Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Effet du gel sur les superstructures routières avec fondation en matériaux concassés

Frosteinfluss auf den Strassenoberbau mit Fundationsschicht im gebrochenen Kiessand

**Laboratoire de mécanique des sols de
l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
H. Lefebvre et M. Dysli**

**Mandat de recherche No 28/84 sur proposition de la
VSS Union des professionnels suisses de la route**

Novembre 1988

Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Effet du gel sur les superstructures routières avec fondation en matériaux concassés

Frosteinfluss auf den Strassenoberbau mit Fundationsschicht im gebrochenen Kiessand

Laboratoire de mécanique des sols de l' Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
H. Lefebvre et M. Dysli

Mandat de recherche 28/84 sur proposition de l'Union des professionnels suisses de la route

Novembre 1988

TABLES DES MATIERES

RESUME 5

ZUSAMMENFASSUNG 7

RIASSUNTO 9

1. INTRODUCTION 11

1.1 Définition du mandat 11
1.2 Programme générale de la recherche 11

2. DESCRIPTION DU MODELE 13

2.1. Description générale 13
2.2. Les matériaux 14
2.2.1 Le limon 14
a) Caractéristiques géotechniques intrinsèques 14
b) Caractéristiques géotechniques in situ 15
2.2.2 Les matériaux concassés 16
2.3. Appareils de charge du modèle 16
2.3.1 Simulateur de trafic lourd 16
2.3.2 Vérin hydraulique 16
2.4. Instrumentation du modèle 17
2.4.1 Mesure des températures 17
2.4.2 Déformations verticales permanentes 17
a) Capteurs BISON 17
b) Nivellement 18
c) Comparateurs 18
2.4.3 Déformations verticales élastiques 19
a) Comparateurs 19
b) Poutre Benkelman 19
c) Mode de chargement 19

3. LES MATERIAUX CONCASSES 20

3.1. Essais préliminaires 20
3.1.1 Les matériaux 20
3.1.2 Mode de compactage 20
3.1.3 Portance de la fondation après compactage 20
3.1.4 Conclusions 21
3.2. Matériaux du modèle 22
3.2.1 Caractéristiques géotechniques 22
3.2.2 Mise en œuvre 22

4. INFLUENCE DU DRAINAGE SUR LA FORCE PORTANTE D'UNE CHAUSSEE LORS D'UN CYCLE DE GEL-DEGEL 26

4.1. Introduction 26
4.2. Conditions thermiques 26
4.3. Mode de chargement de la chaussée 27
4.4. Périodicité de lecture des mesures 27
4.5. Résultats des essais 28
4.6. Commentaires sur les résultats des essais 31
4.7. Interprétation des résultats 34
4.7.1 Comparaison présents résultats / résultats recherches antérieures 34
4.7.2 Influence de la membrane étanche 39
4.7.3 Influence du drainage sur la forme de l'infrastructure 39
a) Analyse des résultats 39
b) Tentative de simulation des écoulements souterrains 41
4.7.4 Caractéristiques géotechniques du limon d'infrastructure après essais 44
4.8. Conclusions 45

5. CONCLUSIONS GENERALES 47

BIBLIOGRAPHIE 51

ANNEXES 53

0. GRAPHIQUES GENERAUX

0-1, 2 Valeurs de γ, w et M_E après compactage de l'infrastructure
0-3 à 6 Valeurs de γ, w et M_E après compactage de la couche de fondation
0-7 Schéma des instruments de mesures
0-8 Position des appareils de surface
0-9 Modèle et instrumentation interne, plan
0-10 Modèle et instrumentation interne, coupe
0-11 Coupes transversales champ 1, axes A, B et C
0-12 Coupe longitudinale du drainage latéral
0-13 Coupes transversales champs 2 et 3

1. ESSAIS NO 1 : GEL ET DEGEL RAPIDE

1-1, 2	Isothermes du Champ 1
1-3, 4	Isothermes du Champ 2
1-5	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 1
1-6	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 2
1-7, 8, 9	Tautochrones, Champ 1
1-10, 11, 12	Tautochrones, Champ 2
1-13	Déformations permanentes en surface en 1 point, selon 3 procédés différents, Champ 1, Axe B
1-14	Déformations permanentes en surface en 1 point, selon 3 procédés différents, Champ 2, Axe E
1-15	Déformations permanentes en surface en 2 points distincts, selon 2 procédés différents, Champs 1 et 2, Axes B et E
1-16	Déformations permanentes en surface en 3 points distincts, selon 1 même procédé
1-17, 18, 19	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 1, Axe B
1-20, 21	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 2, Axe D
1-22, 23	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 2, Axe E
1-24, 25	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 3, Axes H et I
1-26	Déformations élastiques en fonction du temps, Champ 1

2. ESSAIS NO 2 : GEL ET DEGEL LENT

2-1, 2	Isothermes du Champ 1
2-3, 4	Isothermes du Champ 2
2-5	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 1
2-6	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 2
2-7, 8, 9	Tautochrones, Champ 1
2-10, 11, 12	Tautochrones, Champ 2
2-13	Déformations permanentes en surface en 2 points distincts, selon 2 procédés différents, Champs 1 et 2, Axes B et E
2-14	Déformations élastiques en fonction du temps, Champ 1
2-15	Débit au dégel

RESUME

Dans le cadre de la révision des normes suisses de dimensionnement des superstructures routières, le Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne a réalisé , sur mandat de l'Office des Routes du Département Fédéral des transports, des communications et de l'énergie, 3 séries d'essais en vraie grandeur portant sur le comportement des superstructures routières lors de cycles de gel/dégel.

Le présent rapport traite de la troisième série d'essais qui était consacrée à l'étude :

- du mode de compactage et de la portance des couches de fondation en matériaux concassés
- de l'influence du drainage de la forme de l'infrastructure sur la portance de la chaussée lors du dégel.

Le nouveau modèle a été réalisé en réutilisant l'infrastructure construite lors des précédentes recherches et en remplaçant l'ancienne couche de fondation par une couche de 30 cm de grave concassée instrumentée comme auparavant. Ce modèle a été divisé en trois champs : le champ 1 pourvu, à la base de sa couche de fondation en gravier concassé, d'un géotextile drainant dans son plan relié latéralement à des drains et surmonté d'une membrane étanche ; le champ 2 pourvu d'une seule membrane étanche à l'interface infra-superstructure (sans géotextile drainant) et le champ 3 où l'infrastructure et la couche de fondation sont directement en contact.

Les essais réalisés ont, tout d'abord, mis en évidence **l'impossibilité d'obtenir un bon compactage** donc une portance suffisante et conforme aux normes pour une couche de fondation en **grave concassée** de faible épaisseur mise en place sur une infrastructure de faible portance. Ils ont aussi montré que la valeur de cette portance restait inférieure à celle obtenue, dans les mêmes conditions, avec une grave roulée et donc le moindre intérêt de l'utilisation d'une grave concassée par rapport à une grave roulée.
La portance d'une grave concassée peut largement dépasser celle d'une grave roulée; pour cela il faut pouvoir lui transmettre une énergie de compactage plus importante de façon à vaincre l'angle de frottement interne de cette grave concassée qui est plus élevée que celui de la grave roulée. Malheureusement, pour une couche de grave concassée de faible épaisseur reposant sur une infrastructure de faible portance (dans notre cas CBR = env. 7 %), la plus grande partie de l'énergie de compactage passe dans l'infrastructure très déformable et il est impossible de compacter correctement la couche de grave concassée.

Quant à l'**influence du drainage de la forme de l'infrastructure sur la portance de la chaussée lors du dégel**, les deux essais entrepris n'ont pas permis de tirer de conclusions probantes : des résultats à priori contradictoires ont été obtenus. Peu à pas d'eau n'a été récoltée lors du dégel ,alors que le tassement résiduel est resté beaucoup plus faible que celui d'autres essais similaires où la chaussée avait poinçonné.
Le géotextile drainant paraît ainsi jouer un rôle favorable mais d'une façon qu'il est difficile d'expliquer par son seul effet de drainage qui est faible : lors de l'essai avec dégel rapide, sur les quelque 30 litre·m^{-2} d'eau accumulée sous forme de lentilles de glace, seuls environ 1 litre·m^{-2} ont passé dans la couche drainante. L'armature constituée par le géotextile drainant, qui était composé de deux couches de non-tissé et d'un geogrid, a certainement joué un rôle favorable sur la portance lors du dégel. Cette solution est cependant coûteuse et ne peut être généralisée en pratique.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Revision der Schweizer Normen für Strassenoberbau hat das Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL im Auftrag des Bundesamtes für Strassenbau des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements, drei Reihen von Versuchen in wahrer Grösse, das Verhalten des Strassenoberbaues während Frost/Tau-Zyklen betreffend, durchgeführt.

Der vorliegende Bericht handelt von der dritten Reihe von Versuchen, die folgendes erforscht hat :

- die Verdichtungsmethode und Tragfähigkeit der unteren, aus gebrochenem Material bestehenden Tragschicht,
- den Einfluss der Entwässerung der Planie des Unterbaues auf die Tragfähigkeit der Strasse beim Auftauen.

Das neue Modell ist hergestellt worden, indem der Unterbau, gebaut für frühere Versuche, wiederverwendet und die alte Tragschicht durch eine 30 cm dicke, wie zuvor mit Messgeräten ausgestattete Brechkiesschicht ersetzt worden war. Dieses Modell ist in drei Felder geteilt worden : das Feld 1 mit, unter seiner Tragschicht aus Brechkies, einem entwässernden Geotextil, das seitlich an Dräns angeschlossen und mit einer wasserdichten Membrane bedeckt war, das Feld 2 nur mit einer wasserdichten Membrane zwischen Ober- und Unterbau (ohne entwässerndes Geotextil) und das Feld 3, wo Ober- und Unterbau direkt in Berührung waren.

Die ausgeführten Versuche haben zuerst herausgestellt, dass **es unmöglich ist, eine gute Verdichtung**, und demzufolge eine genügende und normenentsprechende Tragfähigkeit für eine dünne Tragschicht aus Brechkies auf einem schlecht tragendem Unterbau zu erhalten. Sie haben auch gezeigt, dass der Wert der Tragfähigkeit geringer bleibt als der bei gleichen Bedingungen erhaltene Wert für gerollten Kies, und daher das geringere Interesse des gebrochenen Kieses gegenüber dem gerollten.
Die Tragfähigkeit eines gebrochenen Kieses kann die eines gerollten weit übertreffen; dafür muss man ihm aber eine grössere Verdichtungsenergie übertragen, um den internen Reibungswinkel des gebrochenen Kieses, der grösser ist als der des gerollten Kieses zu überwinden. Leider wird mit der dünnen Brechkiesschicht auf einem Unterbau mit geringer Tragfähigkeit (in unserem Fall, CBR = ca. 7 %), der grösste Teil der Verdichtungsenergie vom sehr deformierbaren Unterbau aufgenommen, und es ist unmöglich, die Brechkiesschicht richtig zu verdichten.

Im Bezug auf den **Einfluss der Entwässerung der Unterbauplanie auf die Tragfähigkeit des Strassenoberbaus beim Tau** haben die beiden ausgeführten Versuche es nicht ermöglicht, überzeugende Schlüsse zu ziehen : auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnisse wurden erhalten. Wenig oder kein Wasser wurde während dem Tau gesammelt, die residuale Setzung blieb viel geringer als bei ähnlichen Versuchen, bei denen die Strasse durchgestanzt wurde.
Der Entwässerungsgeotextil scheint eine vorteilhafte Rolle zu spielen, jedoch în einer schlecht nur durch seinen Drainageeffekt, der gering ist, erklärbaren Art : beim Versuch mit raschem Auftauen kam von 30 $l \cdot m^{-2}$ zu Eislinsen gefrorenem Wasser nur 1 $l \cdot m^{-2}$ durch die Entwässerungsschicht. Die durch das Entwässerungsgeotextil, aus zwei nicht gewobenen Schichten und einem Geogrid bestehend, gebildete Bewehrung hat bestimmt einen vorteilhaften Einfluss auf die Tragfähigkeit während dem Tau gehabt. Diese Lösung ist aber teuer und kann in der Praxis nicht verallgemeinert werden.

RIASSUNTO

All' interno del programma di revisione delle norme svizzere relative al dimensionamento delle sovrastrutture stradali, il Laboratorio di Meccanica delle Terre del Politecnico di Losanna ha realizzato, per conto dell' Ufficio delle Strade del Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie, tre serie di prove, a grandezza naturale, finalizzate allo studio del comportamento delle sovrastrutture stradali sottoposte a cicli di gelo/disgelo.

il presente rapporto si riferisce alla terza serie di prove volte a studiare:
- il modo di compattazione e la portanza degli strati di fondazione formati da materiali fratturati
- l' influenza del drenaggio operato dall' infrastruttura sulla portanza del manto stradale al momento del disgelo.

Il nuovo modello è stato realizato riutilizzando l' infrastruttura già costruita per le precedenti ricerche, dove al vecchio strato di fondazione è stato sostituito un nuovo strato di 30cm di spessore di ghiaia fratturata, strumentato come nel passato.
Questo modello è stato diviso in 3 zone: la zona 1, provvista, alla base dello strato di fondazione in ghiaia frantumata, di un geotessile con funzioni drenanti nel suo piano, collegato lateralmente a dei dreni e coperto di una membrana impermeabile; la zona 2 provvista solo di una membrana impermeabile all' interfaccia fra la sovrastruttura e l' infrastruttura (senza geotessile drenante) e la zona 3 dove l' infrastruttura e lo strato di fondazione sono direttamente in contatto.

Le prove hanno innanzitutto messo in evidenza **l' impossibilità di ottenere una buona compattazione** e quindi una portanza sufficiente e conforme alle norme per il caso di uno strato di fondazione di piccolo spessore di **ghiaia frantumata** poggiante su una infrastruttura di scarsa portanza. Le prove hanno inoltre mostrato che il valore di tale portanza resta inferiore a quello ottenuto, nelle stesse condizioni, per una ghiaia a spigoli arrotondati; da qui un minor interesse riguardo l' utilizzazione della ghiaia frantumata rispetto a quella a spigoli arrotondati.
La portanza di una ghiaia frantumata può tuttavia superare largamente quella di una ghiaia a spigoli arrotondati: a tal fine bisogna impiegare una energia di compattazione più grande in modo da superare il valore dell' angolo di attrito interno della ghiaia fratturata che è maggiore di quello di una ghiaia a spigoli arrotondati. Sfortunatamente, per uno strato di piccolo spessore di ghiaia frantumata riposante su su una infrastruttura di scarsa portanza (nel nostro caso CBR=7%), la maggior parte dell' energia viene assorbita dalla infrastruttura molto deformabile ed è quindi impossibile compattare correttamente la ghiaia frantumata.

Per quanto riguarda **l' influenza del drenaggio dell' infrastruttura sulla portanza del manto stradale** al momento del disgelo, le 2 prove effettuate non hanno permesso di tirare delle conclusioni certe: infatti si sono ottenuti risultati a priori contraddittori. La quantità d' acqua raccolta durante il disgelo è stata molto piccola se non addirittura nulla, mentre il cedimento residuo è stato molto più piccolo di quanto misurato in prove simili dove il manto stradale è sprofondato.
Sembra inoltre che il geotessile, con funzione drenante abbia giocato un ruolo favorevole sebbene attraverso un meccanismo più complesso del semplice drenaggio che infatti è stato scarso: dei 30 lt/m2 circa d' acqua accumulati sooto forma di lenti di ghiaccio, solo 1 lt/m2 è passato nello strato drenante. L' armatura costituita dal sistema drenante, composto da due strati di geotessile non tessuto e da una geogriglia, ha certamente giocato un ruolo favorevole sulla portanza all' atto del disgelo. questa soluzione è tuttavia costosa e non può essere quindi generalmente utilizzata in pratica.

1. INTRODUCTION

1.1. DEFINITION DU MANDAT

Dans le cadre de la révision des normes suisses de dimensionnement des superstructures routières, l'Office des Routes du Département Fédéral des Transports, des Communications et de l'Energie a mandaté à plusieurs reprises le Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour l'exécution en vraie grandeur d'essais portant sur le comportement de superstructures routières lors de cycles de gel / dégel.

Les deux premiers mandats concernaient des superstructures réalisées en grave I [4], [5], [6], respectivement en matériaux stabilisés au ciment [2], [3].

Le troisième, dont le présent rapport est la conclusion, a été attribué au LMS par lettre du 29 novembre 1984; il concerne les couches de fondations réalisées en matériaux concassés, drainées ou non à leur base.

1.2. PROGRAMME GENERAL DE LA RECHERCHE

La recherche entreprise comporte deux directions principales d'étude :

- le mode de compactage et la portance des couches de fondation en matériaux concassés;

- l'influence du drainage de la forme de l'infrastructure sur la portance de la chaussée lors du dégel.

Cette recherche s'inscrit en continu avec les deux précédentes; le modèle de chaussée construit a donc été réalisé avec la même infrastructure auparavant mise en oeuvre.

Le programme de travail s'est déroulé conformément au schéma directeur suivant :

a) Essais préliminaires : enlèvement des matériaux constituant la superstructure routière précédemment étudiée; contrôle des paramètres géotechniques du sol d'infrastructure; mise en oeuvre de différents matériaux concassés, essais de compactage et choix final des matériaux concassés utilisés par la suite.

b) Enlèvement des matériaux testés; nouveau contrôle des paramètres géotechniques de sol d'infrastructure.

c) Mise en oeuvre, sur les champs respectifs, du drainage et de l'étanchéité sur la forme de l'infrastructure.

d) Mise en oeuvre et instrumentation de la couche de fondation en matériaux concassés; mesure de ses paramètres géotechniques; mise en oeuvre du revêtement.

e) Cycles de gel / dégel avec chargement dynamique de la portion de route dont la forme est drainée.

On notera que le Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC) a utilisé le modèle construit pour effectuer une recherche sur le comportement mécanique du revêtement de la chaussée.

2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1. DESCRIPTION GENERALE

Le modèle, construit dans la partie peu profonde de la fosse du Département de Génie Civil, a une largeur de 5.0 m, une longueur de 12.0 m et une épaisseur de 2.0 m.

Comme les objectifs de la présente recherche n'exigeaient qu'une modification complète de la superstructure routière, l'infrastructure et l'instrumentation des modèles précédemment construits ont été entièrement conservées : on notera toutefois qu'elles ont subi plusieurs cycles de gel / dégel.

Le niveau de référence de l'échelle des profondeurs étant le bord de la fosse d'essai, le modèle peut être décrit comme suit, de bas en haut :

- de -200 à -192 cm, couche de gravier 8-30 mm. Cette couche assure l'alimentation de la nappe phréatique dans le modèle par l'intermédiaire des tubes de mise en charge placés latéralement.

- à -192 cm, géotextile anticontaminant placé sur le gravier.

- de -192 cm à -30 cm (à l'axe longitudinal), sol d'infrastructure du modèle : limon de lavage de la gravière de Biolley-Orjulaz. La nappe phréatique est située à -150 cm.

- de -30 cm à 0.0 cm, couche de fondation de la superstructure : gravier concassé de granulométrie 0-60 mm.

- de 0.0 à 12 cm, revêtement hydrocarboné : 7 cm d'enrobé HMT 25 et 5 cm de tapis AB 16.

Ce modèle a été divisé en trois zones d'expérimentation, appelées champs 1, 2 et 3, qui diffèrent uniquement au niveau de la norme de l'infrastructure :

- le champ 1 est **drainé** : un géotextile drainant dans son plan, surmonté d'une membrane étanche, couvre toute la surface du sol d'infrastructure nivelée avec une pente de 2 % de part et d'autre de l'axe longitudinal du champ. Deux drains, placés latéralement, recueillent l'eau éventuellement drainée et l'amènent à deux bacs gradués par l'intermédiaire de tuyaux souples courants dans les "tubes à câbles".

- le champ 2 est **non drainé** : une membrane étanche mise en place sur toute la surface du sol d'infrastructure sépare le limon du gravier concassé.

- le champ 3 est **non drainé** : il ne comporte ni géotextile, ni membrane étanche; le limon et le gravier concassé sont en contact direct.

Chaque champ comporte trois axes transversaux de mesure notés respectivement A, B, C (Champ 1), D, E, F (Champ 2) et H, I, J (Champ 3), l'un au milieu du champ, les deux autres à 1.0 m de part et d'autre de l'axe médium.
On trouvera sur les annexes 0.9 à 0.13 le plan de situation et les coupes du modèle.

2.2. LES MATERIAUX

Le tronçon de route se compose de trois matériaux, si l'on excepte les 8 cm de gravier filtrant 8-30 mm placés en fond de fosse; il s'agit du limon de la gravière de Biolley-Orjulaz (infrastructure), des matériaux concassés (couche de fondation) et du revêtement.

Seules sont abordées ici les caractéristiques et la mise en place du limon et des matériaux concassés.

2.2.1 Le limon

a) *Caractéristiques géotechniques intrinsèques*

Ce matériau, dont la mise en place s'est effectuée au cours de la première recherche - mandat du 2 juillet 1976 -, a été étudié à cette époque. Ses principales caractéristiques intrinsèques sont rappelées dans le tableau 2.1 :

Granulométrie					Limites d'Att.			Proctor st.		Perm.
Ømax (mm)	60.0/2.0 (mm)	2.0/0.06 (mm)	0.06/0.002 (mm)	<0.002	W_L	W_P	I_P	$\gamma_{d_{opt}}$	w_{opt}	k
mm	%	%	%	%	%	%	%	$kN \cdot m^{-3}$	%	ms^{-1}
56	8	12	59	21	31.4	19.6	11.8	17.4	17.0	$1\text{-}4 \cdot 10^{-9}$

Tableau 2.1: Caractéristiques géotechniques in situ

b) *Caractéristiques géotechniques in situ*

Comme ce matériau a subi au cours des essais précédents plusieurs cycles de gel / dégel, les caractéristiques géotechniques de l'été du sol en place ont été de nouveau mesurées (cf. Annexes No 0-1, 2) et comparées à celles obtenues lors de la première recherche (tableau 2.2):

Mandat	Caractéristique mesurée		Nb de mes.	Moy.	Ecart type
02.07.1976	Cœfficient CBR	[%]	531	7.07	3.31
(1er essai)	Poids volumique γ (nucléomètre)	[kN·m^{-3}]	93	21.3	0.7
	Teneur en eau w (")	[%]	81	17.15	2.79
	Teneur en eau w (échantillon)	[%]	148	17.48	2.67
	Module de compressibilité M_{E1}	[kN·m^{-2}]	10	19500	6200
	" M_{E2}	["]	10	44500	33500
09.11.1986	Cœfficient CBR	[%]	28	6.74	2.6
(essai	Poids volumique γ (nucléomètre)	[kN·m^{-3}]	27	21.88	0.49
actuel)	Teneur en eau w (")	[%]	27	18.0	0.74
	Teneur en eau w (échantillon)	[%]	6	15.6	1.2
	Module de compressibilité M_{E1}	[kN·m^{-2}]	12	21337	4748
	" M_{E2}	["]	12	58818	15741

Tableau 2.2 : Caractéristiques géotechniques in situ

Commentaires :

- La comparaison des poids volumiques γ et teneur en eau w d'une recherche à l'autre est délicate; les valeurs mesurées lors du premier essai concernent l'ensemble du massif limoneux, tandis que celles mesurées lors du présent essai ne se rapporte qu'aux 30 cm supérieurs de la couche de limon.

  On remarquera simplement que les valeurs de γ et w (nucléomètre) sont du même ordre de grandeur.

- Les valeurs du coefficient CBR, mesurées dans les deux cas dans tout le massif, sont semblables. Il en est de même des valeurs des modules de compressibilité M_{E1} et M_{E2} mesurées sur la forme de l'infrastructure; la

légère augmentation obtenue dans le deuxième cas n'est pas suffisamment importante pour avoir une réelle signification.

En conclusion, les cycles de gel / dégel auxquels a été soumise l'infrastructure du modèle n'a pas eu une influence décelable sur ses caractéristiques géotechniques, au vu du nombre de mesures effectuées dans le massif.

2.2.2 Les matériaux concassés

Les essais réalisés sur ces matériaux constituant l'un des axes de la recherche, leurs description et résultat font l'objet d'un chapitre entier (Chap. 3). On s'y reportera donc.

2.3. APPAREILS DE CHARGE DU MODELE

Conformément aux études précédemment réalisées, le tronçon de route étudié a été soumis à deux types de chargement. Le premier, réalisé à l'aide du simulateur de trafic lourd (STL) développé par le LAVOC, a eu pour but de vieillir la chaussée.

Le deuxième, effectué au moyen d'un vérin hydraulique, a permis de simuler les sollicitations du trafic routier.

2.3.1 Simulateur de trafic lourd

Ce dispositif, mobile longitudinalement, est constitué d'un essieu de camion pouvant être animé d'un mouvement de va et vient transversalement à la fosse; il est susceptible de transmettre au modèle une charge de 10 à 100 kN [7].

2.3.2 Vérin hydraulique

Cet appareil permet d'appliquer à la surface du modèle, selon un axe longitudinal, une charge statique (inférieur ou égal à 500 kN) ou dynamique (inférieur ou égal à 300 kN à 3 Hz maximum) par l'intermédiaire de deux plaques circulaires de 30 cm de diamètre, sous chacune de laquelle est disposé un coussin de néoprène de 50 mm d'épaisseur [4], [6]. Il prend appui sur un cadre métallique pouvant être fixé en travers de la fosse en un nombre discret de points.

2.4. INSTRUMENTATION DU MODELE

Trois paramètres, selon six procédés différents, ont été mesurés. Il s'agit des déformations permanentes verticales - un dispositif à l'intérieur du massif, deux en surface -, des déformations élastiques - deux dispositifs en surface -, et de la température - un seul et même dispositif à l'intérieur du massif et en surface -. On trouvera à l'Annexe 0-7 le schéma de chaque instrument de mesure.

2.4.1 Mesure des températures

Celles-ci ont été effectuées par l'intermédiaire de thermomètres à résistance de platine PT100. Ils permettent de mesurer des températures de -220 à +550°C. Selon le constructeur, l'incertitude de mesure est de ± 0.4°C à ± 25°C et de ± 0.3°C à 0°C.

Chacun des trois champs est équipé de dix thermomètres, disposés selon un axe vertical (axes C, F et G) à des profondeurs variant entre ~ -200 cm (fond de la fosse) et de +150 cm (température de l'air).

Tous les thermomètres sont reliés à une centrale de mesures qui permet l'enregistrement des températures sur cassette magnétique selon un programme temporel prédéfini.

2.4.2 Déformations verticales permanentes

a) *Capteurs BISON*

Ces appareils, judicieusement placés à l'intérieur du massif, permettent de connaître les déformations du sol à chaque instant de mesure, lors du cycle de gel / dégel.

Le principe de mesure est le suivant : deux capteurs, solénoïdes cylindriques plats de 4" de diamètre et 0.64 cm d'épaisseur, sont disposés, face parallèles, sur un même axe à une distance "d" l'un de l'autre. Un courant d'excitation envoyé dans l'un de ceux-ci produit dans l'autre capteur un courant d'induction dont on mesure l'intensité. On établit une courbe d'étalonnage distance - courant induit qui permet de connaître, une fois les deux capteurs enterrés, la distance qui les sépare en mesurant le courant induit.

Les principales caractéristiques de ce dispositif sont les suivantes :

· Capteur :	diamètre 10.5 cm, épaisseur 0.64 cm
· Courant d'excitation :	fréquence = 20 kHz amplitude = 15 V pointe à pointe
· Sensibilité maximale :	0.1 % de déformation par Volt

Un calcul d'erreur a montré que l'incertitude de mesure (à ~ 20°C) était, tant que l'amplitude restait inférieure à 800, de l'ordre de 0.4 mm lors d'un écartement (gonflement) de deux capteurs consécutifs, respectivement de 0.5 mm lors d'un rapprochement (tassement). Les erreurs dues à un décentrement et une légère rotation (faces non parfaitement parallèles) ont été considérées comme négligeables (cf. Manuel BISON).

Dix à onze capteurs BISON ont été disposés sur un même axe vertical, à des intervalles variant entre 15 et 30 cm, le premier étant placé pratiquement en fond de fosse, le dernier à la surface du revêtement. Chaque champ comporte deux axes verticaux (Axes A et B, D et E, H et I) de mesure des déformations verticales internes.

Les lectures ont été faites manuellement, chaque couple de BISON étant mesuré l'un après l'autre.

b) *Nivellement*

L'appareil utilisé est un niveau compensateur NI007 de la Société Zeiss. Le repère de niveau choisi a été collé sur le mur Est de la Halle Fosses, à l'extérieur de la zone refroidie. La mire ordinaire, longue de 2.5 m, est graduée tous les dix centimètres.

L'erreur de mesure donné par le constructeur est de l'ordre de ± 2 à 3 mm par kilomètre de nivellement double, valeur négligeable comparée à celle due aux variations de température du mur portant le repère, estimée à 0.2 mm, et aux erreurs de lecture, d'autant plus grande que le point de nivellement est plus éloigné de l'appareil (ondes de froid devant l'optique du niveau) : ± 0.2 mm pour l'axe B, ± 0.4 mm pour l'axe E, ± 1 mm pour l'axe H.

L'appareil a été mis en place à l'extérieur de l'enceinte réfrigérée, un trou obturable ayant été aménagé dans l'isolation thermique pour l'accomplissement des mesures.

Un seul point par champ, à proximité immédiate d'un axe "BISON", a été nivelé (cf. Annexe 0-8).

Les lectures ont été exécutées manuellement.

c) *Comparateurs*

Les comparateurs utilisés sont de marque Compac (Genève); gradués au 1/100 de mm, ils permettent de mesurer des déformations pouvant atteindre 50 mm. Les comparateurs mesurant les déformations selon un même axe transversal sont fixés à une poutre en contre-plaqué, de dimensions 30 x 20 mm, posée sur les bords latéraux de la fosse.

L'incertitude de mesure, essentiellement due aux déformations du bois de la poutre, a été évalué grâce à un comparateur placé au droit de l'un des appuis de la poutre; on a ainsi observé un gonflement continu de l'appui de 4/100 mm par jour lors du premier essai.

Deux lignes de comparateurs ont été installées. La première court le long de l'axe transversal B du champ No 1, elle comporte douze comparateurs placés de part et d'autre de l'axe longitudinal, respectivement à 17, 23, 33, 49, 71 et 99 cm de celui-ci.

La deuxième ligne se compose de trois comparateurs placés sur l'axe transversal E à 17 et 200 cm à l'Ouest (Genève), respectivement à 200 cm à l'Est (Lausanne), de l'axe longitudinal (cf. Annexe No 0-8).

2.4.3 Déformations verticales élastiques

a) *Comparateurs*

La même instrumentation que celle décrite au paragraphe précédent a été utilisée.

Seuls n'ont été lus que les comparateurs qui montraient une variation de l'aiguille lors d'un cycle de charge-décharge. Cette opération s'est faite, comme ci-dessus, manuellement.

b) *Poutre Benkelmann*

L'instrumentation utilisé respecte en tous points la norme SN 670 362. Le palpeur de la poutre a été placé sur le champ No 1, à l'intersection de l'axe longitudinal de la fosse et de l'axe transversal B, entre les deux plaques d'appui du vérin.

L'enregistrement des mesures s'est effectué par l'intermédiaire d'un capteur situé à l'extrémité opposée au palpeur et relié à un enregistreur à jet d'encre.

c) *Mode de chargement*

Pendant toute la durée des essais, la chaussée au droit du vérin a été soumise à une charge dynamique de 40.8 kN à 0.5 Hz.La charge a été momentanément augmentée à 50 kN avec une période 2 min. pour pouvoir mesurer les déflexions conformément à la norme SN 670 362.

3. LES MATERIAUX CONCASSES

3.1. ESSAIS PRELIMINAIRES

3.1.1 Les matériaux

Deux types de matériau concassé ont été utilisé pour la construction de trois types de fondation :

1er type : grave 0-25 mm $w_{opt} = 3.6$ %
2e type : grave 0-60 mm $w_{opt} = 3.8$ %

Les teneurs en eau optimales sont données pour la granulométrie complète.

Ces graves concassées proviennent de la gravière "Hartschotterwerk" à Mühlehorn, comme celles utilisées dans le manège de Dübendorf; elles ont la même granulométrie que ces dernières.

Les trois types de fondations mis en oeuvre sont les suivants :

Champ No 1 : 300 mm de grave concassée 0-60 mm
Champ No 2 : 250 mm de grave concassée 0-60 mm
Champ No 3 : 250 mm de grave concassée 0-25 mm

3.1.2 Mode de compactage

Deux compacteurs ont été utilisés, soit :

- Une plaque vibrante IERNIGER 12 CV, 65 cm de large, 800 kg, 6 tonnes dynamiques.

- Un rouleau à pneus statiques RW 140, 12 tonnes.

Le compactage a été réalisé en trois étapes :

Première étape : 6 passages de plaque vibrante
Deuxième étape : 24 passages de plaque vibrante
Troisième étape : 100 passages de rouleau à pneus

3.1.3 Portance de la fondation après compactage

Le contrôle de la portance après chaque étape de compactage a été réalisé par des essais M_E rapide. La teneur en eau a été régulièrement contrôlée pendant toute les opérations de compactage de façon à ce qu'elle avoisine toujours l'optimum Proctor.

Les résultats des essais M_E sont résumés dans le tableau 3.1:

Etape de compactage	Champ	Epaisseur [mm]	Matériau	Module M_E [kNm^{-2}]
1er étape	1	300	grave 0-60 mm	50800 ± 5700
	2	250	grave 0-60 mm	48000 ± 8100
	3	250	grave 0-25 mm	53300 ± 7400
2ième étape	1	300	grave 0-60 mm	49900 ± 930
	2	250	grave 0-60 mm	53200 ± 2020
	3	250	grave 0-25 mm	53000 ± 9100
3ième étape	1	300	grave 0-60 mm	53770 ± 5690
	2	250	grave 0-60 mm	50430 ± 16820
	3	250	grave 0-25 mm	48980 ± 18000

Tableau 3.1 : Résultats des essais M_E sur grave concassée

3.1.4 Conclusions

Les valeurs de la portance des trois types de fondation en matériaux concassés sont nettement inférieures aux valeurs prescrites par les normes. Elles sont mêmes plus faibles que celles obtenues en 1976, lors de la série d'essais sur les fondations en grave I roulée, d'une épaisseur variant entre 300 et 500 mm. Ces valeurs sont reportées au tableau 3.2 :

Epaisseur [mm]	Module M_E lent [$kN \cdot m^{-2}$]	Module M_E rapide [$kN \cdot m^{-2}$]
300	64000 ± 6700	62000 ± 11500
400	74500 ± 5900	63500 ± 12200
500	79000	75500 ± 8500

Tableau 3.2: Résultats des essais M_E sur grave roulée (1976)

Une grave concassée a théoriquement une portance supérieure à celle d'une grave roulée; cependant, pour obtenir cette portance, il faut pouvoir compacter

la grave concassée avec une plus grande énergie que pour une grave roulée afin de vaincre les frottements internes élevés que présente un tel matériau : cette opération n'est pas réalisable pour des couches de grave de 250 à 300 mm d'épaisseur mises en place sur une infrastructure dont le CBR est de ≈ 7% . Autrement dit, à épaisseur et à énergie de compactage égales et pour une faible portance de l'infrastructure, une grave concassée aura une portance inférieure à celle d'une grave roulée.

3.2. MATERIAUX DU MODELE

3.2.1 Caractéristiques géotechniques

Les matériaux concassés retenus pour la couche de fondation du modèle sont la grave I, de granulométrie 0-60 mm, de la gravière de Mühlehorn-Quinten.

Les essais d'identification suivants ont été exécutés sur ce matériau en vrac :

- Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie
- Teneur en eau w et poids volumique des grains γ
- Essai Proctor standard, compte tenu de la correction due à la fraction grossière

Les résultats de ces essais sont portés dans le tableau 3.3 :

Granulométrie					Caractérist. d'état		Proctor st.	
Ømax (mm)	60.0/2.0 (mm)	2.0/0.06 (mm)	0.06/0.002 (mm)	<0.002 (mm)	γ	w	$\gamma_{d_{opt}}$	w_{opt}
mm	%	%	%	%	$kN \cdot m^{-3}$	%	$kN \cdot m^{-3}$	%
60	86	12	2	0	18.05	.94	21.55	5.1

Tableau 3.3 : Résultats essais géotechniques sur grave concassée

3.2.2 Mise en oeuvre

Le mise en place des matériaux s'est effectuée en deux couches de 15 cm chacune; chaque couche, humidifiée de façon à ce que leur teneur en eau soit celle de l'optimum Proctor, a été compactée par un rouleau vibrant de 2 tonnes de type Amman DTV 213.

Une vingtaine de passes ont été effectuées sur chaque surface.

La teneur en eau w et le poids volumique apparent γ de chaque couche ont été contrôlés au nucléomètre et, à la fin du compactage, six essais de plaque rapide ont été exécutés sur la surface.

Comme les résultats de ces derniers paraissaient faibles, un deuxième compactage a été réalisé au moyen d'un compacteur à pneus de 14 tonnes. Une nouvelle série de mesure de contrôle a été ensuite effectuée.

Le tableau 3.4 récapitule l'ensemble de ces mesures (résultats détaillés aux annexes No 0-3 à 6) :

	Teneur en eau * w [%]			Poids volumique apparent * γ [kN·m^3]			Module de compressibilité M_E [kN·m^2]		
Couche testée	Nb de mes.	Moy.	Ecart type	Nb de mes.	Moy.	Ecart type	Nb de mes.	Moy.	Ecart type
I Couche inférieure, e=15 cm	9	5.0	0.7	9	21.0	0.86	-	-	-
II Couche complète, e=30 cm rouleau vibrant 2t	6	3.9	0.6	6	21.6	0.4	6 (M_{E1}) 6 (M_{E2})	40800 115000	11400 30000
III Couche complète, e=30 cm rouleau à pneus 14t	8	4.1 **	0.46	8	21.0	0.4	6 (M_{E1}) 6 (M_{E2})	42100 116900	7200 31600
IV Essais préliminaires : e=30 cm, 24 passages de plaque vibrante 0.8 t							(M_{E1})	49900	930
V Essais préliminaires : e=30 cm, 100 passages de rouleau à pneus 12t							(M_{E1})	53770	5690
VI Essais de 1976, e=30 cm grave roulée 0-60 mm rouleau à pneus							4 (M_{E1})	62000	11500

* Valeurs mesurées au nucléomètre

** Le volume d'eau nécessaire à augmenter la teneur en eau de 1% a été rajouté entre le compactage au rouleau vibrant et le compactage au rouleau à pneus.

Tableau 3.4 : Récapitulation des mesures de teneurs en eau, poids volumiques et modules M_E

Commentaires :

Pour le présent essai :

- Les valeurs du module de compressibilité M_E sont faibles et du même ordre de grandeur, quels que soient les modes de compactage utilisés (engin, nombre de passes).

- Un compactage par rouleau à pneus donne des résultats à priori légèrement meilleurs que ceux obtenus par rouleau à plaque vibrante (3 à 8 %), cette très faible amélioration reste cependant insuffisante pour choisir celui-ci plutôt que celui-là.

- L'examen spatial (cf. Annexes No 0-3 à 6) des résultats montre que les valeurs obtenues sur le champ No 1 sont plus basses d'environ 21 à 27 % par rapport à la moyenne pour chacun des deux compactages (II et III). La présence du géotextile, relativement épais, est l'hypothèse qui vient immédiatement à l'esprit pour expliquer cette tendance : c'est le seul paramètre fondamental qui différencie le champ No 1 des autres champs.

En comparaison avec les résultats précédents :

- Bien que les caractéristiques géotechniques de l'infrastructure soient les mêmes que celles existantes lors de la première recherche (juillet 1976), les valeurs du module de compressibilité M_E obtenues sur la couche de fondation réalisée en grave roulée sont dans l'ensemble supérieur de 30 % à celles obtenues avec la grave concassée.

En résumé, la couche de fondation en grave concassée n'a pu être compactée conformément à la norme SNV 670 585a ($M_E \geq 80'000$ kNm^{-2}) bien que plusieurs modes de compactage aient été mis en oeuvre. Les valeurs de M_E restent en outre plus faibles que celles obtenues avec une couche de fondation en grave roulée. Deux raisons principales peuvent être avancées (cf. paragraphe 3.1.4) :

- d'une part, la faible portance (voulue) de limon qui rend l'infrastructure incapable de fournir un bon appui,

- d'autre part, l'absorption par la couche de limon de l'énergie supplémentaire qu'il faut fournir à une grave concassée par rapport à une grave roulée pour vaincre les frottements intergranulaires plus élevés dans celle-là que dans celle-ci.

Un autre paramètre semble diminuer la compactibilité de la couche de fondation; il s'agit du géotextile sous-jacent à cette couche qui pourrait bien absorber une partie de l'énergie de compactage. Là encore, les résultats sont trop peu nombreux pour que l'expérience ait valeur de démonstration.

4. INFLUENCE DU DRAINAGE SUR LA FORCE PORTANTE D'UNE CHAUSSEE LORS D'UN CYCLE DE GEL-DEGEL

4.1. INTRODUCTION

Des résultats des recherches précédemment entreprises sur la force portante d'une chaussée lors de cycle de gel-dégel, il était apparu qu'une corrélation étroite entre vitesse d'élimination de l'eau et perte de portance semblait exister. L'idée de la mise en place - aisée - d'une couche drainante au contact du sol gélif, c'est-à-dire sur la forme de l'infrastructure est naturellement venue à l'esprit. Restait à savoir si un telle couche avait ou non une réelle efficacité sur la force portante d'une chaussée lors de cycles de gel-dégel.

Les deux essais entrepris sur le champ No 1 (drainé par un géotextile perméable dans son plan) avait pour but essentiel de répondre à cette question. Plus précisément, il s'agissait de savoir si un drainage pouvait réellement faciliter l'évacuation de l'eau provenant des lentilles de glace, dans quelles conditions, quelle quantité d'eau il était possible de drainer et selon quel débit et quel impact sur la portance pouvait-on escompter (suppression du poinçonnement, diminution du tassement résiduel, retour à la portance initiale plus rapide, etc.).

Ces deux essais ne diffèrent l'un de l'autre que par les conditions de dégel : la vitesse de dégel a été beaucoup plus élevée lors de l'essai No 2 que lors de l'essai No 1.

4.2. CONDITIONS THERMIQUES

Pendant toute la durée des essais, la température en fond de fosse (-2.0 m) a été fixée et maintenue à 4°C.

Pendant la période de gel des deux essais, la température de l'air a été brutalement abaissée de 20°C environ (température ambiante) à -20°C, valeur maintenue pendant quelques jours puis remontée par palier de 5°C jusqu'à -5°C de façon à conserver le front de gel à une profondeur pratiquement constante.

Pendant la période de dégel, qui a débuté dès que le gonflement avait atteint ou légèrement dépassé 4 cm, la température de l'air a été remontée à plus 5°C lors du premier essai, respectivement à quelques 23°C (température de l'air ambiant) lors du deuxième essai.

L'arrêt de chacun des essais est intervenu peu après que le dégel de l'infra- et de la superstructure routière se fut entièrement produit.

4.3. MODE DE CHARGEMENT DE LA CHAUSSEE

Avant que ne commencent les essais, la chaussée nouvellement réalisée a été vieillie artificiellement au moyen du simulateur de trafic lourd (cf. § 2.3.1) : 800 passages de l'essieu chargé à 80 kN ont été effectués sur toute la surface du modèle.

Pendant chacun des essais, la chaussée a été soumise, dans le champ 1, à l'intersection de l'axe longitudinal de la fosse et de l'axe transversal B, à une charge dynamique de 40.8 kN, fréquence 0.5 Hz, exercé par le vérin hydraulique (cf. § 2.3.2).

Ce mode de chargement, qui est le même que celui mis en oeuvre lors des précédentes recherches, simule approximativement un convoi ininterrompu de camions à deux essieux chargés, roulant à environ 60 km/h, distant les uns des autres de 60 m; il correspond à un trafic d'à peu près 43'000 essieux de 81.6 kN par jour.

4.4. PERIODICITE DE LECTURE DES MESURES

Le tableau 4.1 indique la période de lecture de chaque instrument. Des incidents, en général techniques, n'ont pas toujours permis de respecter les valeurs tabulées.

Instrument	Période prévue	
	Essai N° 1	Essai N° 2
Thermomètre PT100	2 h	2 h
Capteur Bison Axe B, du 1er au 31e jour d'essai	2 j	-
Capteur Bison Axe B, du 32e au dernier jour d'essai	4 j	-
Capteur Bison Axes A, D, E	8 j	-
Nivellement	1 j	1 j
Comparateur *	1 j	1 j
Poutre Benkelman *	1 j	1 j

Tableau 4.1 : Période de lecture de chaque instrument

* Lecture des déformations élastiques interrompue dès que les valeurs étaient inférieures à 1/100 mm.

4.5. RESULTATS DES ESSAIS

Aux fins d'interprétation ultérieure des résultats des essais avec ceux obtenus lors des recherches précédentes, l'ensemble des mesures effectuées a été exploité graphiquement selon la méthodologie précédemment adoptée (Tableau 4.2).

Type de courbes	Essai No		Annexes No	
Isothermes 0, 1 et -1 o C	1	Ch.1,2	1-	1 et 2,3 et 4
	2	"	2-	1 et 2,3 et 4
Températures de chaque PT100	1	"	1-	5,6
en fonction du temps	2	"	2-	5,6
Températures en fonction de la profondeur	1	"	1-	7 à 9, 10 à 12
à un instant donné (Tautochrones)	2	"	2-	7 à 9, 10 à 12
Déformations permanentes à la surface du modèle :				
- en un même point, selon	1	"	1-	13,14
différents procédés	2		-	-
- en 2 points distincts de l'axe				
longitudinal, selon 2 procédés	1		1-	15
différents	2		2-	13
- en 3 points distincts de l'axe				
longitudinal, selon un même	1		1-	16
procédé	2		-	-
Déformations permanentes cumulées en	1	Ch.1	1-	17 à 19,
fonction de la profondeur		Ch. 2	1-	20 à 23,
		Ch. 3	1-	24 et 25
Déformations élastiques verticales	1	Ch. 1	1-	26
	2	Ch. 1	2-	14
Quantité d'eau drainée *	2	Ch. 1	2-	15

Tableau 4.2 : Références aux annexes

* Aucune eau n'a été drainée pendant l'essai N° 1

Après la fin de chaque essai, une saignée de 0.6 m de largeur et de 0.4 m de profondeur (soit jusqu'au niveau supérieur de la couche de limon) a été exécutée dans le champ 1 dans le but de contrôler le système de drainage, de prélever des échantillons dans l'infrastructure et de préciser ainsi certaines de ses caractéristiques géotechniques, dont la valeur est donnée dans le tableau 4.3 .

Essai N° 1								Essai N° 2				
Sondage N°	Prof. m	γ_s $kN \cdot m^{-3}$	γ $kN \cdot m^{-3}$	w %	Sr %	$k_{œd}$ $m \cdot s^{-1}$	k_{perm} $m \cdot s^{-1}$	Sondage N°	Prof. m	γ $kN \cdot m^{-3}$	w %	Sr %
Carrotier	≈.30		21.03			0.7·10-9	2.5·10-6	Carrotier	≈.30	19.33	15.95	73.1
1								1	≈.45	19.55	17.03	78.4
	≈.60	27.03	20.42			0.5·10-9	"		≈.60	18.77	18.31	73.8
	≈.30	27.03	21.48			1.1·10-9	5·10-8		≈.30	19.97	18.67	87.7
2								2	≈.45	19.14	18.53	78.1
	≈.60	27.09	20.15			0.5·10-9	"		≈.60	17.76	19.28	66.8
	≈.30		20.96	16.2	93.5				≈.30	19.96	16.44	81.3
3	≈.45		20.94	17.9	98.3			3	≈.45	19.71	18.27	81.4
	≈.60		20.56	19.2	96.5				≈.60	19.51	18.76	82.7
Manuel	≈.35		13.4									
	≈.45		13.7									
Bord fosse	≈.55		14.9									
	≈.65		13.5									
	≈.75		14.3									
	≈.35		13.2									
	≈.45		14.9									
Centre fosse	≈.55		14.7									
	≈.65		15.9									
	≈.75		14.4									

Tableau 4.3 Caractéristiques géotechniques des prélévements dans les saignées de reconnaissance

4.6. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS DES ESSAIS

L'allure générale des courbes obtenues est, pour les paramètres communs aux trois recherches jusqu'à présent entreprises, semblable à celle des courbes résultant des essais précédemment réalisés : léger tassement ou absence de gonflement au début de la période de gel, gonflement à vitesse plus ou moins décroissante ensuite, tassement ou gonflement résiduel en fin de dégel selon que la chaussée est ou non chargée; pénétration graduelle de l'isotherme 0°C jusqu'à une certaine profondeur puis stabilisation, léger tassement des sols en dessous de la zone gelée en cours de gel, remontée de la branche inférieure et descente simultanée de la branche supérieure de l'isotherme 0°C lors du dégel.

En examinant plus en détail chacune des courbes et en les comparant entre elles, certaines informations relatives aux incertitudes de mesures, à la période de gel, à la période de dégel et à l'eau drainée ont pu être précisées :

Incertitudes de mesures

. Au début de la période de gel, les valeurs mesurées aux comparateurs indiquent un léger gonflement - ou un moindre tassement - par rapport à celles mesurées avec le niveau; cette situation pourrait peut-être avoir pour origine la prépondérance du phénomène de retrait (bois et béton) dû à un abaissement de température (environ 40°C) sur le phénomène de gonflement dû aux déformations du bois de la poutre.

. Après quelques jours de gel et pour toute la période de gel, la courbe des gonflements mesurés par les comparateurs est systématiquement située sous celle des gonflements mesurés au niveau. Cette observation est confirmée par l'incertitude de mesures estimée (cf. § 2.4.2.c), qui donne un gonflement des appuis de la poutre de 0.04 mm par jour, soit une sous-estimation du gonflement réel de la chaussée.

. La situation est semblable pendant la période de dégel de l'essai No 1.
Par contre, pendant la période de dégel de l'essai No 2, la situation est inversée, c'est à dire que la courbe des gonflements mesurés par les comparateurs passe au dessus de celle des gonflements mesurés au niveau. La vitesse de tassement obtenue par la "courbe des comparateurs" est ainsi légèrement plus faible que celle obtenue par la "courbe des nivellements".
Le tassement de l'appui mesuré pendant cette période (0.2 mm environ) et les incertitudes de mesures estimées - comparateurs et nivellement - ne peuvent expliquer à eux seuls cette situation. Il sortirait du cadre du présent mandat d'expliquer ce phénomène; l'essentiel est que les valeurs mesurées soit du même ordre de grandeur.

. La courbe des gonflements/tassements obtenue par les BISON coïncide étonnamment bien avec les courbes obtenues par les autres procédés de mesures, bien que ce procédé de mesure soit à priori moins précis. Une

pose correcte associée à un écartement des cellules en général faible permet d'expliquer ce bon résultat.

Période de gel

. Pendant les premiers jours de gel, on observe un très léger tassement de la chaussée au droit de la charge (champ 1), tandis qu'aucune déformation n'est décelable dans la zone non-chargée (champ 2).

. Le gonflement de la chaussée débute peu après que l'isotherme 0°C ait pénétré dans le limon d'infrastructure.

. La vitesse de gonflement est d'abord élevée (de 2 à 3 mm.jour^{-1}) puis décroît continûment dans certains cas (essai No 1, champ 2, V_g = 0.35 à 0.15 mm.jour^{-1}), ou décroît et se stabilise à une valeur constante dans d'autres cas (essai No 1, Champ No 1, V_g = 0.41 mmjour^{-1}; essai No 2, champ No 1, V_g = 0.60 mm.jour^{-1}; essai No 2, champ No 2, V_g = 0.47 mm.jour^{-1}.

. Le gonflement continue encore quelques jours (deux à trois jours) après le début du dégel.

. La vitesse de pénétration de l'isotherme de 0°C, élevée dans la grave (10 à 13 mm.jour^{-1}), diminue dès que l'isotherme arrive à la couche de limon; elle décroît progressivement au cours du déroulement de l'essai, jusqu'à atteindre une valeur relativement faible (0.12 à 0.33 mm.jour^{-1}), voire nulle (essai No 1), à la fin de la période de gel.

. La profondeur de pénétration de l'isotherme de 0°C varie de 70 cm (champ 1, essai No 2) à 80 cm (champ 1, essai No 1) , respectivement à 84 cm (champ No 2, essai No 2).

Remarque : Les défaillances du système de refroidissement ont donné naissance à un "marais thermique" au droit du champ No 2 lors de l'essai No 1, dont l'interprétation est sujette à caution.

Période de dégel

. La vitesse de dégonflement varie d'une façon monotone croissante dans le champ No 1 de l'essai No 1 (entre 0.68 et 4.6 mm.jour^{-1}), elle est sensiblement constante dans les autres cas (essai No 1, champ No 2, Vd = 2.15 mm.jour^{-1}; essai No 2, champs No 1 et 2, Vd = 4.6 mm.jour)$^{-1}$.

. Cette vitesse de dégonflement diminue dès que l'isotherme de 0°C s'est refermée.

. Le dégonflement cesse peu après que l'isotherme de 0°C se soit refermée. Ce laps de temps est d'environ un jour et demi pour l'essai No 1; pour l'essai No 2, il n'a pu être déterminé du fait d'une panne du système d'enregistrement des températures.

. A la fin de la période de dégel, on observe un tassement résiduel dans le champ No 1, de 6 mm lors de l'essai No 1, de 3.5 mm lors de l'essai No 2, et un gonflement résiduel dans le champ No 2, de 5 mm lors de l'essai No 1, de 1 mm environ lors de l'essai No 2.

. Dès le début de la période de dégel, la branche inférieure de l'isotherme de 0°C remonte très progressivement et très lentement vers le haut, tandis que la branche supérieure pénètre rapidement dans la grave pour descendre graduellement dans la couche de limon à une vitesse plus ou moins grande selon l'essai (vitesse faible lors de l'essai No 1, moyenne lors de l'essai No 2).

Eau drainée (principal paramètre de la présente recherche)

. La quantité d'eau drainée est nulle lors de l'essai No 1.

. Elle est de 2.55 l pour le drainage situé à l'Ouest (Genève) et de 3.8 l à l'Est (Lausanne) pour l'essai No 2.

. Le débit maximum a été atteint 4 jours après le début du dégel pour le drainage Ouest (9.5 ·10-2 $l.h^{-1}$), soit au début de la pénétration de la branche supérieure de l'isotherme 0°C dans la couche de limon, et 7 jours après le début du dégel pour le drainage Est (5.5·10-2 $l.h^{-1}$), soit lorsque supérieure de l'isotherme 0°C avait pénétré de 25 cm dans la couche de limon.

. Après 9 jours de dégel, soit lorsque la branche supérieure de l'isotherme de 0°C avait pénétré de 30 cm, les quantités d'eau récoltées sont restées nulles.

Quant aux caractéristiques du limon d'infrastructure après essais (cf tableau 4.3), elles peuvent être commentées comme suit :

. La valeur de la teneur en eau mesurée sur les échantillons prélevés à la main est de quelques pourcents plus faible que celle mesurée sur les échantillons prélevés au carottier.

. Dans tous les cas, elle a tendance à augmenter avec la profondeur.

. Les valeurs sont très voisines d'un essai à l'autre, mais aussi de celles mesurées avant essais.

. La valeur des poids volumiques apparent et sec décroît légèrement avec la profondeur.

. Elle a tendance à diminuer après chaque essai (d'environ 1 $kN.m^{-3}$ à chaque cycle de gel-dégel).

. Les valeurs de la perméabilité mesurées sont du même ordre de grandeur que celles obtenues lors des précédentes recherches.

. La valeur du degré de saturation a légèrement diminué de l'essai No 1 à l'essai No 2.

. La valeur du coefficient CBR a diminué de 30 % environ après l'exécution des deux cycles de gel-dégel.

4.7. INTERPRETATION DES RESULTATS

Bien que la présente recherche ait pour objet l'influence du drainage sur la portance des chaussées lors de cycles de gel-dégel, il a paru judicieux, avant d'aborder ce sujet, d'esquisser quelques comparaisons entre les résultats obtenus lors des précédentes recherches et ceux obtenus ici.

4.7.1 Comparaison présents résultats / résultats recherches antérieures

Le chapitre 5 "Perte de portance au dégel" de [6] synthétise les résultats les plus importants des recherches antérieures. En complétant le tableau 5.1 "Principales données et résultats des essais" (tableau 4.4 du présent rapport) et les figures 5.8 "Résistance de la superstructure en fonction du gonflement" et 5.9 "Rôle de la vitesse du dégel" de ce chapitre, quelques éléments nouveaux apparaissent.

Mandat	Essai N°	Champ N°	Epaisseur grave mm	Durée du gel jour	FI air °C·jour	Profond. max. gel 1) m	Gonflem. max. 1) mm	Tempér. à - 2.0 m °C	Vitess. de dégonf. mm·jour^{-1}	Défléx. max. à 40.8 kN, 0.5 Hz mm/100	Défléx. max. à 50 kN, 2 mn mm/100	Poinçon.	Tassem. résiduel 1) mm
Juillet 1976	1	2	400	37	376	.96	29	7	3.2	60	104	oui	-
		3	300	14	176	.53	15	7	2.8	42	-	non	2.8
	2	3	300	34	345	.80	27	7	4.3	54	-	oui	-
	3	1	500	47	553	1.28	42	4	1.9	36	50	non	2.0
Nov.1984 (actuel)	1	1	300	66.5	536	.80	41	4	2.4	(15) 2)	35	non	6.0
		2	300	66.5	484	1.2 à 1.3	31	1 à4	2.0	-	-	-	-
	2	1	300	70	658	1.0	47	4	4.6	20	(30) 2)	non	3.4
		2	300	70	577	1.16	40	4	4.6	-	-	-	-

1) Au milieu de l'axe B, respectivement E et H
Niveau ±0.0 = bord de la fosse

2) Valeurs calculées

Tableau 4.4 : Principales données et résultats des essais

Les conditions d'essais réalisés auparavant sont notablement différentes de celles des essais exécutés lors du présent mandat; seul l'essai No 3 entrepris sur le champ No 1, qui se rapproche le plus - quant aux conditions et aux résultats - de ceux réalisés lors de la recherche actuelle, peut se prêter à une comparaison. Quelques différences notables toutefois :

a) L'épaisseur de la couche de limon gelé atteignait 0.78 m alors qu'elle n'est plus que de 0.40 à 0.50 m.

b) Les tassements résiduels étaient de 2.0 mm auparavant, ils sont de 3.4 à 6 mm maintenant.

c) En fin de dégel, les déflexions élastiques étaient plus fortes (36 à 50 1/100 mm) lors de la recherche antérieure, les valeurs obtenues actuellement oscillent entre 20 et 35 1/100 mm.

d) La durée de gel était précédemment de 47 jours alors qu'elle est actuellement de 66.5 à 70 jours.

Comme les indices de gel FI sont semblables, les points a) et d) signifient que les basses températures ont régné plus longtemps lors des essais précédents que lors des récents essais.

Quant aux tassements résiduels et aux déflexions élastiques, les écarts proviennent entre autres de la différence d'épaisseur et de type de matériaux utilisés pour la superstructure : 50 cm de grave roulée pour le champ No 1 de l'essai No 3, 30 cm de grave concassée pour le champ No 1 des essais actuels. D'autres raisons ne sont pas à exclure.

Finalement, les essais actuels s'inscrivent en continuité de ceux déjà réalisés et leurs résultats peuvent être interprétés sur les mêmes bases.

L'examen de la figure 4.1 ci-contre confirme l'idée, déjà avancée dans [6], que le gonflement n'est pas un critère suffisant pour exprimer la perte de portance au dégel. Les résultats de la recherche nouvellement réalisée sont largement dans la zone dite "Poinçonnement" alors que la chaussée n'a aucunement poinçonné durant les essais.

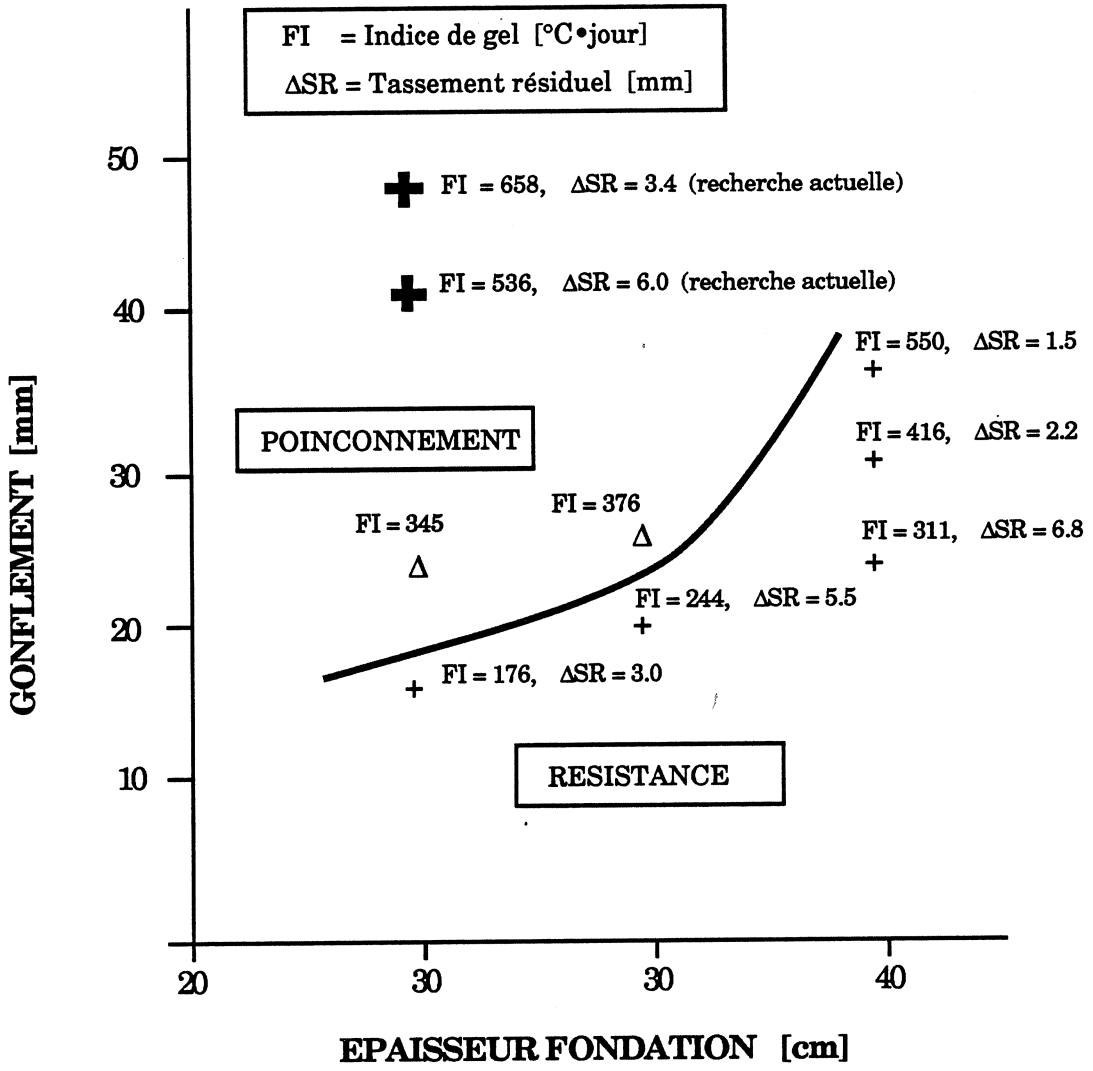


Figure 4.1 : Résistance de la superstructure en fonction du gonflement

Les nouveaux résultats reportés sur le diagramme "Déformations permanentes / Vitesses de dégonflement" de la figure 4.2 sont beaucoup plus intéressants.

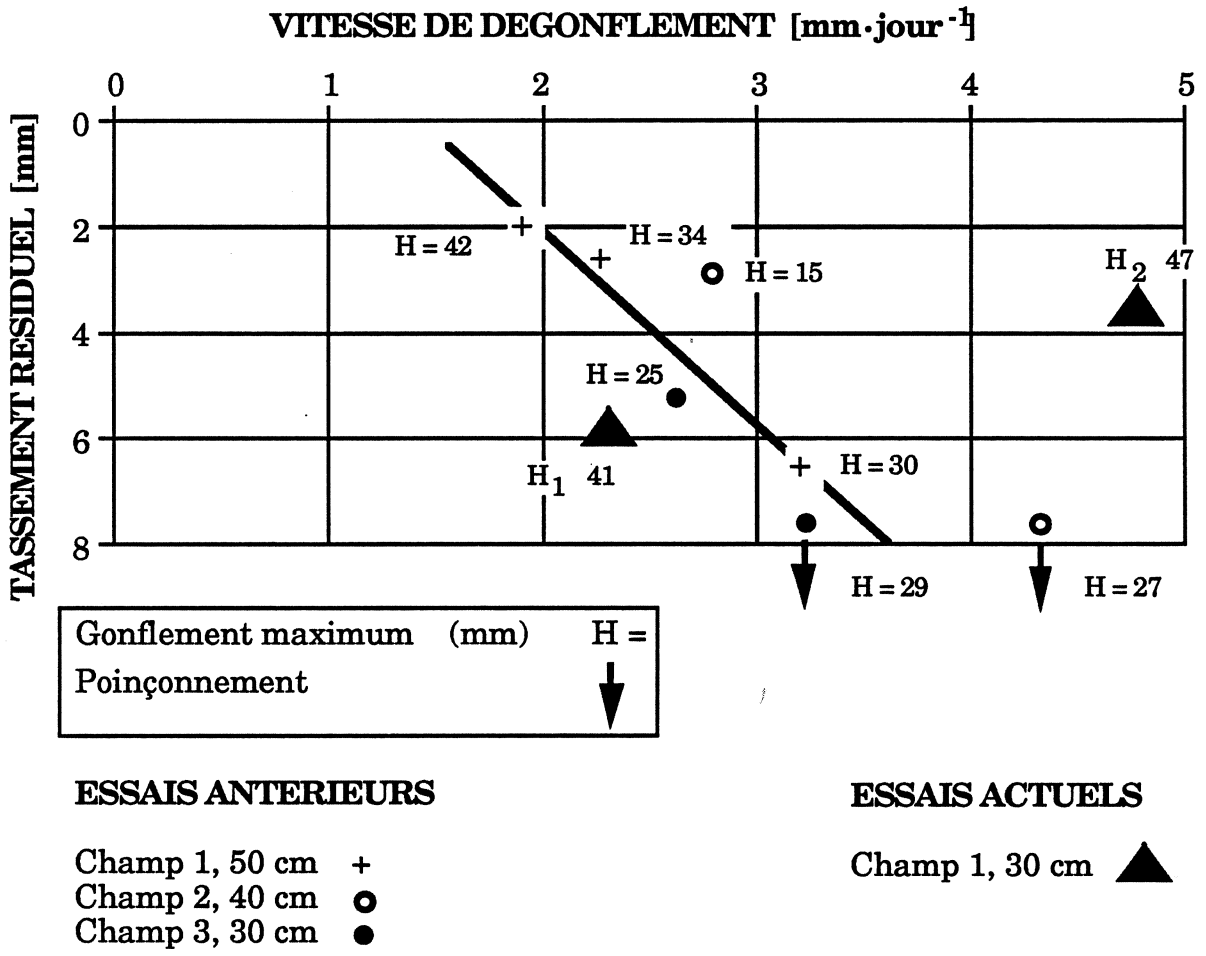


Figure 4.2 : Rôle de la vitesse de dégel

Tandis que le point H_1 est situé dans la même zone que les points précédemment obtenus, le point H_2 est , lui, fortement éloigné de cette zone : malgré un gonflement important, une vitesse de dégonflement élevée et une épaisseur de superstructure faible en comparaison des autres, la déformation permanente sous charge après dégel reste étonnamment faible (3.4 mm).
Les deux points H = 27 mm et H = 29 mm, dont les vitesses de dégonflement sont les plus élevées après le point H_2, correspondent tous les deux à un poinçonnement de la chaussée.

Ce résultat pourrait suggérer l'idée que le drainage a une influence déterminante sur la portance de la chaussée lors du dégel. La réalité de cette influence sera examinée plus en détail au paragraphe 4.7.3.

4.7.2 Influence de la membrane étanche

Une membrane étanche a été placée sur les champs No 1 et No 2 lors de la construction du modèle entre le limon de l'infrastructure et la grave concassée de la superstructure de façon à ce que le drainage ne récolte que l'eau provenant du limon d'infrastructure.

En analysant les courbes de variation du gonflement / tassement en fonction de la profondeur (cf. annexe No 1-17 à 23), il est apparu que le phénomène de léger gonflement à l'interface fondation / revêtement observé systématiquement lors des précédentes séries d'essais ne s'est produit lors de l'essai No 1, ni dans les champs No 1 et 2, ni dans le champ No 3 qui, contrairement aux deux autres champs, ne comporte aucun écran étanche entre la couche de limon et la couche de grave concassée.

Les essais qui font l'objet de ce rapport n'avaient pas pour but l'étude de ce phénomène constaté lors des précédentes séries d'essai; il est cependant intéressant de tenter d'analyser ce comportement différent des essais précédents.
Sur les champs 1 et 2, l'étanchéité au gaz de la membrane peut expliquer cette absence de gonflement à l'interface fondation / revêtement. Quant au champ 3, qui était dépourvu d'une membrane étanche, cette absence de gonflement ne peut s'expliquer que par une perméabilité du revêtement du présent modèle plus élevée que celle des modèles précédents ou par l'incertitudes de mesures : le calcul d'incertitude a montré que, pour une distance des cellules Bison de 20 cm environ, l'incertitude de mesure restait inférieure à 0.4 mm.

4.7.3 Influence du drainage sur la forme de l'infrastructure

a) Analyse des résultats

Au cours des deux essais entrepris, seul le champ No 1 a été équipé d'un dispositif de drainage, constitué d'un géotextile de type Filtram 1B1 de 5 mm d'épaisseur placé à l'interface couche de limon / couche de grave concassée. Deux drains latéraux faisaient office d'exutoire.

Lors de la longue période de dégel de l'essai No 1, aucune eau n'a été récoltée.

Lors de la brève période de dégel de l'essai No 2, un peu d'eau a été drainée : 2.55 l pour le drainage Ouest (Genève), 3.8 l pour le drainage Est (Lausanne), soit au total 6.35 l. En considérant la saturation de la couche drainante on peut admettre à quelque 10 litres le volume d'eau drainé par le géotextile. Compte tenu du gonflement maximum observé sur ce champ (47 mm à l'axe longitudinal), soit, en tenant compte du gonflement plus faible sur les bords de la fosse, un volume des lentilles de glace de quelque 600 litres, cette quantité est très faible.

L'examen de la courbe des débits en fonction du temps (annexe No 2-15) montre que la première goutte d'eau a été récoltée 3 jours après le début du dégel et la

dernière 9 jours après et fait apparaître un décalage temporel entre le drainage Est et le drainage Ouest, le débit maximum étant atteint plus tôt à l'Ouest.

Par ailleurs, l'analyse des résultats du dégonflement de la chaussée selon l'axe B, comparateur par comparateur, montre que la chaussée côté Ouest commence à dégonfler entre le 2e et le 3e jour de dégel, tandis que ce même processus ne s'observe qu'un jour plus tard côté Est. Plus précisément, le phénomène de dégonflement est d'autant plus marqué que le point observé est situé plus à l'Ouest.

Cette dissymétrie transversale s'explique par le fait que la zone d'air refroidi couvre non seulement les champs No 1, 2 et 3, mais aussi une frange de 2 à 3 mètres de large à l'Est de la fosse; les matériaux autour de la fosse y sont donc plus froids qu'à l'Ouest et le temps de réchauffement plus élevé.

Ainsi, le débit maximum à l'Ouest est atteint dans le courant du 4e jour de dégel, environ deux jours après le début du dégonflement Ouest, qui est d'environ 4 mm; l'isotherme 0°C au milieu de l'axe B, commence seulement de pénétrer dans le limon, il doit être légèrement plus profond à l'Ouest. A l'Est, le débit maximum s'est produit au plus tard le 7e jour de dégel, soit au plus trois jours après le début du dégonflement Est; l'isotherme 0°C au milieu de l'axe B a alors pénétré de 8 cm dans la couche de limon, il doit donc être moins profond à l'Est.

Dès le 9e jour de dégel, à un moment où environ la moitié du dégonflement s'est produit (milieu de l'axe B), plus aucune eau n'est recueillie. L'isotherme 0°C a alors pénétré d'environ 22 cm dans la couche de limon. L'épaisseur de la zone gelée est d'à peu près 50 cm.

Il semble donc que le drainage de la forme de l'infrastructure n'a permis de récolter l'eau provenant du dégel que sur les premiers centimètres de la couche de limon. Au moment où l'essentiel des 2.55 l d'eau dégelée avait été récoltée par le drainage Ouest, 4 mm de dégonflement s'étaient produits.

Le drainage mis en place dans le champ No 1 est-il réellement si peu efficace ? D'autant que, comme mentionné au paragraphe 4.7.1, le tassement résiduel mesuré à la fin de la période de dégel est étonnamment faible (3.4 mm); comparé au point H = 29 mm et H = 27 mm de la figure 4.2 , un poinçonnement de la chaussée eût été dans l'ordre des choses. Le géotextile drainant paraît ainsi jouer un rôle favorable mais d'une façon qu'il est difficile d'expliquer par son seul effet de drainage; l'armature constituée par le géotextile, qui était composé de deux couches de non-tissé entourant un geogrid, a certainement joué un rôle favorable sur la portance lors du dégel.

Un autre point reste à éclaircir : puisque le drainage ne récolte que très peu d'eau dégelée, quel est le cheminement de l'eau de fonte des lentilles de glace lors du dégel ?

Pour essayer de répondre à cette question, une tentative de modélisation des écoulements a été effectuée à l'aide du programme ADINAT [1]. Tentative, car ce programme ne permet de prendre en compte qu'un seul type de phénomène physique - les écoulements - sur les trois en jeu dans le modèle - hydraulique, thermique et mécanique.

b) Tentative de simulation des écoulements lors du dégel

Ce programme, basé sur la méthode des éléments finis, permet de simuler des écoulements souterrains transitoires ou permanents dans un milieu composé de plusieurs couches. La conductivité hydraulique du sol de chaque couche peut être soit orthotropique et constante dans le temps, soit isotropique et fonction de la pression interstitielle. Différents types de conditions aux limites peuvent être introduits.

Comme ce programme ne permet de simuler qu'un seul phénomène à la fois, il a fallu recourir à de nombreuses simplifications et hypothèses :

. Massif divisé en trois couches horizontales distinctes : la grave de fondation, le limon gelé et le limon non gelé siège des succions cryogéniques.

. Charges et déformations au sein du modèle non prises en compte.

. Eau de fonte des lentilles de glace simulée par une variation de la charge hydraulique en fonction du temps au niveau de l'interface grave / limon gelé.

. Présence du géotextile pris en compte en effectuant deux calculs : l'un avec la conductivité hydraulique de la grave, l'autre avec celle du géotextile. Cependant, les calculs ont montré que ces deux calculs conduisaient au même résultat.

. Caractéristiques de la couche de limon gelé constantes.

. Au stade initial, équipotentielles horizontales.

. Conductivité hydraulique de la grave isotrope et constante.

. Conductivité hydraulique de la couche de limon gelé orthotrope et constante : la composante verticale a été admise cent fois plus faible que celle de la conductivité hydraulique du sol non gelé et saturé; la composante horizontale a été admise 10 et 100 fois plus grande que la composante verticale.

. Conductivité hydraulique de la couche de limon non gelé isotrope et fonction de la succion cryogénique : les valeurs adoptées au stade initial sont celles mesurées lors des recherches précédentes [4], [5], [6]; lorsque la succion est nulle, la valeur adoptée est celle de la conductivité

hydraulique verticale déterminée par l'essai oedométrique ou le perméamètre.

. Ecoulements transitoires, temps initial $t_i = 0$ et temps final $t_f = 336$ h (durée de la période de dégel de l'essai No 1).

. La paroi latérale de la fosse au contact des matériaux du modèle et du sagex isolant n'est pas imperméable et permet éventuellement à une partie de l'eau dégelée de s'échapper.

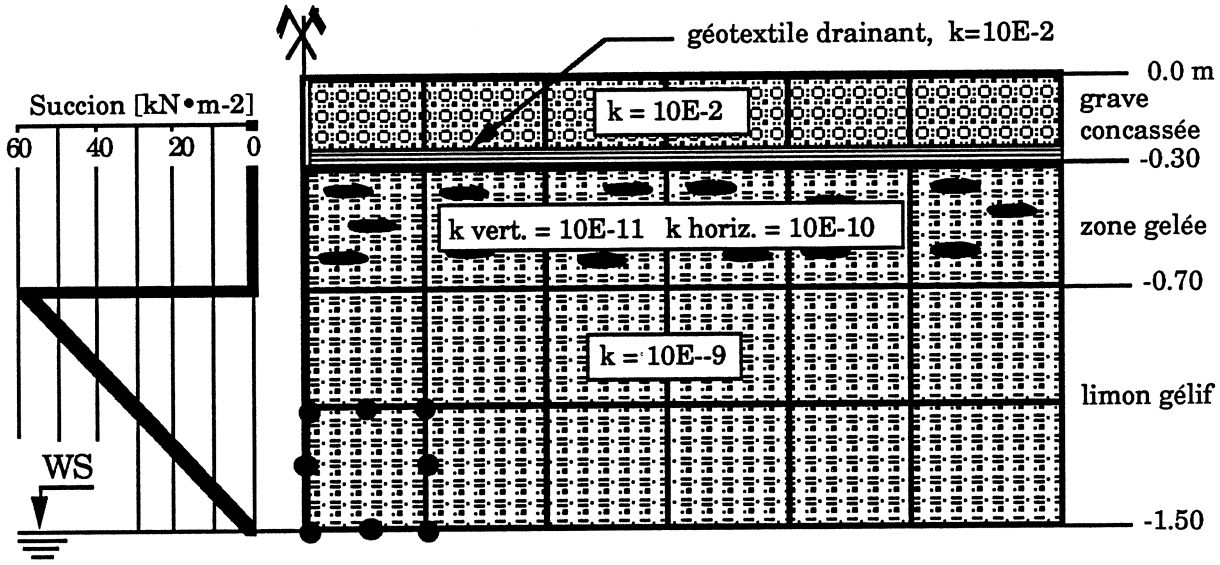
. L'eau dégelée correspond à une variation de la charge hydraulique de 0.04 m au temps $t_i = 0$ (soit 4 cm de gonflement) à 0.0 m au temps $t_f = 336$ h.

. Coefficients d'emmagasinement spécifiques constants tout au long de l'essai pour chacune des couches.

Cinq calculs ont été effectués, conformément aux valeurs des paramètres du tableau 4.5 et à la géométrie de la figure 4.3.

Calcul Nº	Conductivité hydraulique [m·s^{-1}]				Charge hydraul. H à 1.70 m [m]
	Grave	Limon non gelé	Limon gelé		
	k_{gr}	k_l	k_{gl} vert.	k_{gl} horiz.	
1	10^{-2}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-10}	1.70
2	"	"	"	10^{-9}	"
3	"	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	"
4	"	"	"	$5 \cdot 10^{-8}$	"
5	"	10^{-9}	10^{-11}	10^{-10}	1.74 à 1.70

Tableau 4.5 : Paramètres des calculs par la méthode des éléments finis



Conductivités hydrauliques en m•s-1

Figure 4.3 : Réseau d'éléments finis et conditions initiales des calculs

Lors des quatre premiers calculs, l'influence de la conductivité hydraulique de chacune des couches sur l'équilibre du massif a été étudiée, en l'absence de toute variation de la charge hydraulique due à l'eau dégelée.

Il apparaît ainsi que :

- La conductivité hydraulique de la grave de fondation et/ou du géotextile n'a pas d'influence sur l'équilibre du modèle.

- Dans la couche du limon gelé, une conductivité hydraulique horizontale cent fois plus élevée que la conductivité hydraulique verticale donne des résultats très voisins de ceux obtenus lorsque celle-ci n'est que de dix fois plus élevée. Seuls les flux d'eau sont modifiés, mais non l'équilibre final global du modèle.

- Les valeurs des conductivités hydrauliques du Calcul N°1 simulent correctement le temps du dégel observé lors de l'essai No 1.

- Dans tous les cas, les flux d'eau dans les couches de limon sont dirigés vers la zone des succions tant que celles-ci perdurent, puis vers la nappe phréatique dès qu'elles sont résorbées. Aucun flux n'est dirigé, à quelque moment que ce soit, vers l'interface limon gelé / grave de fondation.

Lors du cinquième et dernier calcul, une variation de la charge hydraulique H de 4 cm simulant le dégel des lentilles de glace a été introduite. Les résultats sont semblables à ceux obtenus lors des précédents calculs. La figure 4.4 illustre les résultats obtenus lors du calcul No 5; ceux des calculs No 1 à 4 sont presque identiques.

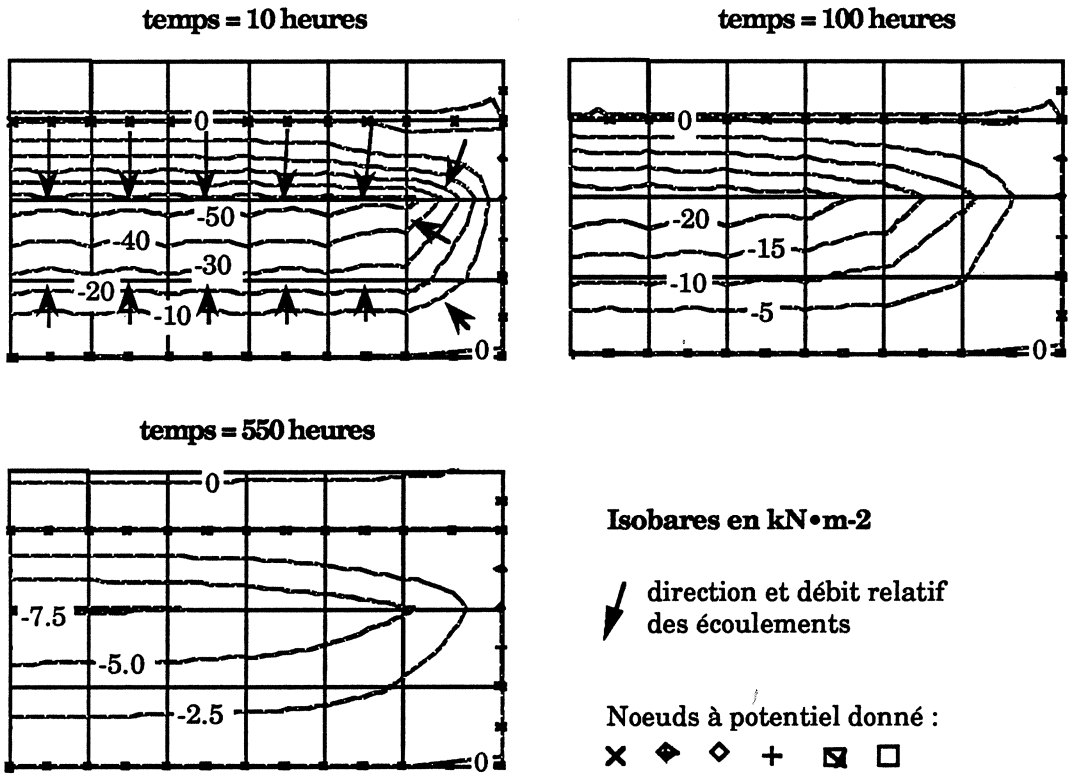


Figure 4.4 : Résultats du calcul No 5

Compte tenu des nombreuses simplifications et hypothèses effectuées, ces calculs ne peuvent avoir valeur de démonstration. Mais ils indiquent la propension, qu'il conviendrait de vérifier par des recherches théoriques plus approfondies, de l'eau dégelée à s'écouler vers les zones de succions puis vers la nappe phréatique, négligeant la présence du géotextile drainant à l'interface du limon gelé / grave de fondation.

4.7.4 Caractéristiques géotechniques du limon d'infrastructure après essais

Bien que les caractéristiques mesurées soient celles du limon au droit du champ No 1, c'est-à-dire du champ chargé dynamiquement, il semble que les cycles de gel/dégel aient provoqué, tout au moins dans la partie supérieure de l'infrastructure, un léger décompactage de ce matériau. En effet, la comparaison des caractéristiques avant et après essai indique une diminution des poids volumiques apparent et sec de l'ordre de 1kN.m^{-3} après chaque cycle coïncidant avec une absence de variation globale de la teneur en eau, soit une augmentation de la porosité de 35 à 40 % entre les deux essais.

En fait, compte tenu de l'emplacement des tranchées d'investigations par rapport à l'appareil de chargement, il est probable que les échantillons ont été prélevés dans une zone où l'influence de la charge dynamique était peu sensible, en tout cas insuffisante pour compenser le gonflement résiduel du limon en fin de période de dégel.

Quant à la diminution des poids volumiques apparent et sec, respectivement l'augmentation de la teneur en eau avec la profondeur, elles peuvent être dues au compactage de la couche de fondation lors de la construction du modèle qui aurait légèrement affecté la partie supérieure du limon.

En définitive, les caractéristiques du limon mesurées après essai sont sans surprise; elles ne contredisent pas les phénomènes observés lors de cycles de gel/dégel.

4.8. CONCLUSIONS

De l'analyse des résultats des deux cycles de gel/dégel entrepris sur le modèle, il ressort les points suivants :

- **Drainage à l'interface couche de fondation / infrastructure** : le rôle positif de ce drainage sur la portance de la chaussée lors du dégel n'a pu être mis en évidence. Moins de 2 % de l'eau de fonte des lentilles de glace a pu être récoltée par ce drainage lors du dernier essai (0 % lors du premier essai), résultats corroborés par une simulation - toutefois très simplifiée - des écoulements par un calcul des éléments finis.

  Cependant, le tassement résiduel en fin de période de dégel est étonnamment faible comparé à ceux obtenus lors des recherches précédentes. Le géotextile drainant paraît ainsi jouer un rôle favorable mais cependant pas uniquement par son effet drainant qui est très faible; l'armature constituée par le geogrid du géotextile drainant a certainement joué un rôle favorable sur la portance lors du dégel.

- comme cela avait été déjà démontré dans [6], **le gonflement des sols** n'est pas, un critère suffisant pour exprimer la perte de portance au dégel.

5. CONCLUSIONS GENERALES

La série d'essais en vraie grandeur du comportement au gel et dégel de superstructures routières qui fait l'objet de ce rapport est la dernière d'une longue campagne d'essais qui a débuté en 1977 dans la halles fosses de l'EPFL à Ecublens. Les résultats obtenus lors des précédentes séries d'essai ont permis, dans une certaine mesure, une quantification de la diminution de la portance lors du dégel et ont conduit à une modification des concepts en matière de dimensionnement au gel des superstructures routières. Ces résultats ont ainsi servi de base à la révision des normes suisses de dimensionnement en ce qui concerne le gel.
Après ces essais deux points restaient encore à éclaircir : le comportement au gel et dégel de fondations en matériaux concassés et l'effet d'un drainage de l'interface entre la terrain naturel gélif et le fondation. Ce furent donc les buts de cette troisième et dernière série d'essais.

Les **essais de compactage réalisés sur les matériaux concassés** ont mis en évidence l'impossibilité, lorsque la portance de l'infrastructure est faible, d'obtenir une portance de la couche de fondation suffisante et conforme aux normes, quel que soit le mode de compactage utilisé; cette portance est en outre plus faible que celle obtenue, dans les mêmes conditions avec une grave roulée.
Une grave concassée a théoriquement une portance supérieure à celle d'une grave roulée; cependant, pour obtenir cette portance, il faut pouvoir compacter la grave concassée avec une plus grande énergie que pour une grave roulée afin de vaincre les frottements internes élevés que présente un tel matériau : cette opération n'est cependant pas réalisable pour des couches de grave de quelque 300 mm d'épaisseur mises en place sur une infrastructure de faible portance (CBR $< \approx 10\%$).
Autrement dit, à épaisseur et à énergie de compactage égales et pour une faible portance de l'infrastructure, une grave concassée aura une portance inférieure à celle d'une grave roulée.
Quant au comportement au gel et dégel d'une fondation en grave concassée, elle découle directement de son degré de compactage et devrait ainsi, sur des sols gélifs qui sont presque toujours de faible portance, être moins bon que celui d'une grave roulée compactée avec la même énergie.

En de qui concerne l'**effet d'un drainage de l'interface entre la couche de fondation et le terrain gélif**, la présente recherche a pas permis de mieux comprendre le phénomène des mouvements de l'eau dans les sols gélifs lors d'un cycle de gel et de dégel.
Par rapport au volume total de l'eau accumulée, sous forme de lentilles de glace, lors du gel dans le sol gélif supportant la superstructure routière, le volume d'eau drainé par la couche drainante est très faible (lors de l'essai avec dégel rapide : environ 1 litre par m^2 contre 30 litres par m^2 accumulés sous forme de lentilles de glace). La couche drainante n'a pas ainsi le rôle déterminant que laissaient supposer les résultats obtenus lors de la première série

d'essais [6]. Elle agit cependant juste sous la fondation, soit où les contraintes de cisaillement sont les plus importantes et les faibles tassements résiduels (après dégel) obtenus lors de ces derniers essais peuvent être expliqués, en partie, par son effet drainant.
Ces faibles tassements, qui déterminent un bon comportement, lors du dégel, de la superstructure testée, sont aussi dus, très probablement, à l'armature constituée par le type particulier de géotextile utilisé comme couche drainante : un geogrid pris en sandwich entre deux couches de géotextile non-tissé. Cette solution, choisie uniquement pour des raisons propres à l'essai, est malheureusement très coûteuse et ne peut être utilisée, en pratique et à première vue, que dans des cas très particuliers.
La figure 5.1 illustre le phénomène du mouvement de l'eau dans le sol gélif lors d'un cycle de gel / dégel tel que l'on peut se l'imaginer après les résultats des essais qui font l'objet de ce rapport (en particulier le faible effet de la couche drainante sous la fondation) et l'analyse du mouvement de l'eau par la méthode des éléments finis.

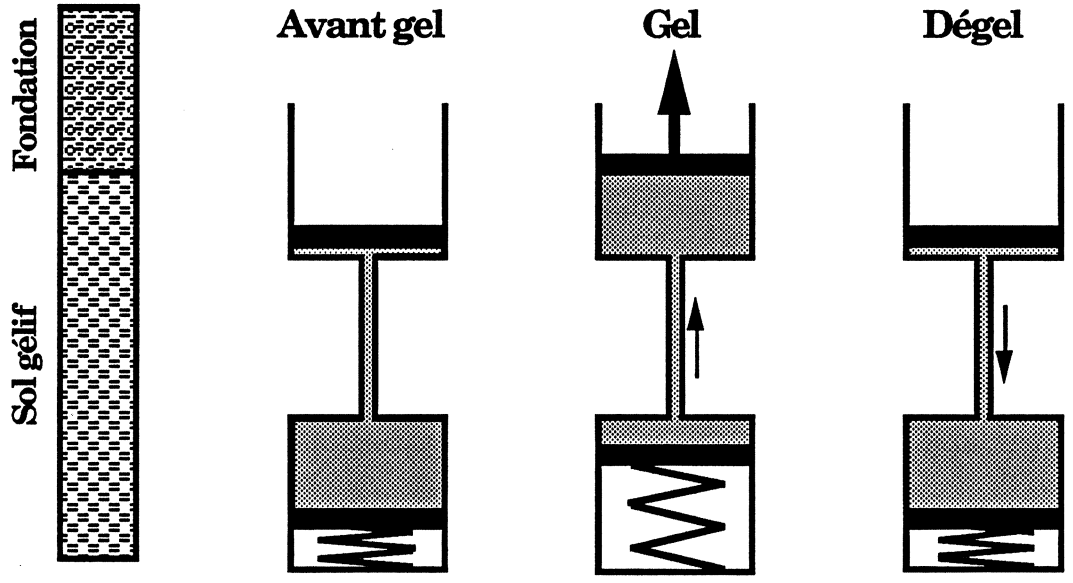


Figure 5.1 : Schéma du mouvement de l'eau pendant un cycle de gel / dégel

Lors du gel, l'eau interstitielle des premiers décimètres de la couche de limon gélif est aspirée vers le front de gel par le phénomène décrit, en particulier, dans [6]; cela met en dépression le limon sous la zone gelée. Au dégel, la zone non gelée mise en dépression se comporte alors comme un puits qui réaspire l'eau de fonte des lentilles de glace. Les mouvements de l'eau sont ainsi surtout verticaux et seul l'eau de fonte de la partie supérieure de la zone gelée peut s'écouler dans une couche drainante placée sous la fondation.
Ce processus est valable pour des couches gelées de faible épaisseur (40 cm dans notre cas); pour des couches plus épaisses le mouvement de l'eau de fonte des lentilles de glace vers le haut est peut-être plus prononcé.

Lausanne, novembre 1988

BIBLIOGRAPHIE

[1] ADINAT , Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis of Temperatures , ADINA Engineering, Inc. U.S.A., Septembre 1981

[2] Despond J. M., Martinenghi T., Superstructures stabilisées au ciment lors de gel et dégel - Rapport final, 1er partie, de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, Novembre 1979

[3] Despond J. M., Martinenghi T., Superstructures stabilisées au ciment lors de gel et dégel - Rapport final, 2ème partie, de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, à paraître

[4] Dysli M., Pfister R., Influence du milieu ambiant sur la force d'une chaussée - Rapport final, 1er partie, de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, Novembre 1979

[5] Dysli M., Pfister R., Influence du milieu ambiant sur la force d'une chaussée - Rapport final, 2ème partie, de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, Juin 1981

[6] Dysli M., Bourdeau P. L., Influence du milieu ambiant sur la force d'une chaussée - Rapport final, 3ème partie de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, Avril 1984

[7] Pigois M. L., Dumont A. G., Hefti J. J., Superstructures routières dans des conditions climatiques extrêmes, Rapport Nº 77 de l'Office des Routes, Département fédéral de l'Intérieur, Décembre 1983

[8] Manuel BISON, Soil Strain Gage, Model 4101A, Bison Insruments Inc.,U.S.A.

ANNEXES

0. GRAPHIQUES GENERAUX

0-1, 2	Valeurs de γ, w et M_E après compactage de l'infrastructure
0-3 à 6	Valeurs de γ, w et M_E après compactage de la couche de fondation
0-7	Schéma des instruments de mesures
0-8	Position des appareils de surface
0-9	Modèle et instrumentation interne, plan
0-10	Modèle et instrumentation interne, coupe
0-11	Coupes tranversales champ 1, axes A, B et C
0-12	Coupe longitudinale du drainage latéral
0-13	Coupes transversales champs 2 et 3

1. ESSAIS NO 1 : GEL ET DEGEL RAPIDE

1-1, 2	Isothermes du Champ 1
1-3, 4	Isothermes du Champ 2
1-5	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 1
1-6	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 2
1-7, 8, 9	Tautochrones, Champ 1
1-10, 11, 12	Tautochrones, Champ 2
1-13	Déformations permanentes en surface en 1 point, selon 3 procédés différents, Champ 1, Axe B
1-14	Déformations permanentes en surface en 1 point, selon 3 procédés différents, Champ 2, Axe E
1-15	Déformations permanentes en surface en 2 points distincts, selon 2 procédés différents, Champs 1 et 2, Axes B et E
1-16	Déformations permanentes en surface en 3 points distincts, selon 1 même procédé

1-17, 18, 19	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 1, Axe B
1-20, 21	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 2, Axe D
1-22, 23	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 2, Axe E
1-24, 25	Déformations permanentes en fonction de la profondeur, Champ 3, Axes H et I
1-26	Déformations élastiques en fonction du temps, Champ 1

2. ESSAIS NO 2 : GEL ET DEGEL LENT

2-1, 2	Isothermes du Champ 1
2-3, 4	Isothermes du Champ 2
2-5	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 1
2-6	Température de chaque PT100 en fonction du temps, Champ 2
2-7, 8, 9	Tautochrones, Champ 1
2-10, 11, 12	Tautochrones, Champ 2
2-13	Déformations permanentes en surface en 2 points distincts, selon 2 procédés différents, Champs 1 et 2, Axes B et E
2-14	Déformations élastiques en fonction du temps, Champ 1
2-15	Débit au dégel

Gy 22

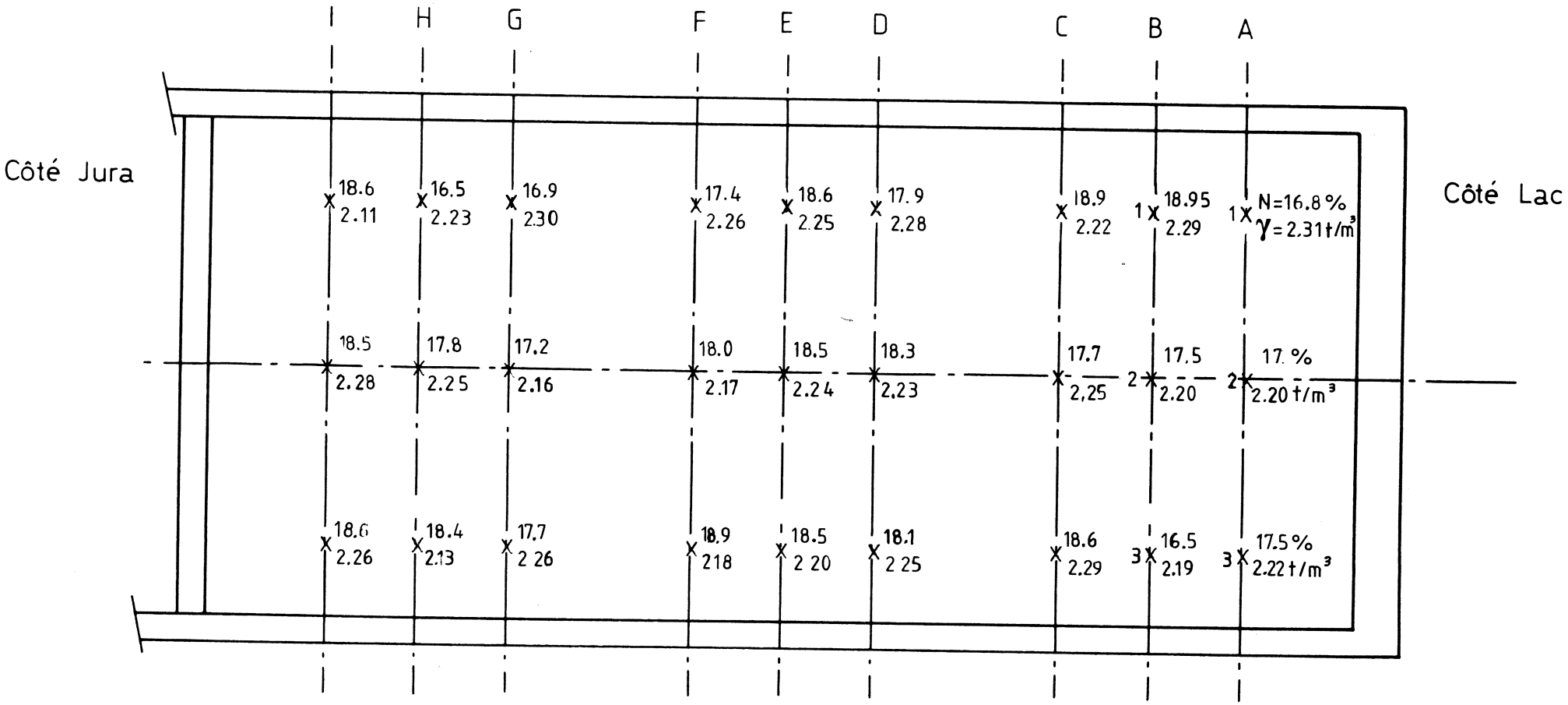
ANNEXE N° Ø-1

$\gamma = 21{,}9 \pm 0.5$ kN/m³
$w = 18\% \pm 0.7$ %

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

MESURES DE LA TENEUR EN EAU ET DU POIDS VOLUMIQUE APPAPENT(NUCLEOMETRE) SUR LA FORME DE L'INFRASTRUCTURE (- 30 cm)



Gy 22

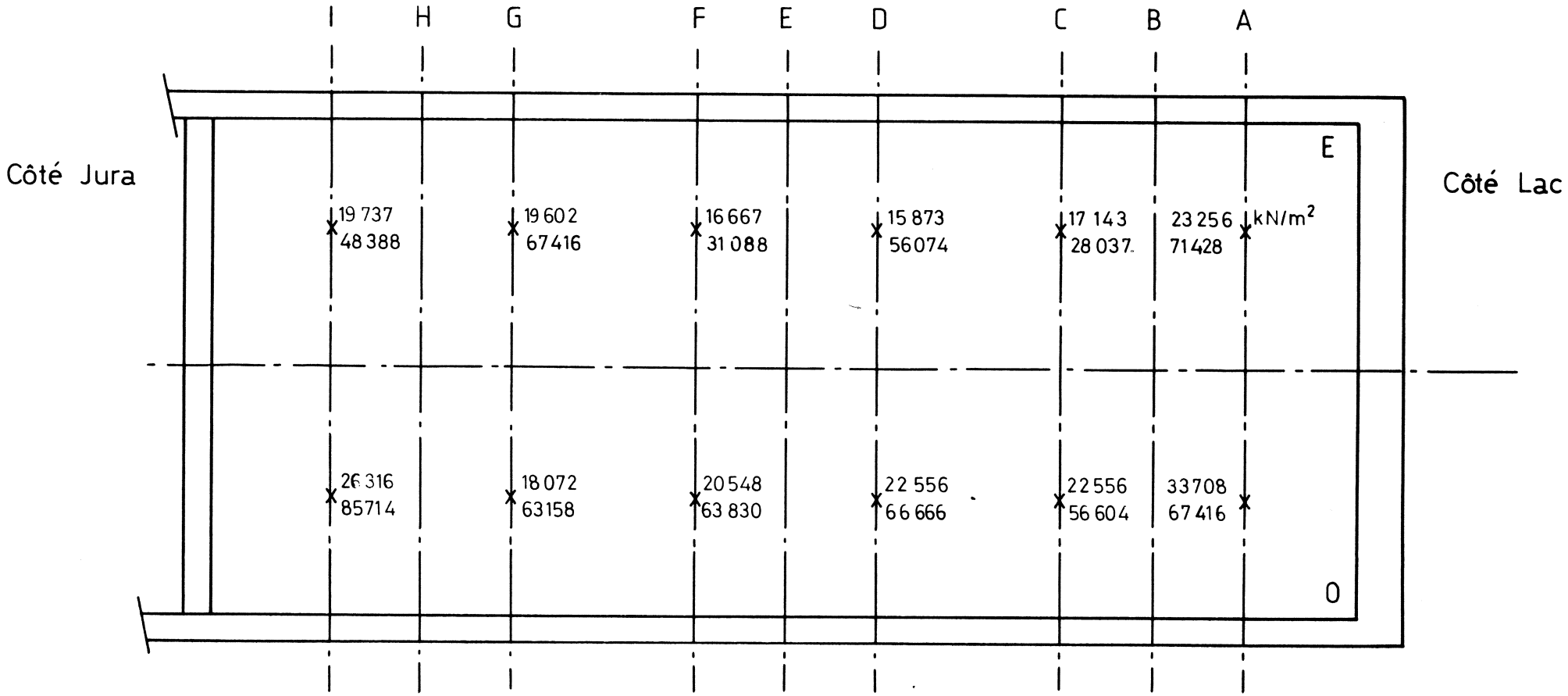
ANNEXE N° Ø-2

M_{E_1}	= 21 337 ± 4748 kN/m²
M_{E_2}	= 58 818 ± 15741 kN/m²

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

ESSAIS DE PLAQUES "LENTS" SUR LA FORME DE L'INFRASTRUCTURE (-30 cm)



Gy 22

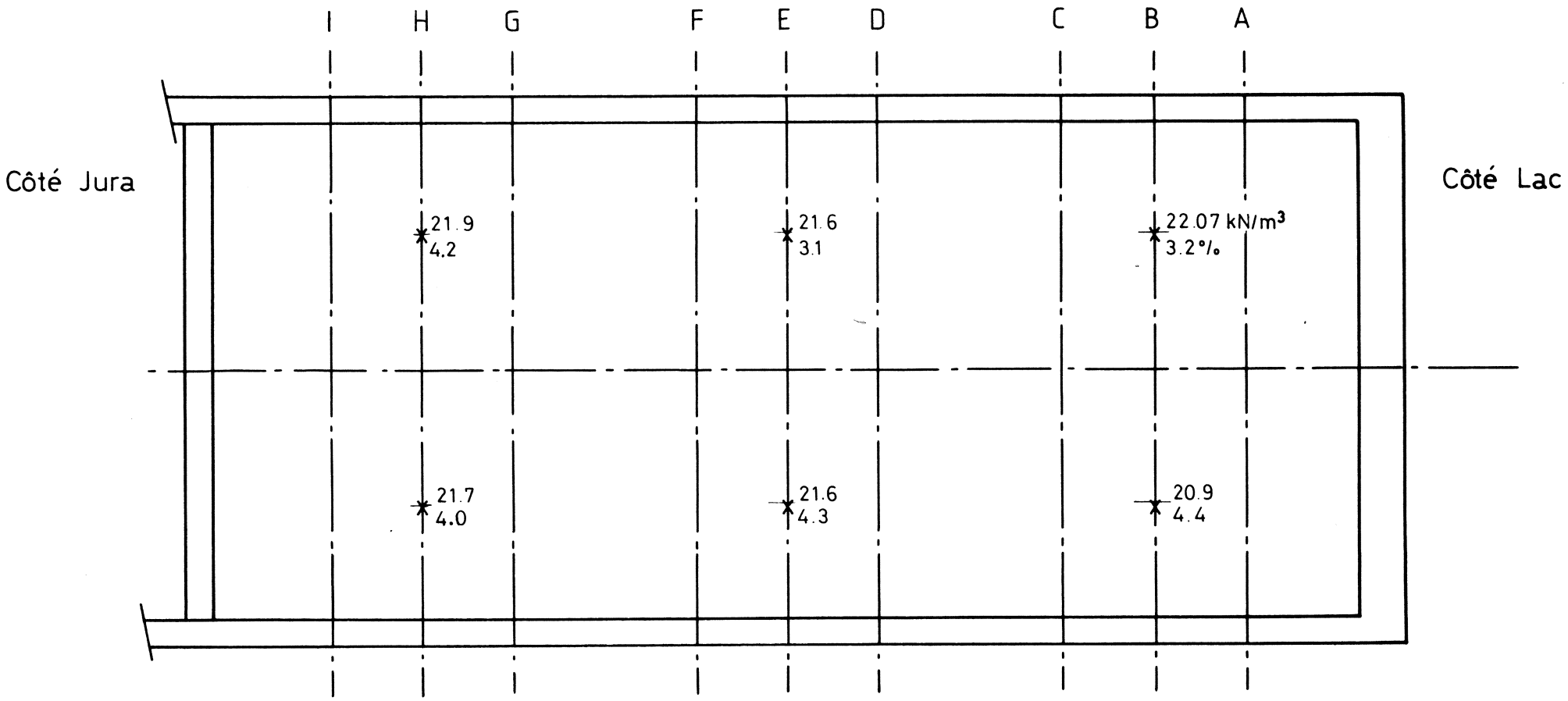
ANNEXE N°Ø-3

$\gamma = 21{,}6 \pm 0.4\ kN/m^3$
$w = 3.9 \pm 0.6\ \%$

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

MESURES DE LA TENEUR EN EAU ET DU POIDS VOLUMIQUE APPAPENT(NUCLEOMETRE) SUR LA FORME DE LA FONDATION APRES COMPACTAGE AU ROULEAU VIBRANT 2t



Gy 22

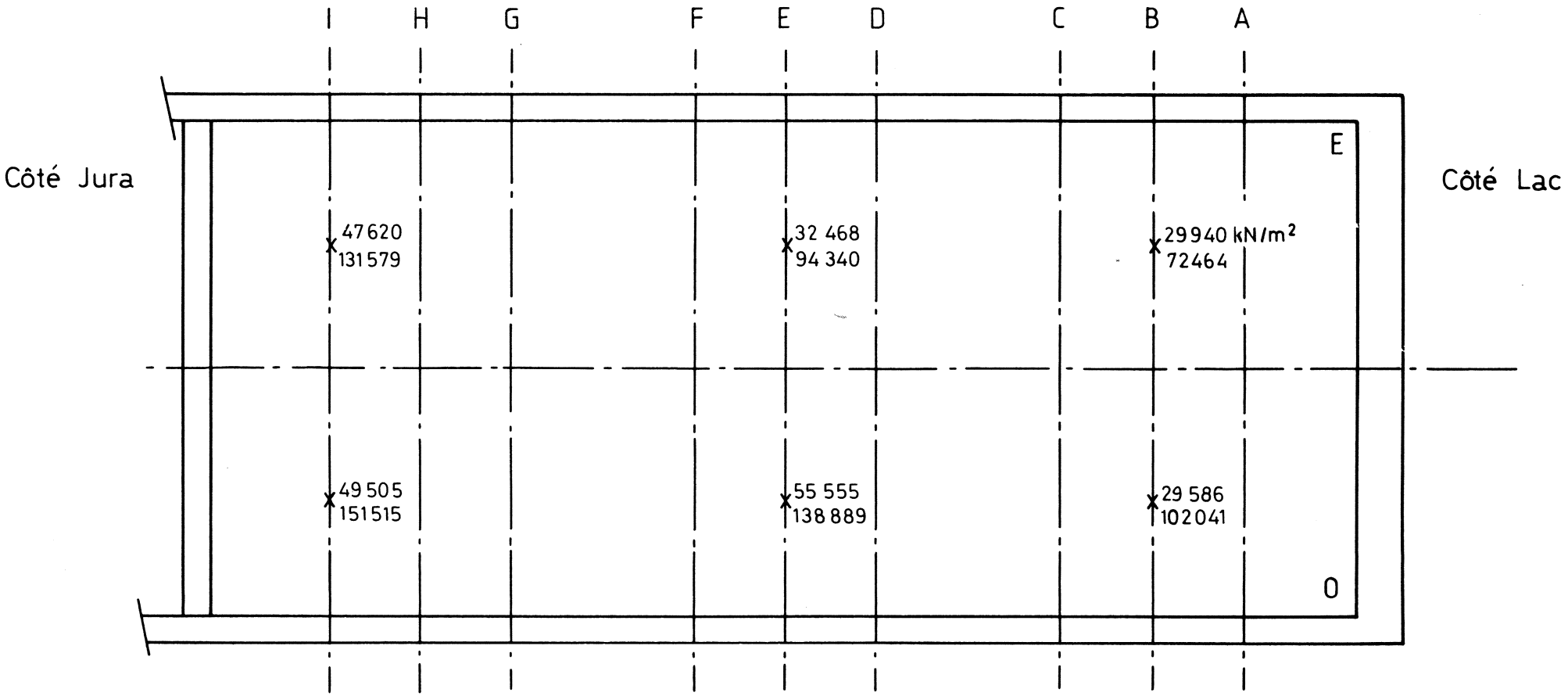
ANNEXE N° Ø-4

M_{E_1} = 40 775 kN/m² ± 11429
M_{E_2} = 115 138 kN/m² ± 30 275

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

ESSAIS DE PLAQUES RAPIDES SUR FORME DE LA FONDATION (±0.0) APRES COMPACTAGE AU ROULEAU VIBRANT



Gy 22

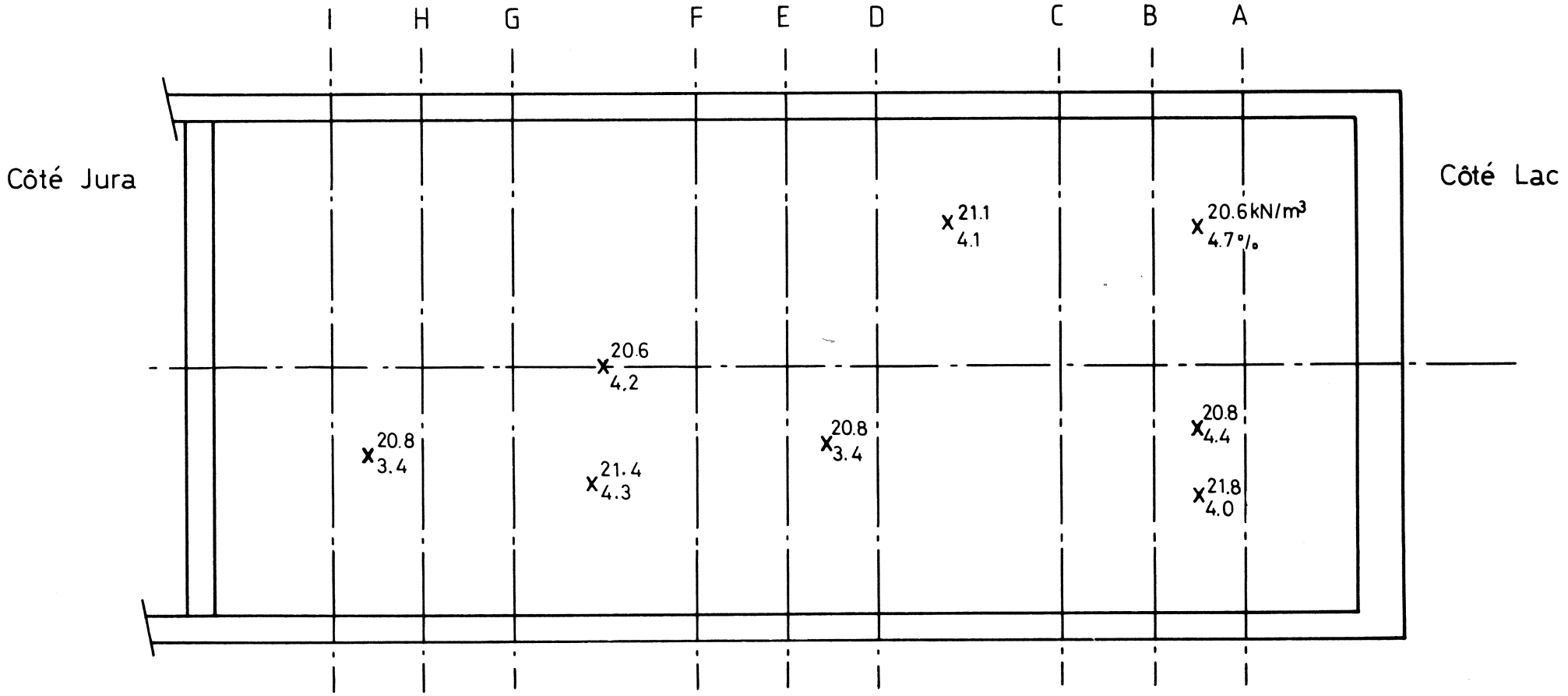
ANNEXE N° Ø-5

$\gamma = 21.0 \pm 0.4\ kN/m^3$
$w = 4.06 \pm 0.46\ \%$

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

MESURES DE LA TENEUR EN EAU ET DU POIDS VOLUMIQUE APPARENT (NUCLEOMETRE) SUR FORME DE LA FONDATION (± 0.0) APRES COMPACTAGE AU ROULEAU A PNEUS



Gy 22

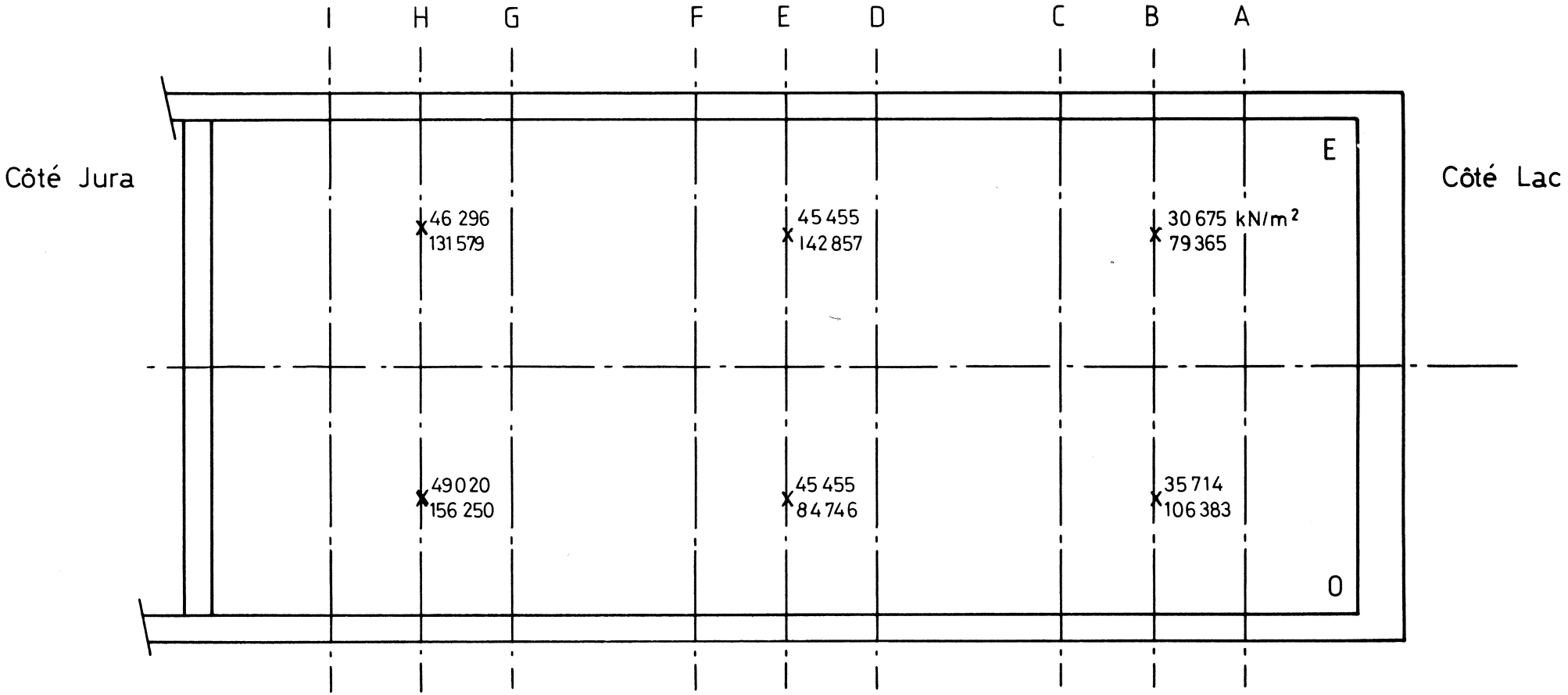
ANNEXE N° ϕ-6

M_{E_1} = 42 103 ± 7200 kN/m²
M_{E_2} = 116863 ± 31594 kN/m²

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

ESSAIS DE PLAQUES RAPIDES SUR LA COUCHE DE FONDATION (±0.0), APRES COMPACTAGE AU ROULEAU A PNEUS



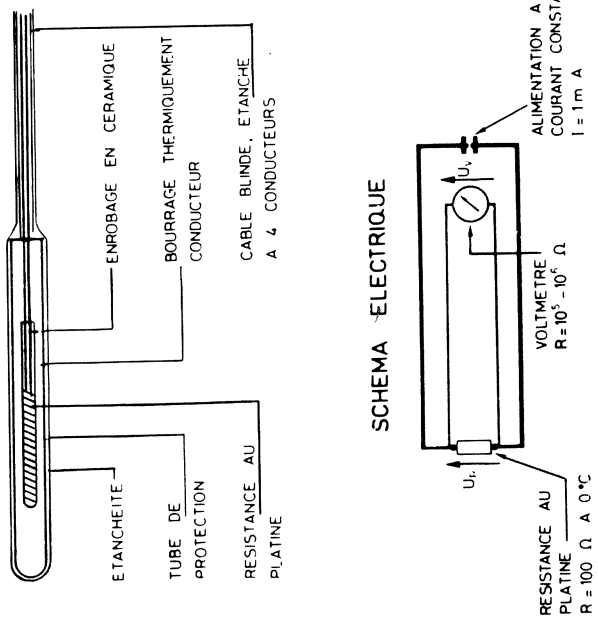
Gy 22

ANNEXE N° Φ-7

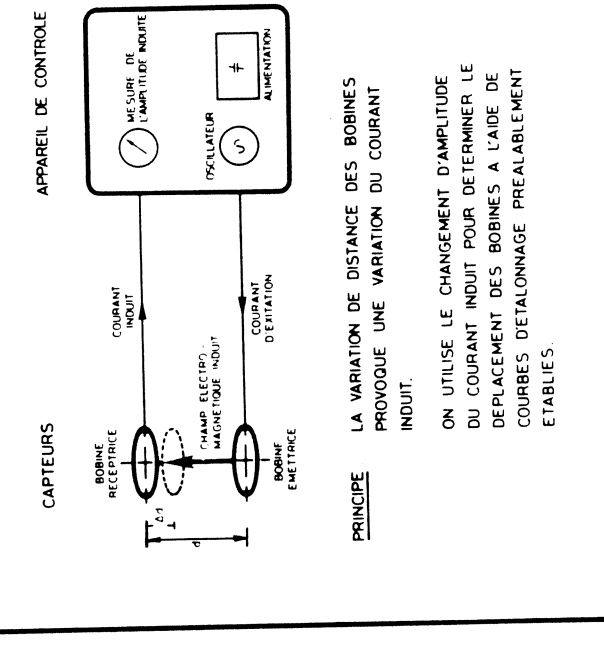
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

THERMOMETRE A RESISTANCE



CAPTEURS MAGNETIQUES DE DEPLACEMENTS



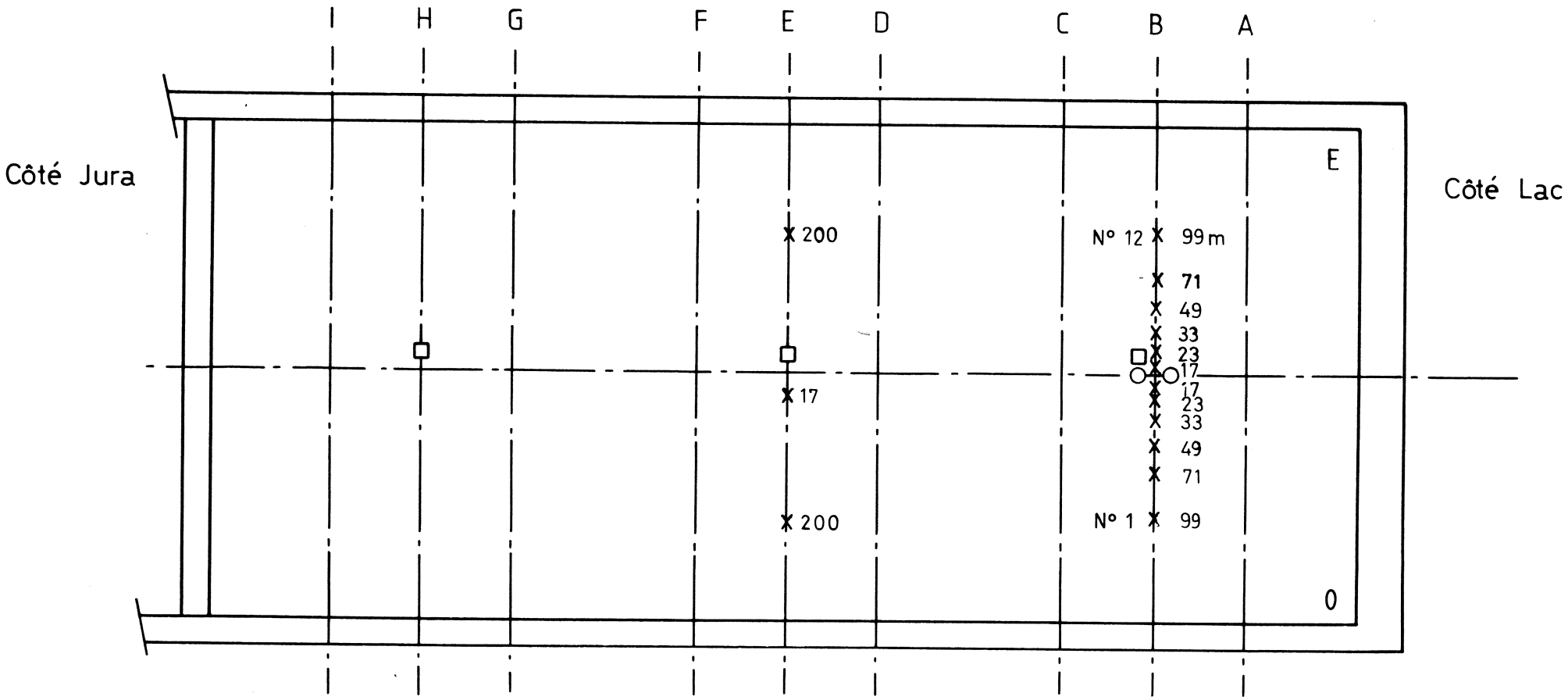
Gy 22

ANNEXE N° Ø-8

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

POSITION DES PLAQUES D'APPUI DU VERIN , DES COMPARATEURS ET DES POINTS DE NIVELLEMENT



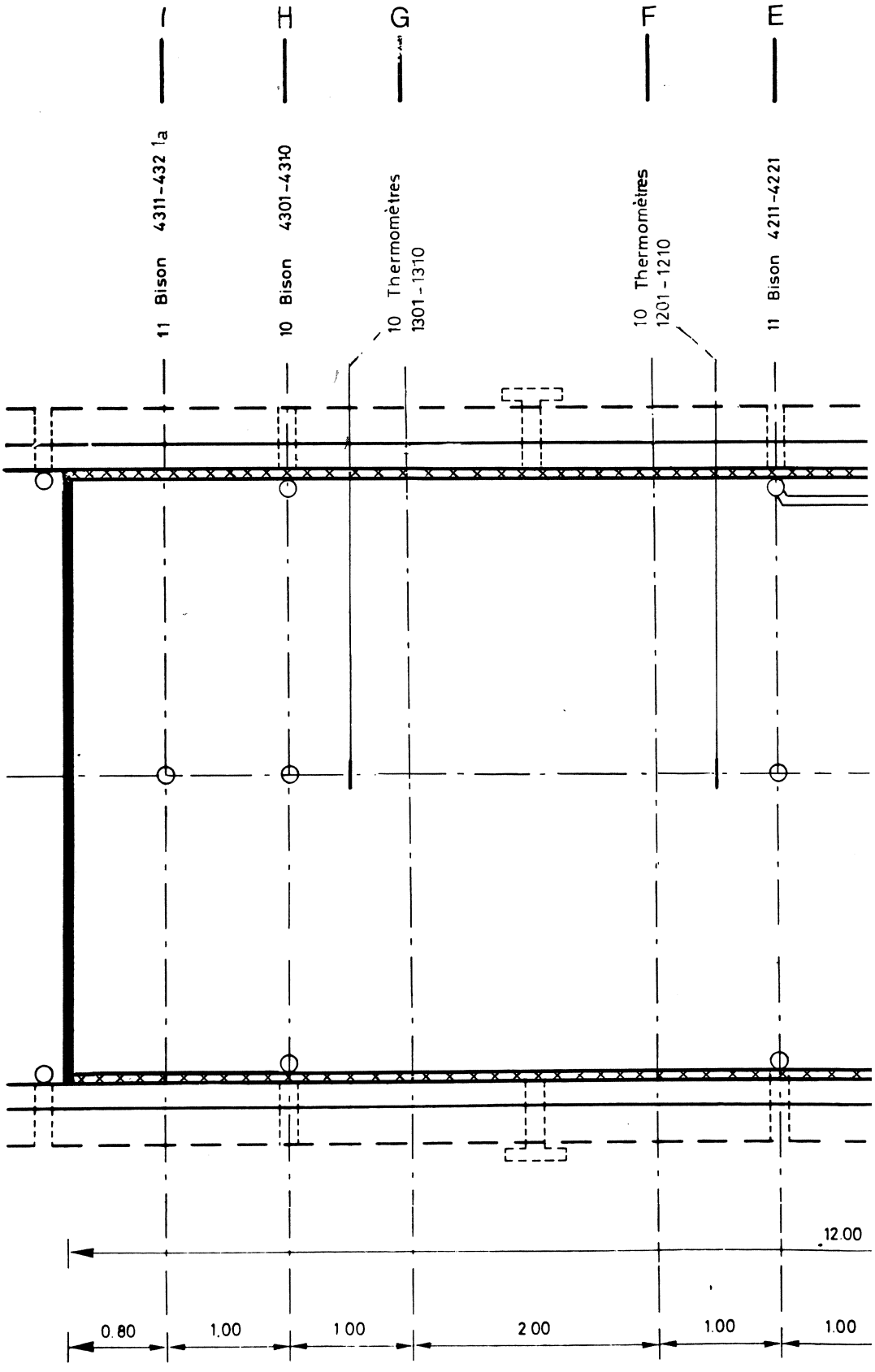
○—○ Plaques d'appui du vérin hydraulique x Comparateurs □ Nivellements

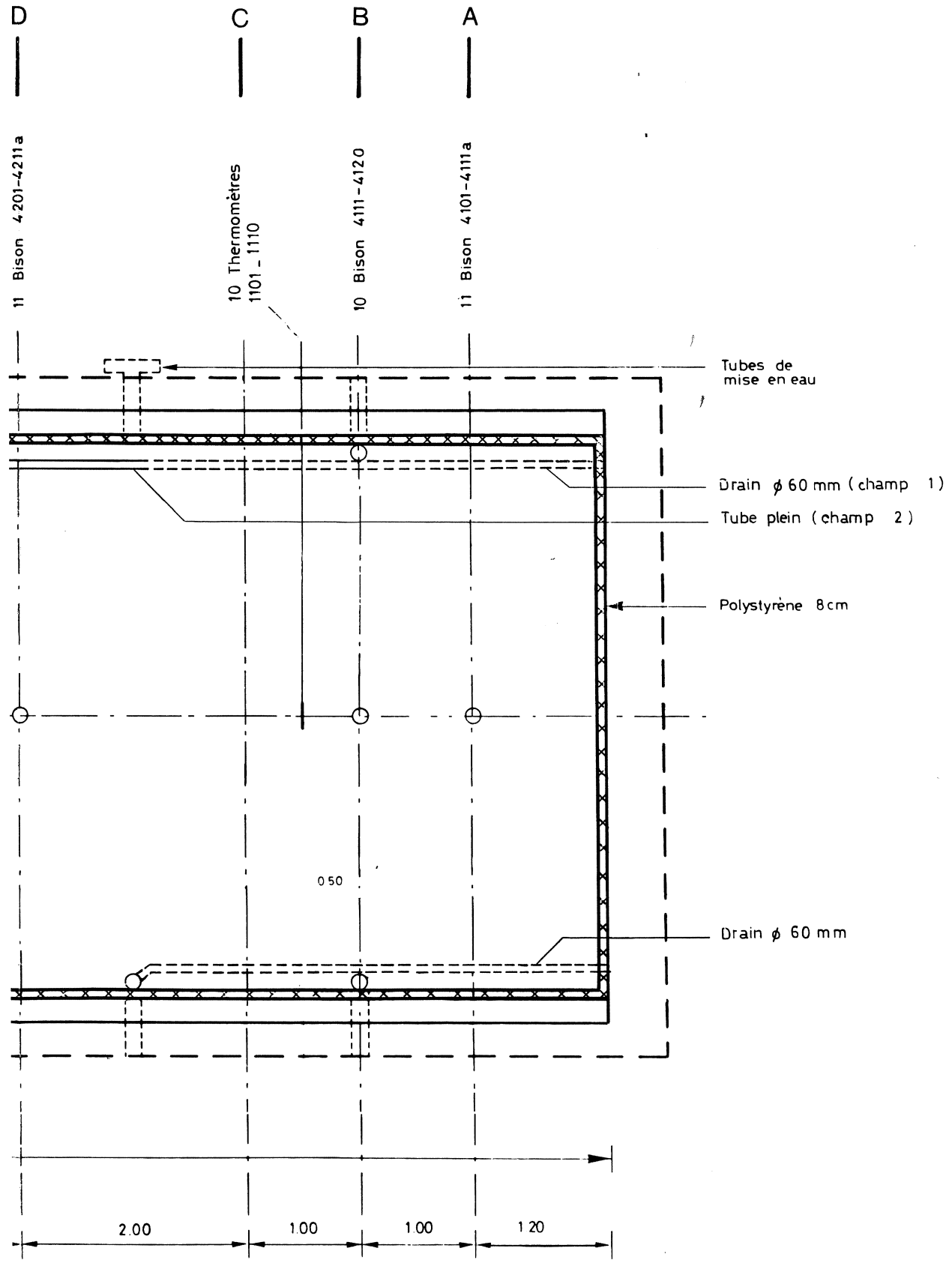
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

MODELE ET INSTRUMENTATION INTERNE

VUE EN PLAN




D
C
B
A
11 Bison 4201-4211a
10 Thermomètres 1101 - 1110
10 Bison 4111-4120
11 Bison 4101-4111a
Tubes de mise en eau
Drain ϕ 60 mm (champ 1)
Tube plein (champ 2)
Polystyrène 8cm
0 50
Drain ϕ 60 mm
2.00
1.00
1.00
1.20

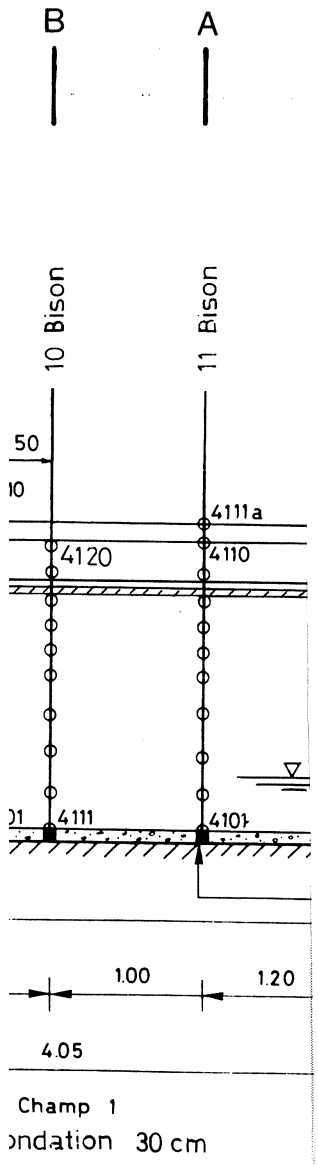
Gy 22

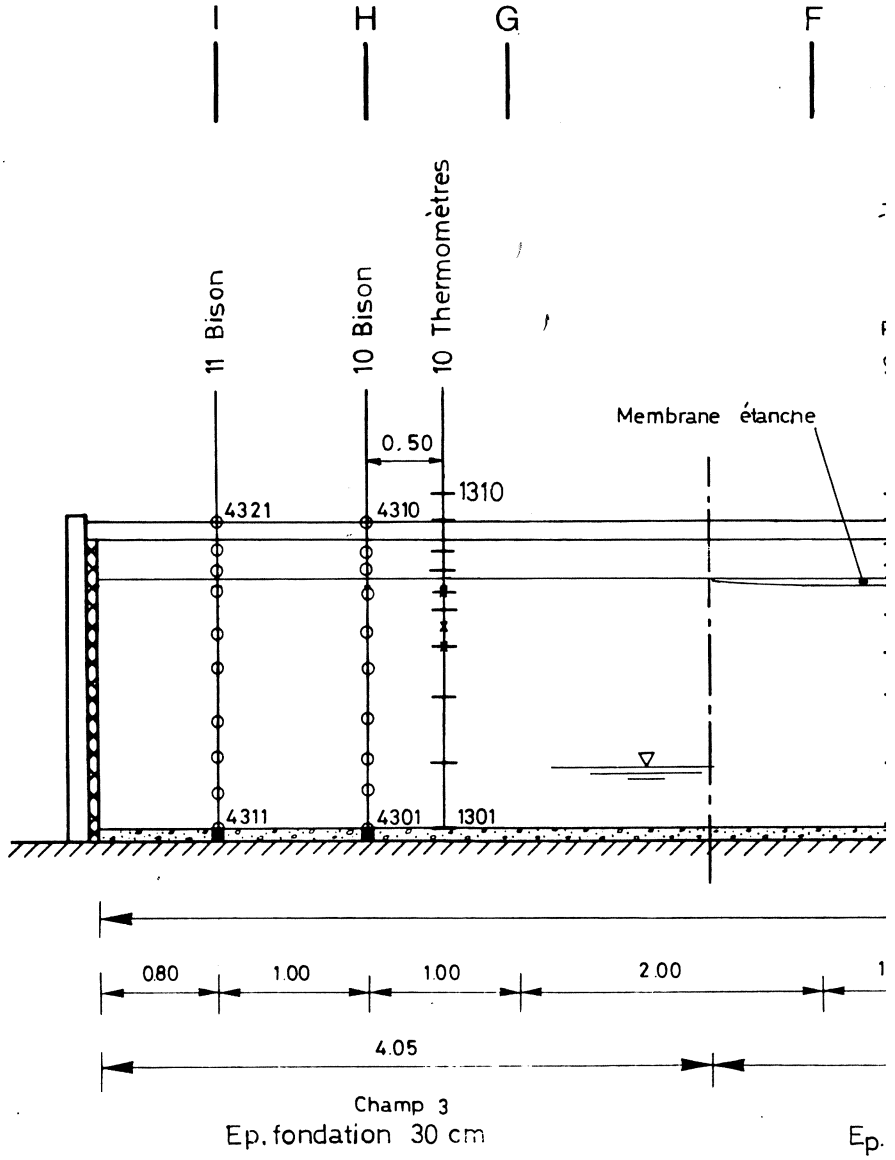
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASS

MODELE ET INSTRUMENTATION INTERNE

COUPE LONGITUDINALE A L'AXE





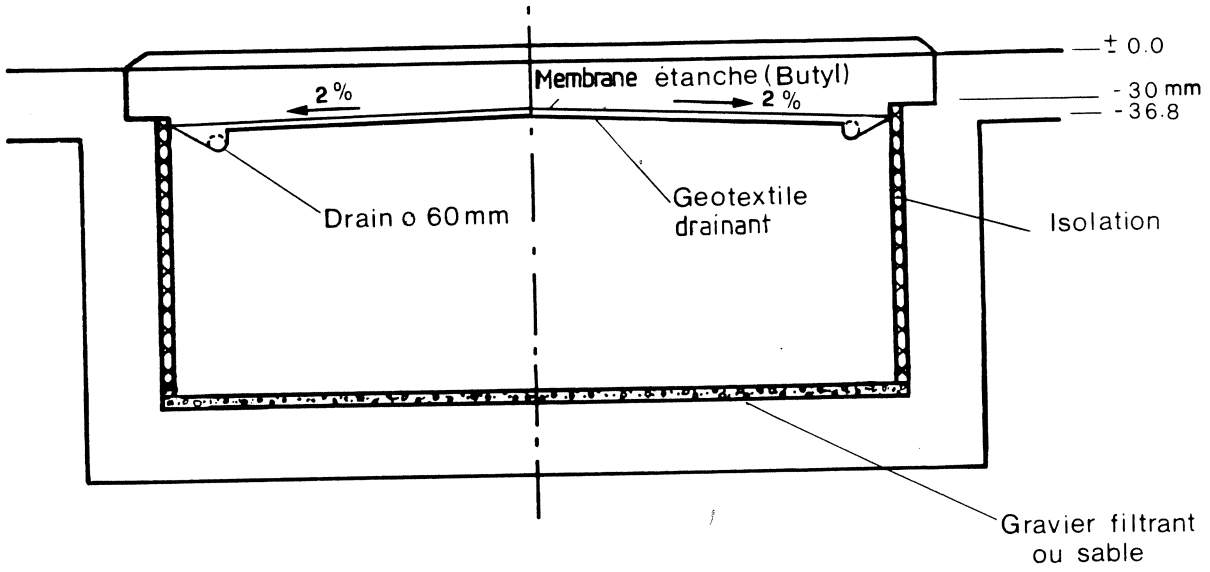
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

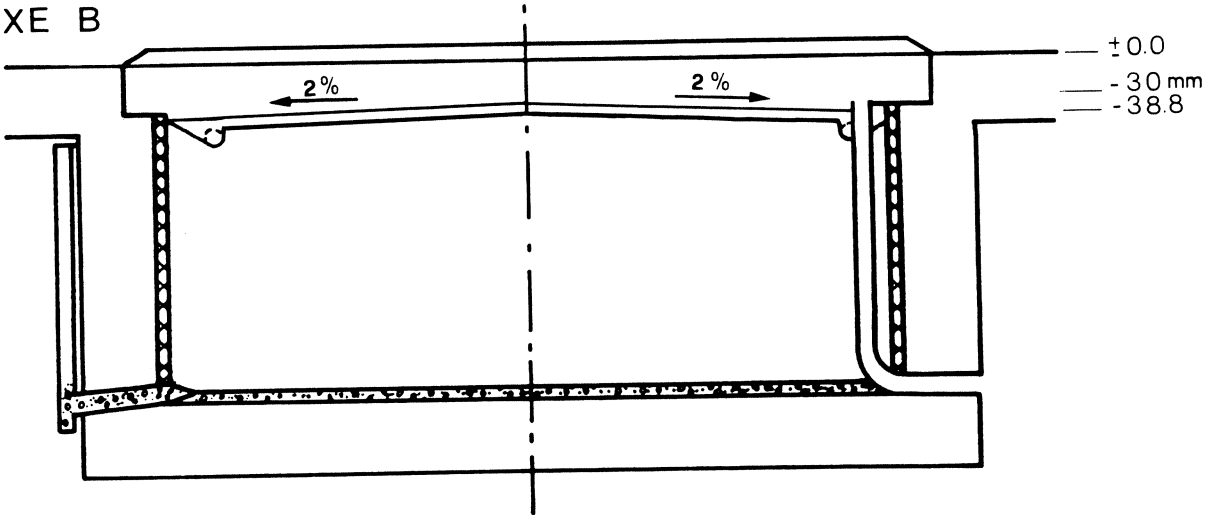
COUPES TRANSVERSALES

AXE A

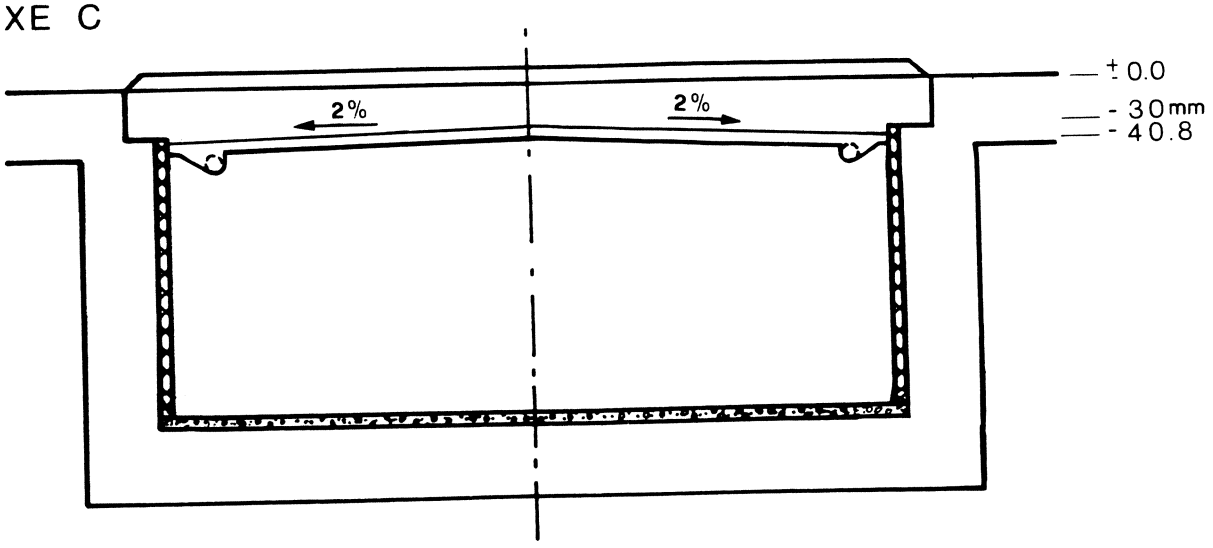
Champ 1



AXE B



AXE C

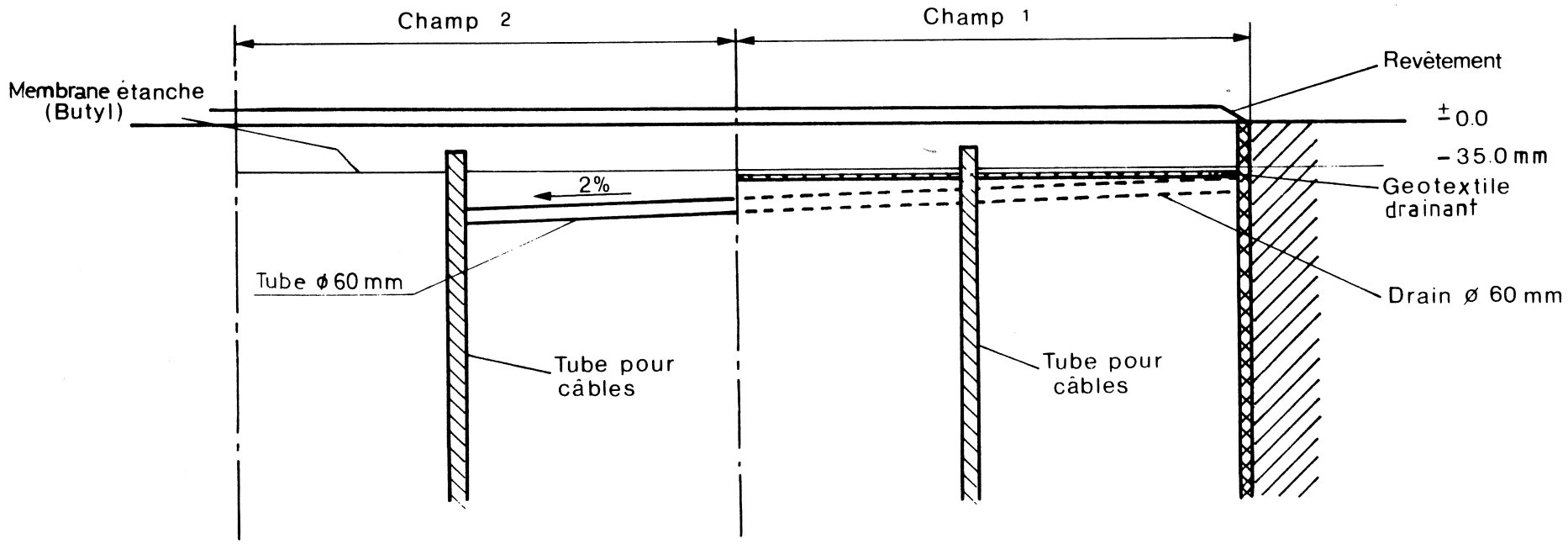


LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

MODELE ET INSTRUMENTATION INTERNE

COUPE LONGITUDINALE DU DRAINAGE LATÉRAL CÔTÉ LAUSANNE Ech. 1/50

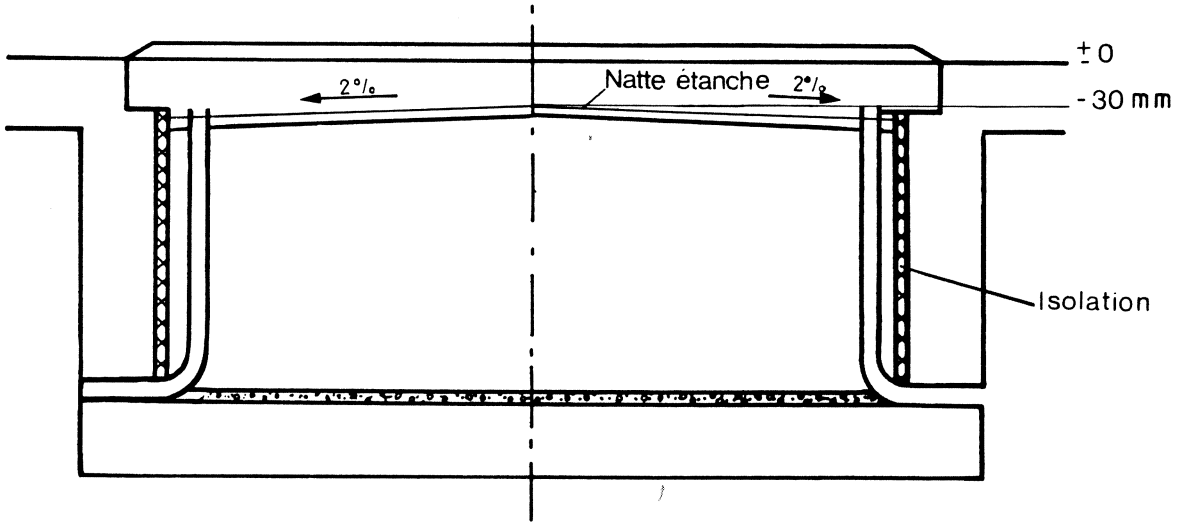


LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

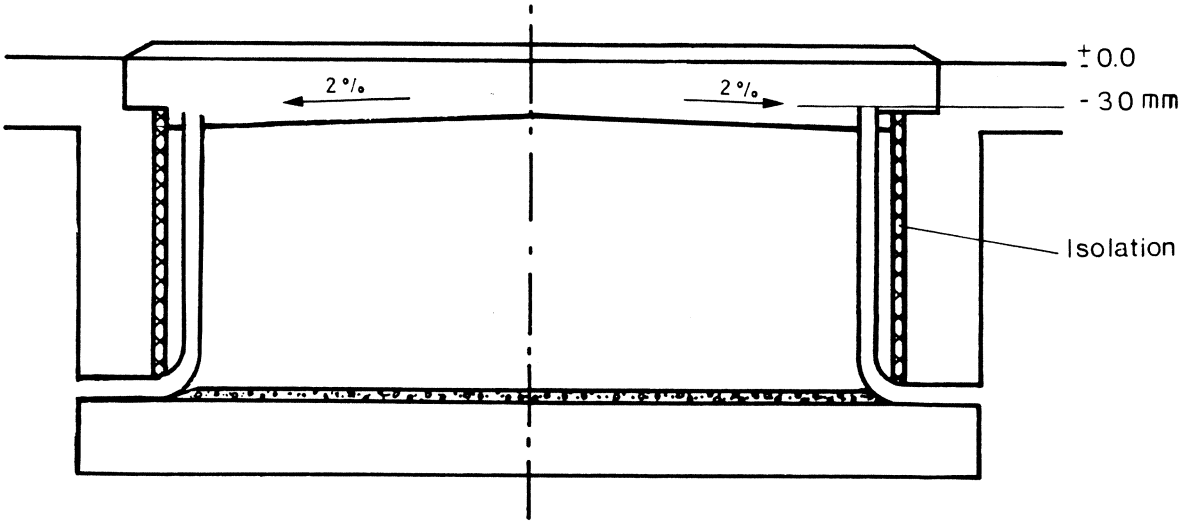
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

COUPES TRANSVERSALES

AXE E Champ 2



AXE H Champ 3



Gy 22

ANNEXE 1-1

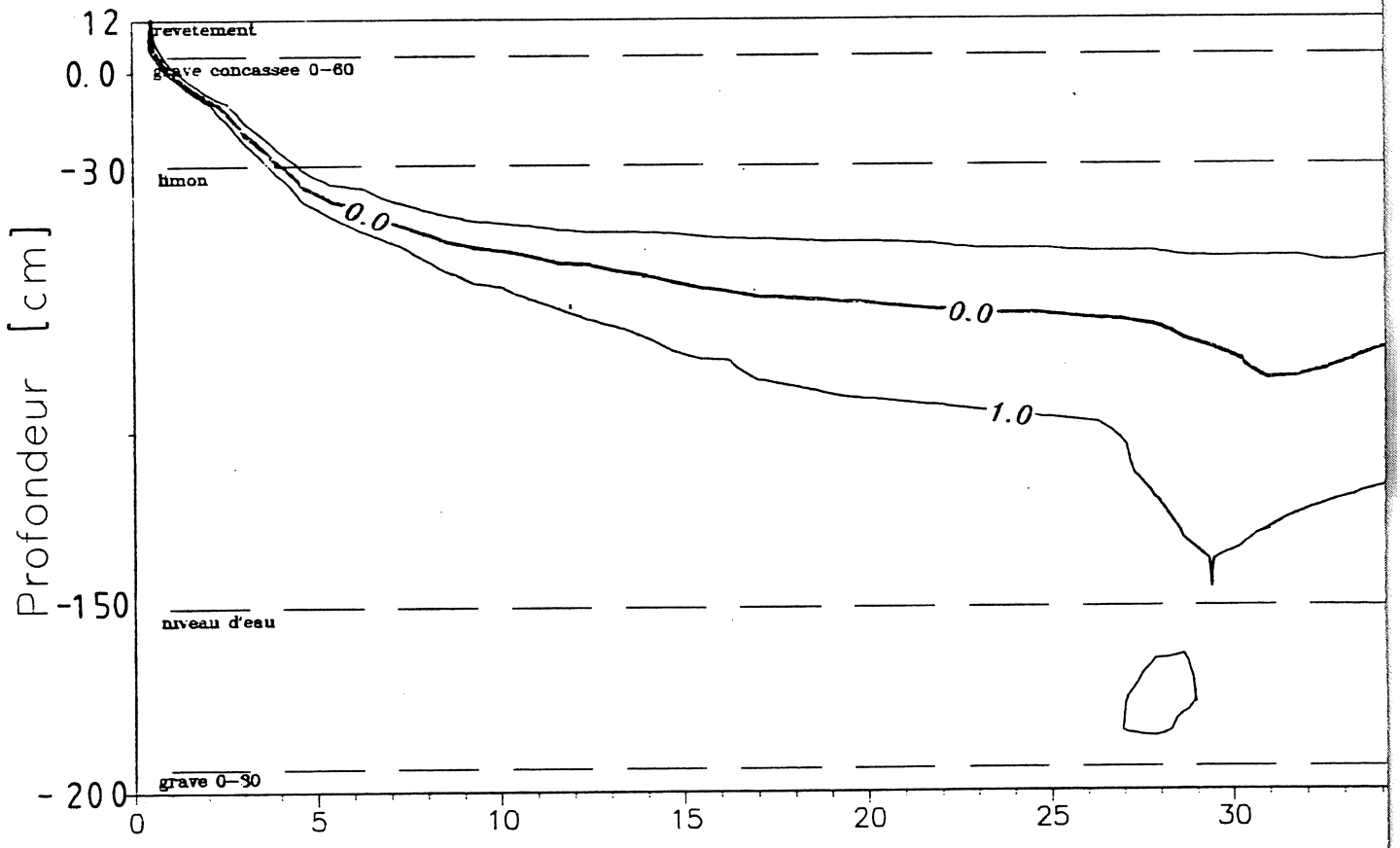
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

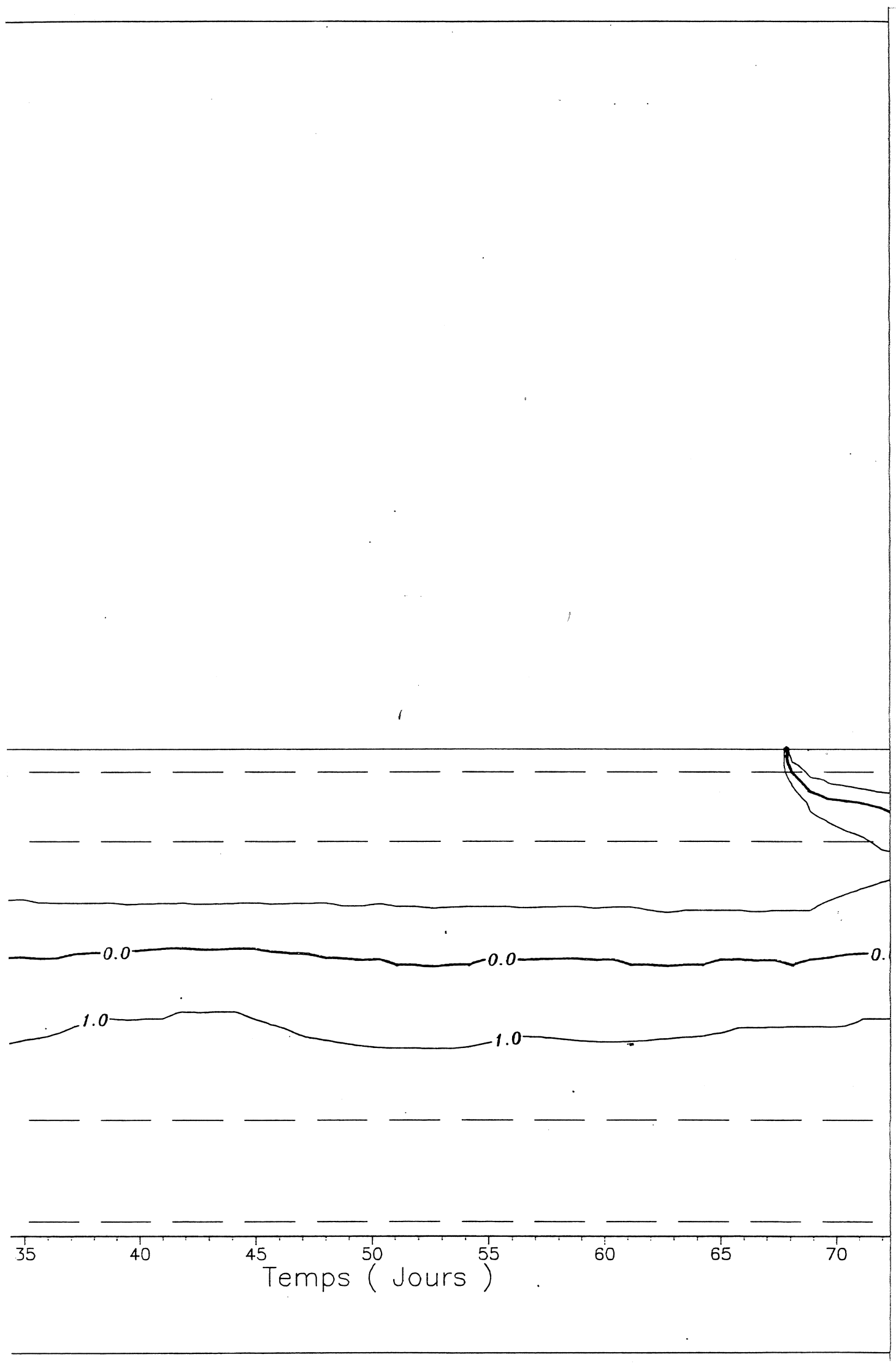
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

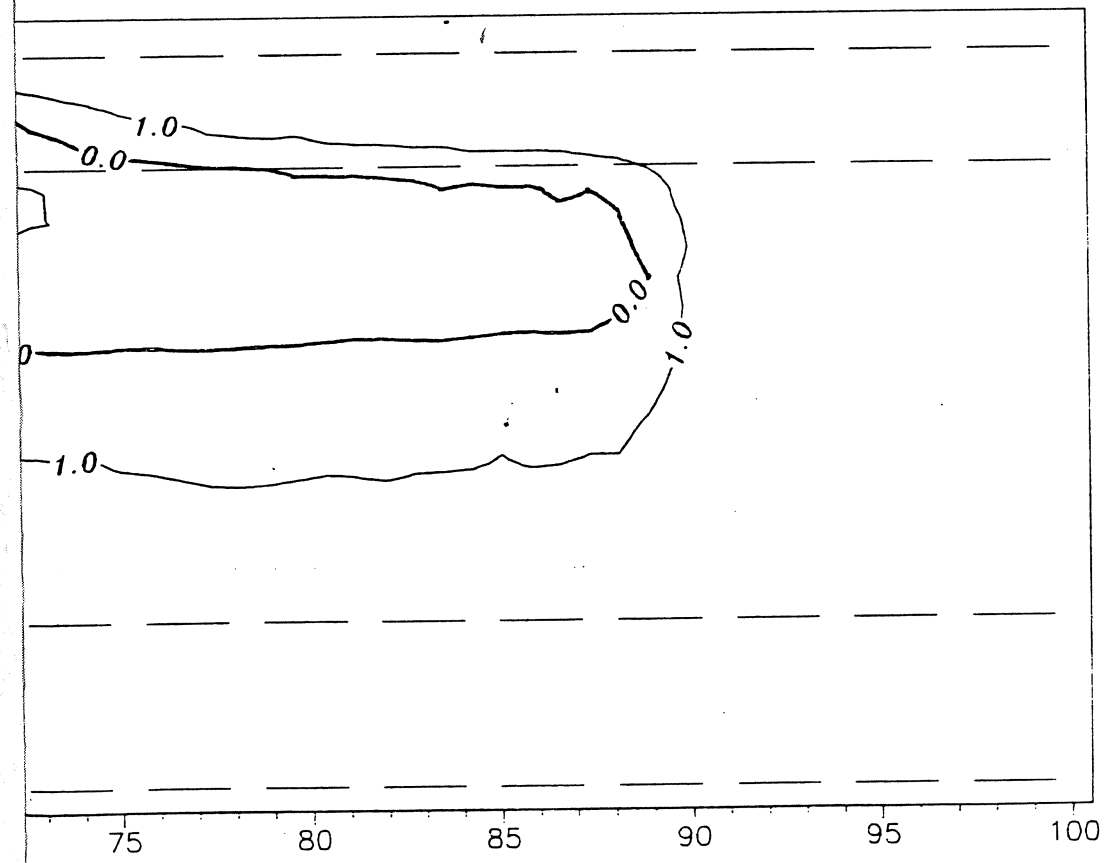
ISOTHERMES -1,0 et 1°C

Début de l'essai 1 : 31.08.87

Champ 1




0.0
0.0
0.
1.0
1.0
35
40
45
50
55
60
65
70
Temps (Jours)


1.0
0.0
0.0
1.0
0
1.0
75
80
85
90
95
100

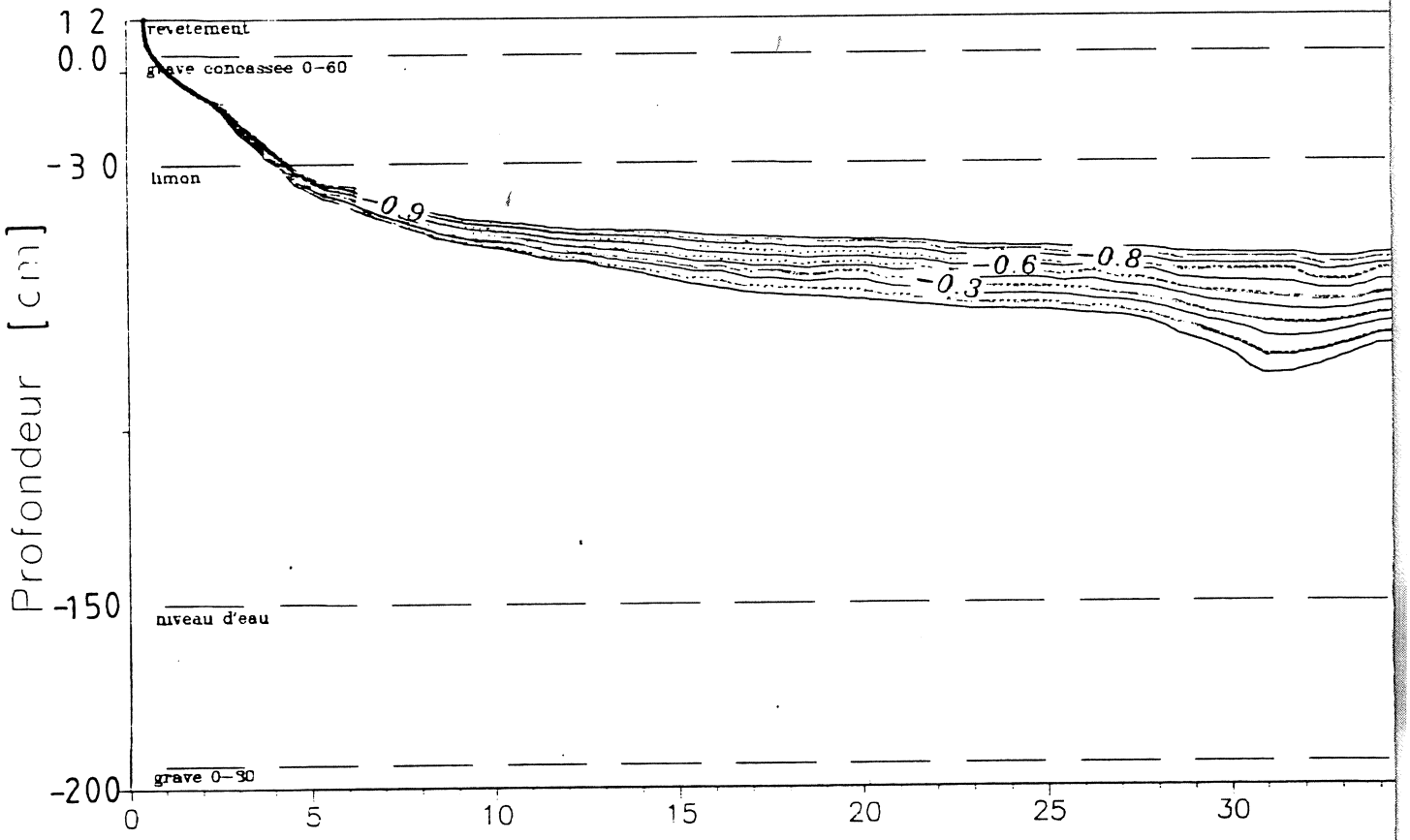
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

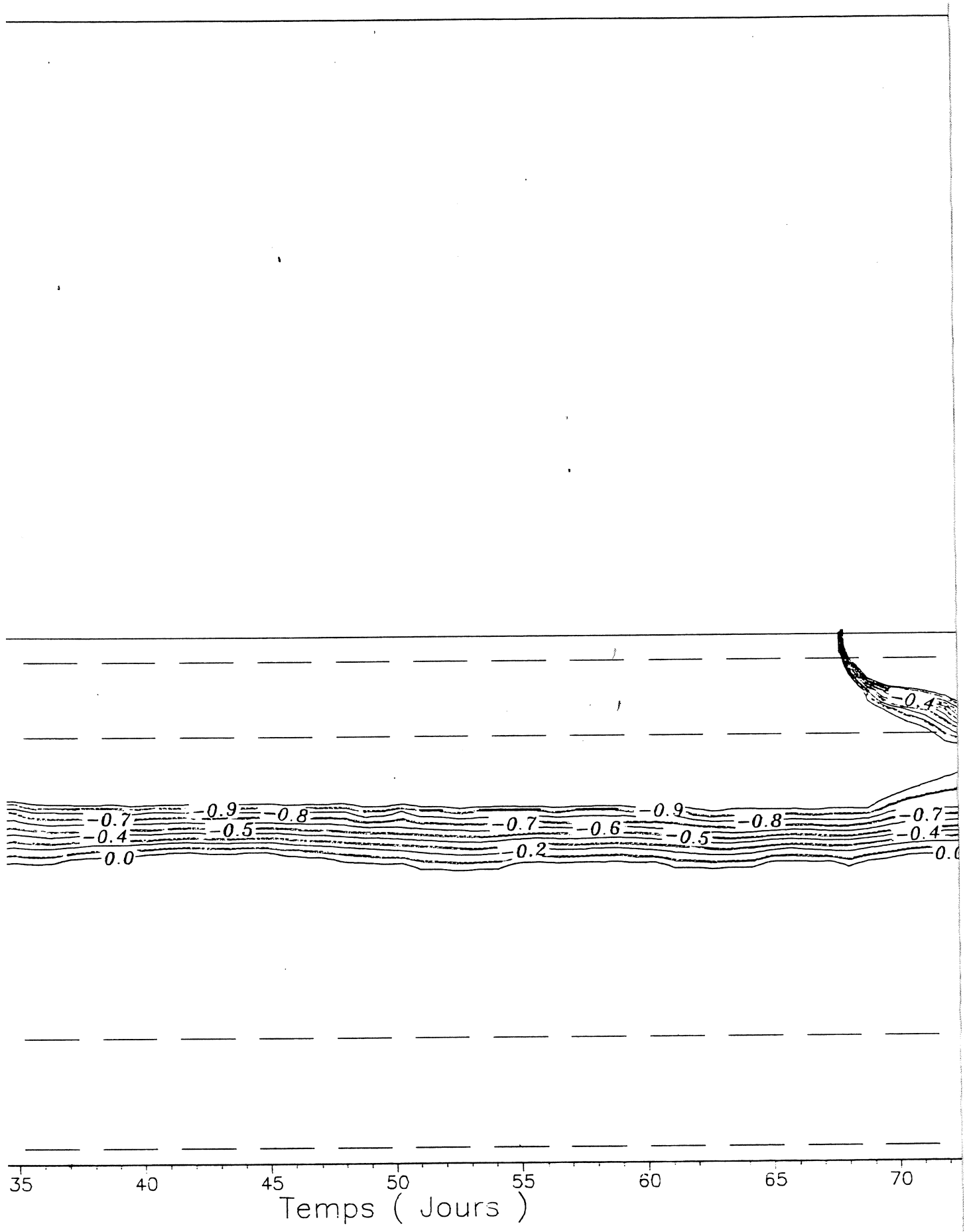
CYCLE DE GEL / DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

ISOTHERMES -1 à 0°C

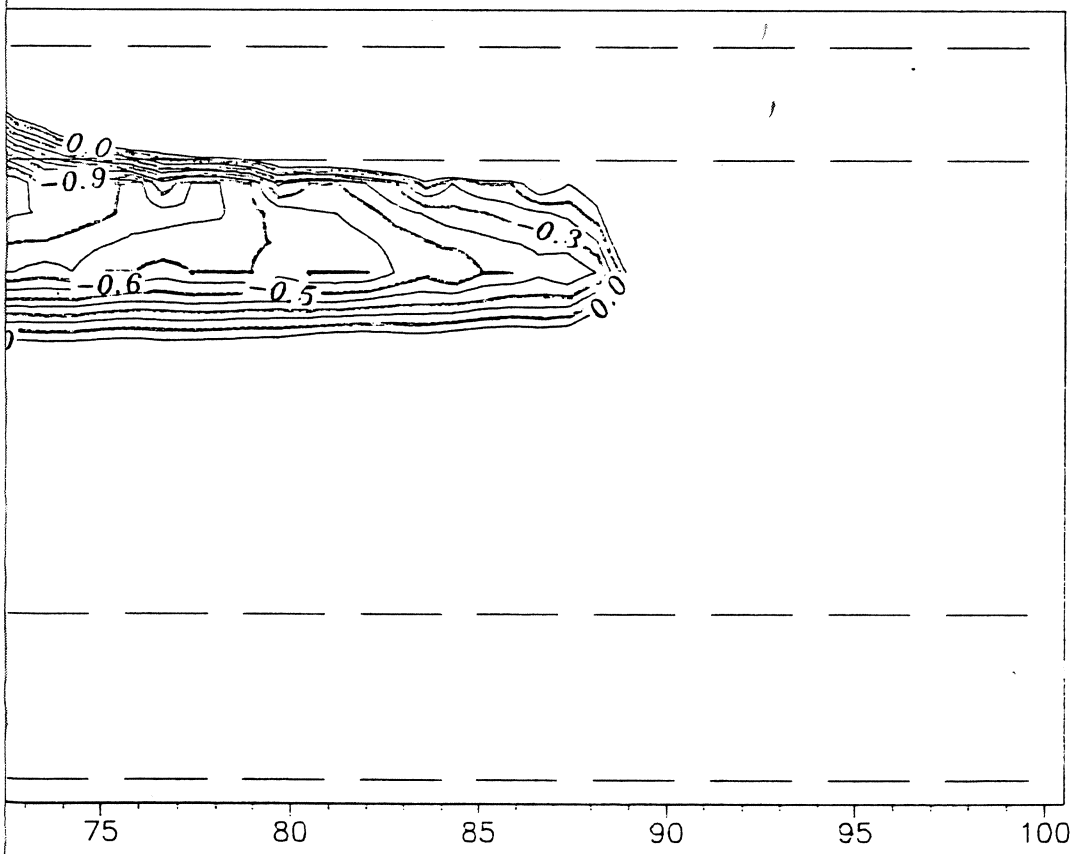
Début de l'essai 1 : 31.08.87

Champ 1




-0.4
-0.7
-0.9
-0.8
-0.9
-0.8
-0.7
-0.4
-0.5
-0.7
-0.6
-0.5
-0.4
0.0
-0.2
35
40
45
50
55
60
65
70
Temps (Jours)

G



Gy 22

ANNEXE 1-3

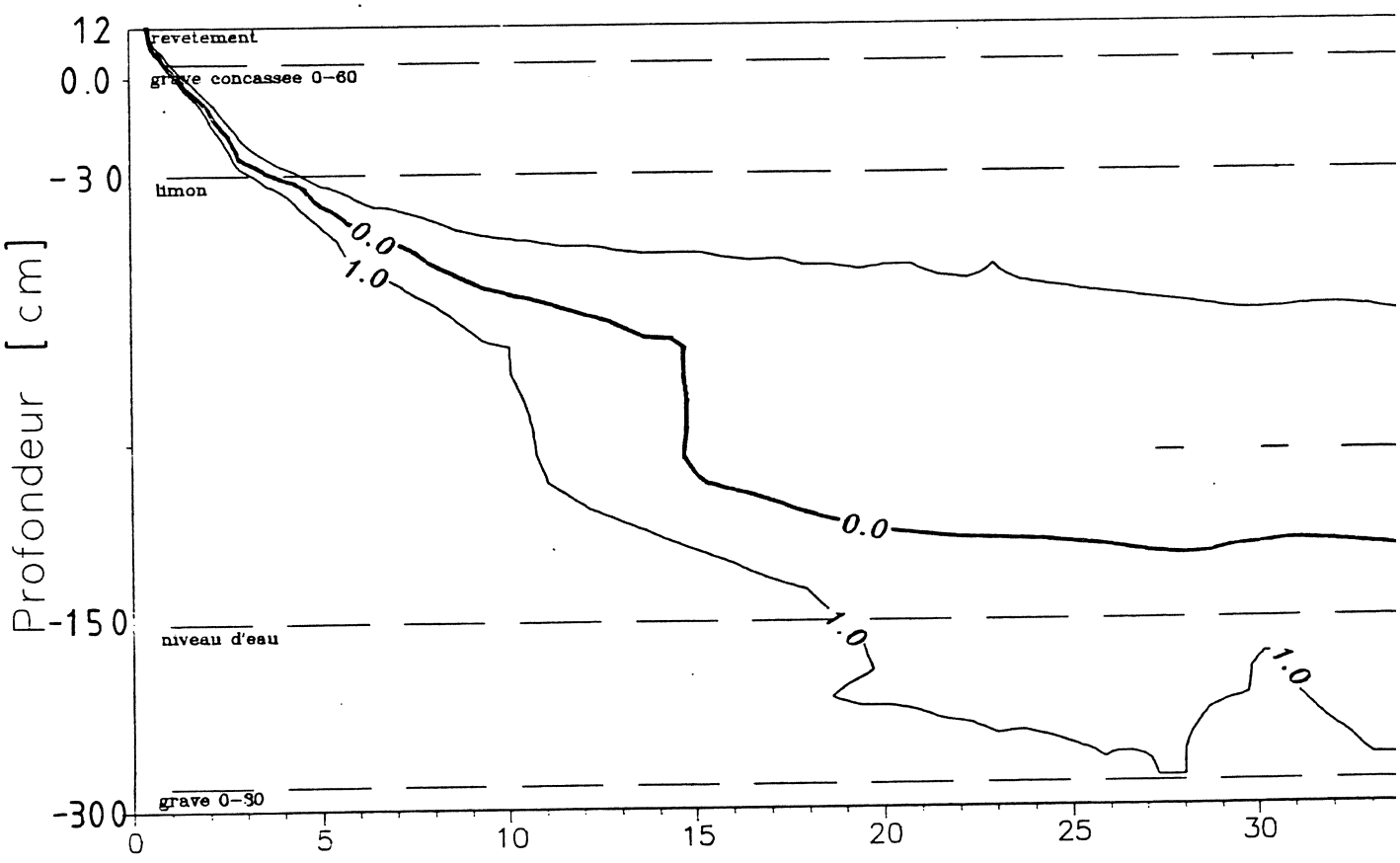
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

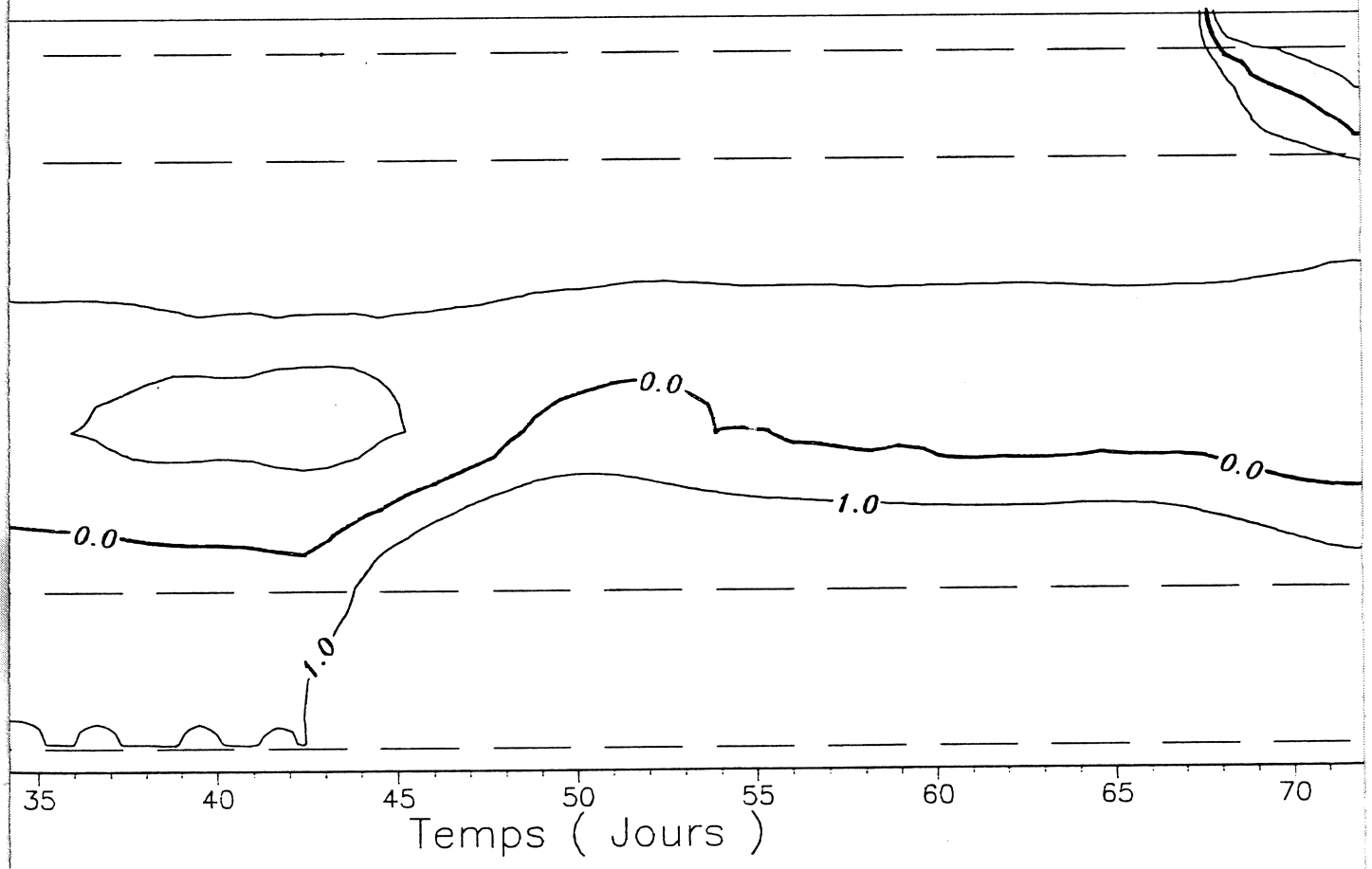
CYCLE DE GEL / DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

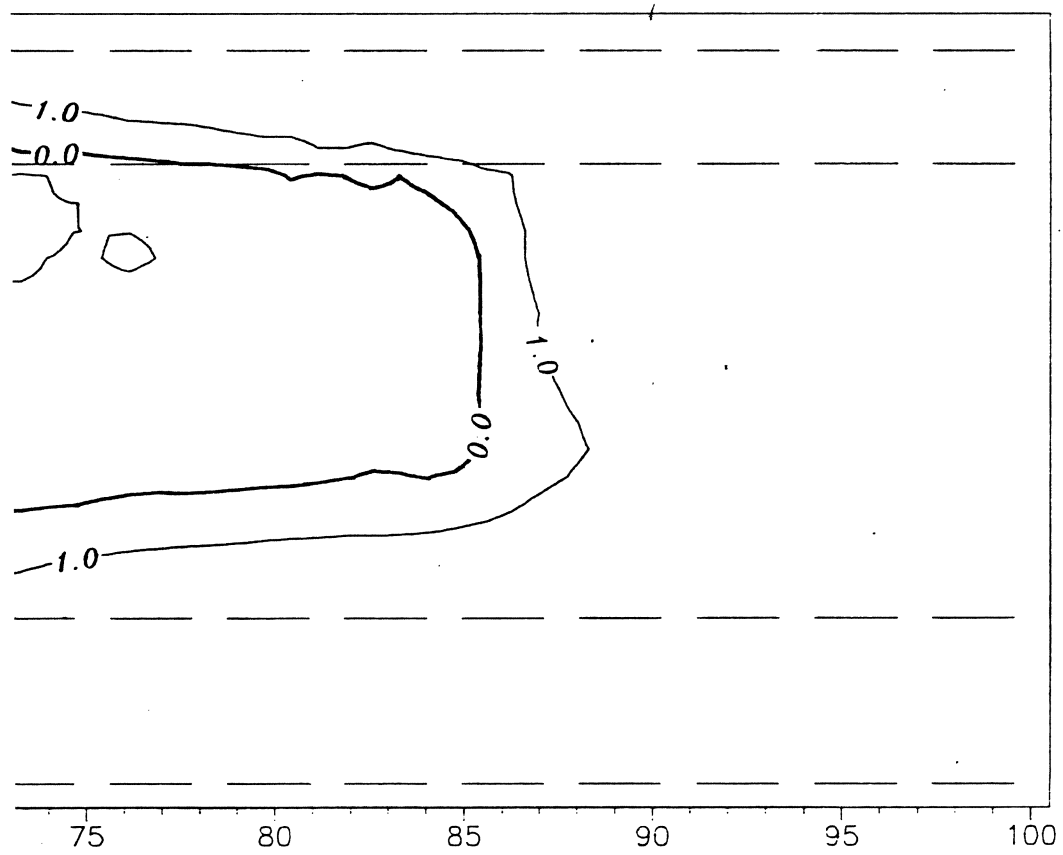
ISOTHERMES -1,0 et 1°C

Début de l'essai 1 : 31.08.87

Champ 2




0.0
0.0
0.0
1.0
1.0
35
40
45
50
55
60
65
70
Temps (Jours)


1.0
0.0
1.0
0.0
1.0
75
80
85
90
95
100

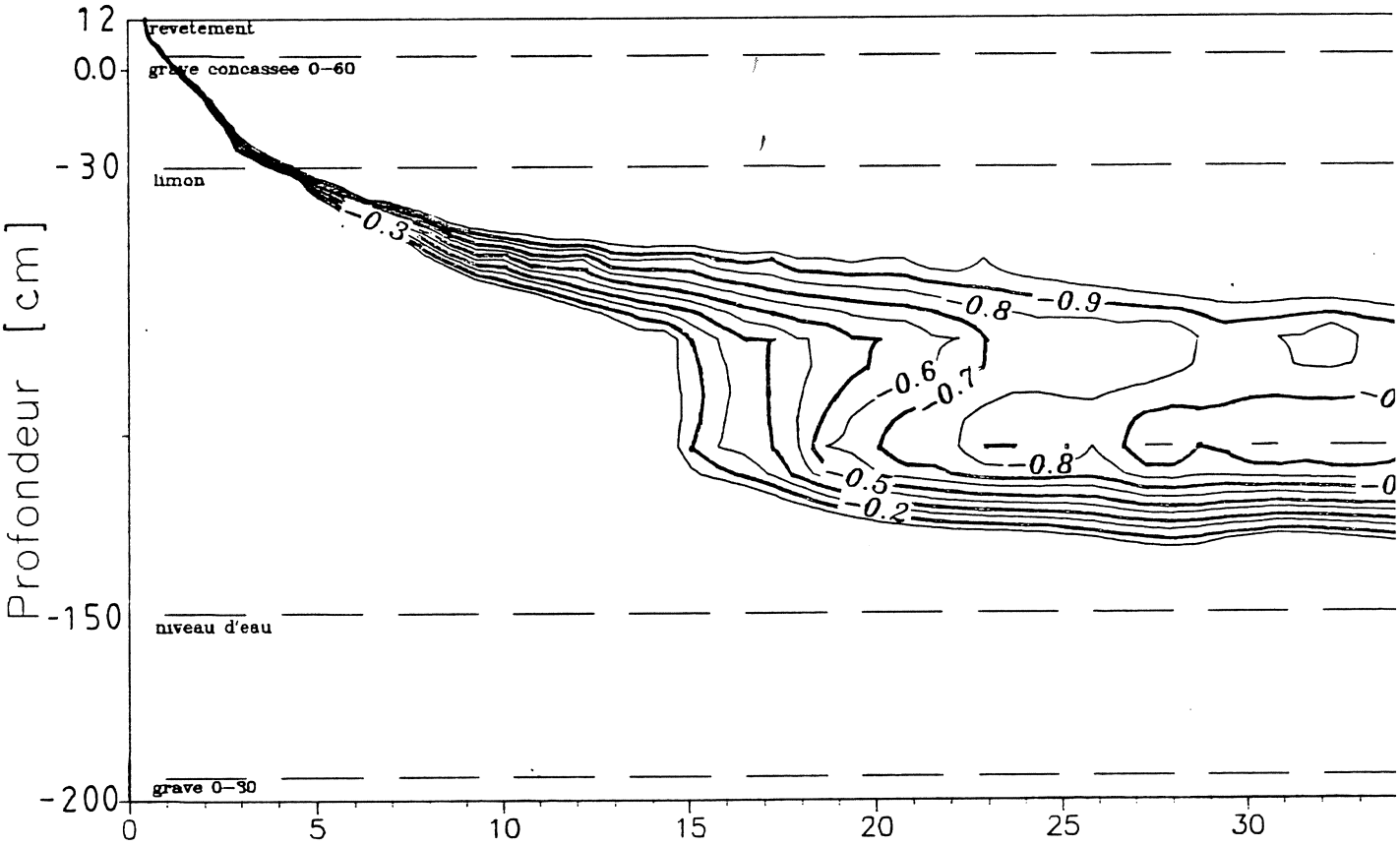
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

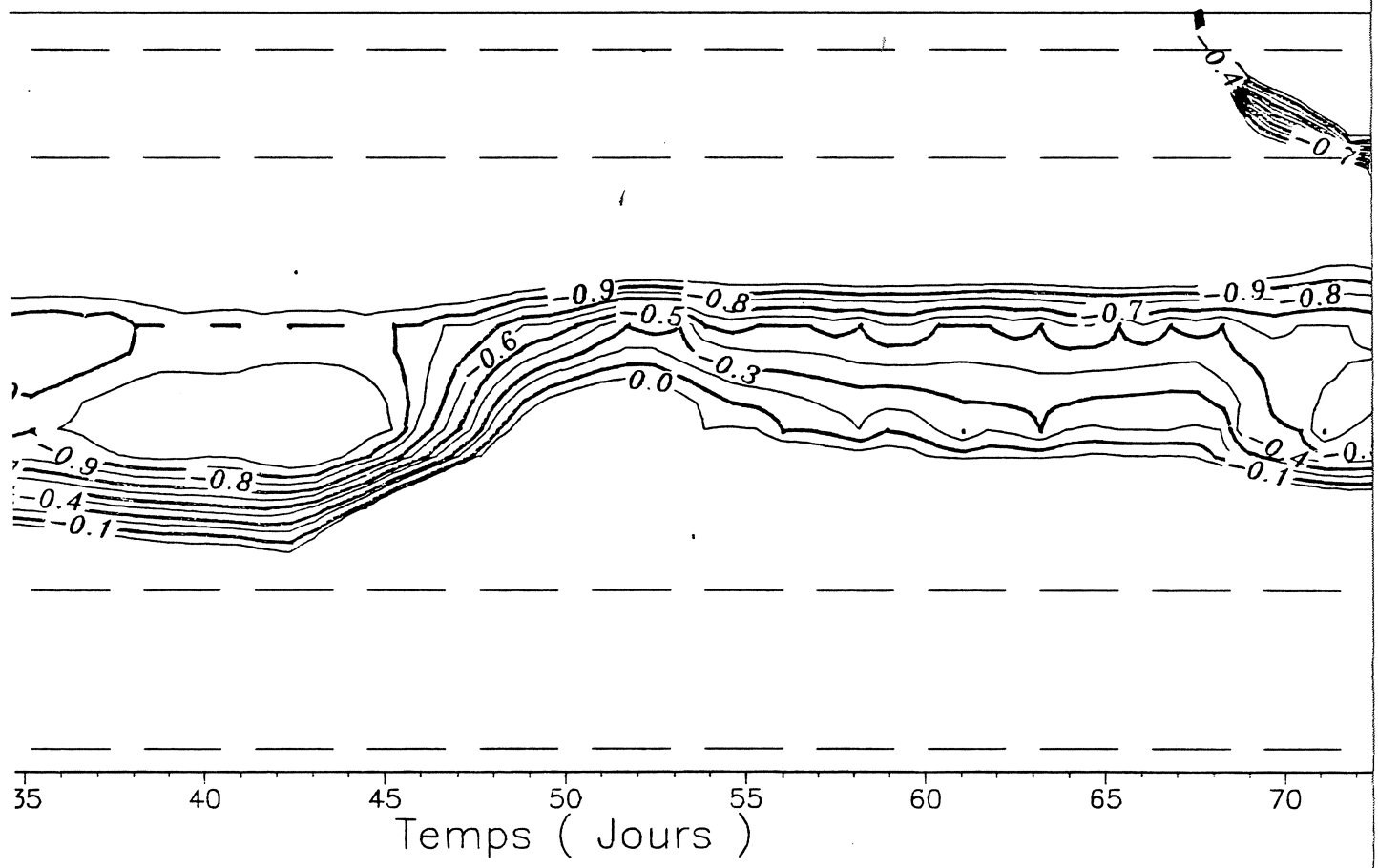
CYCLE DE GEL / DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

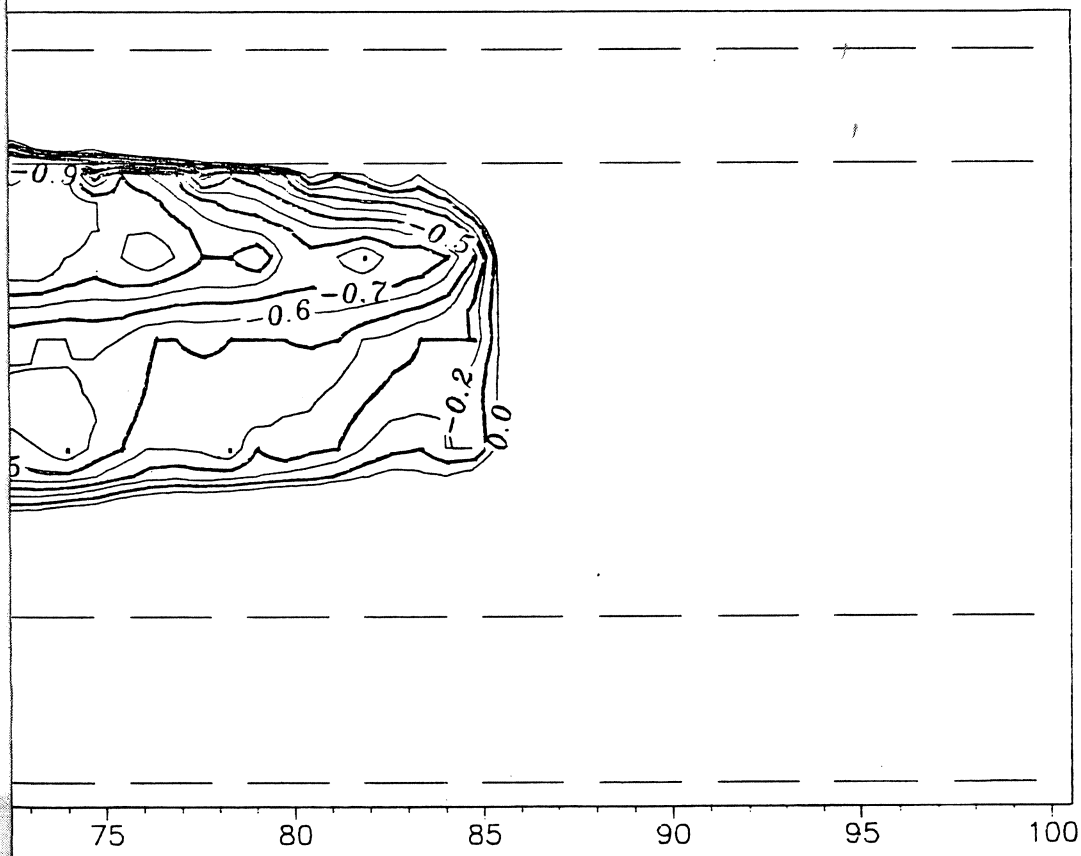
ISOTHERMES -1°C à 0°C

Début de l'essai 1 : 31.08.87

Champ 2




-0.4
-0.7
-0.9
-0.8
-0.5
-0.6
-0.7
-0.9
-0.8
-0.3
0.0
-0.9
-0.8
-0.4
-0.1
-0.4
-0.1
35
40
45
50
55
60
65
70
Temps (Jours)


-0.9
-0.5
-0.7
-0.6
-0.2
0.0
75
80
85
90
95
100

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

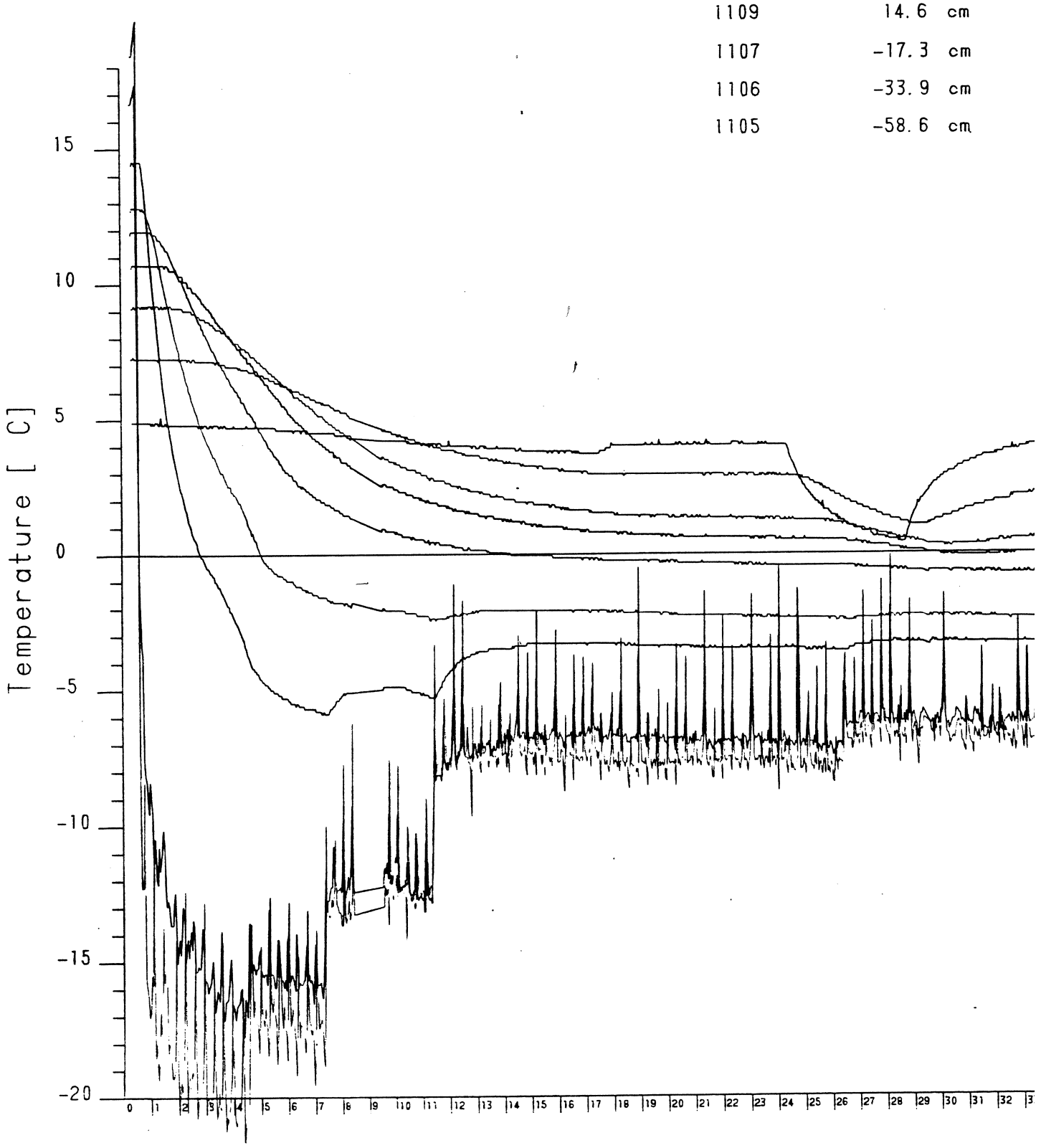
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS
(A UNE PROFONDEUR DONNEE)

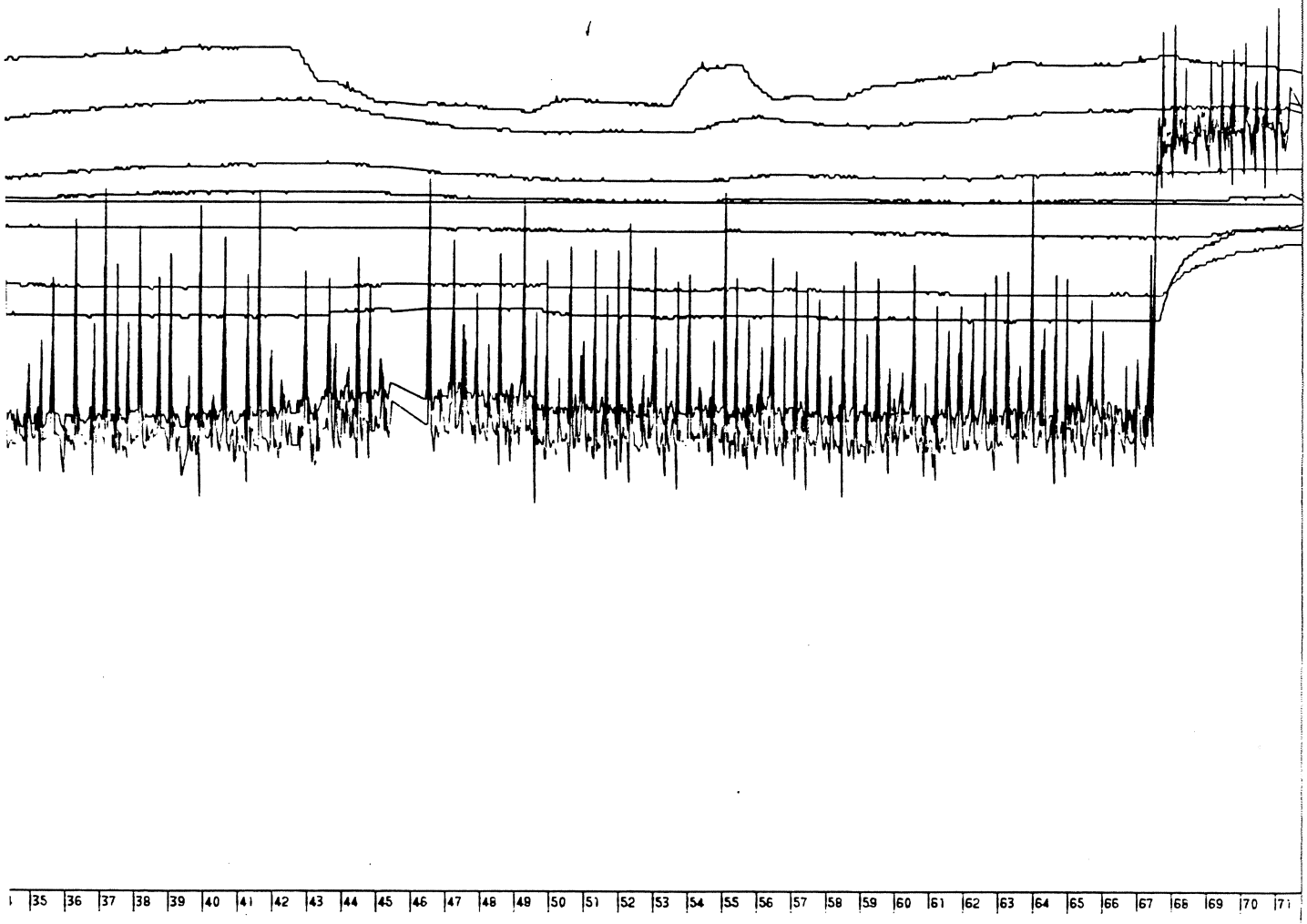
Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

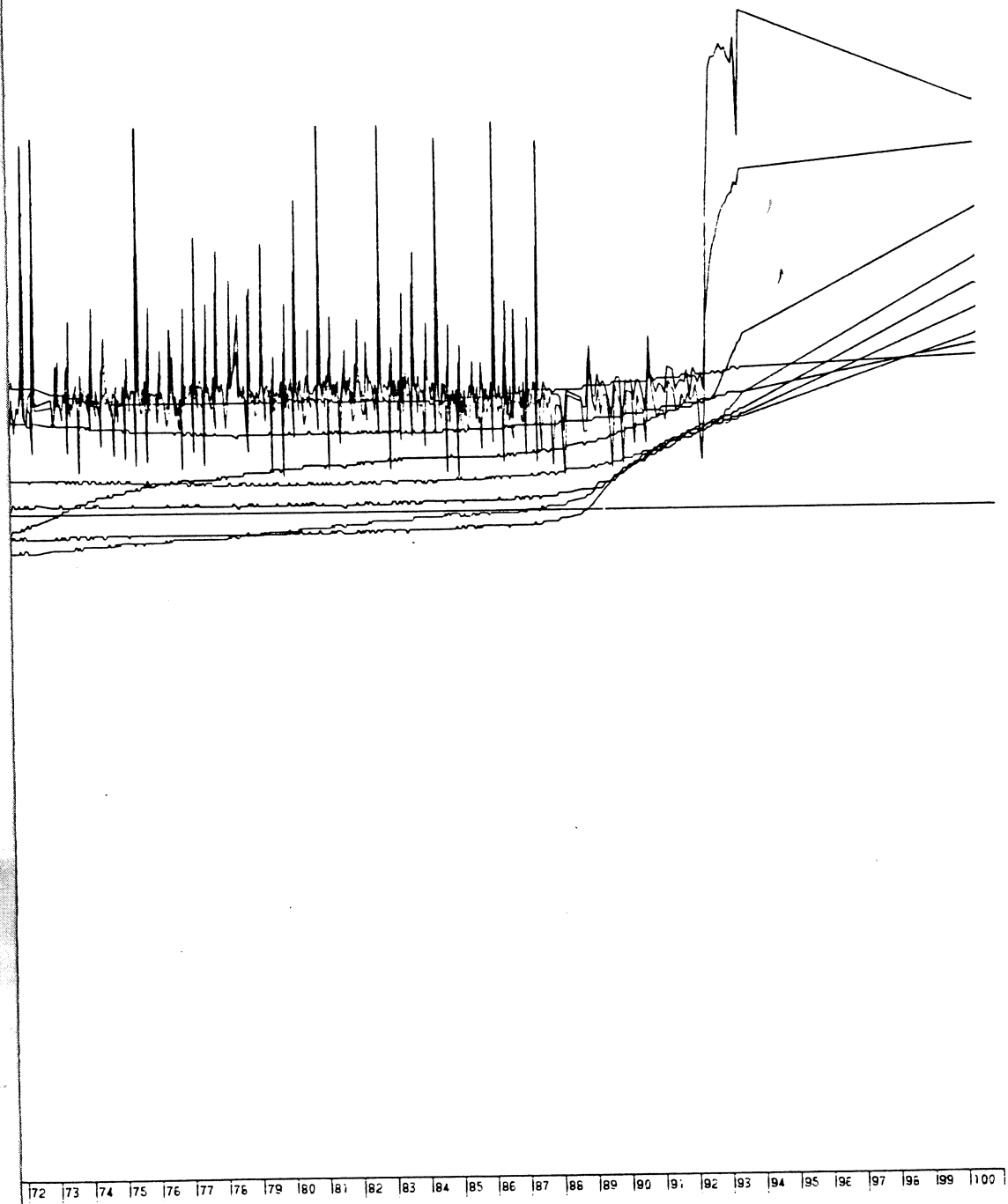
Champ 1

Capteur N°	Profondeur
1110	163.0 cm
1109	14.6 cm
1107	-17.3 cm
1106	-33.9 cm
1105	-58.6 cm



Capteur N	Profondeur
1104	-81.6 cm
1103	-104.0 cm
1102	-145.0 cm
1101	-187.0 cm




72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

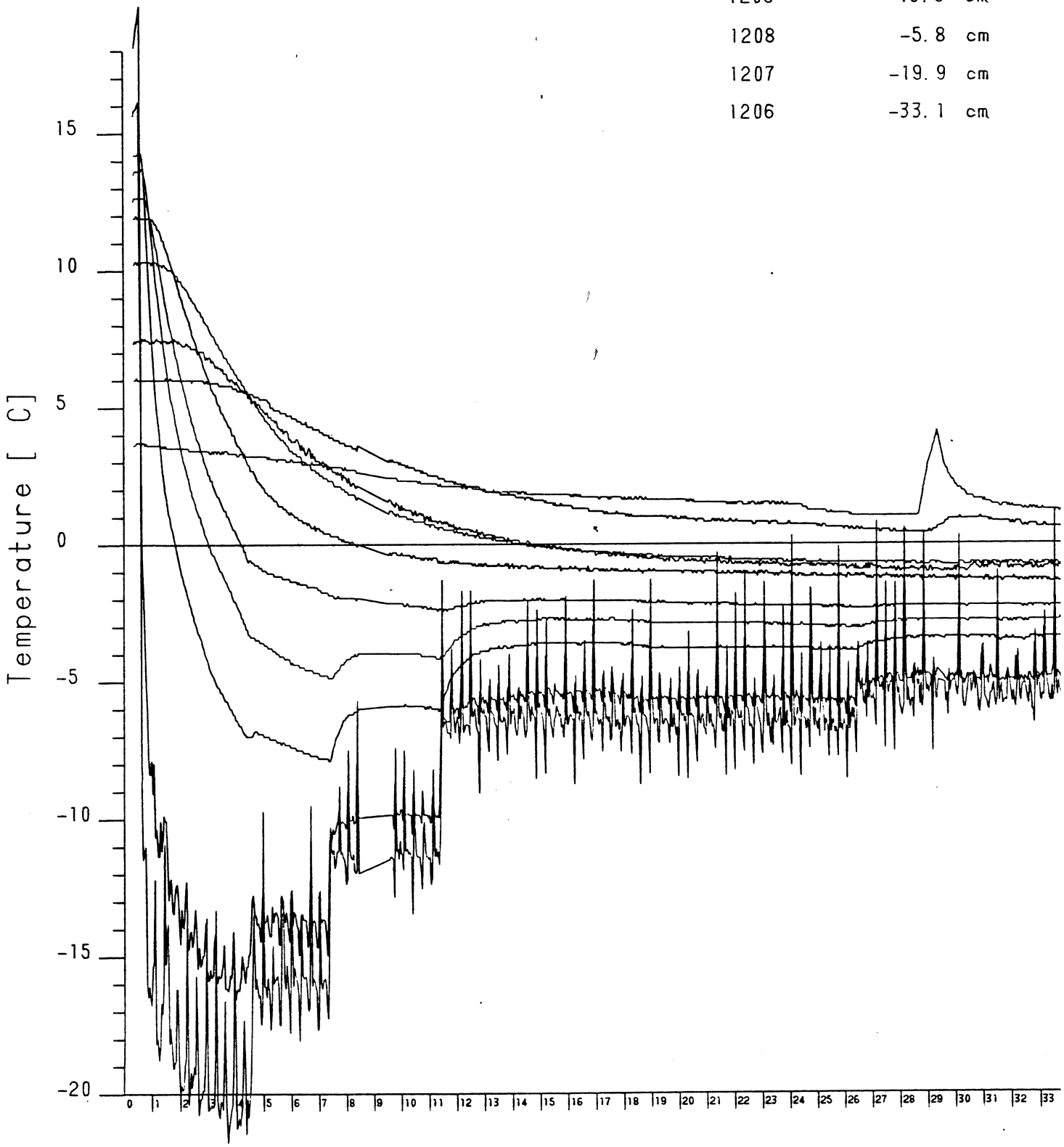
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS
(A UNE PROFONDEUR DONNEE)

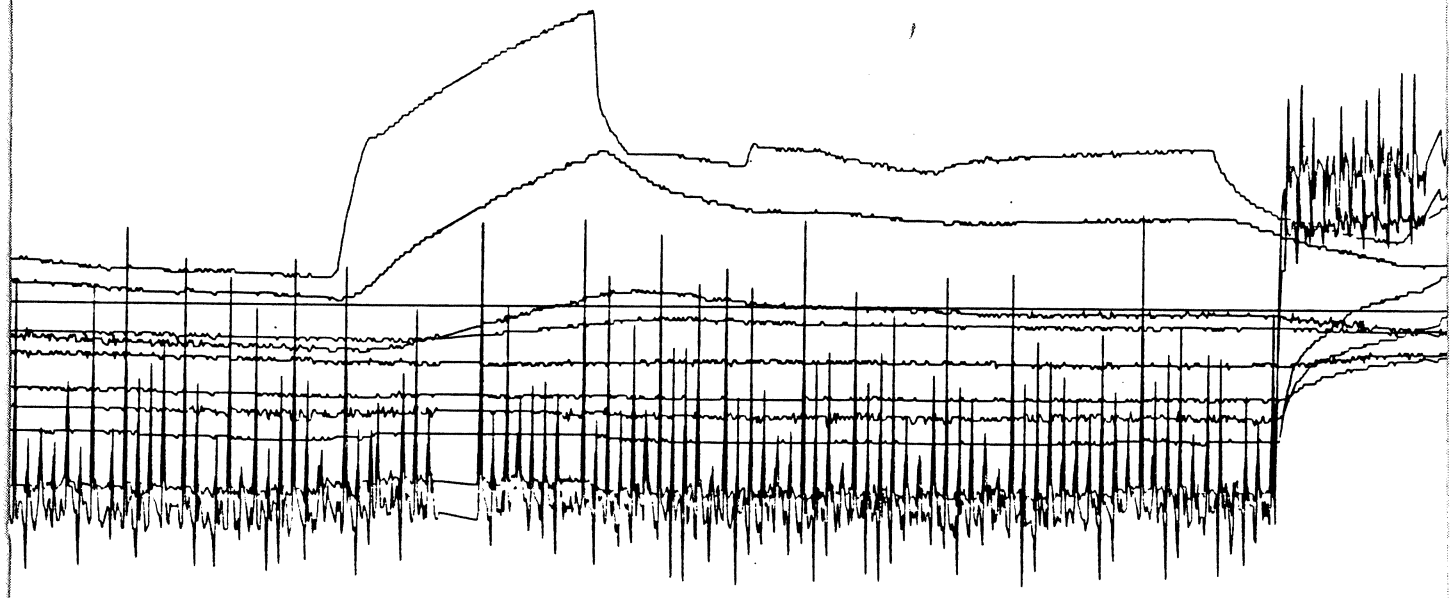
Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2

Capteur N°	Profondeur
1210	163.0 cm
1209	13.9 cm
1208	-5.8 cm
1207	-19.9 cm
1206	-33.1 cm

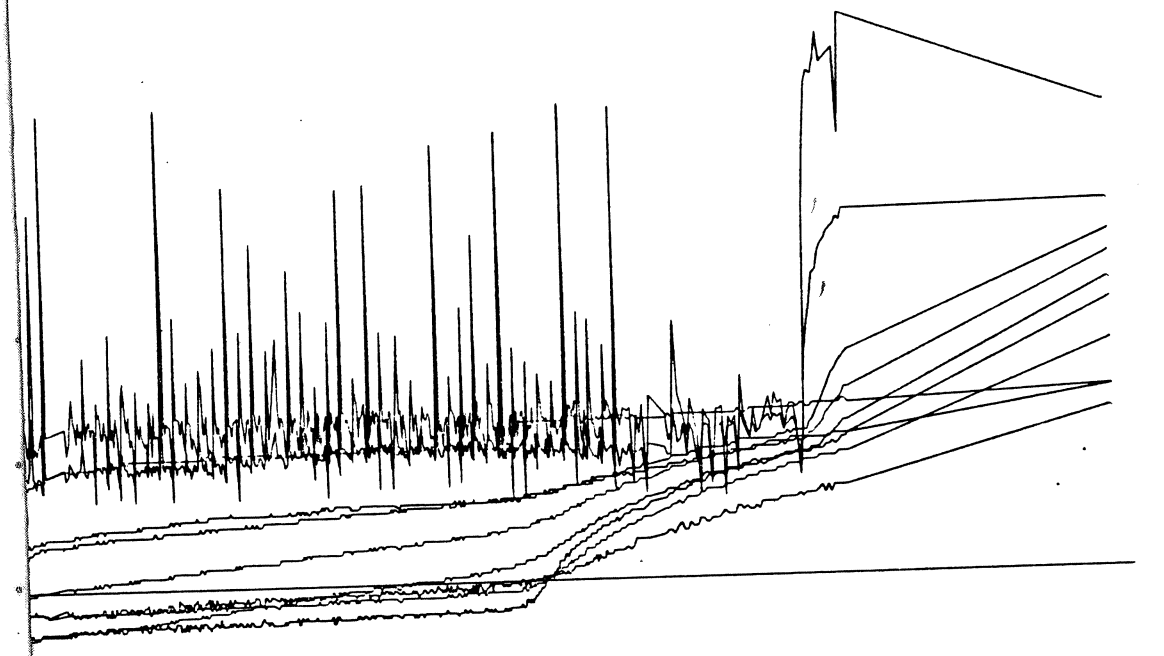


Capteur N	Profondeur
1205	-49.6 cm
1204	-75.5 cm
1203	-103.0 cm
1202	-148.0 cm
1201	-189.0 cm



4 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71

Temps [jours]



72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

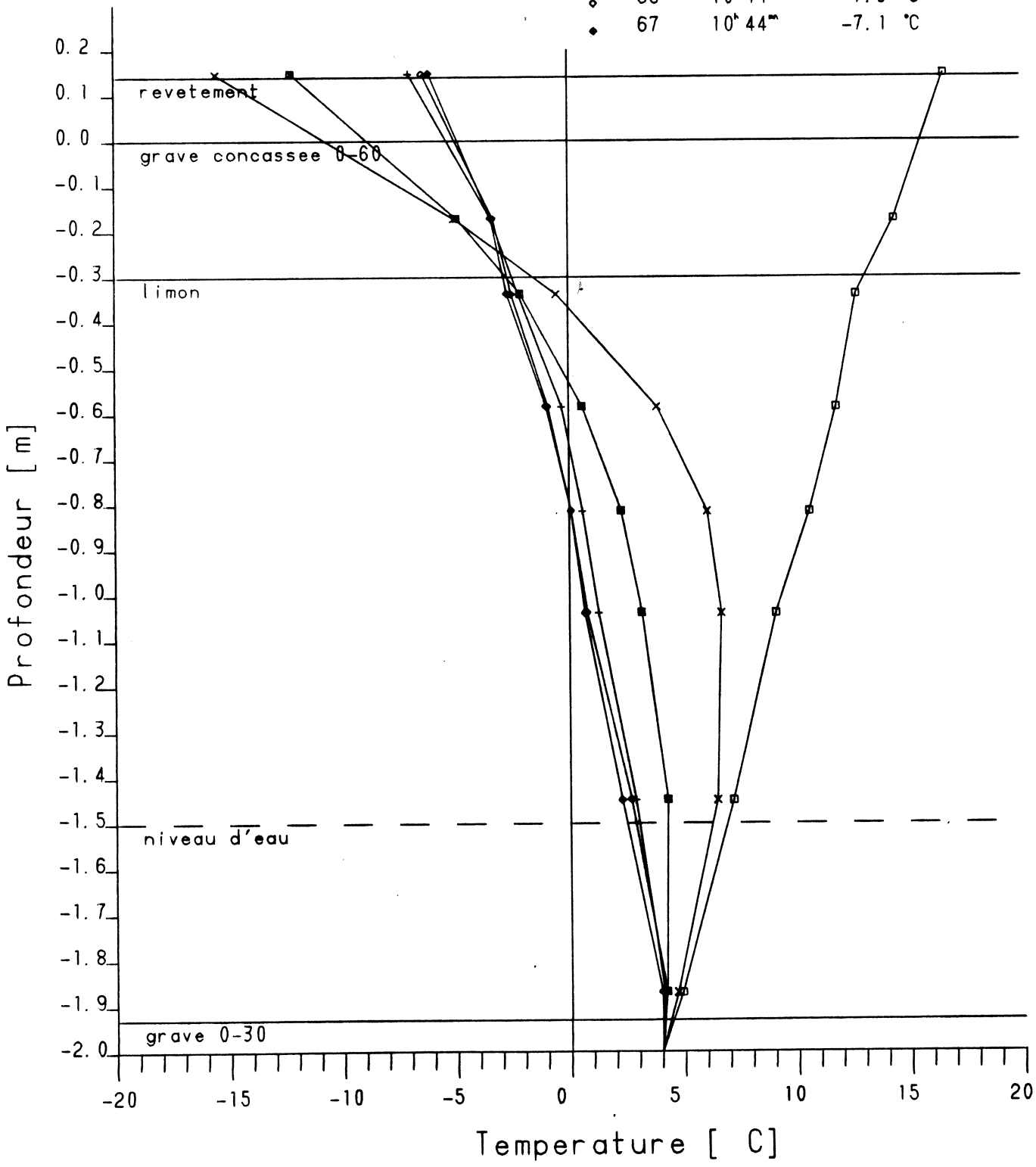
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	0	10h 0mn	18.4 °C
×	5	10h 4mn	-16.9 °C
■	10	10h 3mn	-14.3 °C
+	20	10h 5mn	-7.8 °C
◇	55	10h 44mn	-7.3 °C
◆	67	10h 44mn	-7.1 °C



LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

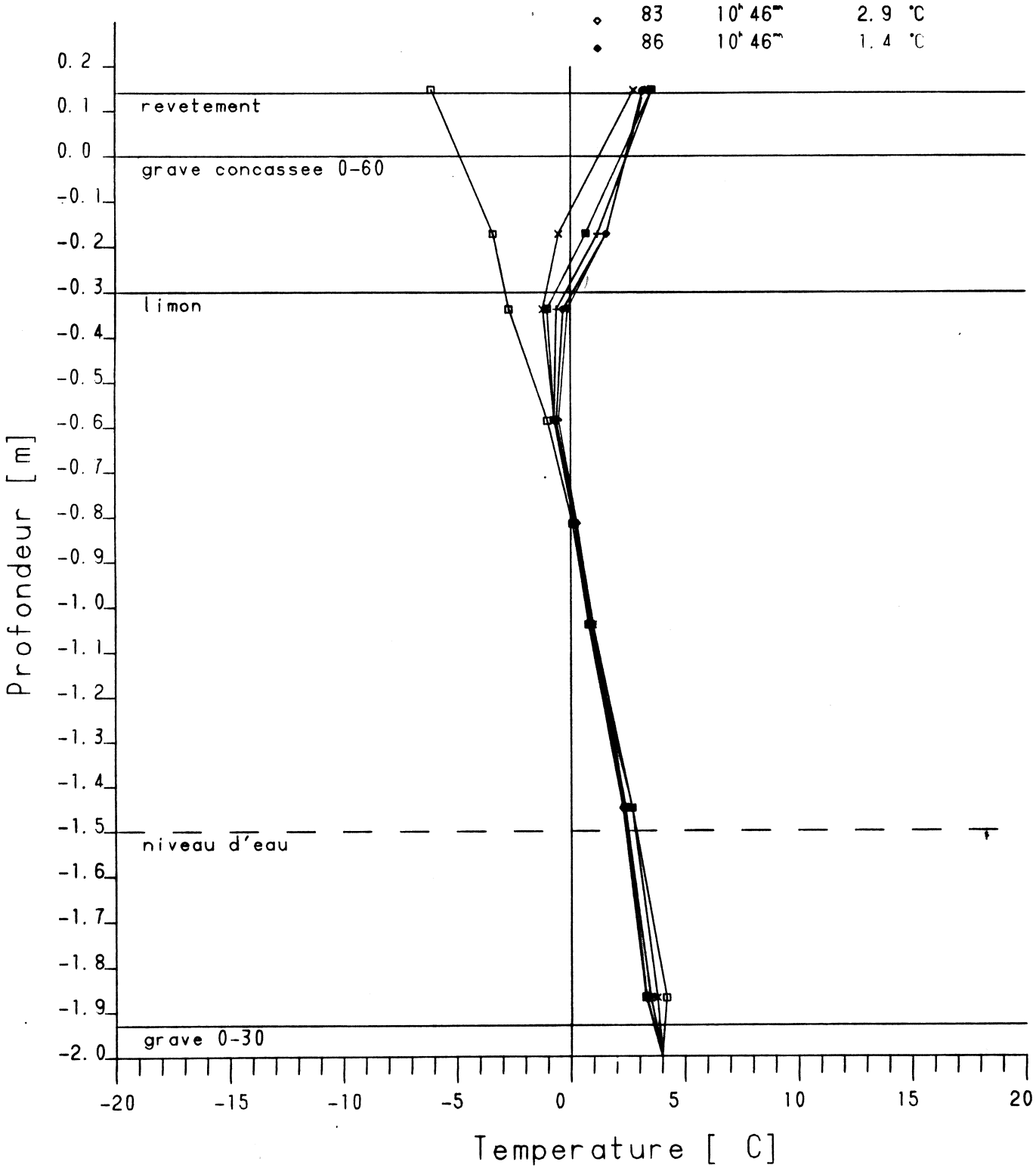
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DÔNNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	67	10h 44mn	-7.1 °C
×	71	20h 39mn	2.4 °C
■	75	10h 41mn	3.6 °C
+	79	10h 28mn	3.6 °C
◇	83	10h 46mn	2.9 °C
◆	86	10h 46mn	1.4 °C



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

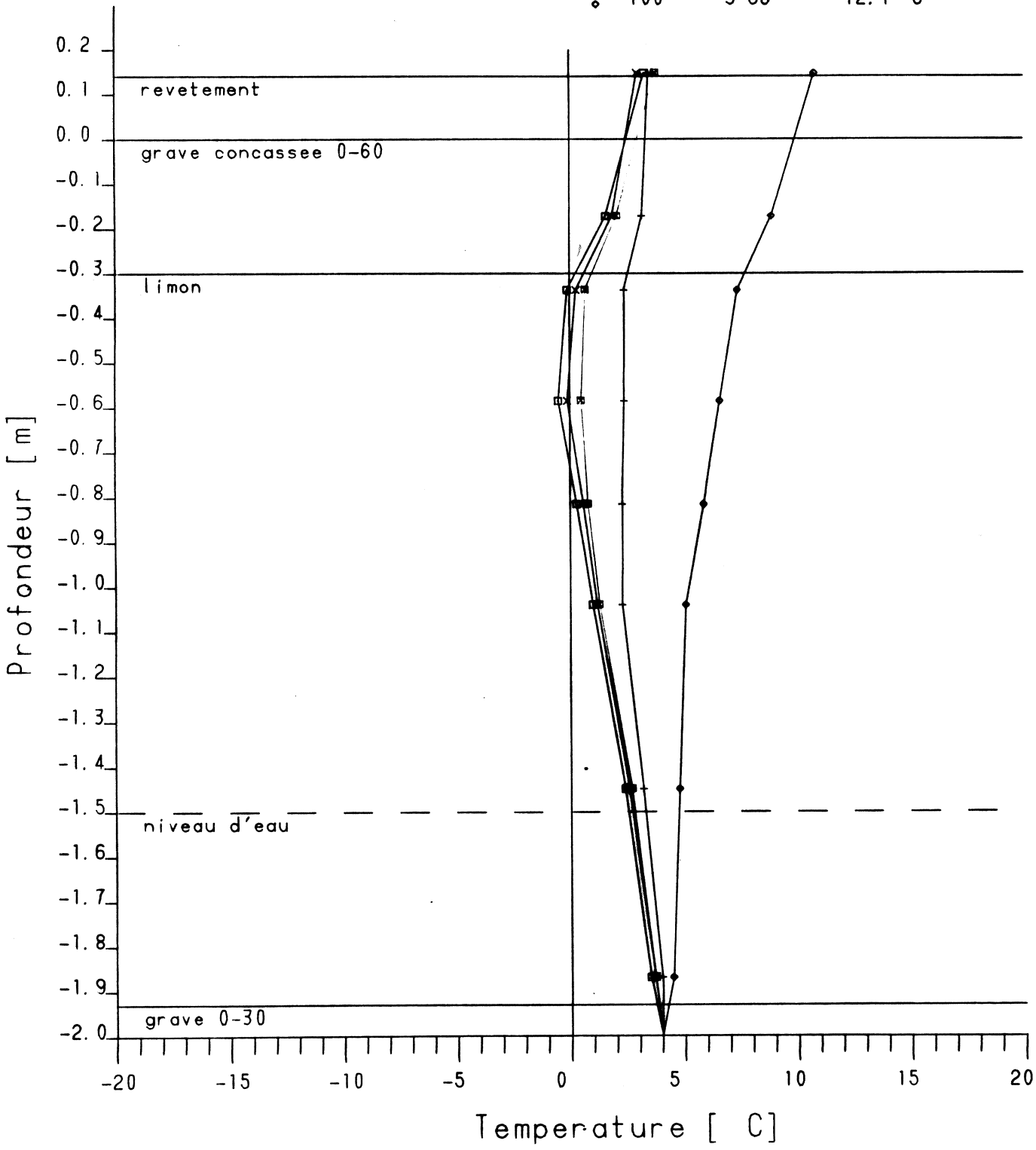
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	86	10h 46mn	1.4 °C
×	88	20h 10mn	2.3 °C
■	89	10h 10mn	3.4 °C
+	92	9h 58mn	2.9 °C
◇	100	9h 58mn	12.1 °C



LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

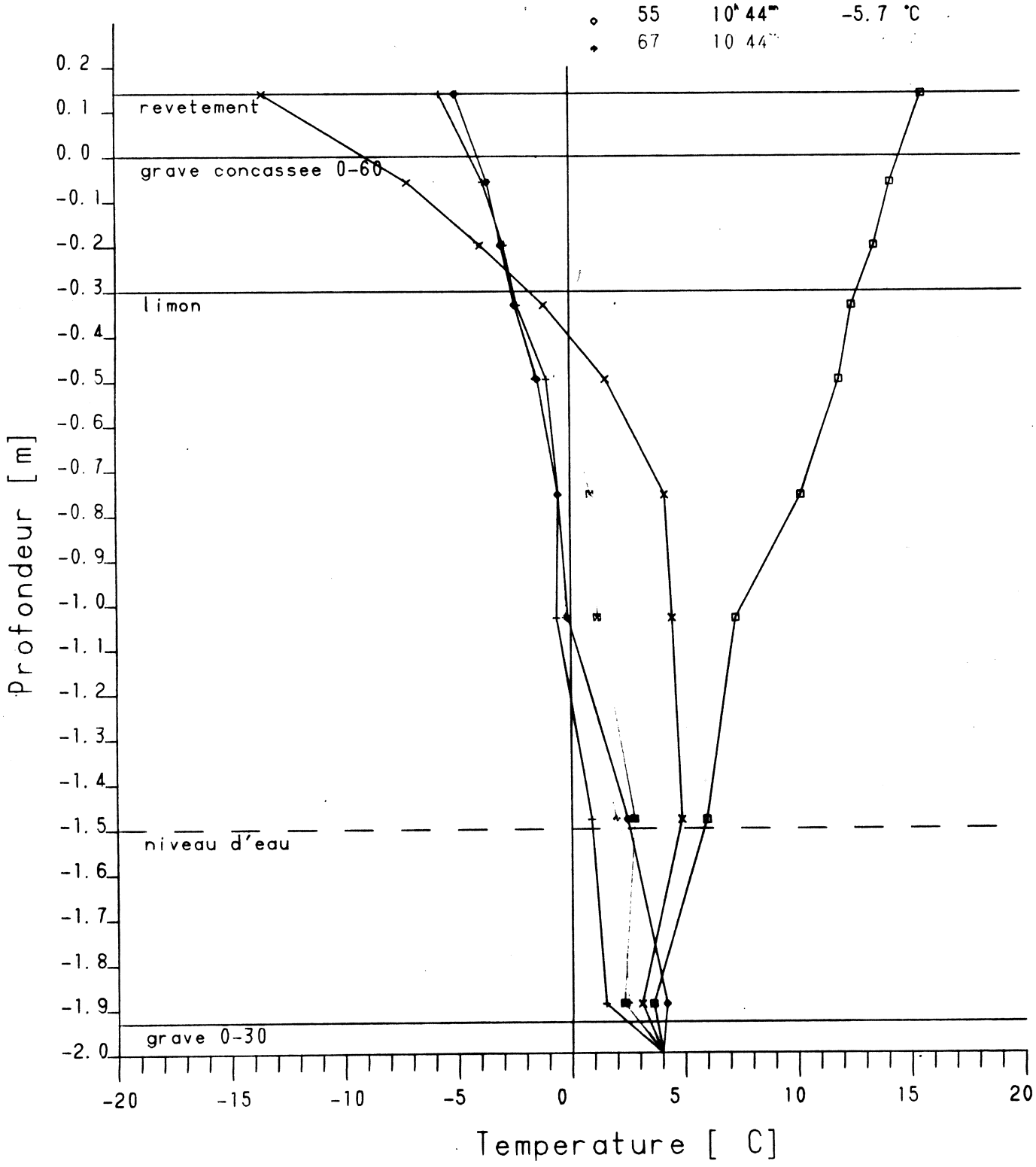
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	0	10h 0m	18.1 °C
×	5	10h 4m	-15.9 °C
■	10	10 3	
+	20	10h 5m	-6.3 °C
◇	55	10h 44m	-5.7 °C
◆	67	10 44	



LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

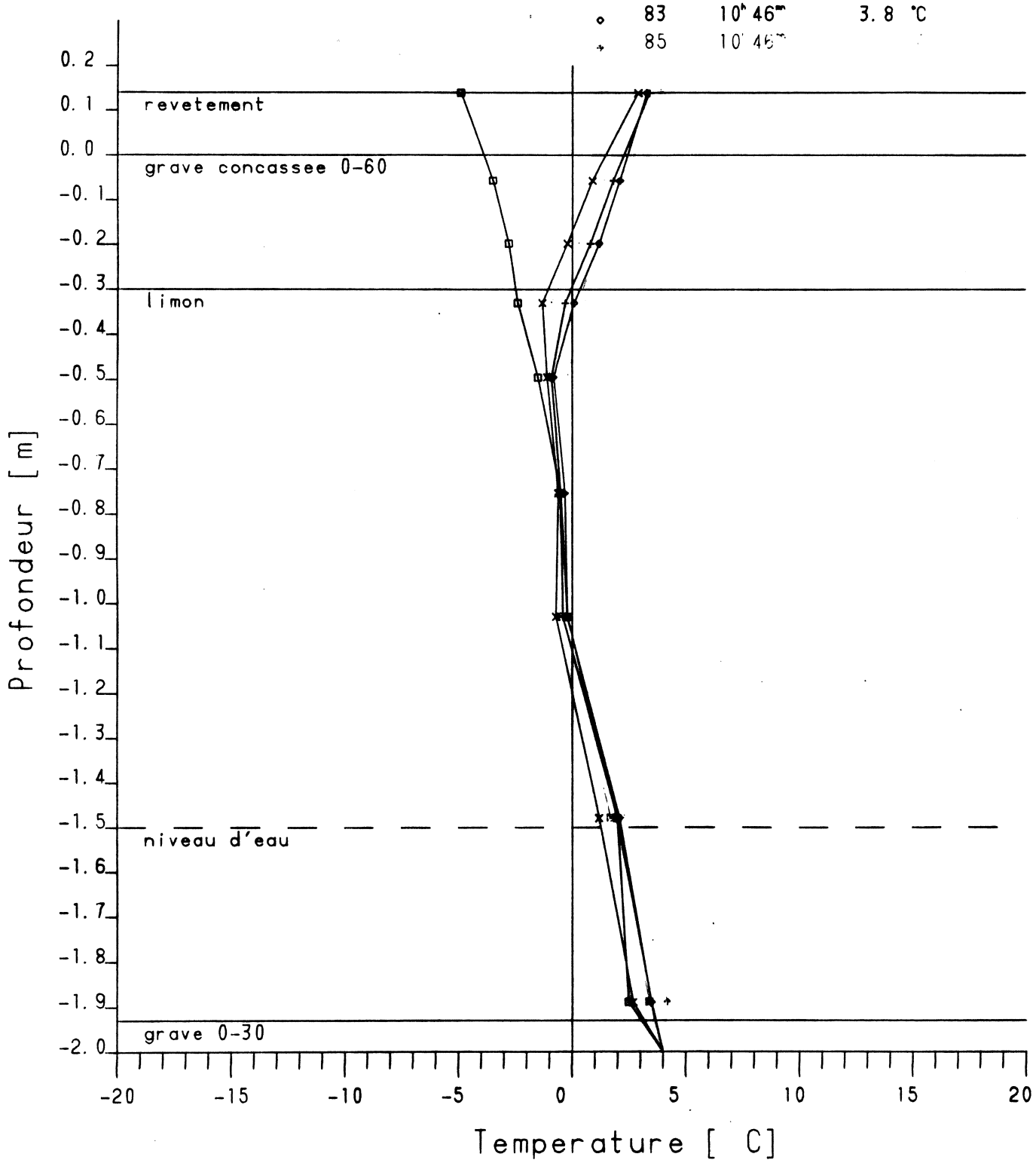
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	67	10h44m	-5.7 °C
×	71	20h39m	3.8 °C
■	75	10 41	
+	79	10h28m	4.1 °C
◇	83	10h46m	3.8 °C
+	85	10 46m	



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

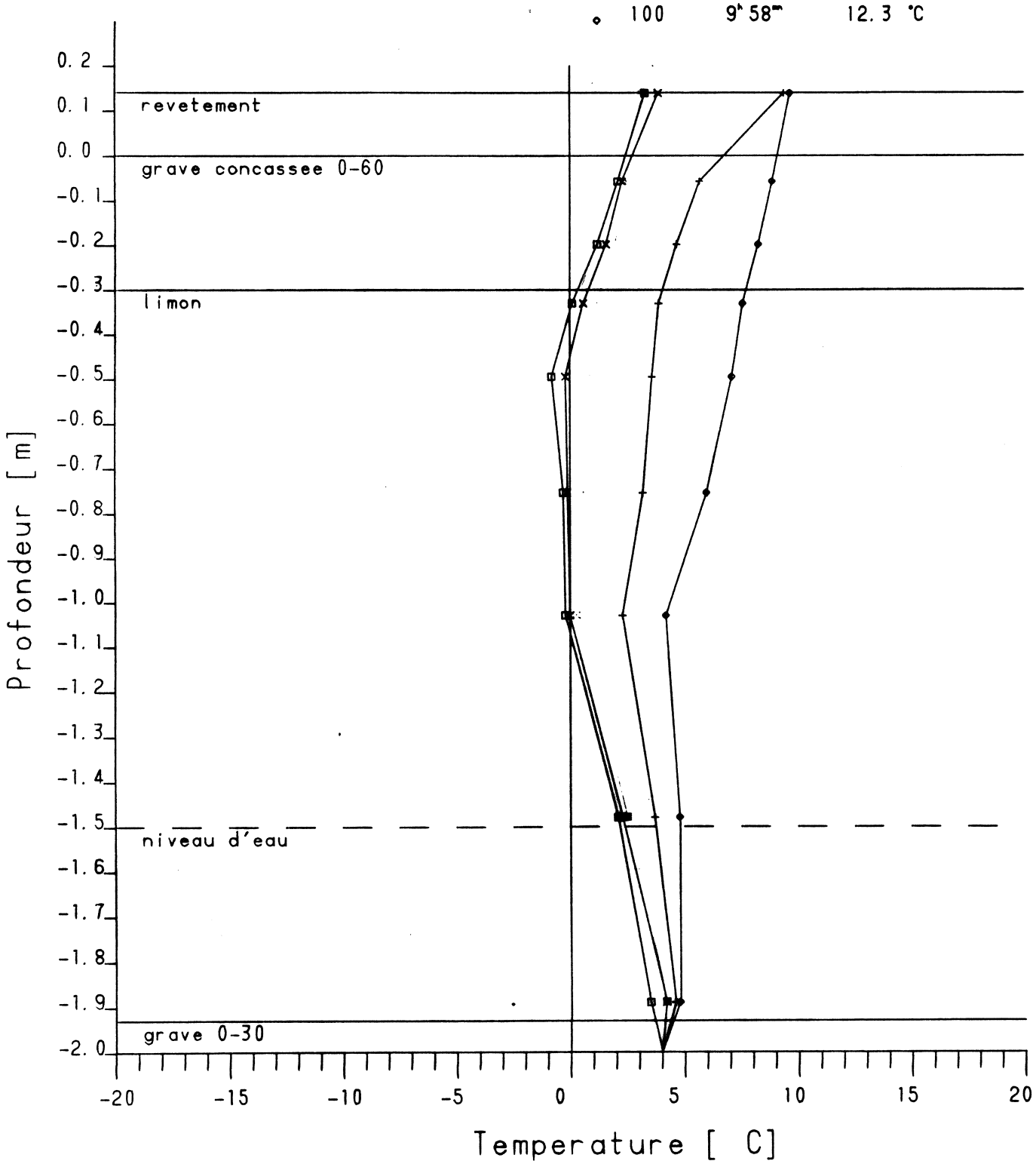
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	83	10h 46mn	3.8 °C
×	85	10h 46mn	5.5 °C
■	86	10 46	
+	93	9h 58mn	13.9 °C
◇	100	9h 58mn	12.3 °C



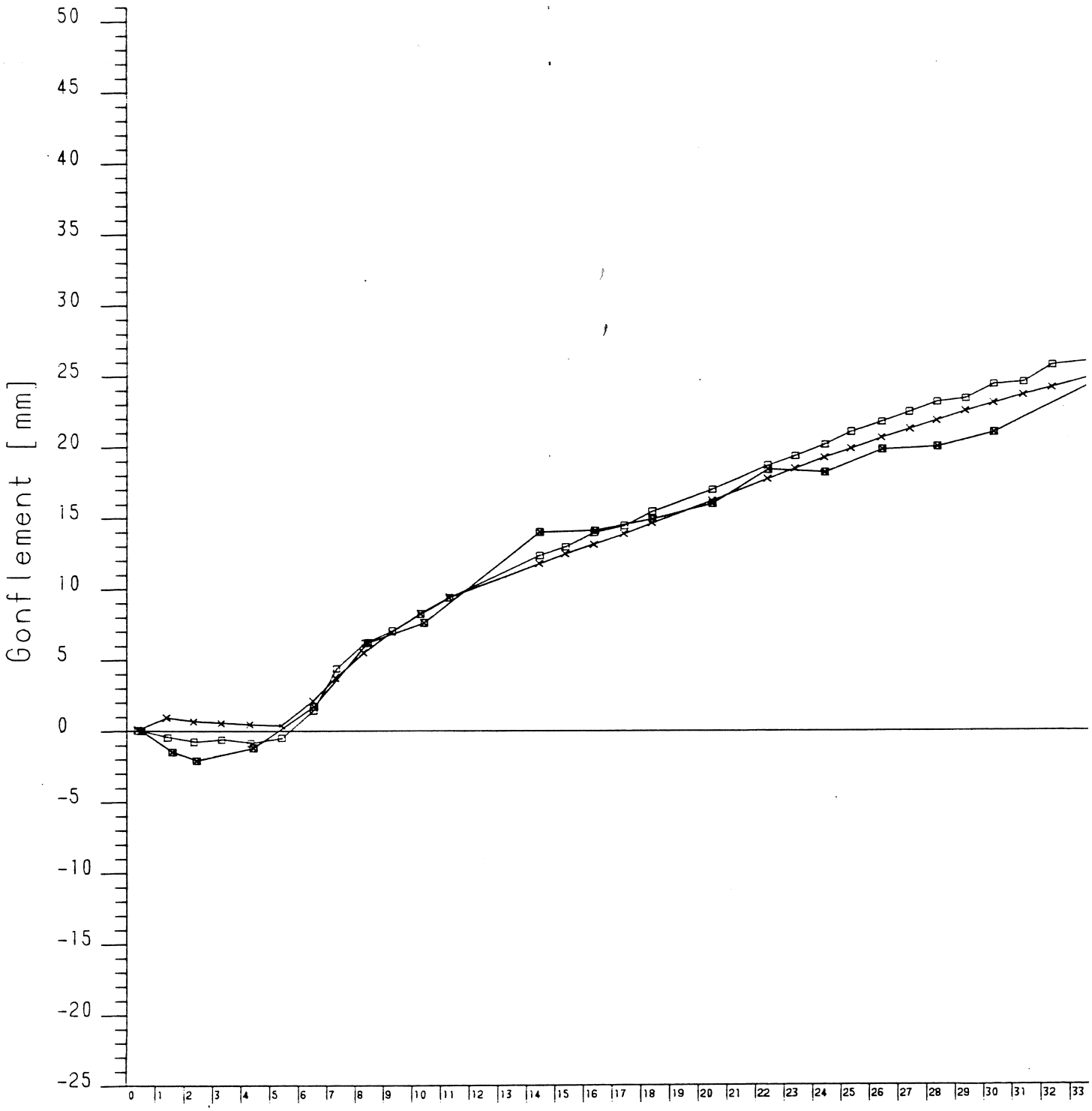
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

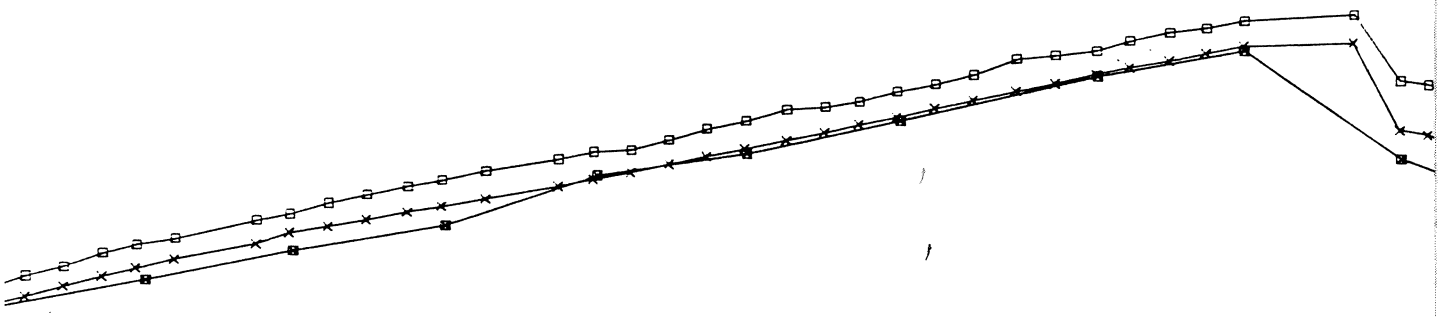
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS
(MESURES A LA SURFACE DU SOL)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

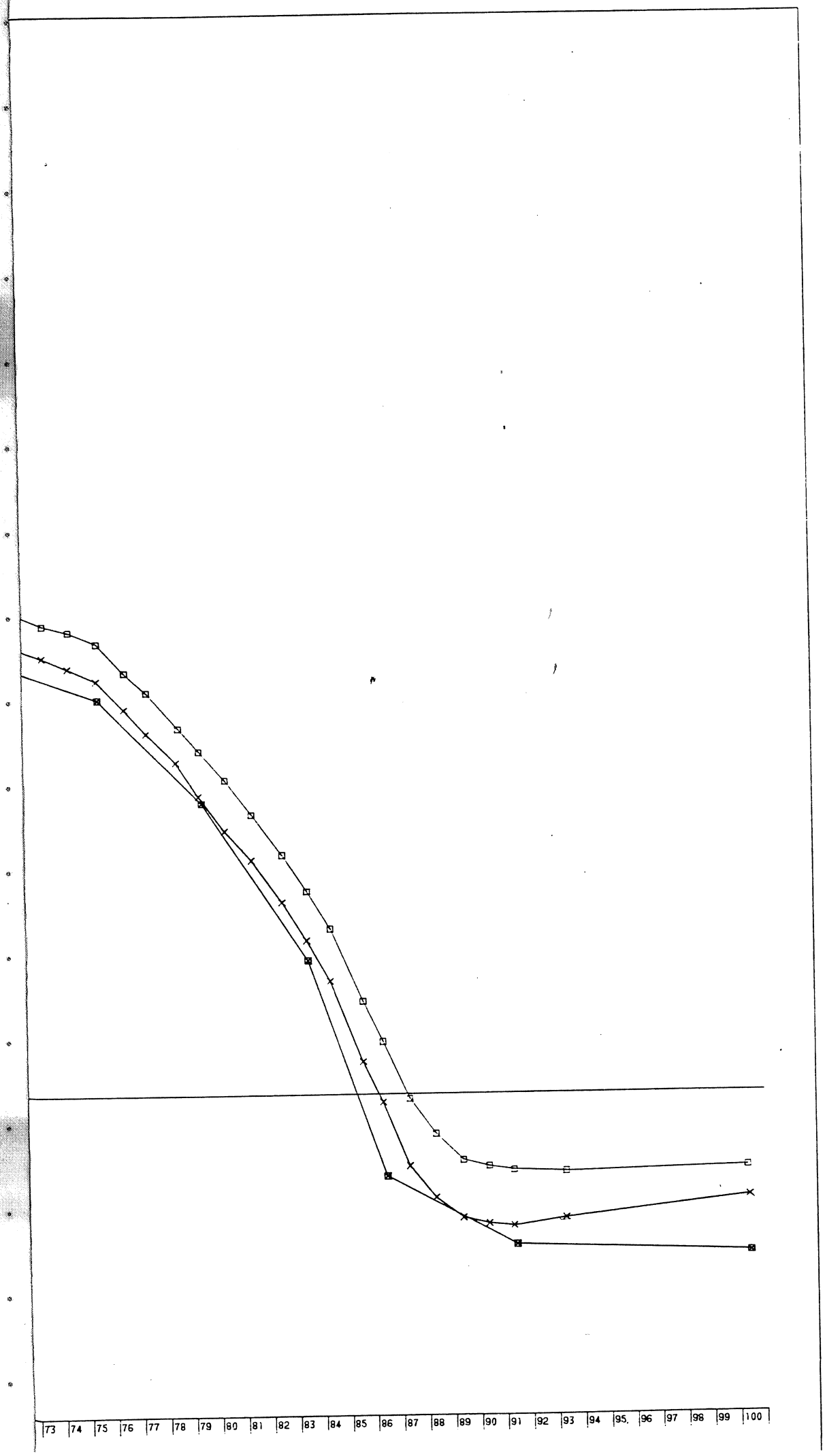
Champ 1





5 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72

Temps [jours]


73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

Gy22

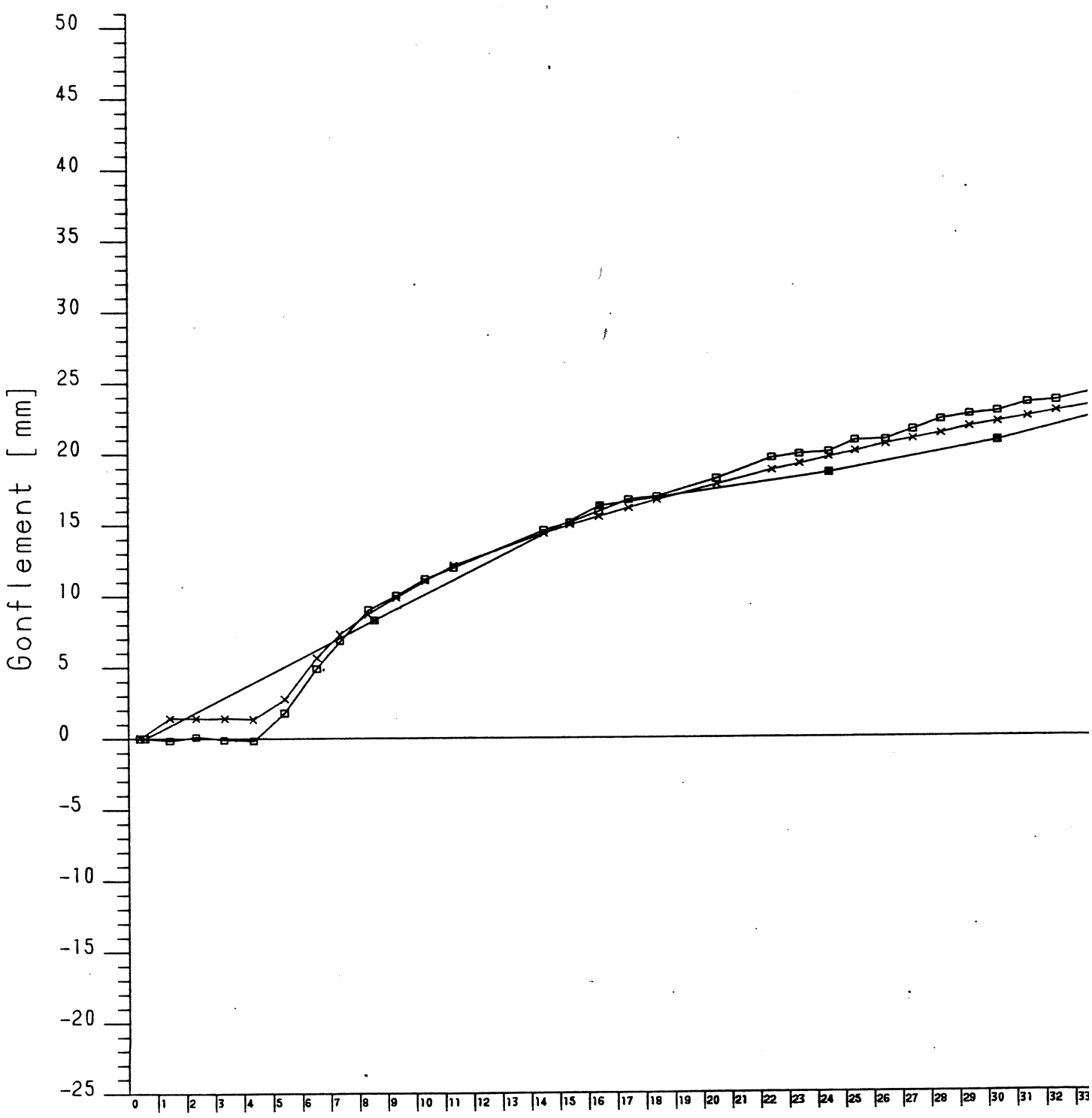
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

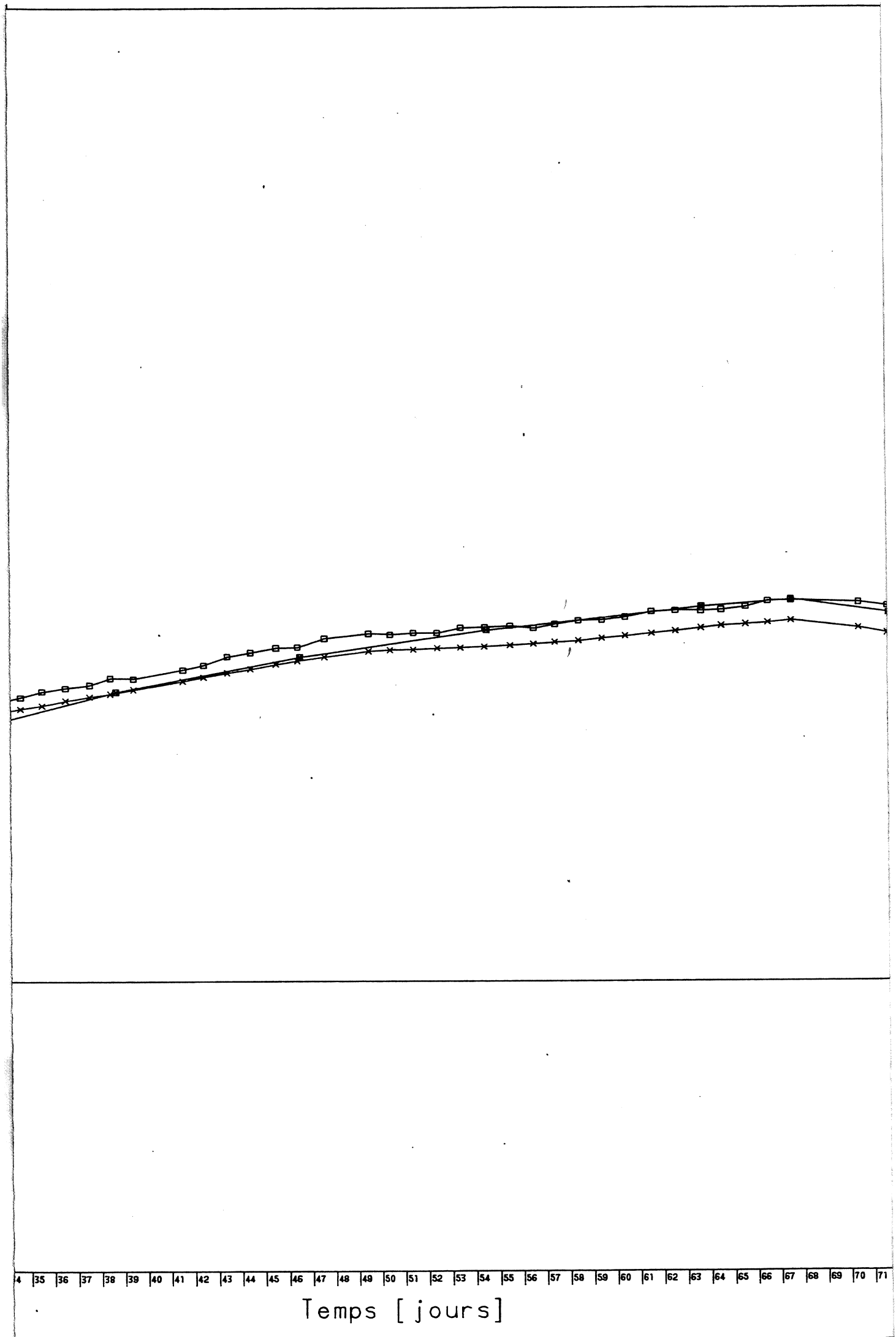
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

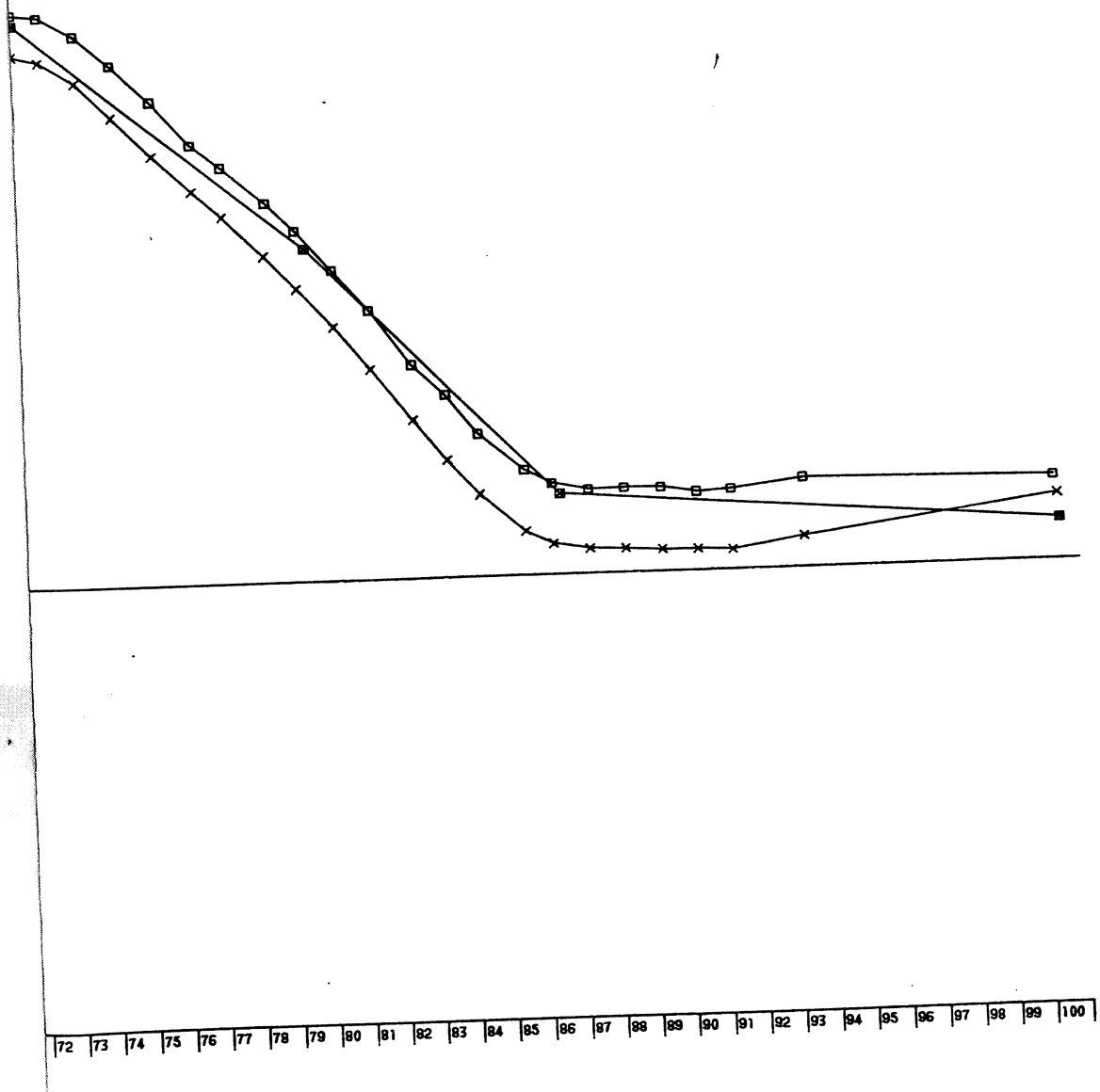
VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS
(MESURES A LA SURFACE DU SOL)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2




4 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71
Temps [jours]


72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

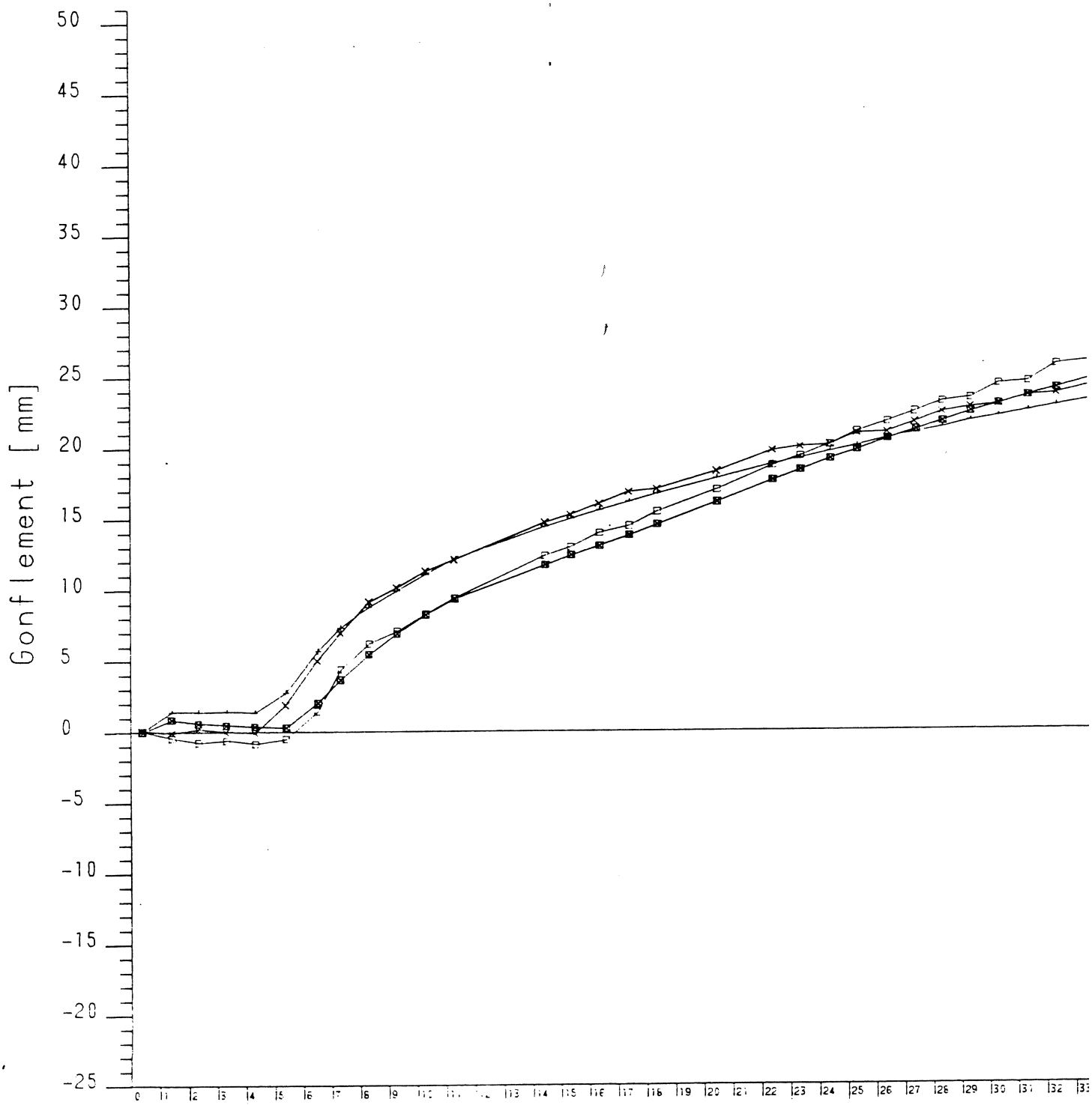
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

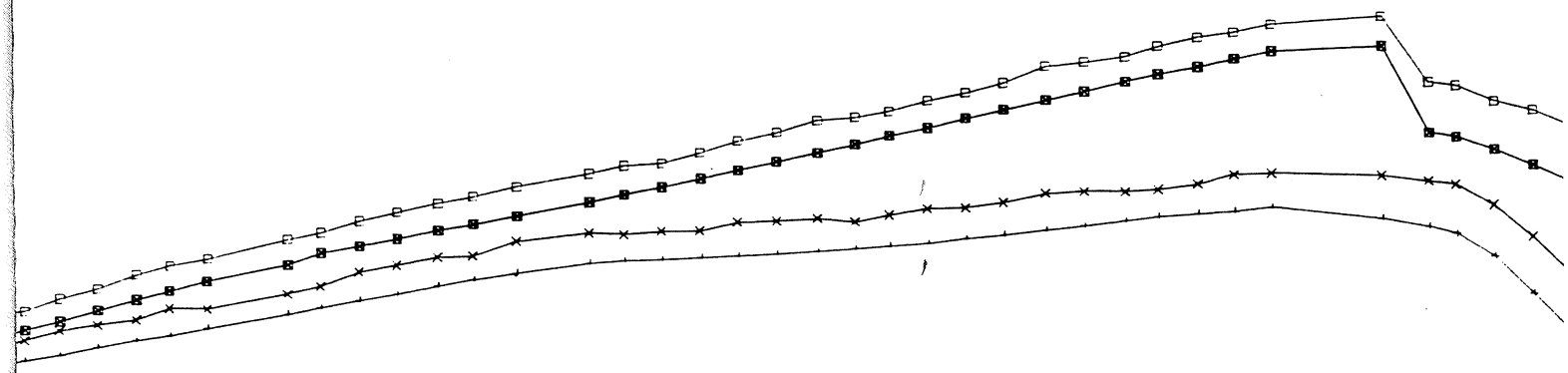
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS
(MESURES A LA SURFACE DU SOL)

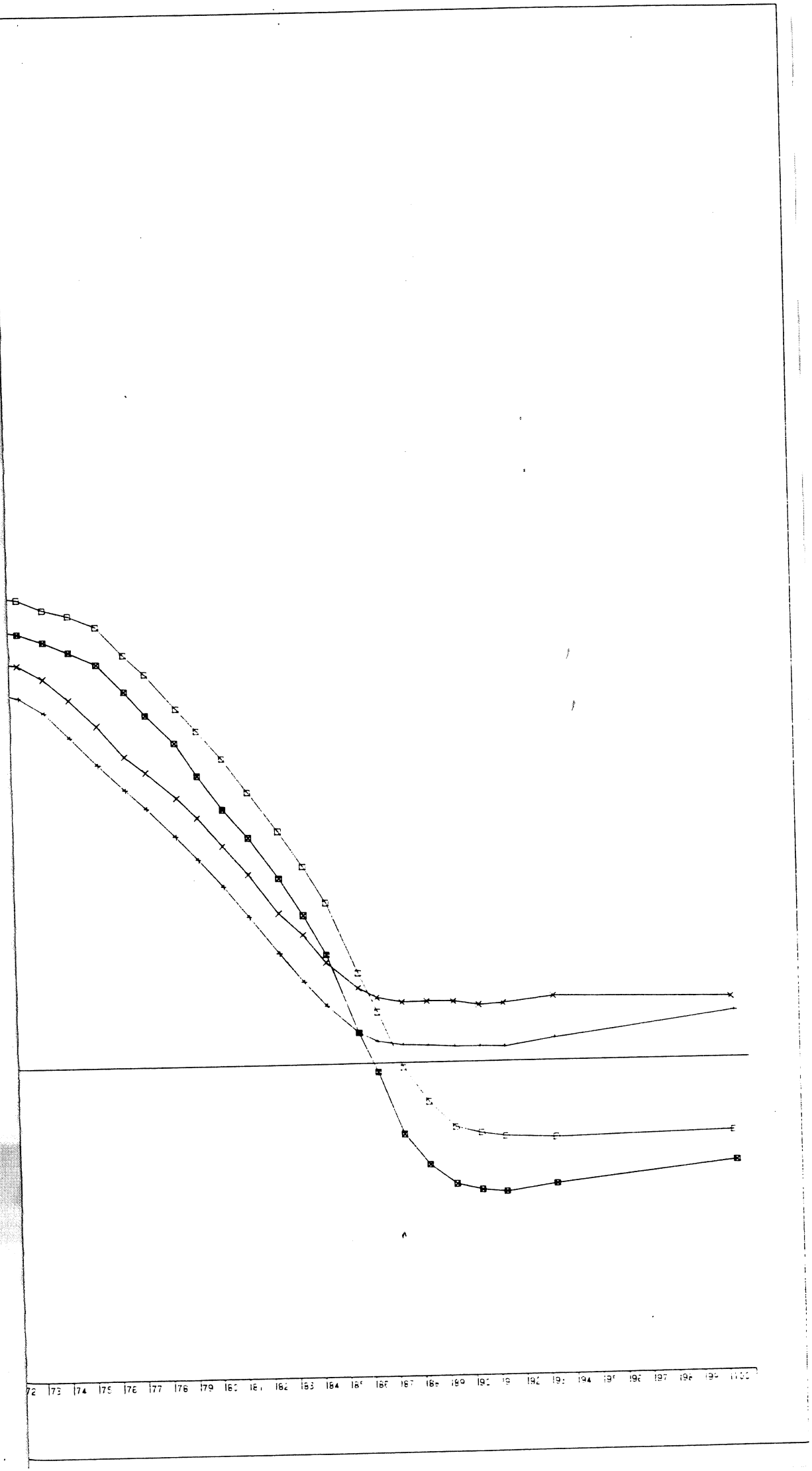
Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champs 1 et 2





Temps [jours]


72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

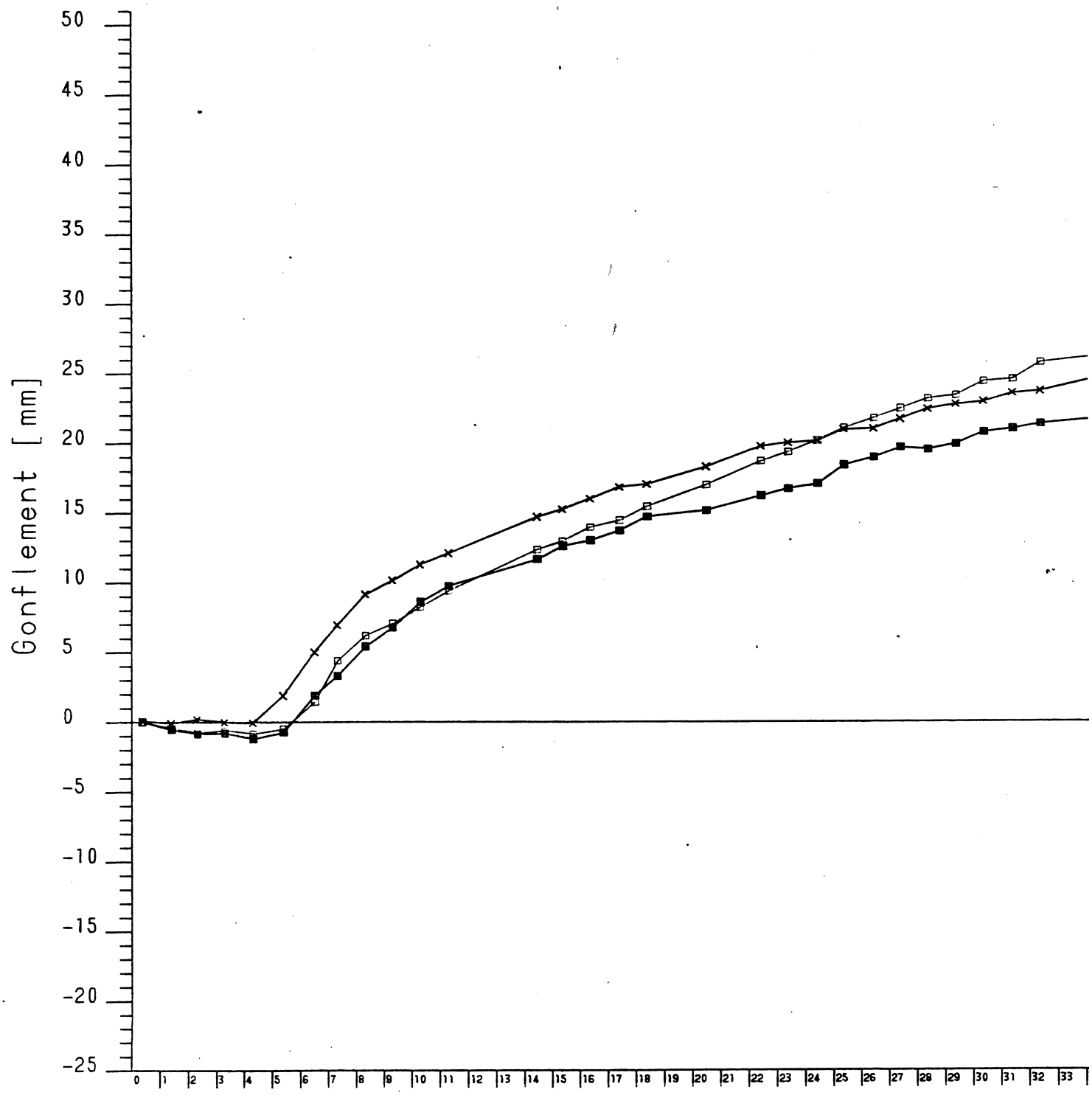
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

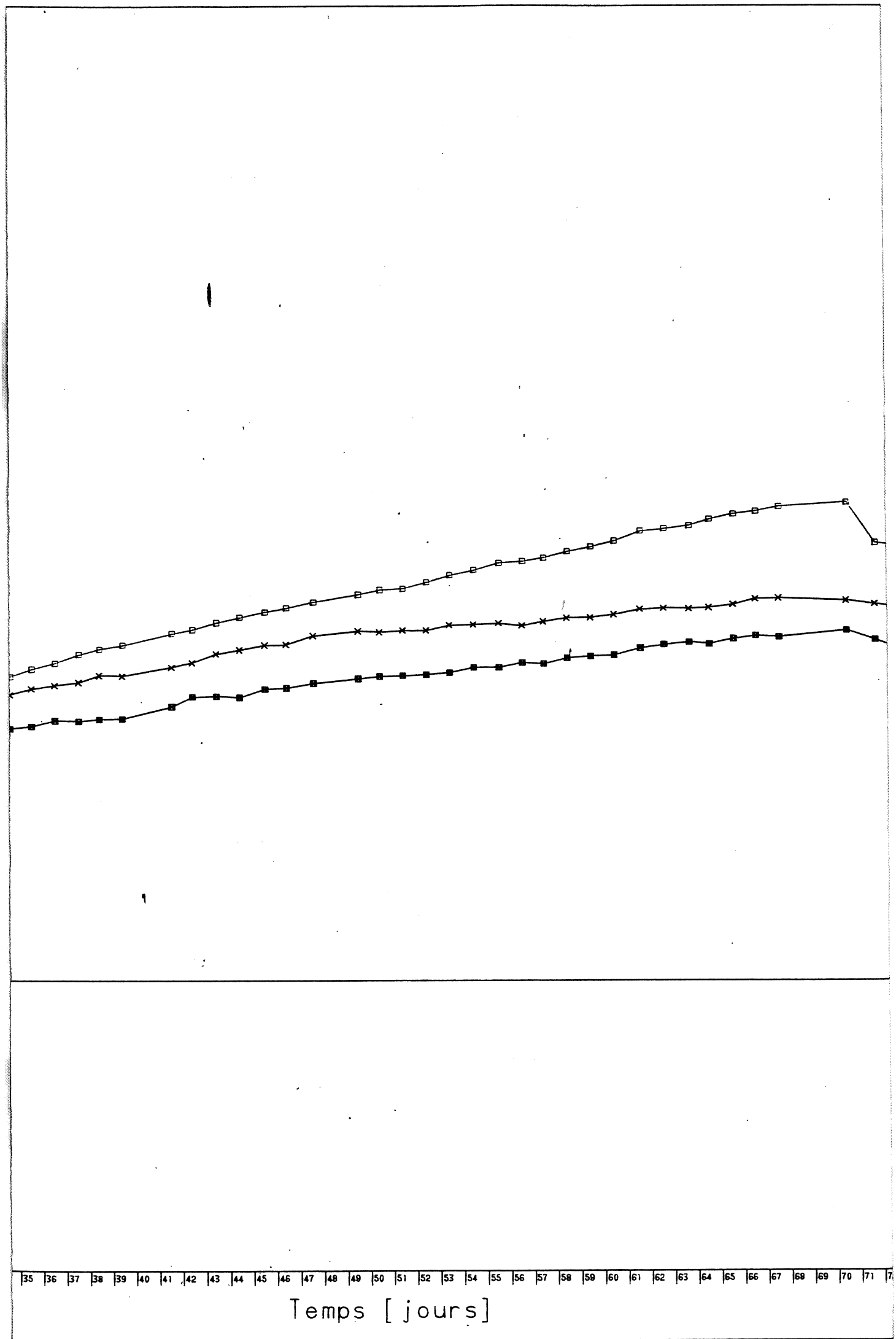
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

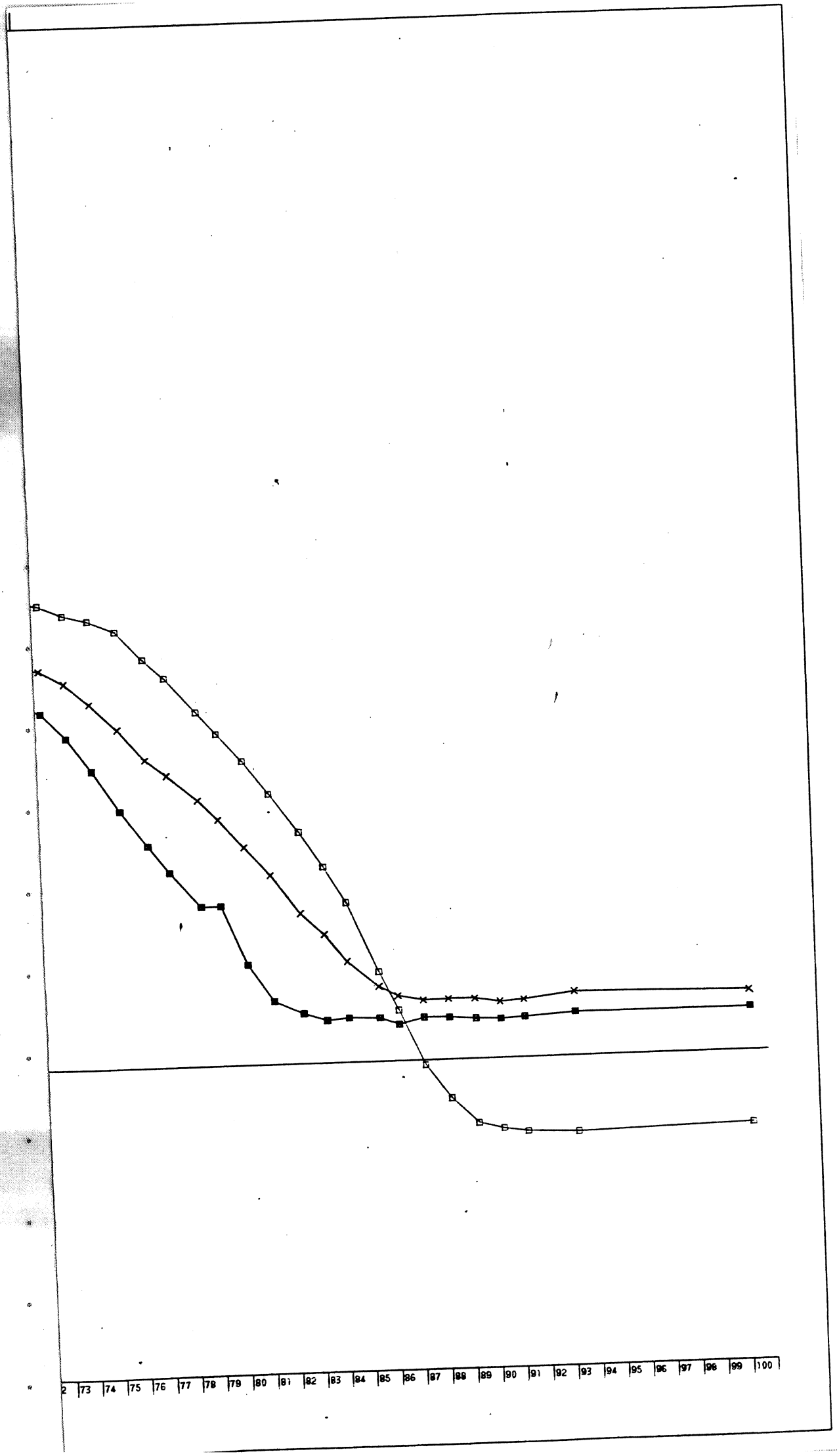
VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS
(MESURES A LA SURFACE DU SOL)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champs 1,2,3




35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71
Temps [jours]


2
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

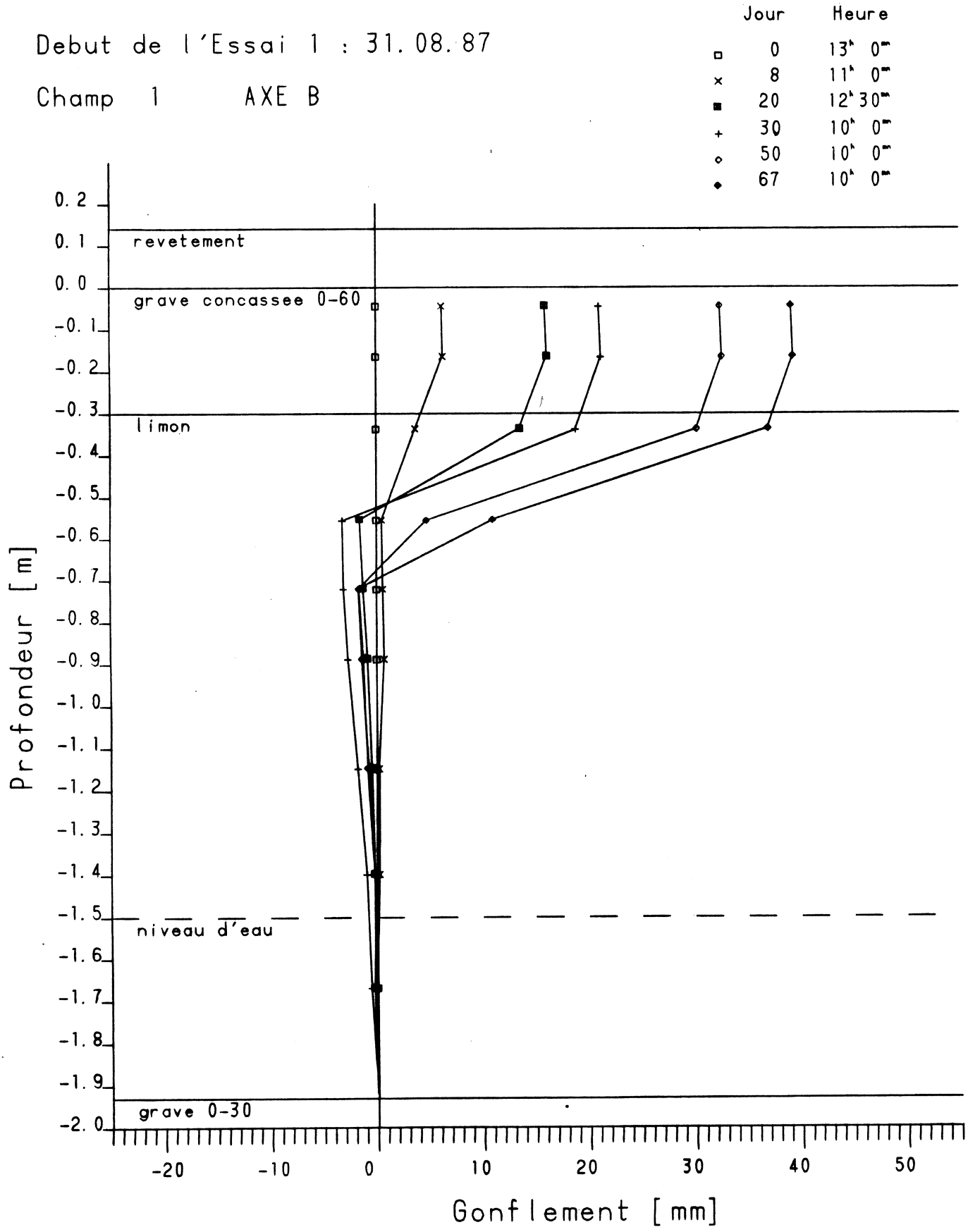
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1 AXE B



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

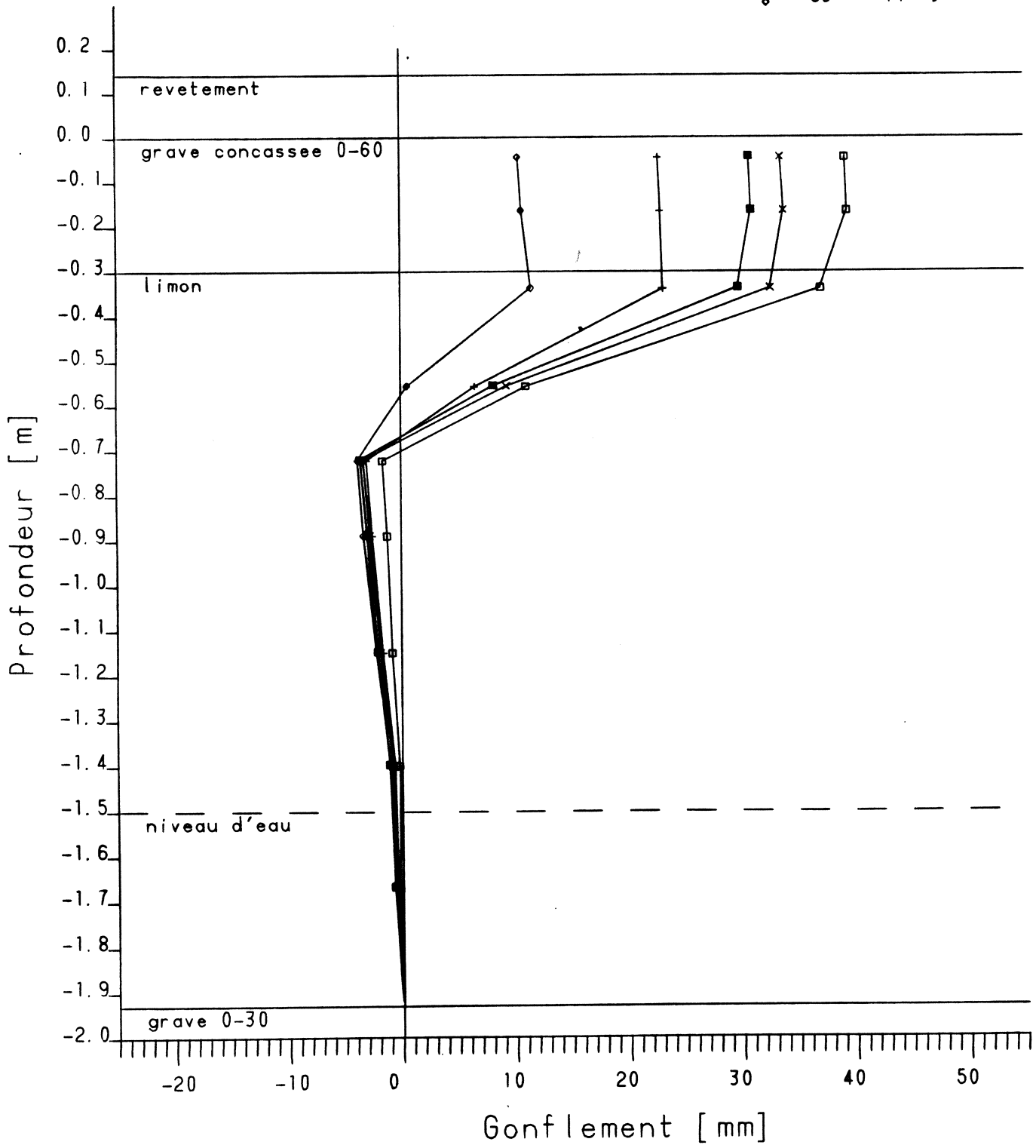
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1 AXE B

	Jour	Heure
□	67	10h 0mn
×	71	14h30mn
■	75	10h30mn
+	79	10h 0mn
◇	83	11h 0mn



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

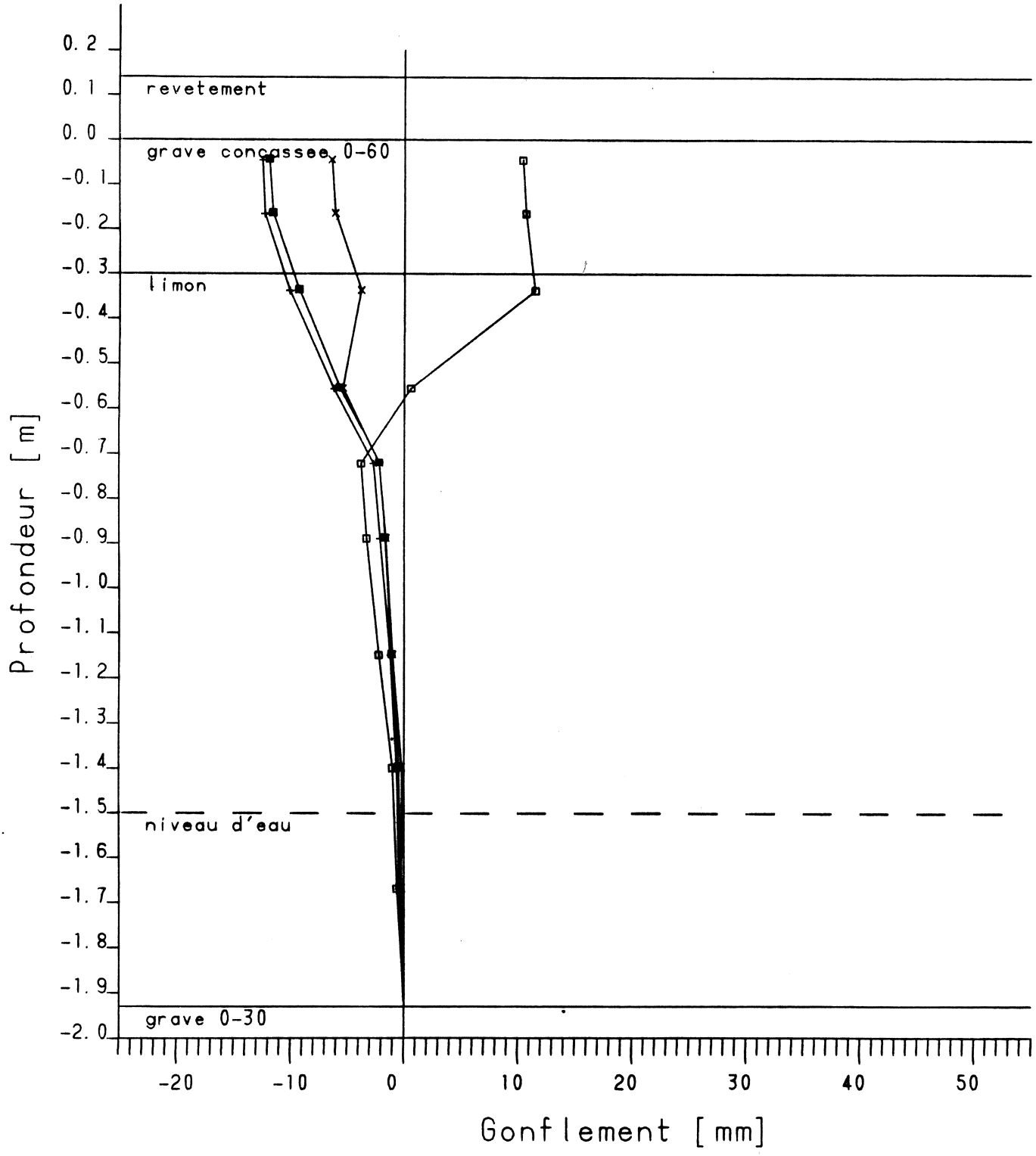
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 1 AXE B

	Jour	Heure
□	83	11h 0mn
×	86	10h30mn
■	91	10h 0mn
+	100	10h 0mn



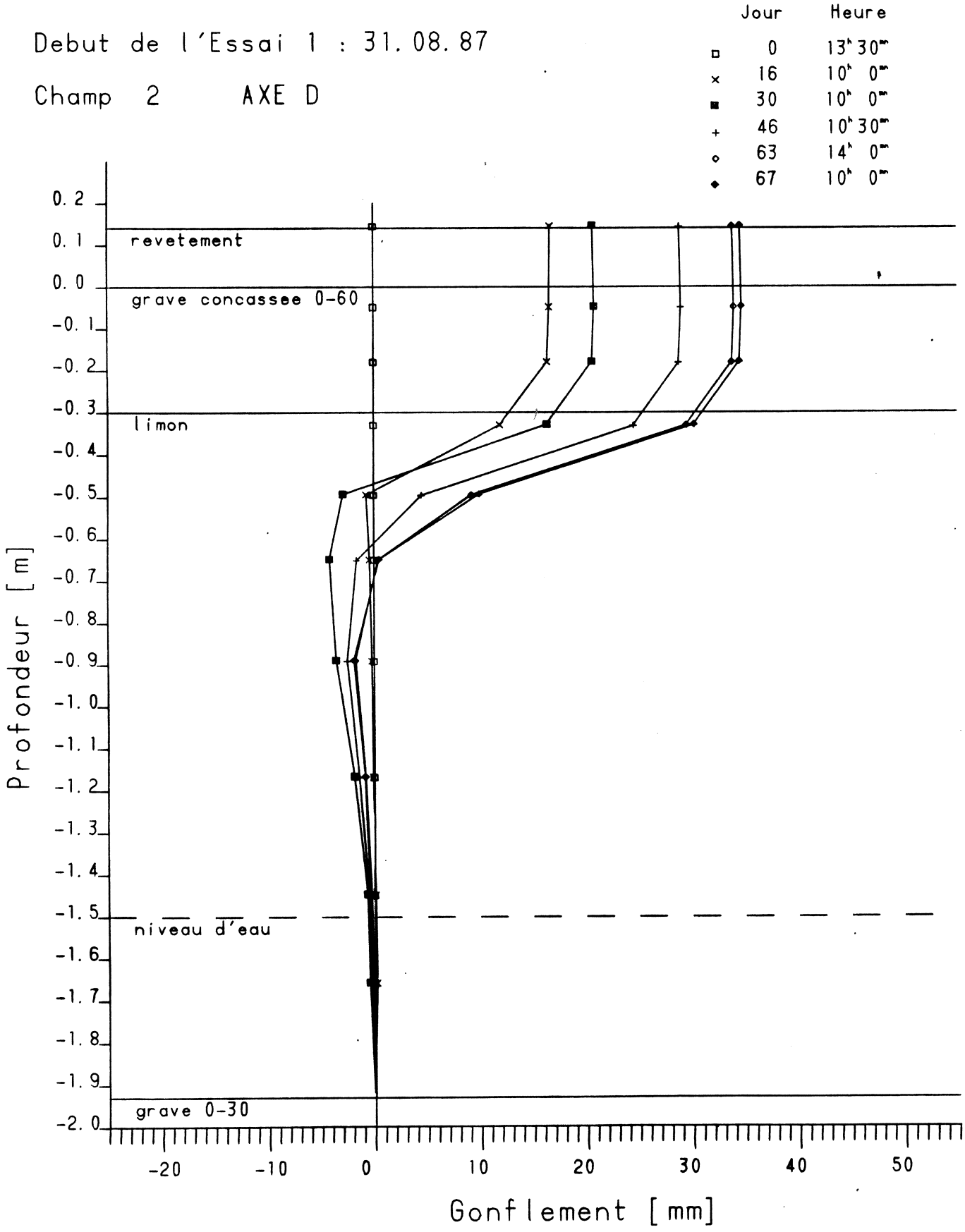
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2 AXE D



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

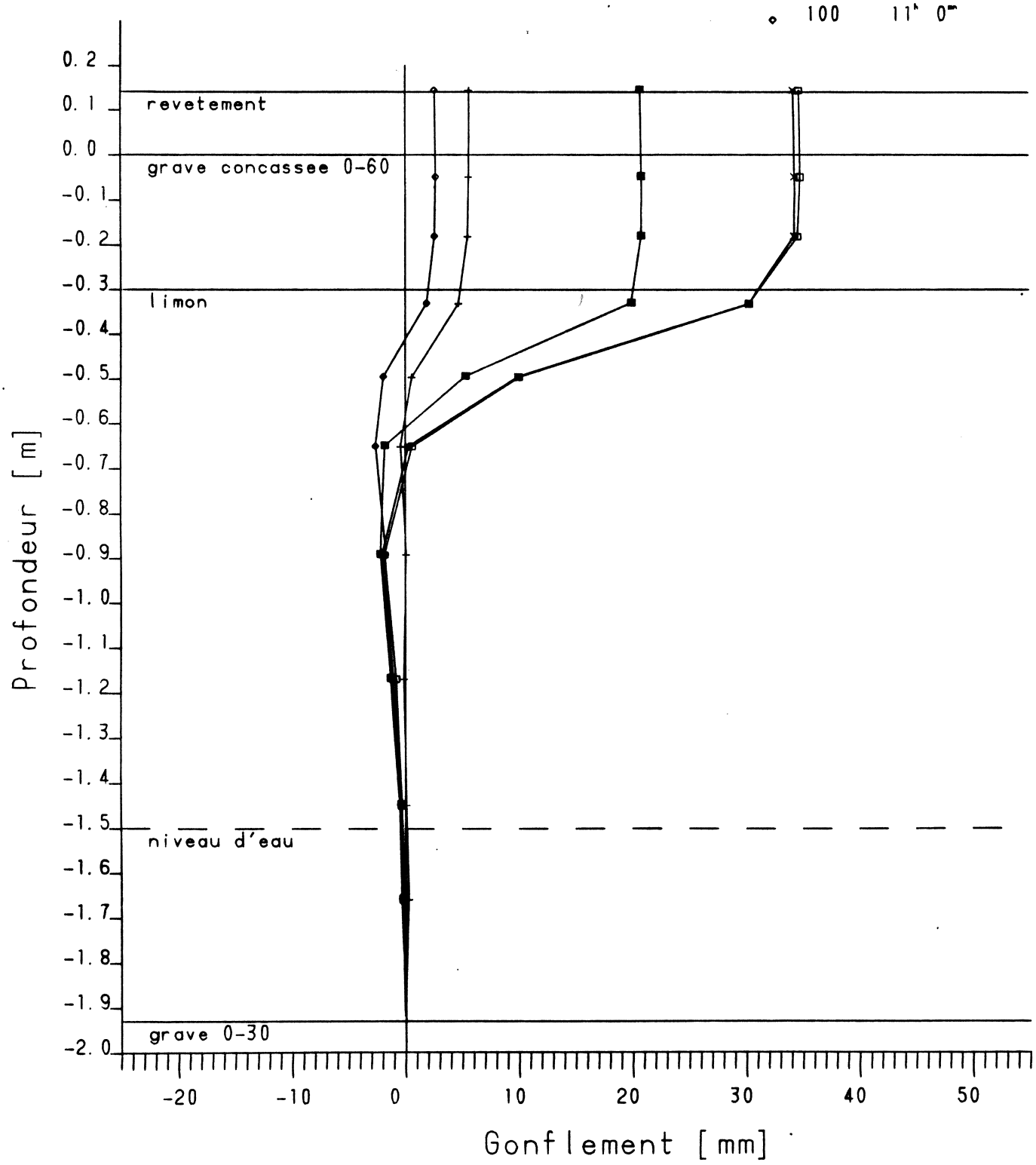
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2 AXE D

	Jour	Heure
□	67	10h 0m
×	71	15h 0m
■	79	12h 30m
+	86	11h 0m
◇	100	11h 0m



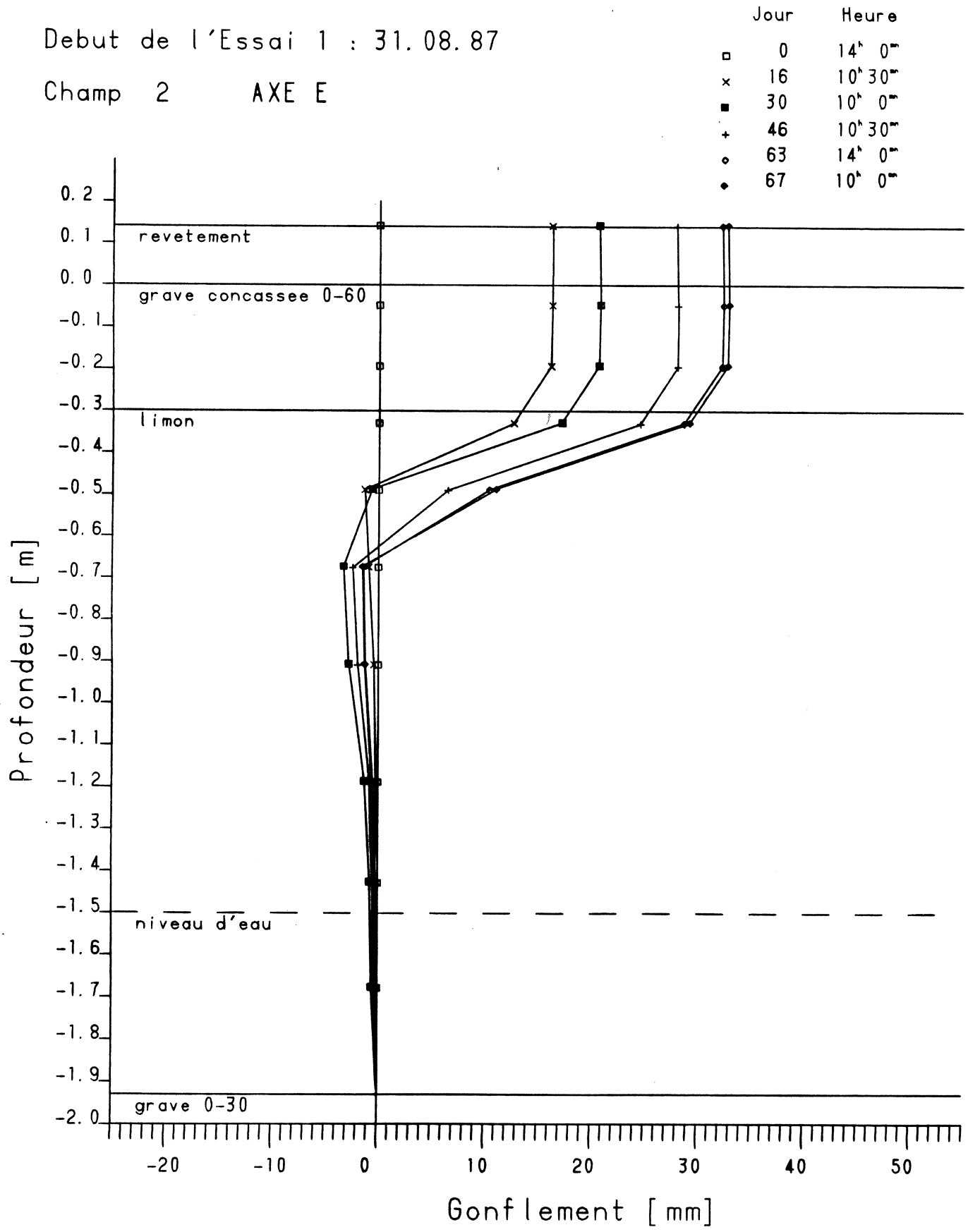
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2 AXE E



Gy22

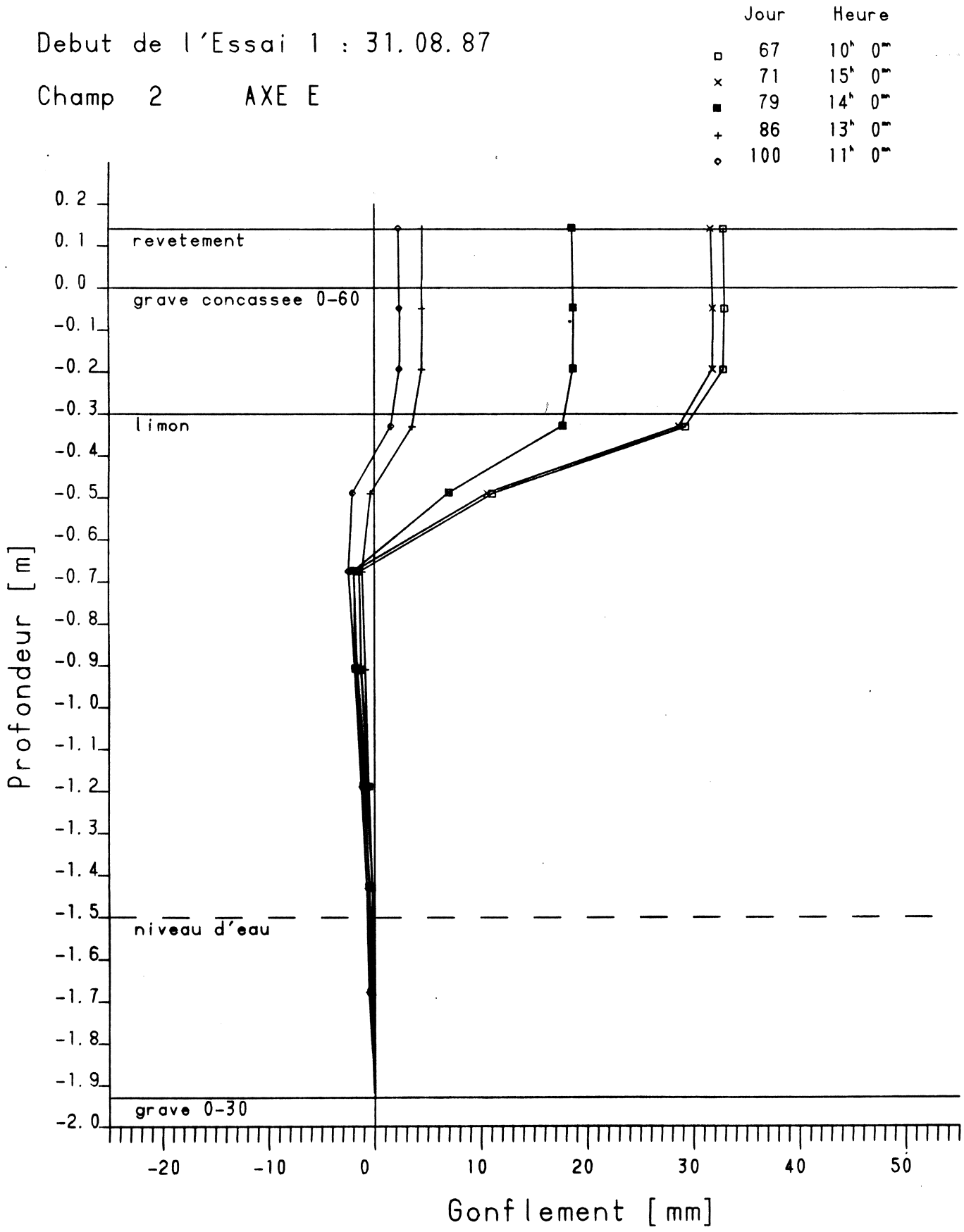
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 2 AXE E



Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

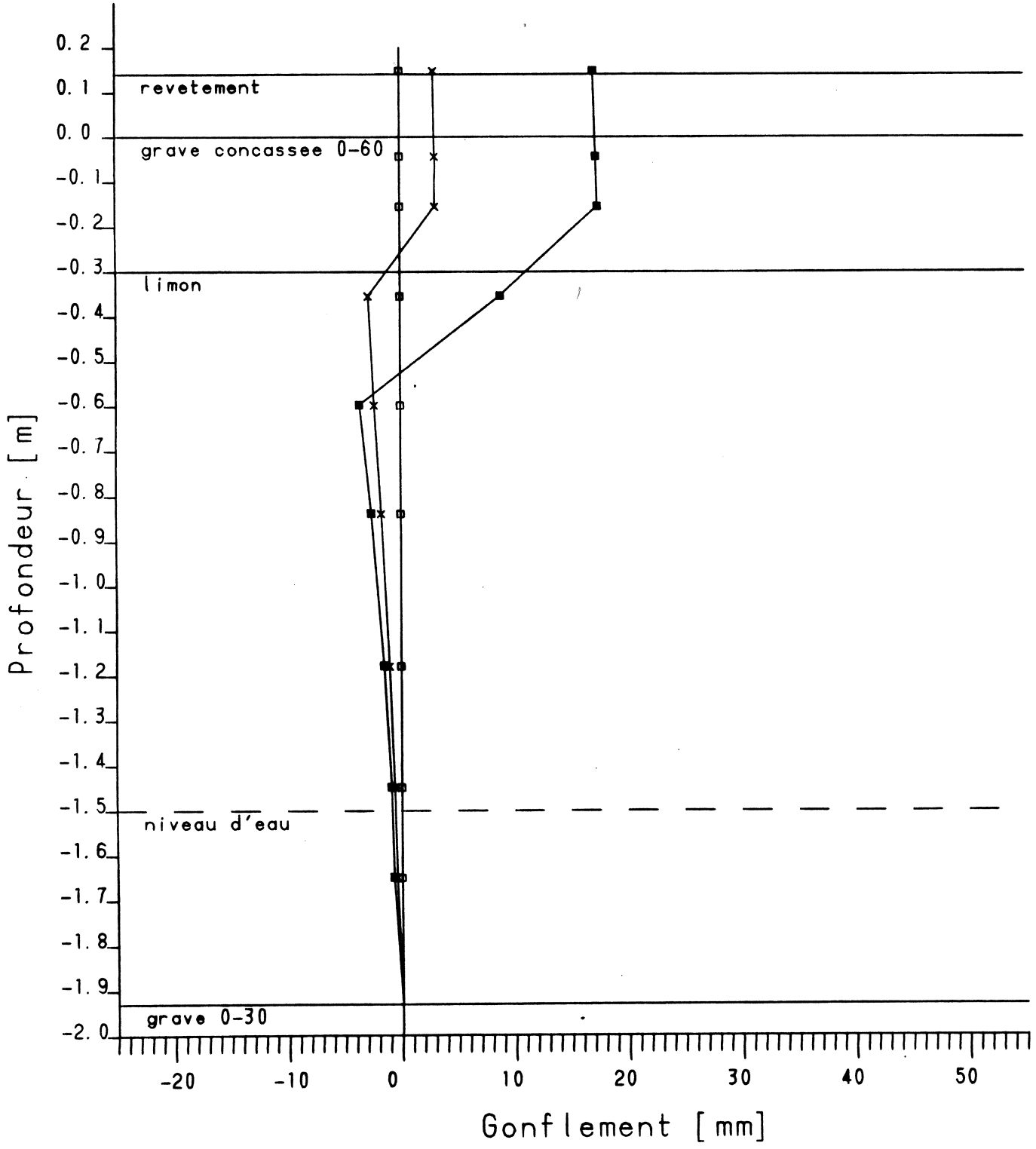
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR (A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 3 AXE H

	Jour	Heure
□	0	14h30mn
×	8	14h 0mn
■	38	14h30mn



LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

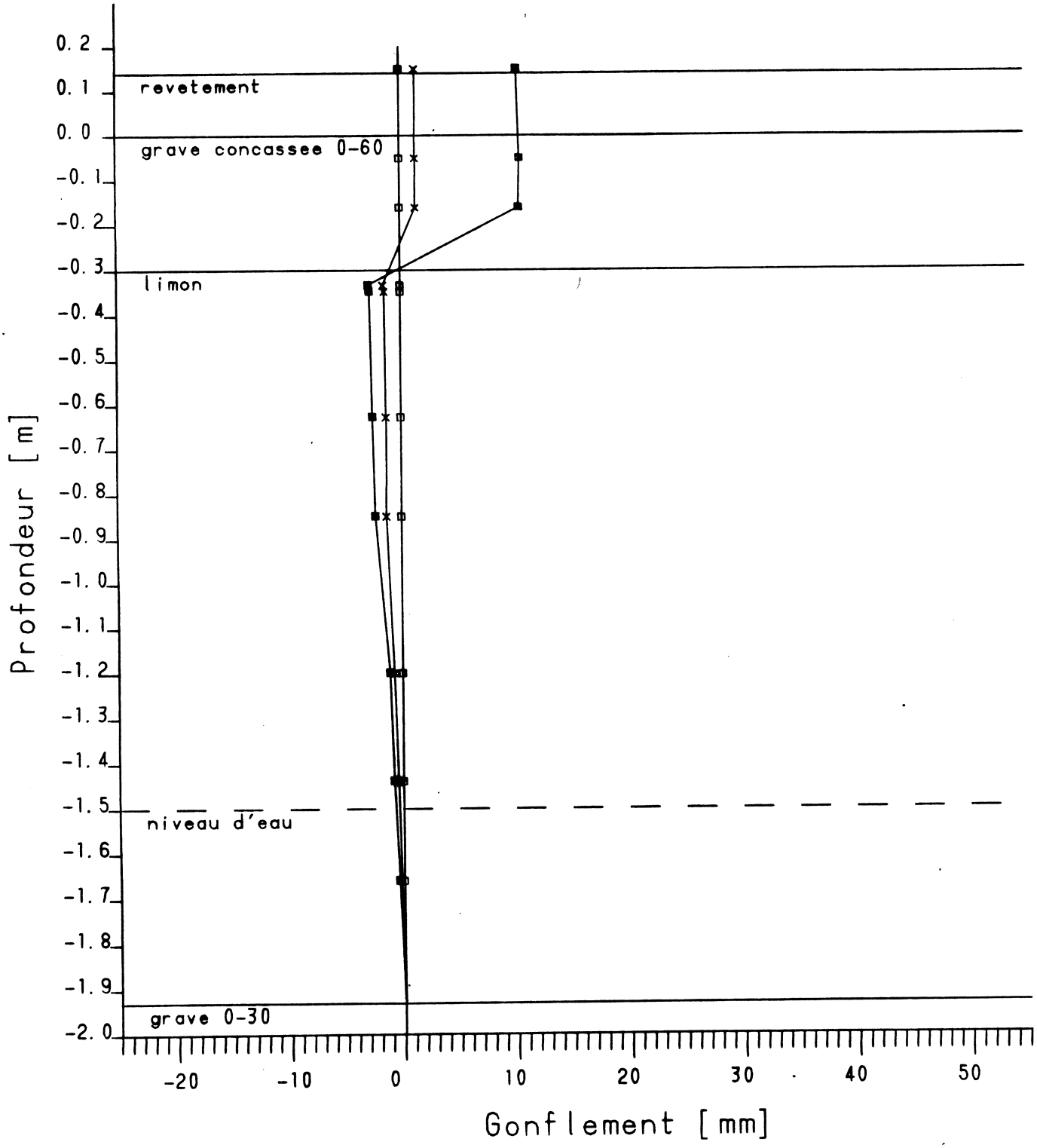
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 1 : 31.08.87

Champ 3 AXE 1

	Jour	Heure
□	0	15h 0mn
×	8	14h30mn
■	38	15h 0mn



Gy 22

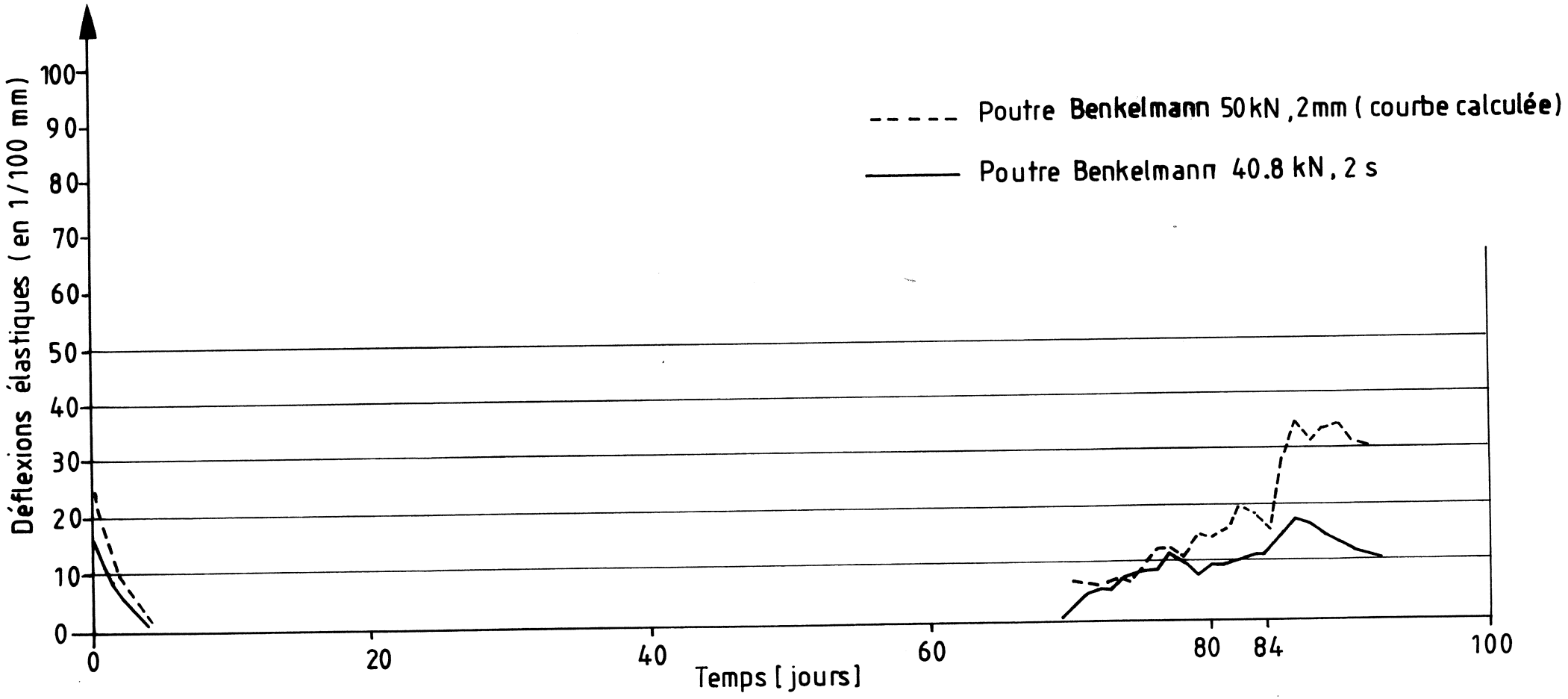
ANNEXE N° 1-26

DEBUT DE L'ESSAI 1 : 31.08.87
CHAMP 1 AXE B

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPEL

CYCLE DE GEL / DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

VARIATION DE LA DEFLEXTION ELASTIQUE EN FONCTION DU TEMPS



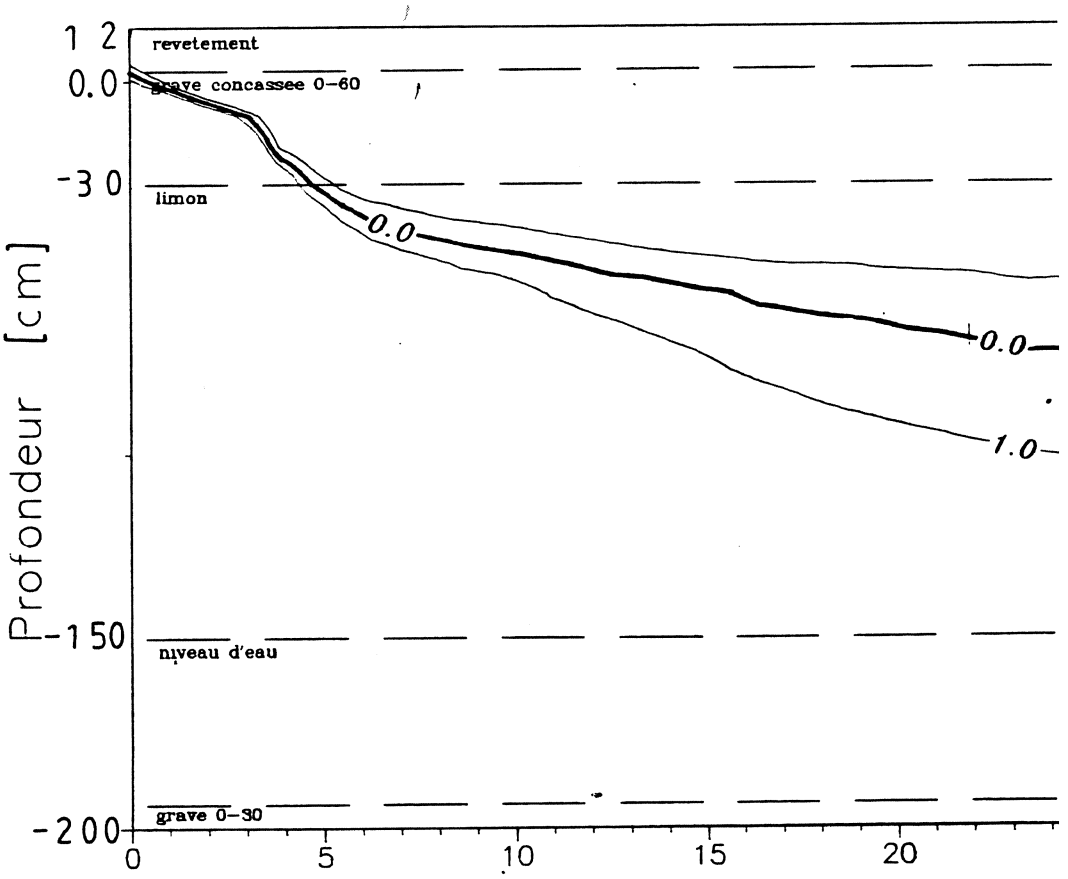
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

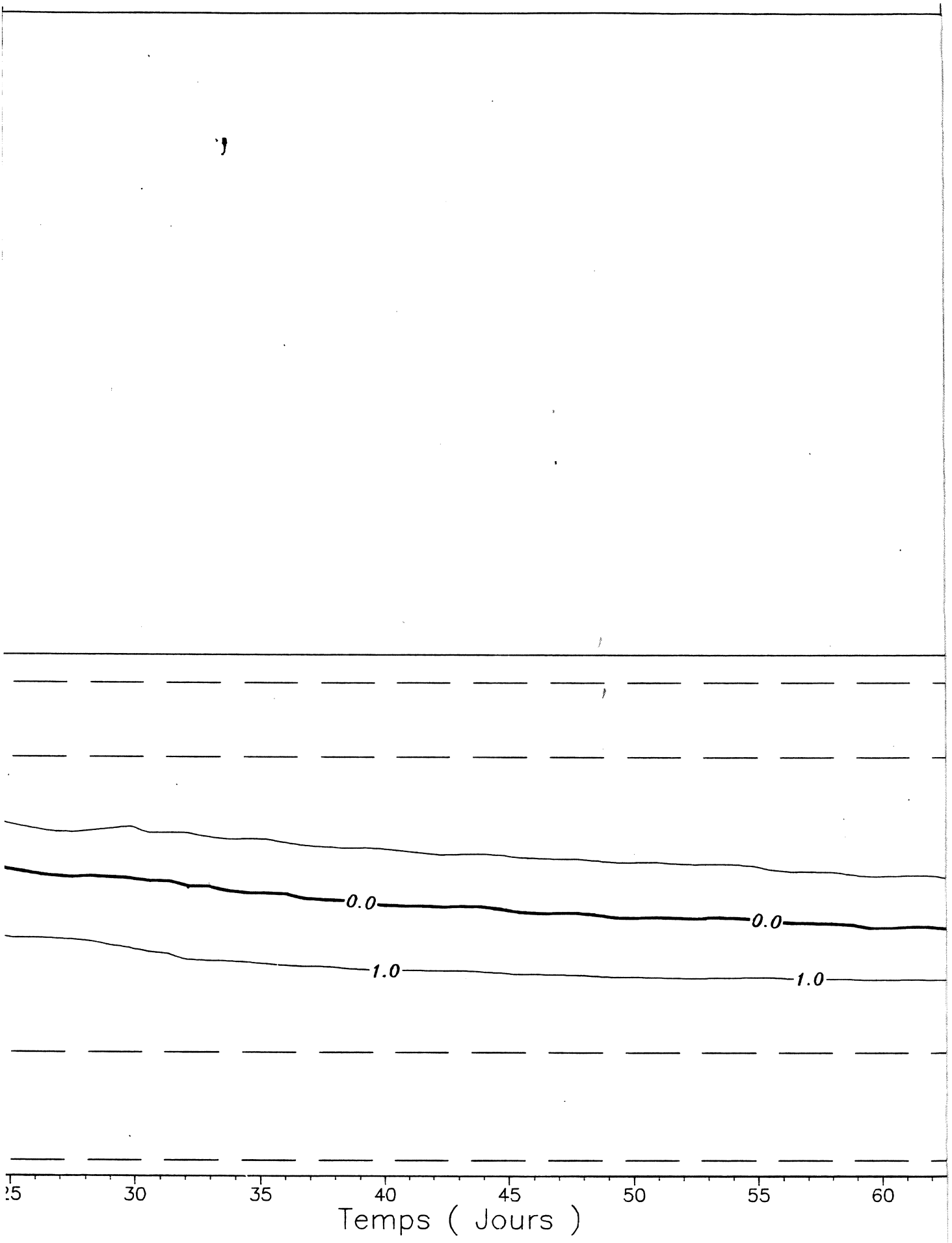
CYCLE DE GEL/ DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

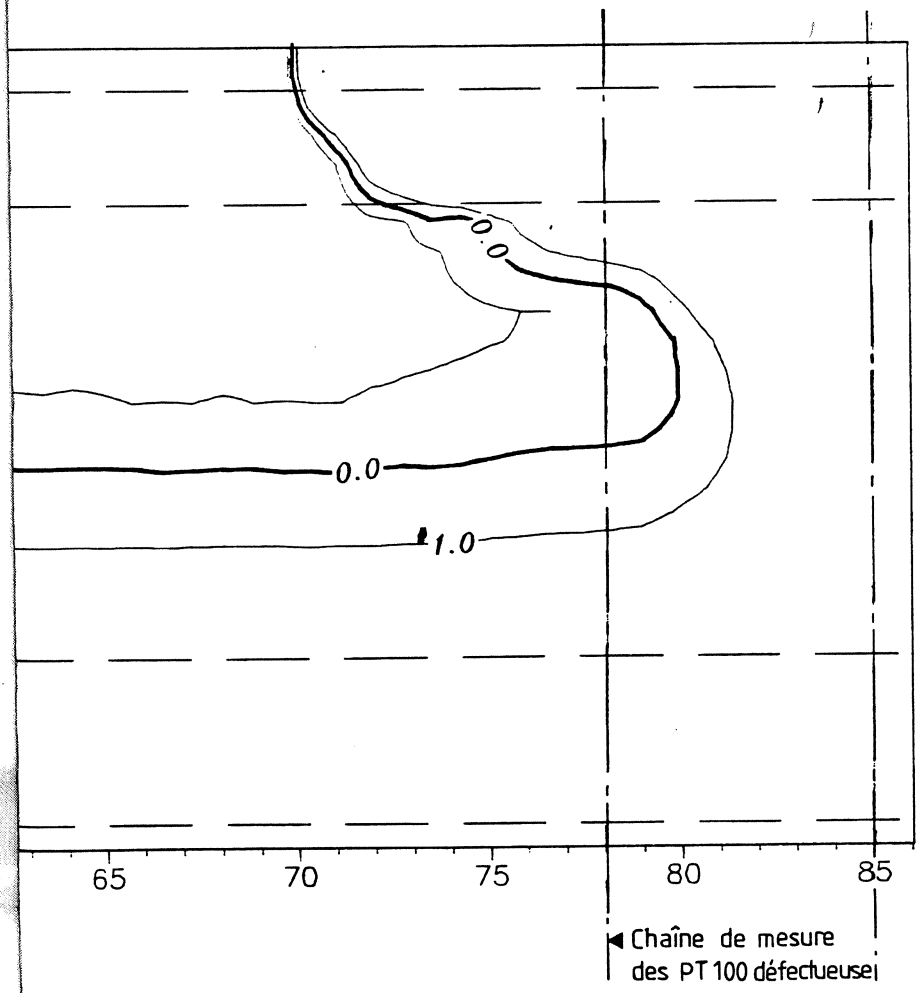
ISOTHERMES -1,0 et 1°C

Début de l'essai 2 : 10.05.88

Champ 1




0.0
0.0
1.0
1.0
25
30
35
40
45
50
55
60
Temps (Jours)


0.0
0.0
1.0
65
70
75
80
85
Chaîne de mesure
des PT 100 défectueuse

Gy 22

ANNEXE 2-2

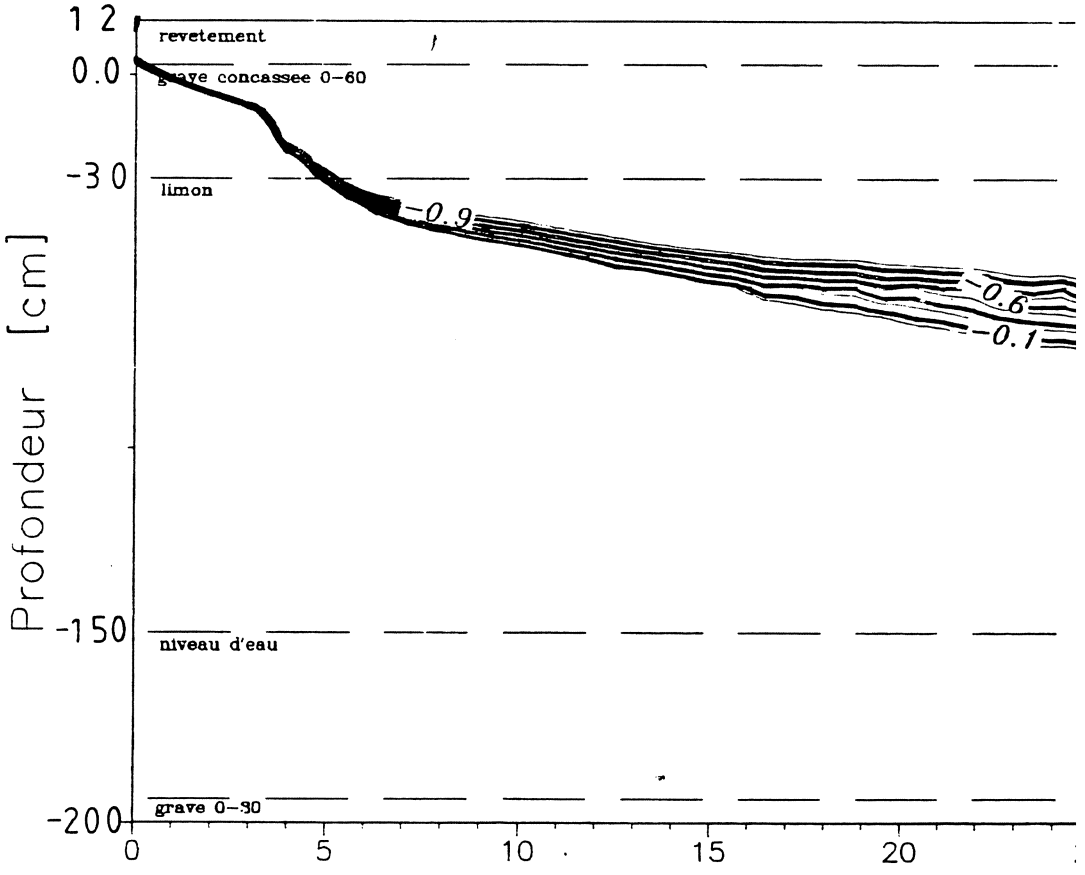
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPEL

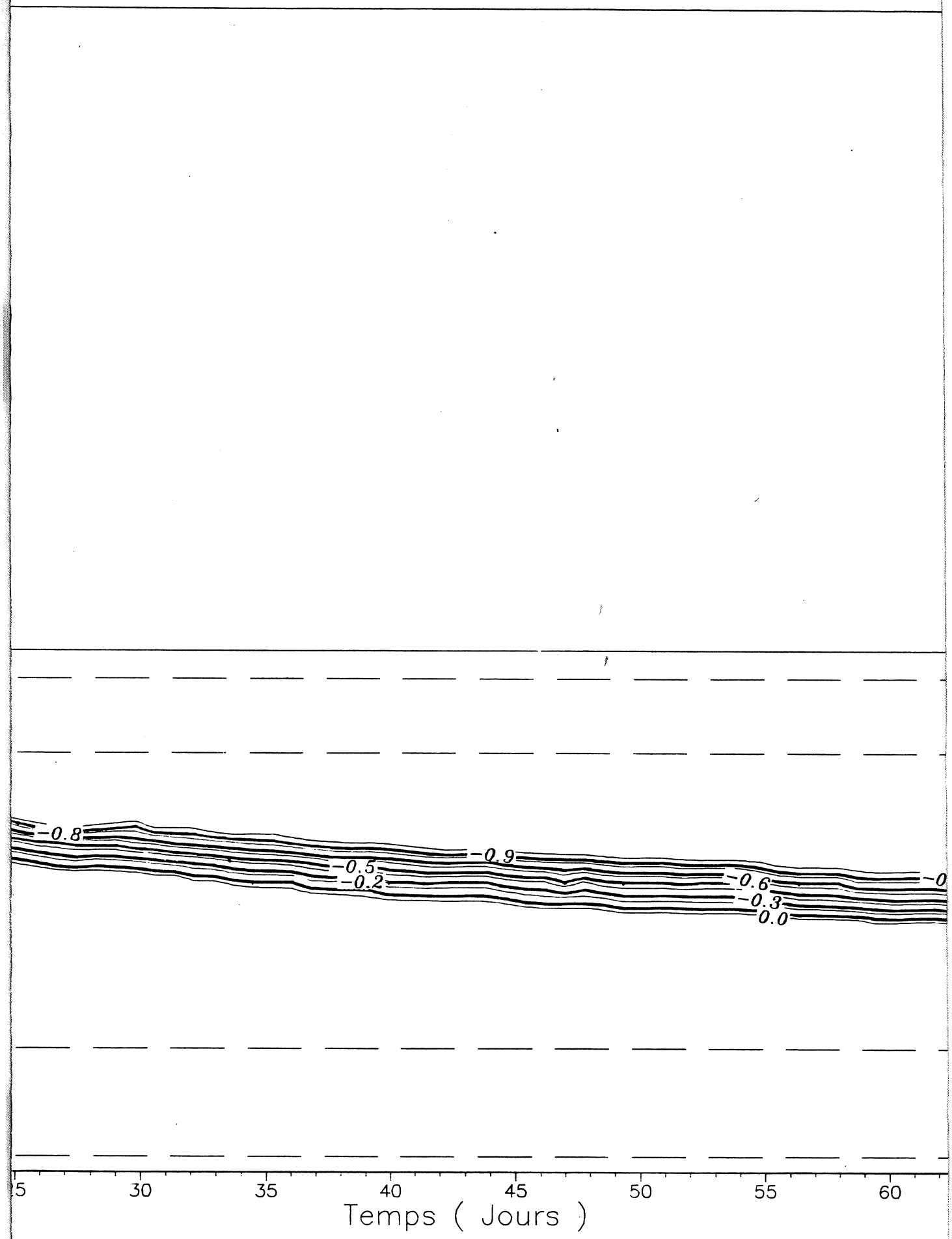
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

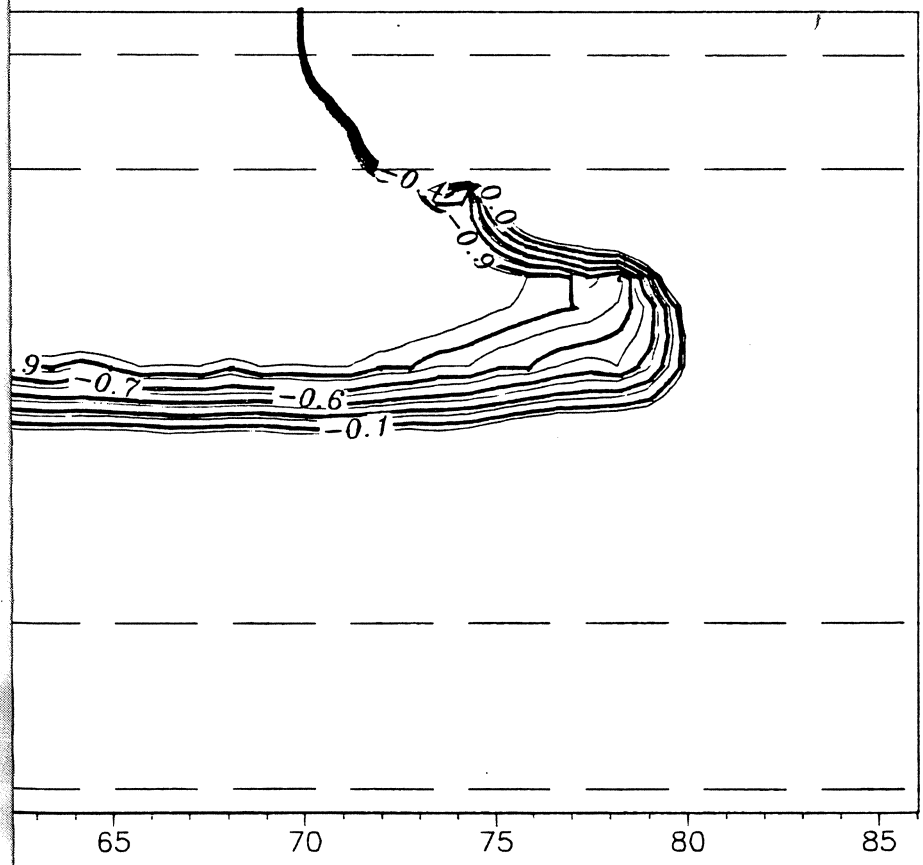
ISOTHERMES - 1,0 et 1°C

Début de l'essai 2 : 10.05.88

Champ 1




-0.8
-0.9
-0.5
-0.2
-0.6
-0.3
0.0
-0
25
30
35
40
45
50
55
60
Temps (Jours)


-0.4
0.0
-0.9
.9
-0.7
-0.6
-0.1
65
70
75
80
85

Gy 22

ANNEXE 2-3

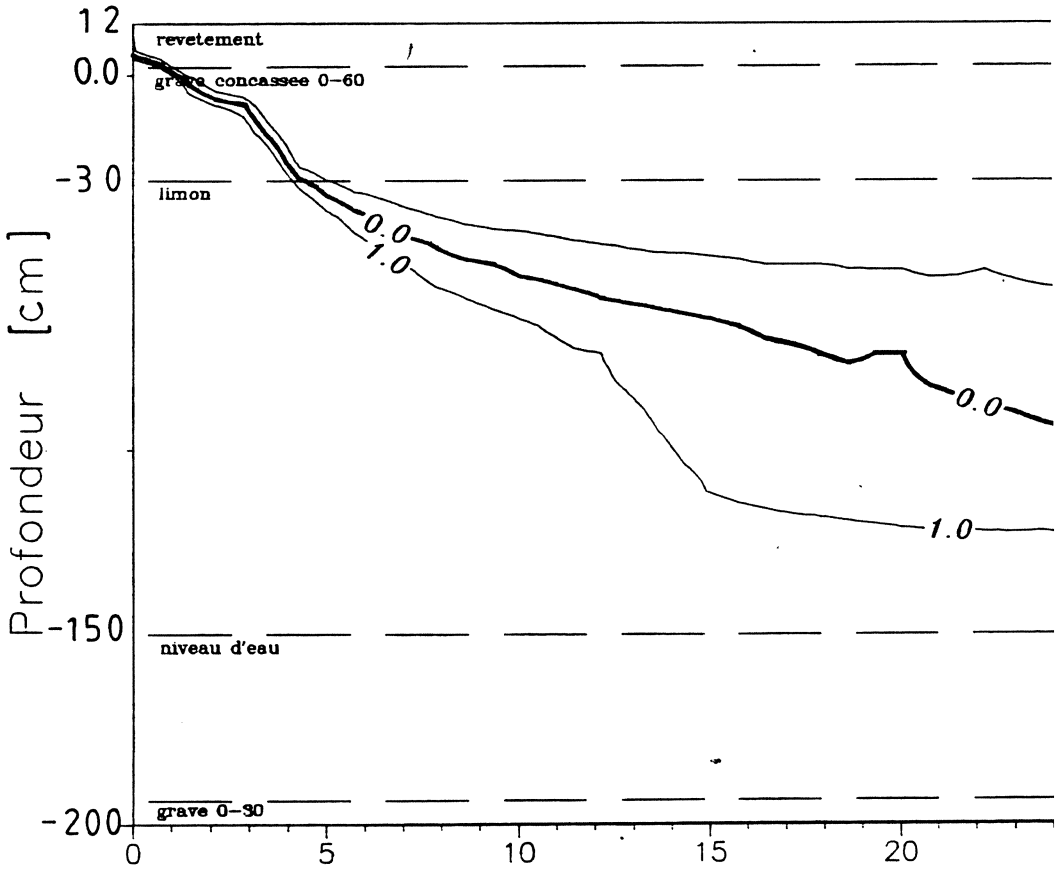
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L' EPFL

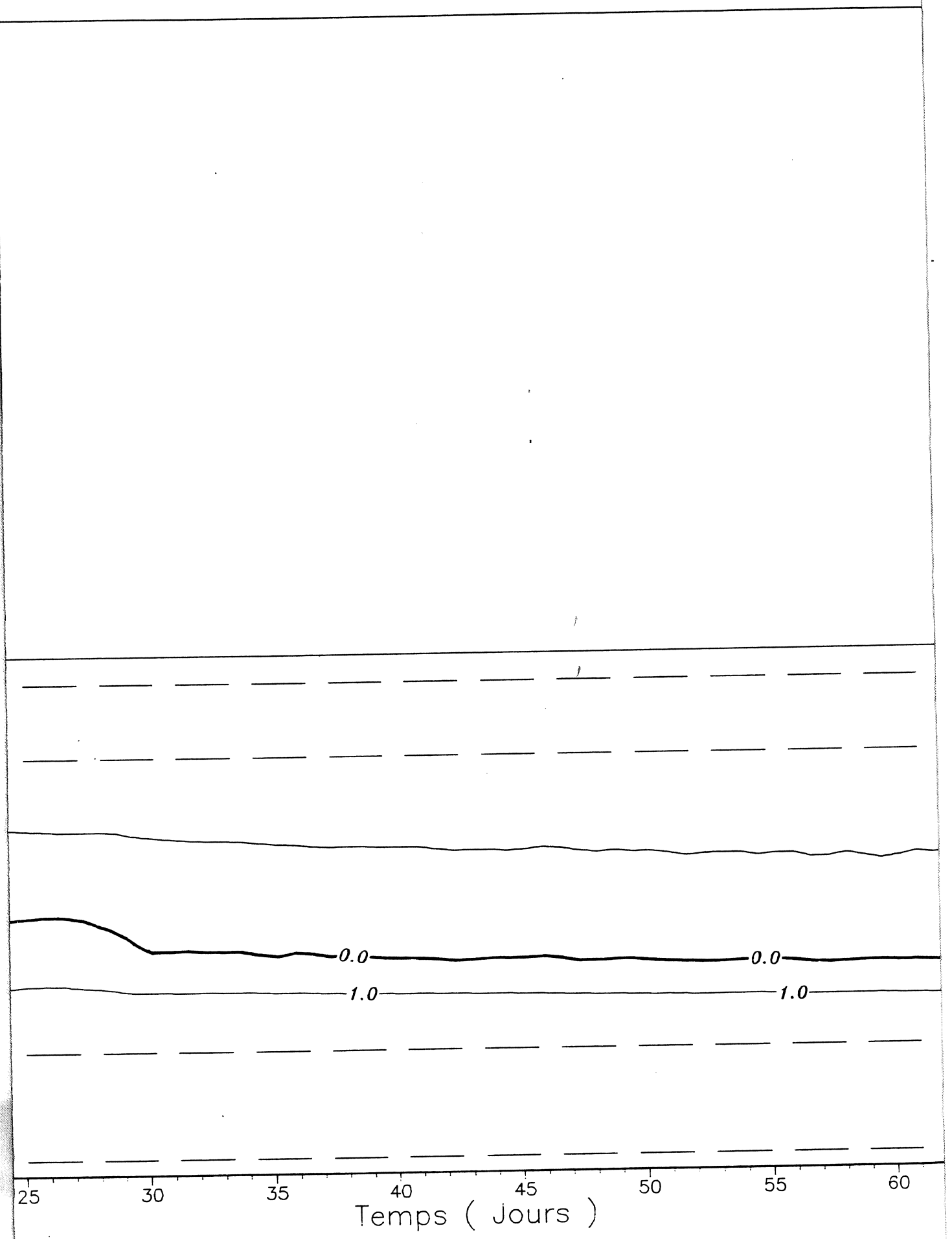
CYCLE DE GEL/ DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

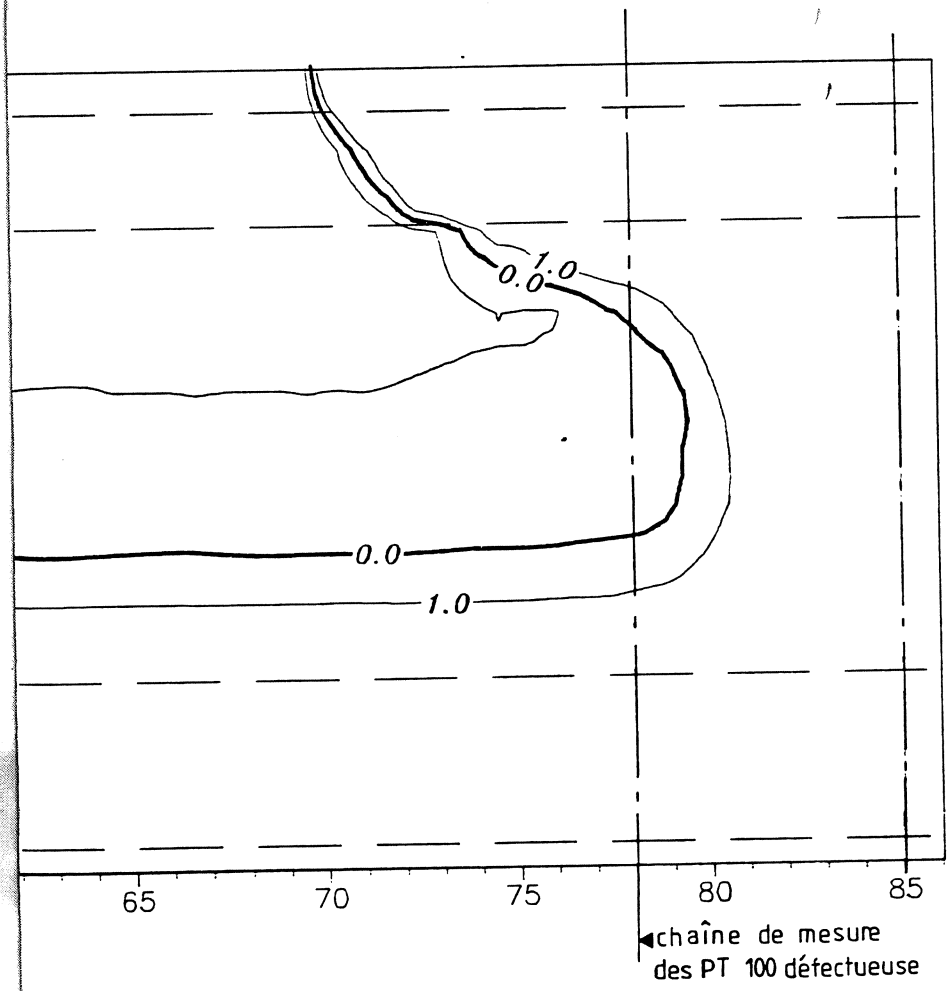
ISOTHERMES -10, et 1°C

Début de l'essai 2 : 10.05.88

Champ 2




0.0
0.0
1.0
1.0
25
30
35
40
45
50
55
60
Temps (Jours)


0.0
1.0
0.0
1.0
65
70
75
80
85
chaîne de mesure
des PT 100 défectueuse

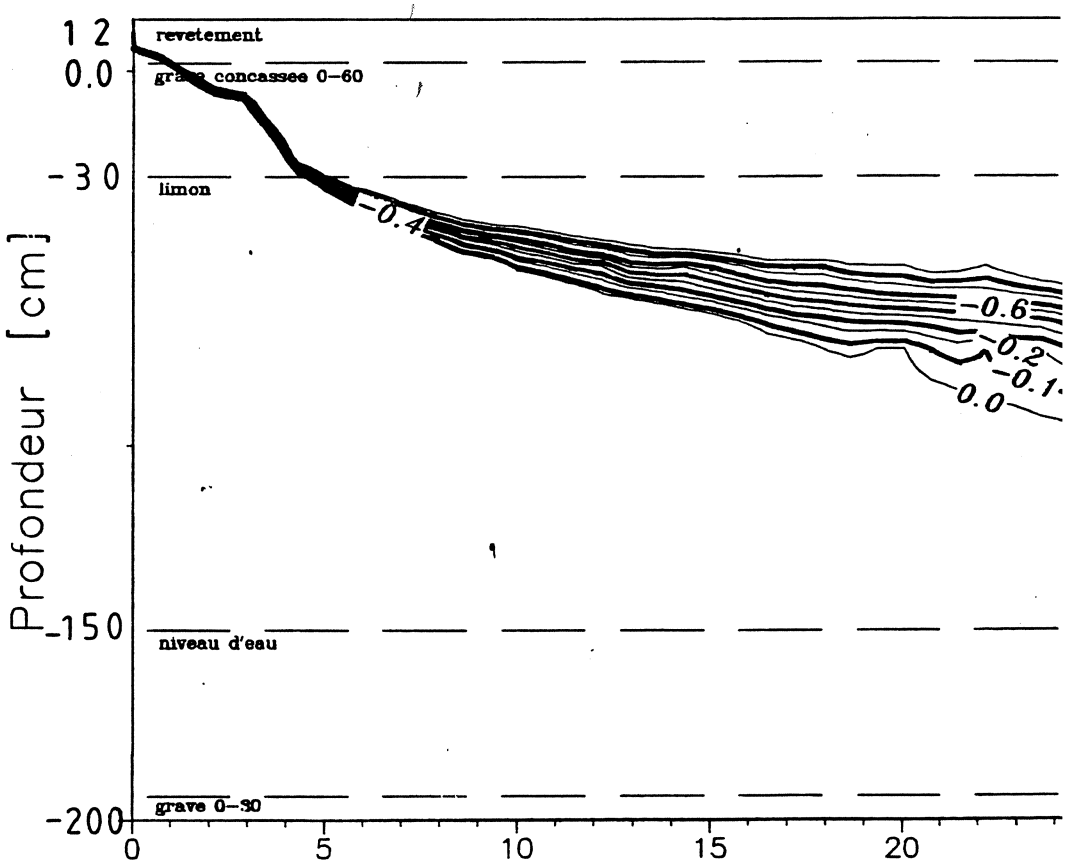
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

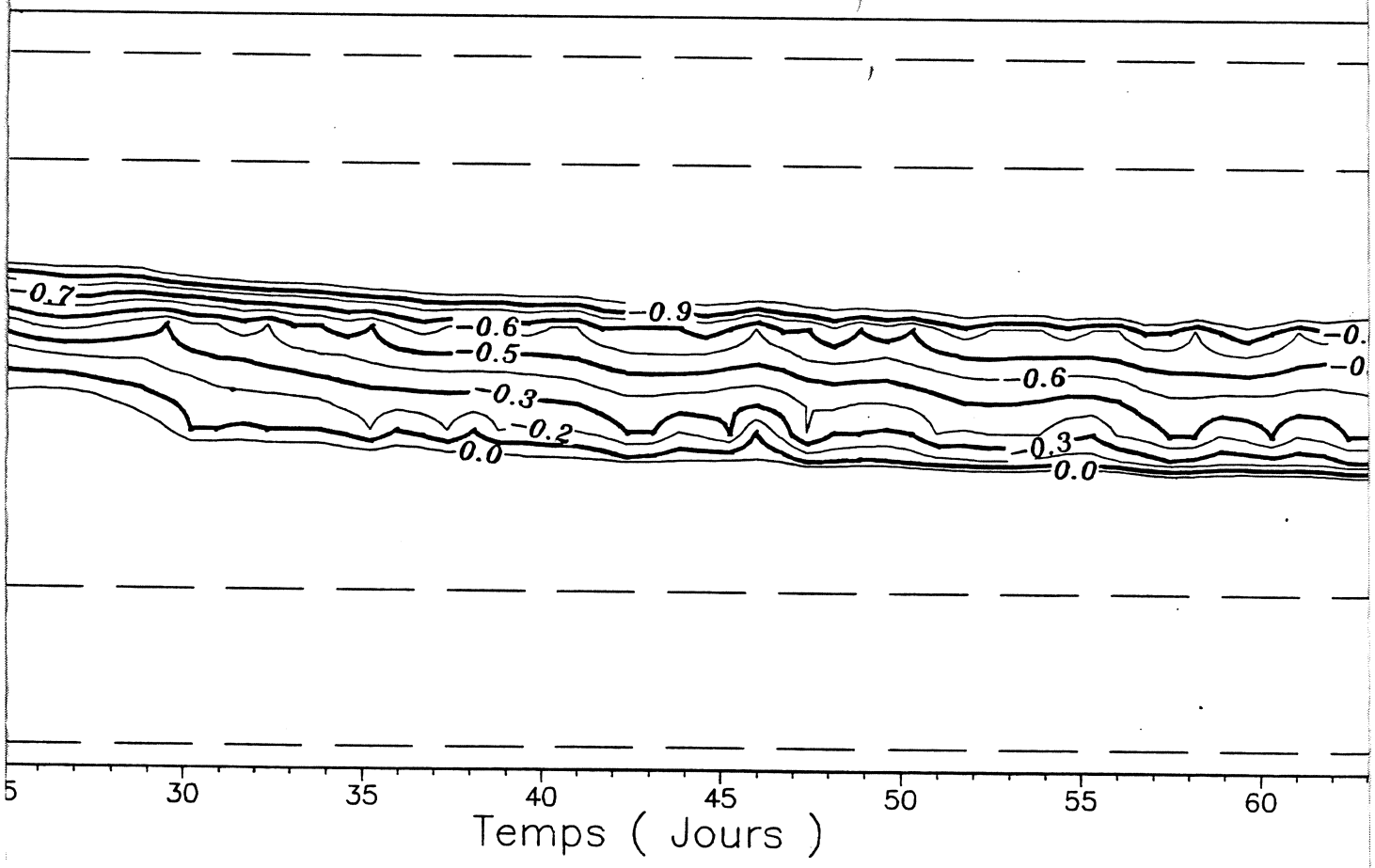
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

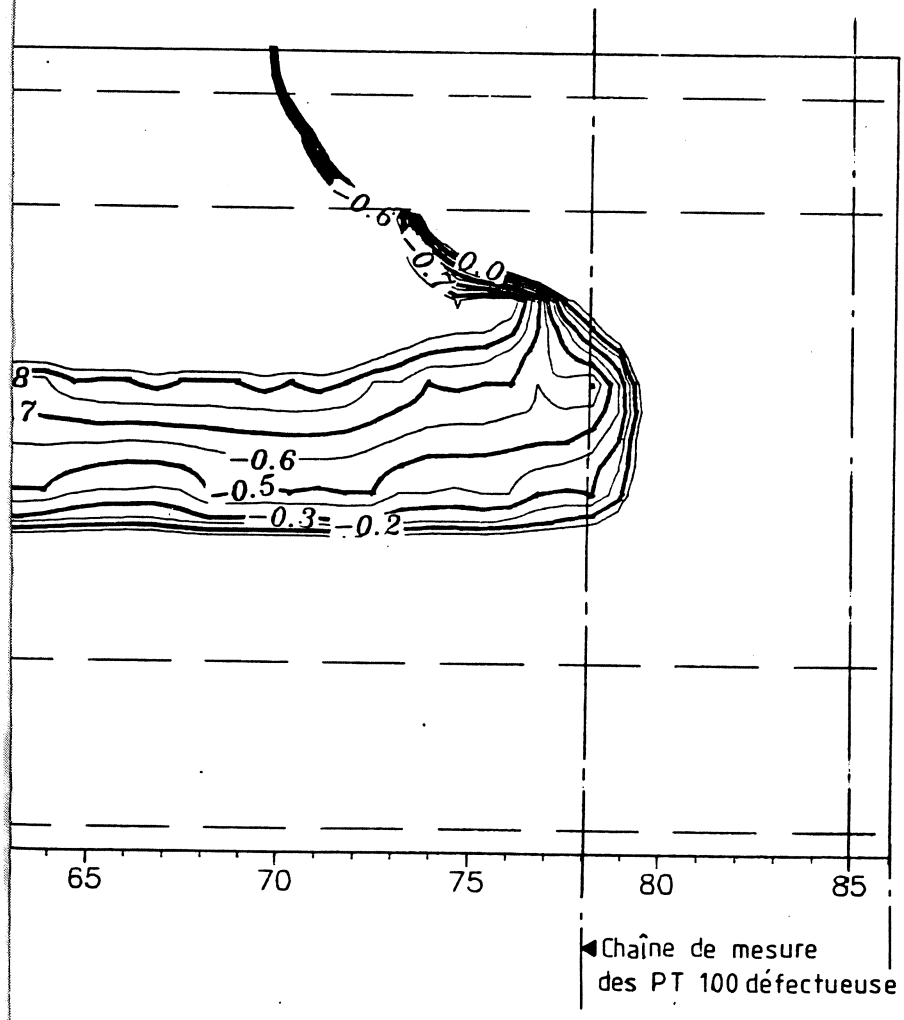
ISOTHERMES - 1,0 et 1°C

Début de l'essai 2 : 10.05.88

Champs 2




-0.7
-0.9
-0.6
-0.5
-0.6
-0.3
-0.2
-0.3
0.0
0.0
5
30
35
40
45
50
55
60
Temps (Jours)


-0.6
-0.7
-0.0
8
7
-0.6
-0.5
-0.3
-0.2
65
70
75
80
85
Chaîne de mesure
des PT 100 défectueuse

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

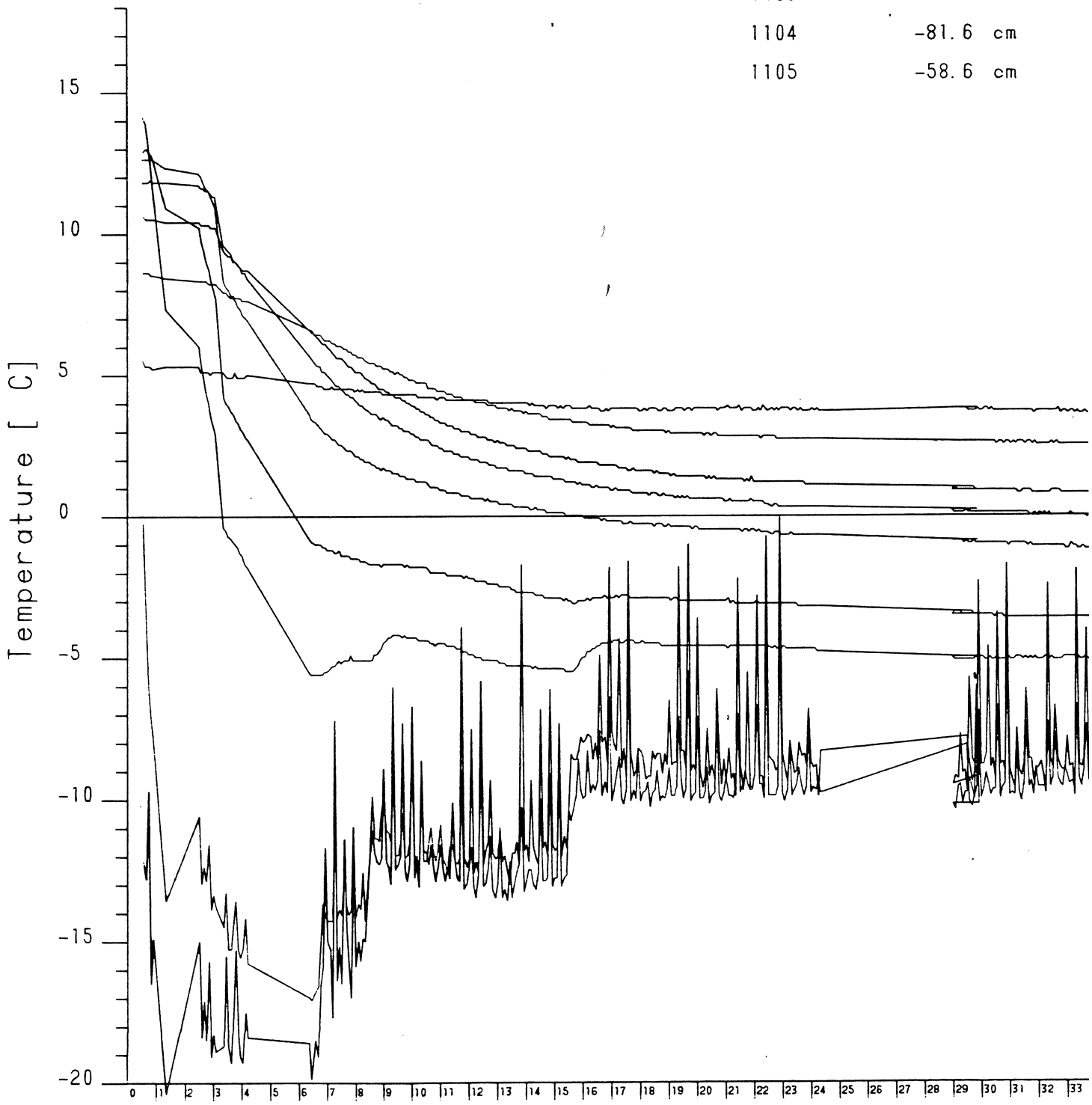
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS
(A UNE PROFONDEUR DONNEE)

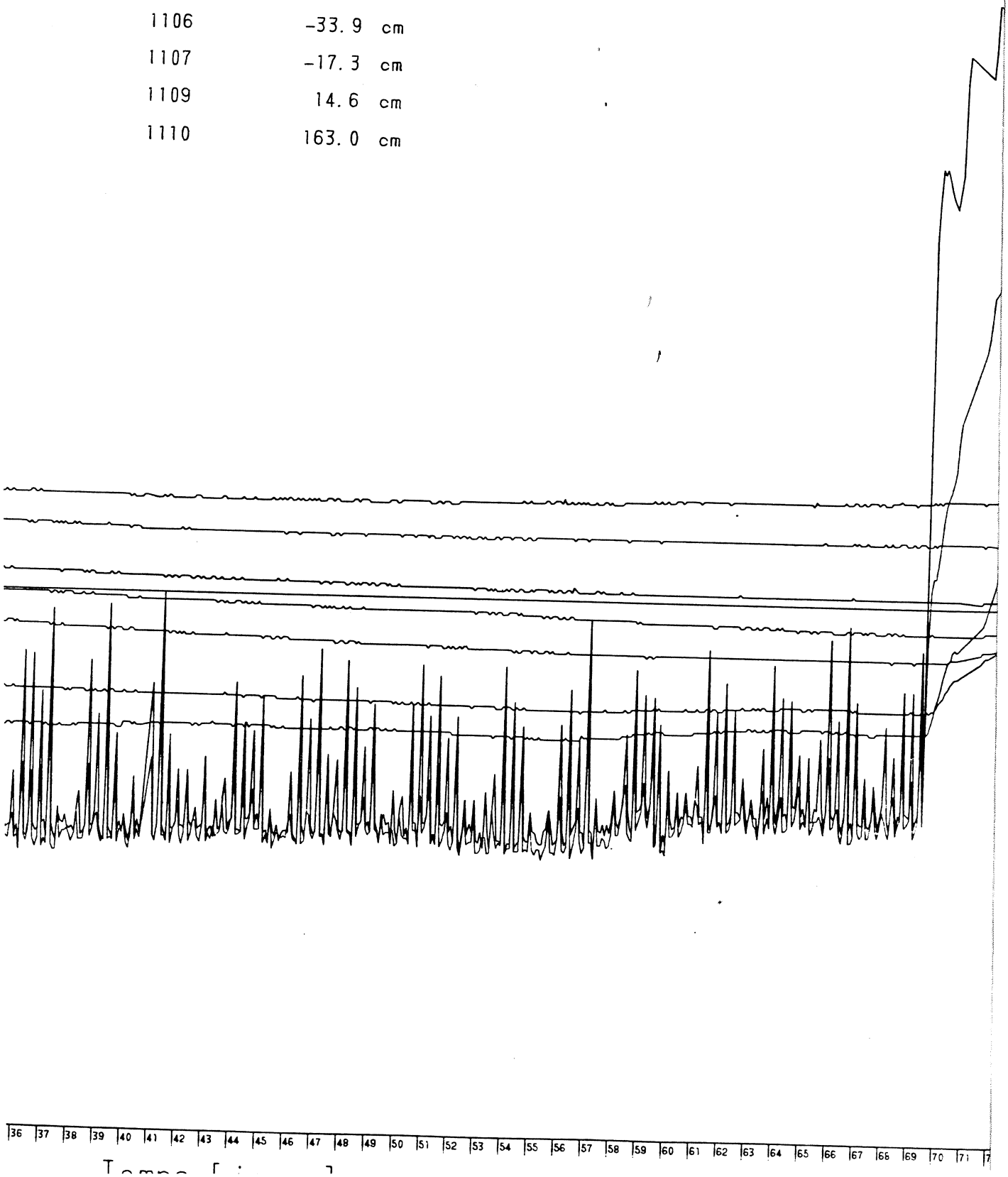
Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

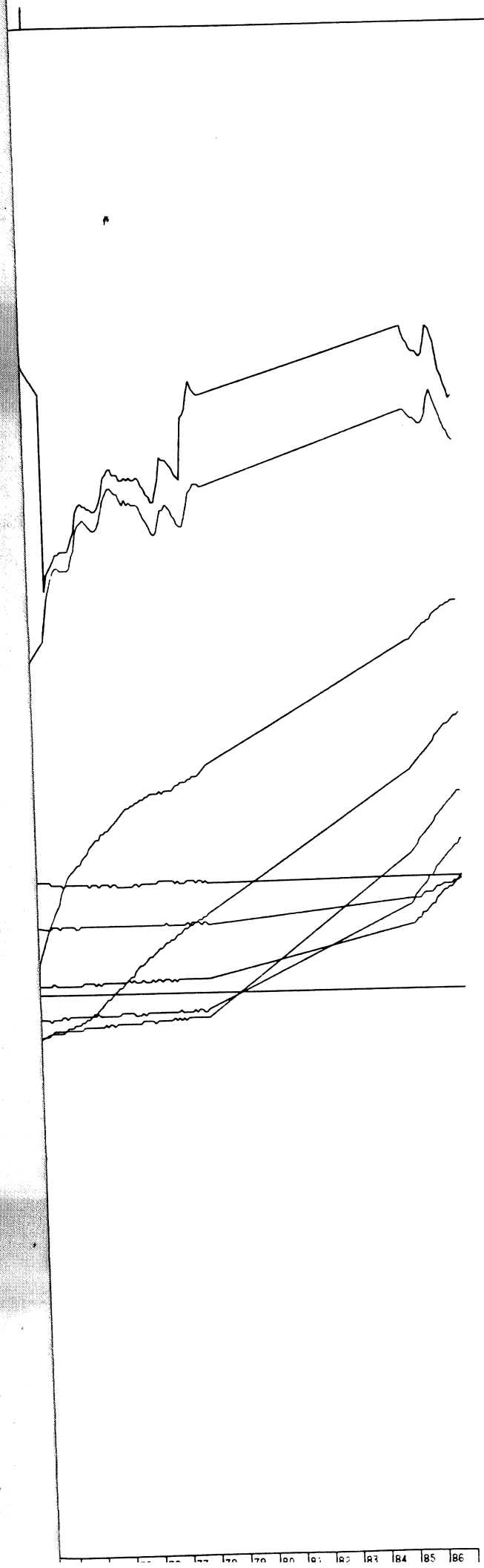
Champ 1

Capteur N°	Profondeur
1101	-187.0 cm
1102	-145.0 cm
1103	-104.0 cm
1104	-81.6 cm
1105	-58.6 cm



Capteur N	Profondeur
1106	-33.9 cm
1107	-17.3 cm
1109	14.6 cm
1110	163.0 cm




84
85
86

Gy22

ANNEXE 2-6

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

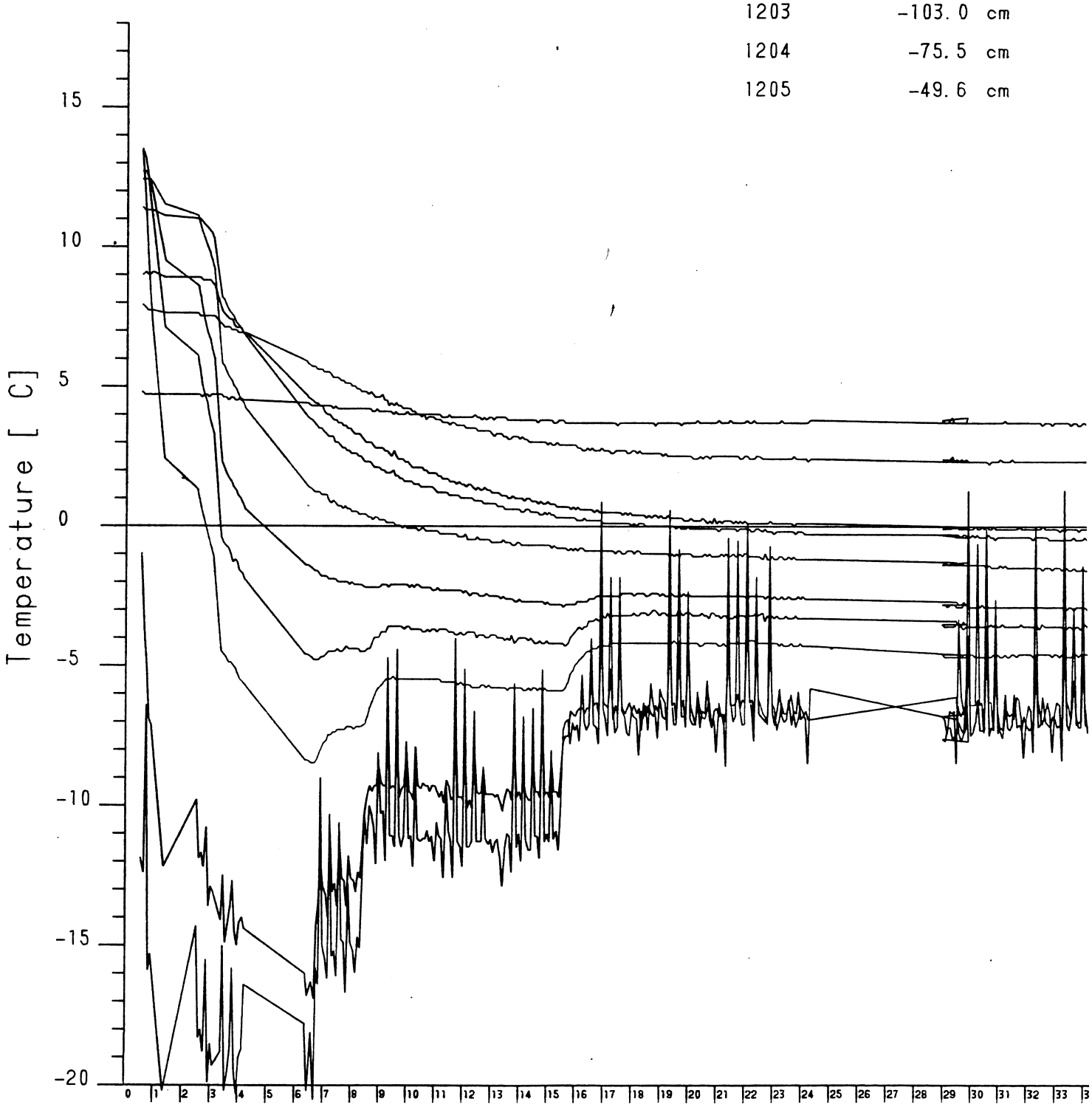
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS
(A UNE PROFONDEUR DONNEE)

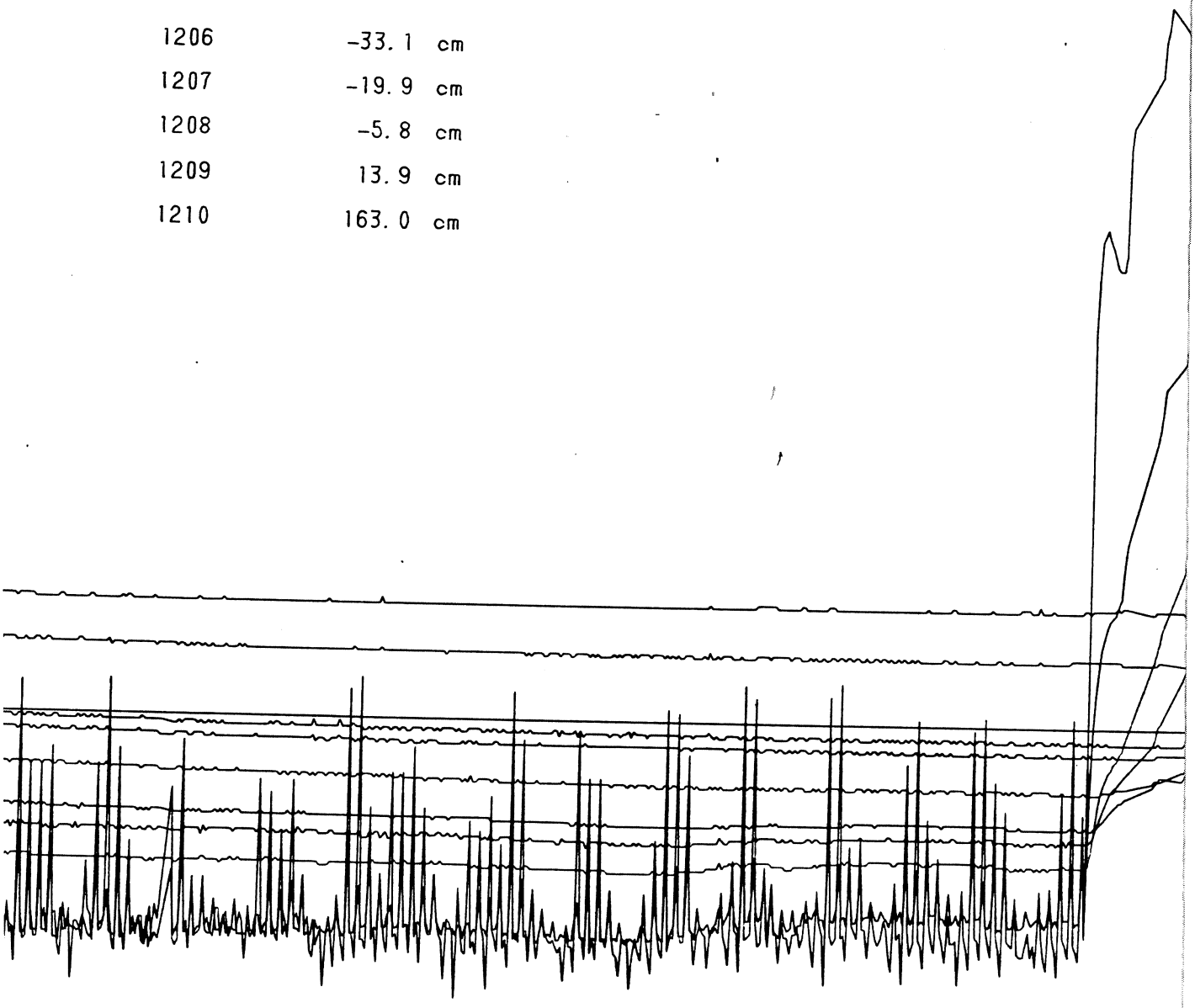
Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 2

Capteur N°	Profondeur
1201	-189.0 cm
1202	-148.0 cm
1203	-103.0 cm
1204	-75.5 cm
1205	-49.6 cm

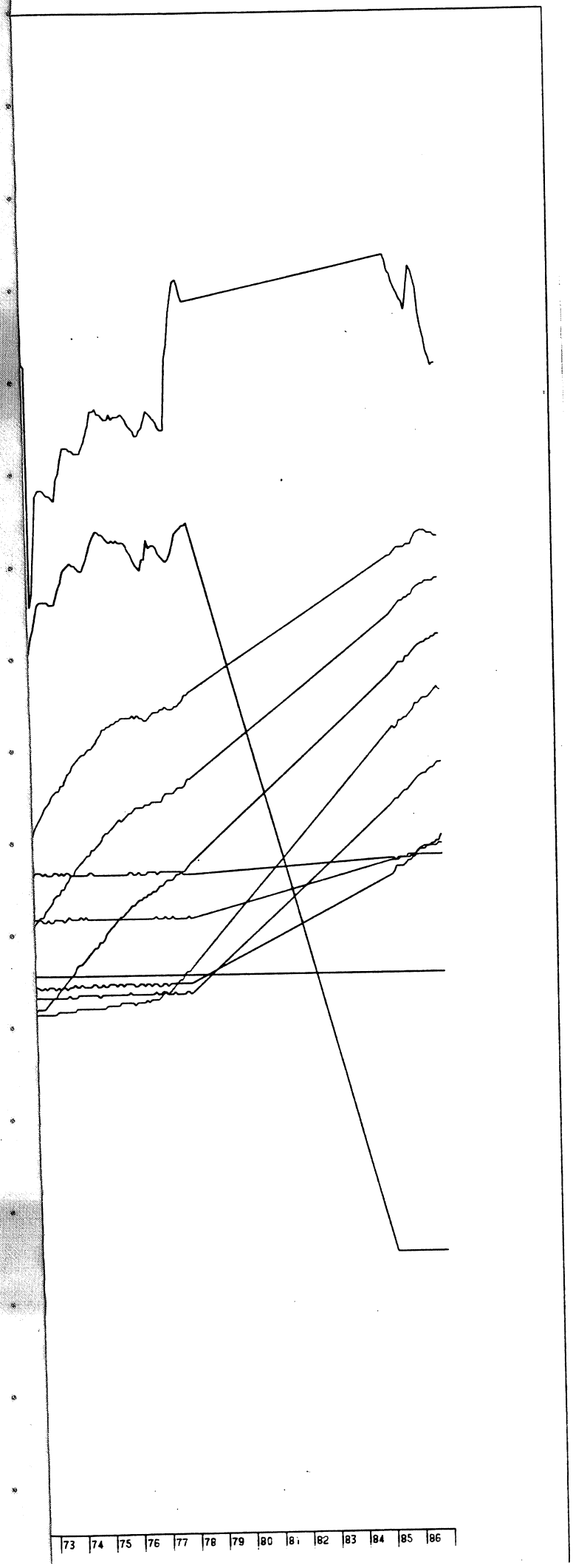


Capteur N	Profondeur
1206	-33.1 cm
1207	-19.9 cm
1208	-5.8 cm
1209	13.9 cm
1210	163.0 cm



36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72

Temps [jours]


73
74
75
76
77
78
79
80
82
83
84
85
86

Gy22

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

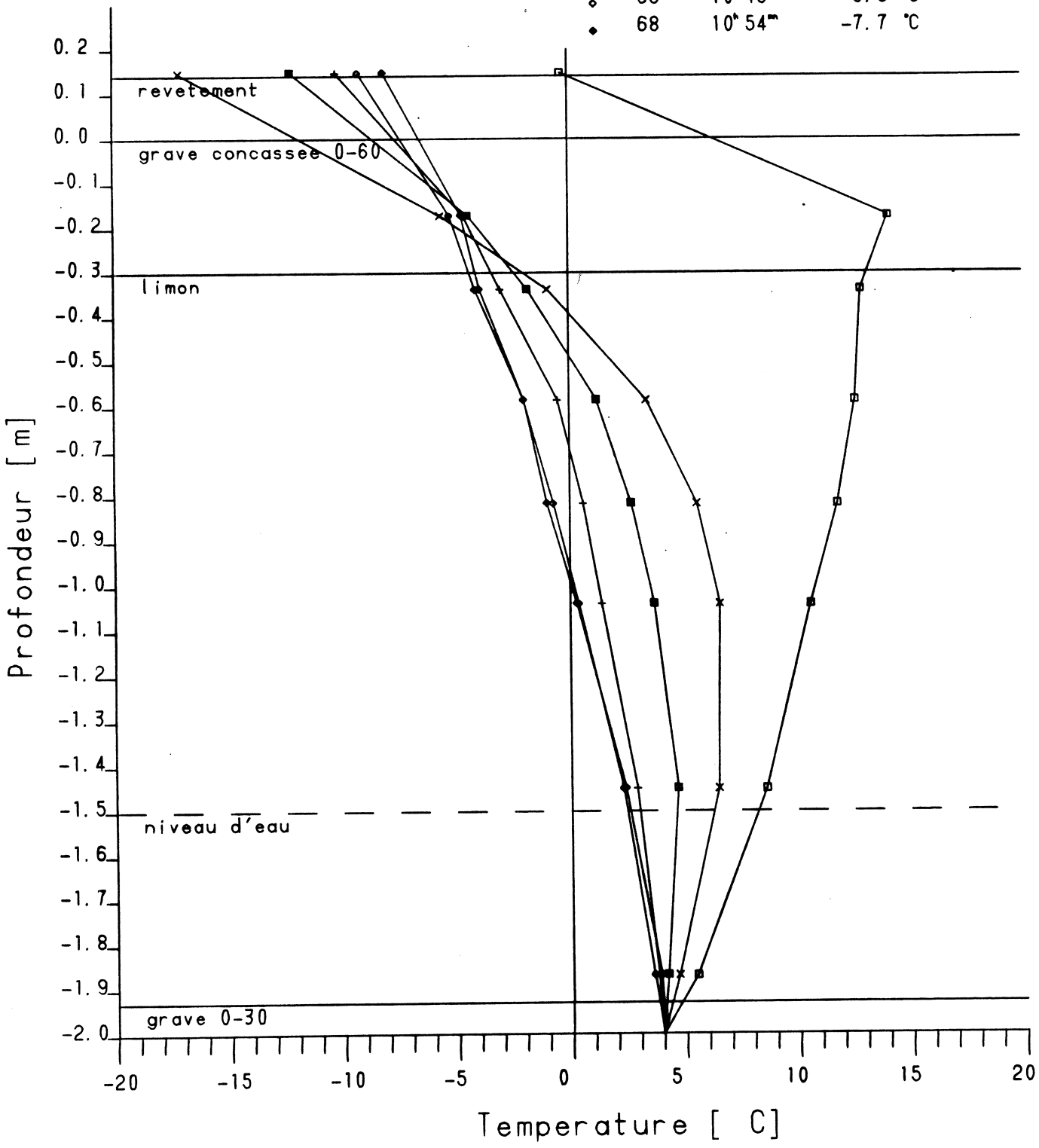
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	0	10h 4mn	-12.2 °C
×	6	10h 27mn	-19.9 °C
■	10	10h 17mn	-11.8 °C
+	20	10h 39mn	-9.2 °C
◇	55	10h 46mn	-8.5 °C
◆	68	10h 54mn	-7.7 °C



Gy22

ANNEXE 2-8

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

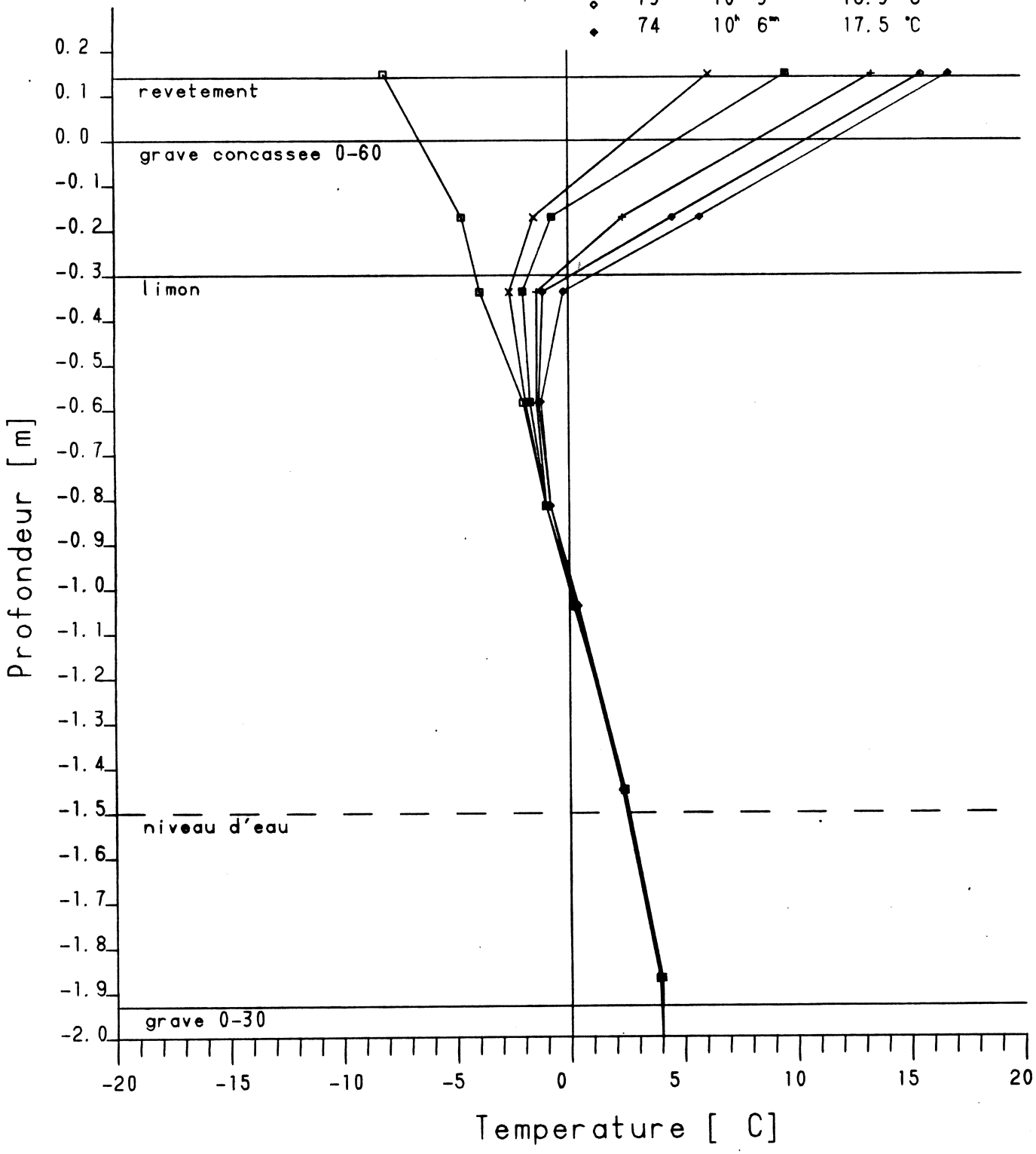
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	68	10h 54mn	-7.7 °C
×	70	10h 58mn	19.6 °C
■	71	10h 2mn	19.8 °C
+	72	10h 2mn	14.4 °C
◇	73	10h 3mn	16.3 °C
◆	74	10h 6mn	17.5 °C



Gy22

ANNEXE 2-9

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

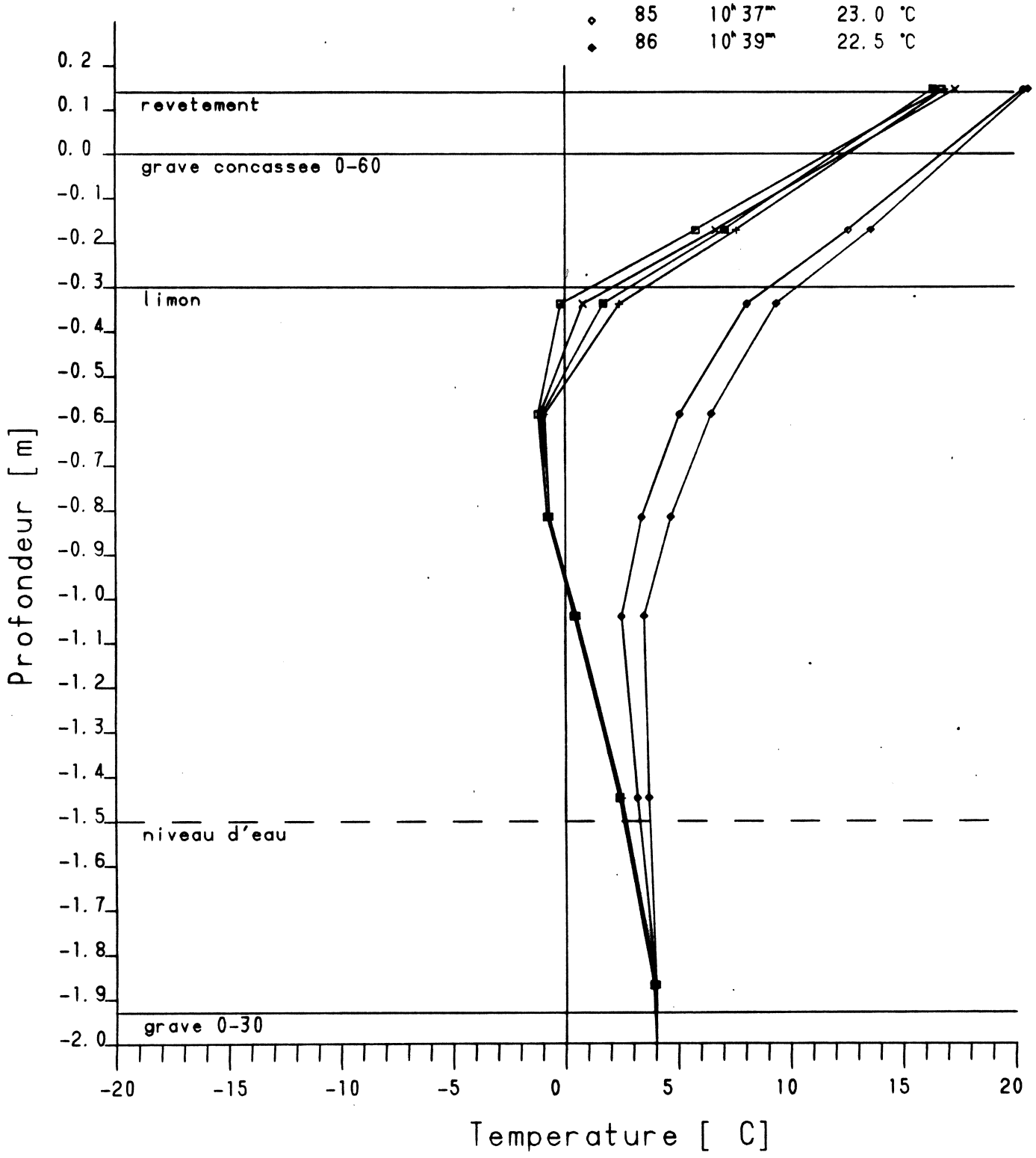
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 1

	Jour	Heure	Temp. air
□	74	10h 6mn	17.5 °C
×	75	10h 3mn	18.3 °C
■	76	10h 5mn	17.9 °C
+	77	10h 3mn	20.6 °C
◇	85	10h 37mn	23.0 °C
◆	86	10h 39mn	22.5 °C



Gy22

ANNEXE 2-10

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

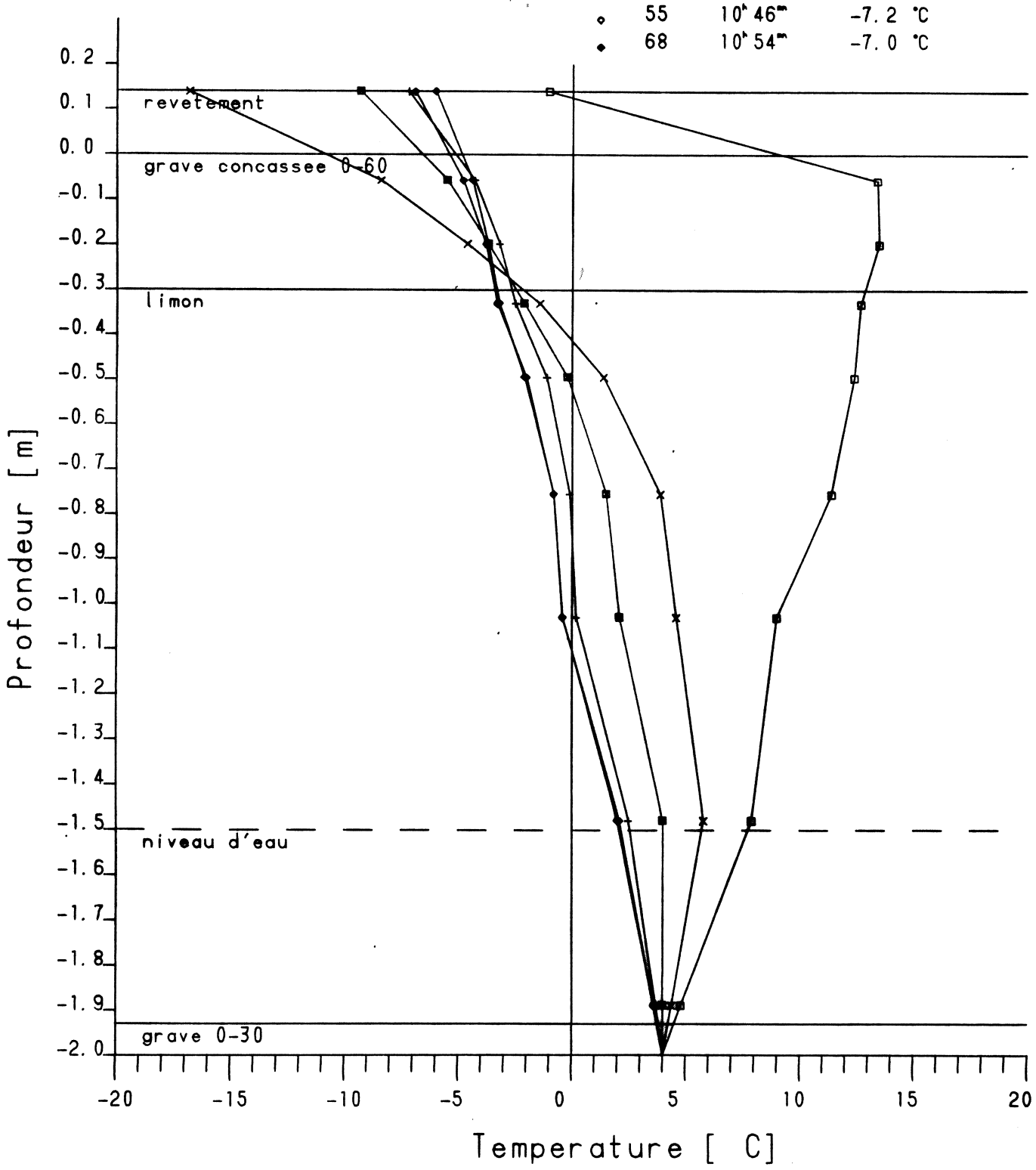
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	0	10h 4mn	-11.9 °C
×	6	10h 27mn	-20.2 °C
■	10	10h 17mn	-11.2 °C
+	20	10h 39mn	-6.4 °C
◇	55	10h 46mn	-7.2 °C
◆	68	10h 54mn	-7.0 °C



Gy22

ANNEXE 2-11

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

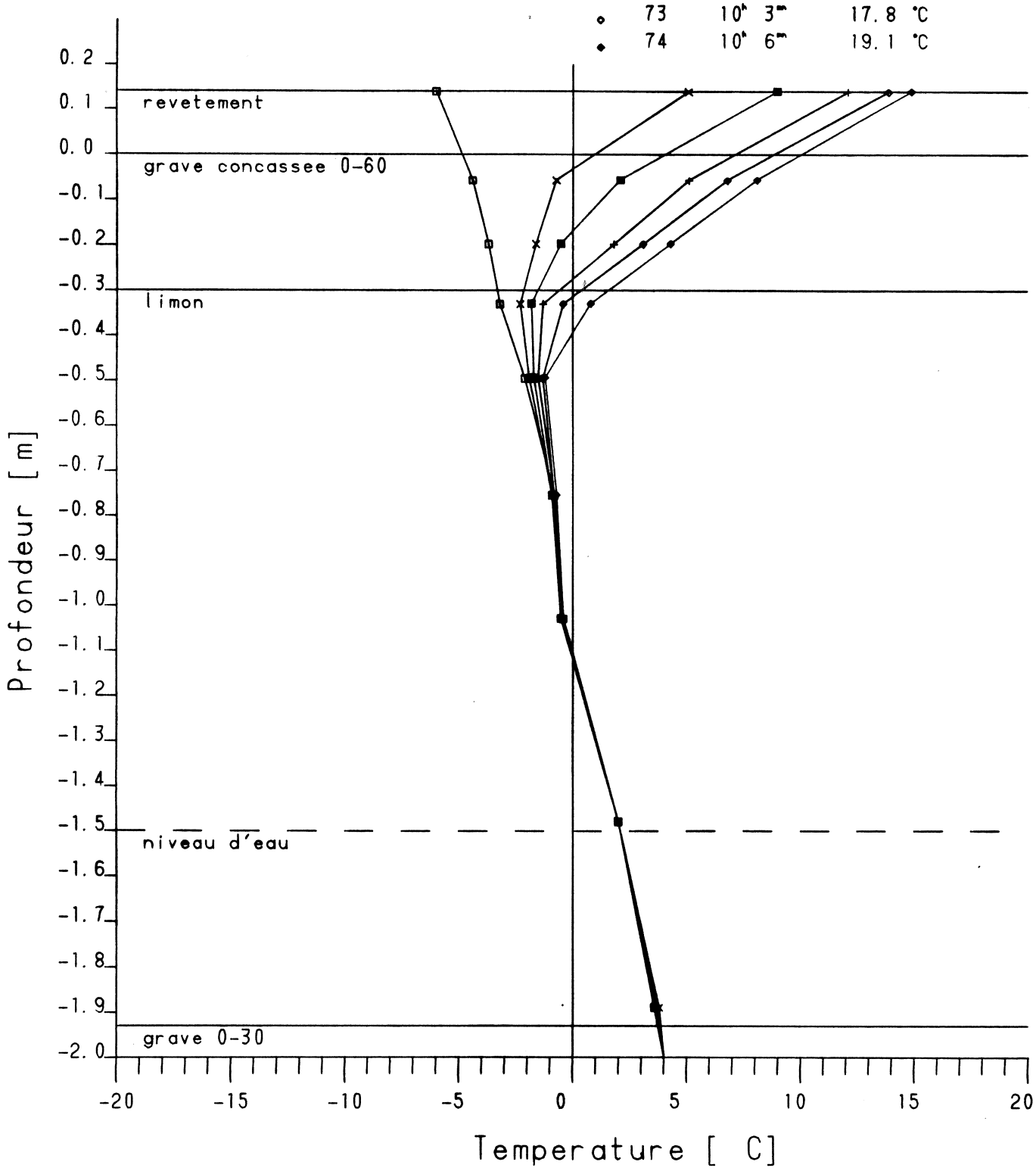
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	68	10h 54mn	-7.0 °C
×	70	10h 58mn	18.2 °C
■	71	10h 2mn	20.5 °C
+	72	10h 2mn	13.2 °C
◇	73	10h 3mn	17.8 °C
◆	74	10h 6mn	19.1 °C



Gy22

ANNEXE 2-12

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

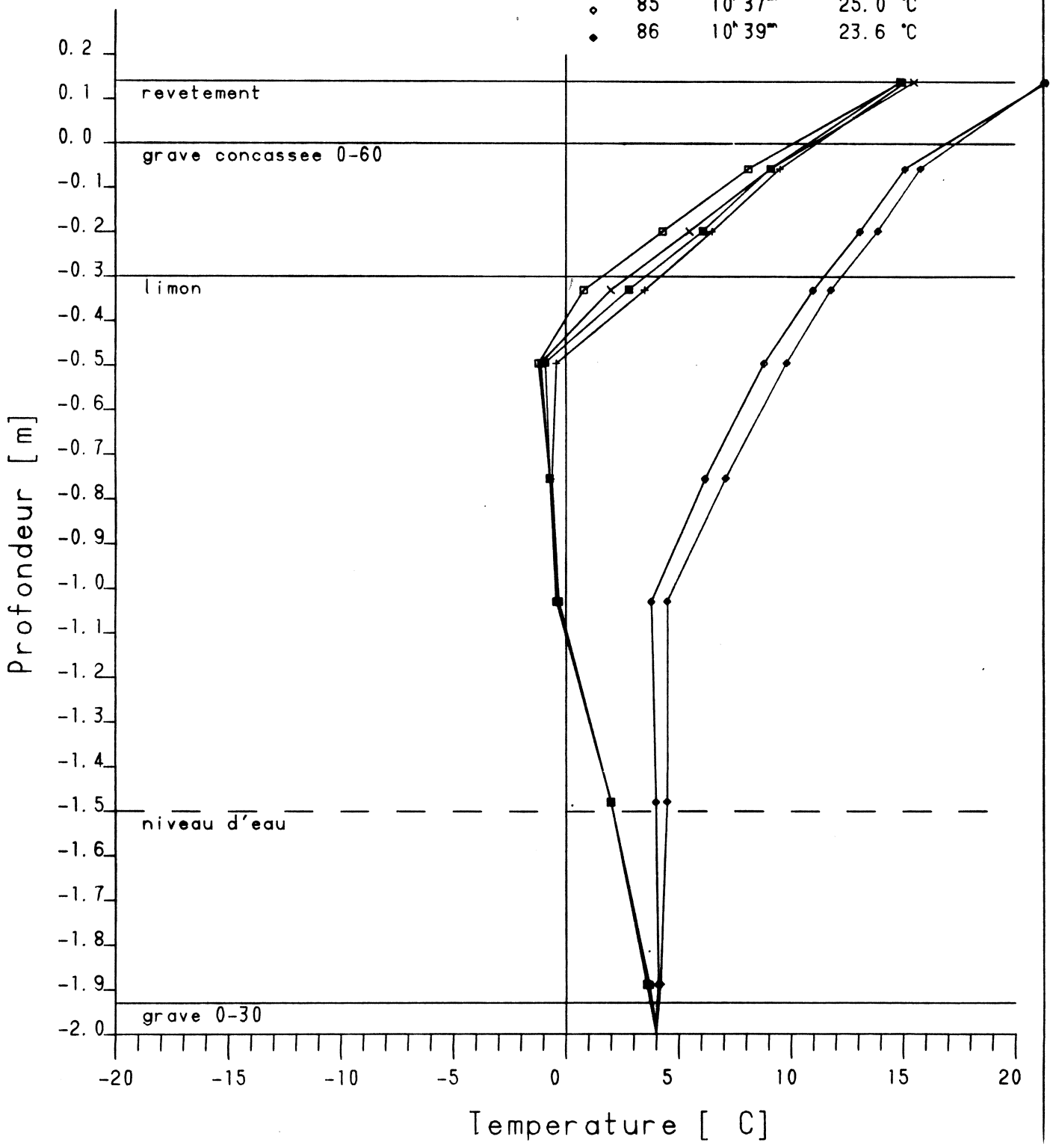
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
(A UN INSTANT DONNE)

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 2

	Jour	Heure	Temp. air
□	74	10h 6m	19.1 °C
×	75	10h 3m	19.9 °C
■	76	10h 5m	19.5 °C
+	77	10h 3m	22.6 °C
◇	85	10h 37m	25.0 °C
◆	86	10h 39m	23.6 °C



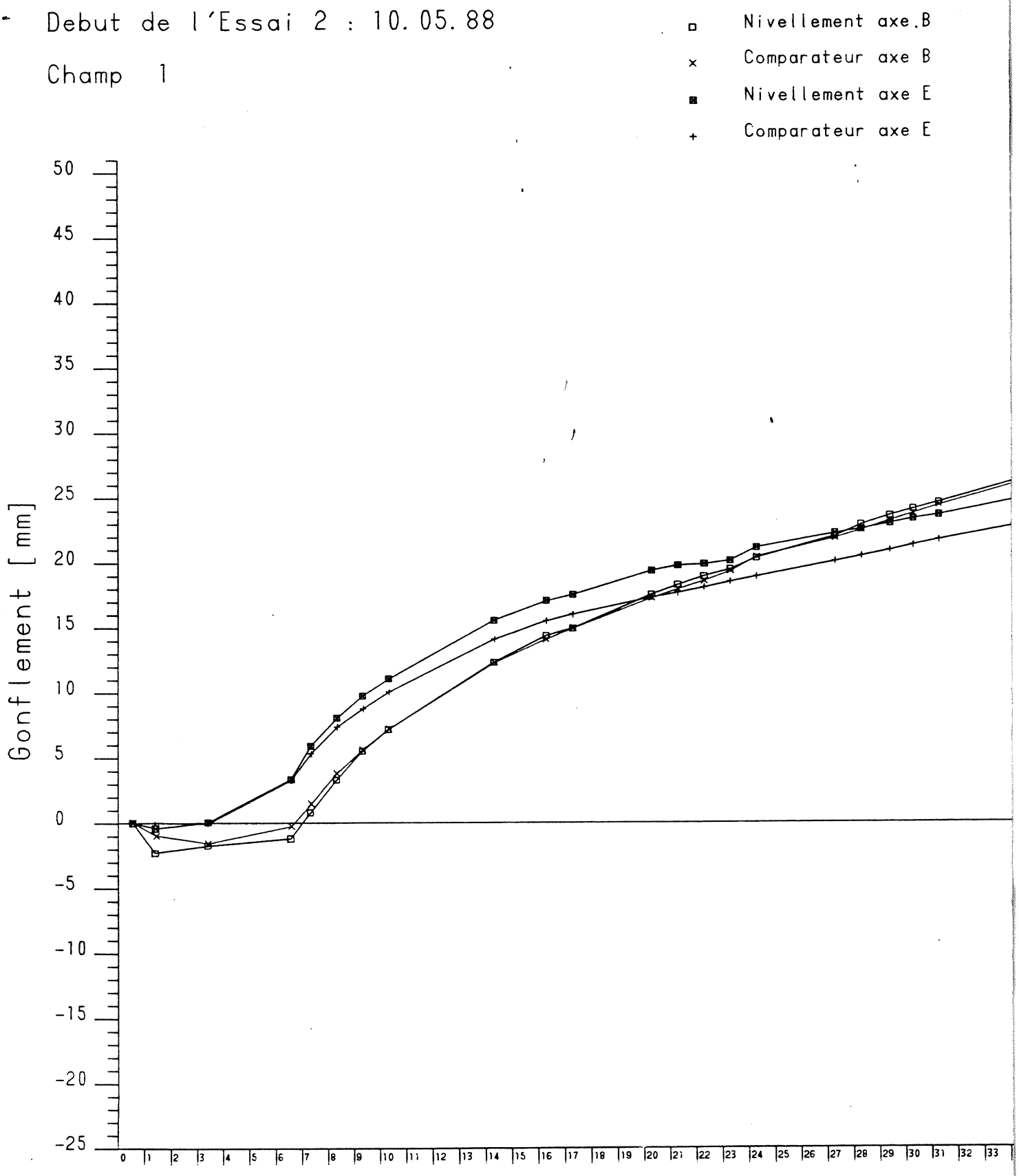
LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

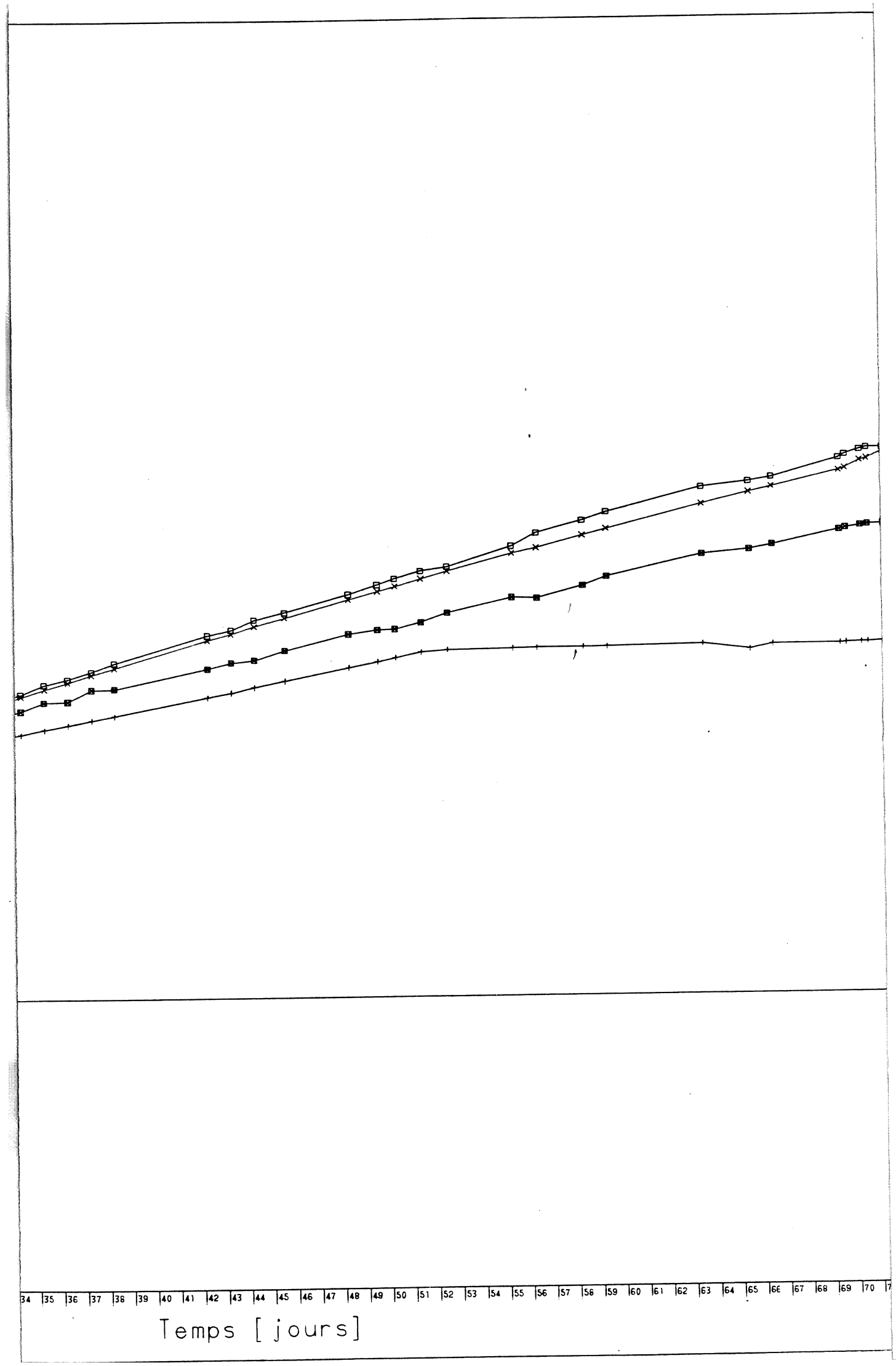
CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

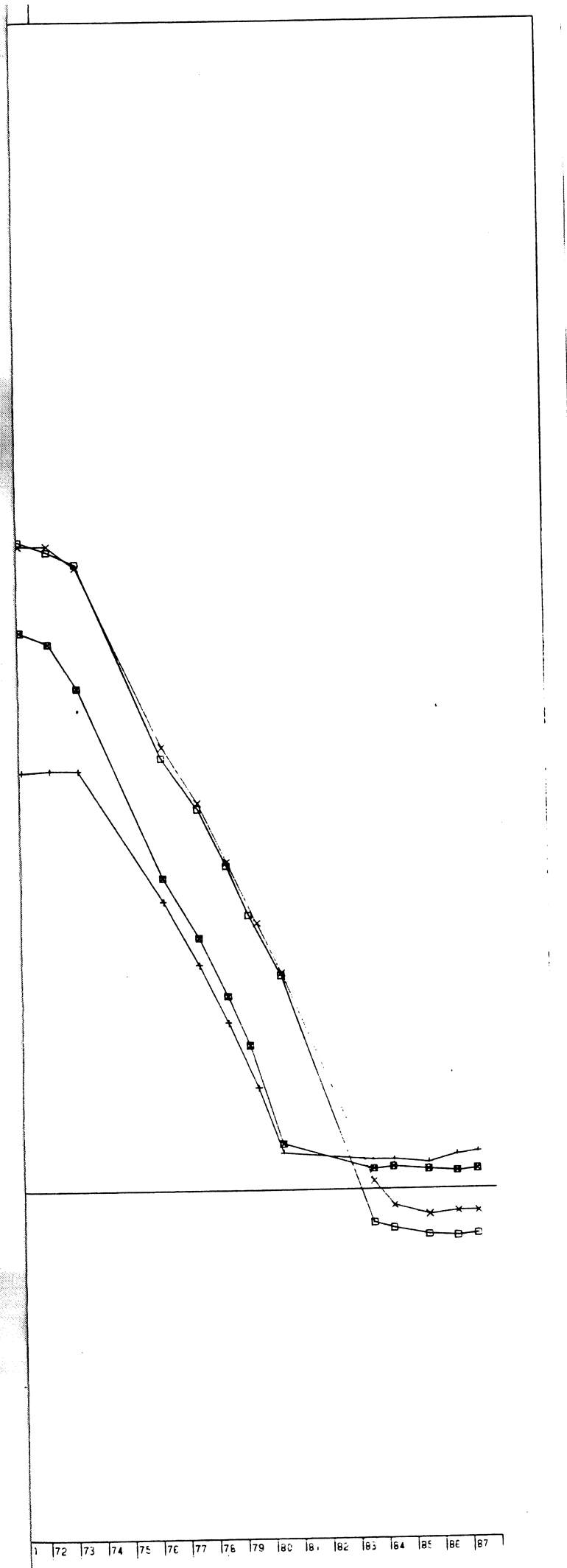
VARIATION DU GONFLEMENT/TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS
(MESURES A LA SURFACE DU SOL)

- Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 1




34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70
Temps [jours]


72
73
74
75
76
77
78
79
80
82
83
84
85
86
87

Gy 22

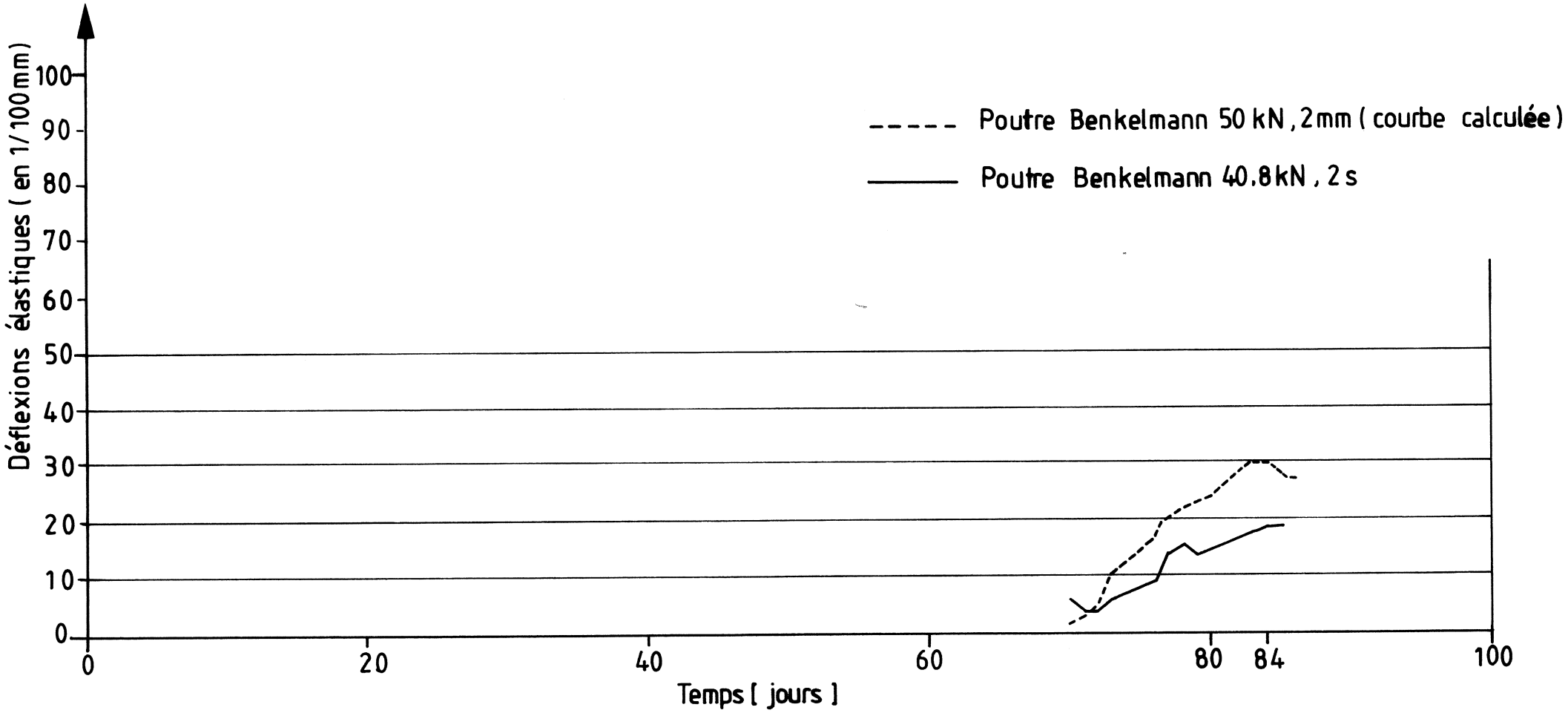
ANNEXE N° 2-14

DEBUT DE L'ESSAI 2 : 10.05.88
CHAMP 1 AXE B

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL / DEGEL SUR GRAVE CONCASSÉE

VARIATION DE LA DEFLEXION ELASTIQUE EN FONCTION DU TEMPS



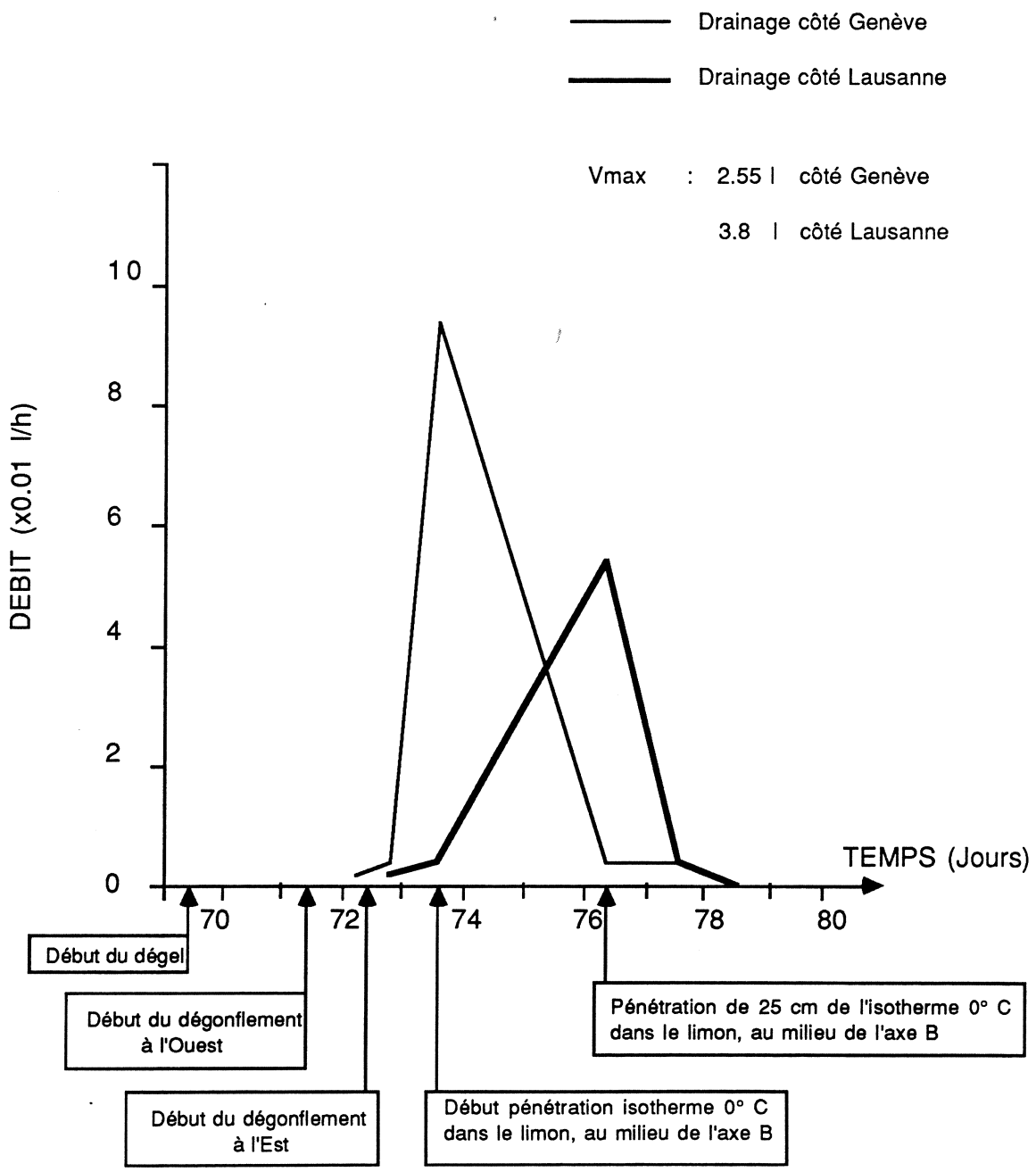
Gy22

ANNEXE 2-15

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CYCLE DE GEL/DEGEL SUR GRAVE CONCASSEE

VARIATION DU DEBIT D'EAU RECUEUILLIE LORS DU DEGEL EN FONCTION DU TEMPS

Debut de l'Essai 2 : 10.05.88

Champ 1