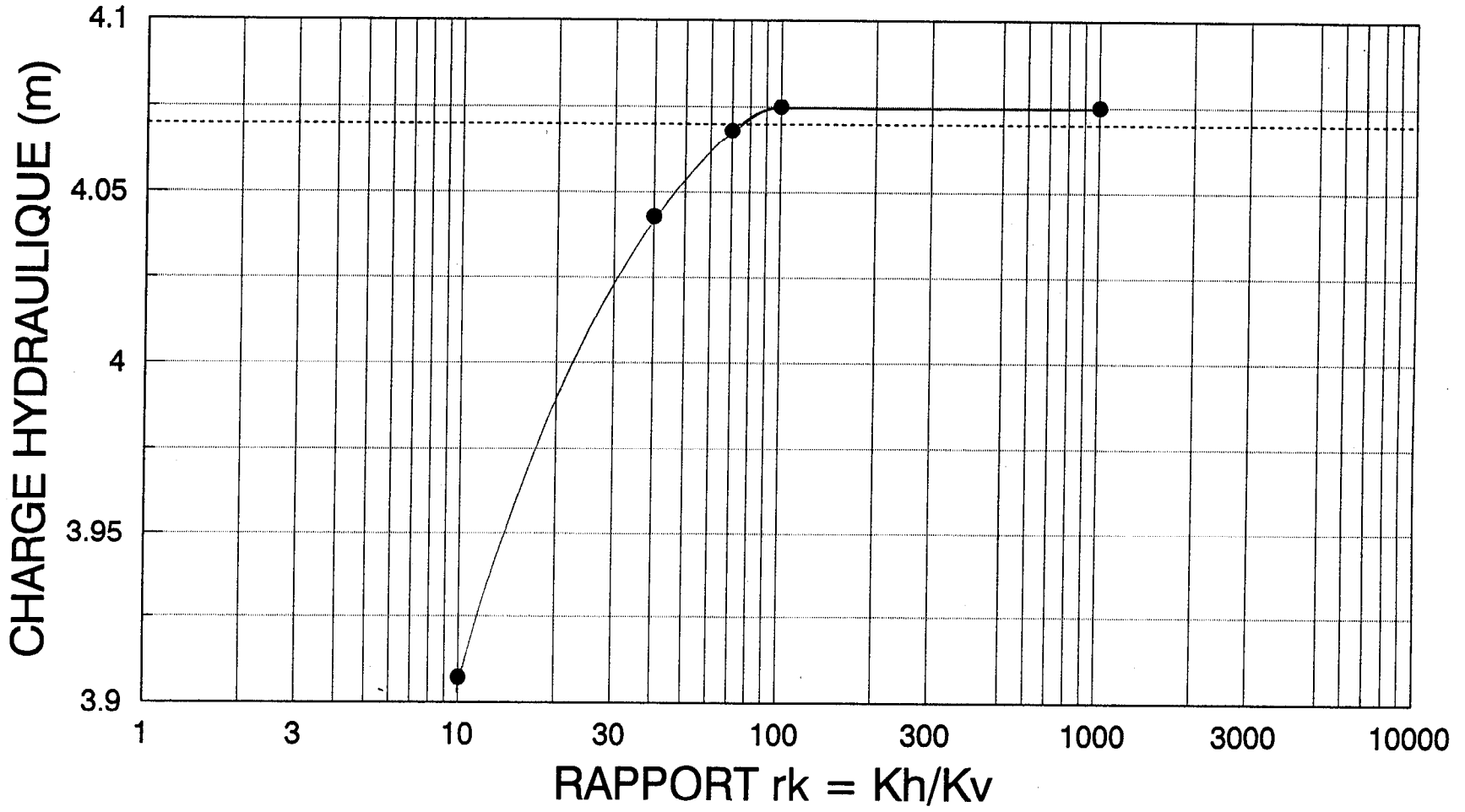


WAITE AMULET CAS No 1 R3-1



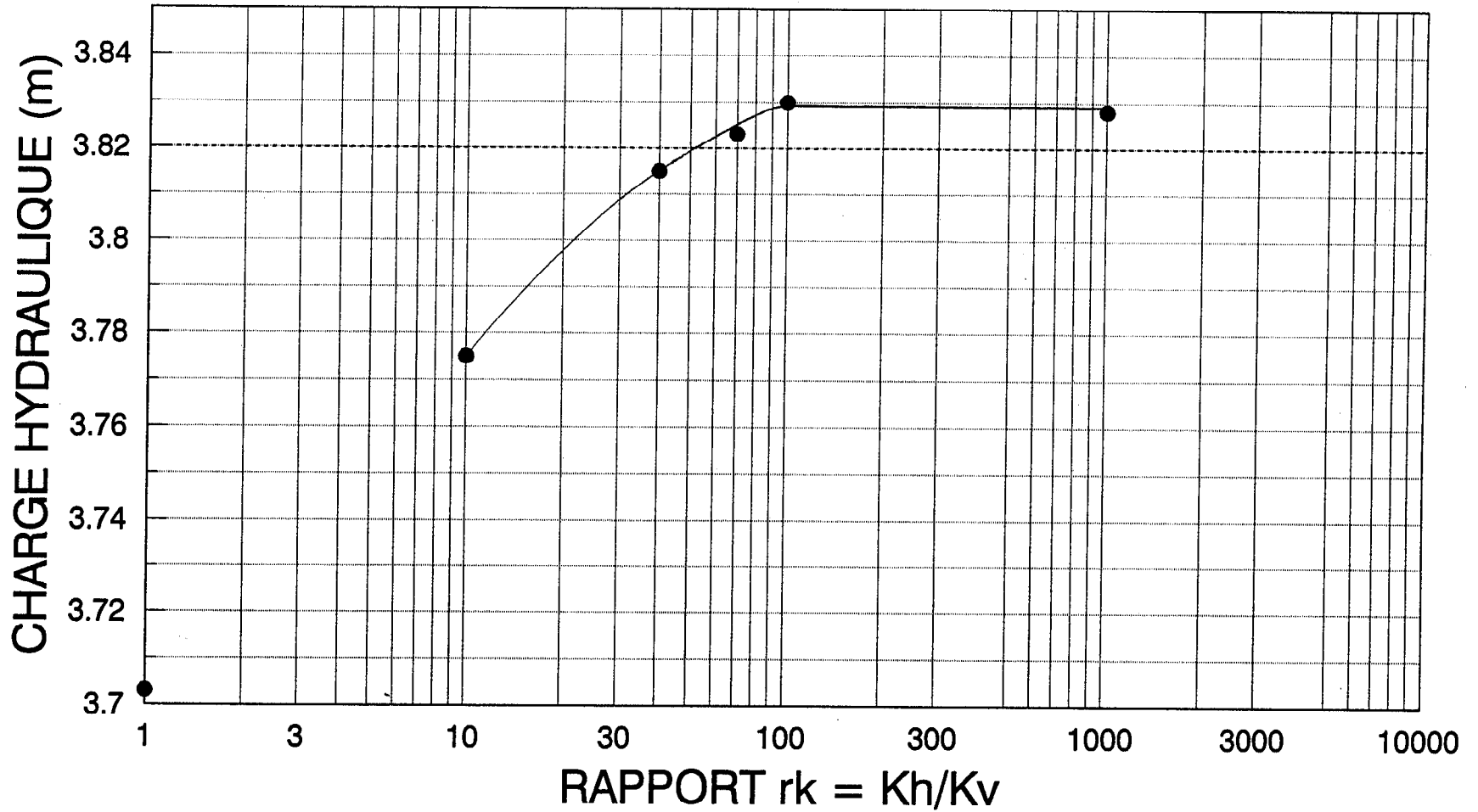
R3-1 $K_h/K_v = 50$

WAITE AMULET CAS No 1 R3-2



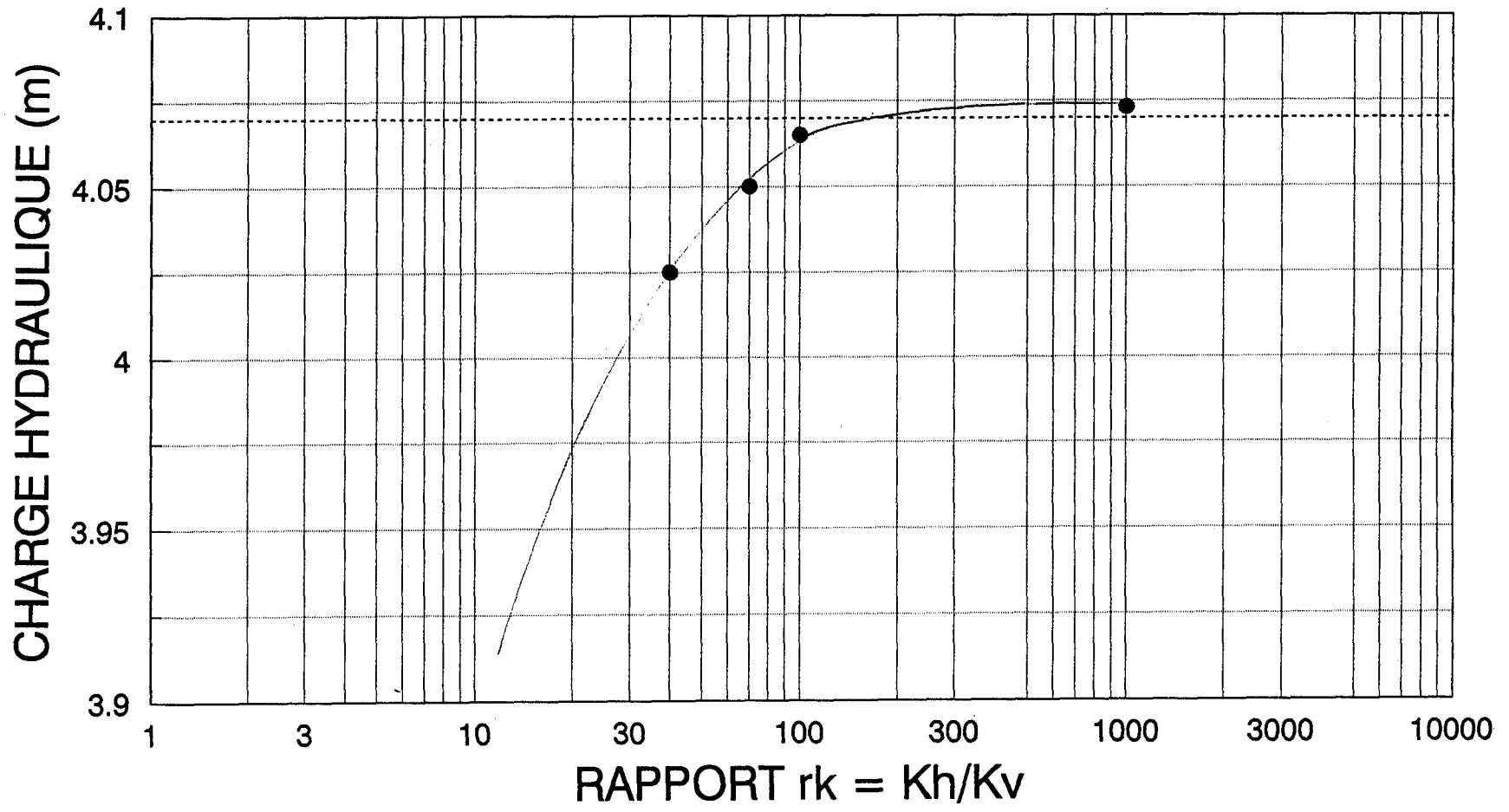
R3-2 $K_h/K_v = 75$

WAITE AMULET CAS No 2 R3-1



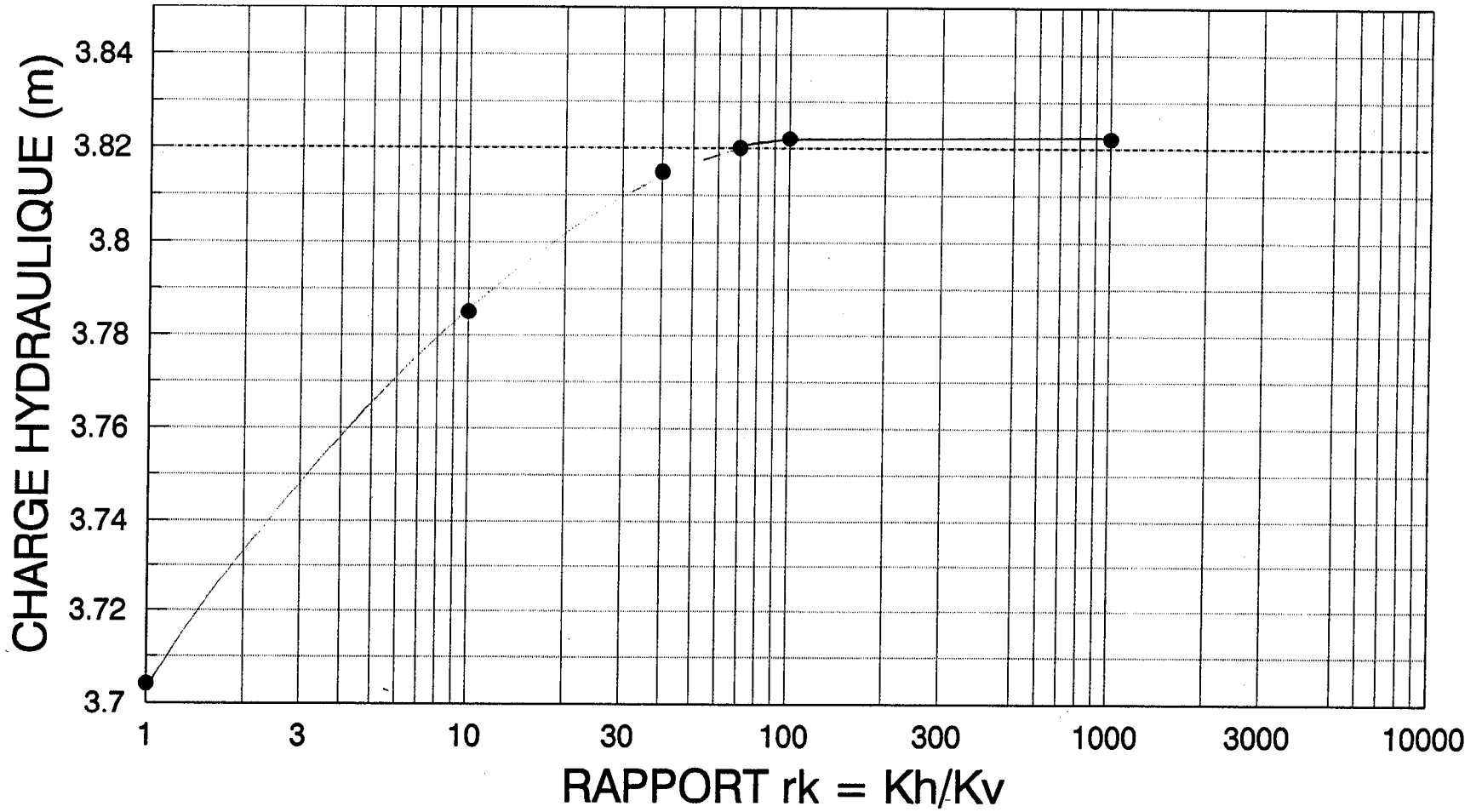
R3-1 $K_h/K_v = 50$

WAITE AMULET CAS No 2 R3-2



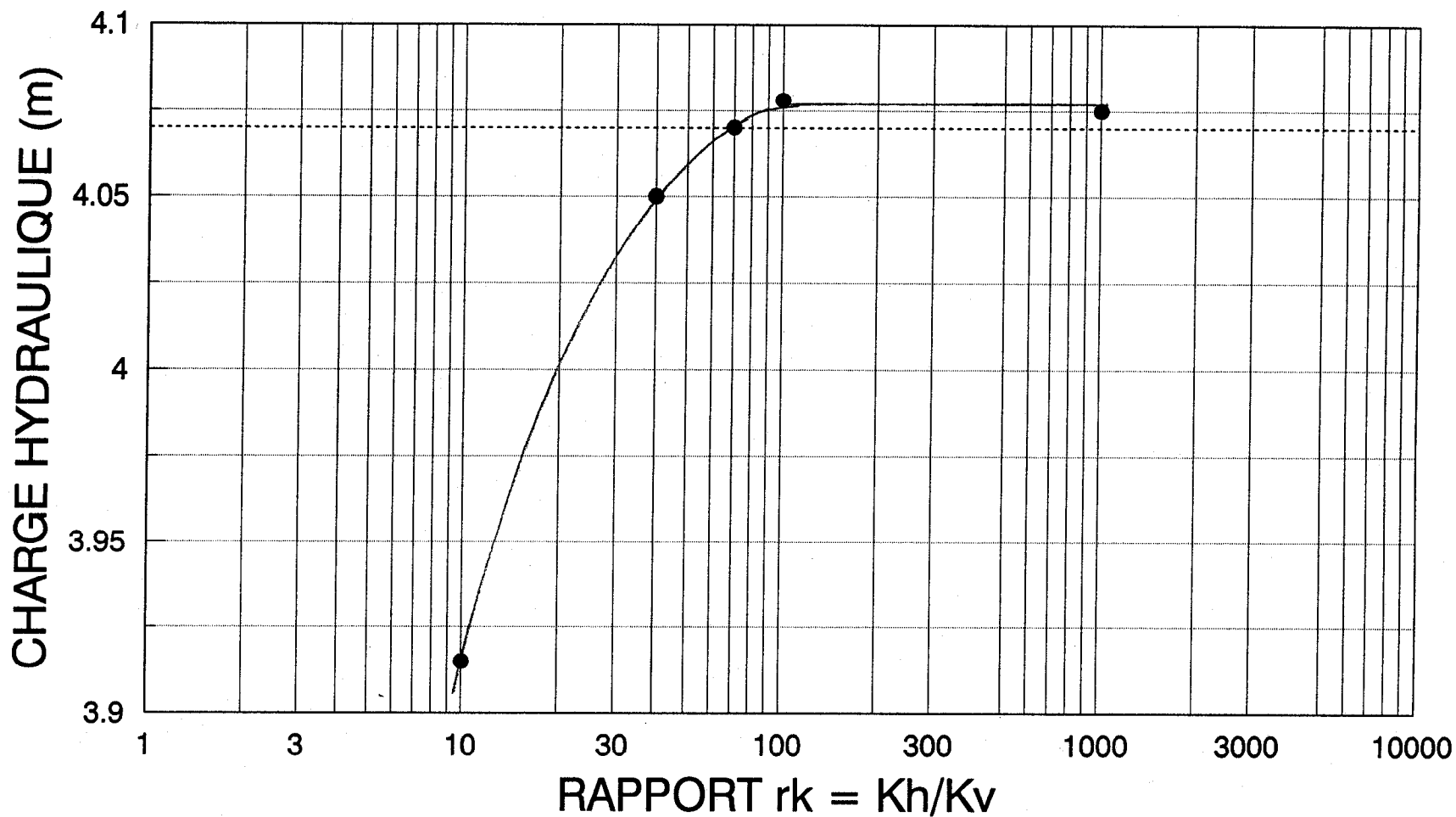
R3-2 $K_h/K_v = 170$

WAITE AMULET CAS No 3 R3-1



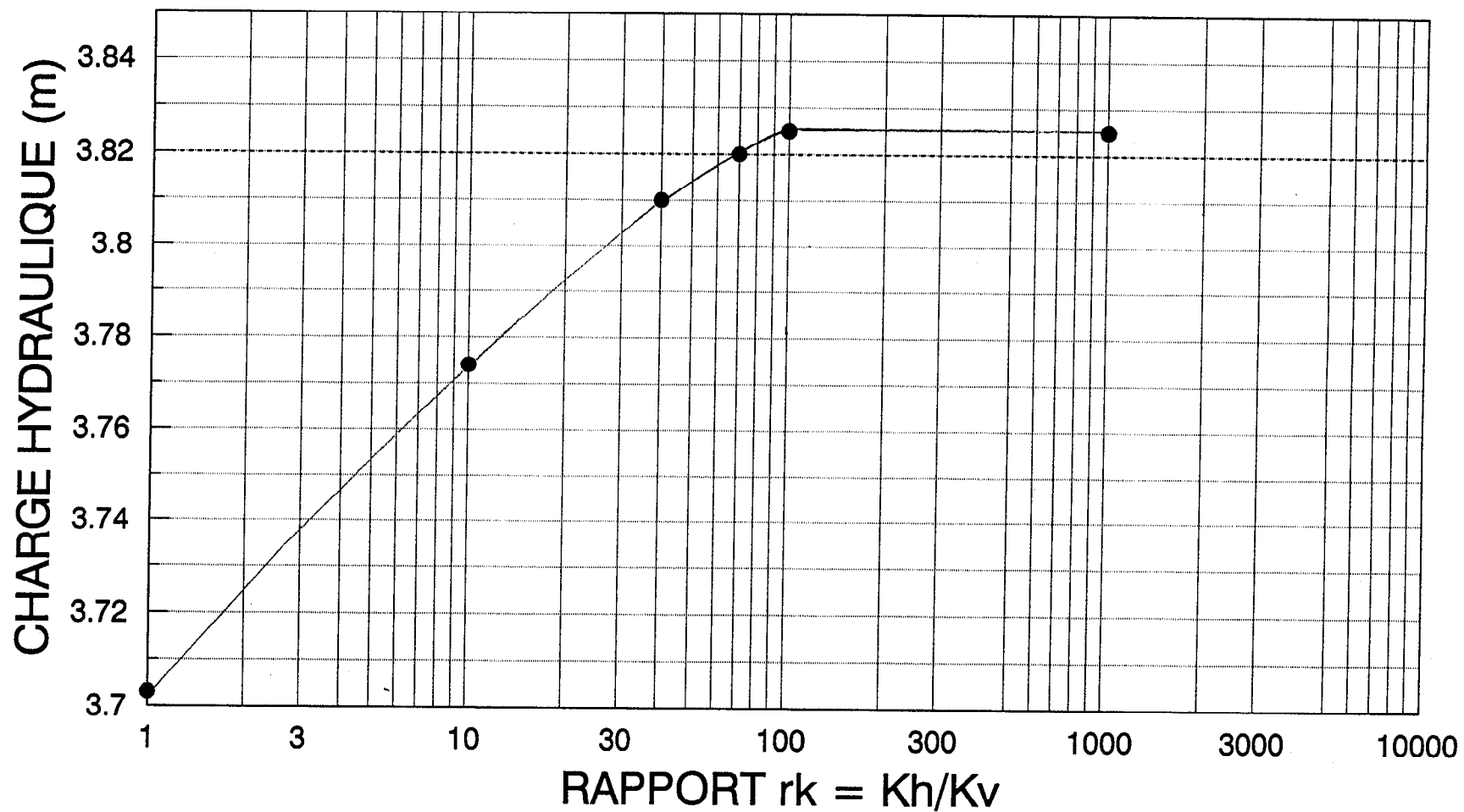
R3-1 $K_h/K_v = 70$

WAITE AMULET CAS No 3 R3-2

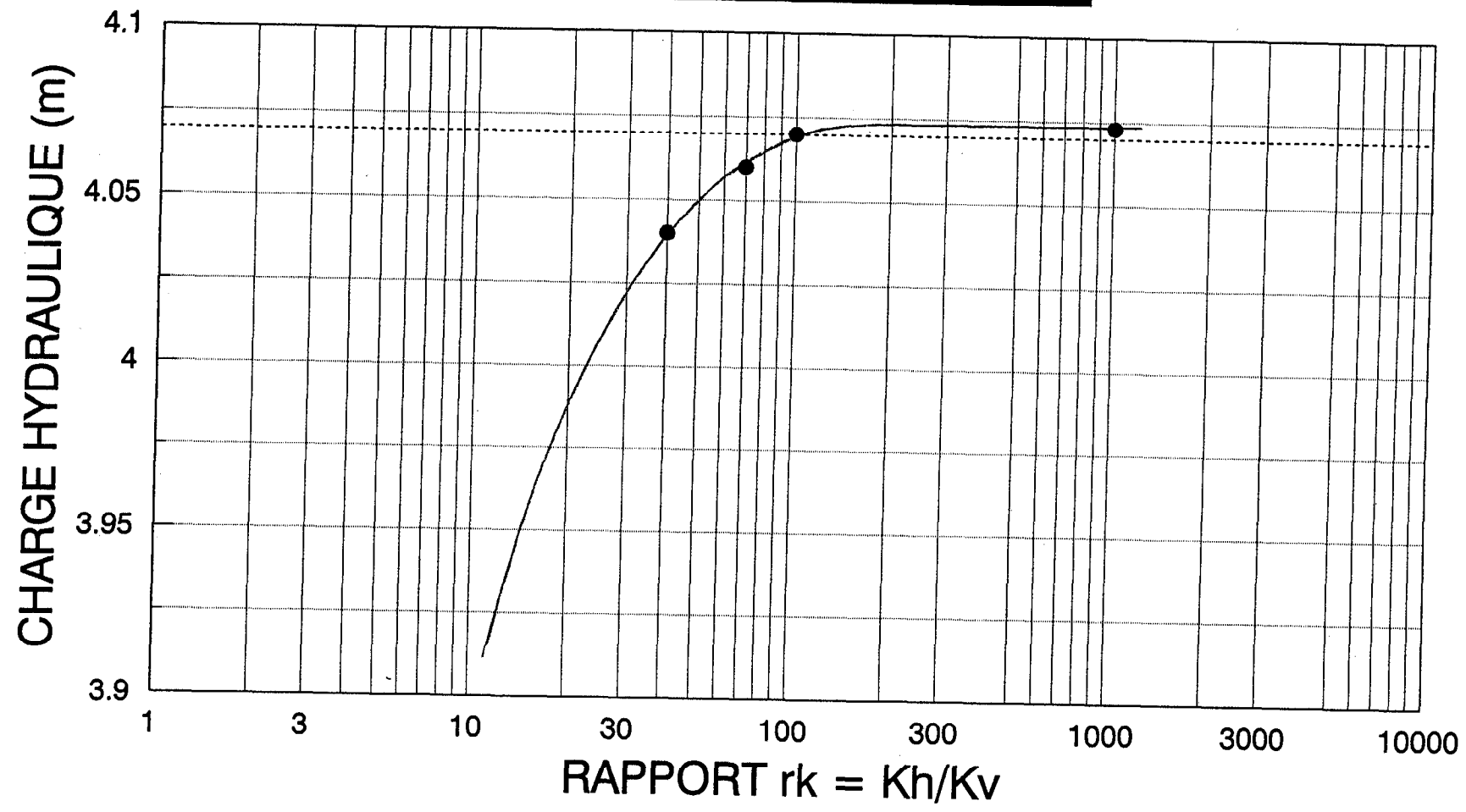


R3-2 $K_h/K_v = 70$

WAITE AMULET CAS No 4 R3-1

R3-1 $K_h/K_v = 70$

WAITE AMULET CAS No 4 R3-2



R3-2 $K_h/K_v = 100$

VALEURS $r_k = Kh/Kv$ DANS LA PLANCHE R3 QUI DONNENT LE MEILLEUR AJUSTEMENT POUR LES PIÉZOMÈTRES R3-1 ET R3-2

No PIÉZO	CAS No 1	CAS No 2	CAS No 3	CAS No 4
R3 -2	75	170	70	100
R3-1	50	50	70	70

FINAL REPORT

Dossier STM-89TE17

**Fiscal Year 1990-91
(July 1, 1990 - March 31, 1991)**

PROJECT TITLE: The effectiveness of engineered soil covers on reactive mine tailings at Waite Amulet, Québec

PREPARED FOR: Centre de recherches minérales
Ministère de l'Energie et Ressources (Mines)
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

PREPARED BY: Prof. Charles N. Alpers and Ms. Shelagh Montgomery
Department of Geological Sciences, McGill University
and Mineral Exploration Research Institute (MERI-IREM)
3450 University St.
Montréal (Québec) H3A 2A7

TABLE OF CONTENTS

	<u>page</u>
LIST OF TABLES AND FIGURES	iii
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 RESULTS	2
2.1. Design of monitoring units	2
2.2. Site visits and on-site measurements	2
2.2.1. October, 1990	2
2.2.2. November, 1990	3
2.3. Chemical analyses	3
2.3.1. Gas samples	3
2.3.2. Water samples	4
3.0 GEOCHEMICAL MODELLING	5
3.1 Charge balance and error analysis	5
3.2 Saturation index analysis	6
3.3 Iron redox speciation: comparison to field Eh	7
4.0 DISCUSSION - INDICATIONS FOR FUTURE WORK	7
4.1 Gas geochemistry	7
4.2 Stable isotopes	7
4.3 Water geochemistry	8
5.0 REFERENCES	9
TABLES	10
FIGURES	19

LIST OF TABLES AND FIGURES

Table 1. Waite Amulet gas sampling, Oct. 15, 1990

Table 2 A,B. Waite Amulet metal and major ion concentrations, October, 1990 (from Noranda Technology Centre)

Table 3. Physio-chemical parameter values for the groundwater samples from Waite Amulet piezometers, October, 1990 (from Noranda Technology Centre)

Table 4. Waite Amulet gas sampling, November 22-23, 1990

Table 5. Waite Amulet metal and major ion concentrations, November, 1990 (from Noranda Technology Centre)

Table 6. Field measurements of pH and redox EMF, November, 1990

Table 7. Concentrations of As, Sb, Se, and Hg in water samples, October and November, 1990

Table 8. Results of speciation-saturation calculations using programs WATEQ4F and PHREEQE for Waite Amulet water samples R4-2 and LYS-R1, October and November, 1990

Figure 1. Waite Amulet gas samples, October, 1990 (O_2 vs. CO_2)

1.0 INTRODUCTION

This report summarizes the work performed during the period from July 1, 1990 through March 31, 1991 by the Department of Geological Sciences, McGill University, on the project "The effectiveness of engineered soil covers on reactive mine tailings at Waite Amulet, Québec." The work was funded by the Centre de recherches minérales (CRM) with the cooperation of the Noranda Technology Centre. The contractor for McGill University was the Mineral Exploration Research Institute (MERI-IREM).

The principal scientific goals of the work for this project carried out at the Department of Geological Sciences, McGill University, are to develop a better understanding of the role of S-bearing gases during the oxidation of sulfide-bearing tailings and to document the geochemical evolution of water samples collected from the covered and uncovered test plots at Waite Amulet.

Six tasks were identified in the Scope of Work sections, as detailed in the Terms of Reference of the contract (Dossier STM-89TE17) between CRM and MERI-IREM:

1. Participation in the design of monitoring units (gas monitors, piezometers, and lysimeters)
2. Site visits to install instrumentation and to sample groundwater and pore gases.
3. Chemical analysis of gas and water samples.
4. Geochemical modeling using WATEQ4F and PHREEQE software.
5. Analysis of geochemical data.
6. Interpretation of results and reporting.

Results of tasks 1, 2, and 3 in the Scope of Work are presented in sections 2.1, 2.2, and 2.3, respectively. Tasks 4, 5, and 6 are accomplished in sections 3 and 4 of this report.

2.0 RESULTS

2.1. Design of monitoring units

Prior to installation of the field plots at Waite Amulet, C. Alpers of McGill met with E. Yanful and L. St.-Arnaud of the Noranda Technology Centre (NTC) to discuss the design of the monitoring units. Because both McGill and NTC would have the need to sample gases from several depths in each test plot, a design was considered with two stainless steel tubes bottoming at each desired depth. This design was rejected, however, because of the unknown effects of interaction between the two withdrawal points, and the desire to analyze all gasses from the same exact location. Instead, it was agreed that a single extraction point would be used, and that gas would be withdrawn alternately for analysis of O₂ by NTC and of CO₂ and S-bearing gases by McGill.

The locations of piezometers and lysimeters proposed by NTC were found to be acceptable. C. Alpers voiced some concern that lateral flows could effect the test plots, which were designed with the assumption of predominantly vertical flow. Therefore, additional piezometers were placed around the test plots (outside the chain-link fence) so that water levels could be monitored and lateral flows detected.

2.2. Site visits and on-site measurements

2.2.1 October, 1990

Two site visits were made by the McGill-Geological Sciences group during the study period (July 1, 1990 through March 31, 1991). The first trip, on October 14-15, 1990, was made by Prof. C. Alpers accompanied by students S. Montgomery and M. Lund. Because of a relatively high water table due to recent rainfall, all three of the gas sampling ports in plot R-1 were saturated, as were eight of the ports in R-2, -3, and -4, such that no gas samples could be taken from these depths (Table 1). Of the ten gas ports which could be sampled of the 21 total in the test compound, five were taken in duplicate, for a total of 15 samples. In addition, a sample of the air was taken for comparison.

Gas samples averaging 400 mL were pumped from the various depths of the sampling tubes into evacuated sample bags that had previously been purged with nitrogen gas. Pumping was performed with a hand-held, battery operated pump. Samples successfully obtained were analyzed on-site for O₂ concentration by S. Payant (NTC), C. Alpers, and S. Montgomery using a portable oxygen meter belonging to NTC. Splits of the gas samples were taken by C. Alpers and S. Montgomery for analysis of CO₂ and S-bearing gases (see section 2.3.1).

Water samples were taken during the October, 1990 trip at 20 locations, including one of the four lysimeters (LYS-R1); the other three lysimeters were dry. The sample from piezometer 9-6 was taken in triplicate (Table 2). Measurements of pH and redox EMF were made by C. Alpers, M. Lund, and S. Montgomery in duplicate using McGill equipment (Table 3). Results for pH were found to agree within 0.02 units on the parallel instrumentation, which included one Orion Model 290 pH meter and one Orion Model 250 meter, each connected to

an Orion Triode electrode. Specific conductance and temperature were also determined in the field by the McGill group. Acidity and alkalinity titrations (Table 3) were carried out by S. Payant (NTC). The samples were filtered with 0.45 micron membranes. Splits of the water samples were acidified in the field to $\text{pH} < 1$ with concentrated HCl for cation analysis; non-acidified splits were retained for anion analysis. Major elements and metal concentrations (Table 2) were determined by the NTC.

2.2.2. November, 1990

A second trip to Waite Amulet was carried out on November 22-23, 1990 by S. Montgomery. Similarly wet conditions were found to those in October, such that all of the gas ports in plot R-1 were saturated and nine of the other gas ports in plots R-2, -3, and -4 did not yield gas samples. Gas samples were taken and O_2 measured from ten locations (Table 4); one site was sampled in duplicate.

Water samples were taken in November, 1990 from the eight piezometers in the four test plots plus from lysimeter LYS-R1. Two additional samples of surface water (WA-SD-1 and -2) were taken by S. Montgomery from the seepage ditch at the road along the southern side of the tailings pile. Field measurements and sample preparation were carried out in the same manner as described for the October, 1990 samples. Results are shown in Tables 5 and 6.

2.3. Chemical analyses

2.3.1. Gas samples

Carbon dioxide concentrations were determined at McGill Univ. using a CO_2 meter with an infrared absorbance detector and a flow-through pump that allowed for sample retrieval after analysis. Results for gas samples taken during October, 1990 are given in Table 1 and plotted in Figure 1. Several extremely high concentrations of CO_2 were encountered, some apparently in excess of 20%. These samples required substantial dilution to put the unknown concentrations in the range of the CO_2 meter. A relatively high uncertainty of $\pm 25\%$ of the amount present must be applied to these data for CO_2 because of difficulties with the dilution method used. These difficulties were overcome at a later date with the subsequent batch of samples. In addition, a serious calibration error may have been made on the October samples, given that the sample of air gave a reading of 0.72% (7,200 ppm), a value about 20 times the expected concentration. Therefore, the results for CO_2 from the October, 1990 samples should be considered to be correct in a qualitative and relative sense only.

Despite the above limitations, a well-defined, inversely proportional relationship can be seen between CO_2 and O_2 for the October, 1990 samples (Figure 1). No clear relationships are evident between gas concentrations and the nature of the geologic material at the point of sampling (clay, sand, or tailings; Figure 1). The lowest apparent concentration of O_2 (4.4%) was found in plot R-3 in a sand layer at a depth of 1.05 m (samples R-3-D1 and -D2); these two samples had among the highest apparent concentrations of CO_2 (greater than 30%).

The samples taken in November, 1990 (Table 4) gave much more reasonable results when analyzed for CO₂ in the laboratory, with values ranging from 550 to 43,000 ppm (0.055% to 4.3%). As with the first batch of samples, dilution was necessary. The dilution method used involved purging a length of tubing attached to the valve on the sample bag, sealing the open end of the tube, and then drawing the contents into a plastic syringe by piercing the tube. The dilution gas (a standard with 749 ppm CO₂) was taken directly from a 3L sample bag equipped with a teflon septum. This procedure was an improvement over the previously used method in that the ratio of sample gas to dilution gas was more accurately known. There was, however, possible error introduced as a result of air contamination during the sealing of the tube after purging with the sample. To minimize errors in future CO₂ measurements, it is recommended that samples should be collected in bags equipped with teflon septa. An inverse relationship between O₂ and CO₂ concentrations can also be seen in the November, 1990 data (Table 4). A general trend of decreasing O₂ and increasing CO₂ concentrations with depth is maintained in test plots R-2, R-3, and R-4.

Qualitative analysis of S-bearing gases (COS, CS₂, H₂S, and SO₂) was attempted with samples from both sampling trips using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The GC-MS instrument used is a Varian unit in the laboratory of Dr. J.-P. Farant, McGill School of Occupational Health. A sample aliquot (250 uL) was introduced into the GC-MS with a gas-tight syringe. The aliquot was obtained by purging a short length of tubing attached to the valve on the sample bag, sealing the open end with a clamp, and then piercing the tube with the syringe needle. This procedure resulted in wastage of sample due to the purging of the tube and may also have resulted in sample contamination due to possible air entry into the tube during clamping of the open end. Several of the Waite Amulet samples showed the presence of COS gas; however, a very similar spectrum was observed for each of the samples analyzed, suggesting the possibility of contamination. In fact, the laboratory in which the analyses were performed may contain a significant background concentration of COS as a result of other analyses performed there. No evidence of CS₂, H₂S, or SO₂ was detected.

2.3.2. Water samples

Water samples taken in October and November, 1990 were analyzed for major cations and anions plus selected trace metals by NTC. Results provided by NTC are given in Tables 2 and 5. In addition, the trace elements As, Sb, Se, and Hg were analyzed at McGill using hydride generation-atomic absorption spectroscopy (HG-AAS). Results of the HG-AAS analyses are shown in Table 7 and are summarized below.

Arsenic was detected (above a detection limit of 0.5 ppb) in 15 of 30 samples analyzed (including 3 duplicates). Three values above 10 ppb were found: sample 9-6 (October) and sample LYS-R1 (October and November).

Antimony was detected (above 0.5 ppb) in only four of 30 samples. Again sample LYS-R1 showed the highest values (2.4 and 9.3 ppb in October and November, respectively).

Selenium was detected (above 0.5 ppb) in 11 of the 30 samples analyzed. LYS-1 showed detectable Se in both October (0.9 ppb) and November (1.5 ppb), however the highest Se concentration was found in sample R2-1, which contained 3.1 ppb in November and 1.0 ppb in October.

Mercury was not detected in any of the samples taken in October, above a detection limit of 2.0 ppb. Analysis of Hg in the samples taken in November, 1990 was not attempted.

3.0 GEOCHEMICAL MODELLING

Geochemical modelling was carried out for selected water samples taken during October and November, 1990 to accomplish two distinct objectives: (1) to evaluate the quality of the geochemical data by checking the charge balance and (2) to determine if certain samples are saturated, super-saturated, or under-saturated with respect to commonly formed mineral phases. Objective (2) is an essential part of any attempts to evaluate the role of mineral precipitation and dissolution in controlling water geochemistry.

3.1 Charge balance and error analysis

The computer program WATEQ4F (Ball et al., 1991) was used to evaluate the charge balance of four water samples taken in October and November, 1990. Attention was focussed on samples R4-2 and LYS-R1, which showed the most evidence of sulfide oxidation; these two samples had the lowest pH (3.8 to 3.9), highest acidity (4,300 to 53,000 mg/L CaCO₃), and elevated total Fe (540 to 2010 mg/L).

Prior to computer-aided analysis of the analytical data, inspection revealed an apparent error in the Zn value for LYS-R1, reported as "8570" mg/L for November, 1990 (Table 5), compared with a value of 840 mg/L for October (Table 2). Consideration of typical ratios for Fe/Zn and Cd/Zn in mine waters strongly suggests that the Zn value for November should have been reported as "857" mg/L; this lower value was used in all calculations.

Results of charge balance calculations using WATEQ4F are shown in Table 8. Discrepancies for sample R4-2 were relatively small: +19.4% (October) and +0.8% (November), whereas for sample LYS-R1, discrepancies were rather large: -47.3% (October) and -70.4% (November). In theory, all solutions must be perfectly charge balance (0.0% discrepancy) however in practice, discrepancies less than 10% can be attributed to reasonable analytical errors plus uncertainties in the thermodynamic constants used in the speciation calculations. Charge imbalances of the magnitude observed for sample LYS-R1 indicate a major problem with one or more of the chemical analyses. Past experience with the analysis of acid mine waters suggests that sulfate, the dominant anion, is often the source of these discrepancies.

To correct the apparent analytical errors in sulfate concentration for the samples from LYS-R1 (October and November), the program PHREEQE (Parkhurst et al., 1980) was used. One option when running PHREEQE is to let the program achieve charge balance by adjusting the concentration an element chosen by the user. The revised sulfate

concentrations are shown in Table 8; reductions by 15 to 25 % were needed for the October and November samples, respectively. These revised concentrations were put into WATEQ4F, from which revised values of the charge balance parameters were computed (+2.2 and +5.3%, respectively). These values are non-zero because of the absence from PHREEQE of some of the cationic trace elements (Cd, Mn), but the revised results (Table 8) are still within the acceptable range for charge imbalance.

3.2 Saturation index analysis

For each water sample modelled, the WATEQ4F program computes a value for the Saturation Index (SI) for each mineral in its database for which the appropriate elements have been included. A value of SI equal to 0.0 indicates that the water is exactly saturated with respect to that mineral, or that the water and mineral are in apparent thermodynamic equilibrium. Positive values of SI indicate a state of supersaturation, where there is a tendency for the mineral to form from the water in the absence of any kinetic barriers. Negative values of SI correspond to states of undersaturation, where the mineral would tend to dissolve if put in contact with the water in question.

Results of the mineral saturation index calculations are shown in Table 8 for selected minerals. Attention was focussed on Fe-, Al- and SO_4 -bearing minerals which are known to form in similar environments, as these are the principal components ("major elements") in the acidic waters. All four samples are apparently saturated or slightly supersaturated with respect to gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), which is a common property of waters to which a large amount of sulfate has been added. It is reassuring that the charge balance adjustment brought the apparent degree of gypsum supersaturation closer to zero in both cases.

Other minerals apparently supersaturated include ferrihydrite (taken as $\text{Fe}(\text{OH})_3$ in WATEQ4F), alunite [$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$], and jarosite [$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$]. The latter two minerals are commonly supersaturated in actively weathering sulfide-bearing systems; the phases do form over geologic time frames (in the case of alunite) and over several years' time (for jarosite), but there are kinetic barriers which prevent instantaneous formation at low temperatures. Ferrihydrite, or amorphous Fe^{III} -hydroxide as it has been previously known, is a very likely phase to control the solubility of aqueous Fe^{III} . The slight but consistent amount of apparent supersaturation may indicate the formation of a somewhat less soluble (i.e. more stable) phase than the one in the WATEQ4F database, a systematic error in the pH measurements, or a problem with filtration. Given the reproducibility of pH for both samples between October and November, the proximity to the pH=4 standard, and the use of two parallel sets of pH meter and electrode which agreed within 0.02 units, such a systematic error in pH is unlikely.

The presence of colloidal particles of $\text{Fe}^{\text{III}}(\text{OH})_3$ could also explain the apparent supersaturation. Particles smaller than the 0.45 micron diameter membranes are commonly observed in this type of setting, and could easily cause the observed degree of apparent supersaturation. The fact that gibbsite is undersaturated in all samples indicates that a similar problem did not obtain for $\text{Al}(\text{OH})_3$. Gibbsite undersaturation is further evidence that the apparent supersaturation with respect to alunite is real, and not simply an artifact of artificially high values of dissolved aluminum due to colloids passing through the filter membranes.

3.3 Iron redox speciation: comparison to field Eh

Concentration values for Fe_{II} and Fe(total) were input to WATEQ4F, which computed values of the Eh for this redox couple. These values are compared with the field measurements of redox EMF and Eh in Table 8. The comparison is poor for three of the four samples, and fairly close (within 100 mV) only for one sample. Given that these four samples are among those with the highest iron concentrations, one would expect much better agreement if the field Eh measurements had been taken properly.

The consistent results for the Saturation Index of ferrihydrite suggest strongly that it is essential to continue analysis of Fe_{II} and Fe(total) if additional work is to be done on iron geochemistry. The field EMF measured with the platinum electrode does not appear to be useful as any kind of an accurate predictor of Fe^{II} given Fe(total), or vice versa.

4.0 DISCUSSION - INDICATIONS FOR FUTURE WORK

4.1 Gas geochemistry

The results from the first nine months of this study provide some encouragement that S-bearing gases can be analyzed quantitatively using GC-MS techniques. It was clear from reconnaissance attempts with the GC-MS analysis that the GC-MS technique is a very sensitive method, but is also susceptible to contamination. Furthermore, the GC-MS is an extremely expensive instrument to run and to maintain. Conventional GC with a flame photometric detector and a teflon column designed for analysis of S-bearing gases should provide us with the analyses needed for this study, given expected concentrations in the 1 ppm range.

Additional analysis of pore gases should be supplemented by analysis of gas desorbed from soil and artificial sorbents (e.g. zeolites) taken from around the site. Another promising technique to be investigated is the degassing of waters followed by GC or GC-MS. This would allow analysis of pore gases and, potentially, determination of sulfide oxidation rates even in the flooded conditions commonly observed at Waite Amulet and other areas with similar climate and hydrologic setting.

4.2 Stable Isotopes

The origin of the CO₂ observed in the soil gas profiles should be investigated further using stable isotope methods. Analysis of both $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in soil gas carbon dioxide has been used successfully in a number of areas to put constraints on the origin of both the carbon and the oxygen in the carbon dioxide (e.g. Alpers et al., 1990). Some possible sources of carbon are: (1) oxidation of organic matter, (2) dissolution of carbonate minerals in tailings, (3) dissolution of carbonate minerals in compacted clay, (4) dissolution of carbonate minerals in limestone added during revegetation efforts, (5) trapped air, and (6) active plant respiration. Of course, source (6) is unlikely on the test plots, because all vegetation has been removed.

4.3 Water geochemistry

The relatively low concentrations of As, Sb, Se, and Hg observed in the samples taken during October and November, 1990 indicate that further work on these elements would probably not be useful as part of this study. Higher concentrations would be necessary to carry out, for example, comparative studies of transport of these elements, or studies of redox and metal-organic speciation which had been considered.

Separate analysis of Fe^{II} and Fe(total) should be continued so that iron geochemistry can be evaluated. The field values of redox Eh are apparently not very good predictors of iron redox speciation even in the most Fe-rich waters. There is a problem computing Fe^{III} concentration for several samples for which the reported values for Fe(total) are less than the reported value for Fe^{II}. The methods being used by NTC for these determinations should be reviewed. If the Fe(total) is being done either by inductively-coupled plasma (ICP) or by atomic absorption (AA), the methods should be replaced by a spectrophotometric (UV-visible) method using a complexing agent such as Ferrozine, which can be used for both Fe^{II} and Fe(total) and which is much less likely to yield Fe^{II} values greater than Fe(total).

5.0 REFERENCES

Alpers, C.N., Dettman, D.L., Lohmann, K.C., and Brabec, D., 1990, Stable isotopes of carbon dioxide in soil gas over massive sulfide mineralization at Crandon, Wisconsin. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 38, p. 69-86.

Ball, D.K., and Nordstrom, D.K., 1991, User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters. U.S. Geological Survey Open-File Report 91-183, 189 p.

Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.L., and Plummer, L.N., 1980, PHREEQE - A computer program for geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resource Investigations Report 80-96, 210 p. (revised, 1985).

TABLE 1. WAITE AMULET GAS SAMPLING - OCT. 15, 1990

PLOT	DEPTH(m)	MATERIAL	OXYGEN	CARBON DIOXIDE (%)	SAMPLE VOLUME (mL)
R-1	-----NO SAMPLES - SATURATED-----				
R-2-AIR				0.72	500
R-2-A	0.15	SAND	20.6	0.12	500
R-2-B	0.50	CLAY	20.5	-----NO SAMPLE-----	
R-2-C	0.70	CLAY	6.9	28*	500
R-2-D	1.05	SAND	6.6	18*	350
R-2-E	1.45	TAILINGS	18.0	11*	400
R-2-F	1.70	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-2-G	1.95	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-A	0.15	SAND	20.5	0.15	600
R-3-B1	0.50	CLAY	5.4	31*	300
R-3-B2	0.50	CLAY	5.4	28*	500
R-3-C1	0.70	CLAY	5.9	22*	300
R-3-C2	0.70	CLAY	5.9	38*	500
R-3-D1	1.05	SAND	4.4	33*	400
R-3-D2	1.05	SAND	4.4	38*	250
R-3-E	1.45	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-F	1.70	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-G	1.95	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-A1	0.15	SAND	20.4	0.14	500
R-4-A2	0.15	SAND	20.4	0.14	400
R-4-B1	0.45	SAND	15.3	12*	500
R-4-B2	0.45	SAND	15.1	11*	500
R-4-C	0.85	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-D	1.10	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-E	1.35	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-10**				0.10	250

* Uncertainty in values of approx. 25% due to dilution method.

** Sample R-10 was taken from the top of a water sample smelling of hydrogen sulfide.

TABLE 2A. WAITE AMULET METAL AND MAJOR ION CONCENTRATIONS, OCTOBER, 1990
(from Noranda Tech. Ctr.)

Piezometer number	Al (ng/L)	Cu (ng/L)	Pb (ng/L)	Zn (ng/L)	Cd (ng/L)	Fe(T) (ng/L)	Fe++ (ng/L)	Mg (ng/L)	Mn (ng/L)	K (ng/L)	Ca (ng/L)	Na (ng/L)	SO ₄ -- (ng/L)	Cl-(2) (ng/L)
LYS-R1	6830	123	<0.04	840.00	17.60	2010.0	1220*	325	38.20	3.64	348.0	13.70	51300	0.86
R1-1	1.86	<0.01	<0.04	1.82	<0.01	164.0	171.0	144	29.50	2.55	288.0	48.90	1640	4.09
R1-2	1.40	<0.01	0.07	7.37	<0.01	740	758.0	130	17.50	8.87	462.0	16.20	2930	1.44
R2-2	9.79	0.07	<0.04	21.90	<0.01	317	305.0	109	18.40	7.98	558.0	13.00	2290	1.23
R2-1	0.21	<0.01	<0.04	<0.01	<0.01	92.20	85.9	889	1.87	41.10	457.0	23.60	4340	17.50
R3-1	<0.10	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	8.04	8.0	576	0.90	67.30	216.0	896.00	4050	21.30
R3-2	1.84	<0.01	0.14	8.23	0.01	1070	1100.0	227	24.20	17.60	574.0	21.90	3830	3.66
R4-1	<0.10	<0.01	<0.04	<0.01	<0.01	7.7	6	874	1.26	77.30	308.0	875.00	5410	27.00
R4-2	22.80	0.54	<0.04	24.80	0.05	622.0	537 569*	159	22.90	7.27	595.0	21.40	3000	2.09
5-1	0.20	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	107.00	101.0	280	7.6	17.30	386.0	244.00	1940	7.93
5-2	<0.10	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	21.70	18.80	2430.00	1.52	62.30	455.00	63.80	10500	19.50

- (1) Samples filtered and acidified
(2) Samples filtered and not acidified
(T) Total
(C) Casing
* -per volume

TABLE 3. PHYSIO-CHEMICAL PARAMETER VALUES FOR THE GROUNDWATER SAMPLES FROM WAITE AMULET PIEZOMETERS, OCTOBER, 1990
(from Noranda Tech. Ctr.)

Piezometer number	temperature C	pH	Eh mV(1)	Conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$	Acidity mg/L CaCO_3	Alkalinity mg/L CaCO_3
LYS-R1	7.5	3.78	416	11000	52600	<50
WA 10-1	7.0	6.84	393	700	100	800
WA 10-2	dry					
WA 5-1	7.6	6.61	419	1700	300	600
WA 5-2	7.5	7.66	415	4700	50	200
WA 9-1	6.4	7.12	420	1150	50	600
WA 9-2	7.2	6.92	440	1300	<50	100
WA 9-3	7.3	8.20	420	2600	<50	<50
WA 9-4	7.5	7.59	436	3300	<50	200
WA 9-5	8.0	7.66	451	1350	<50	<50
WA 9-6	7.5	6.96	489	2500	100	300
WA 9-7	8.2	6.81	462	2550	100	250
WA R1-1	8.5	5.55	443	1150	450	100
WA R1-2	10.0	5.87	469	1200	1200	<50
WA R2-1	9.7	4.41	431	1350	800	<50
WA R2-2	10.4	6.50	439	1450	200	1400
WA R3-1	8.5	7.66	398	2950	<50	200
WA R3-2	9.1	6.10	401	2050	1500	<50
WA R4-1	8.7	7.37	413	3350	<50	100
WA R4-2	8.3	3.87	410	1650	4300	<50

(1) Correction for platinum electrode: Eh measured + 244 mV

TABLE 4. WAITE AMULET GAS SAMPLING - NOV. 22 - 23, 1990

PLOT	DEPTH(m)	MATERIAL	OXYGEN	CARBON DIOXIDE(ppm)	SAMPLE VOLUME(mL)
R-1	-----NO SAMPLES - SATURATED-----				
R-2-A	0.15	SAND	20.4	690	250
R-2-B	0.5	CLAY	20.4	625	250
R-2-C	0.7	CLAY	9.3	18875	250
R-2-D	1.05	SAND	9.2	1450	250
R-2-E	1.45	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-2-F	1.7	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-2-G	1.95	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-A	0.15	SAND	18.9	2795	250
R-3-B	0.5	CLAY	6.1	35250	250
R-3-C	0.7	CLAY	7.5	33250	250
R-3-D	1.05	SAND	3	43250	250
R-3-E	1.45	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-F	1.7	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-3-G	1.95	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-A	0.15	SAND	15.7	2425	275
R-4-B1	0.45	SAND	12.7	1125	100
R-4-B2	0.45	SAND	12.2	10450	275
R-4-C	0.85	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-D	1.1	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-E	1.35	TAILINGS	-----SATURATED-----		
R-4-AIR			20.6	550	275

TABLE 5. WAITE AMULET METAL AND MAJOR ION CONCENTRATIONS, NOVEMBER, 1990
(from Noranda Tech. Ctr.)

Piezometer number	Al (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)	Fe(T) (mg/L)	Fe++ (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	SO ₄ -- (mg/L)	Cl-(2) (mg/L)
LYS-R1	5090	73.0	<0.04	8570	9.94	1590	995	171	20.3	5.93	490	8.44	43100	2.05
WA-R1-1	1.33	0.01	<0.04	0.79	<0.01	179	211	134	29.3	2.83	260	45.3	1540	2.85
WA-R1-2	2.16	0.79	<0.04	5.83	<0.01	67.7	72	22.8	3.83	5.99	310	5.14	920	4.66
WA-R2-2	0.08	0.03	0.03	1.07	0.02	5.23	0.17	51.1	0.96	4.41	470	16.6	920	0.38
WA-R2-1	0.44	<0.01	<0.04	<0.01	<0.01	74.3	103	867	1.33	62.1	350	22.6	4300	13.5
WA-R3-1	0.03	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	6.74	6	528	0.67	92.4	170	984	4620	25.4
WA-R3-2	2.94	0.02	<0.04	12.8	<0.01	1020	1020	204	18.6	28.7	500	19.5	3880	4.04
WA-R4-1	0.06	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	4.36	1.48	667	0.85	96.8	220	936	5210	29.40
WA-R4-2	14.5	0.30	<0.04	16.4	<0.01	546	525	161	15.9	16.1	500	73.3	3080	1.77

- (1) Samples filtered and acidified
 (2) Samples filtered and not acidified
 (T) Total
 (C) Casing

Table 6. Field measurements of pH and Redox EMF, November, 1990

<u>Sample Number</u>	<u>pH</u>	<u>EMF (mV)</u>	<u>Eh* (mV)</u>	<u>Time after collection (sec)</u>
R-1-1	5.45	134.1	378	60
R-1-2	5.22	207	451	110
R-2-1	6.48	73.2	317	90
R-2-2	6.65	-7.8	236	210
R-3-1	7.56	-90.4	154	210
R-3-2	4.96	145.5	390	180
R-4-1	7.38	-13.6	230	200
R-4-2	3.83	311.2	555	240 (approx.)
WA-L1	3.88	60.8	305	300
WA-SD-1	2.52	209	453	30
WA-SD-2**				

* Eh computed as EMF (mV) + 244 mV

** Samples WA-SD-1 and -2 collected from seepage ditch along road; pH and EMF measured with Noranda meter; all other measurements with McGill meter (Orion SA-290).

Table 7. Concentrations of As, Sb, Se, and Hg in water samples from Waite Amulet, collected October and November, 1990

All concentrations in micrograms/L (ug/L)

<u>Sample Number</u>	<u>As</u>	<u>Sb</u>	<u>Se</u>	<u>Hg</u>
<u>October, 1990</u>				
R1-1A	0.9	ND	ND	ND
R1-1B	0.6	ND	ND	ND
R1-2	2.0	ND	0.8	ND
R2-1	ND	ND	1.0	ND
R2-2	ND	ND	ND	ND
R3-1A	ND	ND	ND	ND
R3-1B	1.0	ND	ND	ND
R3-2A	3.5	ND	ND	ND
R3-2B	3.7	ND	ND	ND
R4-1	ND	0.6	0.7	ND
R4-2	ND	ND	1.0	ND
5-1	0.8	ND	ND	ND
5-2	ND	ND	ND	ND
9-1	ND	ND	1.3	ND
9-2	ND	ND	0.8	ND
9-3	ND	ND	1.0	ND
9-4	ND	ND	ND	ND
9-5	ND	ND	ND	ND
9-6	13.4	ND	ND	ND
9-7	9.4	ND	ND	ND
10-1	2.0	ND	ND	ND
L-1	23.1	2.4	0.9	ND
<u>November, 1990</u>				
R1-1	ND	ND	ND	NA
R1-2	ND	ND	1.8	NA
R2-1	ND	0.3	3.1	NA
R2-2	ND	ND	ND	NA
R3-1	ND	ND	ND	NA
R3-2	3.1	ND	ND	NA
R4-1	ND	ND	ND	NA
R4-2	3.1	ND	ND	NA
SD-1	1.9	ND	ND	NA
SD-2	ND	ND	ND	NA
L-1	28.	9.3	1.5	NA

ND = not detected; detection limits: As 0.5 ug/L, Sb 0.5 ug/L, Se 0.5 ug/L, Hg 2 ug/L.

NA = not analyzed

Table 8. Results of speciation-saturation calculations using programs PHREEQE and WATEQ4F for Waite Amulet water samples R4-2 and LYS-R1, October and November, 1990

A. Concentrations as analyzed

Sample	Charge Balance (%) [*]	SO ₄ (mg/L)	SI § gypsum	SI gibbsite	SI alunite	SI jarosite	SI ferrihydrite	Eh (mV) meas.	Eh (mV) calc.#
R4-2 Oct.	+ 19.4	3,000	+ 0.09	- 2.14	+ 0.40	+ 7.35	+ 1.45	.410	.598
R4-2 Nov.	+ 0.8	5,210	+ 0.04	- 2.50	- 0.11	+ 6.36	+ 0.96	.555	.580
LYS-R1 Oct.	- 47.3	51,300	+ 0.12	- 0.68	+ 5.87	+ 9.30	+ 1.71	.416	.623
LYS-R1 Nov.**	- 70.4	43,100	+ 0.27	- 0.80	+ 5.73	+ 9.24	+ 1.65	.305	.622

B. Sulfate concentration adjusted to improve charge balance ##

Sample	Charge Balance (%) [*]	SO ₄ ## (mg/L)	SI gypsum	SI gibbsite	SI alunite	SI jarosite	SI ferrihydrite	Eh (mV) meas.	Eh (mV) calc.#
LYS-R1 Oct.	+ 2.2	43,447	+ 0.04	- 0.51	+ 6.12	+ 9.15	+ 1.76	.416	.622
LYS-R1 Nov.**	+ 5.3	32,725	+ 0.16	- 0.53	+ 6.12	+ 9.02	+ 1.71	.305	.621

* Charge balance computed for speciated solution by program WATEQ4F as (equivalent cations - equivalent anions)/0.5*(|cations| + |anions|)

** Zn value for November, 1990 corrected from 8570 to 857 mg/L(sec text).

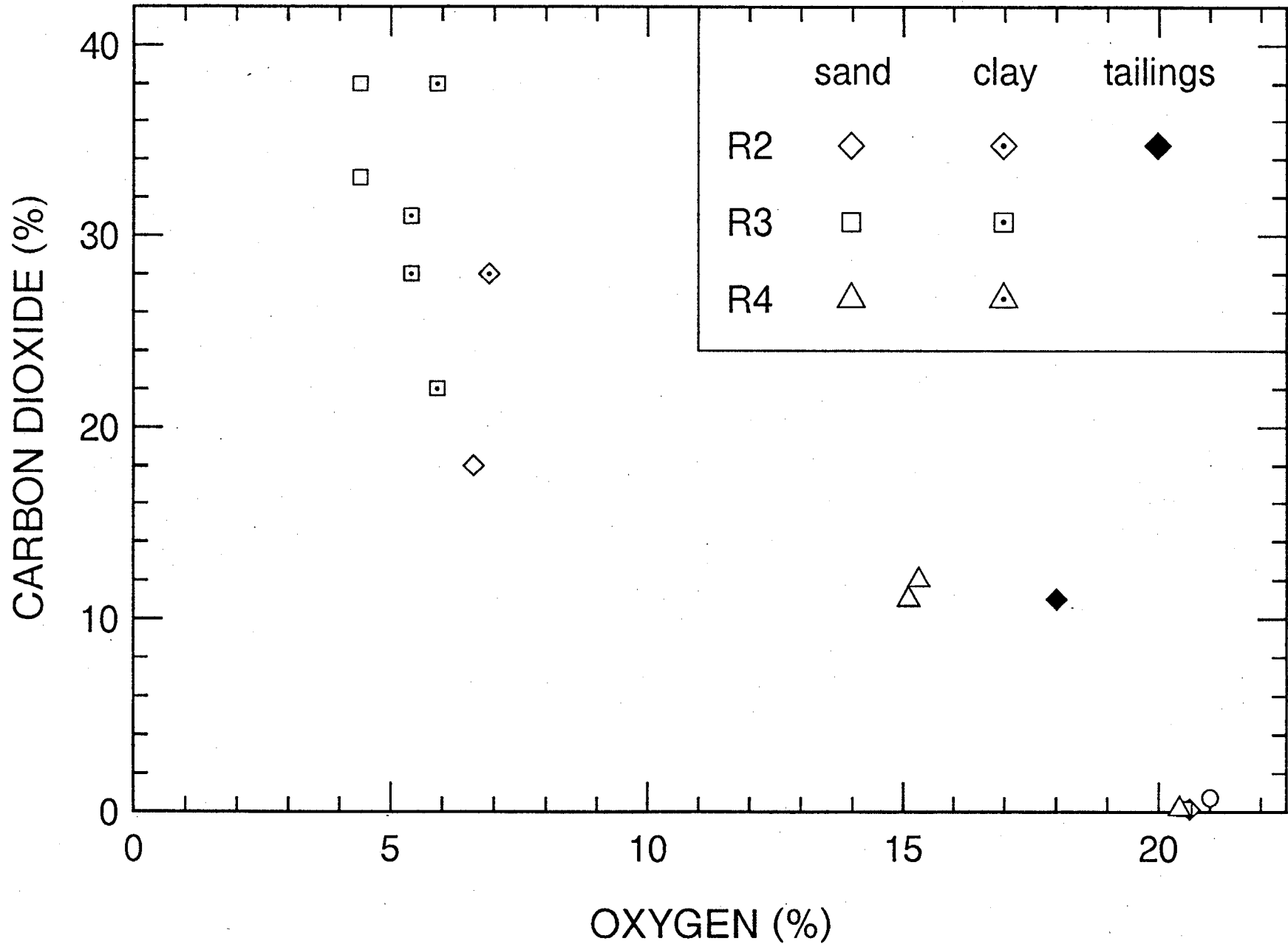
§ SI = Saturation Index: Positive values indicate supersaturation, negative numbers undersaturation.

Eh calculated by program WATEQ4F using measured concentrations of Fe^{II} and Fe(Total).

Adjustment to SO₄ concentration computed using program PHREEQE.

FIGURE 1.

WAITE AMULET GAS SAMPLES, OCT., 1990



RAPPORT FINAL

L'ETUDE D'ECHANTILLONNAGE DE GAZ WAITE AMULET

ANNEE D'EXERCISE 1991-1992
(1^{ER} AVRIL 1991 - 31 MARS 1992)

TITRE DU PROJET: L'efficacité des recouvrements de sol sur
les résidus miniers réactifs à Waite
Amulet, Québec

POUR: Centre de recherches minérales
Ministère de l'Energie et Ressources (Mines)
2700, rue Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

PAR: Shelagh Montgomery et Professeur Charles
N. Alpers, département des sciences
géologiques, Université McGill
3450 rue Université
Montréal (Québec) H3A 2A7

LISTE DE TABLEAUX ET FIGURES	iii
1.0. INTRODUCTION	1
2.0 RESULTATS	2
2.1 visites de sites	2
2.1.1. mai 1991	2
2.1.2. juillet 1991	2
2.1.3. novembre 1991	3
2.2. analyses chimiques	4
2.2.1. analyse d'oxygène sur site	4
2.2.2. gaz carbonique	4
2.2.3. gaz sulfurés	5
2.2.4. isotopes stables	6
3.0. PROPOSITIONS POUR L'ETUDE FUTURE	6
3.1. échantillonnage sur site	6
3.2. colonnes au Centre de Technologie de Noranda	6
3.3. analyse d'isotopes stables	6
4.0. REFERENCES	7
TABLEAUX	8
FIGURES	11

LISTE DE TABLEAUX ET FIGURES

- Tableau 1. L'échantillonnage de gaz du site Waite Amulet (le 13-14 mai, 1991)
- Tableau 2. Résultats d'échantillonnage de gaz du 23-24 juillet, Waite Amulet
- Tableau 3. Résultats d'échantillonnage de gaz du 22 novembre, Waite Amulet
- Figure 1. Oxygène vs. profondeur (mai 1991)
- Figure 2. Oxygène vs. profondeur (juillet/novembre 1991)
- Figure 3. Oxygène vs. profondeur (site R4, 1991)
- Figure 4. Gaz carbonique vs. profondeur (juillet/novembre, 1991)
- Figure 5. Oxygène vs. gaz carbonique (juillet, 1991)
- Figure 6. Exemple d'un chromatogram démontrant les indications pour H_2S , COS , CS_2
- Figure 7. Chromatogram démontrant le COS et CS_2 dans l'argille de R2C à une profondeur de 0.70 m.
- Figure 8. COS vs. profondeur (sites R2 & R3, juillet, 1991)
- Figure 9. COS vs. profondeur (site R4, juillet, 1991)

1.0. INTRODUCTION

Ce rapport résume le travail accompli du 1er avril 1991 au 31 mars 1992 par le département de géologie de l'Université McGill sur "l'Efficacité des recouvrements de sols sur les résidus miniers à Waite Amulet, Québec." Le travail a été fondé par le Centre de recherche minérales (CRM) avec la coopération du Centre de Technologie de Noranda. Le contrat a été géré par I.R. McGill (l'administration de l'université).

Les objectifs scientifiques primaires de ce projet de recherche exécuté au département de sciences géologiques de l'Université McGill, sont de fournir une évaluation géochimique des mouvements de gaz à travers des résidus et des recouvrements et de mieux comprendre le rôle des gaz sulfurés durant l'oxydation des résidus. Le projet sert à évaluer l'efficacité des recouvrements de sol pour les résidus miniers utilisant le site d'épreuve à Waite Amulet près de Rouyn-Noranda, Québec. L'évaluation a été basée sur l'analyse des gaz (COS , CS_2 , H_2S , SO_2) et le CO_2 produit à l'intérieur des résidus recouverts. En déterminant les concentrations des gaz dans les échantillons collectés, on a postulé qu'il était possible d'observer l'effet des recouvrements sur la réduction de l'oxydation des sulfures et la production d'acide. Vu que l'intention des recouvrements est à présenter un obstacle imperméable aux eaux météoriques et réduire la production des eaux d'écoulements d'acide, les analyses quantitatives des gaz donnent une indication de l'étendue et des taux d'oxydation des sulfures permettant une meilleure évaluation des recouvrements.

Les résultats obtenus sur la géochimie des gaz sont présentés.

2.0 RESULTATS

2.1 visites de sites

2.1.1. mai 1991

Du 1er avril 1991 au 31 mars 1992, trois visites ont été effectuées au site d'épreuve de Waite Amulet pour l'échantillonnage. La première visite a été effectuée le 13 et 14 mai 1991 quand Shelagh Montgomery a échantillonner des gaz et des résidus. L'échantillonnage de gaz a été effectué à l'intérieur du complexe de recouvrements géologiques tandis que les résidus ont été pris sur deux profils de résidus - un juste au nord du site et l'autre le long d'un fossé de drainage juste à l'ouest du site.

Avec l'utilisation d'un analyseur de gaz portatif, des relevés *in situ* d'O₂ ont été effectués sur les vingt-deux dispositifs d'échantillonnage pour gaz. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Avant cette visite, un travailleur précédent a noté des difficultés opérationnelles avec le mètre d'O₂. Même si on pensait que le problème était corrigé, le désaccord de quelques données d'O₂ suggère que l'analyseur ne fonctionnait pas. À la suite, le puisement des dispositifs a été continué pour amasser le gaz dans des sacs d'échantillon pour l'analyse de CO₂ et gaz sulfurifère. Sept sur vingt-deux dispositifs ont été échantillonnés avec succès.

Au retour à l'Université McGill, des analyses de CO₂ ont été effectuées utilisant un analyseur de CO₂ avec détecteur infrarouge. Étant donné que tous les échantillons avaient des concentrations plus élevées que la limite supérieure du détecteur (0.05% CO₂), des dilutions ont été fait utilisant des volumes de nitrogène connus (0% CO₂). Ces données sont présentées dans le tableau 1. La balance des échantillons ont été analysés pour du gaz sulfurifère en utilisant un chromatographe à gaz équipé d'un détecteur photométrique à feu et une colonne capillaire "mega-bore" de 30 mètre pour la détection des gaz sulfurés. Sur sept échantillons analysés, R2A, R2C, R2E et R3C ont démontré la présence de COS entre un et deux ppm, tandis que R2D indiquait la présence de CS₂.

2.1.2. juillet 1991

Les 23 et 24 juillet, 1991, Mlle Shelagh Montgomery a visité le site des résidus miniers de Waite Amulet, Rouyn Noranda, dans le but d'échantillonner les gazes. L'échantillonnage des gazes été effectué à l'intérieur du complexe de recouvrements géologiques. Comme aux visites antérieures, des relevés *in situ* d'O₂ ont été effectués sur vingt-deux dispositifs avec l'utilisation d'un analyseur de gaz portatif. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. À la suite, le puisement des vingt-deux dispositifs d'échantillonnage a été continué pour amasser le gaz dans des sacs d'échantillon. Dix-neuf sur vingt-deux dispositifs ont été échantillonnés avec succès. Les trois dispositifs qui ont

été échantillonnés sans succès venaient du site de contrôle.

Pendant cette visite un appareil alternatif d'échantillonnage a été installé. La méthode d'échantillonnage est similaire à celle utilisée par Hinkle et Kantor (1978). Cette méthode utilise une poudre qui absorbe les gaz (gas absorbent molecular sieve powder). La poudre consistant de zéolites artificielles avec un diamètre entre les réseaux cristallins connu (Hinkle et Harms, 1978) a été placée dans six bocaux de silex de 250 mL et recouverts de nappe de coton et gaze. Les bocaux ont été tournés à l'envers et placés dans des trous creusés jusqu'à l'interface de résidus oxydé - non-oxydé. La profondeur moyenne des trous était 35 cm. Les bocaux ont été recouverts de résidus miniers. Les bocaux ont été laissés pour une période de huit semaines puisqu'ils absorbent des émanations de gaz sulfurifères. À la fin de cette période, ils ont été retournés à l'Université McGill pour analyse.

Au retour à l'Université McGill, des analyses de CO₂ ont été effectuées utilisant un analyseur à CO₂ digital. La dilution des échantillons avec un volume connu de nitrogène était nécessaire. Les concentrations de CO₂ sont présentées dans le tableau 2. Le restant de chaque échantillon a été analysé pour les gazes sulfurifères qualitativement utilisant un chromatographe à gaz. Quatorze échantillons avaient des gazes sulfurifères, treize indiquaient la présence de COS seulement et un échantillon possédait du COS et CS₂. Les échantillons qui donnaient de bons résultats sont notés dans le tableau 2.

2.1.3. novembre 1991

Le 22 novembre, 1991, la dernière visite du projet 91/92 au site des résidus miniers de Waite Amulet, Rouyn Noranda, a été effectuée dans le but d'échantillonner les gazes. L'échantillonnage des gazes a été limité à l'endroit des recouvrements géologiques. Avant l'échantillonnage les parcelles ont été puisées tant que l'appareil "in-line" pour détecter l'oxygène donnait un relevé stable. Les résultats de ces prélèvements sont donnés dans le Tableau 3. Suite à l'analyse d'O₂, des échantillons ont été amassés pour des analyses d'isotopes stables et de CO₂. Depuis la dernière visite, trois autres dispositifs d'échantillonnage ont été installés dans le site R4 augmentant le totale à 25 dispositifs. 13 ont été échantillonnés avec succès; les autres étaient saturés.

L'échantillonnage des gaz pour l'analyse d'isotope stable a été effectué utilisant des tubes en verre spécialement fabriqués; ces tubes ont été évacués pour obtenir un vacuum. 10 tubes ont été fournis par le laboratoire GEOTOP de l'UQAM, qui était responsable pour les analyses. Les résultats de $\delta^{13}\text{C}$ sont présentés dans le Tableau 3.

Les gaz ramassés dans des sac à échantillons ont été analysés

à McGill pour le CO₂, utilisant un appareil digitale pour la détection du CO₂. Les données obtenues sont présentées dans le Tableau 3.

Les échantillons n'ont pas été analysés pour les gaz sulfurés comme c'était le cas antérieurement. L'analyse utilisant la chromatographie à gaz n'a pas été possible dû à des problèmes logistiques au laboratoire dans lequel Mlle Montgomery fait ces analyses.

2.2. analyses chimiques

2.2.1. analyse d'oxygène sur site

A chaque visite la concentration d'O₂ aux profondeurs variés dans trois des quatre sites d'épreuves a été analysée avec un détecteur portatif. Ces résultats sont présentés dans les Tableaux 1, 2 et 3 pour les mois de mai, juillet et novembre, respectivement. A quelque reprises, les analyses ont été incomplètes dû à la haute surface de la nappe d'eau à cause d'une récente précipitation ou la fonte des neiges. Pour ces cas, les dispositifs sont notés comme étant sature.

Les difficultés rencontrées avec le détecteur d'O₂ pendant la visite de mai, 1991 sont notées dans la section 2.1.1. et le Tableau 1. Par conséquence, des données problématiques ont été notées. L'exclusion de ces données anomalax démontre une baisse de la concentration d'O₂ avec la profondeur, ce qu'on s'attendait.

La visite de juillet 1991 a fourni les résultats les plus complètes puisqu'il n'y avait aucun problème ni avec la saturation dans les sites ni avec le détecteur d'O₂. Un graphique de la concentration d'O₂ vs. la profondeur est présenté en Figure 2. Comme auparavant, une relation inverse est démontrée.

Le nombre d'analyse d'O₂ obtenu pendant la visite de novembre 1991 a été limité dû à la haute surface de la nappe d'eau. Celles-ci sont présentées vs. la profondeur en Figure 2. Trois nouveaux dispositifs ont été installés au site R4 (section 2.1.3.). Ils ont été installés puisqu'à d'autres occasions, les concentrations d'O₂ sous les recouvrements étaient plus élevées que prévu mettant en question la sûreté de sceau entre le tube d'échantillonnage d'acier inoxydable et la doublure artificielle. Les résultats sont présentés au Tableau 3 et le graphique est au Figure 3.

2.2.2. gaz carbonique

Les concentrations de CO₂ ont été déterminées à l'Université McGill utilisant un analyseur de CO₂ avec détecteur infrarouge. Etant donné que plusieurs échantillons avaient des concentrations plus élevées que la limite supérieure du détecteur (0.05% CO₂), des dilutions ont été fait utilisant des volumes de nitrogène connus

(0% CO₂). Ces données sont présentées dans les Tableaux 1, 2 et 3 pour les mois de mai, juillet et novembre, respectivement. Les données de CO₂ obtenues pour les résidus et autres matériaux de recouvrements étaient érratiques, parfois, il existe des tendances générales. Par exemple, les couches d'argile des sites R2 et R3 ont donné les plus haute concentrations de gaz interstitiels. Figure 4 démontre la variation de CO₂ avec la profondeur pour chaque site du mois de juillet et novembre 1991. Ces résultats peuvent être expliquer par l'emanation de gaz piégé plus profondément ou par la destruction de matière organique dans l'argile. En novembre 1991, des isotopes stables ont été utilisés pour déterminer l'origine du CO₂. Ces résultats sont présentés dans la section 2.2.4. Avec l'exception du CO₂ dans la couche d'argile, il n'y a aucun rapport entre les concentrations de gaz et les matériaux géologiques échantillonnés.

Figure 5 présente un graphique de O₂ vs. CO₂ pour juillet 1991 des sites R1, R3 et R4. Les résultats présentent un rapport inverse des deux gaz entre 7 à 20% O₂.

2.2.3. gaz sulfurés

Des analyses qualitatives pour le contenu de gaz sulfuré (COS, CS₂, H₂S, SO₂) des gaz interstitiels ont été effectuées à l'université McGill avec l'aide de Dr. J.-P. Farant et "The School of Occupational Health". La méthode d'analyse utilisait le transfère direct du gaz dans un sac d'échantillon à une boucle d'échantillon attaché à un chromatograph à gaz; ensuite l'aliquot a passé à travers de la colonne "mega-bore" (30 mètre) au détecteur photométrique à feu avec un "carrier gas" de N₂. Figure 6 montre un chromatogram des standards pour H₂S, COS et CS₂. Figure 7 est un exemple d'un échantillon ou le COS et CS₂ ont été détectés.

Dû aux difficultés rencontrées pendant la production de courbes de calibrations pour les analyses quantitatives, les seules analyses effectuées à date sur les gas sulfurés étaient qualitatives. La concentration relative de COS pouvait être déterminée utilisant les résultats des échantillons obtenus en juillet 1991. L'échantillon qui a donné la plus petite indication sur le chromatogram a été donné une valeur de un. Les autres indications étaient données une valeur relative au minimum. Figure 8 démontre la variation de la concentration de COS vs la profondeur des sites R2 et R3. Cette figure démontre la similarité entre les résultats pour les différents matériaux de recouvrements au deux sites. De plus, il y a une concentration de gaz dans la couche d'argile, suggérant le piègeage. Une même tendance est notée au site R4 où on retrouve la plus haute concentration de COS dans la couche de sable en dessous de la "géomembrane" (Figure 9). Dans la même série d'échantillons, le CS₂ a aussi été détecté dans la couche d'argile du site R2 à une profondeur de 0.70 m. Ni l'H₂S ni le SO₂ ont été détectés dans les gaz échantillonnés. Ces deux gaz ont une grande solubilité dans l'eau (Rose et al., 1979) et donc,

ils sont difficiles à détecter. Le SO_2 était détectable seulement sur des sulfures complètement secs (basé sur une étude par Taylor et al. (1982) dans laquelle la production des gaz sulfurés par la décomposition de sulfures était évaluée). Considérant les conditions humides au site Waite Amulet, il est probable que le moindre H_2S ou SO_2 produit est dissolu dans l'eau.

2.2.4. isotopes stables

Durant la dernière visite en novembre 1991, des gaz ont été amassés utilisant des tubes en verre spécialement fabriquées pour l'analyse d'isotopes stable. L'analyse de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans le CO_2 a été proposée pour mieux déterminer l'origine du CO_2 . Des sources possibles sont (1) l'oxydation de matière organique (2) la dissolution des carbonates dans les résidus (3) la dissolution des carbonates dans l'argile (4) la dissolution des carbonates dans le calcaire utilisé pendant les efforts de reforestation et (5) de l'air piégé.

Les résultats de $\delta^{13}\text{C}$ (Tableau 3) tombent entre -18.2 -14.4‰. Basé sur ces résultats préliminaires, aucune conclusion concrète peut être fait, mais par chance, il est probable que ces valeurs ne soient pas simplement le resultat d'une contribution d'un composant atmosphérique (les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{atmos}}$ sont généralement dans l'ordre de -6‰ (Cerling, 1984).

3.0. PROPOSITIONS POUR L'ETUDE FUTURE

3.1. échantillonnage sur site

Dû au pauvre échantillonnage dans le sit de contrôle R1, on suggère que les dispositifs soient changés et que le drainage soit amélioré. L'échantillonnage au site R4 où deux dispositifs scellés ont été installés doit être continuer pour assurer leur efficacité.

3.2. colonnes au Centre de Technologie de Noranda

Ces expériences à Pointe Claire doivent être échantillonner à chaque mois ou deux fois par mois. Ceux-ci devront produire plus régulièrement un volume suffisant pour l'analyse de CO_2 et S à fin de former un meilleur fond de données.

3.3. analyse d'isotopes stables

L'analyse pour $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ est recommandé pour déterminer l'origine de C et O dans le CO_2 . En plus, l'échantillonnage pour ces analyses devrait être fait à different temps durant l'année, vu que les valeurs varient avec le changement de saisons (Alpers et al., 1990).

4.0. REFERENCES

Alpers, C.N., Dettman, D.L., Lohmann, K.C., and Brabec, D. (1990) Stable isotopes of carbon dioxide in soil gas over massive sulfide mineralization at Crandon, Wisconsin. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 38, p. 69-86.

Cerling, T.E. (1984) The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 71, p. 229 - 240.

Hinkle, M.E. and Harms, T.F. (1978) CS₂ and COS in soil gases of the Roosevelt Hot Springs known geothermal resource area, Beaver County, Utah. *Journal of Research of the United States Geological Survey*, vol. 6, no. 5, p. 571-578.

Hinkle, M.E. and Kantor, J.A. (1978) Collection and analysis of soil gases emanating from buried sulfide mineralization, Johnson Camp area, Cochise County, Arizona. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 9, p. 209-216.

Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) Geochemistry in Mineral Exploration, 2nd Ed., Academic Press Ltd., 657 p.

Taylor, C.H., Kesler, S.E. and Cloke, P.L. (1982) Sulfur gases produced by the decomposition of sulfide minerals: application to geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 17, p. 165-185.

TABLEAUX

TABLEAU 1: Échantillonnage de gaz Waite Amulet (13 et 14 mai, 1991)

SITE	Profondeur(m)	O2(%)	CO2(%)*	COMMENTAIRES
R1A	0.25	20.2		Tous dispositifs pour échantillons ont été déplacé verticalement dû au gel. Tous indiquaient O ₂ atmosphérique. Pas d'échantillons.
R1B	0.50	20.2		
R1C	0.75	20.3		
R2A	0.15	20.4	0.30	SABLE Mètre d'O ₂ défectueuse - donnant
R2B	0.50	16.5	3.72	ARGILE parfois l'air de surface et non
R2C	0.70	12.5	3.08	ARGILE la concentration de l'échantillon.
R2D	1.05	10.9	2.25	SABLE
R2E	1.45	12.1	1.30	RESIDUS
R2F	1.70	20.0		RESIDUS
R2G	1.95	20.2		RESIDUS
R3A	0.15	20.5		SABLE
R3B	0.50	16.3		ARGILE Encore, désaccord avec les
R3C	0.70	15.0		ARGILE données d'oxygène.
R3D	1.05	12.5	2.38	SABLE
R3E	1.45	20.4	1.90	ARGILE
R3F	1.70	0.0		RESIDUS
R3G	1.95	20.1		RESIDUS
R4A	0.15	20.6		SABLE (* couvercle imperméable artificielle
R4B	0.45	16.0		SABLE entre R4A et R4B).
R4C	0.85	14.7		RESIDUS
R4D	1.10	20.4		RESIDUS Oxygène douteux.
R4E	1.35	20.4		RESIDUS

* En l'absence de donnée, aucun échantillon n'a été obtenu.

Tableau 2: Resultats d'échantillonnage de gaz Waite Amulet (23 et 24 juillet, 1991)

ECHAN.	PROF.(m)	MATERIEL	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	GAZ SULF.
R1A	0.25	RESIDUS	20.3		
R1B	0.50	RESIDUS	20.6		
R1C	0.75	RESIDUS	20.4		
R2A	0.15	SABLE	20.3	0.46	
R2B	0.50	ARGILE	11.5	1.73	COS
R2C	0.70	ARGILE	7.2	0.38	COS,CS ₂
R2D	1.05	SABLE	7.5	7.46	COS
R2E	1.45	RESIDUS	13.0	7.38	COS
R2F	1.70	RESIDUS	9.5	2.36	COS
R2G	1.95	RESIDUS	8.0	5.33	COS
R3A	0.15	SABLE	19.9	0.13	
R3B	0.50	ARGILE	7.7	9.01	COS
R3C	0.70	ARGILE	6.8	0.36	
R3D	1.05	SABLE	2.3	0.18	COS
R3E	1.45	RESIDUS	1.3	0.11	COS
R3F	1.70	RESIDUS	1.2	0.06	COS
R3G	1.95	RESIDUS	0.6	1.83	COS
R4A	0.15	SABLE	20.5	0.11	
R4B	0.45	SABLE	13.6	1.71	COS
R4C	0.85	RESIDUS	16.1	1.23	COS
R4D	1.10	RESIDUS	7.0	3.68	
R4E	1.35	RESIDUS	5.0	0.51	COS

Tableau 3: Resultats de l'échantillonnage du 22 novembre, 1991 Waite Amulet

ECHAN.	PROF. (m)	MATERIEL	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	δ ¹³ C (PDB) (±0.1 ‰)
R1A	0.25	RESIDUS	saturé		
R1B	0.50	RESIDUS	saturé		
R1C	0.75	RESIDUS	saturé		
R2A	0.15	SABLE	17.8	0.14	-15.1
R2B	0.50	ARGILE	11.3	0.18	-16.4
R2B2	0.50	ARGILE			-16.4
R2C	0.70	ARGILE	9.6	1.66	-15.7
R2D	1.05	SABLE	9.3	11.5	-15.6
R2E	1.45	RESIDUS	saturé		
R2F	1.70	RESIDUS	saturé		
R2G	1.95	RESIDUS	saturé		
R3A	0.15	SABLE	12.9		-18.2
R3B	0.50	ARGILE	10.4	0.31	-15.5
R3C	0.70	ARGILE	10.4	7.4	-15.3
R3D	1.05	SABLE	7.9	2.54	-14.5
R3D2	1.05	SABLE			-14.4
R3E	1.45	RESIDUS	saturé		
R3F	1.70	RESIDUS	saturé		
R3G	1.95	RESIDUS	saturé		
R4A	0.15	SABLE	19.1	0.09	
R4B	0.45	SABLE	12.2	0.29	
R4C	0.85	RESIDUS	15.1	0.37-0.5	
R4D	1.10	RESIDUS	saturé		
R4E	1.35	RESIDUS	saturé		
R4II A			11.5	0.07	
R4II B			5.9	0.07	
R4II C			saturé		

FIGURE 1.

OXYGEN (%) VS. DEPTH (m)

Waite Amulet Gas Samples, May 1991

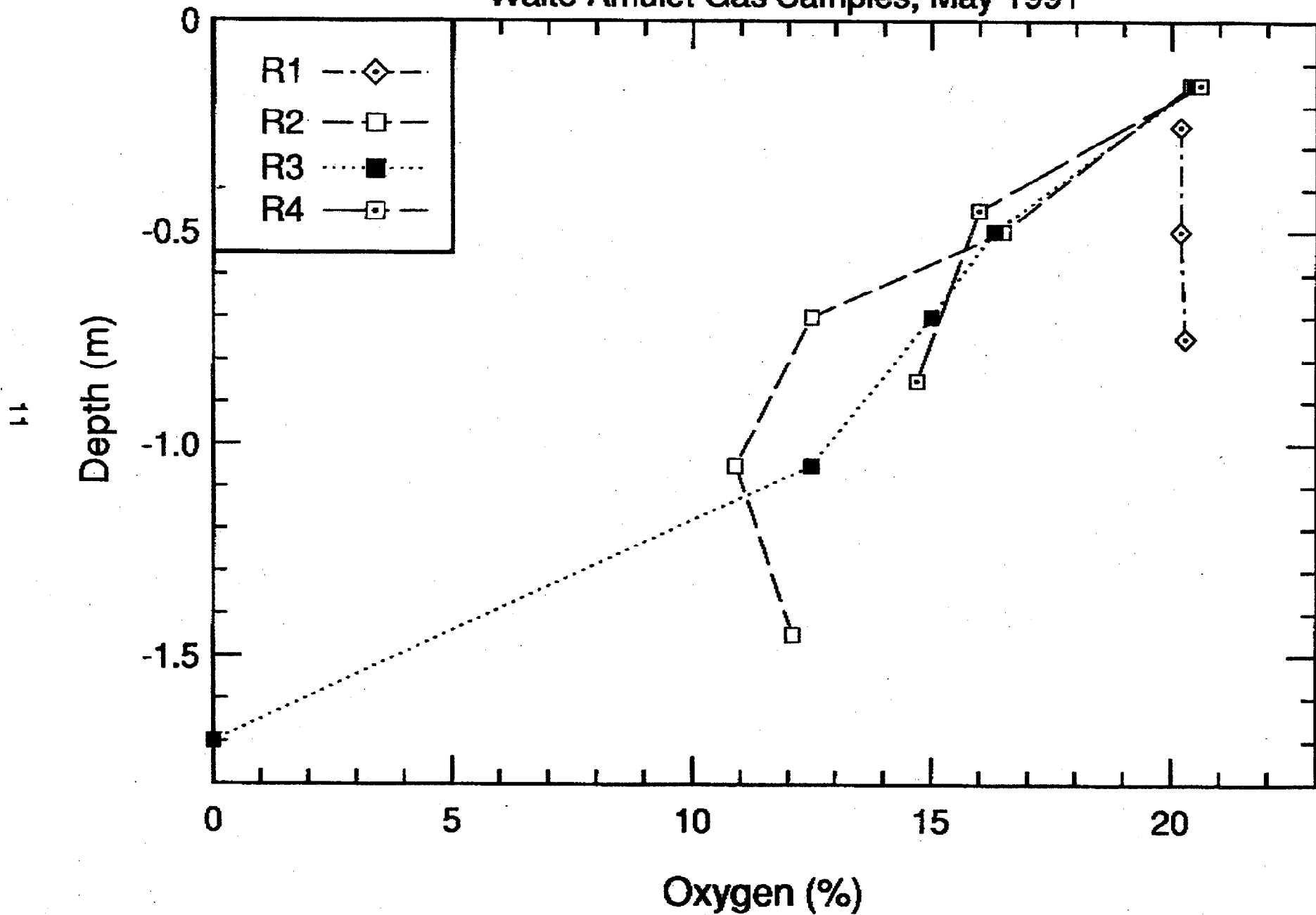


FIGURE 2. Oxygen (%) VS. Depth (m)

Waite Amulet Gas Sampling, July/Nov. 1991

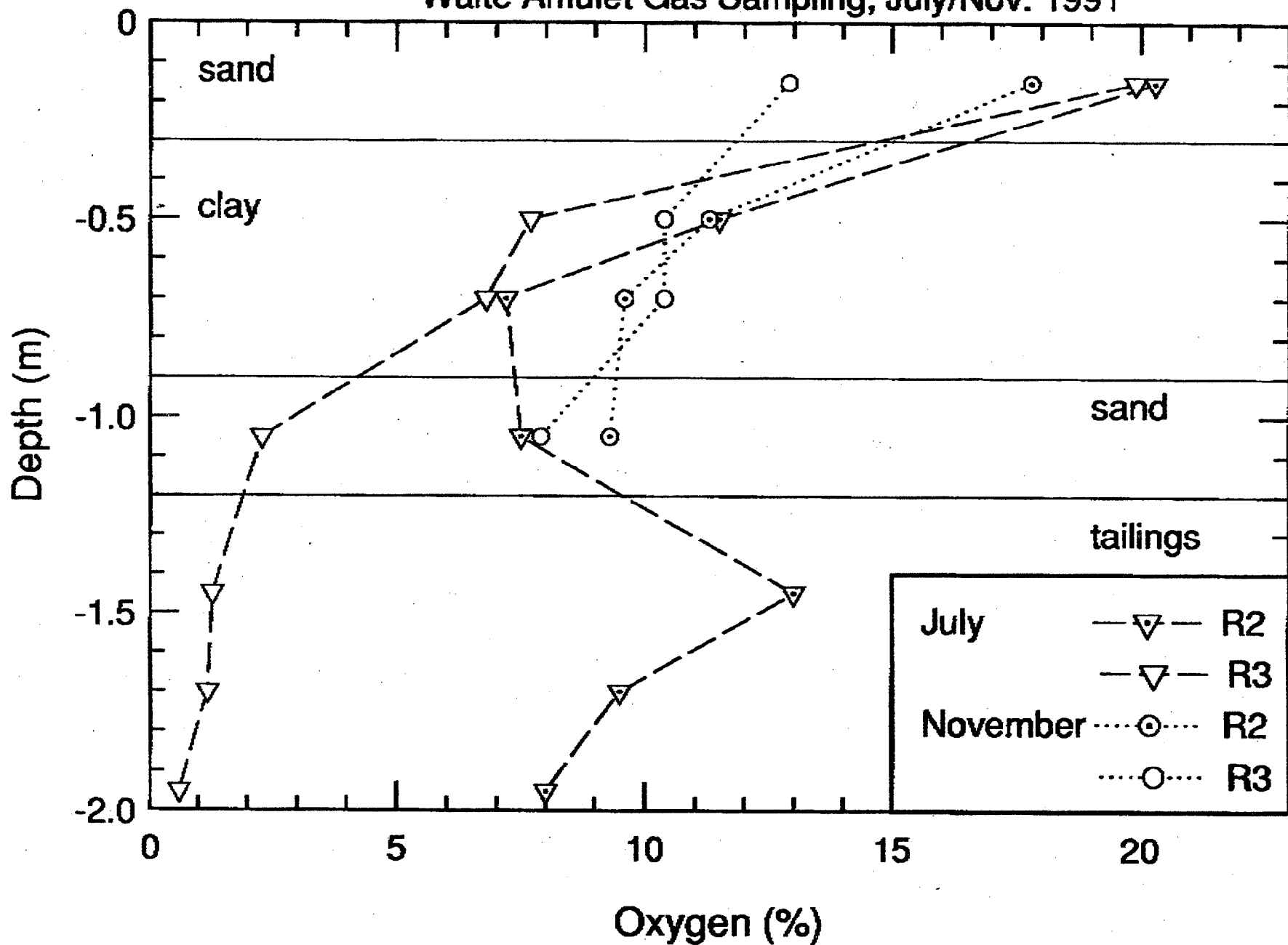
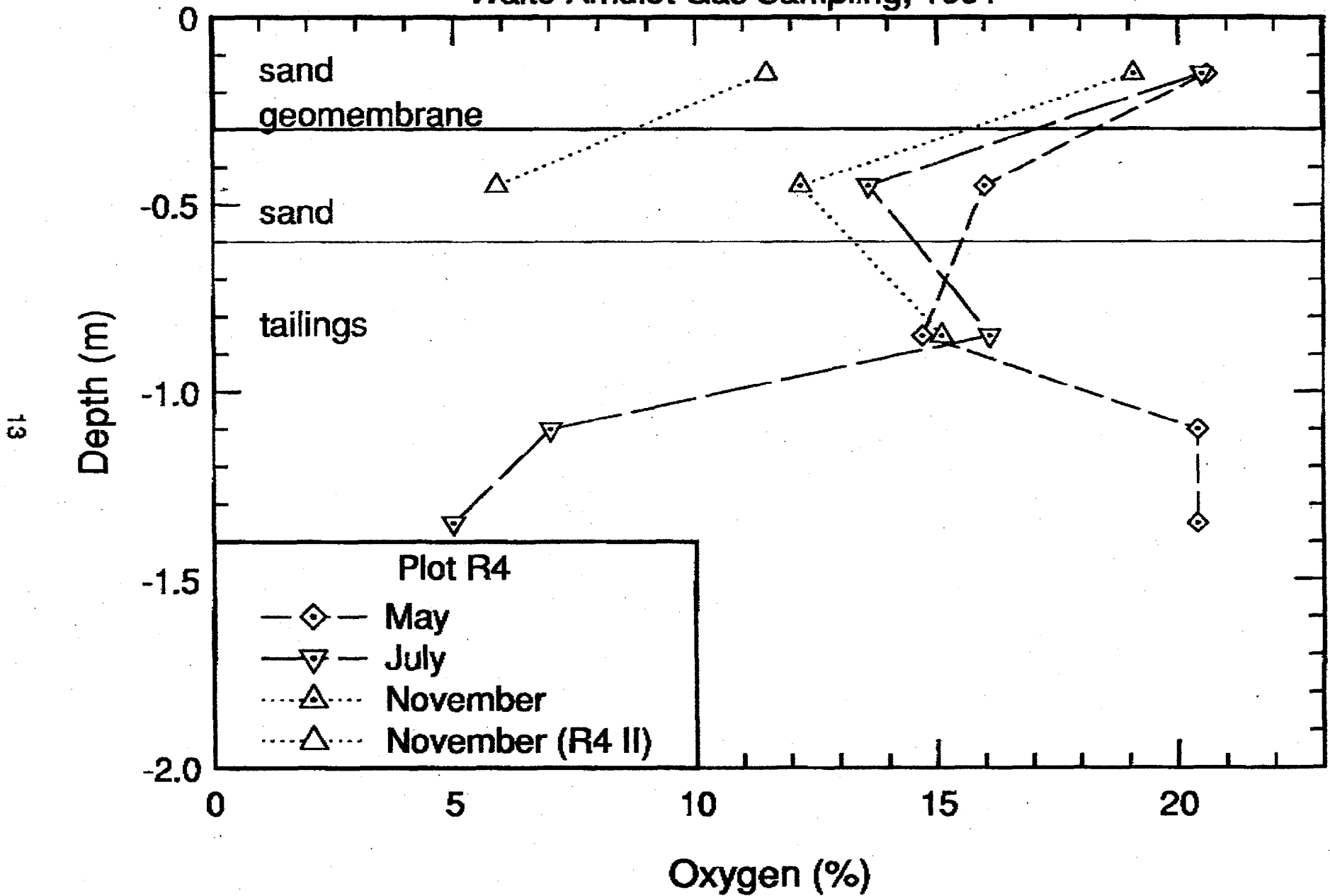


FIGURE 3. Oxygen (%) VS. Depth (m)
 Waite Amulet Gas Sampling, 1991



13

FIGURE 4.

Carbon Dioxide (%) VS. Depth (m)

Waite Amulet Gas Samples, July/Nov. 1991

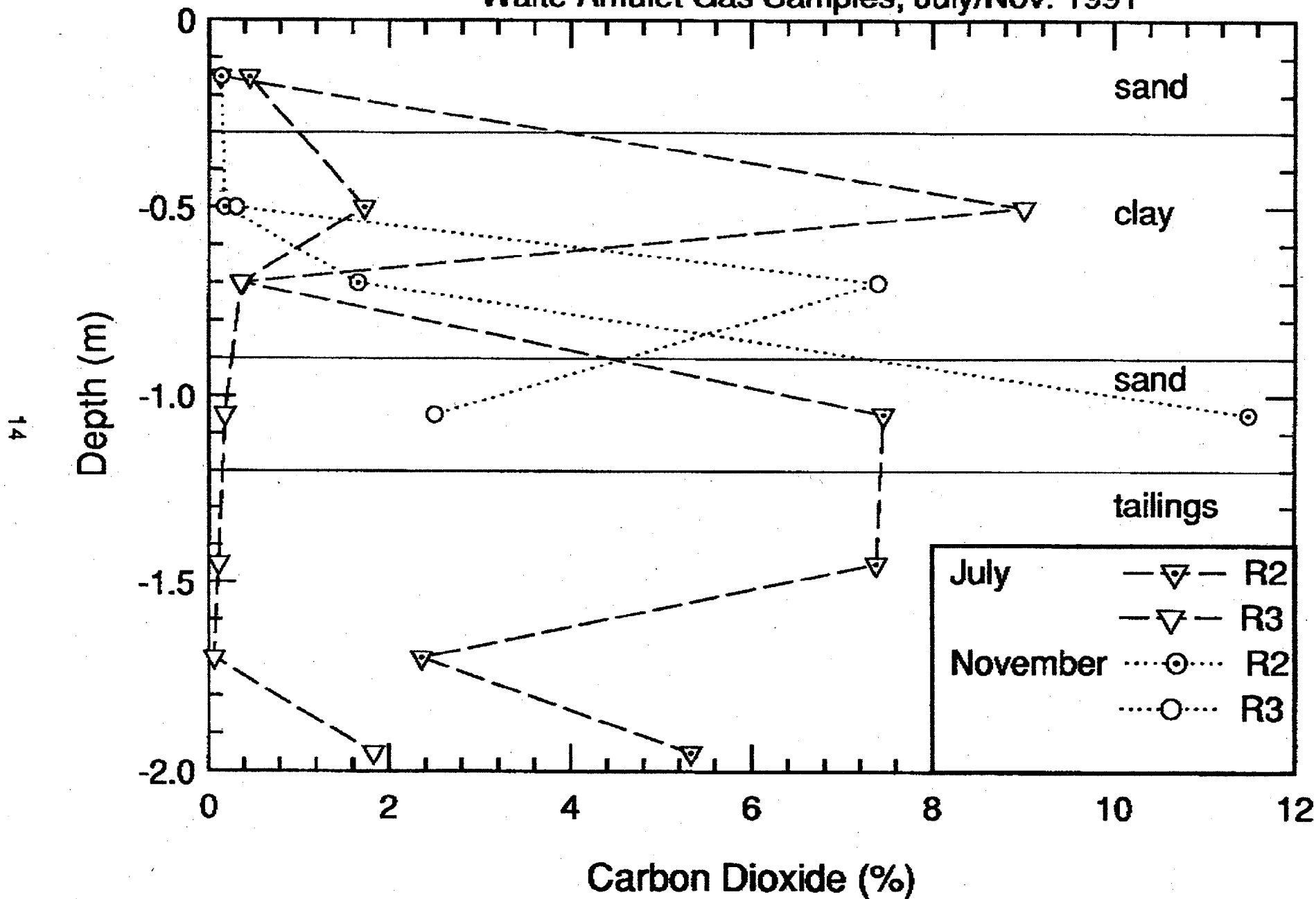
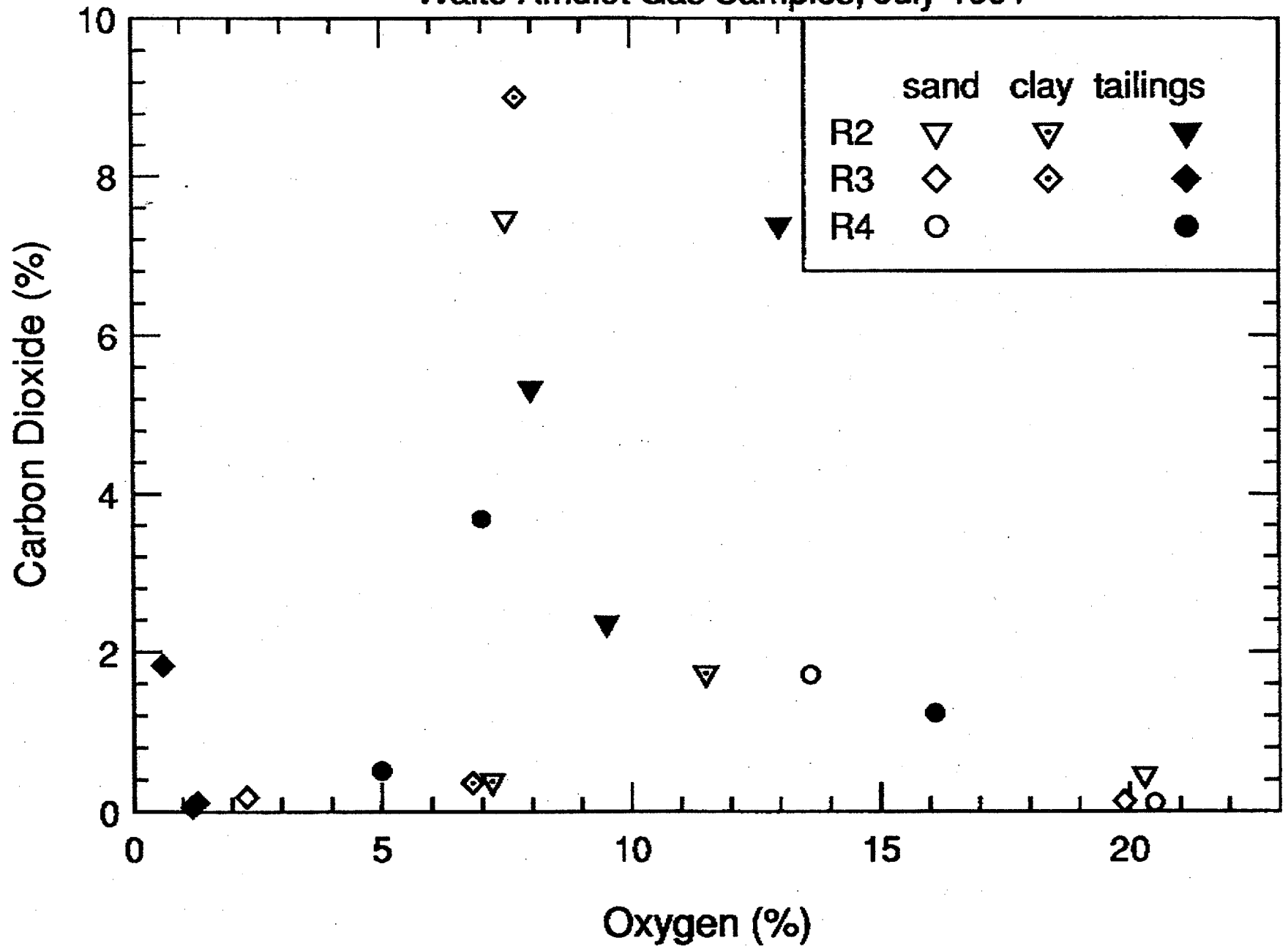


FIGURE 5.

OXYGEN(%) VS. CARBON DIOXIDE(%)

Waite Amulet Gas Samples, July 1991



15

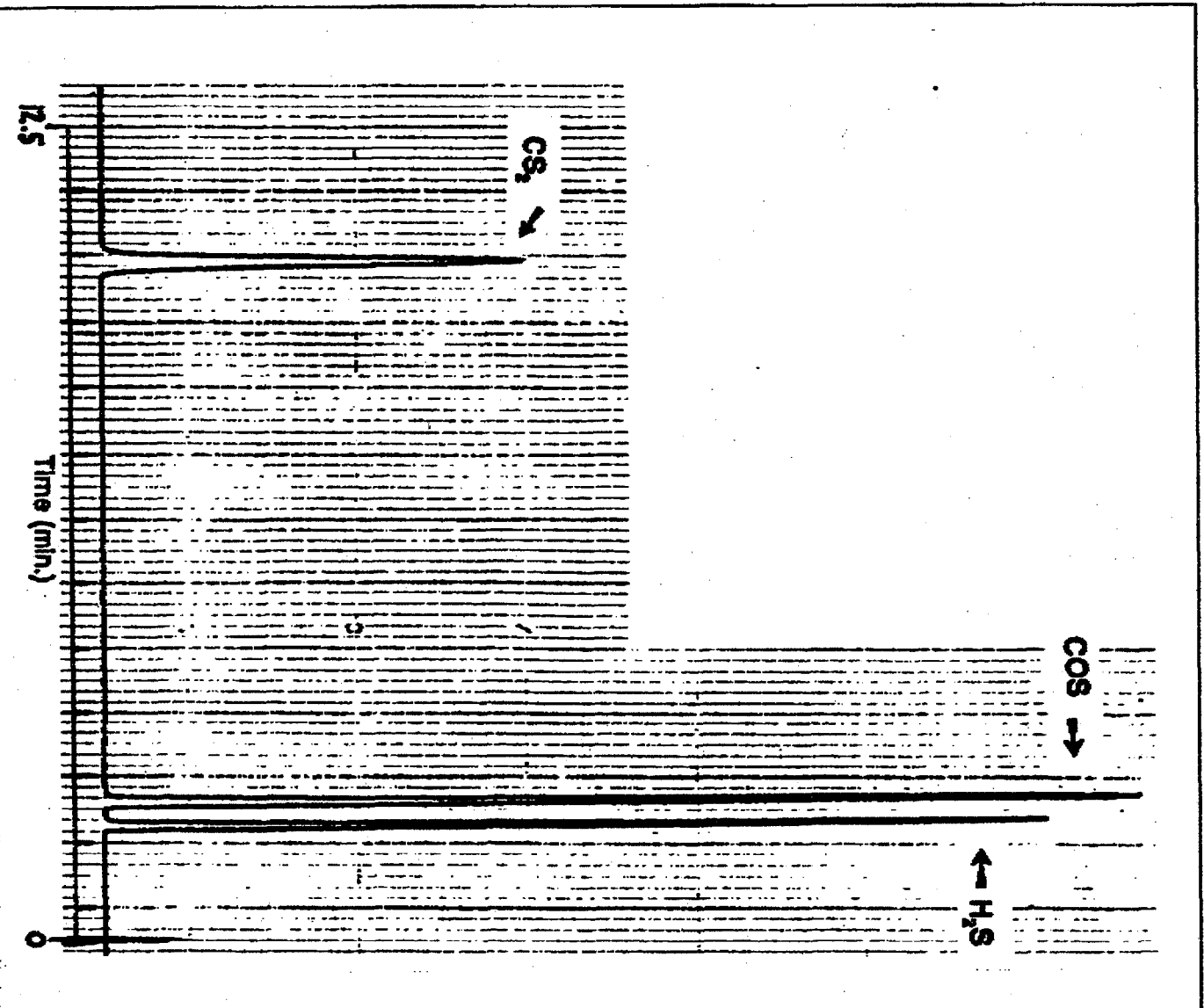


FIGURE 6: Exemple de chromatogram démontrant les indications standards pour H₂S, COS et CS₂. Les concentrations sont 39 ppm, 22 ppm et 24 ppm, respectivement.

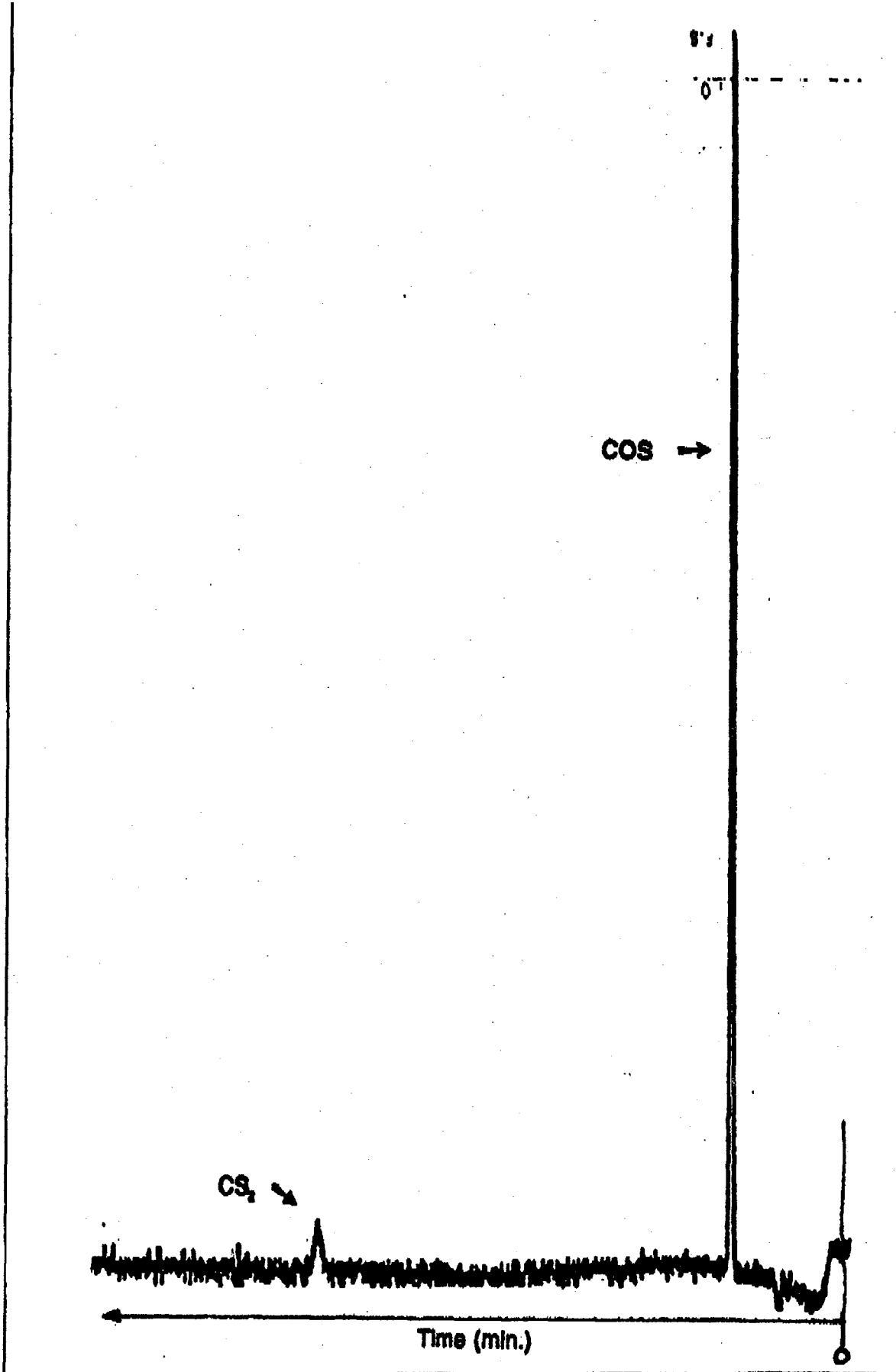
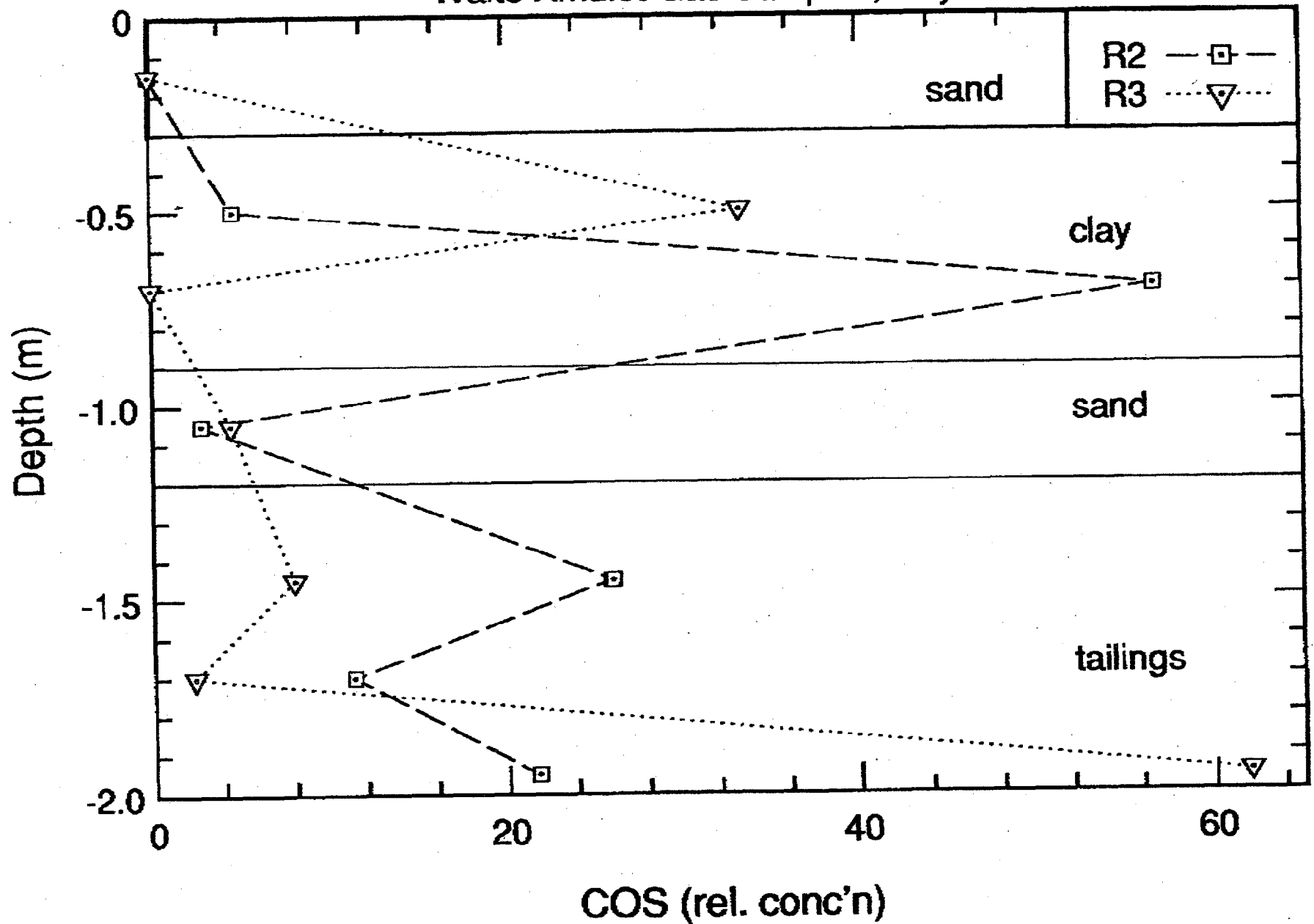


FIGURE 7: Chromatogram démontrant COS et CS₂ dans l'argile de R2C à 0.70 m.

FIGURE 8.

COS (rel. conc'n) VS. Depth (m)

Waite Amulet Gas Samples, July 1991

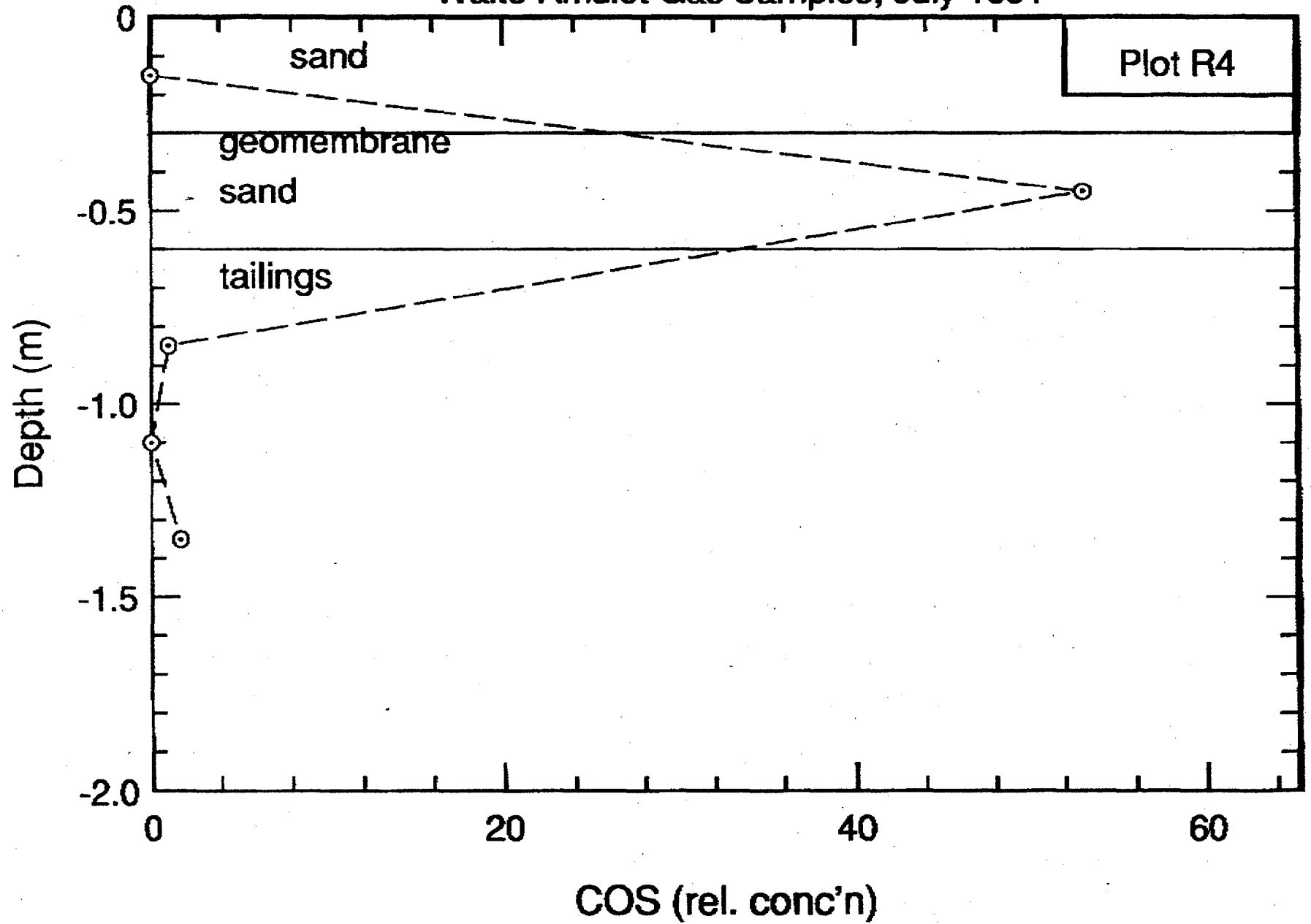


18

FIGURE 9.

COS (rel. conc'n) VS. Depth (m)

Waite Amulet Gas Samples, July 1991





McGill

Geotechnical Research Centre

McGill University
Macdonald Engineering Building
817 Sherbrooke Street West
Montreal, QC H3A 2K6

Centre de recherche géotechnique

Université McGill
Pavillon Macdonald de génie
817, rue Sherbrooke ouest
Montréal, QC H3A 2K6

Tel: (514) 398-6672
Telex: Canada and USA: 05-268510
Other countries: 5268510
Fax: (514) 398-7361

**FIELD EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ENGINEERED
SOIL COVERS FOR REACTIVE TAILINGS:
COMPATIBILITY EVALUATION
FINAL REPORT**

Submitted to

Gouvernement du Québec

Ministère de l'énergie et des Ressources (Mines)

Centre de recherches minérales

Services de la technologie minérales

CRM 7125-G-001 PPVI

Prepared by

A.M.O. Mohamed, R.N. Yong, F. Caporuscio

H. Mamani and M. Mazus

Geotechnical Research Centre, McGill University

817 Sherbrooke St. West Montreal, Quebec

March 1993

TABLE OF CONTENTS

	Page
1.0 INTRODUCTION	2
1.1 Terms of Reference	2
1.2 Contractor	2
1.3 Background	2
1.4 Objectives	4
1.5 Scope of Work	4
2.0 80 mil HDPE COMPATIBILITY STUDIES	5
2.1 Introduction	5
2.2 Procedure	5
3.0 CYCLIC FREEZE- THAW EFFECTS ON WATER DRAINAGE	7
CHARACTERISTICS	
3.1 Introduction	7
3.1.1 Background	7
3.1.2 Objectives	
3.1.3 Scope of Work	7
3.2 Experimentation	9
3.2.1 Sample description	9
3.2.2 Test Procedures	9
ASTM Method	9

Cyclic Freeze- Thaw	9
Moisture Drainage Characteristics	10
3.3 Results and Discussions	13
3.3.1 Cyclic Freeze-Thaw	13
3.3.2 Moisture Drainage Characteristics	13
Distilled Water	17
Leachate	19
3.4 Conclusion	26
4.0 AIR PERMEABILITY AND OXYGEN CONTENT	27
4.1 Introduction	27
4.2 Experimentation	28
4.2.1 Material	28
4.2.2 Test Apparatus	28
4.2.3 Oxygen Probes	30
4.2.4 Test Procedures	30
Freeze- Thaw	31
Leaching	31
Air Permeability	32
4.3 Results and Discussion	32
4.3.1 Air Permeability	32
4.3.2 Oxygen Profiles	36
4.4 Conclusion	40
5.0 REFERENCES AND SUGGESTED READINDS	41

Évaluation sur le terrain de l'efficacité de la conception des recouvrements finaux des résidus miniers réactifs: évaluation de compatibilité.

CONDENSÉ

Cette étude a été structurée de façon expérimentale pour évaluer les points suivants:

(1) la compatibilité du PEHD avec le cycle de gel/dégel et avec le lixiviat acide, (2) l'effet du cycle de gel/dégel sur les caractéristiques de drainage des recouvrements d'argiles et (3) l'effet du cycle de gel/dégel sur la diffusion de l'oxygène à travers le recouvrement d'argile.

Les résultats expérimentaux montrent que le PEHD n'a subi aucun changement de ses propriétés physiques et chimiques pendant la durée de l'expérience.

Les caractéristiques du drainage de l'humidité du recouvrement d'argile sont fortement influencées par le cycle de gel/dégel, due à la formation d'agrégats. Donc un readjustement significatif de l'espace de vide dans le sol est considéré. Les cycles de gel/dégel influencent la perméabilité de l'air ainsi que la quantité d'oxygène dans le recouvrement d'argile.

La perméabilité de l'air et la quantité d'oxygène ont diminué à cause de l'augmentation du taux d'humidité. La perméabilité de l'air a diminué d'un facteur de un à deux ordres de magnitude lors des essais de percolation. Durant ces mêmes essais, la concentration d'oxygène a diminué presque à zéro.

La différence de contenu d'oxygène entre les échantillons saturés avec de l'eau distillé et ceux saturés avec du lixiviat acide est probablement causée par la différence de

Field Evaluation of The Effectiveness of Engineered

Soil Covers for Reactive Tailings:

Compatibility Evaluation

Abstract

This study was structured to evaluate experimentally : (1) the compatibility of the 80 mil HDPE as a function of cyclic freeze/thaw and acidic leachate; (2) the effect of cyclic freeze/thaw on the drainage characteristics of the clay cover, and (3) the effect of cyclic freeze/thaw on the oxygen diffusion in the soil cover.

The experimental results have shown that the HDPE did not experience any changes in its physical and chemical properties within the experimental time frame. The moisture drainage characteristics of the cover was greatly influenced by the leaching and cyclic freeze/thaw due to aggregation and hence significant pore space readjustment. The freeze/thaw cycles influence both the air permeability and the oxygen content in the clay cover. Due to the increase in moisture content, the air permeability and oxygen content were decreased. When the soil samples were subjected to leaching, air permeability decreased by one to two orders of magnitude and oxygen concentration dropped to about zero. The difference in oxygen content, between samples saturated with distilled water and those with acidic leachate, occurred probably due to the difference in oxygen solubility in both liquids.

1.0 INTRODUCTION

1.1 TERMS OF REFERENCE

Research Contract with the Minister de l'Energie et des Ressources Mines/Centre de Recherches Minerales (MER/CRM) CRM 7125-G 001 PPVI.

1.2 CONTRACTOR

Geotechnical Research Centre, McGill University (Dr. A.M.O. Mohamed)

1.3 BACKGROUND

The Waite Amulet "covers project" is a joint project sponsored by NORANDA INC., CANMET an Centre de Recherches Minerales (CRM) of the Ministere de l'Energie et des Resources of Quebec. The project is directed by a three member steering committee with each member representing one of the sponsoring partners. Dr. E.K. Yanful of Noranda Technology Centre (NTC) manages the project on behalf of the committee.

The principal goal of the project is to evaluate, on a field scale the effectiveness of engineered soil covers for the reduction in the rate of acid generation in reactive sulphide tailings. The idea behind the current project is to conduct field testing prior to full-scale construction of soil covers for tailings decommissioning.

The Waite Amulte tailings site near Rouyn-Noranda, Quebec was chosen for the project because the hydrogeochemistry of the site had already been established by earlier studies, and because the tailings are fairly typical of reactive sulphide tailings, with an upper oxidized zone and hard pan formation, and a lower unoxidized zone.

The project duration is designed 3 years. The principal elements of the project are as follows:

- (1) design and construction of various plots with different cover design on the Waite Amulet tailings sites.
- (2) monitoring of the performance of the test covers.
- (3) evaluation of the effectiveness of the covers to reduce oxidation rate and hence acid generation.

The project commenced July 15, 1990 and construction of the test plots was completed in mid September 1990. Four plots measuring 20m by 20m have been installed as follows: (a) control (no cover); (b) and (c) composite cover with coarse-grained soil and a geomembrane, and (d) cover with coarse-grained soil and a geomembrane.

Monitoring systems for each test plot include: (1) gas and temperature monitors in the cover and in the underlying tailings; (2) pressure and water content monitors in the cover; (3) piezometers for water sampling in the unsaturated zone, and (4) a collection basin lysimeter underneath the cover to obtain water sample in the unsaturated zone. The lysimeters contain unoxidized tailings so as to generate a body of data which is not influenced by previous oxidation and the production of an oxidation product. Further details of the tasks to be performed in the project are presented in the project proposal by Noranda Technology Centre, May 2, 1991.

1.4 OBJECTIVES

The objectives of this study were:

- 1) Study of the compatibility of HDPE as a function of cyclic freeze/thaw condition.
- (2) Study the effect of cyclic freeze/thaw on the drainage characteristics of the clay cover
- (3) Study the effect of cyclic freeze/thaw on the oxygen diffusion through the clay cover.

1.5 SCOPE OF WORK

The specific tasks performed by the Geotechnical Research Centre are as follows:

- (1) Compatibility studies of the 80 mil HDPE liner used in the current installed cover systems. Jointed sections of the 80 mil HDPE were used for these investigations. The HDPE liner is subjected to cyclic freeze/thaw conditions to investigate its impact on the tensile properties.
- (2) The study of the effect of cyclic freeze/thaw on the water drainage characteristics of the clay cover is performed via pressure plate tests. Clay samples were subjected to cyclic freeze/thaw conditions and after each cycle pressure plate tests were performed at the end of each cycle.
- (3) The effect of cyclic freeze/thaw on the oxygen diffusion in the installed clay cover is simulated experimentally. This was studied by performing oxygen diffusion experiments in the clay cover "as is" and after subjecting the clay to a number of freeze/thaw cycles. Oxygen profiles were measured as a function of time and depth.

2.0 80 mil HDPE COMPATIBILITY STUDIES

2.1 INTRODUCTION

Specimens of the 80 mil HDPE membrane were cut, measured and weighed. The specimens were cut to include the seamed joint at midlength.

2.2 PROCEDURE

2.1.1 Freeze and Thaw in Leachate

Five specimens of HDPE membrane were placed in a plastic jar containing leachate of pH 3 for a period of 14 days per cycle (freeze and thaw).

After each cycle a specimen was measured and a tensile strength test performed. The tensile strength was performed on an Instron Tension/Compression testing machine at a load range of 0 - 1000 lbs. and at a displacement rate of 254 mm/min.

The results are shown in tables 2.1, and 2.2

TABLE 2.1

TENSILE RESISTANCE FOR 80 mil HDPE
(AT ROOM TEMPERATURE)

SAMPLE	Width (mm)	Length (mm)	Surface Area (mm ²)	Thickness (mm)	Tensile Resistance (KN)
1 (After 14 days)	25.2	80.0	2016.0	3.3	1.50
2 (After 28 days)	25.4	80.0	2032.0	3.3	1.56
3 (After 28 days)	25.2	75.0	1890.0	3.3	1.57
4 (After 42 days)	25.5	77.0	1963.5	3.4	1.56
5 (After 42 days)	25.5	78.0	1989.0	3.3	1.56
"AS IS" (Not Leached)	25.5	80.0	2040.0	3.3	1.50

TABLE 2.2

TENSILE RESISTANCE FOR 80 mil HDPE
(AFTER FREEZE - THAW)

Sample	Width (mm)	Length (mm)	Surface Area (mm ²)	Thickness (mm)	Tensile Resistance (KN)
6 (After 14 days)	25.2	75.0	1890.0	3.3	1.54
7 (After 28 days)	25.6	74.0	1894.4	3.3	1.64
8 (After 28 days)	26.1	75.0	1957.5	3.3	Not reported
9 (After 42 days)	25.8	80.0	2064.0	3.3	1.56
10 (After 42 days)	25.9	76.0	1965.1	3.3	1.55

3.0 CYCLIC FREEZE-THAW EFFECTS ON WATER DRAINAGE CHARACTERISTICS

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 Background

A principal concern in the decommissioning of reactive mine sites and tailings dumpsites is the protection of the mine sites and dumpsites against the generation of acid leachates. The problem is common in both metal and coal mining. Most Canadian base metal, precious metal, and uranium mines contain mineralization either in the ore or the surrounding waste rock, which is a combination of metal and sulfur. The sulphide minerals are unstable and oxidize when exposed to oxygen and water, and the resultant reaction yields sulphuric acid which increases the solubility of heavy metals and promotes their mobility.

In this study, the problem of disposed reactive tailings is addressed from the viewpoint of requirements for protection against oxygen and water - when decommissioning of the site is required. Most tailings occupy mined-out depressions or constructed "dumpsites" designed to contain the tailings. Protection of the contained tailings against water and oxygen entry, is generally consigned to the development of engineered soil covers or some other substitute material, where design specification call for the cover to be "impermeable". Frequently, this means utilization of high clay content materials, compacted to optimum or slightly wet of optimum density.

In regions where substantial freezing occurs during winter periods, the effects of freeze-thaw cycles on high clay content materials can be deleterious. Because of the interactive forces in the clay material, pore-space readjustment occurs after a few cycles of freeze-thaw, creating large pore spaces with a high degree of continuity - in essence

destroying the design considerations of low permeable material requirements (Yong et al. ,1984, and 1985).

3.1.2 OBJECTIVES

The Geotechnical Research Centre, McGill University performed laboratory evaluations in order to achieve the following objectives. The first objective was to study the freeze - thaw characteristics for a leached soil cover material for tailings after passing one pore volume of pH 3 leachate and subjecting the specimens to different cycles of freeze/thaw (1,3,5 cycles).

A second objective was to further study the moisture drainage characteristics of the specimens after each cycle of freeze and thaw.

3.1.3 Scope of Work

Specific tasks to be performed by the Geotechnical Research Centre (GRC) are as follows:

- a) perform cyclic freeze-thaw, after passing one pore volume of pH 3 leachate, through the proposed clay cover.
- b) perform moisture-drainage characteristics of the leached specimens after one pore volume (pH 3, 3 tests)
- c) data analysis
- d) interpretation of results and reporting.

3.2 EXPERIMENTATION

3.2.1 Sample Description

The soil and tailing samples were received by Geotechnical research Centre (GRC) of McGill University in a steel drum and polyethylene bags, and the following visual observations were noted:

SAMPLE	DESCRIPTION
Bulk Varved Clay	light brown silty clay
WA-5	unoxidized mine tailings
WA-17	unoxidized tailings

3.2.2 Test Procedures

(1) ASTM METHODS

The following ASTM Standard methods were adopted during testing.

- | | |
|--|---------------|
| (a) Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock and Soil Aggregate Mixtures | ASTMD 2216-80 |
| (b) Moisture Drainage Characteristics for Modelling of Moisture (soil suction test) | ASTM D2325 |

(2) CYCLIC FREEZE - THAW (OPEN SYSTEM)

Two sets of soil samples were prepared and compacted, with one set leached with a one pore volume. The leachate was prepared from the tailings, the acid generating source at pH 3. The compacted samples were subsequently equipped with type "T" thermocouples, located at 10 mm below the top of the sample. The tests were conducted in an open system

with drainage provided at the base of the 100 mm samples.

The cells were equipped with cold plates (-9.5°C) at the top surface while the base of the samples were kept at the cold room temperature (4°C). The cells were insulated from the surrounding cold room temperature by fiberglass insulation to ensure uni-directional freezing. Figure 3.1 illustrates the test setup in detail.

The leachate supplies (instead of water) were installed approximately at the top of the specimens to ensure ice lens growth. During testing the height of specimen, soil temperature, and leachate intake were monitored and noted. The freezing cycle continued until no further intake of leachate was observed and the temperature of the sample was well below zero. The samples were then allowed to thaw with free drainage overnight, with the heights of the leachate supplies maintained approximately at the top of the samples.

Before starting the next freezing cycle the sample heights and general conditions were recorded including the level of the leachate supplies.

(3) MOISTURE DRAINAGE CHARACTERISTICS

The soil suction measurements were performed by using various suction devices:

- (1) a portable water tank containing clean, coarse sand ($<0.5\text{mm}$ diameter) constituting a system having a pF range of 0 to 1. The sand was packed into a rectangular lucite box to a height of about 150 mm, and subsequently covered with a sheet of filter paper. A standpipe was connected to an outlet at the base of the tank. The water level in the standpipe was adjusted to 10 mm below the base of the soil for pF0 and 100 mm for pF1. Evaporation was avoided by covering the tank with a lucite

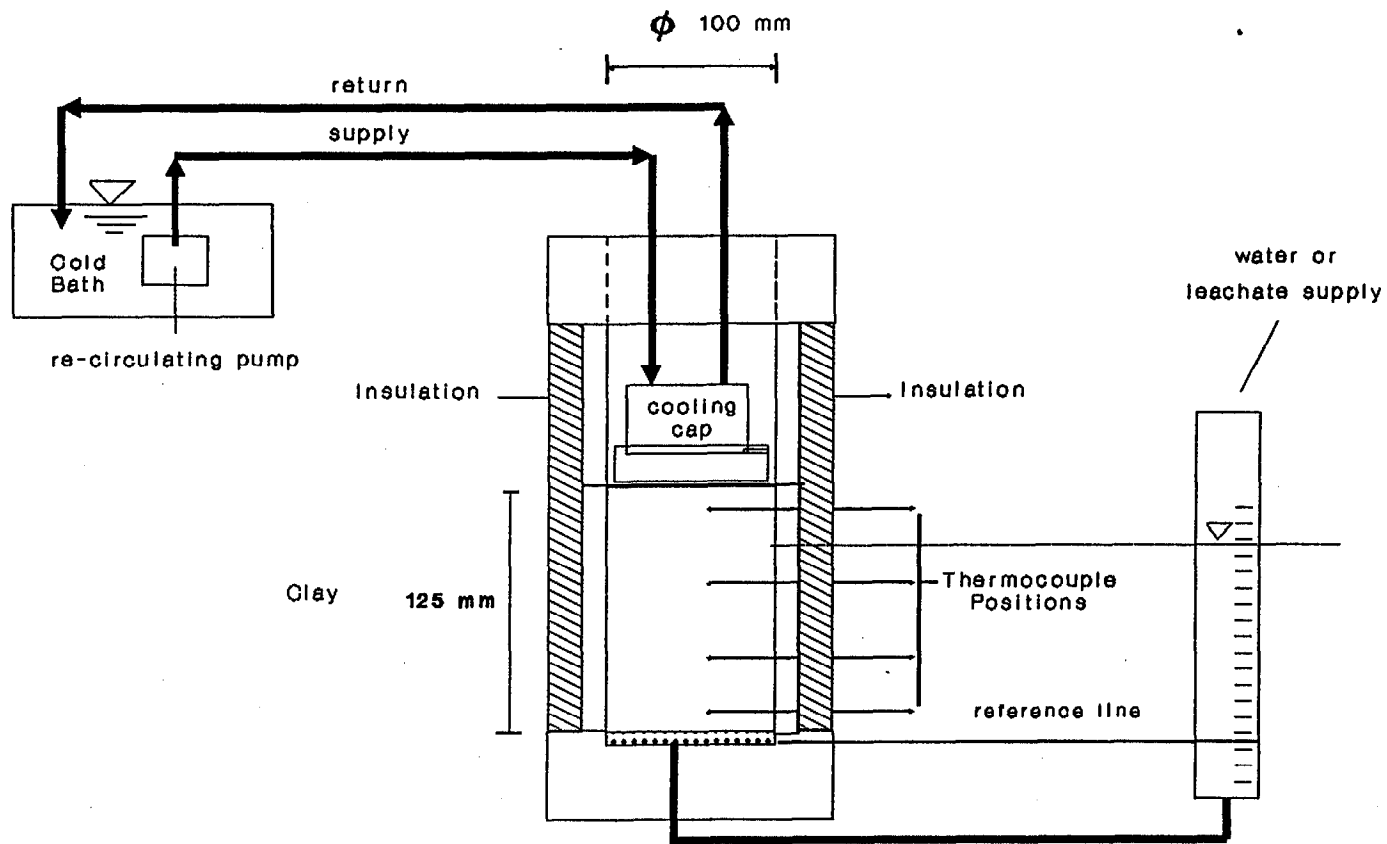


Figure 2.1. Schematic diagram of test apparatus.

sheet having a small diameter hole in order to maintain atmospheric pressure.

- (2) pressure plate extractor capable of a pF range from 1 to 4.2. These consisted of several porous ceramic plates, with different pressure capacities (Soil Moisture Equipment Company). The specified capacity of each plate is the pressure at which air just begins to enter a saturated plate. These plates were kept saturated during testing. The applied air pressures were kept constant by use of a regulator and measured using a pressure gauge and/or manometer.

An initial "as is" moisture content of each undisturbed soil sample was performed prior to soil suction testing. A thin wall aluminium cutting ring was utilized to transfer the soil to the lucite rings of 38.1 mm in internal diameter and between 10-20 mm in height with a minimum of disturbance. A linen cloth base had been previously sealed to the bottom of each lucite ring.

After preparing the samples in the lucite rings, the samples plus the lucite rings were placed in the adjustable water level tank and left for equilibrium for 5 days. The samples were then weighed in order to determine the loss or gain of moisture. Each soil sample followed a desorption (drying) cycle from pF 0 to pF 3.8 and an absorption (wetting) cycle from pF 3.8 to pF0. Each pF stage required a minimum of 5 days for equilibrium.

3.3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.3.1 Cyclic Freeze/Thaw

The results of cyclic freeze/thaw for the varved clay are summarized in Tables 3.1 and 3.2 for distilled water and leachate intakes during freeze-thaw, respectively. Visual observations of the tests shown in Tables 3.1 - 3.2 have indicated that horizontal as well as vertical cracks were formed. The amount of fluid intake during freezing is a direct function of the type of fluid during the freezing process. For example, in the case of distilled water, the effect of freezing temperature on clay aggregation and hence formation of various pore sizes is the main controlling parameter. However, in the case of leachate, the clay was first subjected to leaching, i.e., passing 1 pore volume of leachate through the clay and then cyclic freeze-thaw. During the leaching process, the thickness of the diffuse double layer may decrease due to ion exchange on the surface of the clay minerals due to replacement of naturally adsorbed cations of lower valence (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) by the extracted aluminium ions which have a valence of 3 from the octahedral sheets of the clay mineral. This results in an increase in effective pore spaces and a decrease in the tortuosity factor. Furthermore, the effect of freezing temperature on the clay aggregation is an extra parameter that contributes to the changes in pore spaces within the clay matrix.

3.3.2 Moisture Drainage Characteristics

The effect of cyclic freeze-thaw on the moisture drainage characteristics of the varved clay is studied in terms of the moisture content - pF relation. The following two cases were investigated:

TABLE 3.1

SUMMARY OF CYCLIC FREEZE - THAW FOR VARVED CLAY (BULK)

cycles #	Water intake during freezing (cm³)	Frost Heave (mm)	Water intake during Thaw (cm³)	visual observations
1	7	0	2	-micro cracks in the top mostly
3	69.6	0	16	-micro-cracks top and middle area mostly
5	24.6	0	33.2	-micro cracks throughout

TABLE 3.2

SUMMARY OF CYCLIC FREEZE - THAW FOR VARVED CLAY (BULK)
After Leaching

Cycle #	Leachate intake During freezing (cm³)	Frost Heave (mm)	Leachate intake During Thaw (cm³)	visual observations
1	2	0	8	-some vertical microcracks/fisures
3	7	0	15	-micro cracks throughout
5	16.6	0	31	-microcracks throughout

TABLE 3.3

SOIL SUCTION TEST RESULTS FOR CRM-CLAY AFTER FREEZE-THAW.

Sample:CRM-Clay	Average Dry Density (Mg/m ³)	Water content (%)										
		@ pF (Desorption)					@ pF (Absorption)					
CYCLES			0.0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.8	3.0	2.0	1.0	0.0
First Cycle	1.22	TOP	36.3	35.5	34.3	32.8	31.5	29.2	30.1	31.1	34.2	35.6
		BOT.	34.8	33.8	33.2	32.6	31.0	29.2	29.9	31.1	33.6	34.3
Third Cycle	1.22	TOP	38.0	36.1	34.1	33.2	31.5	28.9	29.3	30.2	33.6	35.6
		BOT.	37.2	36.4	34.8	33.6	31.8	29.4	30.0	30.7	35.2	36.8
Fifth Cycle	1.22	TOP	36.0	34.7	33.3	32.1	30.0	27.8	28.2	28.8	32.0	33.8
		BOT.	34.3	32.1	30.5	29.0	27.7	25.9	26.5	27.2	30.7	32.6

TABLE 3.4

SOIL SUCTION TEST RESULTS FOR CRM-CLAY AFTER FREEZE-THAW.
(LEACHED AT 1 P.V.)

Sample:CRM-Clay (leached @ 1 p.v.)	Average Dry Density (Mg/m ³)	Water content (%)										
		@ pF (Desorption)						@ pF (Absorption)				
CYCLES			0.0	1.0	2.0	2.5	3.0	3.8	3.0	2.0	1.0	0.0
First cycle		TOP	41.90	39.33	37.81		34.16	29.72	30.65			37.82
		BOT.	39.56	37.59	35.72		32.27	30.53	31.70			37.72
Third Cycle	1.22	TOP	37.7	36.6	35.1	---	32.4	27.7	29.9	31.2	33.6	34.2
		BOT.	35.4	34.3	33.3	---	30.7	25.7	28.7	30.0	32.1	33.5
Fifth Cycle	1.22	TOP	37.5	34.6	32.3	31.0	28.3	25.6	27.1	29.9	31.6	32.7
		BOT.	35.5	33.5	30.9	29.5	27.4	24.9	26.3	29.5	31.4	32.5

(1) distilled water

(2) leachate

(1) Distilled Water

The moisture drainage characteristics are shown in Figs. 3.2 and 3.3 for samples located directly below the cooling cap and at the opposite end (bottom). It can be seen that the clay samples at 0 cyclic freeze-thaw exhibit high soil water potential and the air entry value is obtained at approximately pF 3. The changes in material characteristics caused by cyclic freeze-thaw in terms of adsorption-desorption performance of the clay is apparent. At constant values of soil water potential, it is observed that samples subjected to cyclic freeze-thaw exhibit different amount of moisture retention. The largest change in moisture retention is obtained when the clay samples have experienced 1 freeze-thaw cycle. Successive cycles of freeze-thaw yielded relatively lesser changes up until the 5 freeze-thaw cycle. The result of cyclic freeze-thaw induces aggregation, which results in decreasing active surface areas (Yong et al. 1985). This is possibly a factor which continues to the lower water retention ability at each pF value considered. The decrease of moisture content at constant suction should also be influenced by: (1) the reorientation of fabric units observed in the scanning electron micrographs of frozen-thawed samples (Yong and Mohamed 1992); (2) the destruction of interparticle bonds, and (3) the effect of drainage of pore water.

In the unfrozen control sample, the "ink-bottle" effect (Yong and Warkentin 1975) occurs at about pF 3. However after only 1 freeze-thaw cycle, the amount of altered pore sizes and active surface areas is such that the deviations between adsorption-desorption curves are so small that the ink bottle effect is no longer evident as seen in Fig. 3.2. When

Fig. 3.2 Soil water potential after freeze-thaw cycles; distilled water.

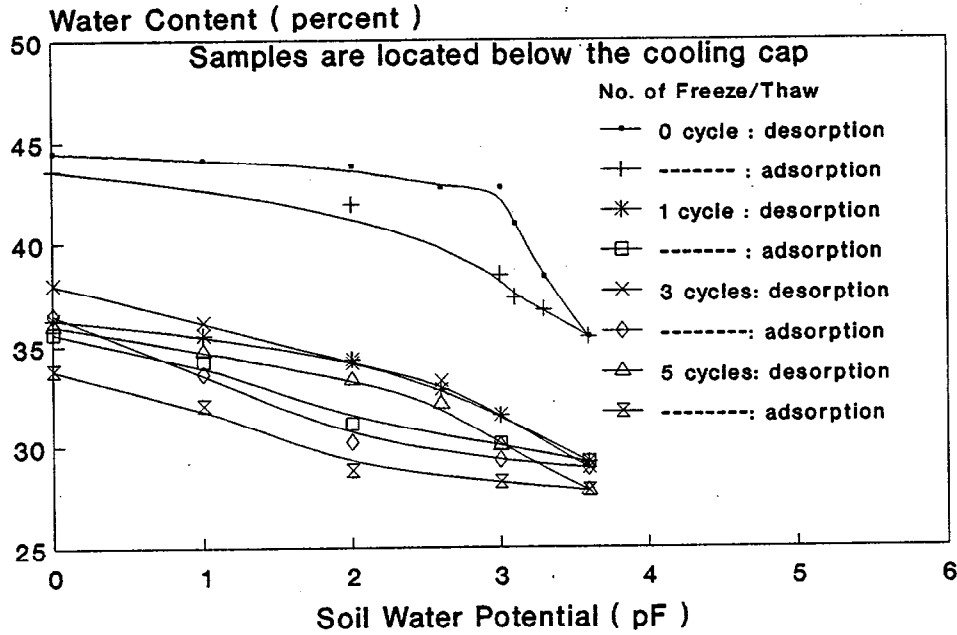
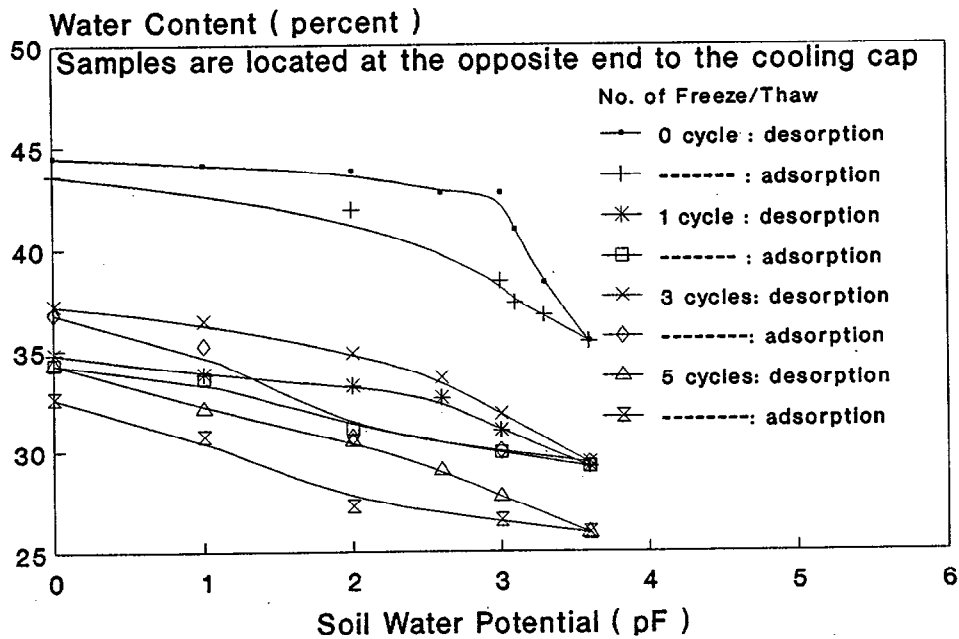


Fig. 3.3 Soil water potential after freeze-thaw cycles; distilled water.



the sample is subjected to more freeze-thaw cycles, sufficient changes have already occurred so that the adsorption-desorption curves now closely assume a different character. It is plausible that the changes in active surface areas and micropore sizes are no longer significant to influence the shape of the moisture drainage characteristic curves of the 3 and 5 freeze-thaw cycles.

The main difference between Fig. 3.2 and Fig. 3.3 can be attributed to the following: the undisturbed sample is frozen and water is drawn from the pores in the soil to form a complicated pattern of needle-like crystals (as noted from a visual examination of the samples after 1 freeze-thaw cycle). This formation of ice crystals inevitably brings about a separation of the soil mass, with line/planes of weakness resulting. Until thawing of the ice crystals, cracks appear in the positions previously occupied by the ice crystals. Some of the water from the thawed ice crystals are likely to seep throughout these cracks and drain out through the bottom of the sample. This indicates that more moisture has accumulated in the upper layer of the first cyclic freeze-thaw samples as a result of the ice crystals drawing up moisture from the lower part of the soil sample, such that even under the effect of drainage through the resulting cracks, high moisture levels are maintained at the top of the sample after subsequent freeze thaw cycles (Mohamed et al., 1993).

(2) Leachate

The moisture-drainage characteristics for samples leached with an acidic leachate from the tailings before being subjected to freeze/thaw cycles are shown in Figs. 3.4 and 3.5 for samples located below the cooling cap and at the bottom of the soil sample. The moisture drainage characteristics are different than those previously discussed for distilled

Fig. 3.4 Soil water potential after freeze-thaw cycles; Leachate.

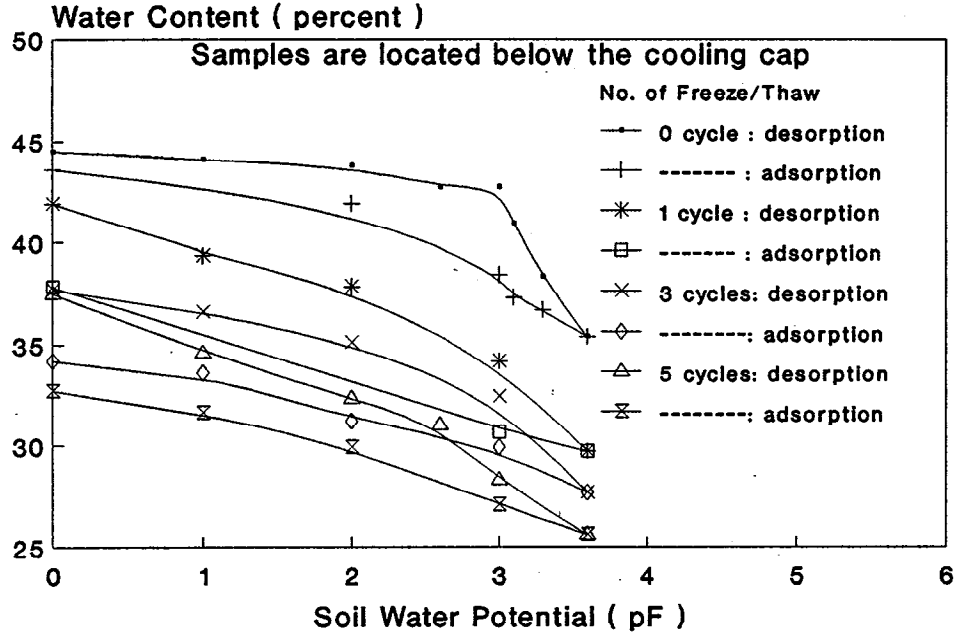
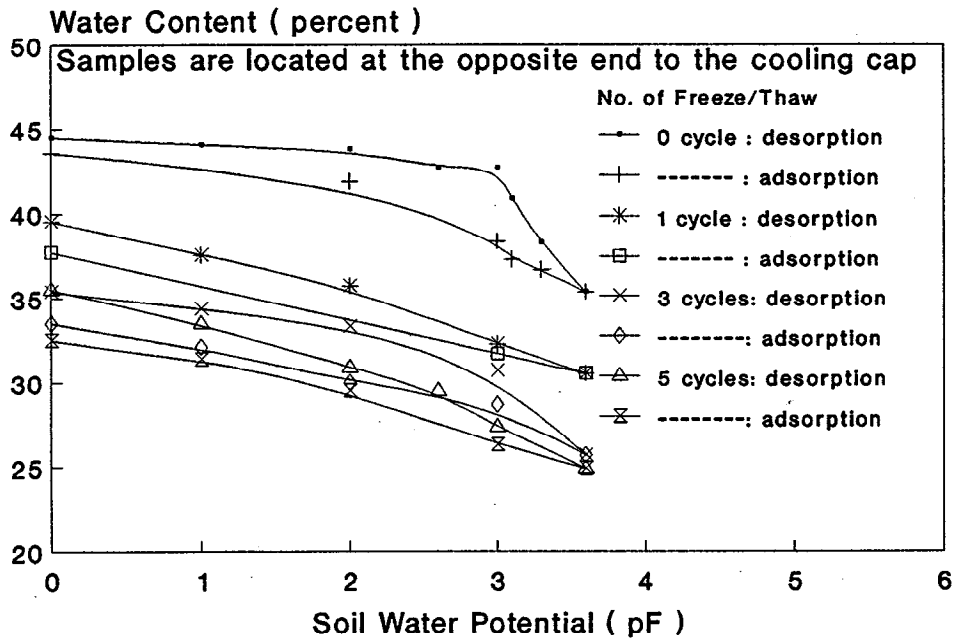


Fig. 3.5 Soil water potential after freeze-thaw cycles; Leachate.



water. The effect of cyclic freeze-thaw on the water retention characteristics can be noticed for all the subsequent freeze/thaw cycles. In order to highlight the difference between the two cases, the adsorption curves shown in Figs. 3.2 to 3.5 are replotted and illustrated in Figs. 3.6 to 3.13. From the desorption data shown in Figs. 3.6 to 3.9, the fluid effect is apparent.

At pF0, samples leached with the acidic solution exhibit higher water holding capability in comparison with those leached with distilled water. The difference is maximized after 1 cycle of freeze-thaw. With the increase in suction pressure, the difference between the two systems continues to decrease, resulting in a lower water holding capability for samples leached with the acidic leachate. This behaviour could be attributed to the following: due to the leaching of samples with distilled water, the concentrations of major cations in the pore fluid solution decreased. This leads to a tendency to form a dispersed structure. Under these conditions, the water can be removed from the soil structure under low suction pressure. However, for samples leached with the acidic solution, the thickness of the diffused ion layer tends to decrease; hence, the repulsive forces between the clay particles decrease. This in turn increases the tendency of soil structure to be focculated. Under low suction pressure, the water within the soil pore spaces can not be easily withdrawn. With the increase in suction pressure, the water continues to drain resulting with a final a final water content after 5 cycles of freeze/thaw less than the case of distilled water.

Fig. 3.6 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; $pF=0$.

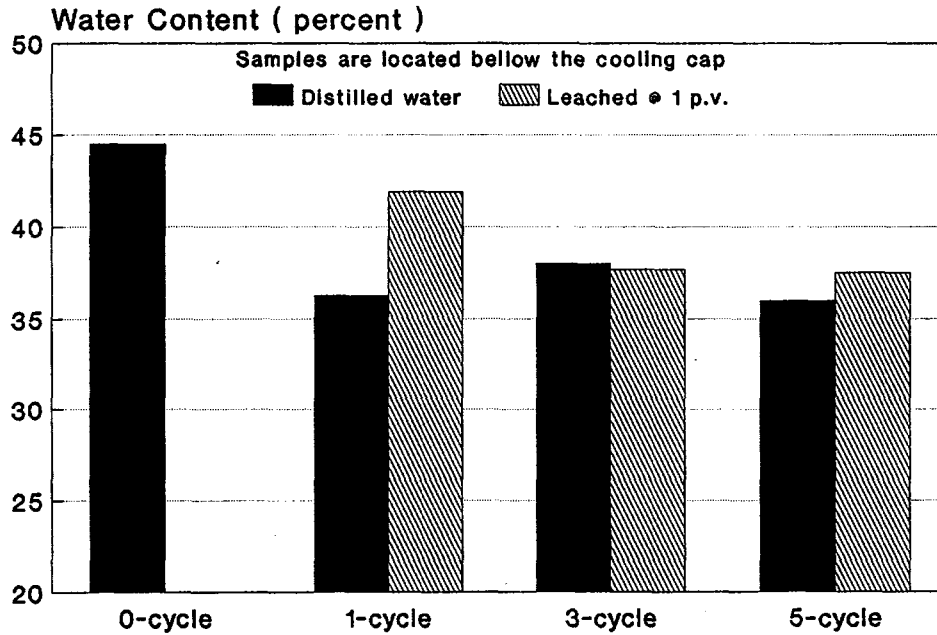


Fig. 3.7 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; $pF=2$.

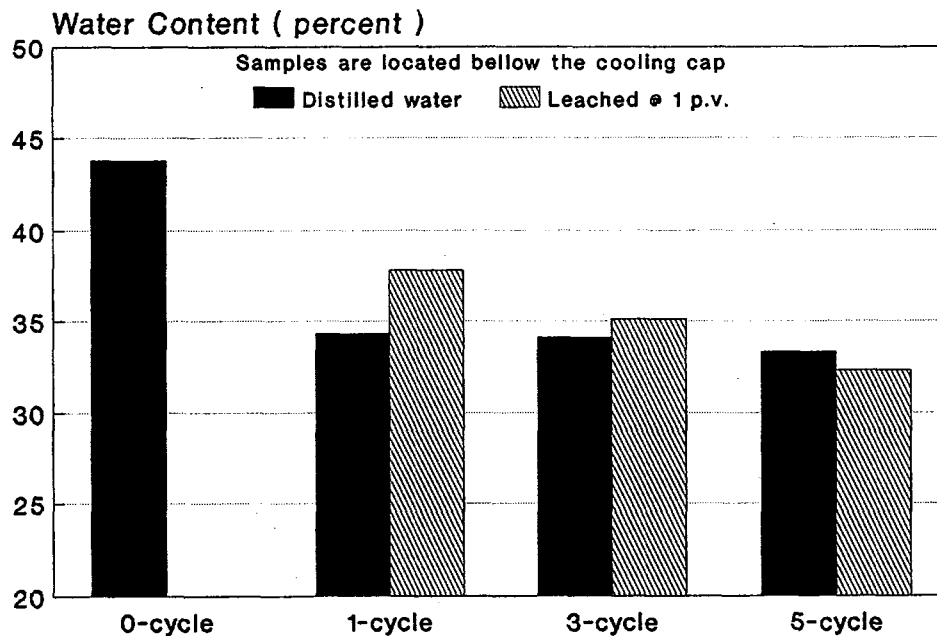


Fig. 3.8 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; pF=3.

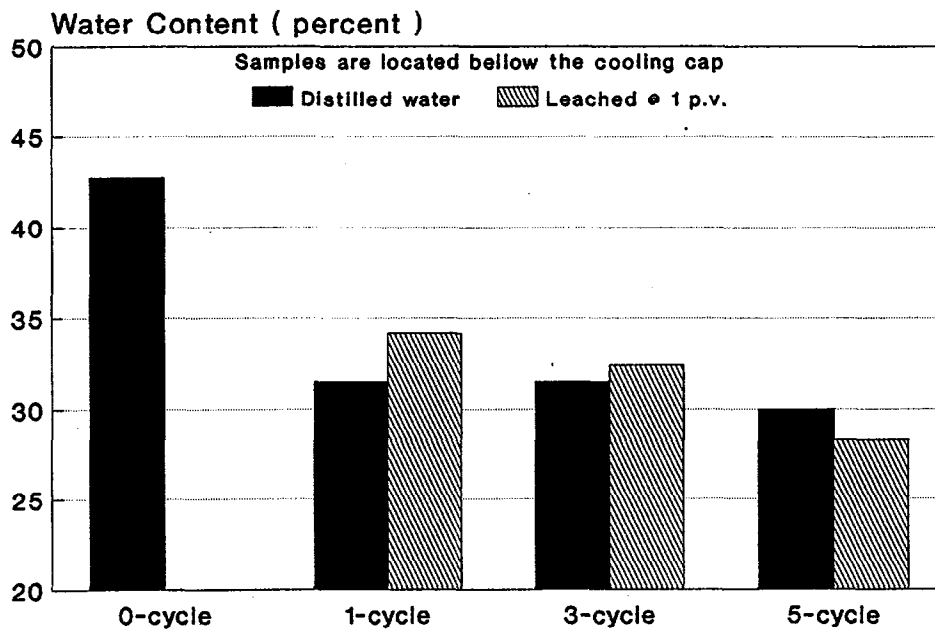


Fig. 3.9 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; pF=3.8.

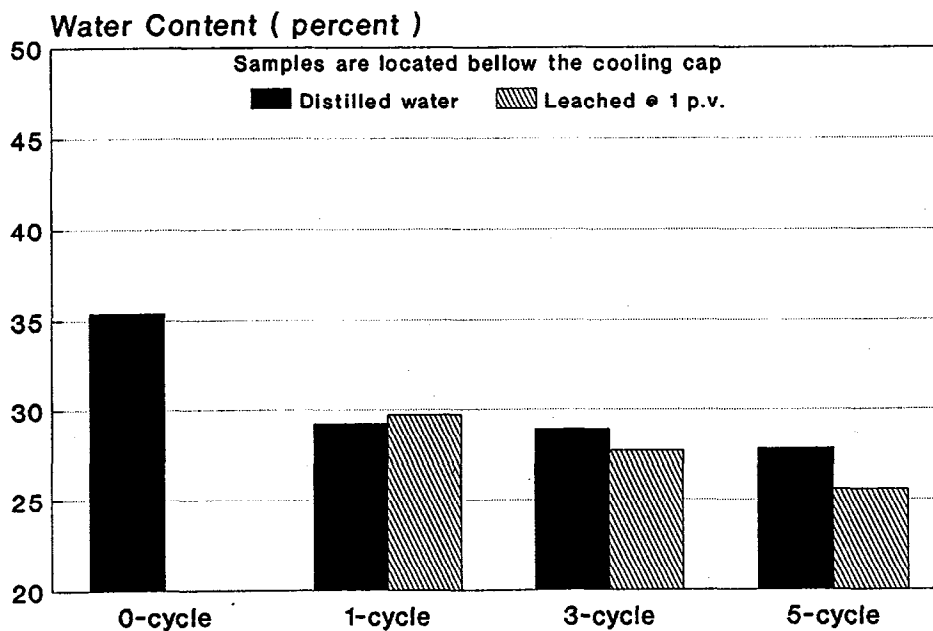


Fig. 3.10 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; pF=0.

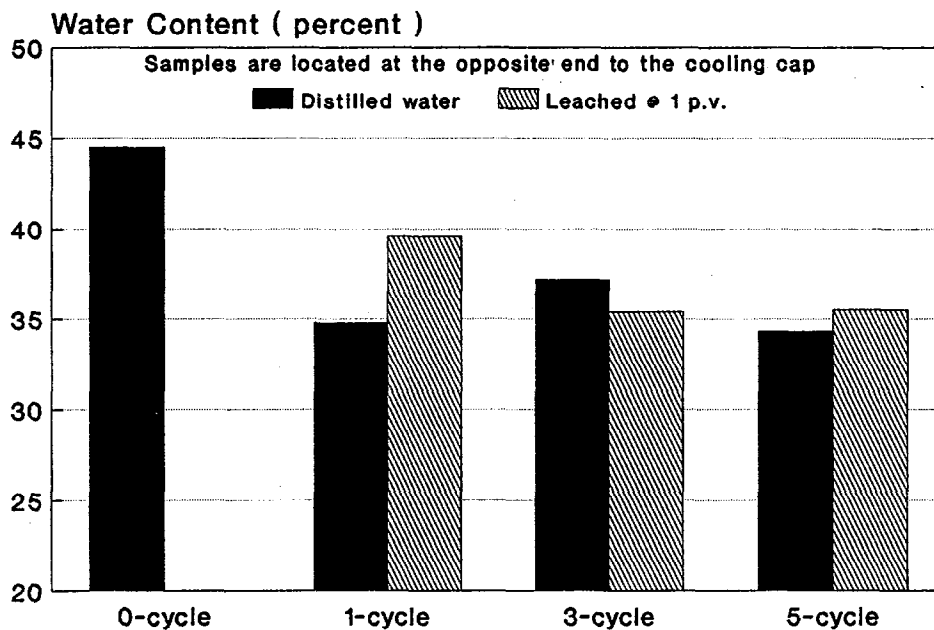


Fig. 3.11 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; pF=2.

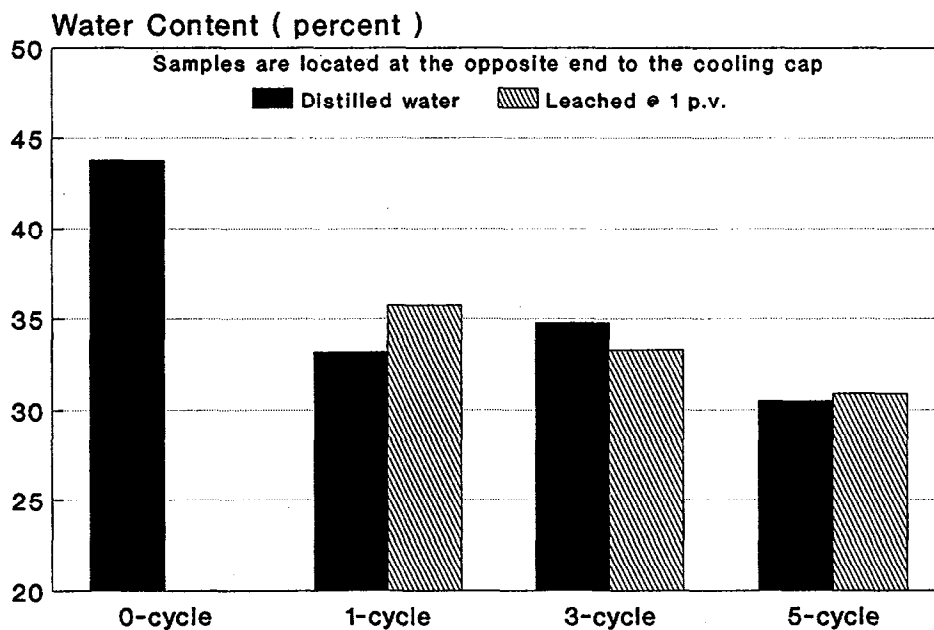


Fig. 3.12 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; $pF=3$.

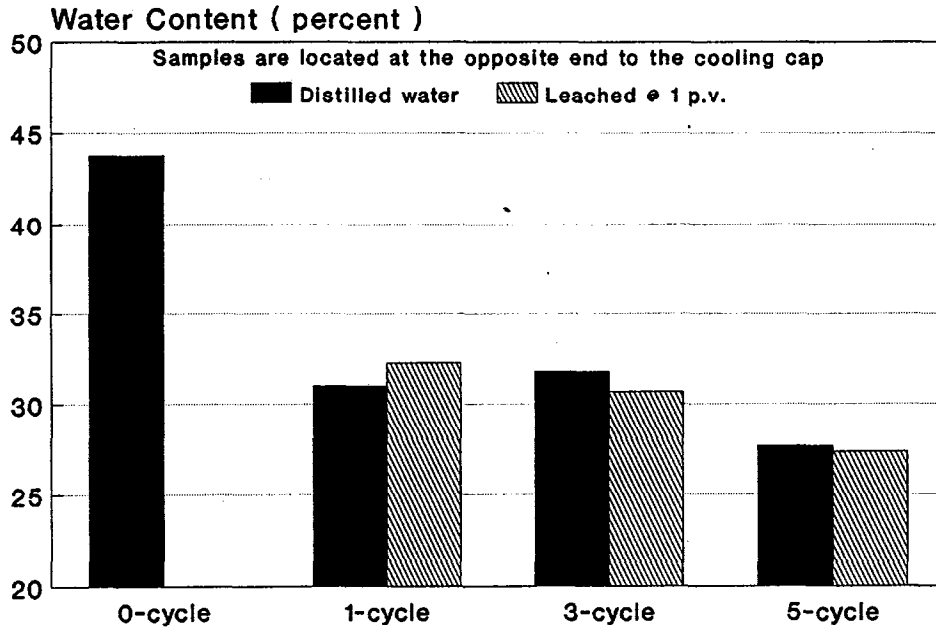
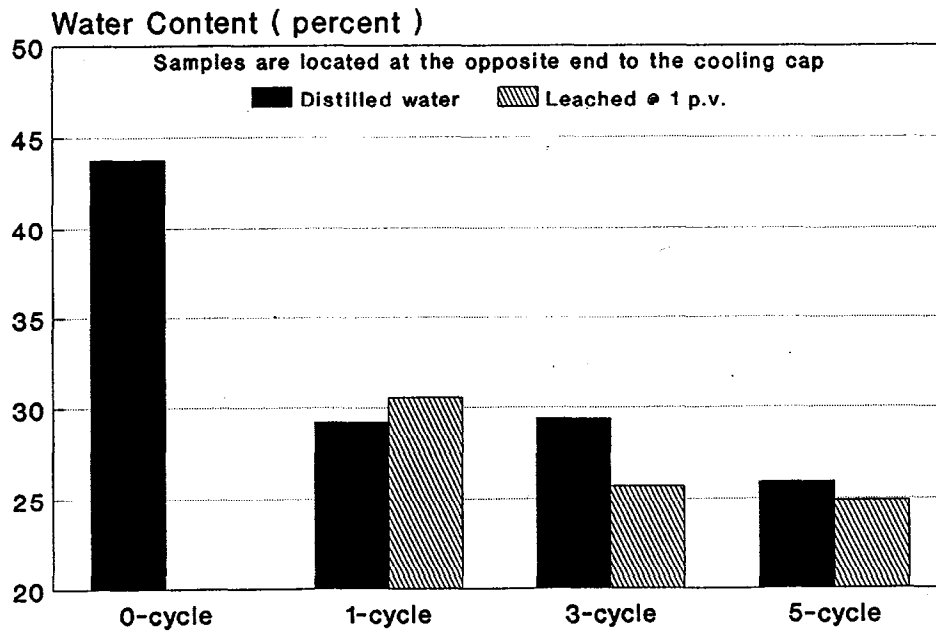


Fig. 3.13 Water content and cyclic freeze/thaw relationships; $pF=3.8$.



3.4 CONCLUSION

The results of this part of the study indicates that the moisture drainage characteristics of the clay cover are greatly influenced by cyclic freeze-thaw and the type of fluid used during both leaching and cyclic freeze-thaw. This can be attributed to the formation of aggregates and hence significant pore space readjustment. Additionally, in the design of engineered soil covers, the cyclic freeze-thaw effects on the structural rearrangement must be accounted for through a proper mix design of low permeable material and a non frost susceptible material. Furthermore, the thickness of the clay cover to be used in the field should be designed according to the air entry value after at least the first freeze-thaw cycle, due to the delaterious effect of cyclic freeze-thaw on the reduction of the suction pressure at which the air entry value could occur.

4.0 AIR PERMEABILITY AND OXYGEN CONTENT

4.1 INTRODUCTION

Oxidation of sulphidic tailings may result in the production of highly acidic leachate which, by infiltration could cause the contamination of water in both subsurface and surface systems. The rate of oxidation is highly dependent on the quantity of oxygen entering the soil system and on the rate of its transport. The oxygen can move through the soil by gas diffusion or by advective transport in solution phase. However, the latter method of transport mechanism is considered to be less important.

The fine grained soil cover over the tailings pile, especially when the soil is saturated, restrains the oxygen migration due to the relatively low solubility of oxygen in the water and to the lower diffusion coefficient for oxygen in water in comparison to that in the air (Nicholson et al.,1989). This, consequently, results in a reduction of acid generation.

This study is designed to investigate the readiness of air migration and oxygen availability in unsaturated and saturated clay cover systems. The principal goal is to evaluate the usefulness of the tested soil to be used as a cover material; hence restricting oxygen migration and reducing the rate of acid generation in sulphide tailings. In order to achieve that, the soil, compacted at about its optimum water content and maximum dry density was subjected to leaching and freeze-thaw cycles. Leaching was performed with two types of liquids: distilled water (pH about 6) and acidic tailings leachate (pH = 3). During freeze-thaw cycles only leachate was used for fluid intake. After each test, air permeability was measured and oxygen content profiles were recorded.

4.2. EXPERIMENTATION

4.2.1. Materials

The soil used in this experimental program was a varved clay provided by the Noranda Technology Centre. For the purpose of this study the soil was dried at room temperature to a moisture content at about optimum. The moisture content of the soil used in the experiments varied between 33 and 35%.

Two liquids were used throughout the study: distilled water (pH about 6.0) and leachate (pH = 3). The leachate was prepared by mixing the tailings with distilled water in a 1 : 3 ratio. After shaking the tailings in mechanical shaker for 1 hour, the water suspension was allowed to settle for 24 hours. The clear supernatant was collected and used as a leachate. The pH of the leachate was further reduced to 3 by the addition of sulphuric acid.

4.2.2 Test Apparatus.

The lucite cell measuring 0.27 m in height and 0.21 m in diameter was used in the experiments. The schematic diagram of the test apparatus is shown in Figure 4.1.

The cell consists of a lucite cylinder, a lucite bottom with a porous plastic acting as a filter and two interchangeable covers changed depending on which test phase: a lucite ring used in freeze-thaw experiments and full sealed cover with air outflow for the air permeability test and leaching. To prevent soil from any upward vertical movement during air the permeability test, an adjustable lucite plate was placed between the top of the soil and the top cover. Four oxygen probes were inserted into the soil through the holes in the bottom of the cell as shown in Fig. 4.1.

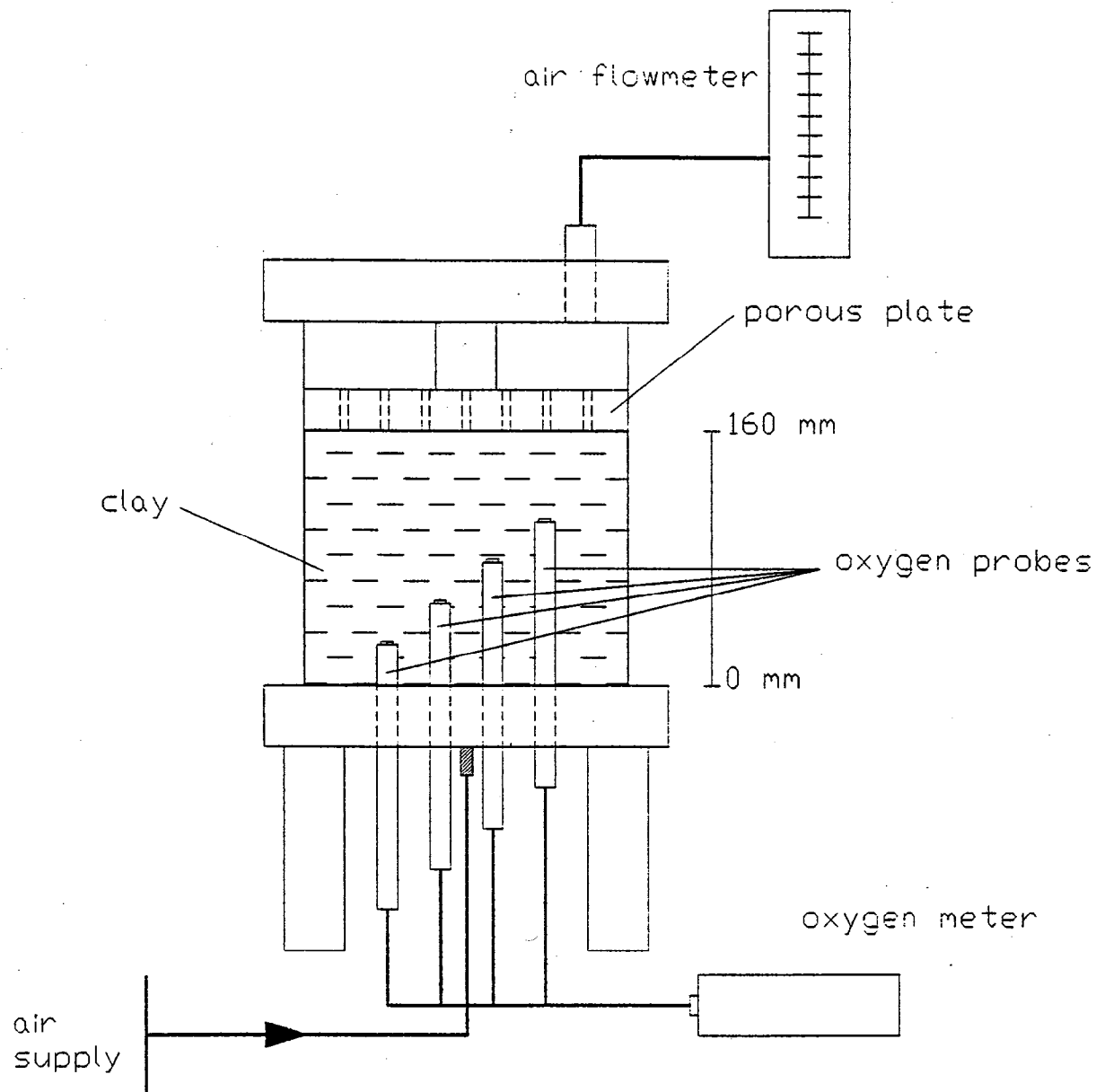


Figure 4.1. Schematic diagram of test apparatus.

4.2.3. Oxygen Probes

The probes used for measurement of the amount of oxygen in the sample were inserted into the soil at four different heights between the middle and the bottom of the cell. Before the experiment, all probes were calibrated in air according to the operating instruction provided by the manufacturer for the 9070 Oxygen Meter. The salinity of the pore solution which could influence the amount of the dissolved oxygen was determined by measuring the conductivity of the leachate and converting the obtained results according to the provided information by the manufacturer. The salinity was found to be less than 2.5 g/l so, no correction for salinity was required. After the probes were installed in the soil, the first control measurements were taken, prior to the subsequent experiment. Subsequent measurements were taken after the end of each experiment and during the air permeability tests.

4.2.4. Test Procedures

The soil was compacted in the lucite cylinder in 16, 1 cm thick layers. An approximate load of 2700 kgf was used for compaction. After four holes of depth 105, 80, 55 and 30 mm were bored from the bottom of the sample, the oxygen probes were introduced. The oxygen concentration measurements were made using Cole - Parmer 9070 Oxygen Meter. The oxygen content was measured directly in mg per litre of solution (or p.p.m.).

Four series of experiments were conducted in this study. Series No. 1 consists of 3 freeze-thaw cycles and was performed with leachate supply during the freezing process. Series No. 2 is composed of two tests: leaching with the acidic solution and a subsequent 1 freeze-thaw cycle. Two leaching fluids, i.e., distilled water, and leachate, and 1 freeze-thaw

cycle were performed during Series No. 3.

Finally, two leaching (distilled water and leachate) and 3 freeze-thaw cycles were conducted for Series No. 4. The air permeability was measured after each experiment.

4.2.5 Freeze and Thaw

The freeze/thaw procedure was similar to the one described in Section 3. The cell with compacted soil was placed in a cold room, then wrapped with plastic seal and fiberglass insulation. From the bottom outlet the cell was connected to a burette with leachate, to allow for liquid intake during freezing. A cooling cap attached to the cold bath was placed at the top of the sample. The temperature of the cooling device ranged between -18°C and -23°C .

One thermocouple, inserted at the bottom of the cell, is used as an indicator for frozen soil. The sample was completely moved together with the connected burette to room temperature ($+22^{\circ}\text{C}$) and allowed to thaw overnight.

4.2.6 Leaching

The leaching was performed using prepared leachate and distilled water as a reference liquid. A measured amount of liquid was poured into the top of the cylinder. To accelerate the process, the top of the liquid was pressurized to 69 kPa. The liquid was collected at the bottom outlet and its volume was measured to ensure that the required amount of fluid passed through the soil.

4.2.7 Air Permeability

For the air permeability measurement, the porous lucite plate was installed at the top of the sample to prevent soil lifting when air pressure was applied at the bottom. The plexiglass ring on the top of the cell used during freeze/thaw cycles was switched for the sealed lucite cover with the air outlet. The cell was connected to the air supply. The flow meter was attached to the air outlet. Air was injected under the following 7, 14, 27.5, 48, 55 or 69 kPa. To check whether air was passing through the soil sample, the oxygen content measurements were taken during the test. The flow rate was recorded by reading the flowmeter scale. The flow rate for the standard conditions (14.7 psi and 70°F) were obtained from the calibration curve in cm^3/sec . The atmospheric pressure and temperature in the laboratory during experiments were close to the standard conditions so, no correction factors were applied.

4.3 RESULTS AND DISCUSSION

4.3.1 Air Permeability

The air permeability of a soil indicates the ease of gas transmission under pressure differences. The air permeability depends on the porosity of the soil which is related to the soil structure. With increasing water content and subsequently decreasing the space through which flow can take place, the air permeability decreases. In the present study relatively high air pressure was applied to accelerate the process so, the errors in measurements might occur as a result of: (1) non viscous flow and (2) changes in soil structure. However, for Test No.2, when 69 kPa pressure was applied, no visible changes in the soil structure (cracks) were noticed. The above mentioned possible errors could give higher than expected air

permeability values. For calculation of the air permeability the following equation was used:

$$k = \frac{Q \cdot \eta \cdot L}{P \cdot A \cdot t}$$

where: k = the permeability of soil [cm^2]

Q = the volume of the flow in time t [cm^3]

η = the viscosity of the air = 1.84×10^{-5} Pa·s at 25°C

L = the length of the soil sample [cm]

P = the applied pressure [Pa]

A = the cross-section area of the sample [cm^2]

t = the time [s]

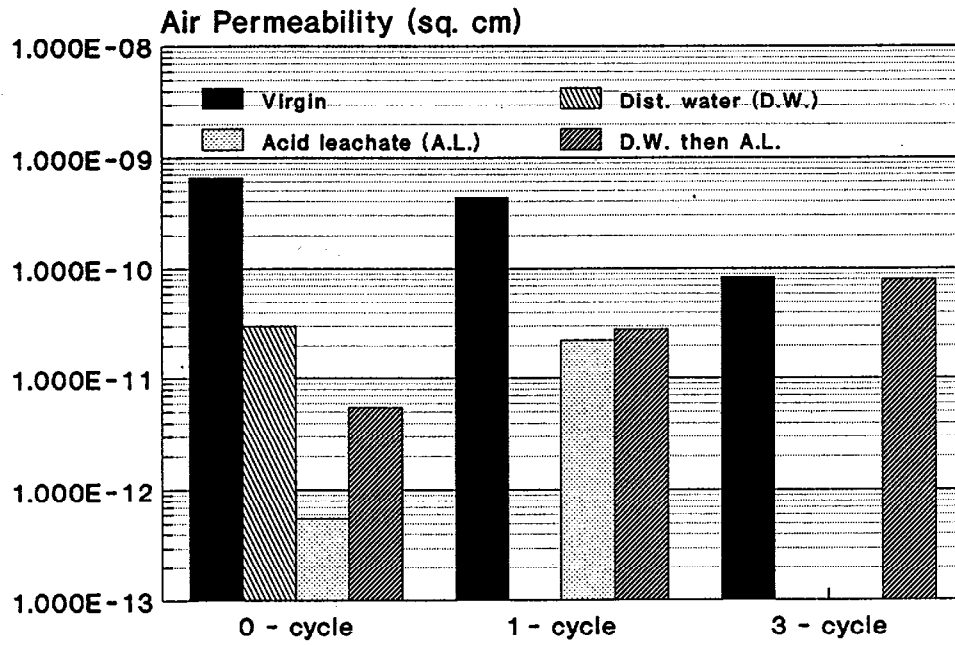
The initial air permeability of the tested soil after compaction ranged from 2×10^{-10} to 9×10^{-10} cm^2 . As indicated in Table 4.1, and shown in Fig. 4.2, for 0-freeze-thaw cycle, the air permeability, of samples leached with distilled water (D.W.) and followed by acidic leachate (A.L.), increased by at least one order of magnitude compared to that obtained after leaching with A.L. In the case where no leaching was performed, i.e., virgin samples, (Series No.1) the air permeability decreased, probably as a result of water intake during freezing and consequent increase in water content. In order to investigate the effect of leaching on air permeability, samples were leached with distilled water and then followed by leaching by acidic leachate. After each case, air permeability was performed. Two to three orders of magnitude difference in air permeabilities has been obtained as shown in Fig. 4.2 for 0-cycle of freeze-thaw. Subsequent freezing and thawing caused changes in the soil structure, i.e., aggregation and cracks. After each cycle, an irregular network of small

Table 4.1

RESULTS OF AIR PERMEABILITY TESTS

Series No.	Test No.	Description	Pressure applied	Air permeability (Sq. cm)	Comments
I	1	before freezing	4 psi	6.49×10^{-10}	
	2	after 1 freeze/thaw cycle	4 psi	4.33×10^{-10}	
	3	after 3 freeze/thaw cycles	4 psi	8.33×10^{-11}	
II	1	before leaching	4 psi	6.64×10^{-10}	Measurement taken after 22 hours of air flow.
	2	after leaching with acidic leachate	4 psi	5.55×10^{-13}	
	3	after leaching and 1 freeze/thaw cycle	4 psi	2.22×10^{-11}	
III	1	before leaching	4 psi	8.89×10^{-10}	after applied high pressure horizontal cracks appeared on the sides at the soil column
	2	after leaching with distilled water	10 psi	2.99×10^{-11}	
	3	after second leaching with acidic leachate	4 psi	5.55×10^{-12}	
	4	after second leaching and 1 freeze/thaw cycle	2 psi	2.78×10^{-11}	
IV	1	before leaching	4 psi	1.23×10^{-10}	
	2	after leaching with distilled water	8 psi	4.17×10^{-12}	
	3	after 2nd leaching with acidic leachate	8 psi	1.59×10^{-12}	
	4	after 2nd leaching and 1 freeze/thaw cycle	8 psi	7.17×10^{-12}	
	5	after 2nd leaching with acidic leachate and 3 freeze/thaw cycles	5 psi	7.99×10^{-11}	

Fig. 4.2 Air permeability variations with leaching condition and freeze/thaw.



horizontal and vertical cracks in the upper part of the soil sample was observed. This occurrence resulted in an increase in air permeability.

It should be noted that the air flow through the soil might dry the pores, increasing to a some degree the air permeability. However, time required to obtain the measurements was short (1 - 10 min) so, no significant changes due to the soil drying are expected.

4.3.2 Oxygen Profiles.

Oxygen diffusion through the clay cover is considered as the most important process by which oxygen transports in soil. The diffused flux of oxygen in the gaseous phase decreases as the water content in the soil increases, reaching a minimum value when the soil is saturated. At this stage, the oxygen transport occurs only in the solution phase and could be four orders of magnitude less than the case of gas diffusion in the air phase (Nicholson et al., 1989).

The measurements of oxygen content in the soil taken before the subsequent series of tests showed that the initial concentrations ranged from 7.9 to 9.1 mg/l. These values are slightly less than that found in the air (8.8 to 9.6 mg/l). The oxygen concentration profiles for various tests conducted in this study are shown in Figs 4.3 to 4.6.

It can be seen from the figures that the concentration of oxygen in the soil column diminished after each freeze-thaw cycle due to the leachate uptake and increased moisture content during freezing. The difference in oxygen content between the bottom and the middle part of the soil sample occurred as a result of moisture redistribution under freezing and thawing conditions (Mohamed et al., 1993a and b). From the previous studies, it is known that water content in the soil after the freeze-thaw cycle performed with leachate is:

Fig. 4.3 Oxygen concentration profiles as a function of cyclic freeze/thaw.

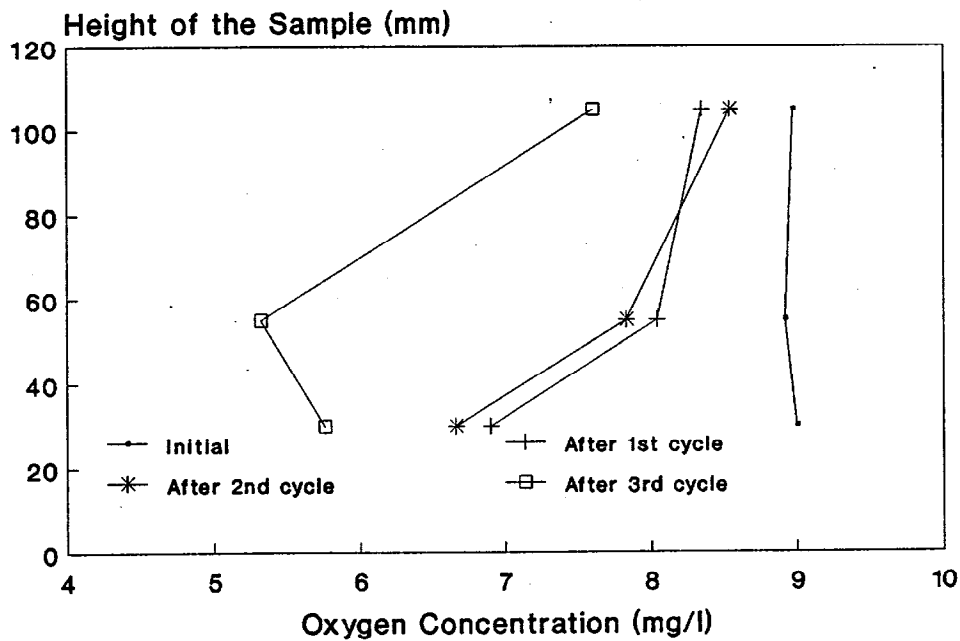


Fig. 4.4 Oxygen concentration Profiles as a function of leachate and freeze/thaw cycles.

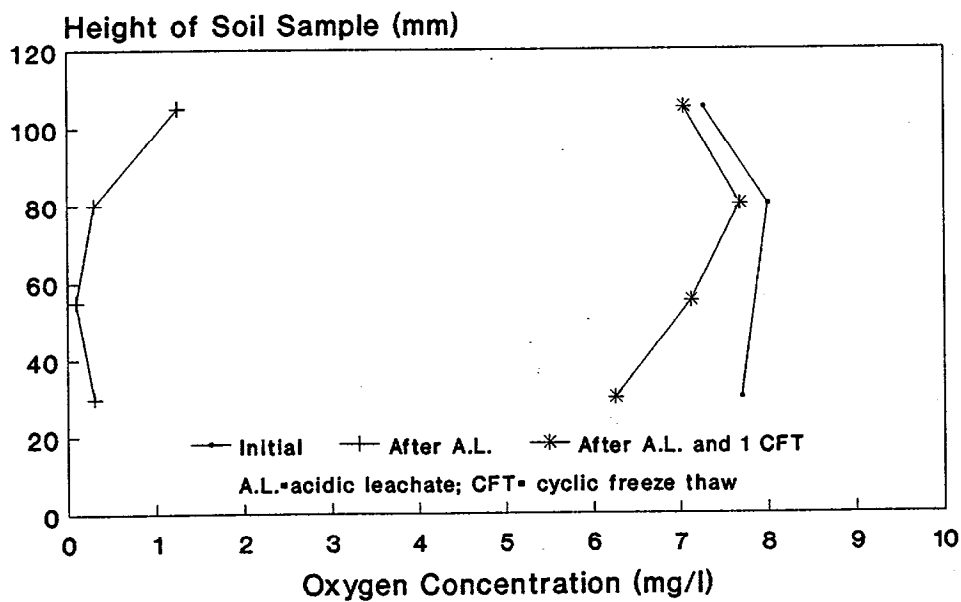


Fig. 4.5 Oxygen concentration profiles as a function of leachate and cyclic freeze/thaw.

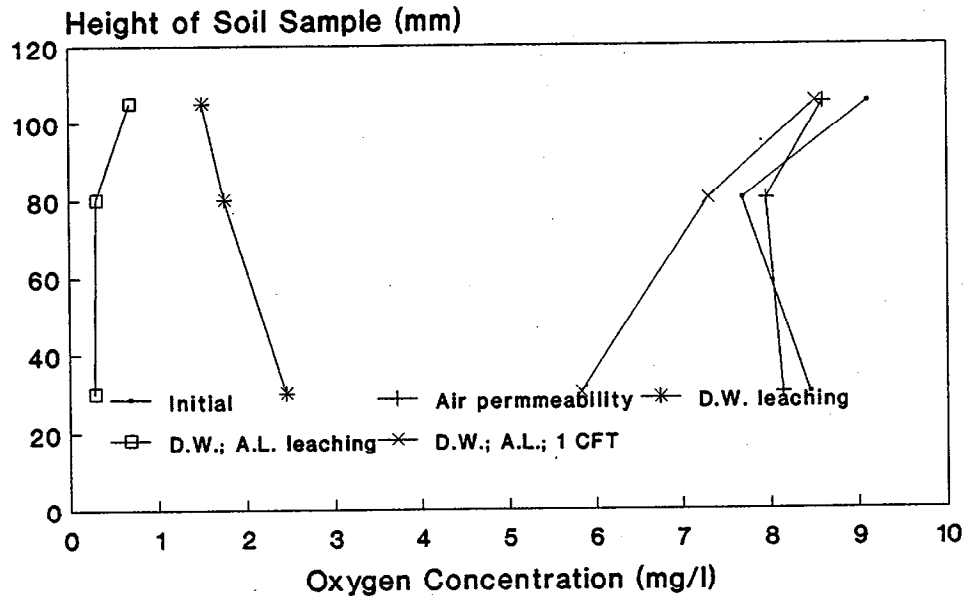
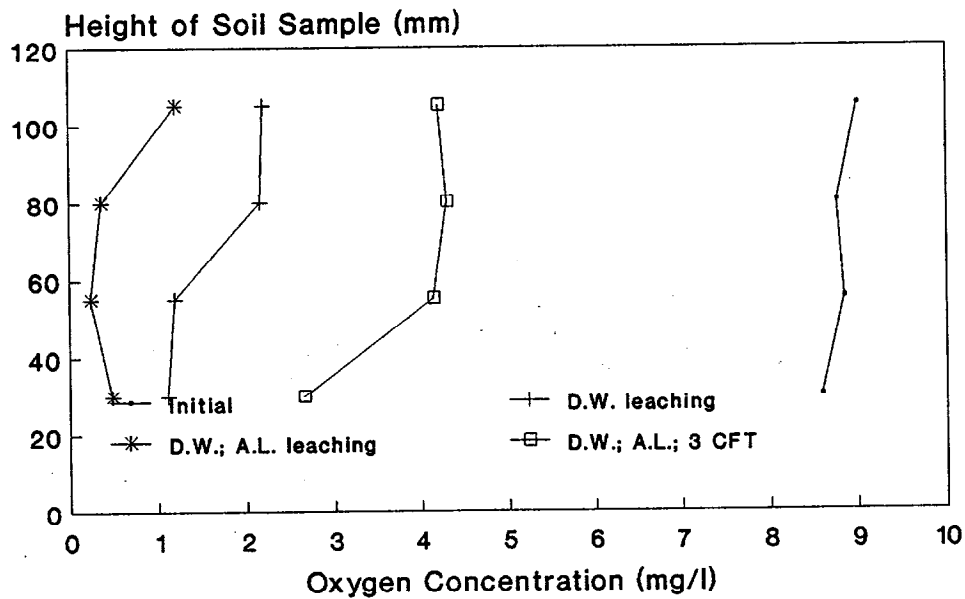


Fig. 4.6 Oxygen concentration profiles as a function of leaching and cyclic freeze/thaw.



(1) much higher than initial water content for samples located close to the liquid source; (2) approximately equal to the initial water content for samples located in the middle part of soil sample and, (3) greater than the initial water content at the top of the soil column (Mohamed et al., 1993a). In agreement with water content distribution, oxygen content is relatively low next to the bottom of the soil column and higher in the middle part of the soil column (at height about 105 mm) where it approaches the initial value.

Leaching considerably decreases oxygen content in the soil. Oxygen concentration is greatly reduced after leaching with distilled water and dropped nearly to zero after subsequent leaching with the acidic leachate. This difference occurred probably as a result of the variation of oxygen content in both liquids, i.e., distilled water and acidic leachate, and is related to the oxygen solubility with different pH's.

The oxygen concentration profiles are markedly altered after one freeze-thaw cycle was performed after leaching. In Series No. 2 and 3 the oxygen content at different points along the profile increased almost to the initial values, remaining however inversely proportional to the water distribution after freezing: lower at the bottom and higher in the middle part of the specimen. This rapid increase in oxygen content is probably caused by the oxygen diffusion through the cracks which appeared as a consequence of freezing.

In Series No. 4, the overall oxygen concentration in the sample after freeze-thaw is less than that in the previous two series. This could be conditioned by higher soil moisture content due to the freezing conditions.

Air permeability testing was always performed after the measurements of oxygen concentration so, air entering the soil during tests would not affect the oxygen distribution.

4.4 CONCLUSION

To reduce the acid production from reactive sulphide tailings, the oxygen diffusion through the protective clay cover must be restricted. To evaluate the usefulness of a given clay as a material for the cover, the soil specimens were subjected to leaching and cyclic freeze/thaw. For each condition, air permeability and oxygen concentration were measured.

It was found that freeze and thaw influence both the air permeability and the oxygen content in the soil. When the soil was unsaturated, prior to the test, the air permeability and oxygen content decreased due to the increase in moisture content.

When the soil samples were subjected to leaching, air permeability decreased by one to two orders of magnitude and oxygen concentration dropped almost to zero. The difference in oxygen content, between the soil saturated with distilled water and that with acidic leachate, occurred probably because of the difference in oxygen solubility in both liquids.

Freeze and thaw cycle performed after leaching caused a significant increase in the air permeability and oxygen content. The possible changes in the soil structure occurred during freezing could allow the air to enter the soil through the formed cracks.

5.0 REFERENCES AND SUGGESTED READING

- Benson, C.H., and Othman, M.A. (1993) "Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in site" ASCE, J. of Geotech. Eng., Vol. 119, No. 2, pp.276-294.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A., and Reardon, E.J. (1989) "Reduction of acid generation mine tailings through the use of moisture retaining cover layers as oxygen barrier" Can. Geotech. J. Vol. 26, pp. 1-8.
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., Capourscio, F., Yanful, E.K., and Bienvenu, L. (1993) "Chemical interaction and cyclic freeze-thaw effects on the integrity of the soil cover for Waite Amulet tailings" Joint CSCE-ASCE national Conf. on environmental engineering, Montreal, Canada, pp. 1-14.
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., and Tan, B.K. (1992) "Mitigation of acidic mine drainage: engineered soil barriers for reactive tailings" Proc. envir. eng. session. water forum '92, ASCE, Baltimore, MD, pp. 457-462.
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., and Mazus, M. (1993a) "Performance evaluation of engineered clay cover subjected to different environmental conditions" Int. Conf. on the environment and geotechnics, Paris, pp. 1-9.
- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., and Mazus, M. (1993b) "Contaminant migration in engineered clay covers due to heat and moisture redistribution under freezing conditions." paper submitted to Can. Geotech. J.
- Yanful, E.K., and Aube, B.(1993) "Modelling moisture retaining soil covers" Joint CSCE-ASCE National Conf. on environmental engineering, Montreal, Canada, pp. 1-8.
- Yanful, E.K., and St-Arnaud, L. (1991) "The hydrogeochemistry and geotechnique of the Waite Amulet tailings site near Rouyn-Noranda, Quebec, Canada " 1st Can. Conf. on envir. geotech. Montreal, Canada , pp. 263-270
- Yong, R.N., and Boonsinsuk, P., and Yin, C.W.P. (1985) "Alteration of soil behaviour and cyclic freezing and thawing" 4th Int. Symp. on ground freezing, Sapporo, Japan, pp. 187-195.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Tucker, A.E. (1984) "A study of frost-heave mechanics of high clay content soils" J. of Energy resources technology, Vol. 106, pp. 502-508.
- Yong, R.N., Sweere, G.T.H., Sadana, M.L., Moh, Z.C., and Chiang, Y.C. (1982) "Compositional effect on suction of a residual soil" ASCE speciality conference, Eng., and Cons. in Tropical and residual soils, Honolulu, Hawaii, pp.296-313.

- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O., and Warkentin, B.P. (1992) "Principles of contaminant transport in soils" Elsevier, Amsterdam, 327 p.
- Yong, R.N., and Mohamed, A.M.O. (1992) "Cyclic freeze-thaw consideration in design of engineered soil covers for reactive tailings" CSCE Annual Conf., Quebec, QC, pp. 173-182.

**CHEMICAL INTERACTION AND CYCLIC FREEZE
THAW EFFECTS ON THE INTEGRITY OF THE
PROPOSED SOIL COVER SYSTEM**

FINAL REPORT

Submitted to

**Gouvernement du Quebec
Ministère de l'Énergie et des Ressources (Mines)
Centre de recherches minérales
Services de la technologie minérales**

CRM 7125-G-001

Prepared by

**A.M.O. Mohamed, R.N. Yong, and F. Caporuscio
Geotechnical Research Centre, McGill University
817 Sherbrooke St. West
Montreal, Quebec
H3A 2K6**

March 1992

TABLE OF CONTENTS

SUMMARY	1
1.0 INTRODUCTION	
1.1 Terms of Reference	3
1.2 Contractor	3
1.3 Background	3
1.4 Objectives	4
1.5 Scope of Work	5
2.0 EXPERIMENTATION	
2.1 Materials	6
2.2 Test Procedure	7
3.0 RESULTS AND DISCUSSIONS	
3.1 Physical Analysis	9
3.1.1 Positive Water Head	9
3.1.2 Negative Water Head	11
3.2 Chemical Analysis	12
3.2.1 Positive Water Head	12
3.2.1.1 Migration of Cations	12
3.2.1.2 Migration of Heavy Metals	
3.2.1.3 Migration of Anion	14
3.2.2 Negative Water Head	
3.2.2.1 Migration of Cations	15
3.2.2.2 Migration of Heavy Metals	15
3.2.2.3 Migration of Anions	16
3.3 Comparison between Positive and Negative Water Heads	16
4.0 CONCLUSIONS	17
5.0 RECOMMENDATIONS	19
6.0 REFERENCES	

CHEMICAL INTERACTION AND CYCLIC FREEZE THAW EFFECTS ON THE INTEGRITY OF THE PROPOSED SOIL COVER SYSTEM

A.M.O. Mohamed, R.N. Yong, and F. Caporuscio
Geotechnical Research Centre, McGill University
817 Sherbrooke St. West
Montreal, Quebec
H3A 2K6

RESUME

Au cours de cet étude, deux cas ont été examinés en tenant compte de la disponibilité d'eau non-gelée lors de la gelissivité d'un sol. En premier lieu, l'application d'une charge positive a permis l'évaluation du dommage maximal sur la couverture argileuse pendant un gel/dégel cyclique. Tandis qu'en deuxième partie, la simulation des conditions du site Waite Amulet, toujours sous gel/dégel cyclique, a été effectué par le biais de l'application d'une charge négative.

Pour caractériser l'influence du gel/dégel cyclique sur l'intégrité de la couverture argileuse, des analyses physiques et chimiques ont été effectuées dans les deux cas. Il a été démontré, qu'il eut une réduction considérable de l'intégrité de la couverture argileuse due à la charge positive induite lors du gel/dégel cyclique. Ceci est attribué à: (1) l'agrégation des particules d'argiles; (2) l'interaction chimique entre les solutions acides et métaux lourds provenant de résidus miniers et du fluide occupant les pores de l'argile. Ce qui résulte en une réduction de l'épaisseur de la double couche et en une augmentation de possibilité de floculation des particules d'argiles, par surcroît en une augmentation de la perméabilité; (3) la réduction de l'écran protecteur argileux causé par la diminution du pH.

D'autre part, pour le cas de pression d'eau négative, l'intégrité de la couverture d'argile est légèrement réduite à cause de: (1) une faible prise d'eau pendant le gel; ainsi qu'une quantité limitée d'interaction chimique. Cependant due à un lessivage prolongé, les cations, dans le fluide occupant les pores de l'argile, seront réduits. Conséquemment l'épaisseur de la double couche ainsi que les tendances dispersives de l'argile seront augmentées. Ce qui se traduit en une diminution de la perméabilité à travers la couverture d'argile.

Néanmoins, la pression d'eau négative utilisée dans cet étude était inférieure à la pression d'entré d'air négative obtenue par le biais d'essais osmotique sur argile en laboratoire (Yong et al. 1991). Suite à ce fait, la couche d'argile ne peut être saturée. Cette solution n'est donc pas recommandable pour l'aménagement du site.

CHEMICAL INTERACTION AND CYCLIC FREEZE THAW EFFECTS ON THE INTEGRITY OF THE PROPOSED SOIL COVER SYSTEM

A.M.O. Mohamed, R.N. Yong, and F. Caporuscio
Geotechnical Research Centre, McGill University
817 Sherbrooke St. West
Montreal, Quebec
H3A 2K6

SUMMARY

In this study program, two cases regarding water availability during freezing were investigated. The first case adopts a positive water head to assess the maximum damage to the clay cover during cyclic freeze/thaw. The second case adopts a negative water head during cyclic freeze/thaw to simulate field condition in the period of fall at Waite Amulet site.

For each case, physical as well as chemical analysis was performed to characterize the effect of cyclic freeze/thaw on the integrity of the proposed clay cover. It was demonstrated that the integrity of the clay cover was considerably reduced due to the induced positive water head during cyclic freeze/thaw. This is attributed to: (1) aggregation of clay particles; (2) chemical interactions between the generated acidic solutions and heavy metals from the tailings and the clay residence pore fluid. This in turn results in a reduction of the thickness of the double layer and increases the tendency of flocculation of the clay particles; hence an increase in permeability; and (3) reduction in the buffering capacity of the clay due to reduction in pHs.

On the other hand, for the case of the negative water head, the integrity of the clay cover is slightly reduced due to: (1) limited amount of water intake during freezing; and (2)

limited amount of chemical interaction. However, due to further leaching, the residence pore fluid cations in the clay will be reduced. Hence, the thickness of the double layer will be increased and the clay tendency for dispersion will be increased. This in turn will reduce the permeability of the clay cover to water.

Nevertheless, the negative water head used in this study was less than the negative head at the air entry value of the clay which obtained from soil suction experiments (Yong et al. 1991). Therefore, the clay layer will remain unsaturated. This is not recommended for decommissioning of the site (i.e. protection against oxygen and water infiltrations).

1.0 INTRODUCTION

1.1 TERMS OF REFERENCE

Research Contract with the Ministère de l'Énergie et des Ressources Mines/Centre de Recherches Minérales (MER/CRM). CRM 7125-G-001.

1.2 CONTRACTOR

Geotechnical Research Centre, McGill University (Dr. A.M.O. Mohamed)

1.3 BACKGROUND

The Waite Amulet "covers project" is a joint project sponsored by NORANDA INC., CANMET and Centre de Recherches minérales (CRM) of the Ministère de l'Énergie et des Ressources of Quebec. The project is directed by a steering Committee of three people, and one representing each of the sponsoring partners. Dr. E.K. Yanful of the Noranda Technology Centre (NTC) manages the project on behalf of the steering committee.

The principal goal of the project is to evaluate, on a field scale, the effectiveness of engineered soils covers for reducing the rate of acid generation in reactive sulphide tailings. The idea behind the current project is to conduct field testing prior to full-scale construction of soil covers for tailings decommissioning.

The Waite Amulet tailings site close to Rouyn-Noranda Quebec was chosen for the project because the hydrogeochemistry of the site had already been established from earlier studies, and because the tailings are fairly typical of reactive sulphide tailings, with an upper oxidized zone and hardpan formation, and a lower unoxidized zone.

The project is designed to last 3 years. Its principal elements were as follows:

- (1) design and construction of these plots with different covers on the Waite Amulet tailings sites.
- (2) monitoring of the performance of the test covers.
- (3) evaluation the effectiveness of the covers to reduce oxidation rate and hence acid generation.

The project began July 15, 1990 and construction of the test plots was completed in mid September 1990. Four plots measuring 20 m by 20 m have been installed as follows:

- (a) control (no cover)
- (b), (c) composite cover with coarse-grained ad fine-grained (clay) soils
- (d) cover with coarse-grained soil and a geomembrane

Monitoring systems for each test plot include gas and temperature monitors in the cover and in the underlying tailings, pressure and water content monitors in the cover, piezometers for water sampling in the saturated zone, and a collection basin lysimeter underneath the cover to obtain water samples in the unsaturated zone (Figs. 1.1 to 1.4). The Lysimeters contain unoxidized tailings so as to generate a body of data which is not influenced by previous oxidation and the production of oxidation product. Further details of the tasks to be performed in the project is presented in the project proposed by Noranda Technology, Centre, May 2, 1990

1.4 OBJECTIVES

The Geotechnical Research Centre, McGill University, performs laboratory evaluation of the performance of the proposed clay cover system subjected to freeze-thaw cycles.

1.5 Scope of Work

The following tasks are performed by the Geotechnical Research Centre:

- (1) Cyclic freeze-thaw experiments on the proposed clay cover. The clay cover consists of the following layers from bottom to top: tailings, gravel, clay and sand.
- (2) Permeability tests on the proposed clay cover after thawing.
- (3) Chemical analysis of major cations and anions after each freeze-thaw cycle of all the layers in the proposed clay cover.
- (4) Simulate the field water intake conditions in the field during freezing.
- (5) Interpretation of results and reporting.

2.0 EXPERIMENTATION

2.1 Materials

The soil was provided by Noranda Technology Centre, and consisted of samples of fine grained sand designated as Ansil S-1, light brown silty clay designated as bulk varved clay, and unoxidized mine tailings designated as WA-17. The mineralogical analysis of the clay has shown that its mainly consists of the following minerals in decreasing order: feldspar, quartz, kaolinite, illite, chlorite and amphibole. Also, the following minerals are shown to be exist in Ansil S-1 in a decreasing order: feldspar, illite, chlorite , amphibole, and mica. The clay has a natural water content ranging from 37% to 40%. The pea gravel used in this experiment was provided by the Geotechnical Research Centre.

Fig. 2.1 shows the proposed clay cover in the filed. The actual thickness of the layers in the proposed clay cover are 0.3, 0.5, and 0.3 m for gravel, clay, and sand layers respectively. To determine the thickness of each layer in the laboratory experiments a ratio of 1 to 10 is used. Therefore, the following thickness were used: 0.03, 0.05, and 0.03 m of gravel, clay, sand layers respectively. The remainder of the plexiglass, approximately 0.02 m, was tailings, giving a total sample height of 0.13 m. Fig. 2.2 shows a schematic diagram of test apparatus showing the dimensions of sand layer, the location of thermocouples along the height of the sample and the cooling cap on the top of the gravel layer. The diameter of the samples was 0.10m.

The calculated dry densities of the placed material were 1.12 to 1.29 Mg/m³ for the tailings, 1.37 to 1.73 Mg/m³ for the sand the 1.48 to 1.59 Mg/m³ for the clay. Based on the height of the clay layer, and the inner diameter of the plexiglass cylinder , the volume of void was calculated. With an assumed specific gravity of 2.65, one pore volume corresponds

to 156 mm³ of leachate.

2.2. Test Procedures

Initially the plexiglass cylinder was coated with a thin film of vaseline to lessen friction during freezing, and to facilitate sample extrusion. Following placement of a Whatman Grade 1 filter paper over the porous stone at the bottom of the cell, the tailings and sand were each compacted by hand in three equal lifts. The clay was statically compacted in three lifts using an Instron Tension Testing machine calibrated for compression. The approximate load placed on each lift was in the range from 5.34 kN to 5.57 kN. The gravel was then hand compacted in two lifts. Before placement of the soil, and after compaction of each material, the apparatus was weighed.

Once all the four materials were compacted in the cell, thermocouples were inserted. The four thermocouples were located at the mid-point of each soil layer. The cell was then wrapped with plastic seal and two layers of fibreglass insulation. Tubing was attached from the bottom outlet to a burette filled with water, thereby allowing for water intake during freezing cycle. Two cases were simulated regarding the water height in the burette. In the first case, the water height was 0.08 m from the top of the unoxidized tailings. This in turn will induce maximum damage to the clay layer during freezing and thawing and hence simulates the worst case scenario. In the second case, the tailing layer was saturated and then the water level in the barrette was dropped to 0.13 m below the top of the unoxidized tailing layer. This condition simulates the actual water level in the field. The cooling cap was placed on the sample, and freezing commenced. It should be noted that the temperatures of the room, supply, and bath varied from 2.8 to 4.5°C, 11.0 to 14.5°C, and

16.0 to 19.5°C, respectively as shown in Fig. 2.3.

Following complete freezing of the sample, leaching test were undertaken. a reservoir with acidified water, pH ranges from 3.8 to 4.5, was attached via tubing to the top inlet valve. As thawing occurred, one pore volume of leachate was collected. Permeability measurements were recorded at this time, under heads of approximately 1.50 m. Following leaching, the freezing cycle was continued or the sample was extruded, depending upon the test requirements.

At the end of each test, specimen was extruded, cut into slices, and the sliced samples were analyzed for soluble ions using batch equilibrium test (ASTM 1984). Cations and heavy metals concentrations were determined using atomic absorption spectrophotometry (AAS). Sulphate was determined using titration with AgNO_3 . The pH was measured using pH meter.

3.0 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 PHYSICAL ANALYSIS

The physical analysis described in this section includes: (1) water intake during freezing; (2) initial water content; (3) initial dry density of the clay (4) change in permeability, and (5) visual observations. As described before the following two cases are discussed.

3.1.1 Positive Water Head

The water height in this case was 0.08 m from the top of the unoxidized tailings. The following tests were conducted in this case:

- (1) One cycle freezing only-no leaching (Test No. 2)
- (2) One cycle freezing/thawing (Test No. 1)
- (3) Two cycles freezing/thawing (Test No. 3)
- (4) One cycle freezing/thawing-no tailings (Test No. 4)
- (5) Repeat Test No. 4 - thaw for 4 days.

Visual observations of all the above mentioned tests have indicated that horizontal as well as vertical cracks have been formed. Also, it is noticed that some ice lenses have been formed. To be specific, for example Test No. 3, it is observed that after first cycle, mostly horizontal cracks are formed. Large horizontal crack in middle of the clay layer has been observed. Furthermore, after the second cycle, smaller horizontal cracks have been formed. However, no large fractures was noticed. It should be noted that formation of ice lenses were observed at the clay/sand interface. These descriptions are shown in Table 3.1.

Variations in clay permeability as a function of freeze thaw cycles are shown Fig. 3.1.

The first set of data are obtained from (Yong et al. 1991) for the clay layer only without any interactions between the clay and the chemicals leached out from the tailings. In another words, the tests were performed on one clay layer with availability of distilled water during freezing and thawing. The second set of data is calculated in this study. For the first set of data, it was observed that an increase in permeability by 23 times after 3 cycles of freeze/thaw was obtained. This is attributed to: (1) formation of microcracks in both vertical and horizontal directions, and (2) clay aggregation during freezing, hence a decrease in surface area and an increase in pore size geometry (Yong and Mohamed, 1992).

For the second series of data, it is observed that after the first cycle of freeze/thaw the permeability increases by 625 times. This is attributed to: (1) formation of microcracks in both vertical and horizontal directions; (2) reduction in the thickness of the diffuse double layer due to replicability of major cations in the clay by the induced heavy metals in the leachate, and (3) clay aggregation during freezing. Furthermore, after the second cycle of freeze/thaw, the permeability decreases by 2.9 times from that observed after the first cycle of freeze/thaw. This is attributed to compression of clay particles in an aggregated form; hence reduction in water content and specific surface area. It is anticipated that the permeability will not show any further decrease after the second cycle and will level off. This conclusion is based on a similar behaviour of clay under freeze/thaw cycles reported by Yong and Mohamed (1992).

In addition, the initial variation of permeability, at zero freeze/thaw cycle, between 1990 data and current data is due to: (1) initial molding water content; (2) initial dry density, and (3) size of the tested samples.

3.1.2 Negative Water Head

The water height in this case was 0.13 m below the top of the unoxidized tailing layer.

The following test was conducted in this case:

(1) Three cycles freezing/thawing (Test No. 6).

Visual observations have demonstrated that horizontal and vertical cracks were formed in the clay layer. Due to the negative water head on the clay layer, the water intake was ~ 30 times less than the case for positive water head. The reduction in the amount of water intake reduces the effect of the chemical attack on the clay layer. However for long period of time, chemicals will continue to migrate in the unfrozen layer around the clay particles (Yong and Warkentin, 1975); hence will affect the integrity of the clay layer. Table 3.2 presents a summary of cyclic freeze/thaw tests under negative water head. As usual, permeability test was performed after thawing in the freeze/thaw cell. It was observed that the calculated permeability was 487 times higher than the original permeability without freeze/thaw cycles. This is attributed to the formation of cracks and possible compression of clay due to formation of aggregates; hence more free path along the side walls. By performing a falling head permeability test on the same clay layer in consolidation cell, the calculated permeability was only 2 times higher than the original permeability without freeze/thaw cycles. The question is which is the correct permeability value?

To answer this question, one has to reevaluate the 1990 permeability data reported in Fig. 3.1. An increase in permeability by 23 times due to 3 cycles of freeze/thaw under a positive water head was reported. Therefore, the only factor which causes the maximum damage is the positive water head associated with cyclic freeze/thaw. There was no induced chemical effects on the clay during freeze/thaw cycles. In the current situation, the clay is

allowed to freeze under a negative water head; hence the amount of water intake as well as the effect of chemical attack is minimum. Therefore, the effect on permeability should be less than that for 1990 data. On the other hand, due to extrusion of the sample and performing the permeability test in consolidation cell there may be a small effect of disturbance which attributed to the lower calculated permeability value.

Last but not least, the negative water head used in this test was high to a degree that will prevent the clay layer from being saturated under all weathering conditions; hence reduction in oxygen diffusion and leachate generation.

3.2 CHEMICAL ANALYSIS

3.2.1 Positive Water Head

The pore fluid chemical analysis associated with positive water head freeze/thaw tests are shown in Table 3.3.

3.2.1.1 Migration of Cations

The migration profiles for pore fluid Na^+ concentrations versus height of the clay cover are shown in Fig. 3.1. The migration profiles depict how a particular species migrate or move through the clay cover with increasing permeation due to freezing. The initial concentration of Na^+ in the clay was 10 ppm. After freezing period in the first cycle, Na^+ concentration, in the pore fluid of the bottom layer of the clay, increases while, it decreases in the middle and top layers of the clay. After thawing, Na concentration decreases along the clay layer. For more cyclic freeze/thaw, Na^+ concentration continues to decrease. On the contrary, the concentrations of K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} are increased with increasing cyclic freeze/thaw as shown in Figs. 3.3 to 3.5. This behaviour is attributed to cation exchange or

replacement by Fe and Zn^{2+} in the bottom layer of the clay. Whilst, at the top part of the clay layer, the interaction mechanism is due to cation exchange process between calcium, magnesium, sodium and potassium. That is, the replacement of sodium and potassium ions in the exchangeable sites by calcium and magnesium to balance the charge deficit that occurs by the elution of sodium and potassium.

3.2.1.2 Migration of Heavy Metals

Before embarking into discussion regarding migration of heavy metals, pH variations along the clay cover are discussed. The variations in pH along the clay cover is shown in Fig. 3.6. It can be seen that the clay has initially a pH value around 7. Due to the generated acidic leachate from the tailings during freezing, soil pH increases as shown in the case of freezing during the first cycle. The pH reduced from 7 to about 4.5 in the bottom layer of the clay. Further freeze/thaw cycles attributed to further decrease in pH along the clay layer. This decrease in pH enhances the movement of heavy metals (i.e. Zn and Fe) as shown in Figs. 3.7 and 3.8. The results have shown that significant amount of heavy metals were retained in the top part of the clay layer. Due to low pH in the bottom part of the clay layer, it is expected that the retention capacity of the clay in the bottom part is reduced. However, this depends on the buffering capacity of the clay to any change in pH. It is known that heavy metals would generally precipitate out of solutions if the solution pHs are high. Since clay pH was initially about 7 therefore, Zn and Fe precipitates in the clay at the start of freezing. Further freezing decreases clay pH and enhances the mobility of Zn and Fe in solution. The amount of Zn retained in the soil is less than the amount of Fe retained. This can be explained by the ease of exchange or the strength with which cations

of equal charge are hold is generally inversely proportion to the hydrated radii or, on the other hand, proportion to the unhydrated radii (Bohn, 1979), Therefore, the predicted order of soil retention based on unhydrated radii is Fe (0.082 nm) > Zn (0.074 nm). Similar results were reported by Mohamed et al. (1992).

3.2.1.3 Migration of Anion.

The migration profiles of so_4^{2-} concentration along the height of the clay cover are shown in Fig. 3.9. It can be seen that the concentration of so_4^{2-} in the pore fluid increased as a function of pH and freeze/thaw cycles. Therefore the so_4^{2-} attenuation by the clay cover is very low and with time this high concentration will eventually be released to the environment. Since so_4^{2-} ions are generally considered as non-specific ions, i.e. only exist on the outer coating of the double layer, attenuation is generally not a function of the type or amount of clay mineral present. Chemical analysis of the sectioned clay cover showing low accumulation and retention of the so_4^{2-} ion can be attributed to physical dispersion in the clay with perhaps a small amount of interaction at anion exchange sites on the clay edges, or to other chemical reactions. The exchange between so_4^{2-} ions and other ions with negative charges which is part of the lattice is not likely because the sulphate ion is significantly bigger than the oxygen ion, i.e. it is too big to replace or coordinate with oxygen and hydroxyl ions.

3.2. 2 Negative Water Head

The pore fluid chemical analysis associated with negative water head freeze/thaw tests

are shown in Table 3.4

3.2.2.1 Migration of Cations

The migration profiles for pore fluid concentration of Na, K, Ca and Mg versus height of the clay are shown in Figs. 3.10 to 3.13 respectively. It can be seen that the concentration of Na, Ca and Mg in the clay pore fluid are decreased after 3 cycles of freeze/thaw. It should be noted that during thawing in the first and second cycles there was no permeability measurements; hence no rain conditions were simulated. The migration of cations in the first and second cycles was due to the expelled water during thawing. During thawing period of the third cycle, falling head permeability test was performed. During this phase, cations are leached from the clay hence a reduction in the concentrations of cations in the clay pore fluid is measured. The increase in the K pore fluid concentration as shown in Fig. 3.11 could be attributed to cation exchange.

3.2.2.2 Migration of Heavy Metals

The migration of heavy metals could be explained on the bases of pH variations along the depth of the clay cover. Due to the limited amount of water taken by the clay cover, soil pH does not show dramatic change in pH. The soil pHs after 3 cycles of freeze/thaw were greater than 6. Therefore, the heavy metals are precipitated in the pore fluid of the clay layer. This is shown in Figs. 3.15 and 3.16. The concentrations of Zn and Fe in the clay pore fluid were 0.1 ppm.

3.2.2.3 Migration of Anion

The migration profiles of SO_4^{2-} are shown in Fig. 3.17. Due to leaching of the clay layer, the SO_4^{2-} concentration in the soil or fluid was reduced.

3.3 COMPARISON BETWEEN POSITIVE AND NEGATIVE WATER HEADS

The integrity of the clay cover was considerably reduced due to the induced positive water head during freezing which resulted in sulphide oxidation and acid generation in the tailings. Due to the low pHs, heavy metals were released and maximum interaction with the major cations resident in the clay pore fluid was obtained. This in turn affects the integrity of clay beside the overall damage to clay layer during freeze/thaw cycles. Permeability increased by 2.6 order of magnitudes due to chemical attacks and aggregation of clay during freezing.

However, the integrity of the clay cover was slightly affected during the use of the negative water head during freeze/thaw cycles. This is mainly attributed to the limited amount of water intake during freezing and acid generation from the tailings. Nevertheless, the negative water head is far beyond the air entry value of the clay; hence, the clay layer will be unsaturated. This in turn will lead to oxygen diffusion through the clay cover. With water availability, sulphide oxidation and acid generation will be enhanced and groundwater will have a great potential of contamination.

4.0 CONCLUSIONS

In this study program, two cases regarding water availability during freezing were investigated. The first case adopts a positive water head to assess the maximum damage to the clay cover during cyclic freeze/thaw. The second case adopts a negative water head during cyclic freeze/thaw to simulate field condition in the period of fall at Waite Amulet site.

For each case, physical as well as chemical analysis was performed to characterize the effect of cyclic freeze/thaw on the integrity of the proposed clay cover. It was demonstrated that the integrity of the clay cover was considerably reduced due to the induced positive water head during cyclic freeze/thaw. This is attributed to: (1) aggregation of clay particles; (2) chemical interactions between the generated acidic solutions and heavy metals from the tailings and the clay residence pore fluid. This in turn results in a reduction of the thickness of the double layer and increases the tendency of flocculation of the clay particles; hence an increase in permeability; and (3) reduction in the buffering capacity of the clay due to reduction in pHs.

On the other hand, for the case of the negative water head, the integrity of the clay cover is slightly reduced due to: (1) limited amount of water intake during freezing; and (2) limited amount of chemical interaction. However, due to further leaching, the residence pore fluid cations in the clay will be reduced. Hence, the thickness of the double layer will be increased and the clay tendency for dispersion will be increased. This in turn will reduce the permeability of the clay cover to water.

Nevertheless, the negative water head used in this study was less than the negative head at the air entry value of the clay which obtained from soil suction experiments (Yong

et al. 1991). Therefore, the clay layer will remain unsaturated. This is not recommended for decommissioning of the site (i.e. protection against oxygen and water infiltrations).

5.0 RECOMMENDATIONS

Based on the required tasks in the general proposal by Noranda Technology as well as the current study, the following areas require further investigations:

- (1) Effect of freeze/thaw conditions on the diffusion of oxygen through the proposed clay cover.
- (2) Effect of water head during freezing on the oxygen diffusion through the clay cover (i.e. positive and negative water heads).
- (3) Modelling the effect of temperature on the diffusion of oxygen through the clay cover.
- (4) Since the 80 mil HDPE liner is used by Noranda Technology Centre as one of the proposed options, compatibility studies of the 80 mil HDPE liner with leachate generated from the unoxidized tailings should be performed. Jointed sections should also be considered.
- (5) The effect of temperature and exposure time of the 80 mil HDPE liner to leachate should be investigated.
- (6) Effect of cyclic freeze/thaw on the soil suction characteristics of the proposed clay cover.

6.0 REFERENCES

- Mohamed, A.M.O., Yong, R.N., and Tan, B.K., Mitigation of Acidic Mine Drainage: Engineered Soil Barriers for Reactive Tailings, ASCE, 1992 National Conf. on Environmental Eng. A Component of Water Forum'92, Aug 2-5, 1992, Baltimore, Maryland.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Murphy, D., Short-Term Cyclic Freeze Thaw Effect on Strength Properties of a Sensitive Clay, Proc. of the 3rd Int. Symp. Ground Freezing, U.S.A., CREL, Hanover, New Hampshire, 1982, pp. 97-104.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Tucker, A., A Study of Frost-Heave Mechanics of High Clay Content Soils, J. of Energy Resource Technology, Trans. ASME, vol. 105, 1984, pp. 502-508
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Yin, C.W.P., Alteration of Soil Behaviour After Cyclic Freezing and Thawing, Proc., of the 4th Int. Symp. on Ground Freezing (ISGF), Soporo, Japan, 1985, pp. 187-195
- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O., and Caporuscio, F., Laboratory Evaluations of the Freeze/thaw Characteristics of Soil Cover Materials and Tailing, Final Report Submitted to Centre de Recherches Minerals (CRM), Dossier 89TE17, 1991, p. 35
- Yong, R.N., and Mohamed, A.M.O., Cyclic Freeze Thaw Consideration in Design of engineered Soil Covers for Reactive Tailings, 1992 Annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineering, 2nd Environmental Specialty Conference. May 26-29, 1992, Quebec, QC.

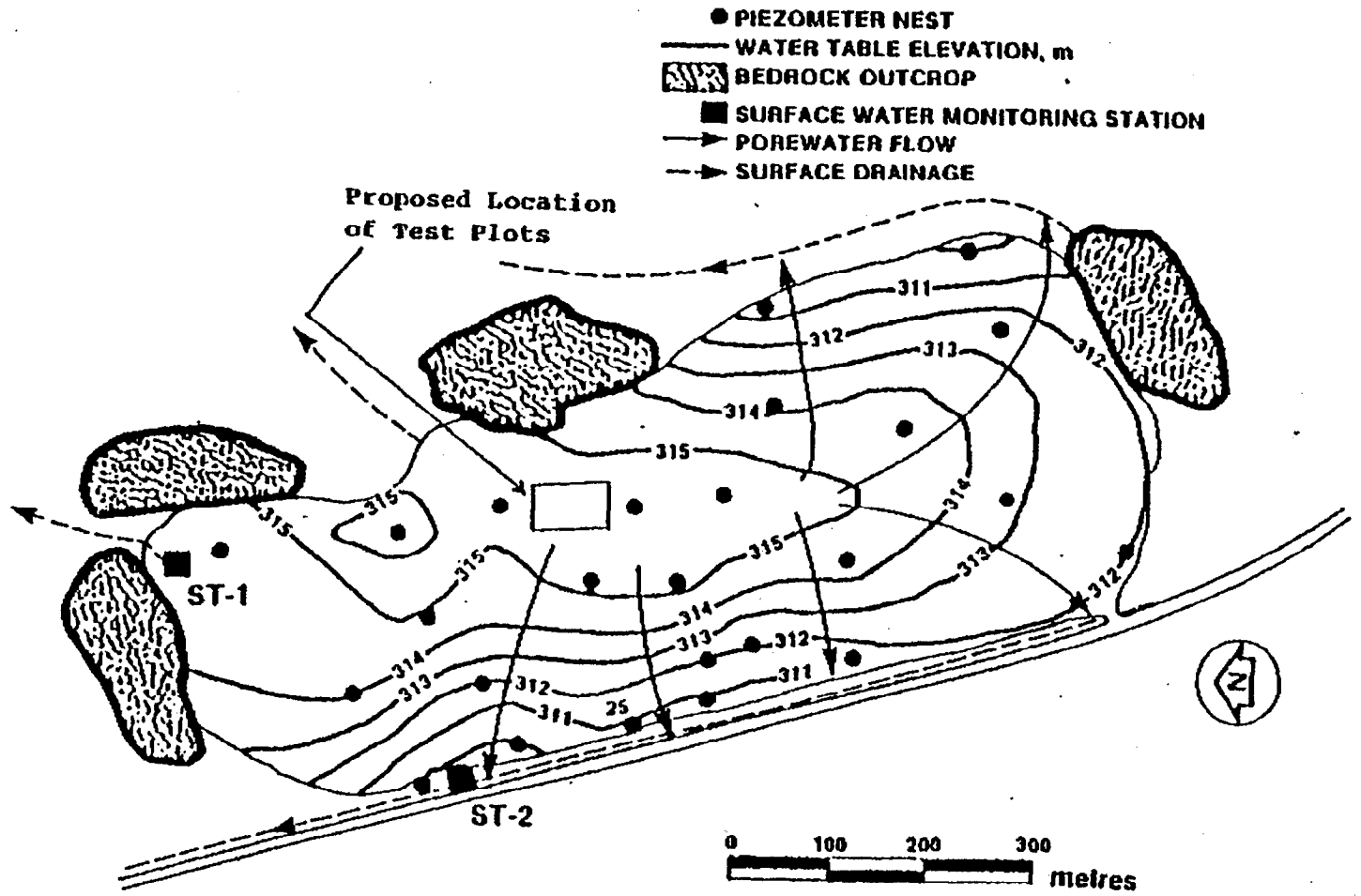


Figure 1.1 Water Table at Waite Amulet, October 1986

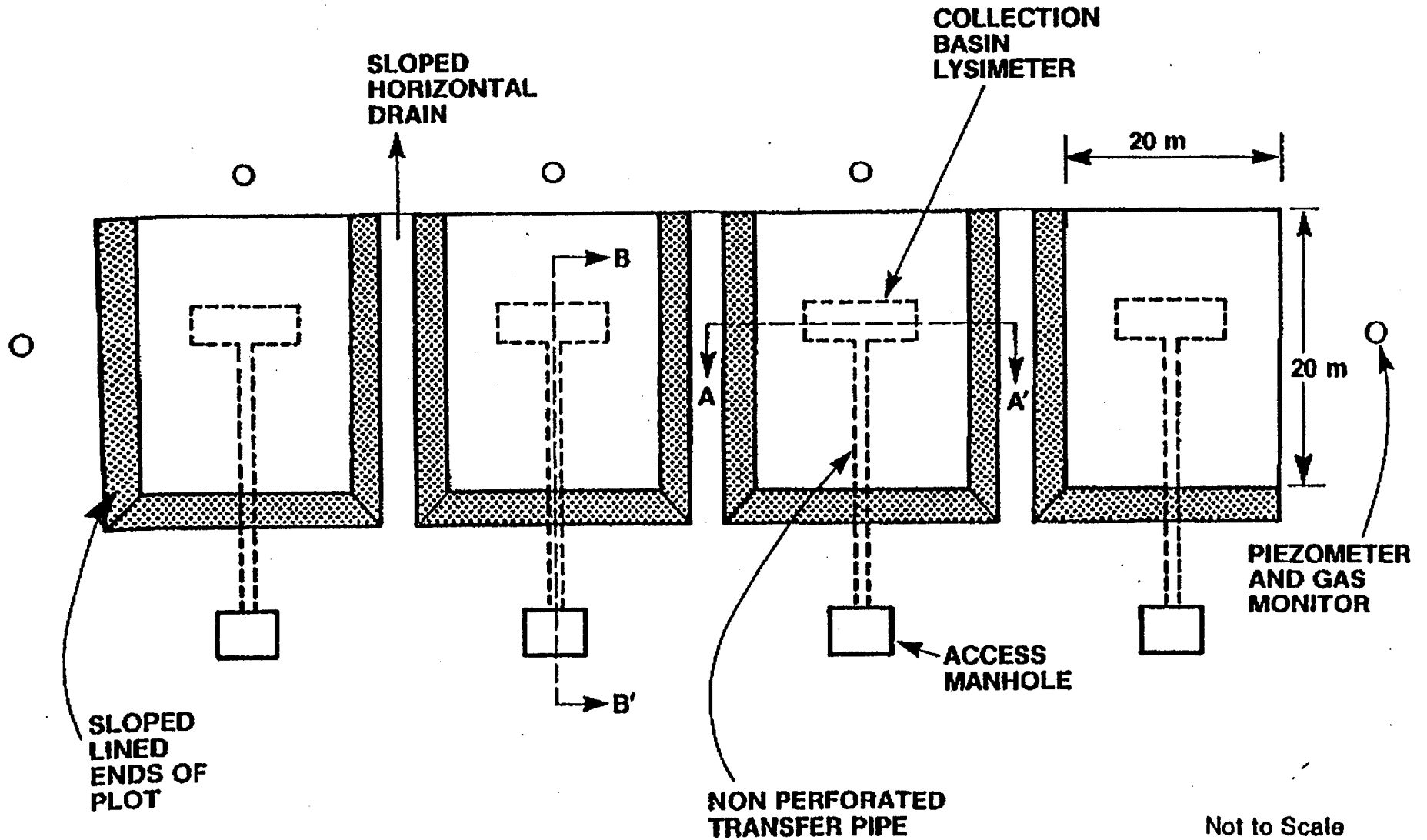


Figure 1.2 Layout of Proposed Test Plots

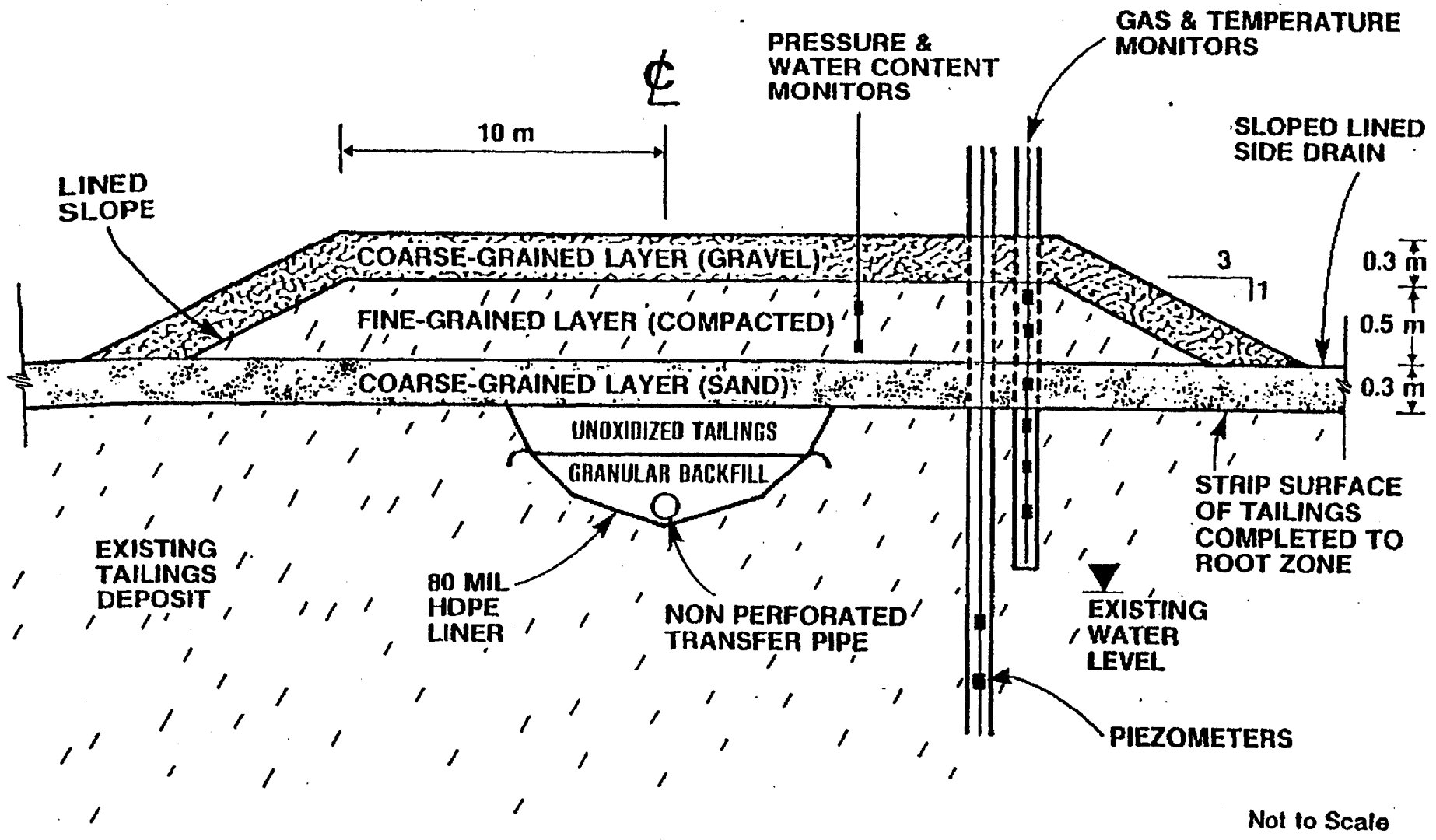


Figure 1.3 Transverse Section A-A' of Test Plots Showing Basin Collection Lysimeter and Instrumentation

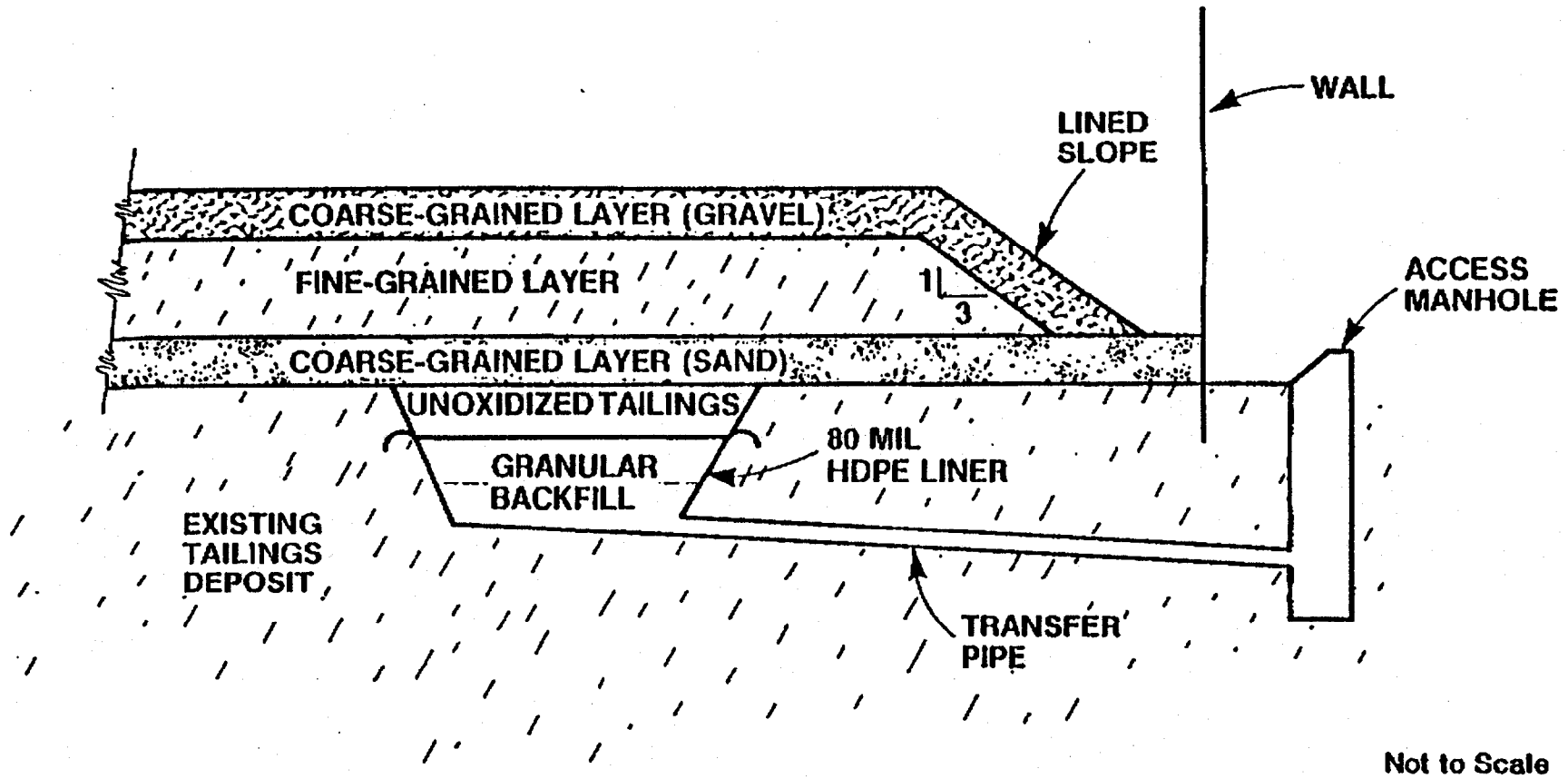


Figure 1.4 Longitudinal Section B-B' of Tests Plots Showing Lysimeter and Access Manhole for Sampling.

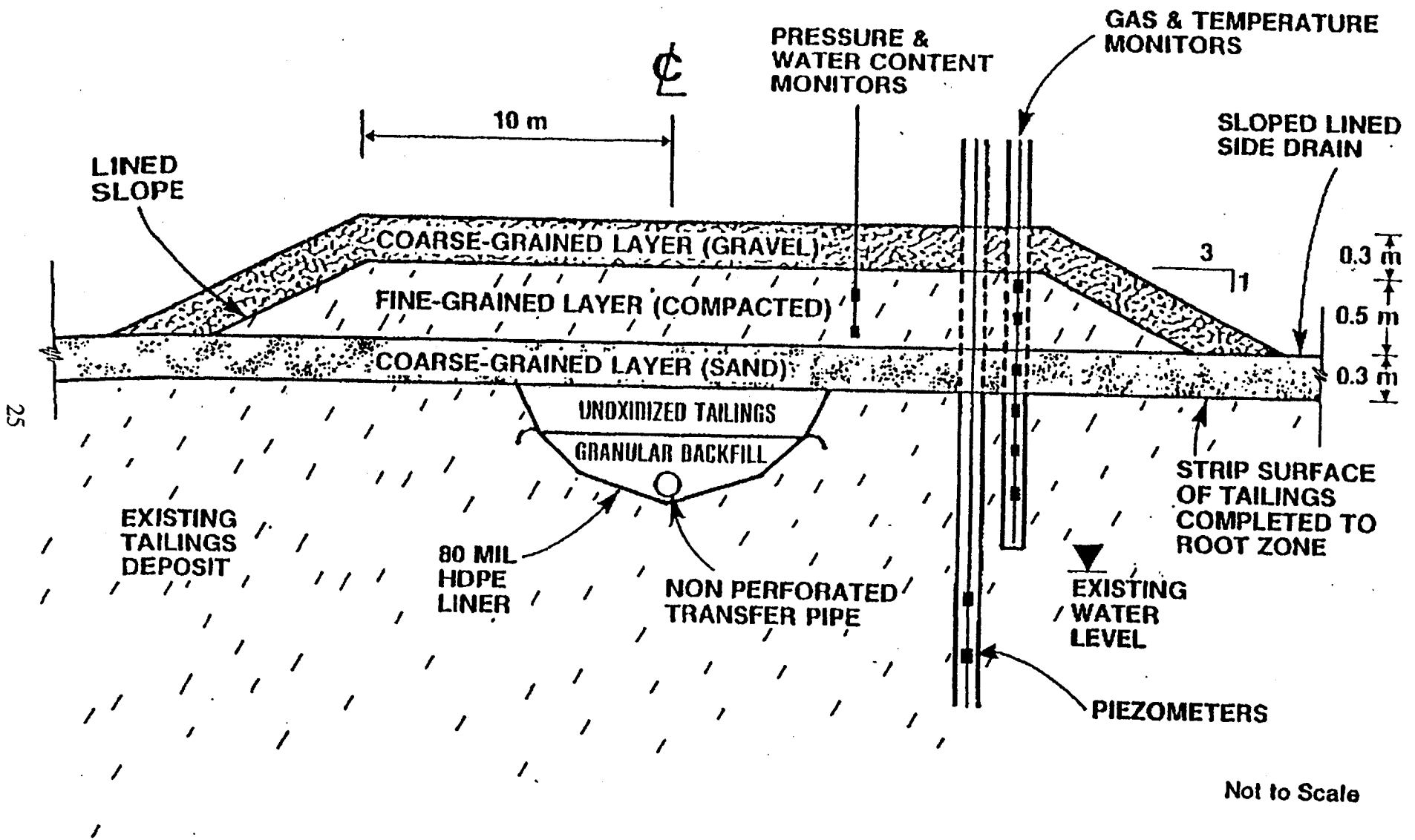


Figure 2.1 Transverse section A-A' of Test Plots Showing Basin Collection Lysimeter and Instrumentation

**Table 3.3 Chemical Analysis Associated
with Positive Water Head during Freeze/Thaw Cycles**

Test No.	Sample	Na	K	Ca	Mg	Zn	Fe	SO ₄	pH
Original	Tailings	0.35	0.10	100.8	81.0	180.0	295.0	3800	2.8
	Clay	10	2.3	1.0	2.0	UD	UD	29.0	6.9
1	Tailings	1.0	0.13	320.0	22.0	23.0	13.5	1560	2.9
	Clay	8.0	2.3	5.7	4.9	UD	UD	46.0	6.2
	Leachate	68.0	5.1	7.5	216	22.0	—	122	2.9
2	Tailings	0.46	0.05	266.0	31.0	60.0	190.0	2200	2.8
	Sand	0.17	0.62	UD	5.7	20.0	22.5	440	3.8
	Clay (B)	13.5	6.2	88.0	35.0	2.5	UD	360	4.7
	Clay (M)	9.5	2.1	1.0	2.2	UD	UD	35.0	6.7
	Clay (T)	9.2	2.1	1.0	2.0	UD	UD	34.0	6.9
3	Tailings	1.16	0.2	420.0	20.0	12.0	7.0	1120	2.3
	Sand	1.08	1.0	2.2	50.0	4.0	1.0	98.0	3.4
	Clay (B)	9.0	7.8	148.0	43.0	15.0	0.09	660	3.2
	Clay (M)	11.0	3.0	23.6	14.0	UD	UD	104	5.9
	Clay (T)	6.0	2.6	9.0	6.1	UD	UD	98.0	5.7

Notes: - all units are mg/100 g of soil
 - UD is not detected
 - B = bottom; M = middle; T = top

Fig. 3.1 Clay Permeability Variations

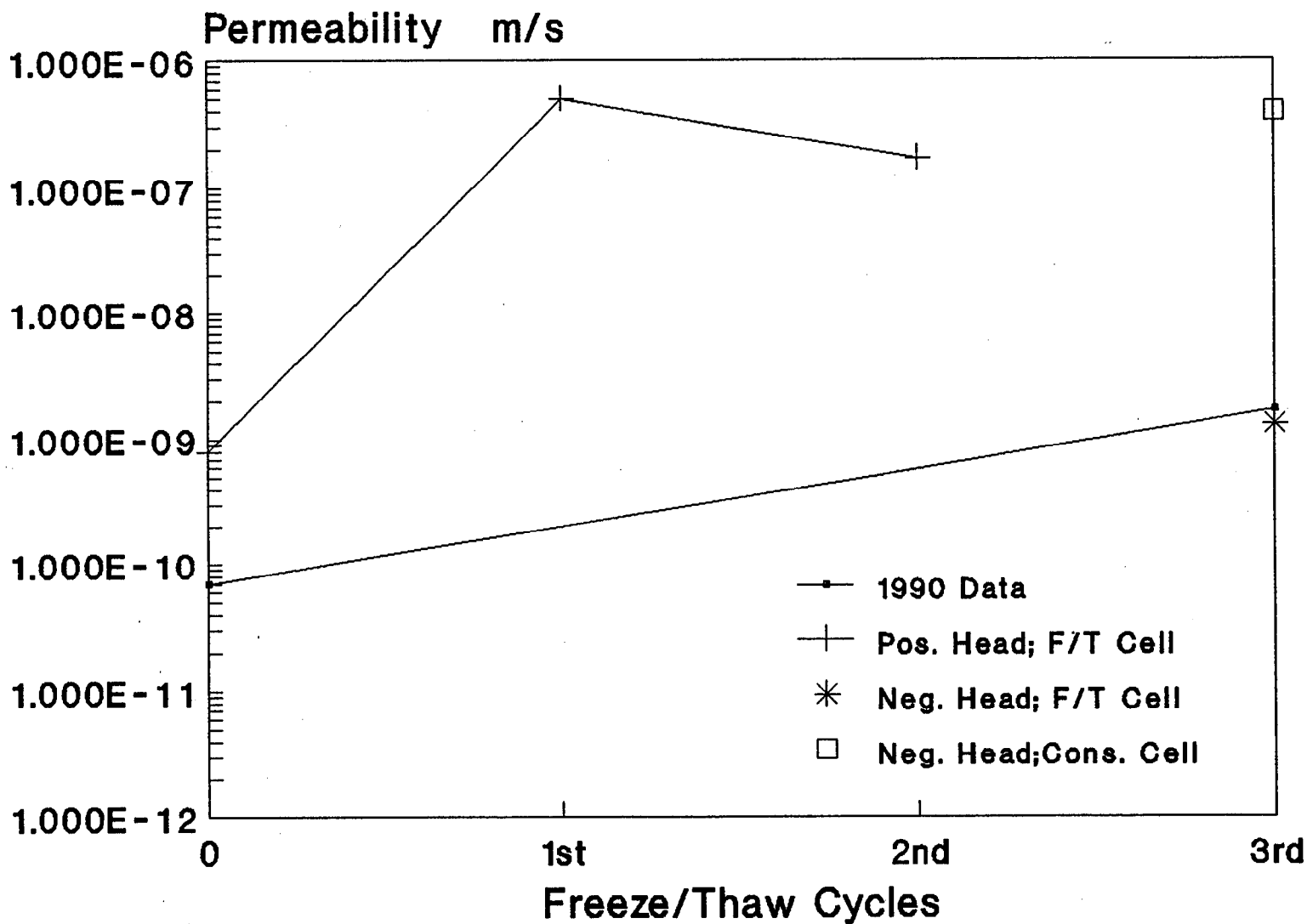


Fig. 3.2 Variation of Concentration with Height for Na.

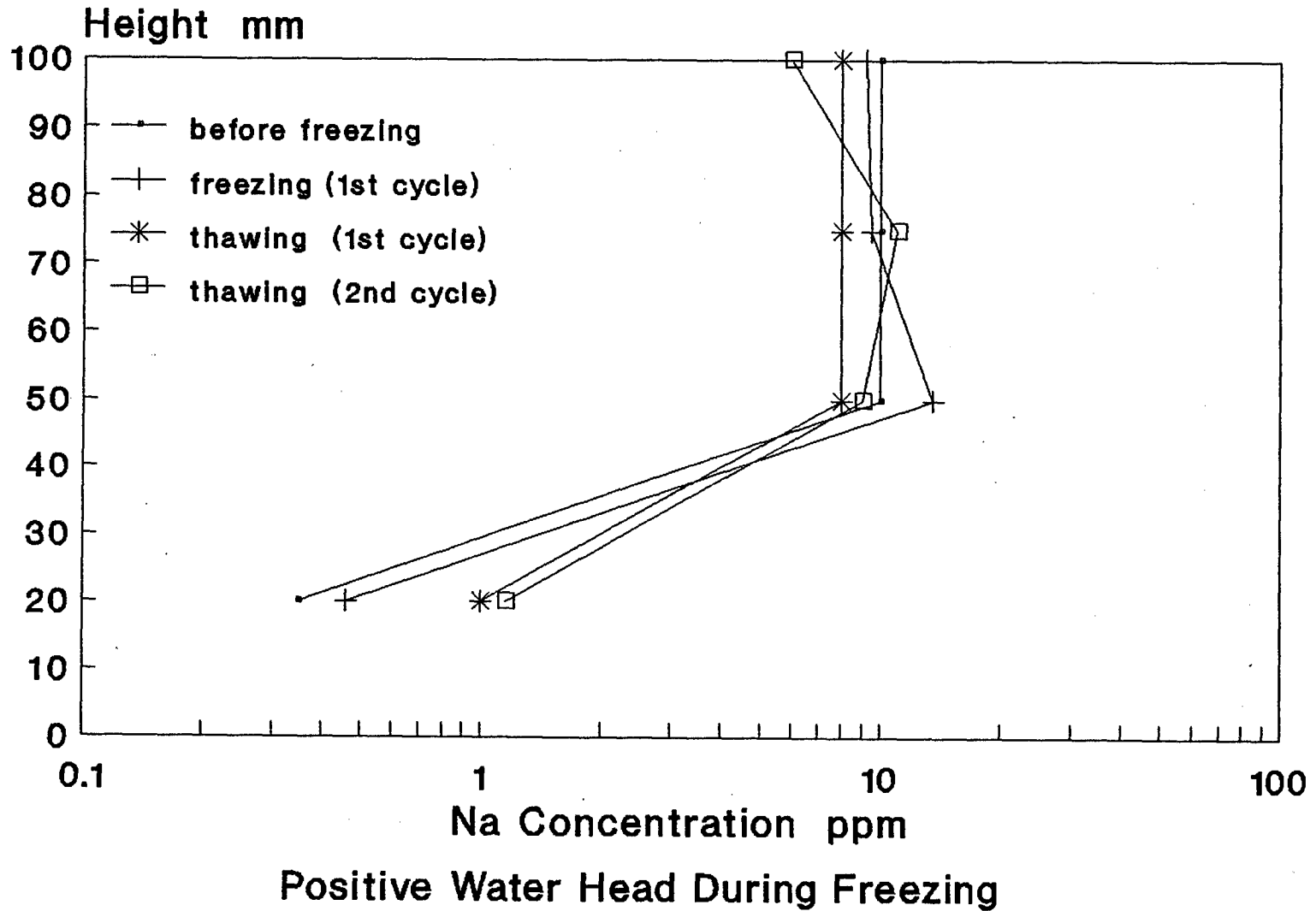
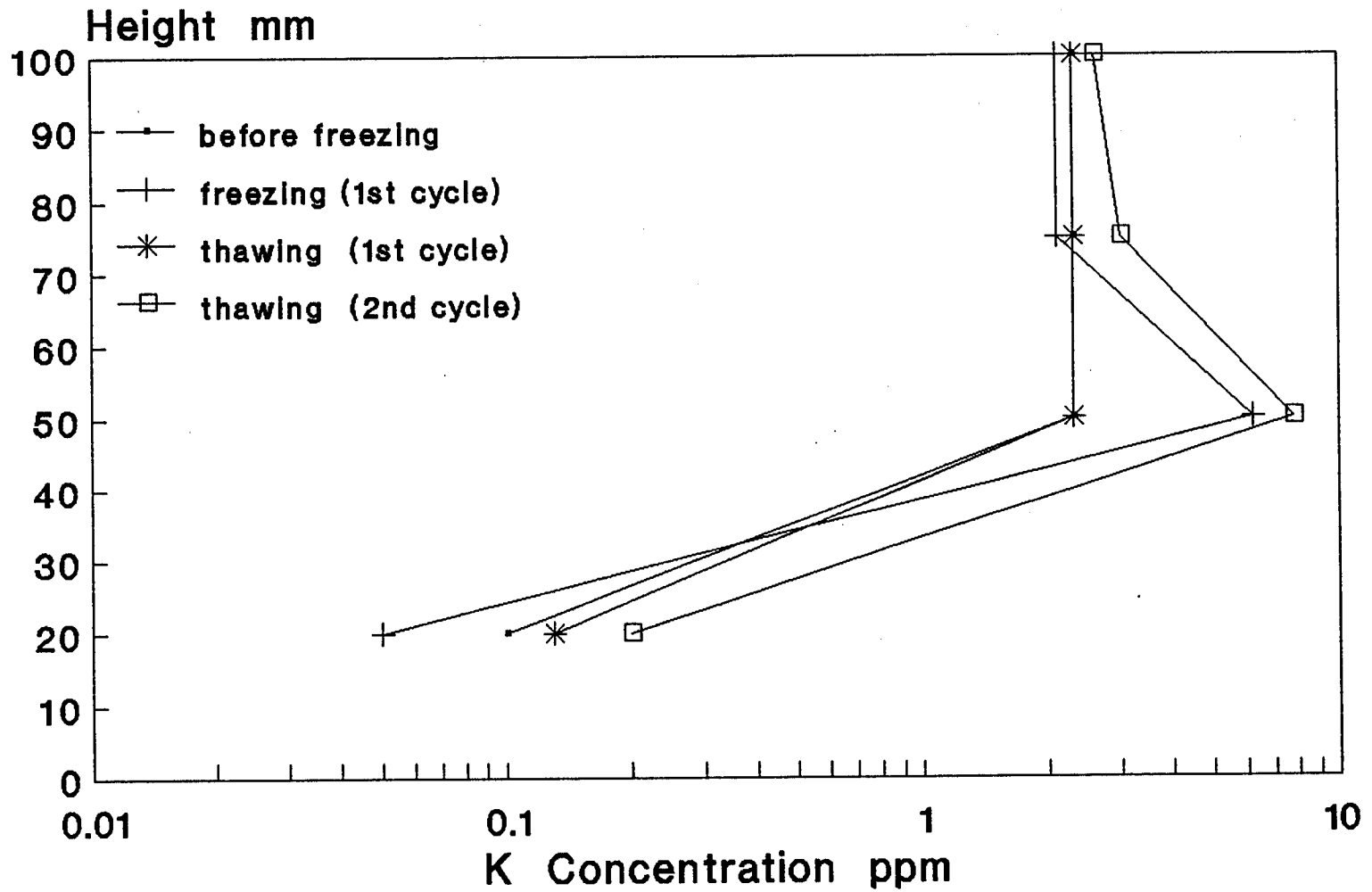


Fig. 3.3 Variation of Concentration with Height for K.



Positive Water Head During Freezing

Fig. 3.4 Variation of Concentration with Height for Ca.

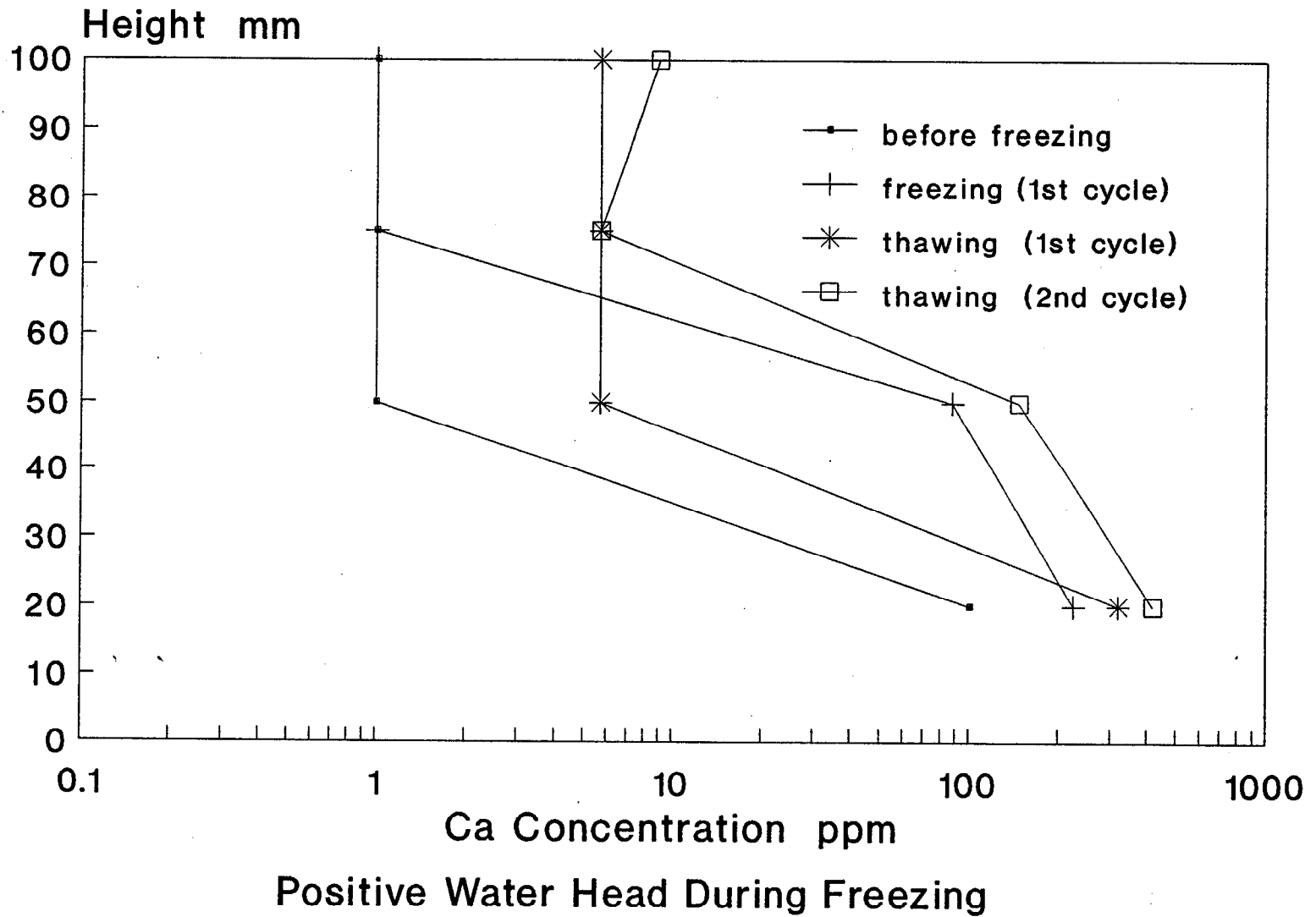
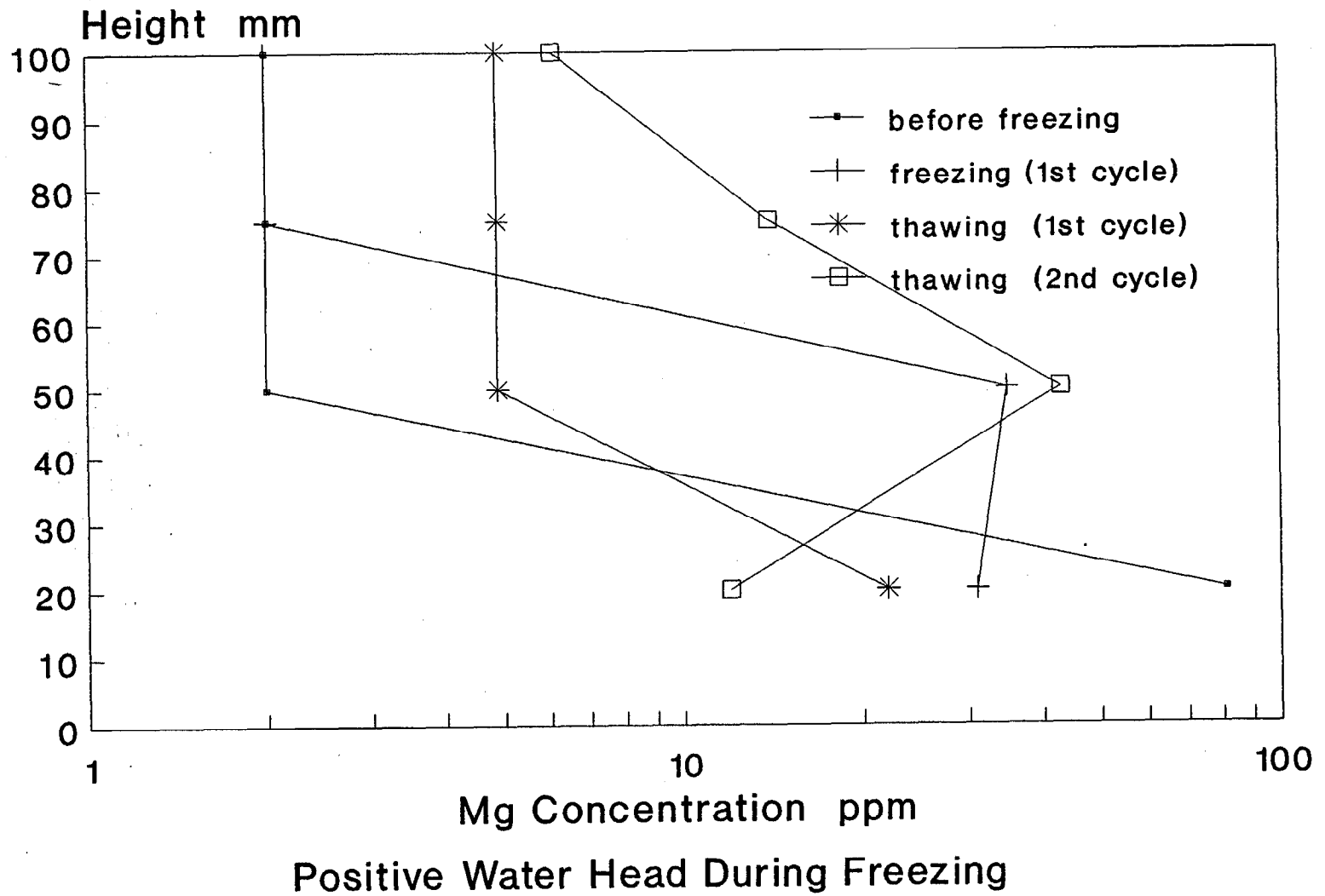
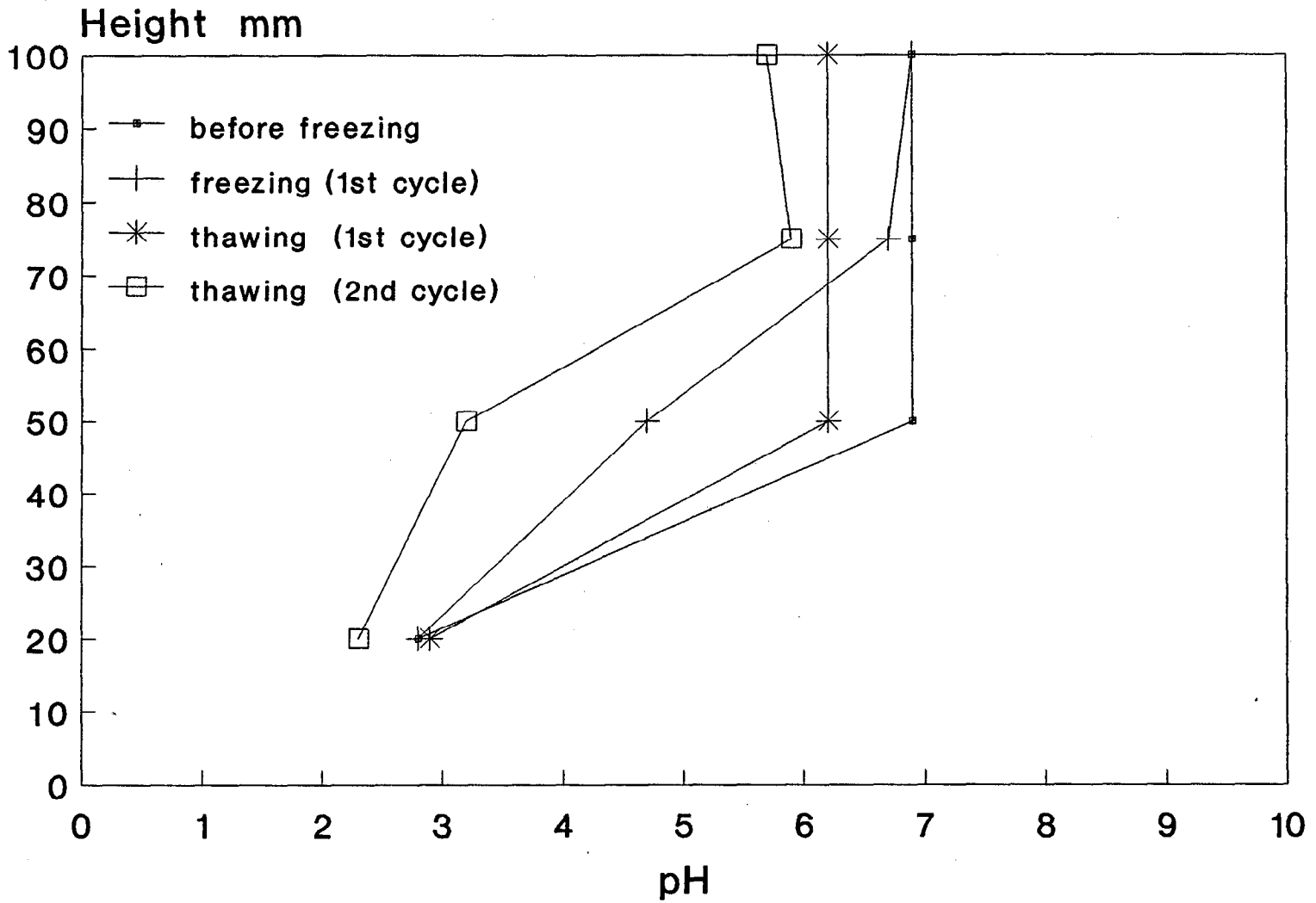


Fig. 3.5 Variation of Concentration with Height for Mg.



Positive Water Head During Freezing

Fig. 3.6 Variation of pH with Height.



Positive Water Head During Freezing

Fig. 3.7 Variation of Concentration with Height for Zn.

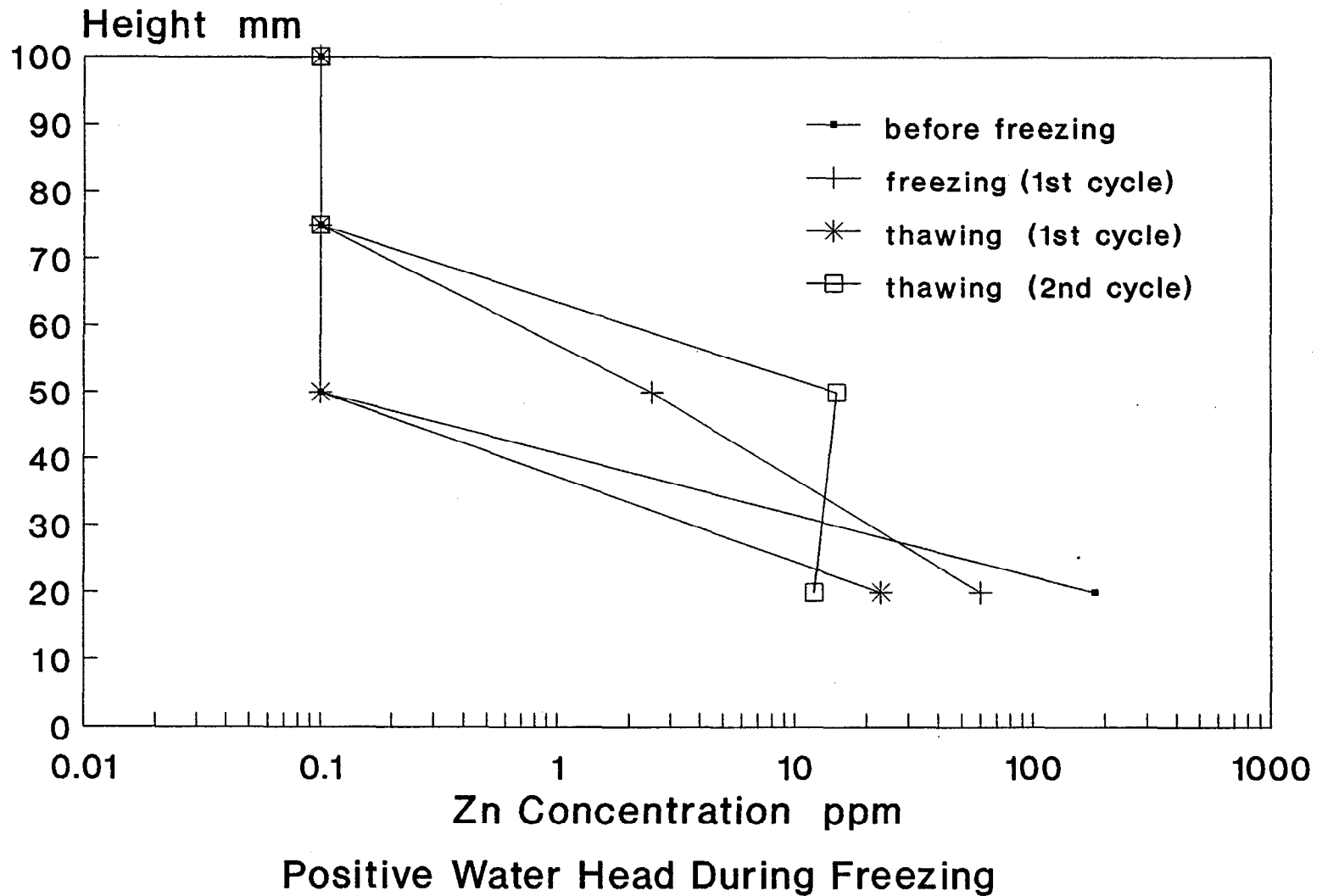


Fig. 3.8 Variation of Concentration with Height for Fe.

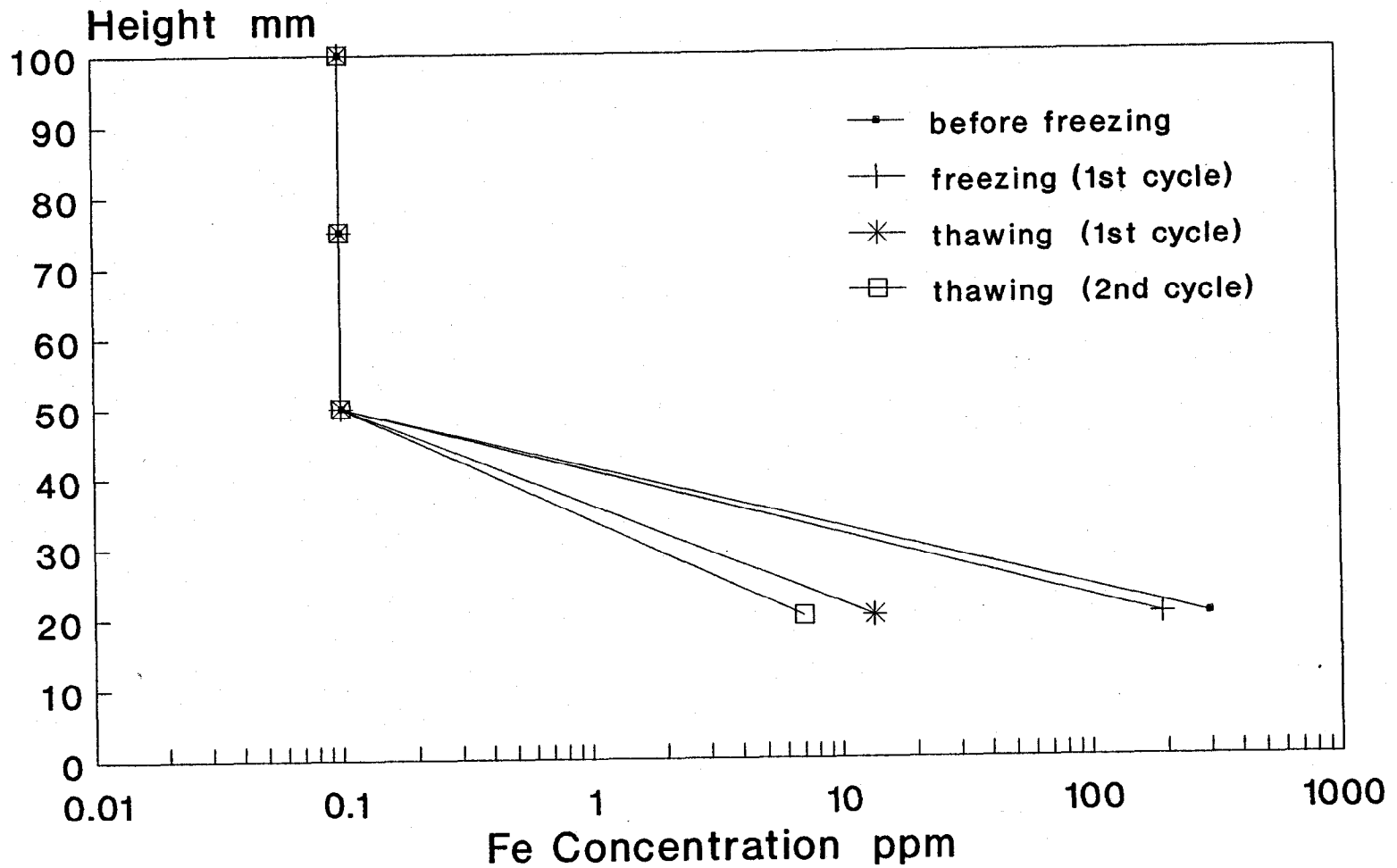


Fig. 3.9 Variation of Concentration with Height for So4.

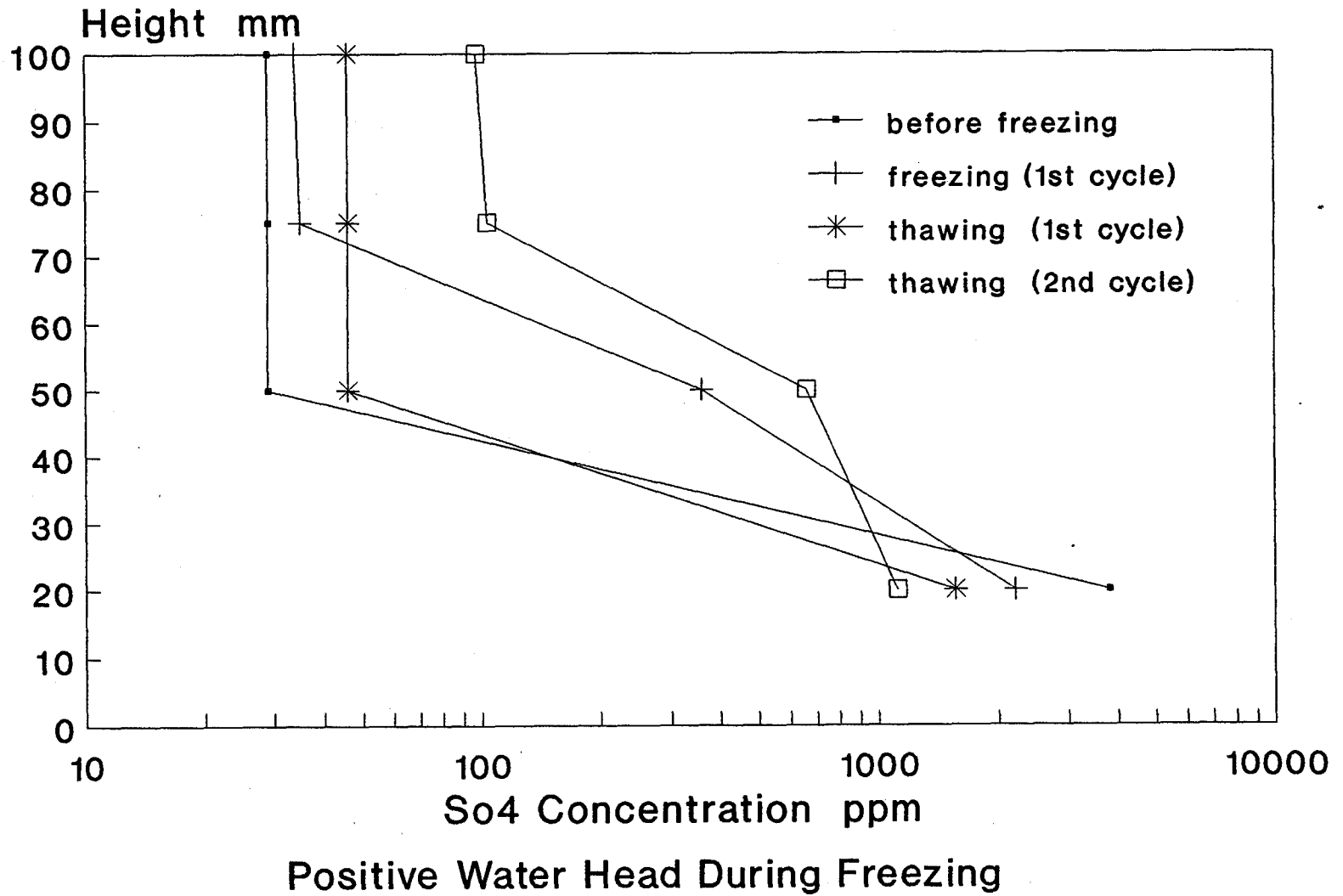
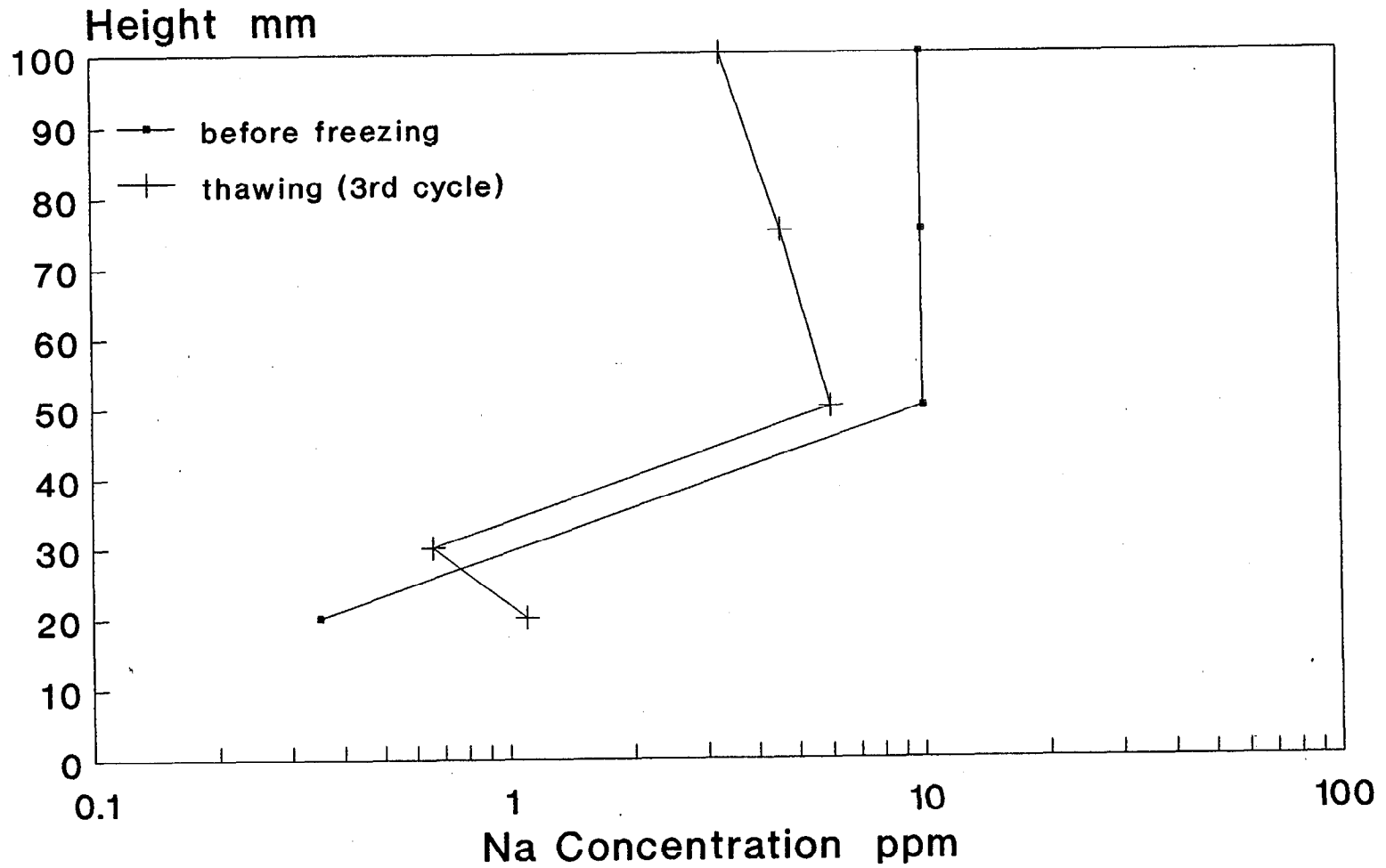


Fig. 3.10 Variation of Concentration with Height for Na.

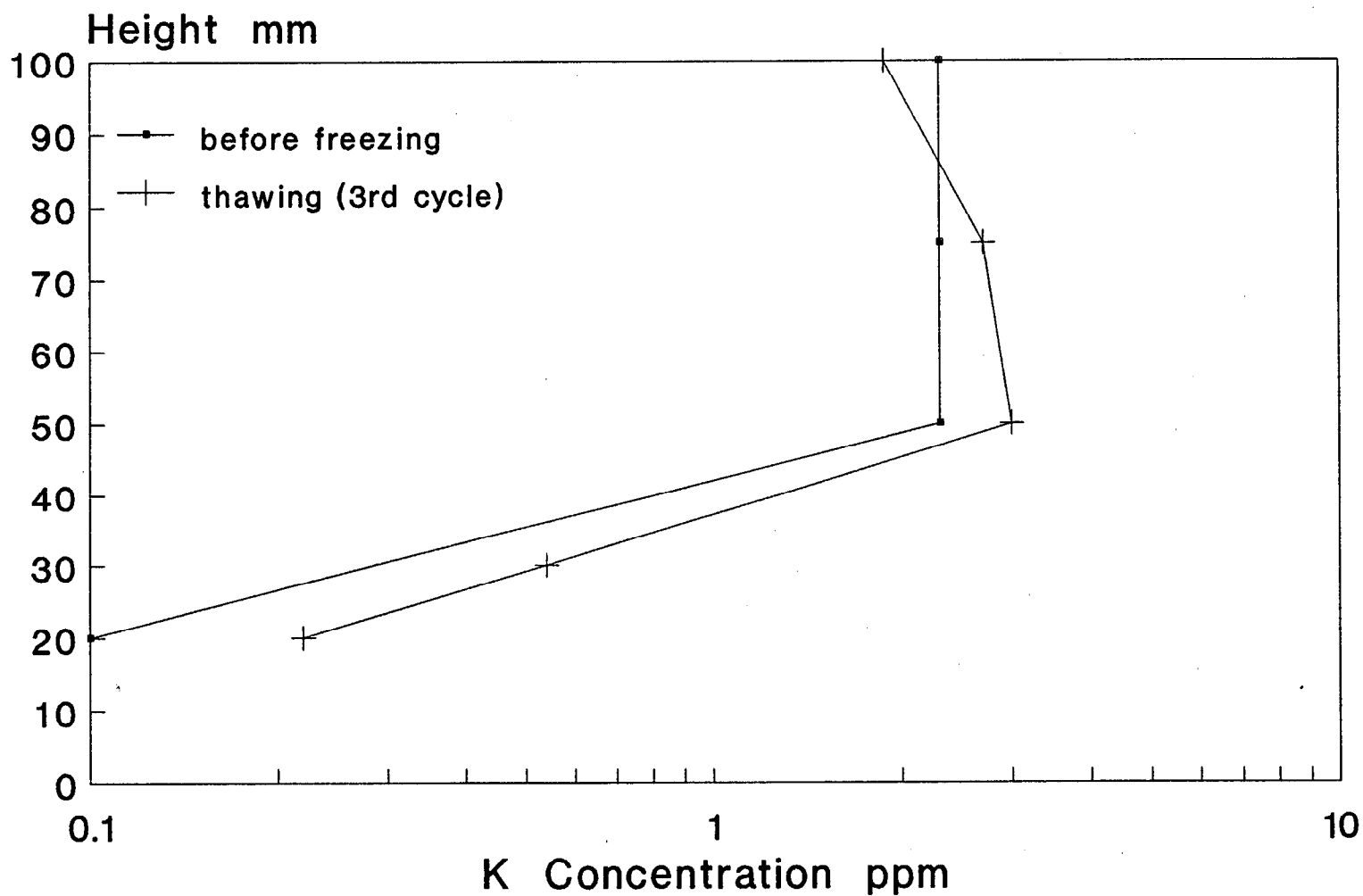


Negative Water Head During Freezing

**Table 3.4 Chemical Analysis Associated
with Negative Water Head during Freeze/Thaw Cycles**

Sample	Lab #	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	Zn	Fe	SO ₄	pH
Clay top	1	3.8	1.88	2.5	2.1	UD	UD	22	6.0
Clay top	1a	3.3	1.88	2.2	2.1	UD	UD	19	
Clay middle	2	4.1	2.7	0.04	.53	UD	UD	17.5	6.6
Clay middle	2a	4.6	2.7	0.04	.53	UD	UD	17.5	
Clay bottom	3	7.0	3.0	0.04	.65	UD	UD	16.5	6.7
Clay bottom	3a	5.2	3.0	0.04	.51	UD	UD	16.5	
Tailing	4	1.1	.22	360	12.5	12.4	110	1100	2.9
Tailing	4a	1.1	.22	360	12.0	13.2	113	1150	
Sand after freeze	5	.66	.54	0.7	.42	.06	UD	18	4.4
Sand after freeze	5a	.66	.54	0.7	.44	.09	UD	14	

Fig. 3.11 Variation of Concentration with Height for K.



Negative Water Head During Freezing

Fig. 3.12 Variation of Concentration with Height for Ca.

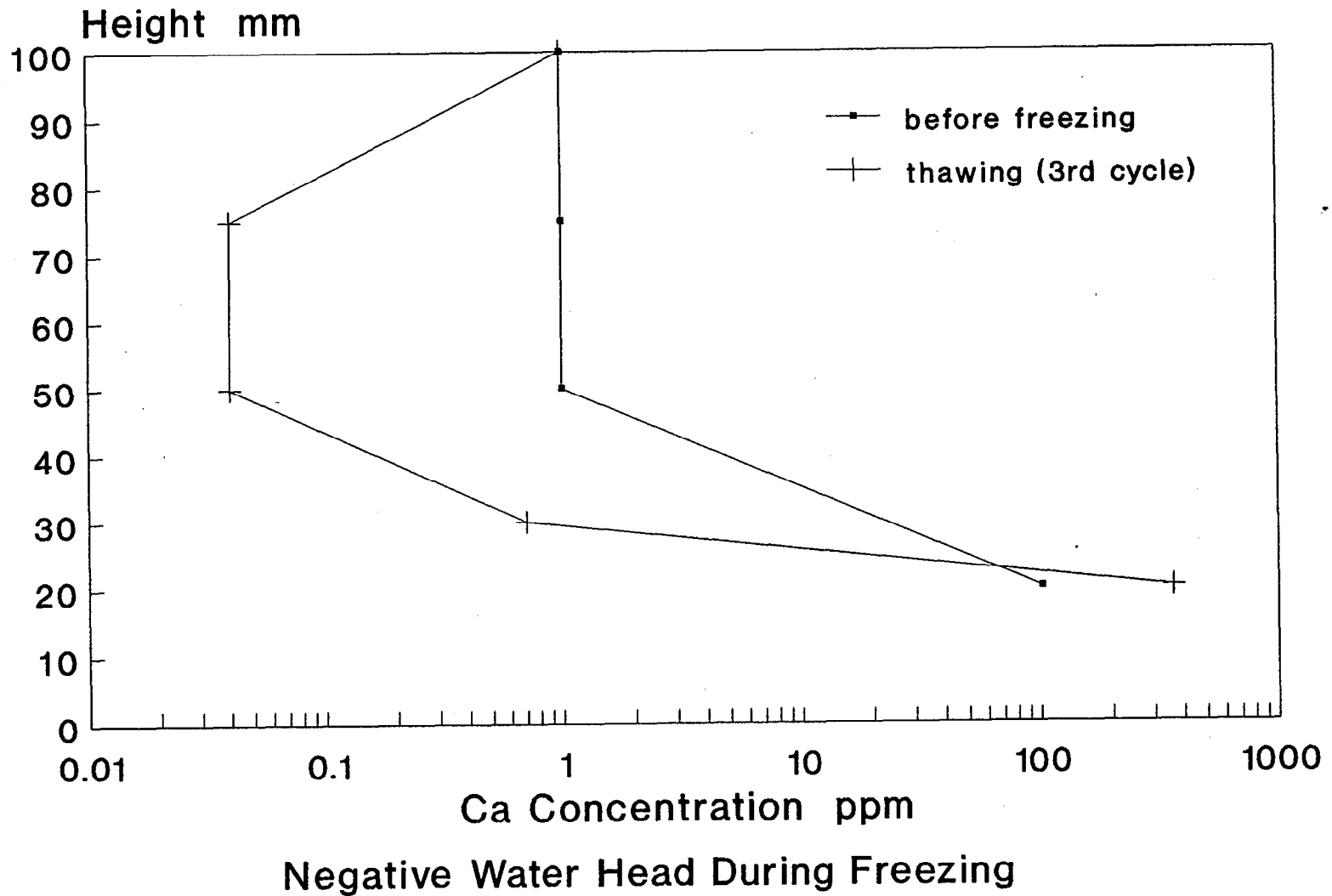
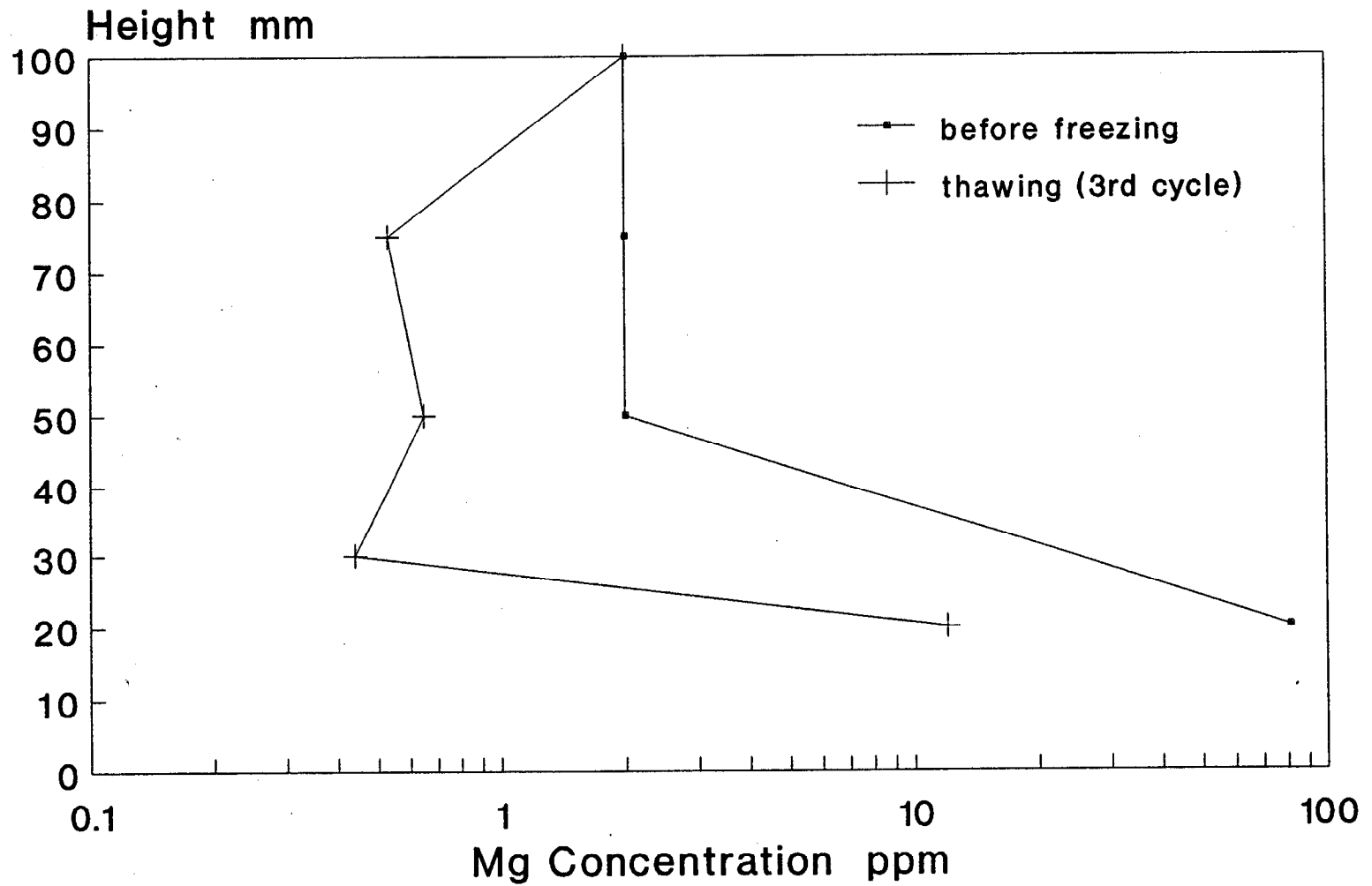
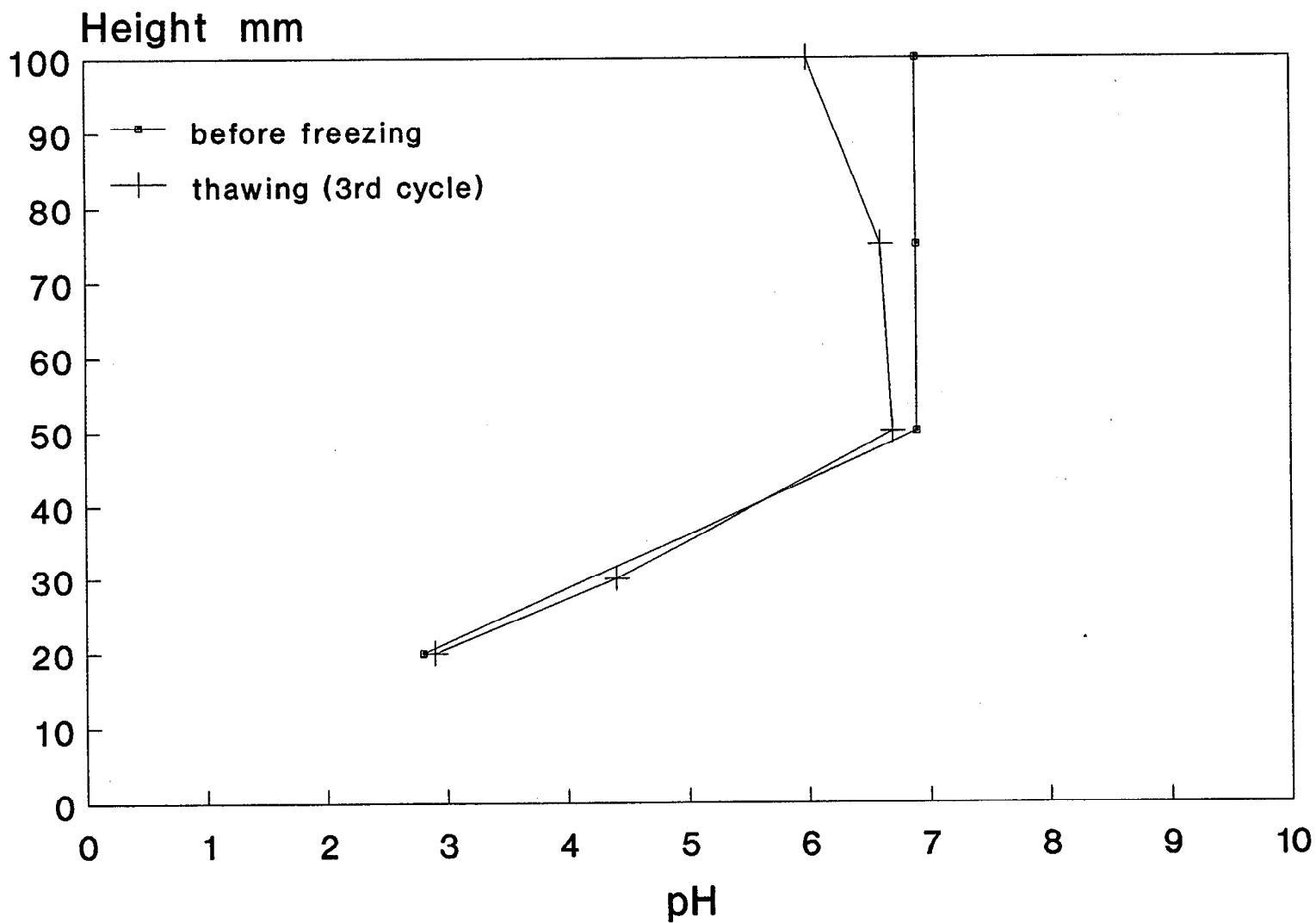


Fig. 3.13 Variation of Concentration with Height for Mg.



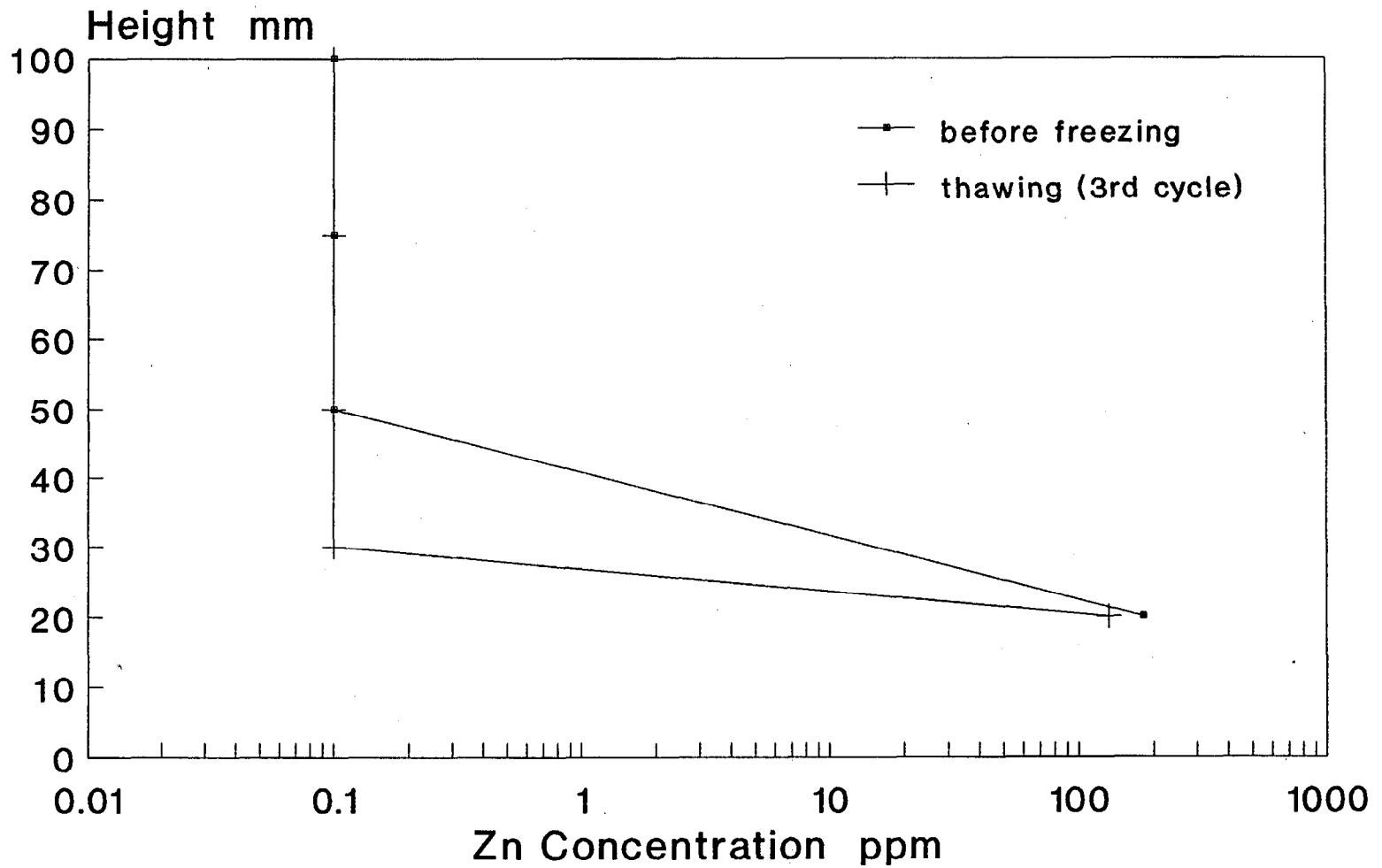
Negative Water Head During Freezing

Fig. 3.14 Variation of pH with Height.



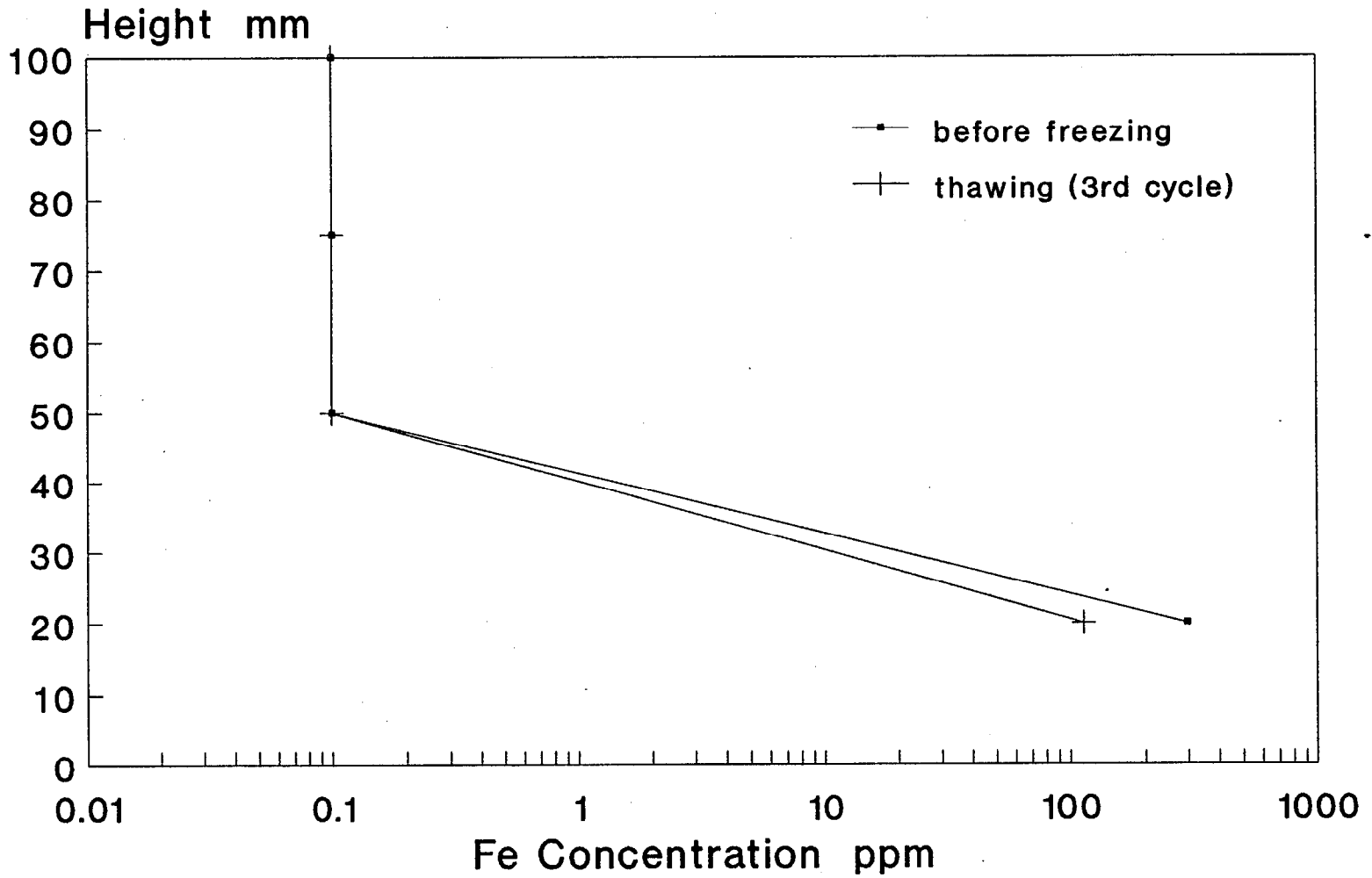
Negative Water Head During Freezing

Fig. 3.15 Variation of Concentration with Height for Zn.



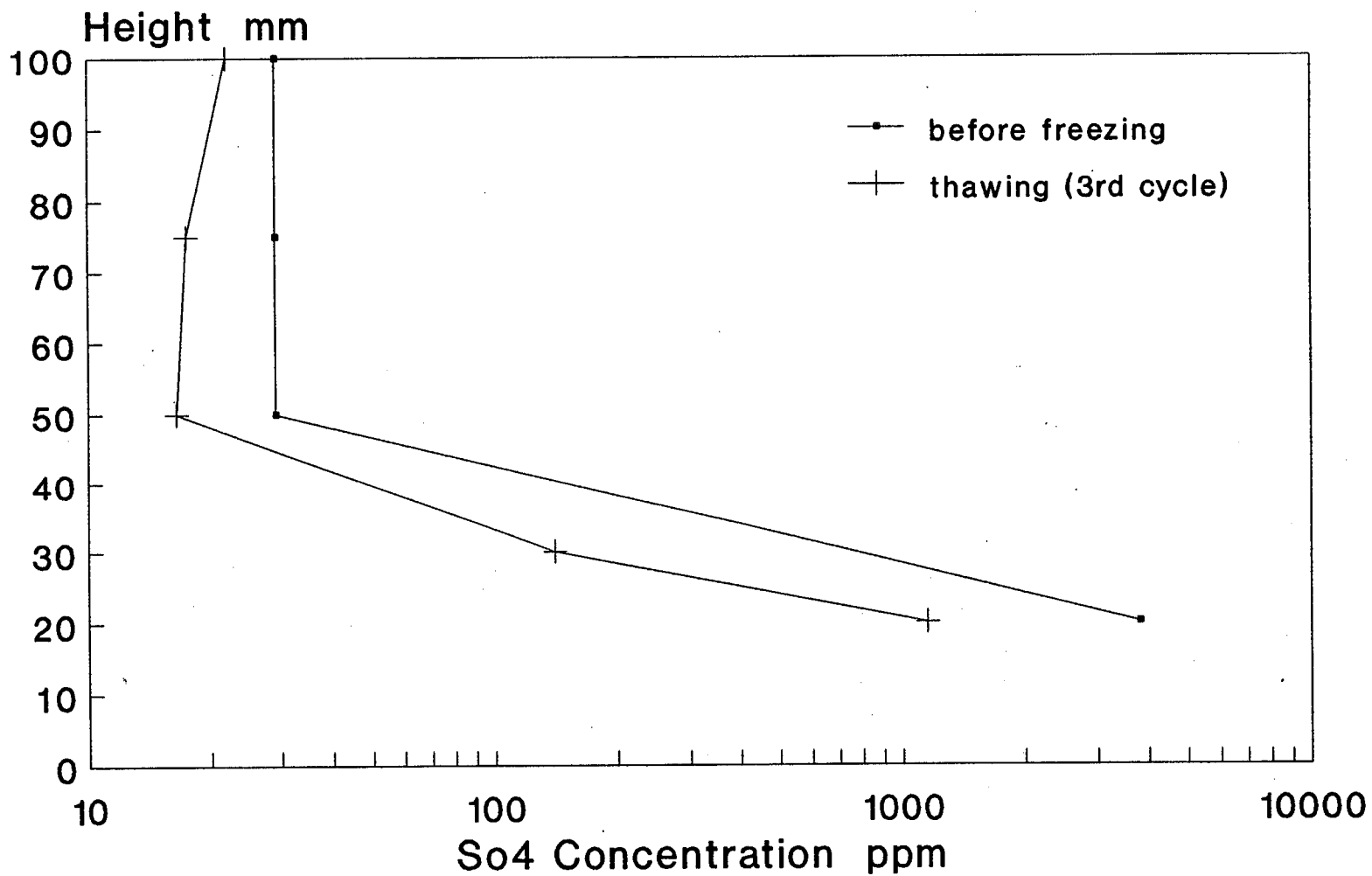
Negative Water Head During Freezing

Fig. 3.16 Variation of Concentration with Height for Fe.



Negative Water Head During Freezing

Fig. 3.17 Variation of Concentration with Height for So4.



Negative Water Head During Freezing

**FIELD EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF
ENGINEERED SOIL COVERS
FOR REACTIVE TAILINGS**

FINAL REPORT

submitted to

**Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources (Mines)
Centre de recherches minérales
Services de la technologie minière**

Dossier 89TE17

Prepared by

**R.N. Yong, A.M.O. Mohamed, and F. Caporuscio
Geotechnical Research Centre, McGill University
817 Sherbrooke Str. West
Montreal, Quebec
Canada H3A 2K6**

March 1991

TABLE OF CONTENTS

1.0 INTRODUCTION

- 1.1 Terms of Reference
- 1.2 Contractor
- 1.3 Background
- 1.4 Objectives
- 1.5 Scope of work

2.0 EXPERIMENTATION

- 2.1 Sample Description
- 2.2 Test procedures
 - 2.2.1 ASTM Methods
 - 2.2.2 Falling Head permeability
 - 2.2.3 Cyclic Freeze-Thaw (Open System)
 - 2.2.4 Mineralogy by X-ray Diffraction
 - 2.2.5 Soil Suction

3.0 RESULTS AND DISCUSSION

- 3.1 Basic Mechanical Properties
- 3.2 X-ray Diffraction
- 3.3 Soil Suction
- 3.4 Permeability and cyclic Freeze-Thaw

4.0 CONCLUSION

5.0 RECOMMENDATION

6.0 REFERENCES

**FIELD EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS
OF ENGINEERED SOIL COVERS FOR REACTIVE TAILINGS**

1.0 INTRODUCTION

1.1 Terms of Reference

Research Contract with the Ministère de l'Énergie et des Ressources Mines/
Centre de Recherches Minérales (MER/CRM). Dossier 89TE17.

1.2 Contractor

Geotechnical Research Centre, McGill University (Dr. Raymond N. Yong)

1.3 Background

A project jointly funded by Noranda Inc., CANMET and Centre de Recherches minérales (MER/CRM) has been initiated to evaluate the effectiveness of engineered soil covers for reactive tailings. The evaluation involves the design, construction, instrumentation, and monitoring of three test plots and a control cover over sulphidic tailings at the Waite Amulet site, near Rouyn-Noranda, Quebec. Participating in the project are personnel from the Noranda Technology Centre, CANMET, CRM, McGill University and Ecole Polytechnique. A detailed description of tasks to be performed in the project is presented in the Project Proposal, Noranda Technology Centre - May 2, 1990.

1.4 Objectives

The Geotechnical Research Centre, McGill University, performs laboratory evaluations of the freeze-thaw characteristics of soil cover materials and tailings. The soil and tailings are also tested for their moisture-drainage characteristics to provide the necessary data for modeling of moisture movements and effectiveness of layered or composite cover systems.

1.5 Scope of Work

Specific tasks to be performed by the Geotechnical Research Centre are as follows:

1. Participation in the final engineering design of test plots.
2. Construction inspection.
3. Laboratory modified Proctor compaction tests (2 tests)
4. Complete mineralogical characterization of cover materials (3 samples)
5. Freeze-thaw evaluation of 1 clay sample (including hydraulic conductivity).
6. Moisture-drainage characteristics of cover material and tailings (5 test)
7. Analysis of data
8. Interpretation of results and reporting

2.0 EXPERIMENTATION

2.1 Sample Description

The soil and tailings samples were received by the Geotechnical Research Centre (GRC) of McGill University in polyethylene bags and the following visual observations were noted:

Sample	Description
Bulk Varved Clay	light brown silty clay
Ansil S-1	fine grained sand
Ansil S-2	coarse grained sand with gravel
WA-5	unoxidized mine tailings
WA-17	unoxidized mine tailings

2.2 Test Procedures

2.2.1 ASTM Methods

The following ASTM standard methods were adopted during testing:

Test Method for Liquid limit, Plastic limit, and Plasticity Index of Soils	ASTM D4318-84
Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock and Soil-Aggregate Mixtures	ASTM D2216-80
Particle Size Analysis of Soils	ASTM D422-63
Wet Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constant	ASTM D2217-85

2.2.2 Falling Head Permeability

The soil samples were compacted statically in 5 equal layers at about 2 % wet of optimum. The samples were compacted in lubricated cylindrical moulds 50 mm in diameter by 200 mm in length with the final compacted sample lengths being 100 mm.

Upon completion of the compaction a falling head permeameter was connected to the base of each compacted sample. The permeability tests were performed according to ASTM D2434 except that the falling-head apparatus was substituted for the constant head due to the low permeability anticipated.

2.2.3 Cyclic Freeze-Thaw (Open System)

The soil samples were prepared and compacted as per section 2.2.2. The compacted samples were subsequently equipped with type "T" thermocouples i.e. one at 10 mm below the top of the sample and the other at 10 mm above the bottom of the sample. The tests were conducted in an open system with the drainage provided at the base of the 100 mm samples.

The cells were equipped with cold plates (-9.5 °C) at the top surface while warm plates (0-2 °C) were provided at the base of the samples. The samples were insulated from the surrounding room temperature by vermiculite loose insulation to insure unidirectional freezing. Figure 2.1 illustrates the test setup in detail.

The water supplies were installed approximately at the top of the specimens to

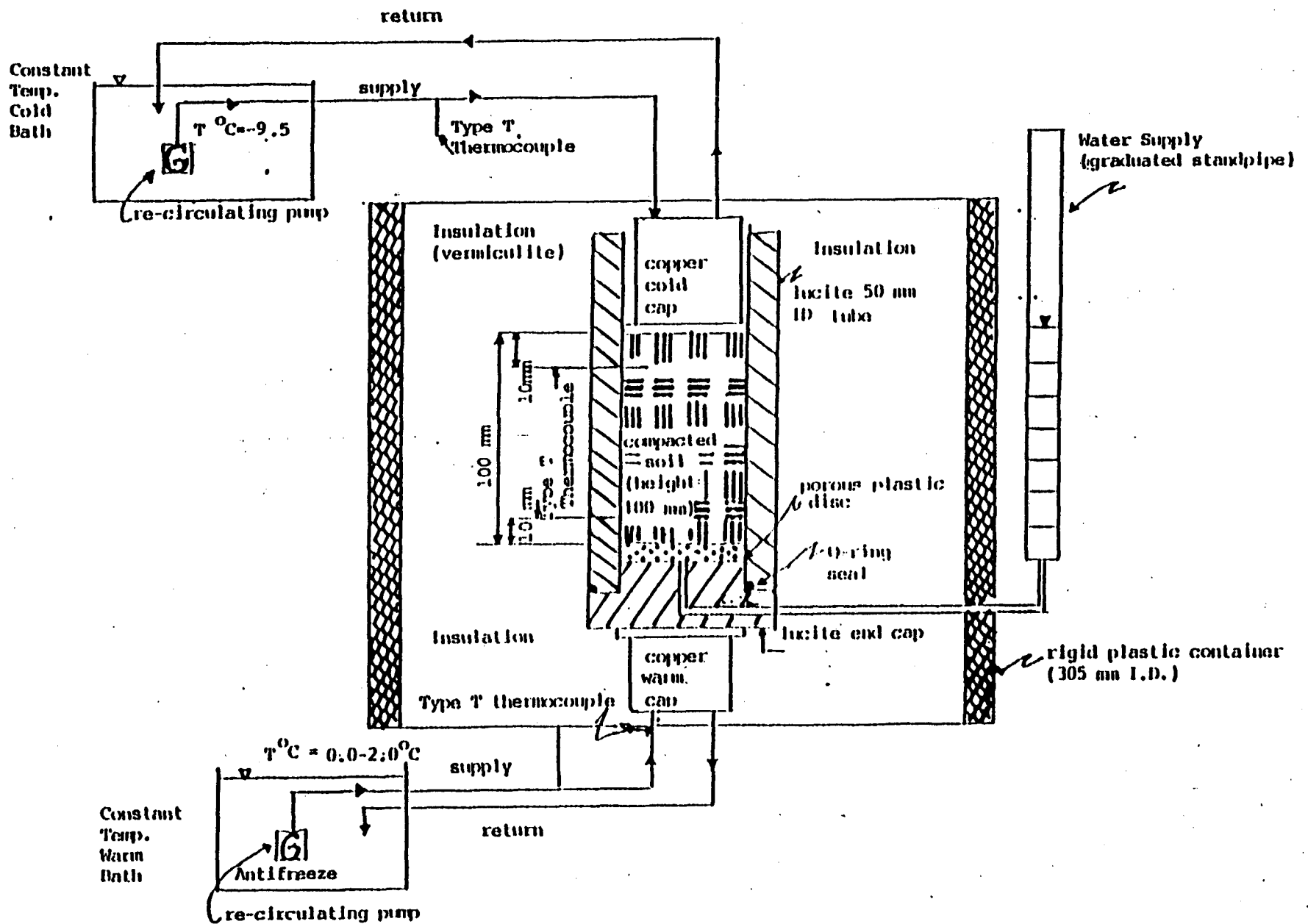


Fig. 2.1 Frost Heave Setup- "Open System"

insure ice lense growth. During, testing the height of specimen, soil temperature, and water intake were monitored and noted. The freezing cycle continued until no further intake of water was observed. The samples were then unpacked from the insulation and observations concerning the sample condition, height, and ice lense growth noted. The samples were then allowed to thaw with free drainage overnight, with the heights of the water supplies maintained at approximately at the top of the samples.

Before starting the next freezing cycle the sample heights and general conditions were recorded including the level of the water supplies.

2.2.4 Mineralogy by X-ray Diffraction

The mineralogical analysis was performed with an x-ray diffractometer connected to a strip chart recorder. Approximately 20g of the total sample was dried and well ground. The preparation and scanning procedures are briefly described below:

- (a) A known amount (2g) of soil was dispersed in distilled water and agitated ultrasonically. About 6 mL of soil suspension (20 to 30% soil concentration) was then pipetted onto glass slides and subjected to the following treatments before scanning:
 - air drying
 - heating to 550°C for one hour.
- b) About 10g of the pulverized soil was subjected to HCl acid treatment and then dispersed in distilled water. After ultrasonic agitation, 6 mL of this suspension was pipetted onto glass slides and air dried.
- (c) A third portion of the soil was Mg saturated with a solution of MgCl₂ after 3 washing procedures. 6 mL of this suspension was pipetted onto glass slides and air dried.

After scanning the slides were treated with glycol and scanned once again.

- (d) The prepared slides were scanned on a Siemen D 500 X-ray Diffractometer using Cu-Ka radiation, 40KV and 20 mA on a 1° beam slit and 0.5° detector slit under room conditions. The scans were obtained at $2^\circ(2\theta)$ /minute with a rate meter setting of 2×10^3 cps with a time constant of 1 second.

2.2.5 Soil Suction

The soil suction measurements were performed by using various suction devices:

- (1) a portable water tank containing clean, coarse sand ($<0.5\text{mm}$ diameter) constituting a system having a pF range of 0 to 1. The sand was packed into a rectangular lucite box to a height of about 15 cm, and subsequently covered with a sheet of filter paper. A standpipe was connected to an outlet at the base of the tank. The water level in the standpipe was adjusted to 1 cm below for pF0 and 10 cm below for pF1. Evaporation was avoided by covering the tank with a lucite sheet having a small diameter hole in order to maintain atmospheric pressure.
- (2) pressure plate extractors capable of a pF range from 1 to 4.2. These consisted of several porous ceramic plates, with different pressure capacities (Soil Moisture Equipment Company). The specified capacity of each plate is the pressure at which air just begins to enter a saturated plate. These plates were kept saturated during testing. The applied air pressures were kept constant by use of a regulator and measured using a pressure gauge and/or manometer.

An initial "as is" moisture content of each disturbed soil sample was performed prior to soil suction testing. The soil samples were placed, by recompaction and remoulding in lucite rings of 38.1 mm internal diameter and between 10-20 mm in height. A linen cloth base had been previously glued to the bottom of each lucite ring.

After preparing the samples in the lucite rings, the samples were placed in the adjustable water level tank and left for equilibrium for 5 days. The samples were then weighed in order to determine the moisture content. Each soil sample followed a desorption (drying) cycle from pF0 to pF3.7 and an absorption (wetting) cycle from pF3.7 to pF0. Each pF stage required a minimum of 5 days to equilibrate.

3.0 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Basic Mechanical Properties

The basic mechanical properties including the particle-size distribution for the bulk varved clay sample are summarized in Table 3.1, while the particle-size distribution curve is illustrated in Figure 3.1.

The maximum dry densities obtained for the bulk varved clay by modified proctor are 1.645 and 1.656 Mg/m³ with optimum moisture contents of 23.6 and 23.1 % respectively (Figure 3.2).

3.2 X-ray Diffraction

The diffractograms of the soil samples are shown in Figures 3.3 to 3.6. The x-ray diffraction mineral patterns are identified by comparison with on file, standard x-ray powder diffraction patterns of the most commonly found minerals. The mineralogical semi-quantitative data is presented in Table 3.2. The semi-quantitative analysis is based on the surface area under the peaks vs. peak base (multiplied by their respective intensity factor).

3.3 Soil Suction

The proposed cover design rely on the slow rate of diffusion of oxygen through water-filled pores, and are therefor based on the hydraulic principles and characteristics of partially saturated media. Figures 3.7 to 3.11 show the water content-pressure head

TABLE 3.1 Basic Mechanical Properties of the Bulk Varved Clay

Natural Moisture Content (%)	Atterberg Limits			Particle Size Distribution			
	L.L* (%)	P.L* (%)	P.I* (%)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay*
44.5	62.8	26.2	36.6	0.0	0.0	10.5	89.9

L.L*: Liquid Limit

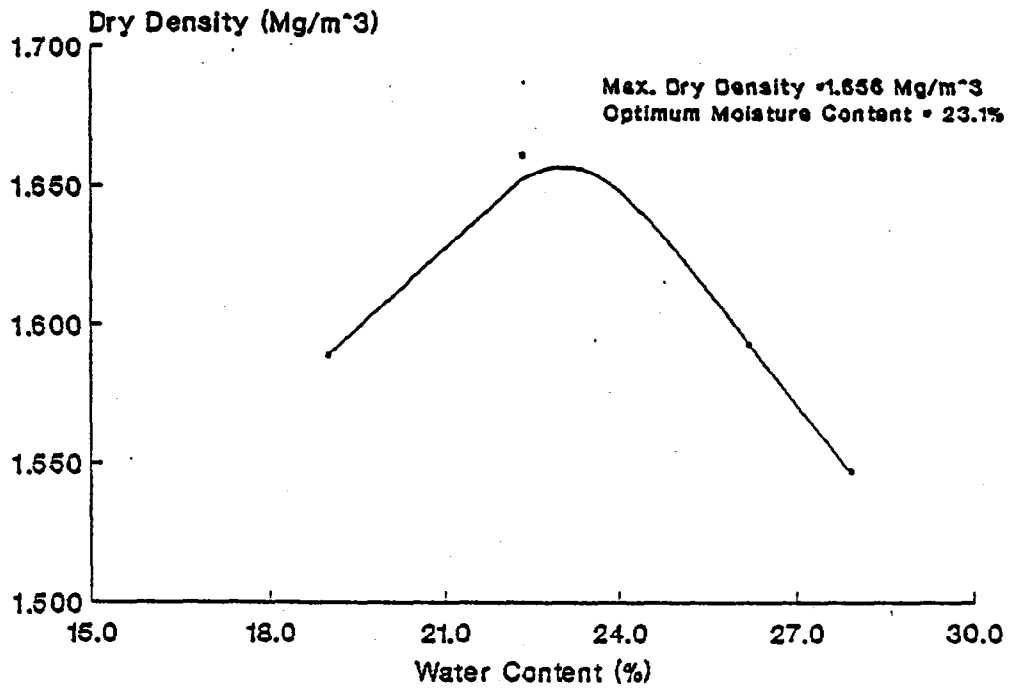
P.L*: Plastic Limit

P.I*: Plasticity Index

Clay**:according to ASTM D422 clay size < 0.005 mm

MODIFIED PROCTOR TRIAL 1

Sample : Bulk Clay



MODIFIED PROCTOR TRIAL 2

Sample : Bulk Clay

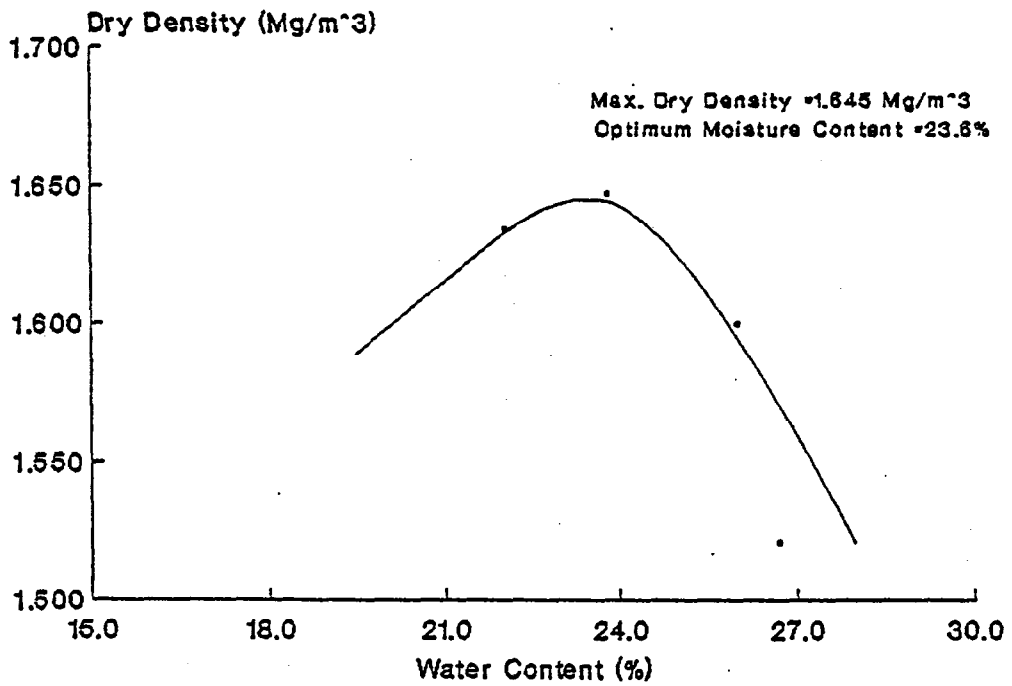


Fig. 3.2 Compaction Test Results for Bulk Varved Clay

Table 3.2: Mineralogy (Semi-Quantitative Analysis)

BULK VARVED CLAY (Oriented)

Feldspar	25%
Quartz	20%
Kaolinite	15%
Illite	25%
Chlorite	10%
Amphibole	05%

BULK VARVED CLAY (Unoriented)

Quartz	30%
Kaolinite	20%
Feldspar	15%
Chlorite	15%
Illite	15%
Amphibole	05%

ANSIL S-1 (Oriented)

Feldspar	30%
Quartz	30%
Chlorite	25%
Amphibole	10%
Mica	05%

ANSIL S-2 (Oriented)

Chlorite	55%
Feldspar	30%
Quartz	05%
Mica	10%

BULK CLAY-ORIENTED SAMPLE

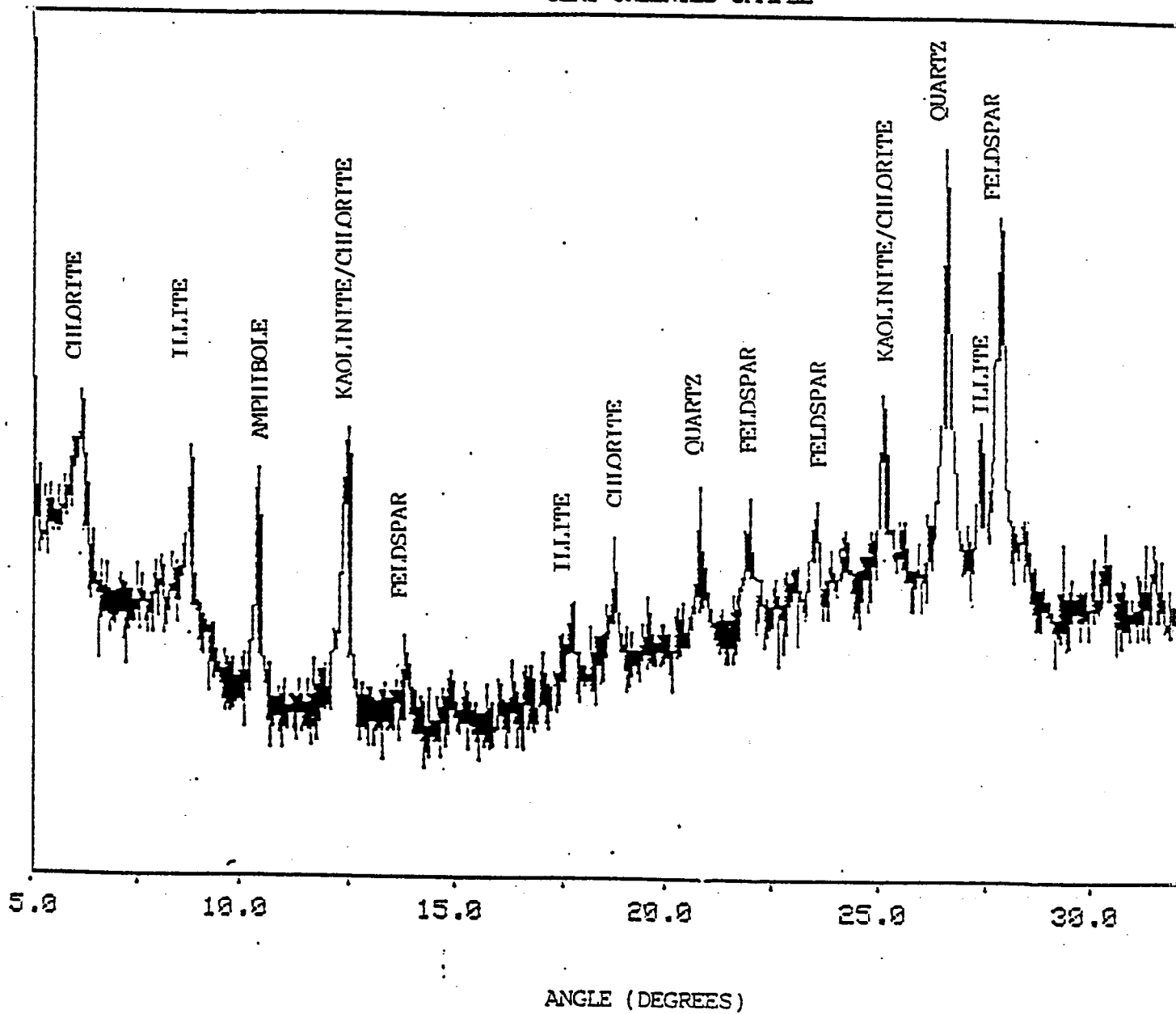


Fig. 3.3 X-ray Diffractogram for Bulk Varved Clay-Oriented

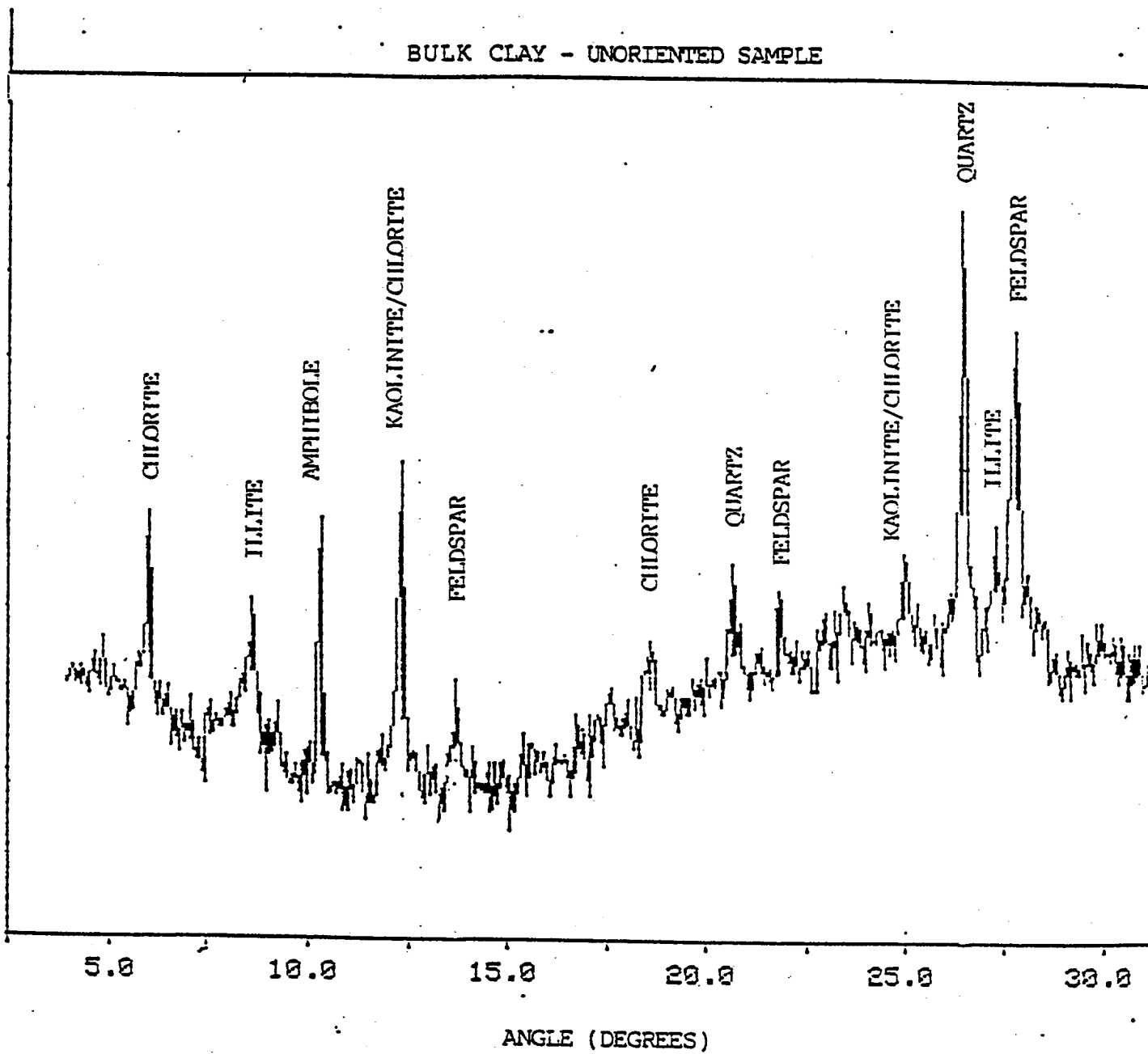


Fig. 3.4 X-ray Diffractogram for Bulk Varved Clay - Unoriented

ANSIL S-1 ORIENTED SAMPLE

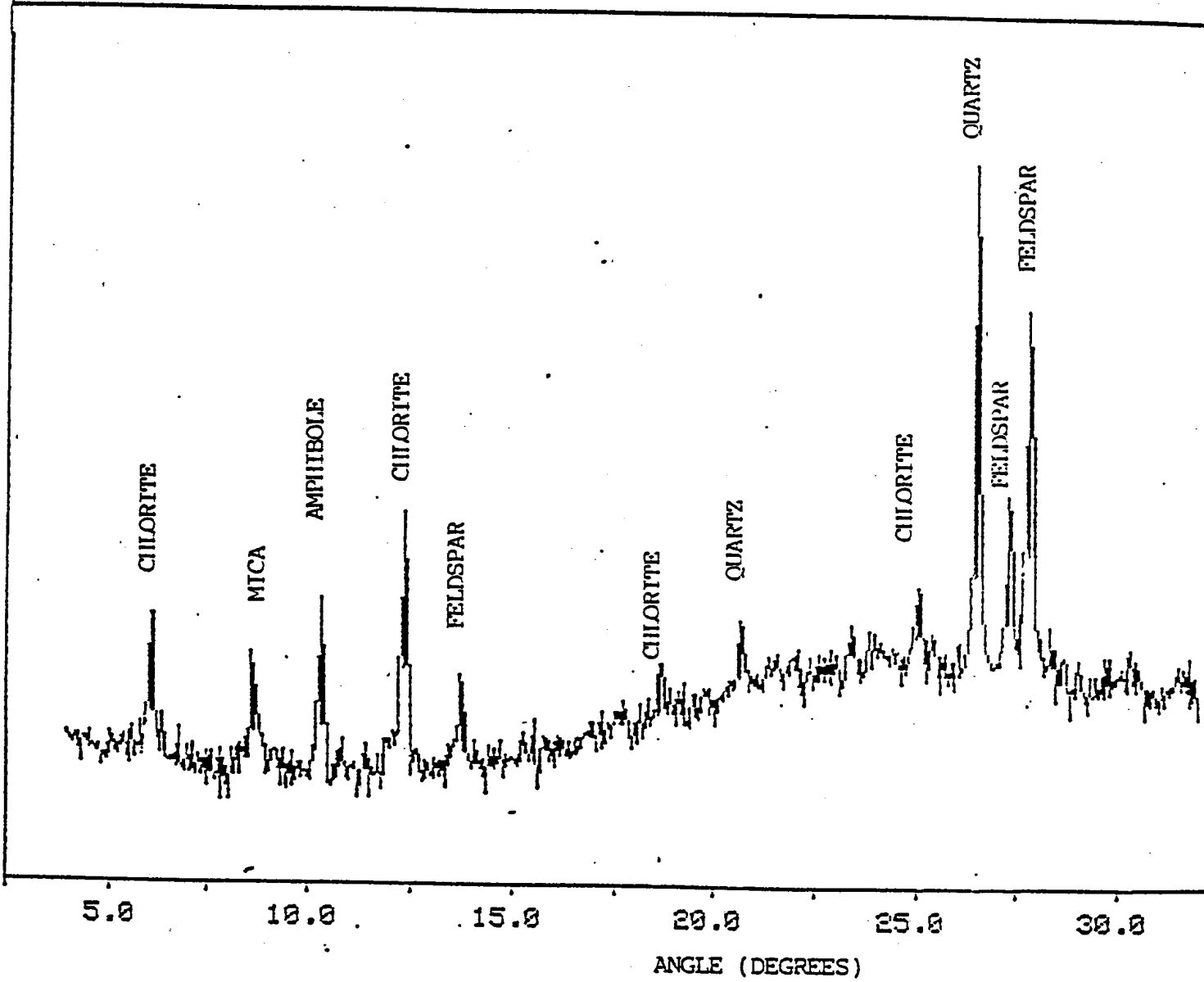


Fig. 3.5 X-ray Diffractogram for Ansil (S-1) - Oriented

ANSIL S-2 ORIENTED SAMPLE

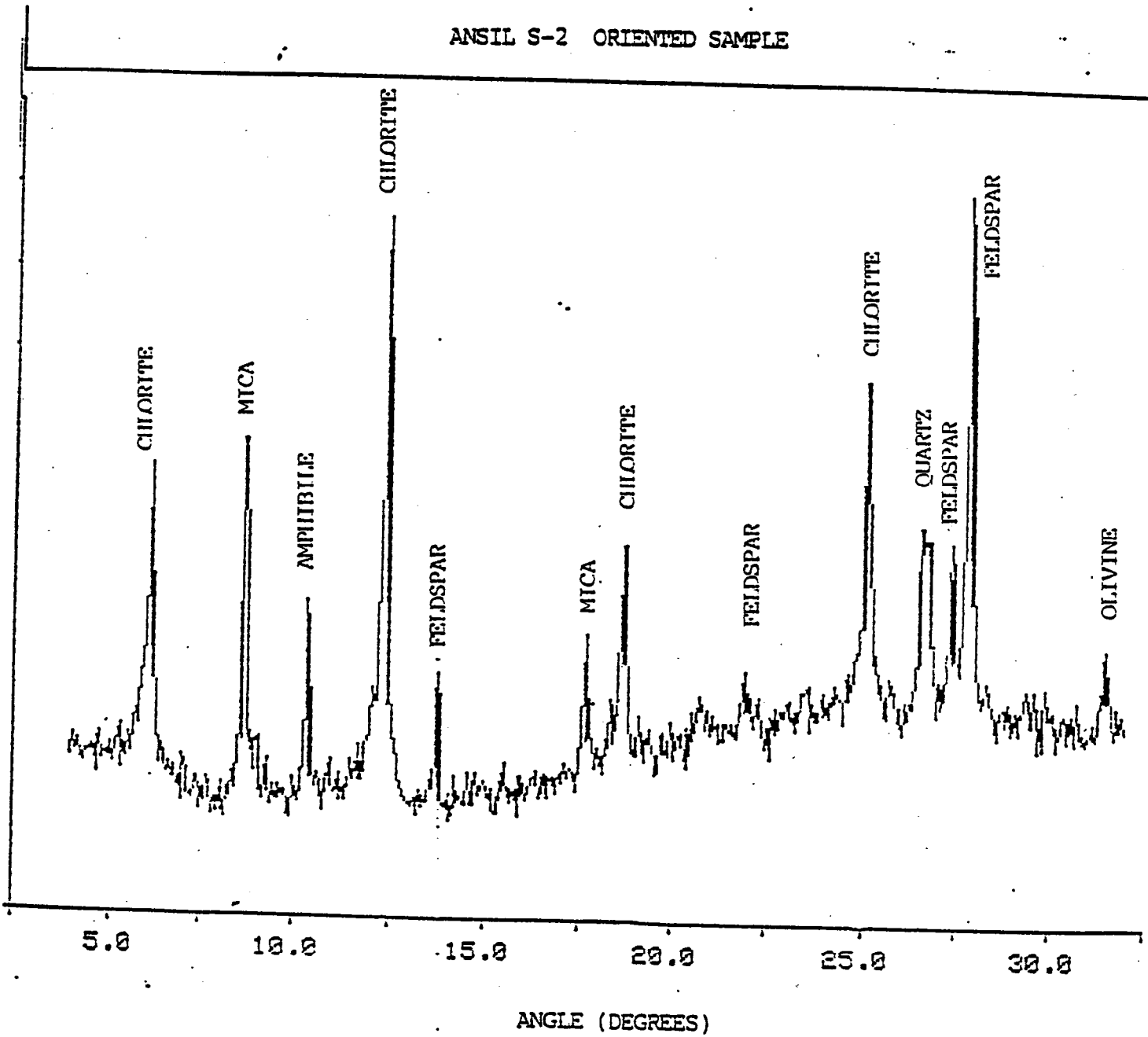


Fig. 3.6 X-ray Diffractogram for Ansil (S-2) - Oriented

TABLE 3.3 Soil Suction Test Results

Sample	Average Dry Density (Mg/m ³)	Water Content (%) pF (desorption)									Water Content (%) pF (absorption)					
		"as is"	0	1	2	2.6	3.0	3.1	3.3	3.6	3.3	3.1	3.0	2.0	1.0	0
Bulk Varved Clay	1.22	44.5	44.5	44.1	43.8	42.7	42.7	40.9	38.3	35.4	36.7	37.3	38.4	41.9	**	43.0
Ansil (S-1)	1.32	4.4	30.8	24.8	3.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	2.2	**	28.0
Ansil (S-2)	1.42	0.8	14.6	8.9	1.6	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	1.0	**	13.0
Unoxidized Tailings (WA-5)	1.60	36.2	28.1	27.9	27.3	27.1	27.1	27.0	26.3	26.6	**	**	**	26.2	26.2	27.0
Unoxidized Tailings (WA-17)	1.37	17.6	36.6	36.2	31.3	27.4	16.9	16.0	15.9	16.0	15.8	15.6	16.6	21.6	**	34.0

** : not available

BULK CLAY

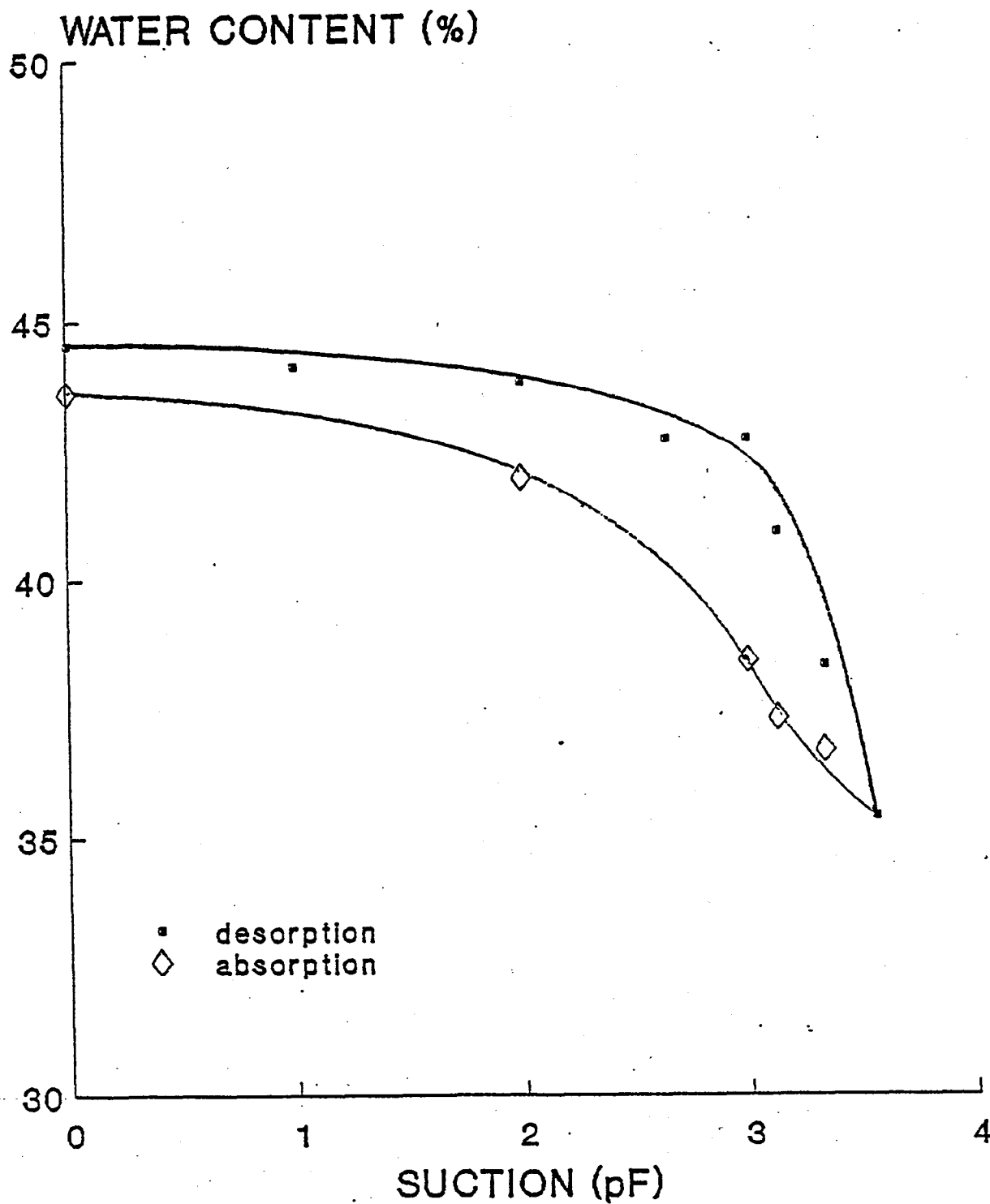


Fig. 3.7 Soil Suction Relationship for Bulk Varved Clay

ANSIL (S-1)

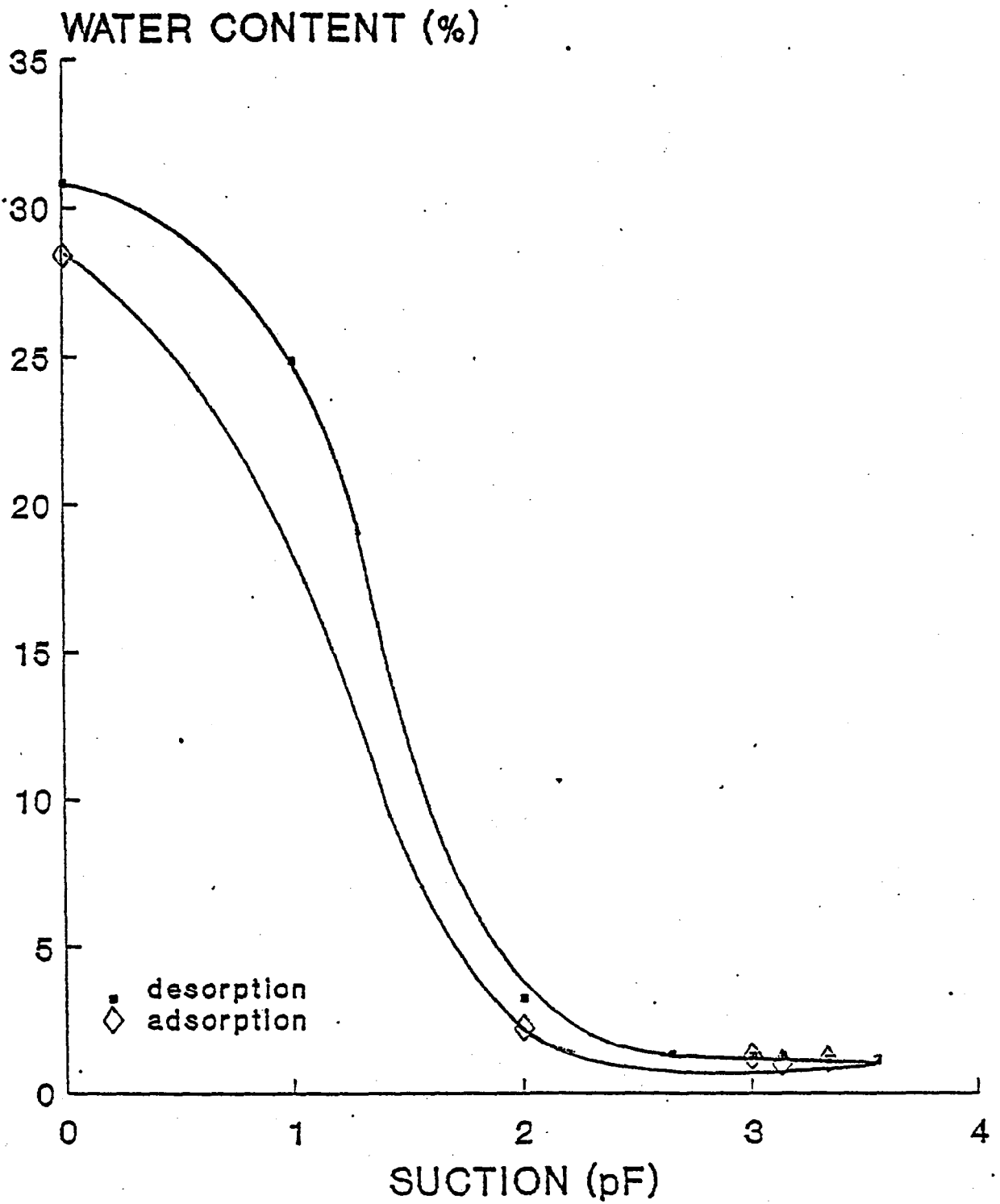


Fig. 3.8 Soil Suction Relationship for Ansil (S-1)

ANSIL (S-2)

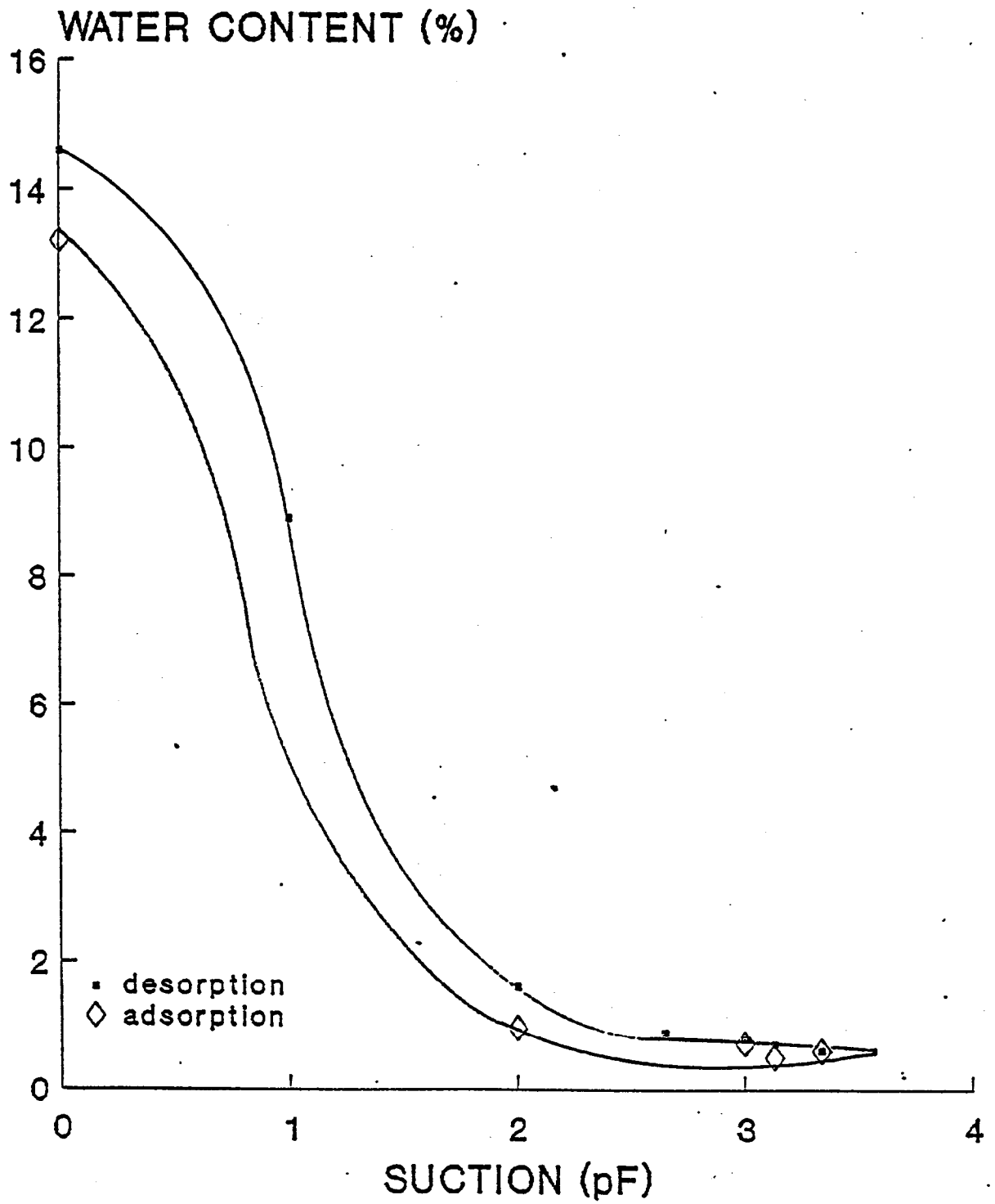


Fig. 3.9 Soil Suction Relationship for Ansil (S-2)

WA 5 UNOXIDIZED TAILINGS

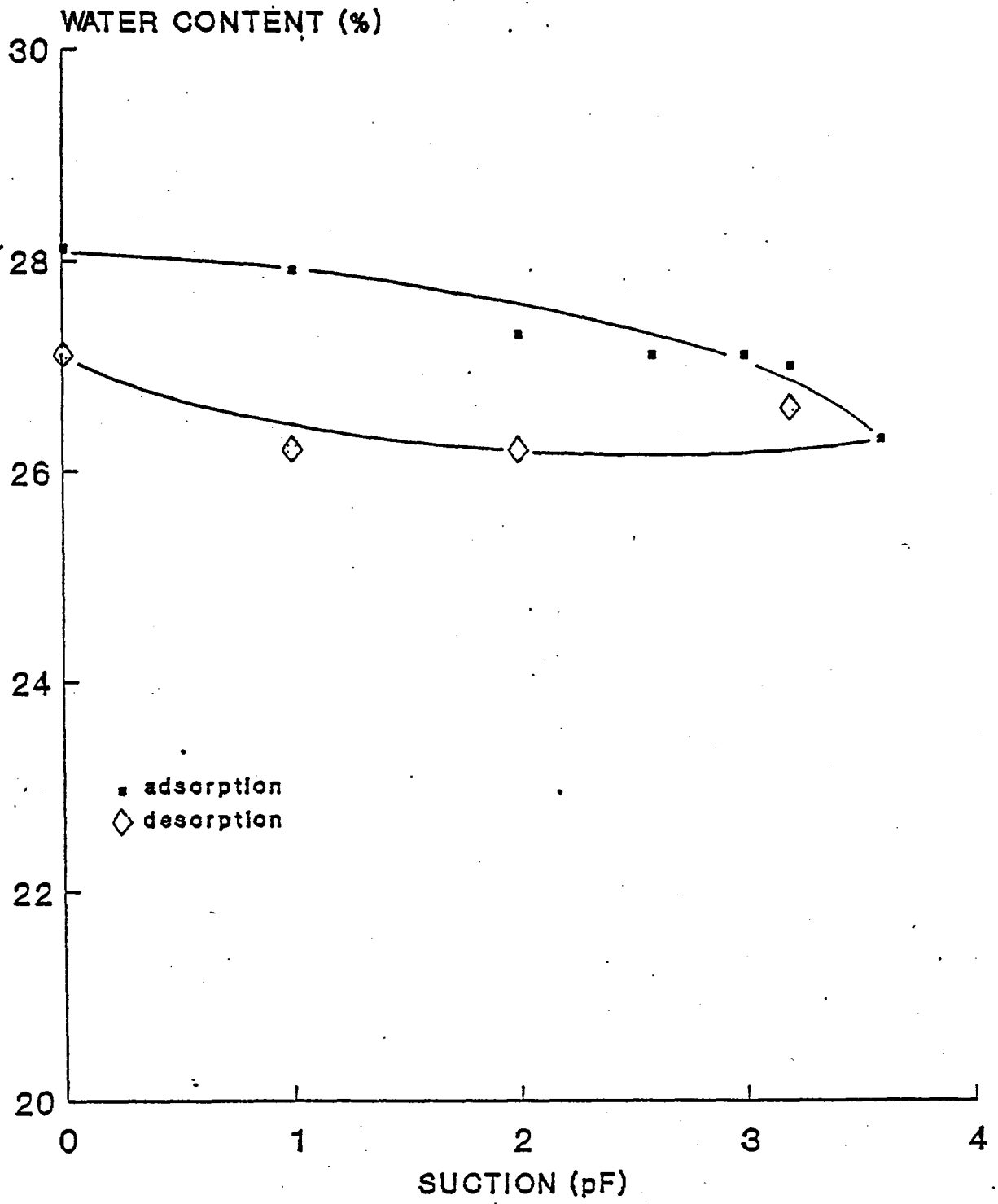


Fig. 3.10 Soil Suction Relationship for Unoxidized Tailings (WA5)

WA (17) UNOXIDIZED TAILINGS

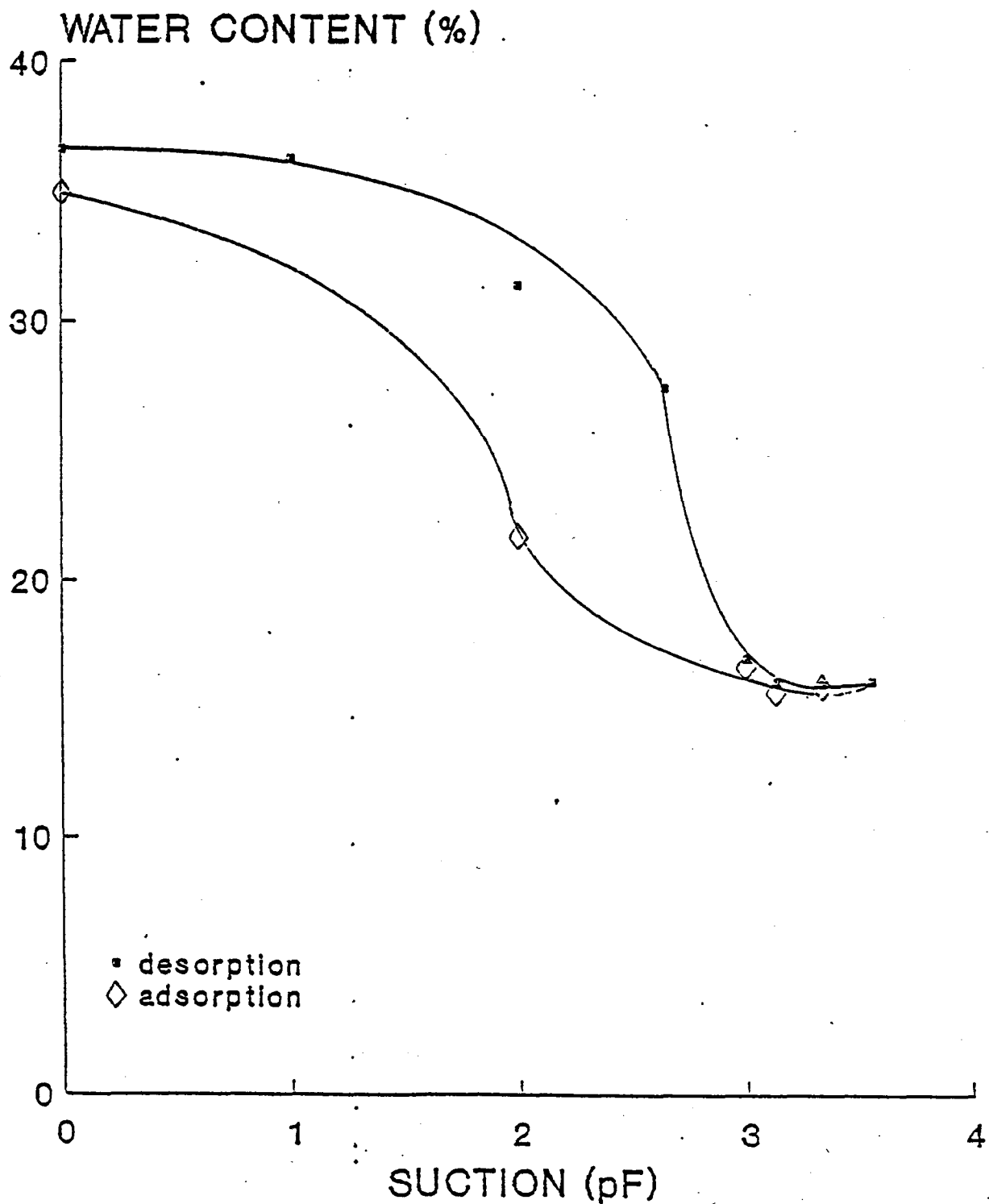


Fig. 3.11 Soil Suction Relationship for Unoxidized Tailings (WA17)

relationships for: (1) bulk varved clay (Figure 3.7); (2) two types of sand (ANSIL (S-1) and ANSIL (S-2)), Figures 3-8 and 3.9, and two types of unoxidized tailings (Figures 3-10 and 3.11). The test data is summarized in Table 3.3. As the pressure head progresses in the negative direction, the tested materials remain saturated until a pressure head of Ψ_a , the air entry value, is attained. The air-entry value is the pressure head necessary to overcome the capillary forces that can be exerted by the largest pore in the medium. As the pressure head becomes more negative, progressively smaller pores drain until the residual water content (θ_r) for the particular material is attained. The shape of the water content-pressure head relation depends largely upon grain size and structure.

Application of the experimental data presented in Figures 3.7 to 3.11 to tailings management would require that the water table does not fall to depths greater than the air-entry value (ψ_a) of the surface material in order that the surface material remains saturated. An alternative approach that avoids concerns regarding the depth of the water table involves appropriate layering of fine and coarse materials.

According to the proposed design, the Noranda Technology Centre adopted a multi-layer system of sand and clay. Assuming the level of the water table at the surface of the tailings, the pressure head will progress in the negative direction with elevation above the water table as shown in Figure 3.12. The water content for ANSIL (S-1) varies from 31% at the water surface to 13% at sand clay interface while, for ANSIL (S-2) the water content varies from 14.5% to 3.8%. The clay layer remains

saturated with an average water content of 44%.

Furthermore, the thickness of the clay layer that would remain saturated should be the air-entry pressure head for the clay minus the pressure head at which the residual water content is reached in the sand layer. For the clay soil tested in this investigation the thickness of the clay layer overlying the sand would be 1.44 ms. This value is calculated based on ψ_a for clay equals 8.25 ms which corresponds $pF = 2.9167$ and ψ at θ_r equals 6.81 m which corresponds $pF = 2.833$. These values are obtained from Figures 3.7 and 3.8 respectively.

3.4 Permeability and Cyclic Freeze-Thaw

The permeability and cyclic freeze-thaw are summarized in Tables 3.4 and 3.5 respectively. It can be seen from Table 3.4 that the permeability increased by a factor of 24 after 3 freeze-thaw cycles. This is attributed to the formation of both vertical and horizontal microcracks. Furthermore, in order to visualize the effect of freeze and thaw on soil structure, the following discussion is helpful.

A schematic illustration of the process of freezing in natural clay mass is shown in Figure 3.13. When the soil is first exposed to subfreezing temperature (stage 1) ice bands will first start to form in the free water (i.e. water not withheld by soil particles is within the macropores (Yong and Warkentin, 1975) due to its lower potential energy. As the freezing process continues, the ice buds continue to grow as heat is being extracted. Free water from adjacent micropores, if available, will migrate towards the ice

TABLE 3.4 Permeability Test Results For Varved Clay (Bulk)

Sample Condition	Initial Moisture Content (%)	Dry Density (Mg/m ³)	Final Moisture Content (%)	Permeability (m/s)
Before Freeze-Thaw	25.3	1.61	25.9	7.0×10^{-11}
After Freeze-Thaw (3 cycles)	25.3	1.60	26.0	1.7×10^{-9}

TABLE 3.5 Summary of Cyclic Freeze-Thaw For Varved Clay (Bulk)

Cycle #	Water Intake During Freezing (cm ³)	Frost Heave (mm)	Water Intake During thaw (cm ³)	Sample Collapse During Thaw (mm)	Visual Observations
1	0.9	0	0.8	0	- micro cracks/fissures at the top - some vertical fissures from 0-20 mm above bottom
2	-0.8	0	1.2	0	- micro cracks/fissures at the top - some vertical fissures from 0-20 mm above bottom
3	0.2	0	0.0	0	- micro cracks/fissures throughout - vertical fissures

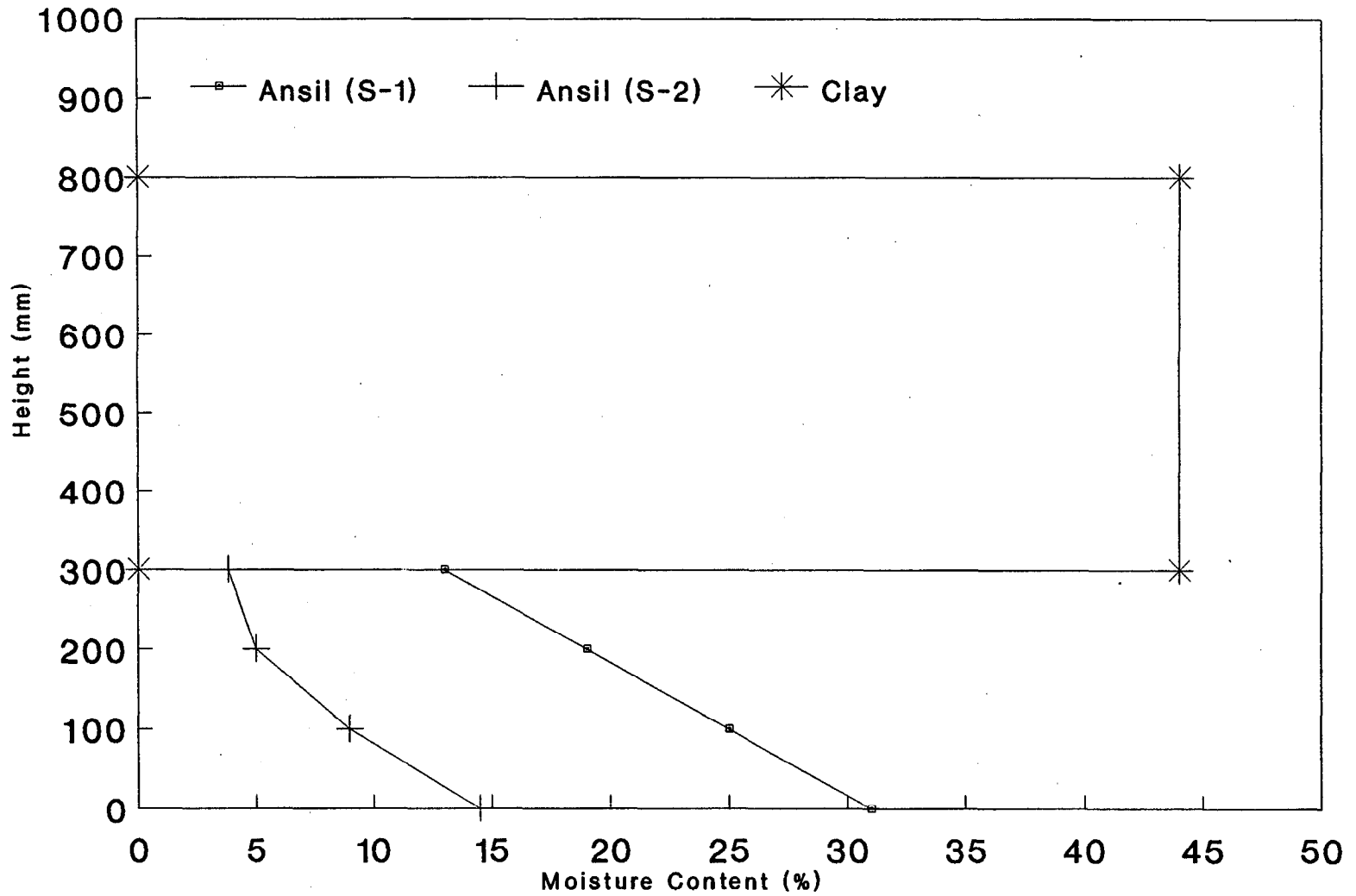


Fig. 3.12 The expected moisture content distribution in the proposed cover system

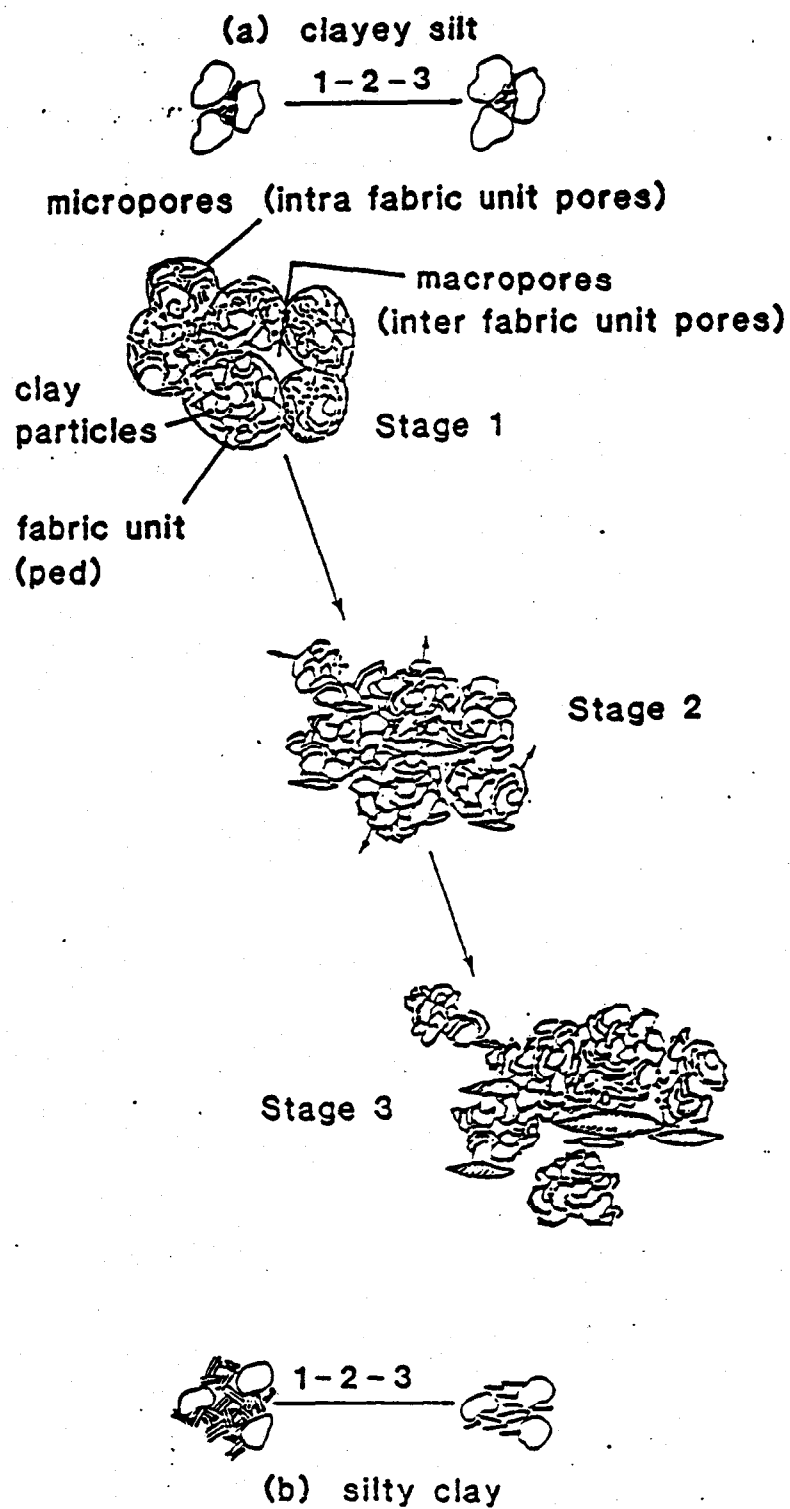


Fig. 3.13 Freezing, ice crystal growth and aggregation in soils

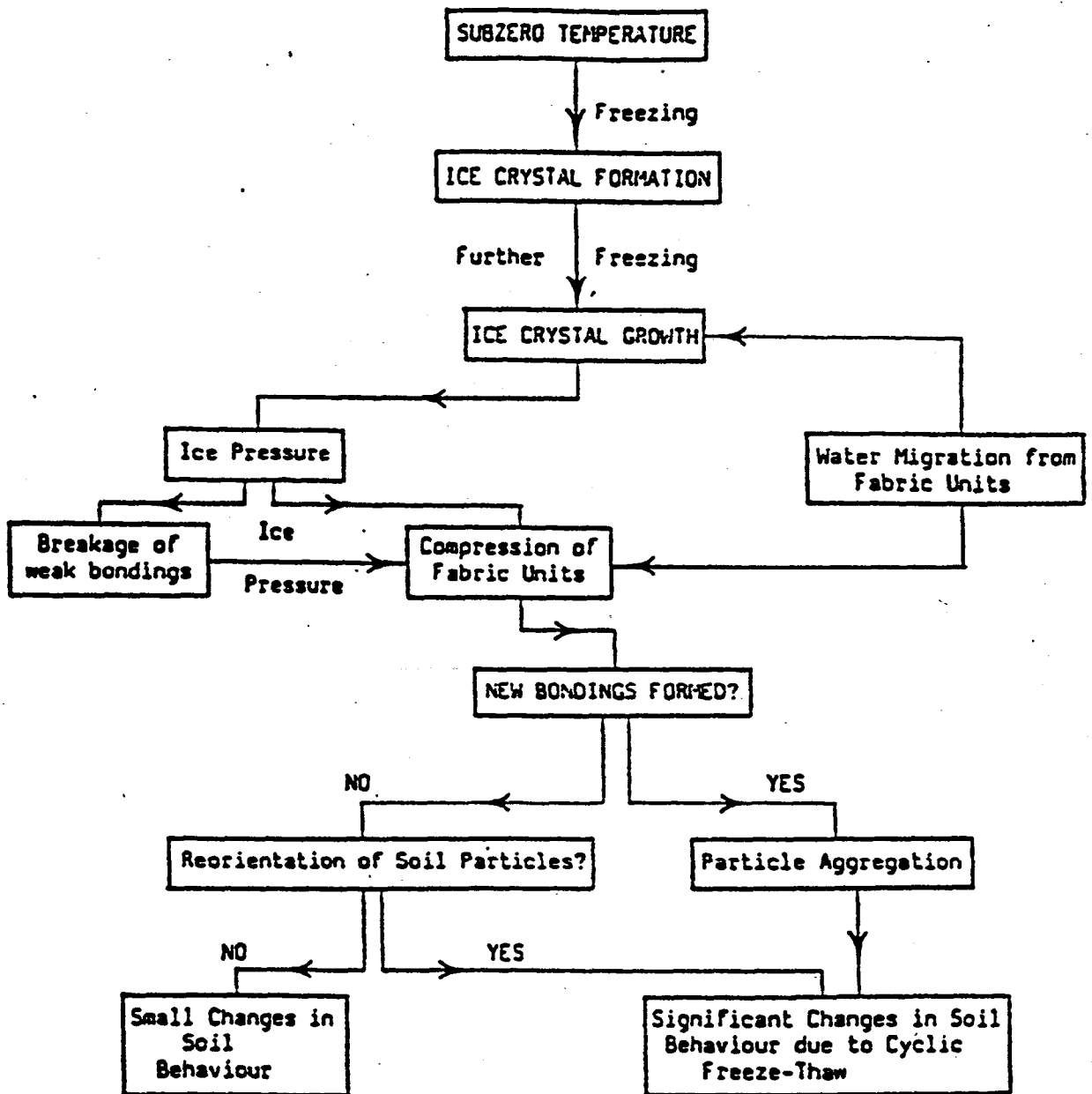


Fig. 3.14 Influence of freezing mechanism on soil behaviour

buds caused by the differences in local temperature and matric potential. Otherwise, some of the absorbed water (i.e. water held closely to soil particles) will be moved and or become ice (stage 2). As the ice crystals in in the pore spaces, continued pore expansion will cause the soil mass to undergo significant volume change. This will break some bondings between fabric units and/or compress the fabric units, and will eventually result in alteration of the original soil structure, thereby forming new fabric units if new bondings can be formed (stage 3).

Insensitive soils where the original bonds are cementations as in nature and, once broken, are normally not reversible, the remoulding effects will cause drastic changes in soil engineering behaviour. In other clay soils where the surface reactivity is relatively high, particle aggregation and/or orientation might occur as a result of reducing interparticle spaces due to ice pressure and or migration of adsorbed water. Such a change in the soil structure should be more pronounced in silty clay than in clayey silt (Figures 3.13 a and b), especially when the clay fractions are susceptible to reorientation and particle aggregation.

It would appear that the freeze-thaw action actually breaks down the original cementation bonding between the clay particles (sensitive soil) - probably due to ice expansion, but at the same time, it brings other soil particles closer together such that new bondings probably due to particle surface change interaction - are formed. These new bondings (e.g. van der Waal, hydrogen, etc.) are relatively unstable and can be broken by vigorous agitation and dispersing agent.

The sequence of freezing mechanism in soil is shown in Figure 3.14. (Yong et al. 1985). Current knowledge is insufficient, however, to identify the type of soil which

will give rise to particle aggregation. Clay minerals by themselves, appear to be of minor significance in inducing particle aggregation, particularly when a stable clay mineral is present in large quantity. The major factors which affect the frost action in soil and promote stable aggregate formation have been recognized by Baver (1966) to be cation effects, organic matter, alternative wetting and drying, cementation effects, irreversible iron colloids, microbial activity and synthetic complex chemicals.

4.0 CONCLUSION

Based on the results of this study, the following statements can be written:

- (1) according to the proposed design of the clay cover by the Noranda Technology Centre, the clay layer will remain saturated at all times. This is an important consideration in order to minimize the oxygen diffusion through the clay layer.

- (2) an increase in permeability due to cyclic freeze-thaw is obtained which will increase the water drainage through the clay layer. This in turn will enhance leachate generation from the tailings.

5.0 RECOMMENDATION

In order to fully examine the effectiveness of engineered soil covers for reactive tailings, the following studies are of extreme importance:

- (1) since the clay layer will be saturated at all times, chemical interactions between the clay cover and leachate from the tailings should be investigated.
- (2) cyclic freeze-thaw effect on clay cover while leaching by effluent from tailings.
- (3) investigate the adverse effect of items (1) and (2) on the resultant permeability

6.0 REFERENCES

- Baver, L.D., Soil Physics (3rd Edition), John Wiley and Sons Inc., New York, 1966.
- Bowles, J.E., Engineering Properties of Soils and Their Measurement, (1987), pp. 97-109.
- Chamberlain, E.J., and Gow, A., Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils, International Symposium on Ground Freezing, Ruhr University, Bochum, Germany 1978, pp. 31-44.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Murphy, D., Short-Term Cyclic Freeze-Thaw Effect on Strength Properties of a Sensitive Clay, Proceedings of the 3rd International Symposium Ground Freezing, U.S.A., CREL, Hanover, New Hampshire, 1982, pp. 97-104.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Tucker, A., A Study of Frost-Heave Mechanics, of High-Clay Content Soils, Journal of Energy Resources Technology, Trans. ASME, Vol. 105, (1984), pp. 502--508.
- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Yim C.W.P., Alternation of Soil Behavior After Cyclic Freezing and Thawing, Proc., of the 4th Int. Symp. on Ground Freezing (ISGF), Sapporo, Japan, (1985).
- Yong, R.N., and Warkentin, B.P., Soil Properties and Behavior, Elsevier, Amsterdam, (1975), 499 pp.