



Programme
géothermie 25'483
66'100

Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo- mécaniques

rédigé par
Dr L. Laloui, M. Moreni, G. Steinmann, Prof. L. Vulliet
EPFL - LMS, 1015 LAUSANNE

Dr A. Fromentin, Dr D. Pahud
EPFL - LASEN, 1015 LAUSANNE

par ordre de
Office fédéral de l'énergie

Résumé

Le but de ce projet est de tester en conditions réelles (dimensions, charges, ...) le comportement statique d'un pieu échangeur et de son interface avec le terrain. Pour ce faire, un pieu (diamètre 880 mm, longueur 25 m) du bâtiment polyvalent du Quartier Nord de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a été équipé avec un circuit hydraulique pour pouvoir lui injecter de la chaleur (i.e. le pieu a été transformé en pieu échangeur à l'aide d'un module de chauffage spécial). Des capteurs de force, de déformation et de température ont été installés afin d'évaluer l'effet des sollicitations thermo-mécaniques sur la statique du pieu.

Après une phase de conception, instrumentation et réalisation du pieu échangeur, une série de sept tests de sollicitations thermo-mécaniques du pieu a été réalisée. Les températures appliquées au pieu ont varié de 15°C à 22°C. Les déformations ainsi que les températures ont été mesurées à différents niveaux du pieu et à différentes époques. Un enregistrement continu des mesures thermiques relatives au chauffage du pieu (températures, débit, puissances électrique et thermique) a également été réalisé. Des carottages soniques et un contrôle avec la méthode de réflexion ont été effectués pour déterminer le module d'élasticité du pieu et la qualité de son béton. A l'aide de ces mesures d'auscultation acoustique, il a été possible de dresser la distribution du module de rigidité le long du pieu à différentes températures. Enfin, une caractérisation du comportement thermo-mécanique du sol a été effectuée en laboratoire.

L'objectif principal du projet de constituer une base de données expérimentales dans des conditions réelles de pieux échangeurs a complètement été atteint. Ainsi, on dispose maintenant d'informations dont l'analyse devrait permettre de répondre aux questions relatives à l'effet de la température sur le comportement du pieu.

De cette première analyse des résultats, on retient que les variations thermiques induisent deux effets significatifs sur les pieux. Le premier est celui de l'augmentation de la mobilisation du frottement latéral due à la dilatation. Le second est celui d'un effort supplémentaire dans le pieu dû à la dilatation empêchée. Dans le cas du bâtiment analysé, il s'avère que la mobilisation de la résistance à l'interface sol-pieu est tout à fait significative et pourrait atteindre ses valeurs limites. L'estimation du coefficient d'hyperstaticité du pieu a permis de montrer qu'au fur et à mesure que le bâtiment se construisait, la valeur de ce coefficient diminuait, ce qui correspond à un empêchement progressif du pieu de se déplacer. Ceci se traduit directement par l'augmentation de la charge verticale d'origine thermique sur le pieu. Cette augmentation a été quantifiée dans le cas du Test 2. Elle correspond à une contrainte de compression relativement importante.

Il est donc possible de conclure que les effets thermiques ont une réelle importance sur le comportement des fondations profondes, et qu'il est donc important d'en tenir compte dans le dimensionnement. Ceci ne limite en rien la faisabilité de telles réalisations.

Abstract

A pile of the foundation of the polyvalent building in the north quarter of the Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL) was equipped with a hydraulic circuit in order to be able to inject heat inside it (i.e. the pile was transformed into a heat exchanger pile). Load, deformation and temperature sensors were installed in the pile in order to assess the influence of thermal solicitations on the static behaviour of the pile.

In the initial phase of the project, the design and realisation of the heat exchanger pile was scheduled together with the installation of the measurement sensors. This phase was finished by the end of May 1998. The next phase, which ends at December 1999, is comprised of series of thermal solicitations applied in the pile. Due to the construction of the building, the weight on the pile increases between each test.

Seven thermal solicitations were performed in between the completion of each floor of the building. The pile was heated with a temperature difference of 15°C for each test, except for the first one, where the temperature difference reached 22 °C (this was before the construction of the building's basement). Temperatures and deformations induced by the thermal and mechanical solicitations were measured and stresses calculated at different depths in the pile. During each test, the measurements relative to the heating of the pile (fluid temperatures, flow rate, electric and thermal powers) were continuously recorded. Sonic coring and a control using the reflection method were performed to determine the pile elastic modulus and the quality of its concrete.

The last part of the report deals with the analysis of the measurements in order to assess the influence of a temperature variation on the ability of the pile to support the load of the building.

The results show that the thermal variation has two effects on the mechanical behavior of the pile. The first effect is that the friction mobilization is increased with the temperature loading. The second effect is that a thermal compressive stress is added in the pile. These two effects should be taking into account in the design of foundations with heat exchanger pile, especially if thermal injection (solar collector) is used in summer. In the studied case, the integrity of the pile and thus of the building have never been threatened by thermal loading.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Cadre de l'étude.....	1
3. Objectifs du projet.....	2
4. Instrumentation et équipements.....	3
4.1 Emplacement du pieu-test.....	3
4.2 Caractéristiques géotechniques du site.....	4
4.3 Description de l'instrumentation du pieu.....	5
4.4 Module de chauffage.....	7
5. Sollicitations thermo-mécaniques et phases du projet.....	9
5.1 Programme de chargement.....	9
5.2 Phases du projet.....	10
6. Résultats des mesures.....	12
6.1 Test 0.....	12
6.2 Champs de température.....	16
6.3 Champs de déformation.....	44
6.4 Pressions.....	61
6.5 Mesures de nivellement.....	64
6.6 Synthèse des résultats.....	65
7. Tests complémentaires.....	66
7.1 Carottages soniques.....	66
7.2 Test d'intégrité du pieu.....	68
7.3 Caractérisation du comportement mécanique du sol.....	68
8. Premières analyses des résultats.....	70
8.1 Dilatation thermique du pieu.....	70
8.2 Mobilisation du frottement latéral.....	75
8.3 Contraintes supplémentaires dans le pieu.....	76
8.4 Synthèse des premières analyses.....	78
9. Conclusion.....	79
10. Publications liées au projet.....	81
11. Références.....	81

ANNEXES

ANNEXE 1 : Illustrations de la mise en place de l'instrumentation du pieu

ANNEXE 2 : Etalonnages des capteurs de mesure

ANNEXE 3 : Déroulement des tests

ANNEXE 4 : Caractérisation géotechnique des sols

ANNEXE 5 : Résultats des mesures

ANNEXE 6 : Mesures soniques des modules de rigidité (Rapport de De Cérenville)

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions.

1. Introduction

Ce document est le rapport final du projet « Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques ». Le projet a été réalisé sur la période de janvier 1998 au 31 décembre 1999.

Un pieu du bâtiment polyvalent en construction au Quartier Nord de l'EPF Lausanne a été équipé d'éléments de sollicitation thermique, de capteurs de force, de déformations et de température. Ce projet porte sur l'évaluation de l'effet de sollicitations thermiques sur la statique de ce pieu, dit pieu échangeur.

La phase initiale du projet comprend la conception, la réalisation ainsi que l'instrumentation du pieu échangeur; cette phase s'est terminée à la fin du mois de mai 1998 et a fait l'objet de la majeure partie du premier rapport intermédiaire (Laloui *et al.*, 1998).

La phase suivante, qui s'est terminée durant l'été 99, a porté sur l'application au pieu de cycles couplés de sollicitations thermo-mécaniques avec mesure des déformations induites par la variation de température et le poids de l'immeuble.

La dernière phase du projet (jusqu'en décembre 99) a porté, en plus du suivi du comportement du pieu et la réalisation d'essais complémentaires, sur une première interprétation des mesures afin d'évaluer l'influence de la variation de température sur la portance du pieu.

2. Cadre de l'étude

Un pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le terrain (Figure 1). Ses deux principales fonctions sont donc de reporter en profondeur les charges d'une construction et de servir d'échangeur de chaleur avec le terrain.

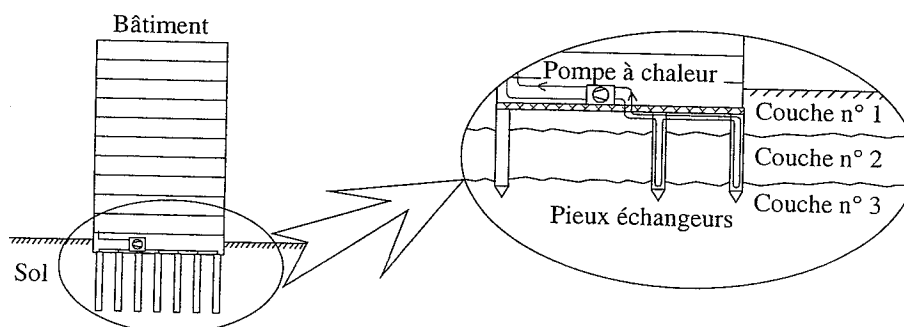


Figure 1 : Schéma d'un système de chauffage avec pieux échangeurs.

Un réseau de pieux de fondation est mis en oeuvre lorsque le sol en surface n'a pas de résistance suffisante pour supporter les charges de l'ouvrage par l'intermédiaire de fondations superficielles. D'une longueur unitaire pouvant varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, une partie ou la totalité des pieux

peuvent être équipés en "pieu échangeur" sans surcoût excessif, ce qui constitue un avantage par rapport à la réalisation de sondes géothermiques. Le système de pieux échangeurs, généralement raccordé à une pompe à chaleur (PAC), permet d'extraire la chaleur du sous-sol pour satisfaire des besoins de chaleur en hiver et d'y rejeter des charges thermiques issues de la production de froid en été. Ce système permet une utilisation avantageuse de l'énergie renouvelable en accord avec la philosophie d'un développement durable. Entraînée par une PAC électrique, cette technologie garantit une émission nulle de CO₂, de NO_x ou de SO_x à l'endroit même de la production de chaleur. Pour autant qu'un système de distribution de chaleur à basse température ait été prévu, ce mode de chauffage ne demande aucune adaptation architecturale notable; de plus, l'occupation du sol est nulle.

L'utilisation de pieux échangeurs représente une solution simple et élégante d'utilisation de l'énergie de façon rationnelle. Plusieurs installations de ce type existent déjà en Suisse (Pago à Grabs, 600 kW, Kino à Buchs, 70 kW, Wohnanlage Malerva à Sargans, 70 kW) et à l'étranger (plus de 300 en Europe). Malgré cela, **aucune connaissance scientifique** n'existe sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations thermo-mécaniques. Ceci représente un handicap quand il s'agit de convaincre un maître de l'ouvrage du bien-fondé d'une telle technologie.

Dans le cadre des études préalables pour l'équipement des futurs bâtiments d'architecture (Quartier Nord EPFL) en pieux échangeurs de chaleur, une étude conjointe (Fromentin *et al.*, 1998) a été menée par le bureau Passera et Pedretti SA, mandataire de l'Office des Constructions Fédérales (OCF), le laboratoire de mécanique des sols (LMS-EPFL) et laboratoire de systèmes énergétiques (LASEN-EPFL). De cette étude résulte qu'un test en grandeur réelle doit être réalisé afin de quantifier l'évolution des forces d'adhésion à l'interface sol-pieu sous l'effet thermique, et évaluer les grandeurs des contraintes supplémentaires qui seraient générées dans la structure (Laloui, 1998).

3. Objectifs du projet

Le présent projet a pour objectif la caractérisation du comportement thermo-mécanique d'un pieu. Par différentes techniques de mesure, il est possible de connaître de manière directe la déformation et la température à différents niveaux du pieu. Il est donc possible de voir l'effet de sollicitations thermiques sur la statique du pieu et d'évaluer les effets des déplacements différentiels (dilatation thermique) et leurs impacts sur les contraintes dans la structure.

Pour atteindre cet objectif, un pieu a été équipé de sorte à permettre les mesures suivantes :

- déformations verticales et horizontales du pieu
- valeurs des champs thermiques dans le pieu
- déformations verticales en tête du pieu

De ces mesures, il devrait être possible de déterminer :

- les efforts normaux en tête du pieu sous les charges de service du bâtiment.
- l'évolution de la charge en pointe en fonction de la température.
- la répartition du frottement latéral en fonction de la température.

4. Pieu-test : emplacement, instrumentation et équipements

Après avoir situé l'emplacement du pieu-test et décrit les couches géologiques du site, l'instrumentation du pieu est détaillée. Une présentation du module de chauffage utilisé dans le projet termine ce paragraphe.

4.1 Emplacement du pieu-test

Le pieu 68 du bâtiment polyvalent en construction au Quartier Nord de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) a été choisi pour servir de pieu-test à notre projet. Il est l'un des pieux d'un bâtiment de 5 étages, long de 100 m et large de 30 m (Figure 2). Le pieu-test a un diamètre de 88 cm et une longueur de 25.8 m. Il a été foré et coulé le 17 février 1998.

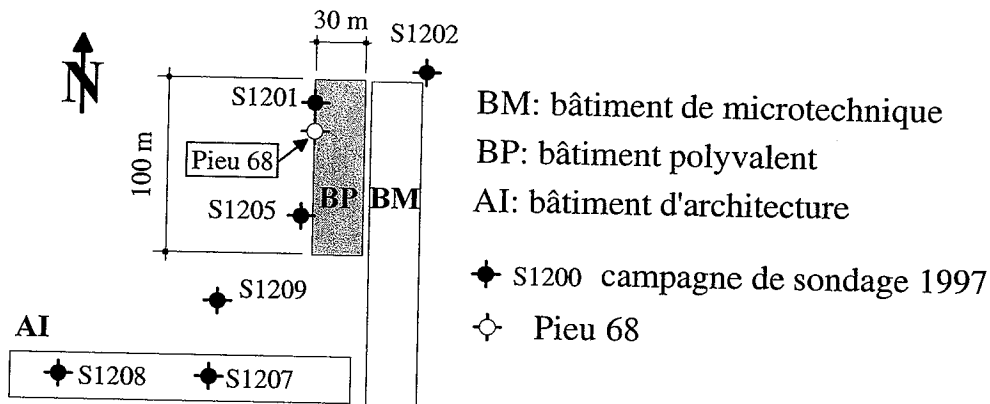


Figure 2 : Nouveaux bâtiments du Quartier Nord de l'EPFL.

Etant donné la longueur du pieu, la cage d'armature est constituée de deux parties de 15 et 12.8 m. Elles ont été assemblées par soudure lors de l'exécution du pieu. La cage d'armature est composée de 12 barres d'acier longitudinales de 18 mm de diamètre et de spires de 12 mm de diamètre espacées de 15 cm (Figure 3).

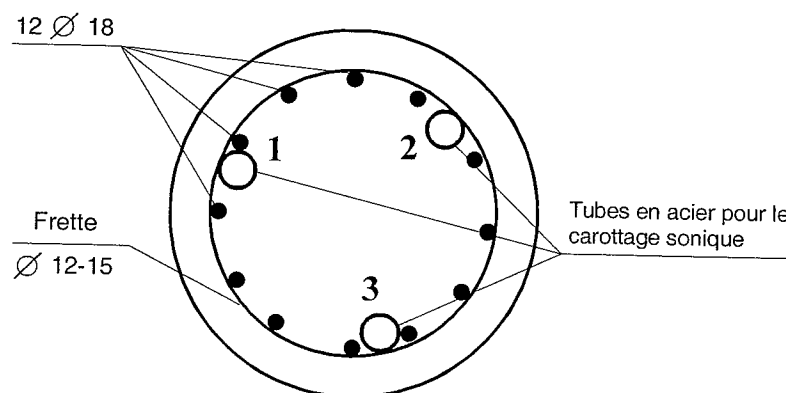


Figure 3 : Armature et tubes carottage sonique.

4.2 Caractéristiques géotechniques du site

Les sols rencontrés sur le site de l'EPFL à Ecublens (VD) sont classés en quatre types principaux (campagnes de sondage 94 et 97, rapport Géotechnique De Cèrenville, 1997) :

- A : sols alluvionnaires
- B : moraine sablo-graveleuse
- C : moraine de fond argileuse/sableuse
- D : molasse grèseuse ou marneuse

Les mesures piézométriques effectuées en septembre 97 (campagne de sondage 1200, Figure 2, De Cèrenville) indiquaient un niveau de « nappe souterraine » situé entre 2 et 3 m de profondeur. Il faut remarquer que les mesures ont été faites après une période relativement sèche et que le niveau d'eau pourrait s'élever en période pluvieuse; dans ce sens, des travaux de reconnaissance antérieures ont montré que le niveau piézométrique peut être pris égal au niveau du sol.

4.2.1. Essais au laboratoire (1994 et 1997)

Nous décrivons brièvement dans ce qui suit les campagnes d'essais en laboratoire réalisées en 1994 et 1997 pour la caractérisation géotechnique du site.

Les échantillons prélevés dans les sols glacio-lacustre (A) sont caractérisés par :

- une consistance en général tendre avec une résistance au cisaillement non drainé déterminée au scissomètre de l'ordre de 15-20 kN/m²
- une teneur en eau voisine de 30%.
- un poids spécifique apparent sec (γ_d) d'environ 15 kN/m³.

La couche de moraine (B) a des caractéristiques en général meilleures que celles des terrains de type (A), mais assez hétérogènes :

- une consistance tendre avec une résistance au scissomètre de l'ordre de 20-30 kN/m².
- une teneur en eau variant entre 20 et 40%.
- un poids spécifique apparent sec (γ_d) de 13-19 kN/m³.

Pour la moraine (C), il a été difficile de prélever des échantillons peu remaniés en raison de la nature souvent sableuse des sols et de la présence de graviers; ainsi les essais de résistance au scissomètre fournissent des valeurs dispersées. On constate cependant que:

- la résistance au scissomètre est comprise entre 70 et 150 kN/m².
- la teneur en eau se situe entre 14 et 20%.
- le poids spécifique apparent sec (γ_d) est de 18 kN/m³.

Dans la roche molassique (D), il faut distinguer le banc de grès dur du massif et les formations plus marneuses; les résultats des essais en laboratoire et des essais au scléromètre effectués sur les carottes de forage indiquent que :

- le grès présente une résistance à la compression simple situé entre 30 et 60 MPa et un module d'élasticité entre 3000 et 7000 MPa.
- Dans les marnes, la résistance à la compression simple est d'environ 12 MPa.

4.2.2 Détermination de la capacité portante

A partir de deux essais de charge statique réalisés sur le site de l'EPFL en 1975, les valeurs limites du frottement latéral ont été estimées. Les essais ont montré que le frottement latéral maximum était voisin de la cohésion non drainée c_{us} mesurée au scissomètre :

$q_s \geq c_{us}$ à la rupture q_s : résistance au frottement latéral à la rupture

$q_{sa} = 0.7 c_{us}$ admissible q_{sa} : résistance au frottement latéral admissible

Sur la base des rapports géotechniques, il est possible d'admettre les paramètres de dimensionnement suivants, pour les couches B, C et D:

	Couche B	Couche C
c_{us} [kPa]	30	135
q_s [kPa]	30	165
q_{sa} [kPa]	20	120

Couche D			
Val. choisie à la rupt.		Val. choisie adm.	
q_s [kPa]	q_p [kPa]	q_{sa} [kPa]	q_{pa} [kPa]
300	16000	200	5000-5500
	11000		3500-4000

Tableau 1 : Paramètres géotechniques de dimensionnement (couche B, C et D).

4.3 Description de l'instrumentation du pieu

L'instrumentation adoptée pour la mesure des déformations et températures dans le pieu, ainsi que la charge en pointe est composée des 58 capteurs suivants (Figure 4):

- 24 extensomètres à corde vibrante TELEMAT C110 qui permettent de mesurer les déformations verticales et la température dans le pieu.
- 24 capteurs à fibres optiques (SMARTEC) d'un mètre de longueur qui permettent de mesurer les déformations verticales dans le pieu.
- 5 capteurs à fibres optiques (SMARTEC) de deux mètres de longueur qui permettent de mesurer les déformations radiales à cinq profondeurs.
- 1 cellule de pression TELEMAT type HCV qui permet la mesure de la charge en pointe du pieu. Cette cellule de pression a été préalablement étalonnée (annexe 2) afin de tenir compte des effets thermiques.
- 4 extensomètres à corde vibrante TELEMAT C110 ont été placés en tête du pieu. Les déformations ainsi mesurées, et la connaissance du module d'élasticité du béton, permettent d'évaluer l'effort vertical transmis par la structure.

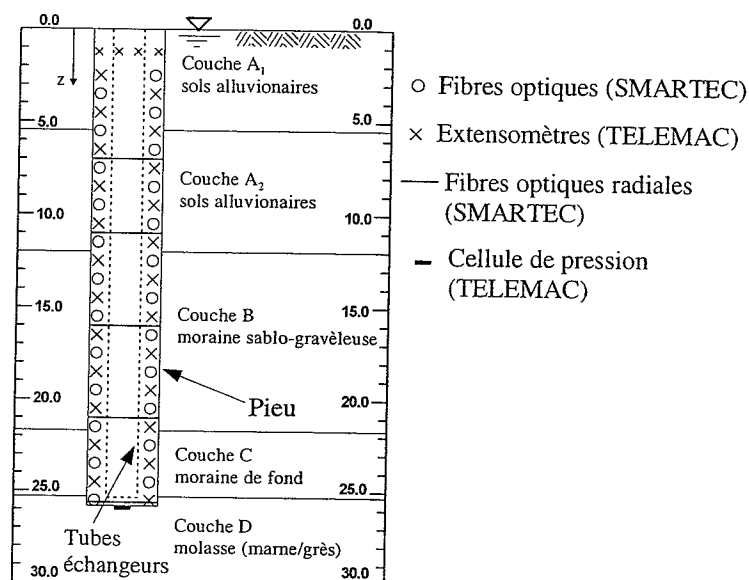


Figure 4 : Pieu test.

Le figure 5 détaille la disposition des capteurs (FO pour fibre optique et T pour Télémac). On peut y observer qu'à chaque mètre du pieu, une mesure de la déformation verticale est réalisée alternativement avec une fibre optique et un extensomètre à corde vibrante, ceci sur deux axes verticaux du pieu. On note aussi la présence de quatre capteurs en tête de pieu.

L'équipement de la cage d'armature et le bétonnage du pieu ont été des phases relativement sensibles. En effet, la mise en place du pieu-test est une opération délicate à la fois à cause de la fragilité des capteurs et ensuite des conditions de chantier dans lesquelles se déroulait cette installation. La longueur du pieu (26 m) a constitué une complication supplémentaire du fait que la cage d'armature était en deux parties à assembler sur place. Pour cela, deux grues ont été nécessaires pour permettre le transport de la cage d'armature sur le lieu du forage. Il a fallu ensuite faire preuve d'une grande attention lors de la soudure des deux parties métalliques de la cage d'armature afin ne pas couper les fils des capteurs. Le bétonnage du pieu était aussi une phase à craindre. Pratiquement, il a fallu un jour entier pour descendre l'armature dans le trou, et préparer le pieu pour le bétonnage.

Avec des précautions de tout premier ordre de la part de tous les intervenants, et la coopération de l'entreprise des pieux qui a accepté de rallonger le temps de mise en place, le taux de réussite de 95% de capteurs opérationnels a été obtenu (soit un seul capteur défectueux) après le bétonnage.

L'ensemble des capteurs a été testé en laboratoire avant la pose sur la cage d'armature du pieu, un autre test a été réalisé après la pose sur l'armature. Tous les capteurs ont été raccordés à un boîtier qui permet l'exploitation des mesures en temps réel à l'aide d'un ordinateur.

Il est à signaler que des tubes ont été placés dans l'armature pour permettre le passage du fluide caloporteur pour le chauffage et refroidissement du pieu.

En outre, 3 tubes de réservation pour des essais soniques ont également été installés sur l'armature.

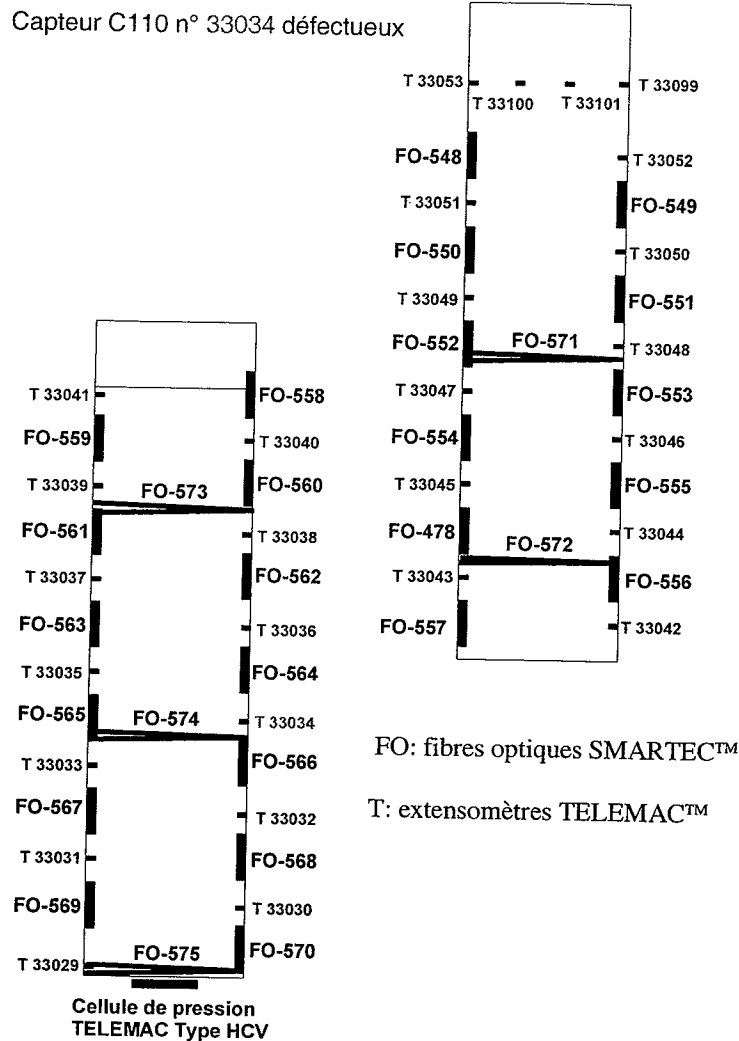


Figure 5 : Emplacement des capteurs du pieu-test
(cage d'armature scindée en deux)

4.4 Module de chauffage

Le rôle principal du module de chauffage est de fournir des sollicitations thermiques au pieu. Accessoirement et moyennant quelques précautions d'utilisation et de mesure, il doit également permettre d'effectuer un « test de réponse » sur des pieux ou des sondes ; pour mémoire, un tel test de réponse permet de déterminer les caractéristiques thermiques du pieu (ou de la sonde) et du sol avoisinant.

La solution retenue a été de construire un module de chauffage monté sur roulotte (voir figure 6) ; ce cube de 1,5 m d'arête, pesant environ 200 kg, est facilement transportable par camionnette. Il se compose principalement d'une chaudière électrique à faible contenance CIPAG ($P = 3, 6$ ou 9 kW), d'une pompe de circulation Grundfos ($Q = 0 - 2,5$ [m³/h]), d'un vase d'expansion Stucklin (50 l) et de deux purgeurs automatiques / mélangeurs Flamcovent. Différentes vannes permettent d'isoler certains tronçons et de faire circuler dans le pieu de l'eau de refroidissement. Un limiteur de niveau d'eau Stucklin (Flow switch) permet d'arrêter automatiquement l'alimentation de la chaudière en cas de débit

insuffisant (p.e. rupture d'un tube) et des soupapes de sécurité empêchent la pression de dépasser une valeur d'environ 3 bar dans les différents composants du module. En plus de ses trois niveaux de puissance, la température de la chaudière peut être réglée au moyen d'un thermostat ; de plus, une sécurité indépendante contre la surchauffe déclenche l'alimentation de la chaudière lorsque la température de cette dernière dépasse $\sim 90^{\circ}\text{C}$.

Les tuyaux, la chaudière ainsi que le module lui-même sont isolés afin de diminuer au maximum les déperditions thermiques.

Les mesures des températures aller et retour, la pression d'eau ainsi que le débit ont été automatisées à l'aide d'un système d'acquisition de données spécialement développé dans le cadre de ce projet. Il permet d'automatiser pour quatre températures (T_{aller} , T_{retour} , T_{module} et T_{ext}), les valeurs du débit et la puissance électrique consommée par la chaudière.

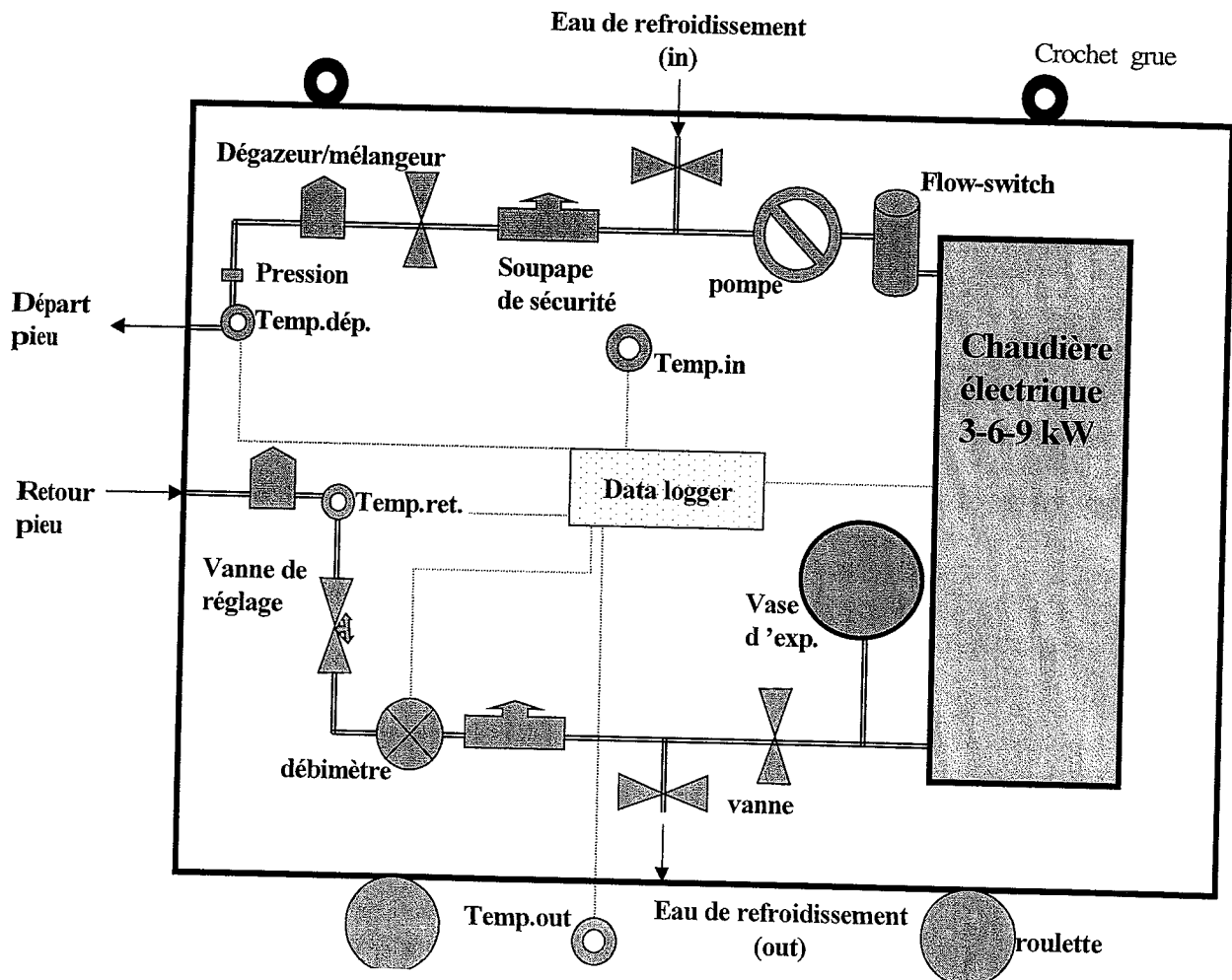


Figure 6 : Schéma du module de chauffage

5. Sollicitations thermo-mécaniques et phases du projet

5.1. Programme de chargement

Le pieu-test a été soumis à deux types de sollicitations: une mécanique et l'autre thermique. La charge mécanique est imposée par le poids propre du bâtiment en construction, quant à la charge thermique, elle est imposée à l'aide du module de chauffage (chaudière électrique) qui permet de chauffer et de refroidir l'eau qui se trouve dans les tubes en PE installés dans le pieu. Afin de mettre en évidence le couplage thermo-mécanique, les sollicitations ont été alternées. Ainsi, à la fin de la construction de chaque étage, un cycle de chargement thermique est imposé au pieu (Figure 7). Les capteurs de mesure sont relevés périodiquement en phase de chauffage et en phase de refroidissement. L'évolution des mesures thermiques relatives au module de chauffage (températures, débit, puissances électrique et thermique) est relevée manuellement pour les Tests 1 et 2, puis automatisée à l'aide d'un datalogger pour les tests suivants.

En ne tenant pas compte du test préalable (Test 0) réalisé au moment du bétonnage du pieu, on se retrouve avec sept tests. A chaque test, toutes les mesures de déformation, température et pression sont réalisées avant, durant et après l'application de la sollicitation thermique.

Quelques différences entre les tests sont à noter. Ainsi, pour le Test 1 les sollicitations thermiques étaient de l'ordre de $\Delta T=22^{\circ}\text{C}$, alors qu'elles sont de 15°C pour les autres. Etant donné que le Test 8 a été réalisé pour observer l'évolution des déformations par rapport à la fin du Test 7, Il a été exécuté à la température naturelle du terrain.

Le Tableau 2 résume les caractéristiques de chaque test thermo-mécanique et le lecteur trouvera dans l'annexe 3 les détails des mesures thermiques et mécaniques.

Test	Date	Etapas de construction	ΔT [$^{\circ}\text{C}$]
1	mai - juin 98	pieu libre	22
2	juillet-août 98	radier	15
3	septembre 98	dalle du 1 ^{er} étage	15
4	octobre 98	dalle du 2 ^{ème} étage	15
5	octobre-novembre 98	dalle du 3 ^{ème} étage	15
6	novembre-décembre 98	dalle du 4 ^{ème} étage	15
7	Janvier – février 99	dalle du 5 ^{ème} étage	15
8	Mai – décembre 99	Etat de service	0

Tableau 2 : les caractéristiques de chaque test thermo-mécanique.

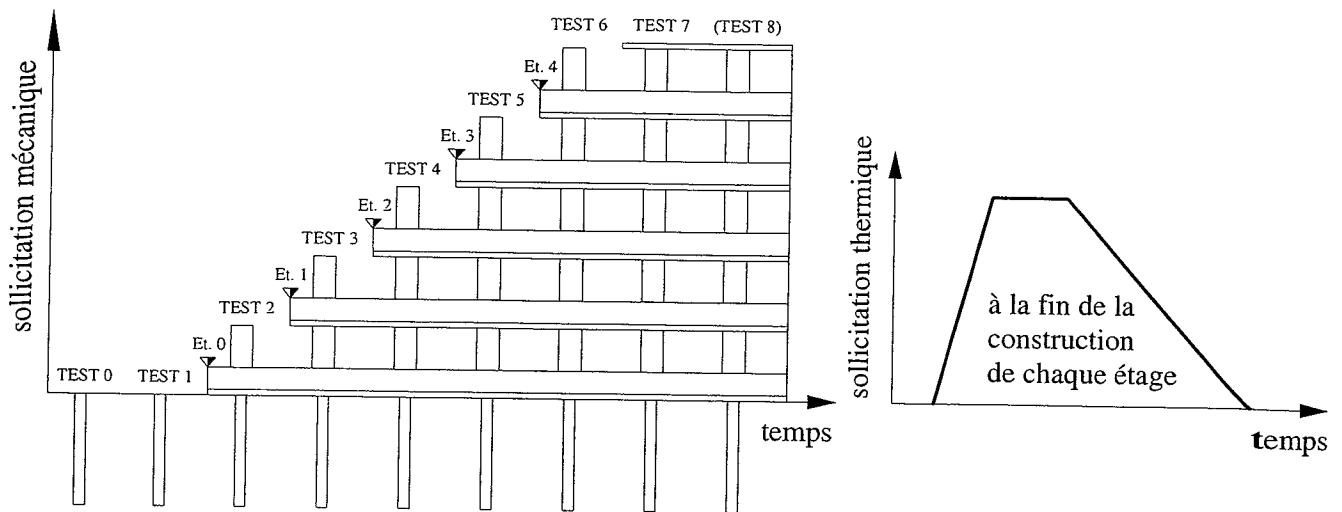


Figure 7 : Programme de chargement.

5.2 Phases du projet

Le projet peut être séparé en trois phases de réalisation. Ces trois phases se chevauchent dans leurs réalisations. Une description chronologique sommaire est donnée dans ce qui suit pour chaque phase.

Phase 0 : conception, instrumentation et réalisation du pieu-test Janvier – mai 1998 (1^{er} rapport intermédiaire)

Les travaux relatifs à la phase 0 concernent la mise en place du pieu échangeur et des capteurs de mesure. Le concept d'un module de chauffage pour créer des sollicitations thermiques dans le pieu est élaboré et le module réalisé. L'étalonnage des divers capteurs est effectué en laboratoire. Les capteurs de mesure dans le pieu sont relevés épisodiquement après le bétonnage du pieu, sans les sollicitations thermiques induites par le module de chauffage. Il s'agit du Test 0, qui s'étend de février à mai 98.

Une description chronologique est donnée ici (toutes les photos mentionnées sont dans l'annexe 1):

Janvier 98 :	conception de l'instrumentation du test
Du 2 au 6 février 98 :	test et étalonnage des divers capteurs en laboratoire (photo 1)
Du 9 au 13 février 98 :	pose des capteurs sur l'armature du pieu (photos 2, 3 et 4)
16 février 98 :	forage du pieu et pose des tubes pour le fluide caloporteur (photo 5 et 6)
17 février 98 :	mise en place de la cage d'armature et bétonnage (photos 7, 8 et 9). L'ensemble des capteurs a ensuite été regroupé dans un « cadre de mesure » (photo 10)
24 février 98 :	premier carottage sonique pour la détermination de la qualité du béton
Du 18 février au 14 mai:	Test 0, premières mesures (détails plus loin).

Phase 1 : Réalisation des cycles de chauffage-refroidissement et acquisition des données**Mai 1998 – juin 1999 (en partie dans le 2^{ème} rapport intermédiaire)**

Cette phase comprend tous les cycles de chauffage et de refroidissement effectués sur le pieu. Ils sont successivement appelés Test 1, Test 2, Test 3, etc. Huit cycles sont prévus (voir Figure 7). Le premier correspond au pieu "libre", le radier du bâtiment n'étant pas encore coulé. Dans ces conditions, le pieu ne subit aucune charge mécanique autre que son poids propre. Les 6 cycles suivants sont effectués après la réalisation de chacune des 6 dalles en béton nécessaires aux 5 niveaux du bâtiment et le toit. Finalement, le dernier cycle correspond à des mesures une fois le bâtiment terminé, lorsque la charge mécanique sur le pieu aura atteint sa valeur nominale.

Une description chronologique est donnée ici:

- 15 mai 1998 : pose de la chaudière
Du 15 mai au 11 juin : Test 1, sollicitation thermique du pieu sans aucune charge mécanique autre que son poids propre. La sollicitation thermique par étapes a permis de suivre le comportement du pieu sous l'effet de températures allant de 15°C à 41°C.
Du 15 juillet 98 à octobre 99: réalisation des Tests 2 à 8.

Phase 2 : Exploitation des mesures et premières analyses

Cette phase a été réalisée courant 1999. Elle a porté sur l'exploitation des mesures, les premières analyses et leurs publications, et la rédaction du rapport final. Elle inclut aussi les essais complémentaires qui ont été réalisés afin de mieux caractériser le pieu et le sol avoisinant.

6. Résultats des mesures

Le programme de chargement décrit précédemment a été appliqué au pieu-test. A l'aide des extensomètres, des fibres optiques et de la cellule de pression, des mesures de déformation, de température et de pression ont réalisées avant, durant et après chaque test. Etant donné l'important volume des mesures faites, ne seront présentés dans ce paragraphe que des résultats indicatifs pour chaque test. **L'ensemble des résultats bruts est regroupé dans l'annexe 5.**

Le test 0 étant particulier (mise en place du pieu), ses résultats seront présentés séparément. Pour les autres tests, les résultats sont séparés en aspects thermiques et mesures de déformations et de pression. La chronologie de chaque test est présentée avant chaque résultat thermique.

6.1 Résultats du Test 0

Le Test 0 représente la première campagne de mesure entreprise tout de suite après le bétonnage du pieu. Ces mesures permettent de contrôler le bon fonctionnement des capteurs lors de la prise du béton. Cette campagne de mesure a duré du 18 février au 14 mai 1998. Les résultats obtenus ont montré que pratiquement tous les capteurs fonctionnaient bien, à l'exception d'un (TELEMAC n° T33034) qui ne permettait pas la mesure de la déformation. La cellule de pression semblait fonctionner normalement. Par la suite, l'impossibilité de noter des variations de charge ne permettait plus de se prononcer sur son état.

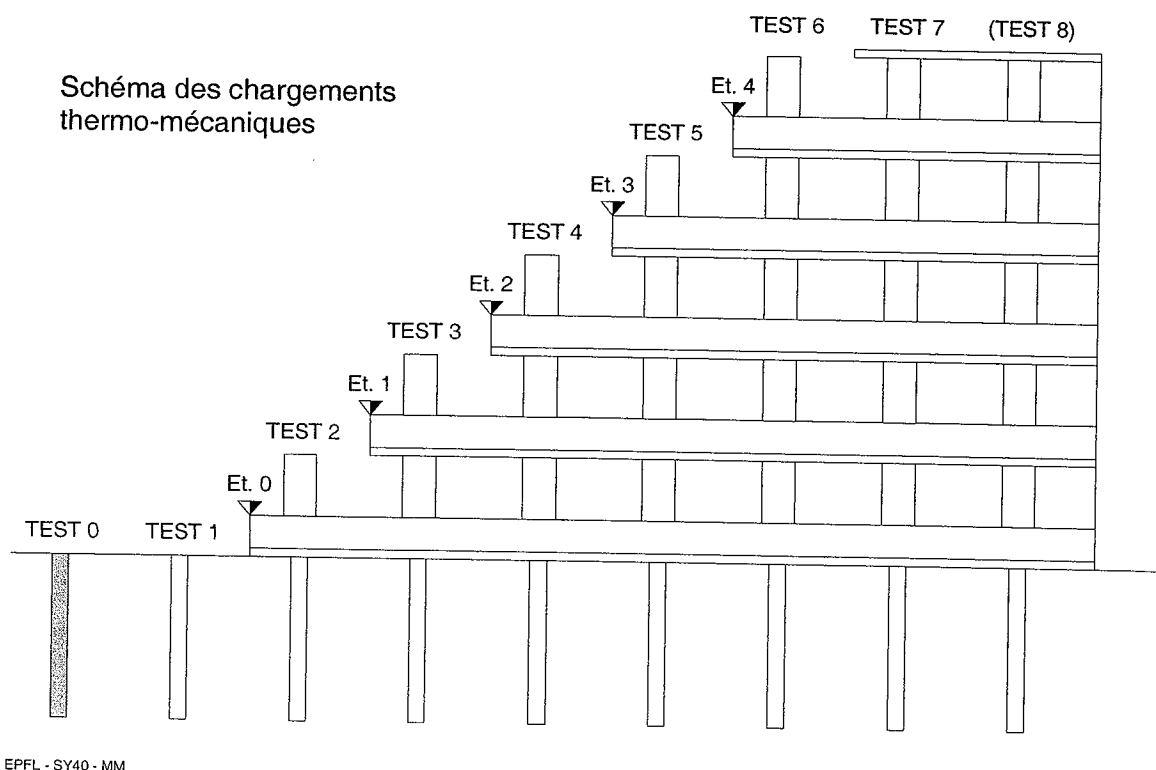


Figure 8: Etat de la construction lors du Test 0.

La Figure 9 représente l'évolution des déformations en fonction de la température aux profondeurs de 2.5 m, 10.5 m, 16.5 m, 24.5 m (mesures avec extensomètres à corde vibrante). Ce gradient de température est uniquement produit par les réactions de bétonnage. L'augmentation de la température en phase de prise du béton provoque une dilatation du pieu. Cette température dépasse les 35°C le 18 février 98 (le jour suivant le bétonnage) pour se stabiliser aux environs des 16 - 18°C en mai 98. Les premiers points des graphiques de la figure 9 correspondent à une mesure faite le 9 février 98, avant que la cage métallique ne soit posée pour le bétonnage.

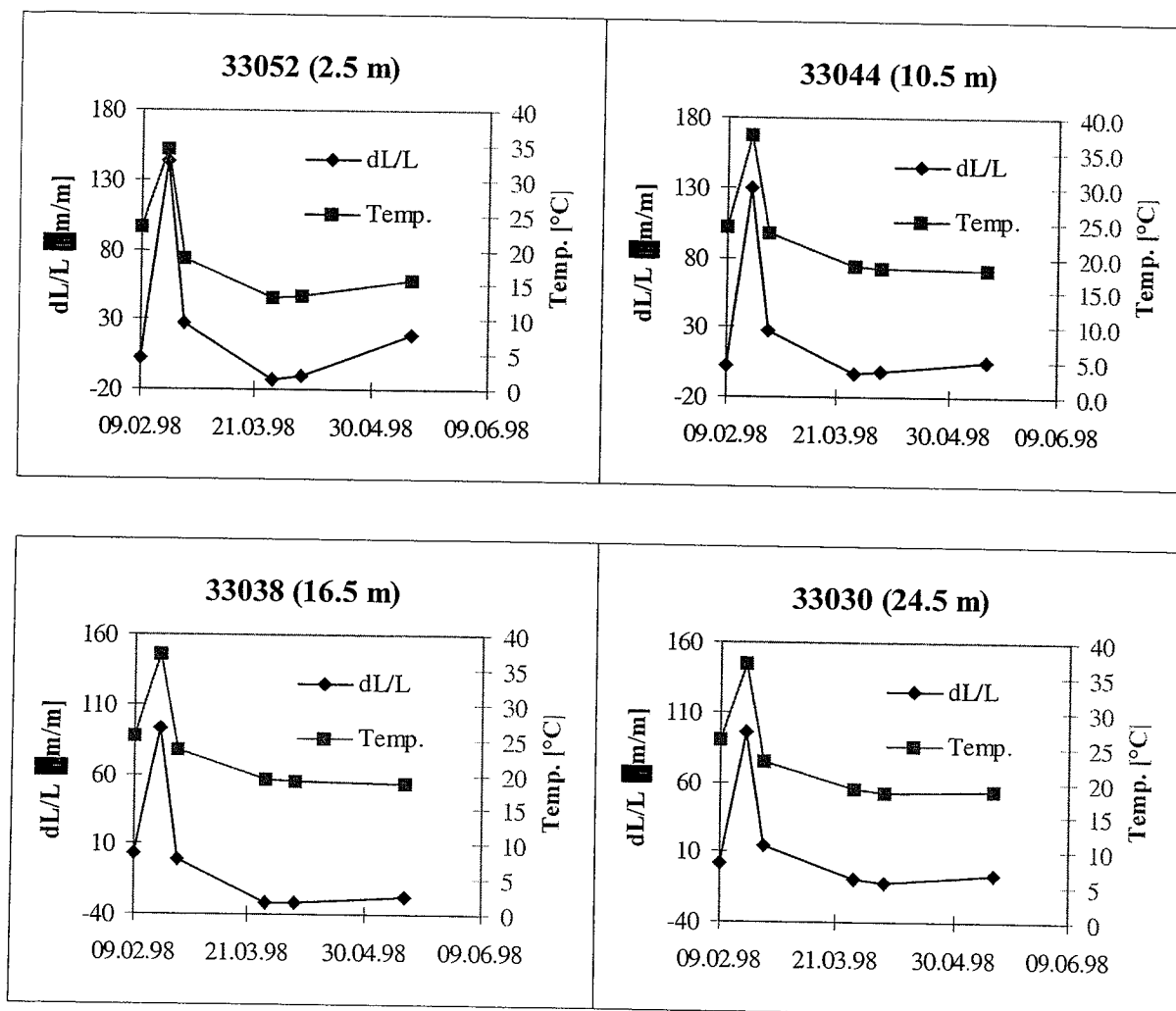


Figure 9 : Test 0 - Déformation et température en fonction du temps - mesures avec les extensomètres à corde vibrante (Capteurs posés aux profondeurs respectives de: 2.5 m, 10.5 m, 16.5 m, 24.5 m).

A titre de remarque, les quatre profondeurs choisies pour représenter les résultats sont caractéristiques des quatre couches du sol.

Les capteurs à fibres optiques (figure 10) donnent, après la prise du béton, des valeurs constantes en fonction du temps à la fois pour les déplacements verticaux

que radiaux; ces valeurs seront le « zéro » de la deuxième campagne de mesure (solicitation thermique du pieu sans aucune charge mécanique, Test 1).

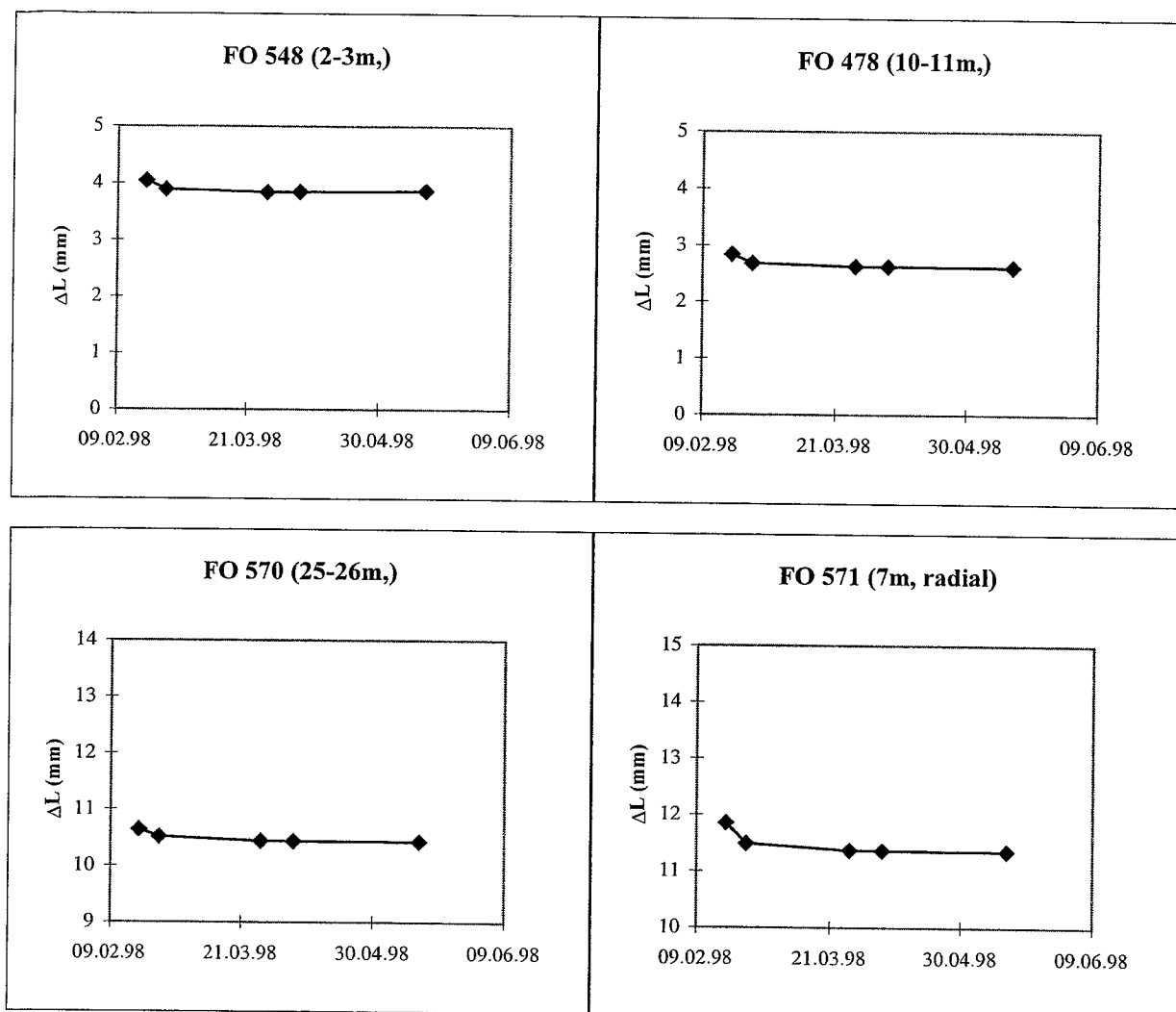


Figure 10 : Test 0 - Déplacements mesurés par fibres optiques (548, 478, 570 et 571).

La figure 11 montre la variation de la température en fonction de la profondeur. La température du pieu se situe entre 16 et 18°C à la fin de la prise du béton (14.05.98). Ces températures sont hautes par rapport à la température normale du terrain (11-12°C). L'écart d'environ 4°C a d'abord été supposé dû au dégagement de chaleur pendant la prise du béton, une stabilisation thermique entre le pieu et le terrain n'ayant lieu seulement après quelques mois. On verra plus loin que cette écart a en réalité une autre cause.

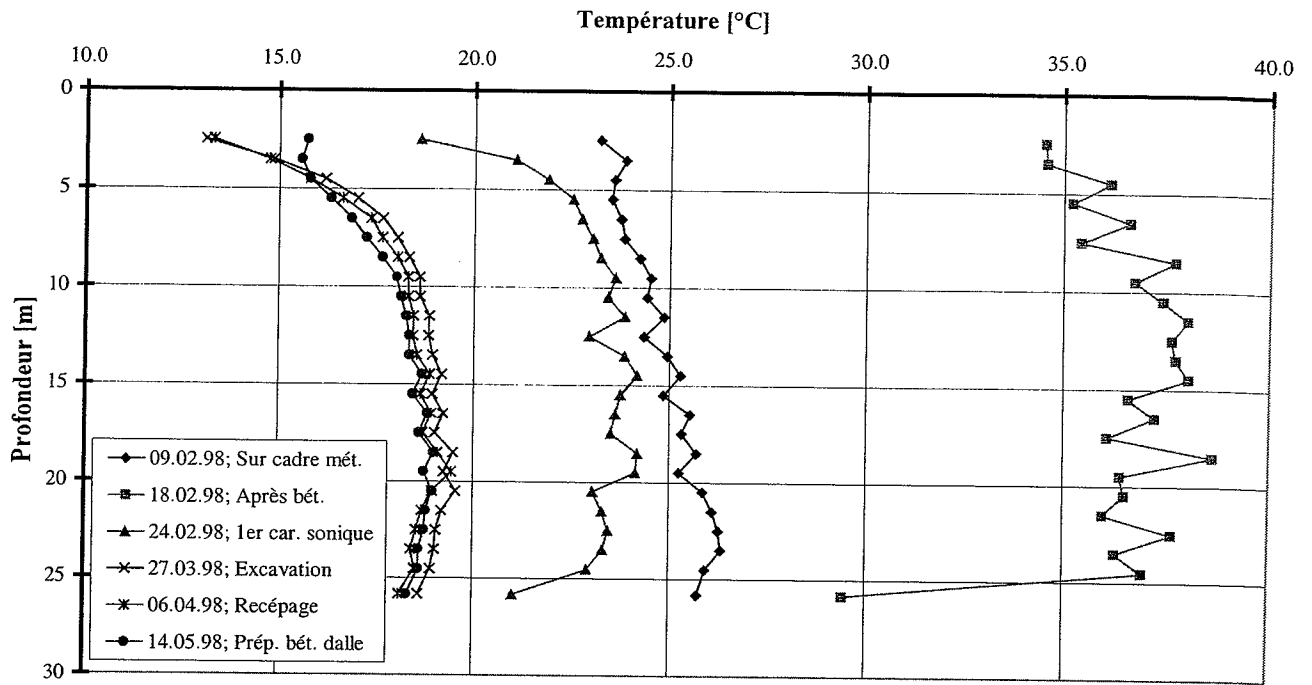


Figure 11 : Test 0 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps.

6.2 Champs de température

6.2.1 Test 1

Ce test a été effectué environ trois mois après le bétonnage du pieu. Dans la situation actuelle, le pieu ne reprend aucune charge verticale autre que son poids propre. En effet le radier, le parapet et les murs colonne du rez-de-chaussée ne sont pas encore coulés (figure 12, zone grise). Sous une charge thermique, le pieu a la possibilité de se déplacer verticalement vu qu'il n'est pas bloqué par la superstructure.

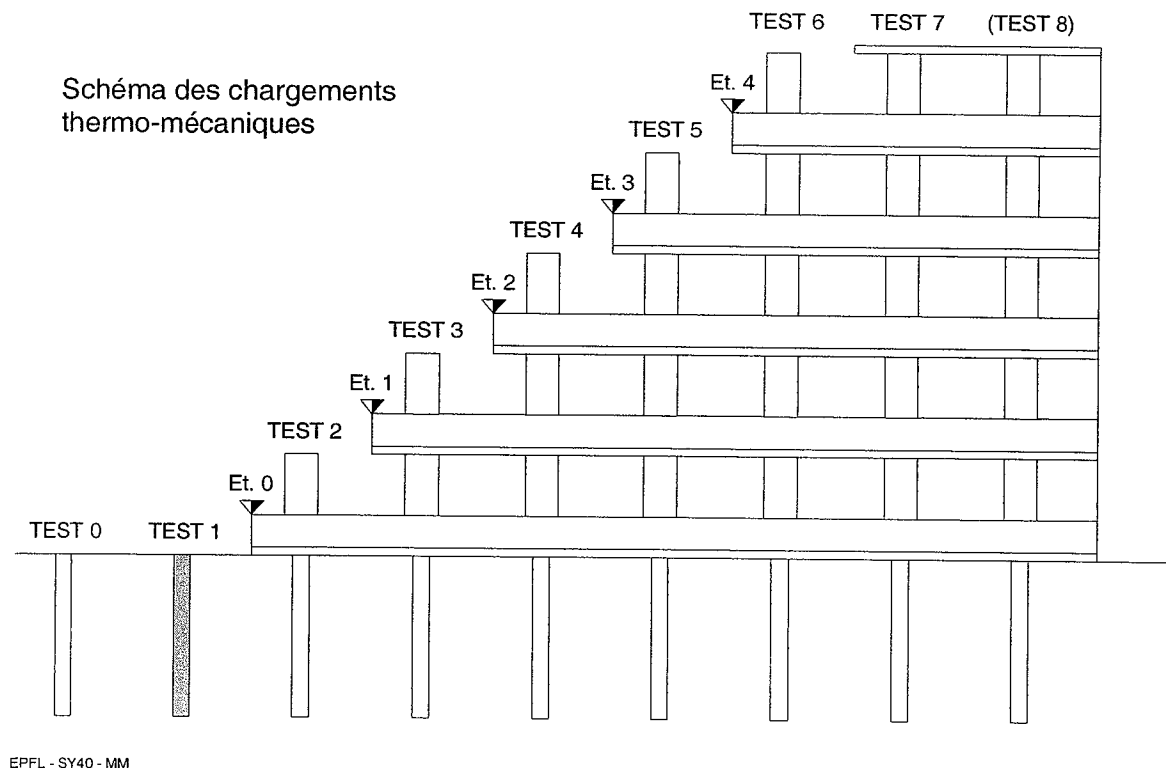


Figure 12: Etat de la construction lors du Test 1.

6.2.1.1 Déroulement chronologique du Test 1

Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 7 jours et le suivi de la phase de refroidissement 14 jours. Le refroidissement actif est effectué en faisant circuler l'eau du réseau d'eau froide dans le pieu après avoir déconnecté la pompe. L'eau froide est généralement coupée durant la nuit et le week-end. Le vendredi 5 juin au matin, une vanne de sécurité s'est ouverte lors de la remise en pression du réseau d'eau froide. Un coup de bélier est certainement à l'origine de l'ouverture de la vanne qui a inondé l'intérieur du module. A partir de cette date, le robinet d'arrivée de l'eau a été fermé tous les soirs pour être progressivement ouvert le lendemain une fois le réseau sous pression. Après la fin du Test 1, un réducteur de pression a été installé sur l'arrivée de l'eau froide et des

tuyaux ont été fixés sur les vannes de sécurité pour évacuer l'eau hors de l'enceinte du module de chauffage.

6.2.1.2 Mesures thermiques relatives au Test 1

Les mesures relatives au module de chauffage ne sont pas encore automatisées à ce stade. Seuls les relevés périodiques des deux thermomètres placés sur la plomberie ont été réalisés. Ces derniers mesurent la température de l'eau après et avant la chaudière (Figure 13), soit l'eau qui circule en direction du pieu (aller pieu) et l'eau qui en revient (retour pieu). Ces mesures de température, par comparaison aux mesures calibrées des températures qui ont été effectuées à partir du Test 3, sous-estiment la température de l'eau d'environ 3 K pour la température "aller" et d'environ 2 K pour la température "retour".

Les figures 14 et 15 montrent la variation de la température en fonction de la profondeur dans le pieu, en phase de chauffage et en phase de refroidissement. Les températures mesurées par les capteurs TELEMAC donnent des valeurs supérieures à celles du fluide caloporteur. On a donc étalonné ces capteurs par rapport aux mesures de température de l'eau qui circule dans les tubes (ANNEXE 2). En moyenne les températures mesurées avec les capteurs TELEMAC sont de 5°C plus hautes. Les valeurs des températures des figures 14 et 15 sont déjà corrigées. La température est d'environ 13-14 °C avant le commencement du chauffage du pieu. La température maximale moyenne mesurée dans le pieu est de 35 °C. La différence de température appliquée au pieu est alors d'environ 22°C.

En phase de chauffage (Figure 14), les valeurs de température varient beaucoup d'un mètre à l'autre de façon alternée. Cette différence de température tient à la proximité d'une partie des capteurs TELEMAC des tubes en plastique où passe le fluide caloporteur.

TEST 1 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL

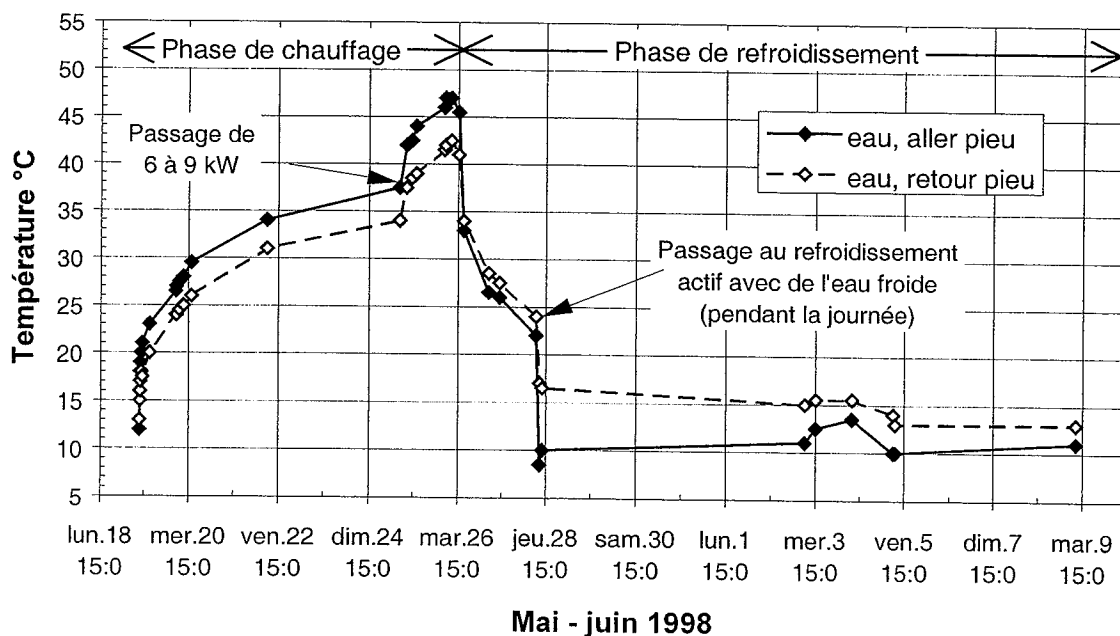


Figure 13 : Evolution des températures de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) lors du Test 1

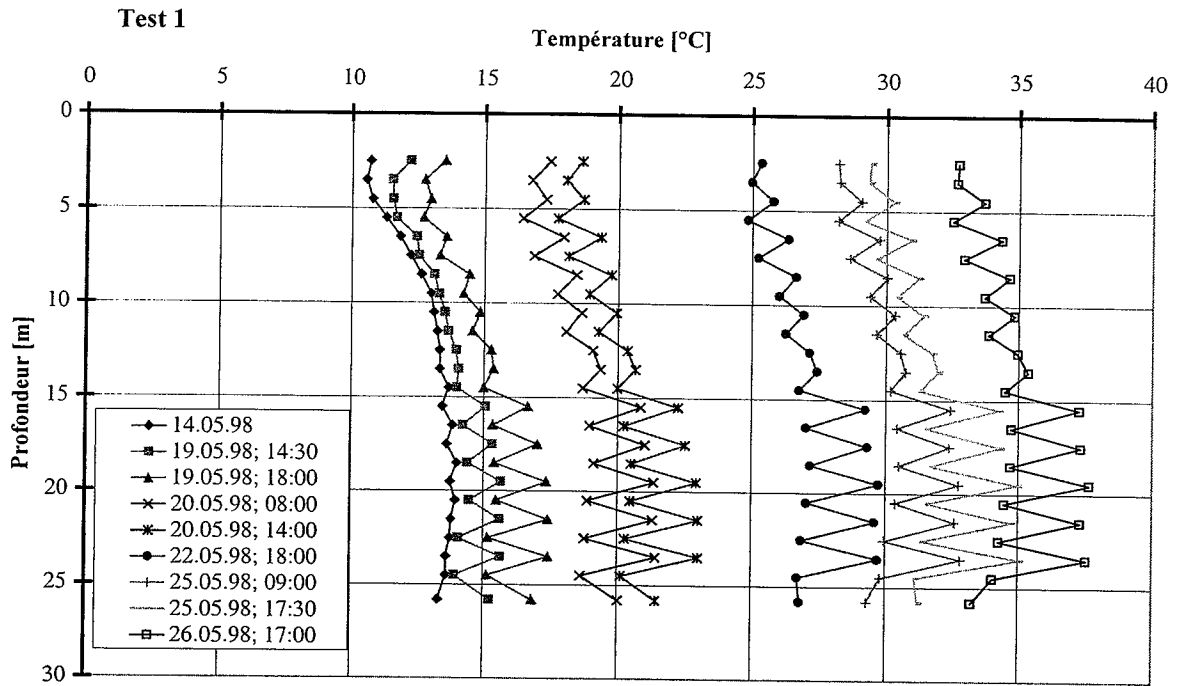


Figure 14 : Test 1 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage.

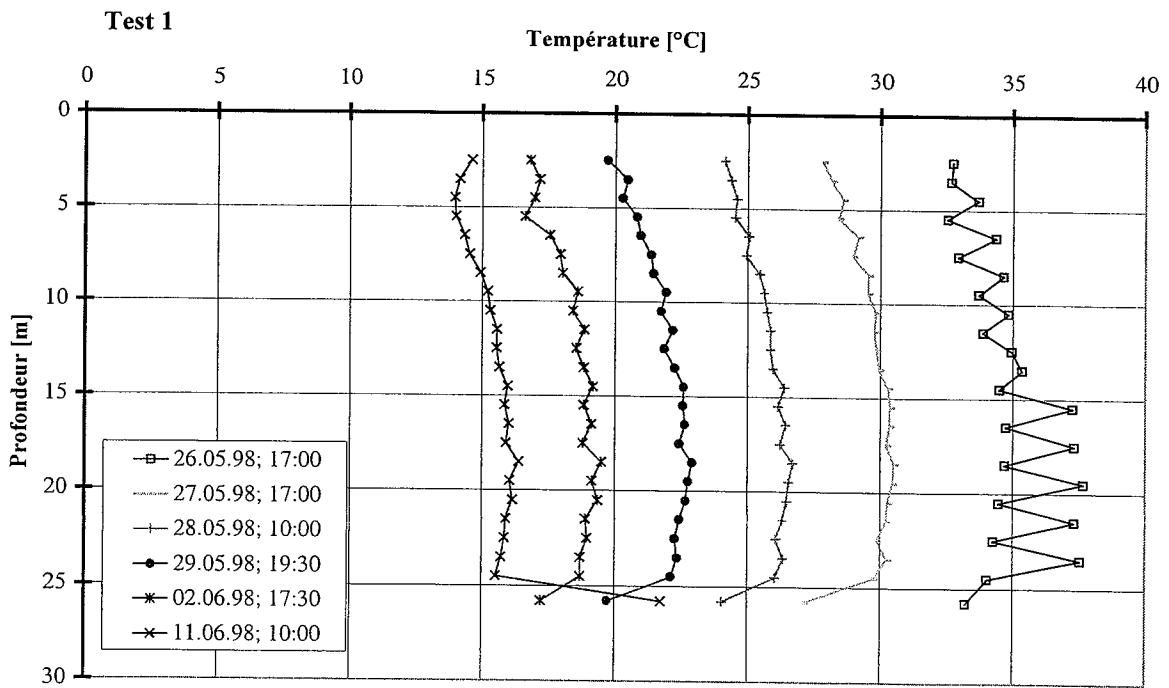


Figure 15 : Test 1 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement.

6.2.1.3 Synthèse du Test 1

Lors de ce Test1 effectué du 19 mai au 11 juin 1998, les mesures de température sont prises de manière manuelle (précision $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$). Néanmoins, comme le montre la figure 13, le déroulement de l'expérience est conforme aux prévisions ; sur ce diagramme, l'évolution des températures aller et retour est montrée en fonction du temps. Le débit, constant, est de l'ordre de $1 \text{ [m}^3\text{/h]}$. La phase de chauffage du pieu (au début 6kW, puis 9 kW) a duré environ une semaine ; la température moyenne maximale du fluide dans le pieu était de l'ordre de 45°C . Lors de la phase de refroidissement, et afin d'accélérer ce processus, de l'eau industrielle ($T \sim 10^{\circ}\text{C}$) a été injectée en circuit ouvert dans le pieu.

6.2.2 Test 2

Une fois le radier, le mur-colonne et le parapet du rez-de-chaussée bétonnés, on a effectué le deuxième test (figure 16, zone grise). Le poids propre de ces deux parties est très faible. Cependant, à la différence du Test 1, une certaine rigidité est introduite par le radier et le parapet qui bloque partiellement le déplacement vers le haut du pieu.

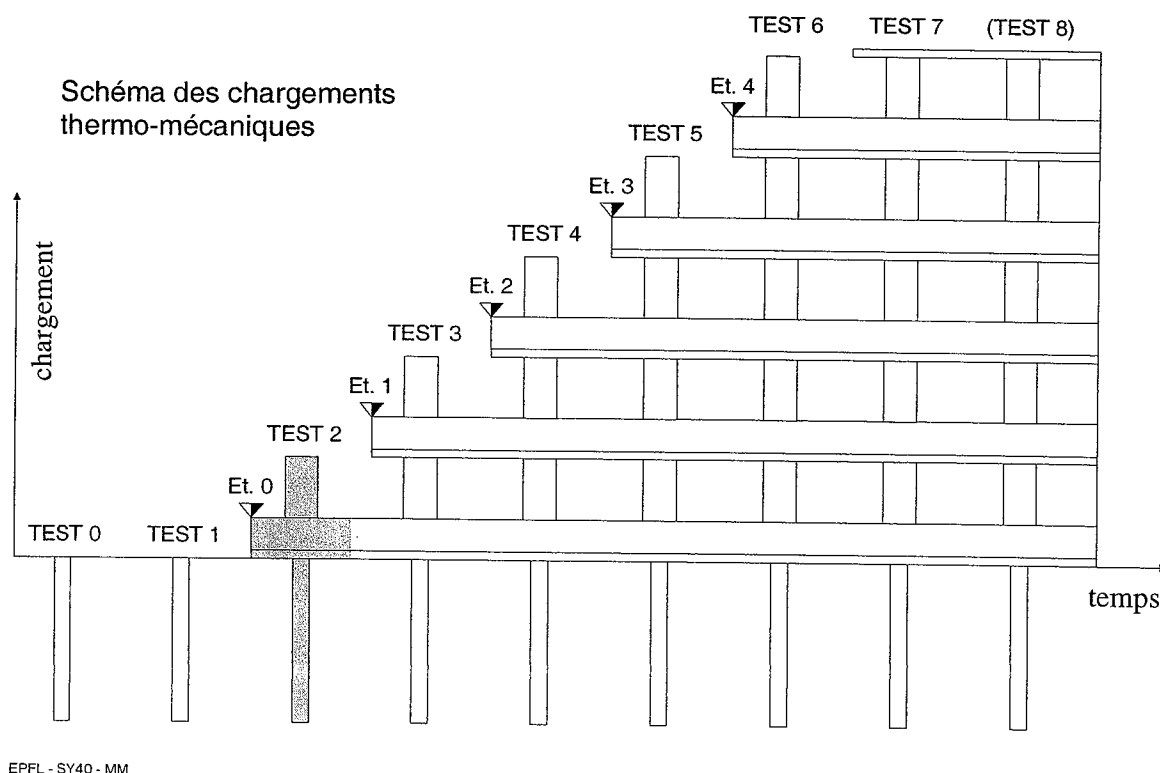


Figure 16 : Etat de la construction lors du Test 2.

6.2.2.1 Déroulement chronologique du Test 2

Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 5 jours, la phase de refroidissement 3 jours. A partir de ce test, le chauffage est arrêté environ 1 heure avant le début d'une mesure, de manière à ce que le champ de température à l'intérieur du pieu soit un peu plus uniforme au moment de la mesure. On constate que la variation de température entre les capteurs d'une partie du pieu et ceux de l'autre partie est plus faible que pour le Test 1. En effet, l'injection d'une puissance thermique de 6 kW conduit à une puissance par mètre linéaire de pieu très élevée de 230 W/m. En conséquence, des gradients de température très prononcés sont créés autour des tubes en plastique qui contiennent le fluide caloporteur, ce qui accentue fortement l'hétérogénéité des températures à l'intérieur du pieu.

6.2.2.2 Mesures thermiques relatives au Test 2

Les mesures relatives au module de chauffage sont encore effectuées par relevés manuels dans ce test. L'électricité consommée par le chauffage et la pompe de circulation est maintenant mesurée par un compteur électrique. La consommation électrique moyenne de la pompe est évaluée à 57 W, et le chauffage, avec deux corps de chauffage enclenchés, à 6.15 kW. Les relevés périodiques des deux thermomètres qui mesurent la température de l'eau "aller" et "retour" du pieu sont montrés dans la figure 17. Pour rappel, la température "aller" est sous-estimée d'environ 2 K et la température "retour" de 3 K. En tenant compte de ces corrections, la température du fluide avant l'enclenchement du chauffage, qui est représentative de la température initiale du pieu, est d'environ 15 °C. Huit jours plus tard, soit après trois jours de refroidissement, elle est encore d'environ 19 °C.

L'évolution des températures en fonction de la profondeur pendant le Test 2 sont représentées sur les figures 18 et 19. Pour rappel, les températures lues avec les capteurs TELEMAC sont corrigées de 5.1°C.

La variation maximale de température appliquée au pieu pendant le Test 2 est en moyenne de 14°C, ceci conformément à ce qui a été convenu par le bureau Passera Pedretti, ingénieur civil responsable du bâtiment.

TEST 2 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL

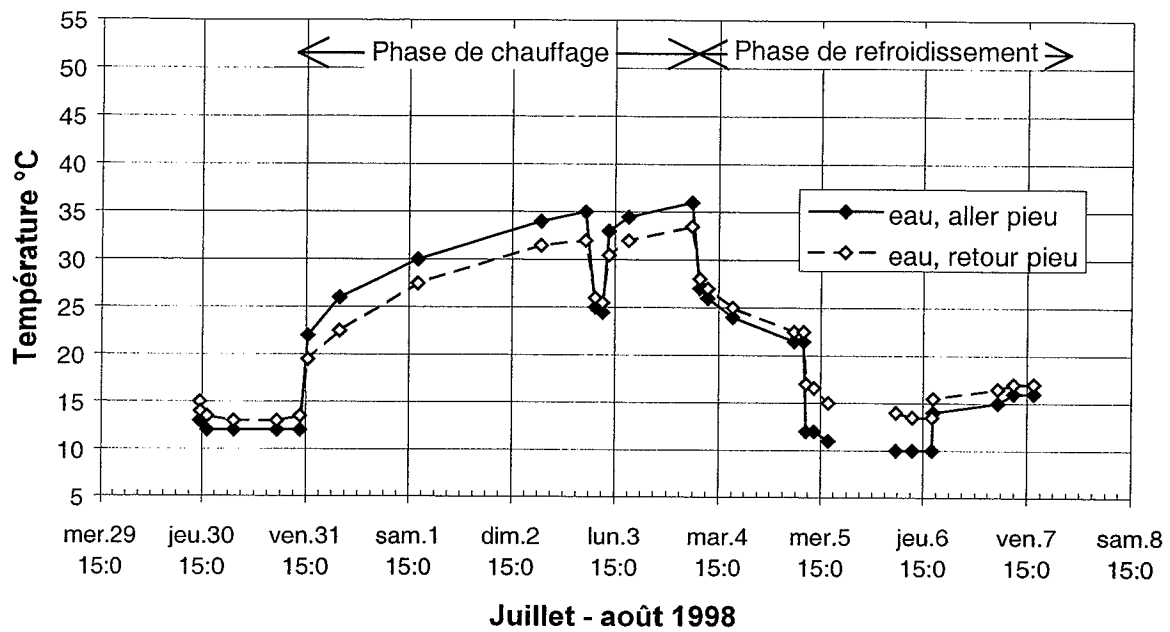


Figure 17 : Evolution des températures de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) lors du Test 2

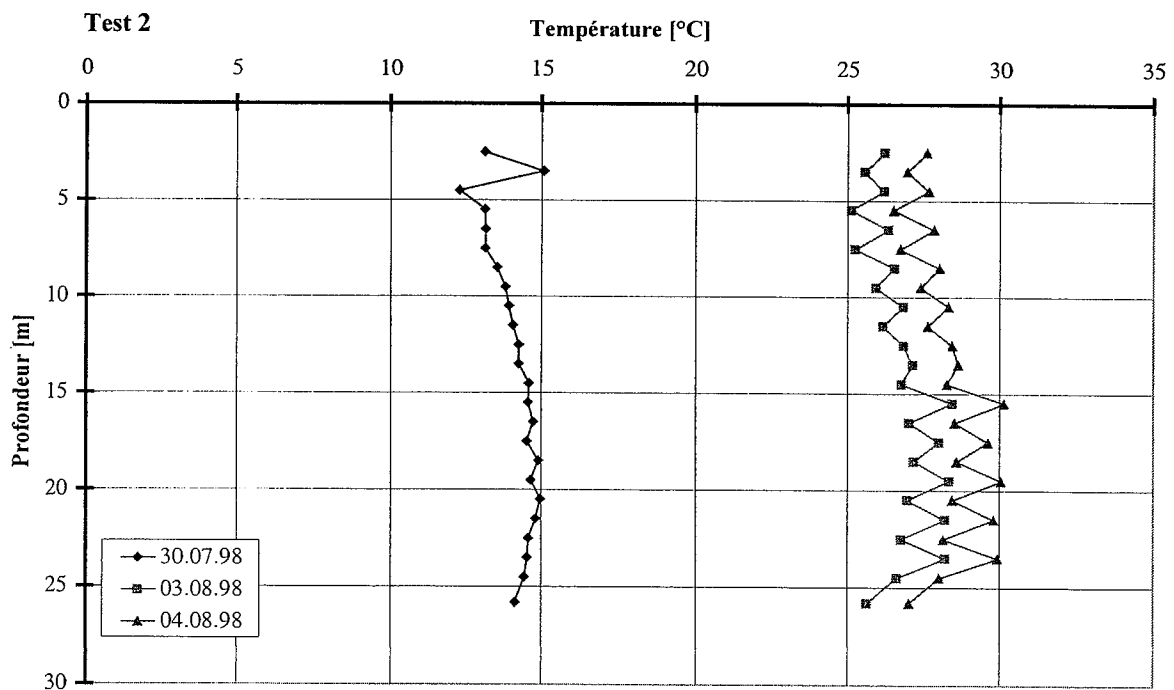


Figure 18 : Test 2 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage.

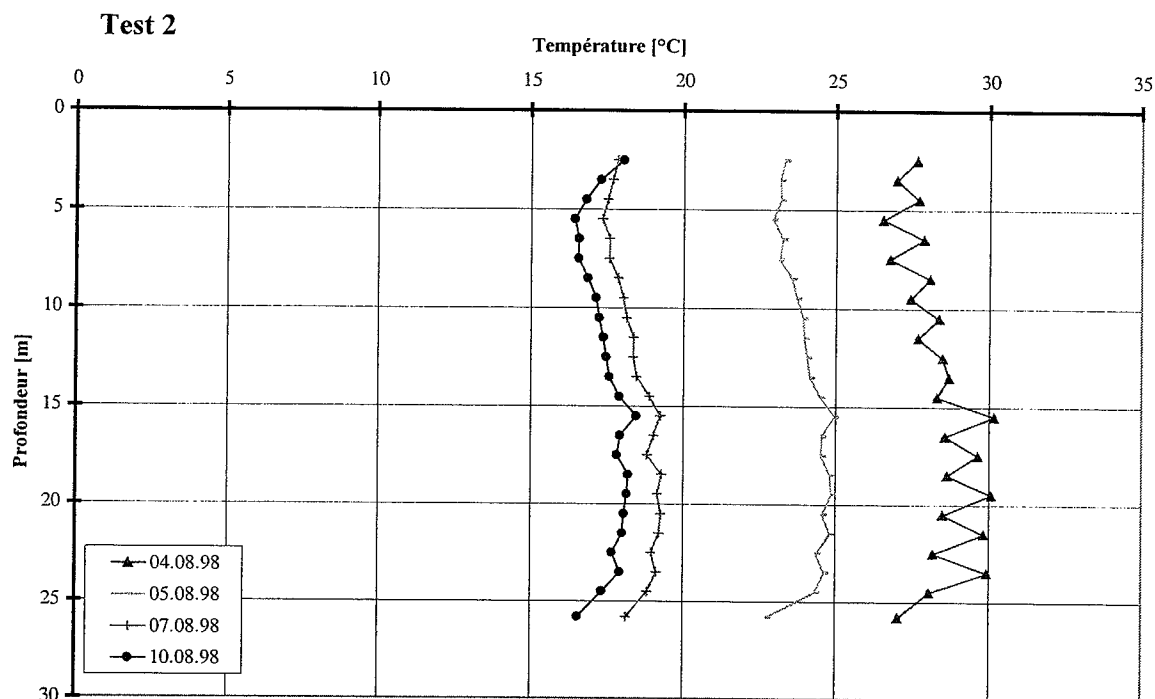


Figure 19 : . Test 2 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement

6.2.3 Test 3

Le test 3 commence lorsque la dalle du premier étage est coulée. Sur le pieu agissent donc le poids du radier, des murs-colonne et de la dalle du premier étage (figure 20, zone grise). Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 4 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 7 jours.

6.2.3.1 Mesures thermiques relatives au test 3

Les mesures relatives au module de chauffage sont automatisées, à l'exception des mesures du compteur électrique, effectuées par relevés manuels. Un datalogger permet de mesurer et d'enregistrer toutes les minutes le débit, la température de l'eau à l'aller et au retour du pieu, ainsi que la température de l'air dans l'enceinte du module de chauffage en deux points différents. Après avoir lu et sauvegardé les mesures du datalogger, un traitement des données permet de corriger les mesures de températures en fonction de leur calibrage individuel, de calculer la puissance thermique transférée et de réduire le nombre des données en effectuant des moyennes sur 10 minutes. Dans la figure 21, les évolutions des températures et du débit sont montrées. Lorsque le débit est nul, les mesures de température de l'eau du circuit du pieu sont mises à zéro. Dans la figure 22, le graphique permet de montrer les évolutions temporelles de la puissance thermique transférée et de la puissance électrique consommée. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Elle est établie sur la base des relevés du compteur électrique. Dans la tableau 3, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour les principales phases du test.

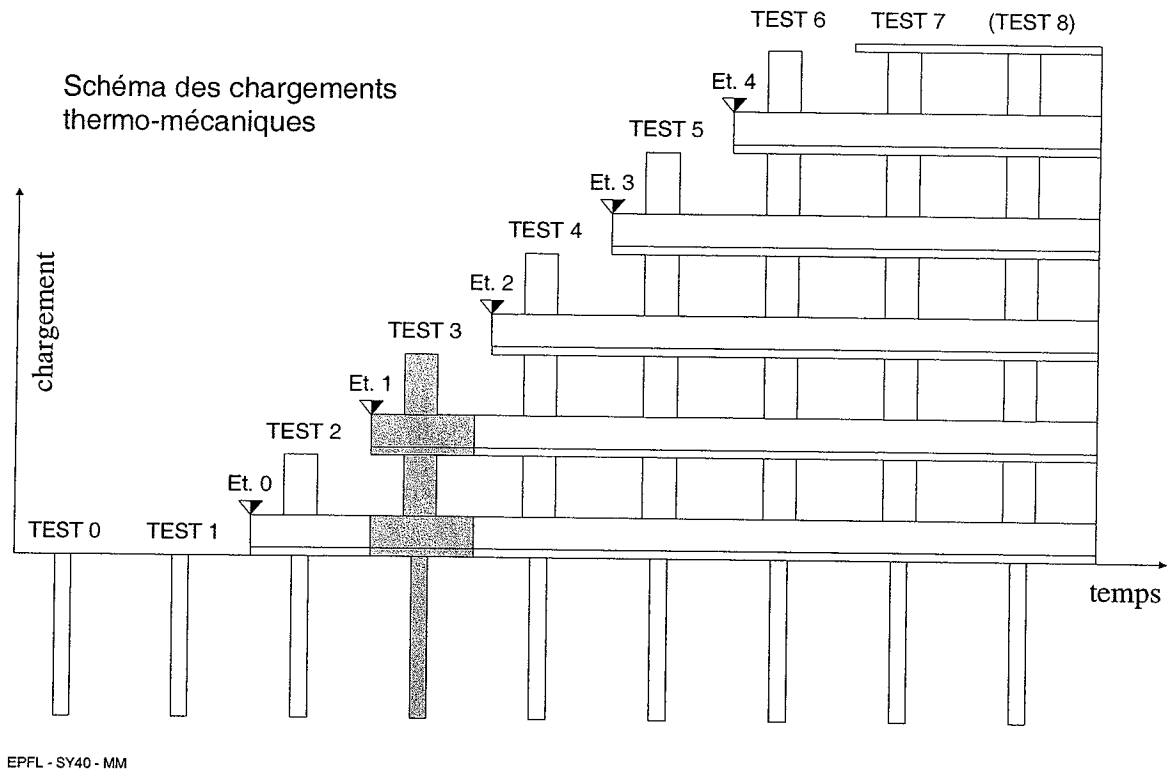


Figure 20 : Etape de construction lors du Test 3

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est mesurée à 15.8°C. La température moyenne du pieu doit être proche de cette valeur. Onze jours plus tard, soit après sept jours de refroidissement, elle est redescendue à 16.7 °C.

TEST 3 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL

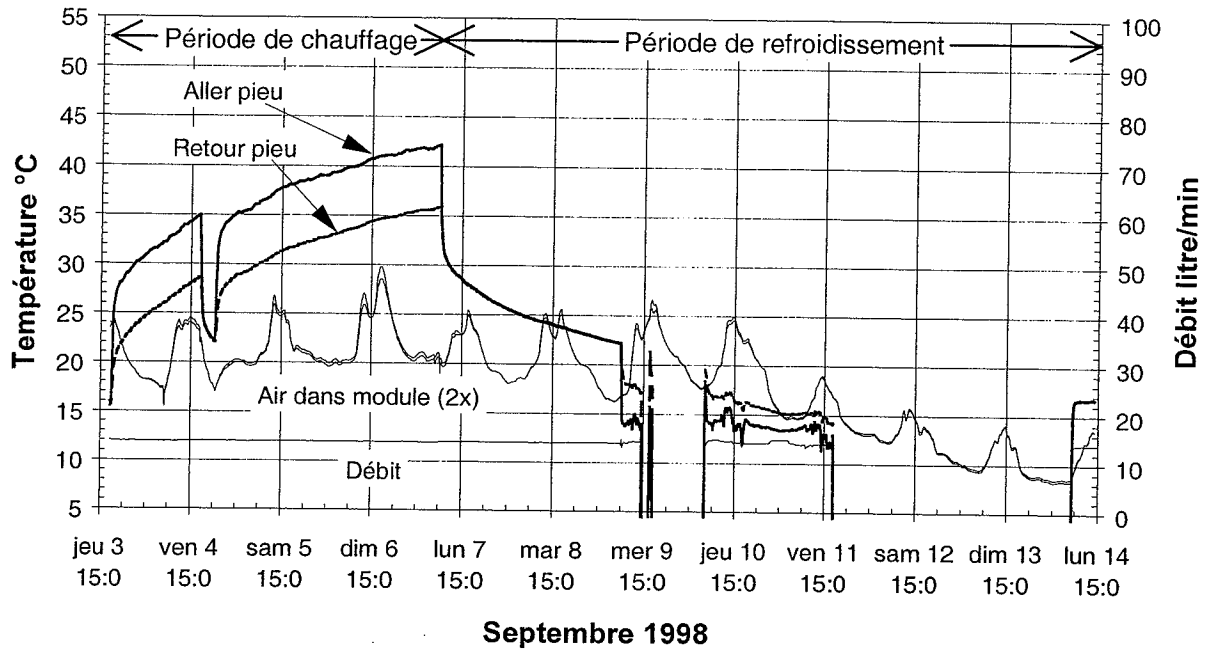


Figure 21 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du Test 3.

L'évolution de la température en fonction de la profondeur, mesurée par les capteurs TELEMAT, est montrée dans les graphiques 23 et 24. Les valeurs moyennes des températures dans le pieu sont comparables avec celles de l'eau qui circule dans les tubes en PE après la correction de 5.1°C.

En phase de chauffage (figure 24) on s'aperçoit que la température n'est pas uniforme dans le pieu. Le fait d'éteindre le chauffage une heure avant les mesures fait diminuer le gradient thermique près des tubes en PE. Comme certains capteurs sont plus proches de ces tubes, ils mesurent des températures plus élevées.

Energie / efficacité	Chauffage	Refroidissement actif	Nette dans terrain
Energie thermique	503 kWh	-89 kWh	414 kWh
Energie électrique	518 kWh		
Efficacité chaudière	97.1 %		

Tableau 3 : Bilan d'énergie relatif au Test 3

TEST 3 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL

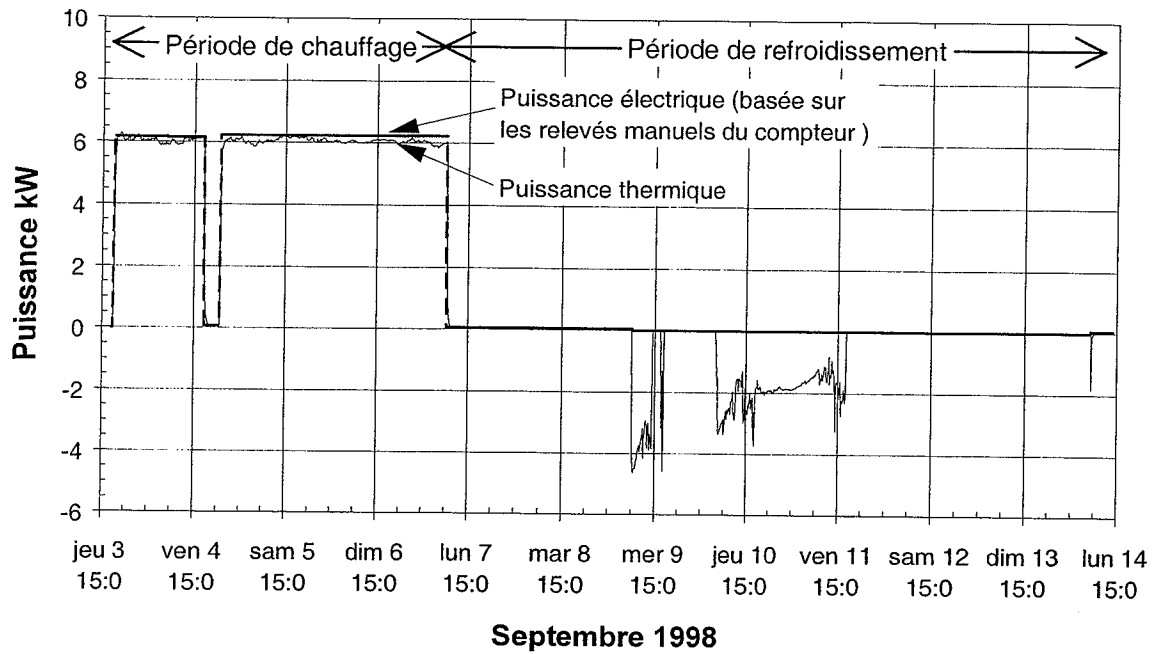


Figure 22 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du Test 3.

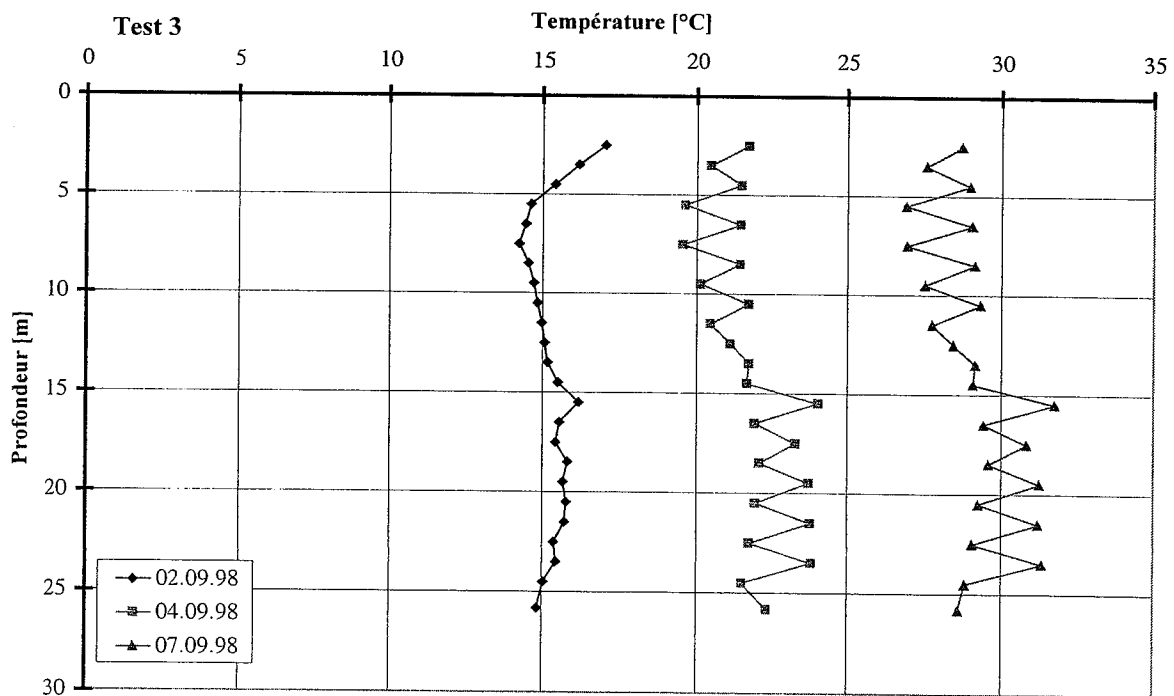


Figure 23: Test 3 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage.

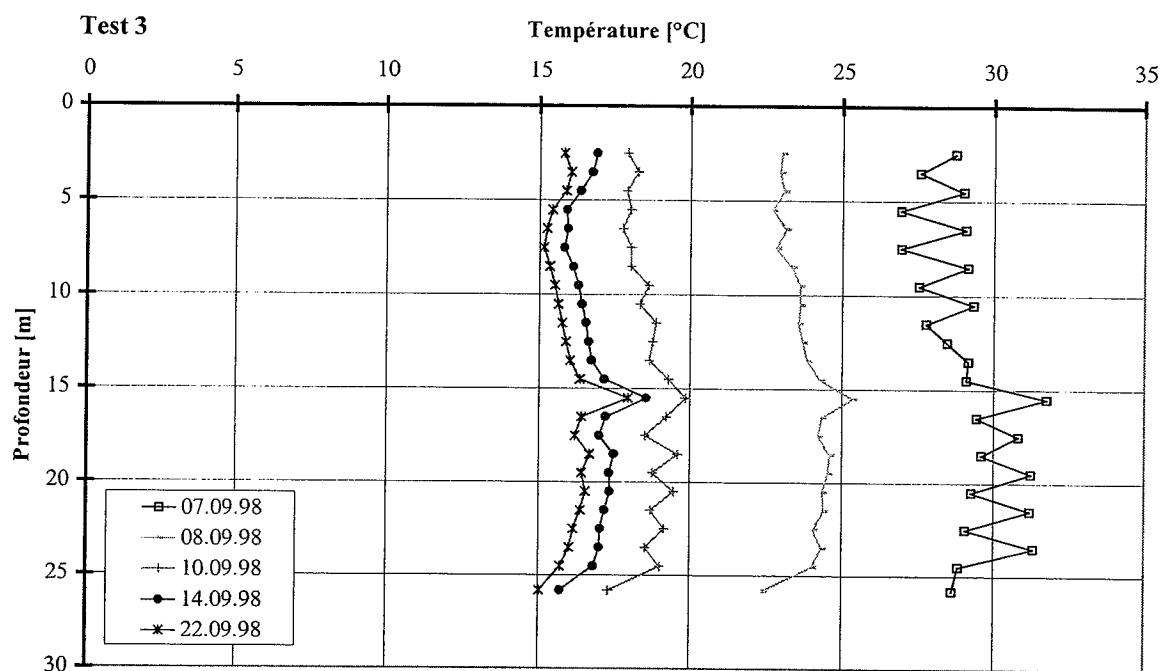


Figure 24 : Test 3 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement.

6.2.4 Test 4

La dalle du deuxième étage du bâtiment polyvalent du Quartier Nord de l'EPFL est coulée le 1er octobre 1998, date à laquelle commence ce test (figure 25, zone grise). Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 7 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 13 jours.

6.2.4.1 Mesures thermiques relatives au Test 4

Les mesures relatives au module de chauffage sont effectuées de la même manière que pour le Test 3 (Les mesures du compteur électrique sont toujours effectuées par relevés manuels). Dans la figure 26, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour les dix premiers jours du test. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure 27. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Elle est établie sur la base des relevés du compteur électrique. En refroidissement actif, la puissance de refroidissement montre une pointe à 30 kW, qui décroît rapidement à 4 kW après une trentaine d'heure. La perturbation observée dans la courbe de décroissance de la puissance est due à un arrêt de la circulation de l'eau froide. Cette dernière avait une température moyenne d'environ 11 °C. Dans le tableau 4, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour les principales phases du test.

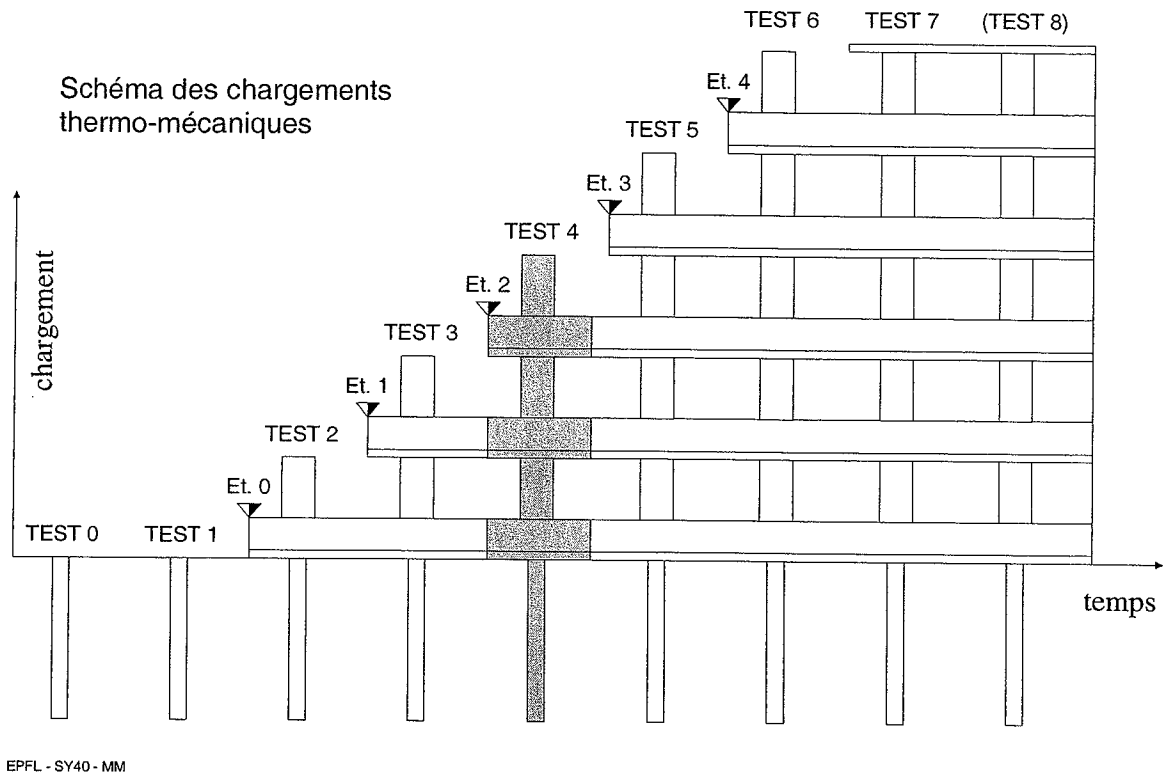


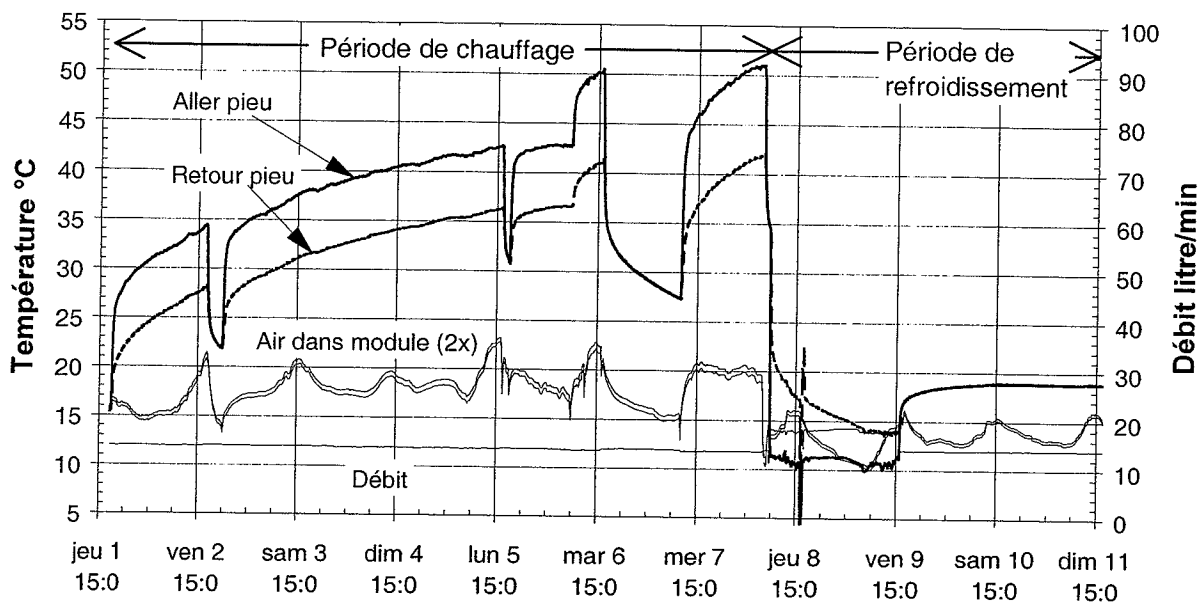
Figure 25 : Etat de la construction lors du Test 4.

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est mesurée à 15.5°C. La température moyenne du pieu doit être proche de cette valeur. Dix jours plus tard, soit après trois jours de refroidissement, elle est redescendue à 18.9 °C. Au bout de 20 jours, soit après 13 jours de refroidissement, elle est à 16.5°C. Dans la figure 28, l'évolution des températures est montrée pour les dix derniers jours de mesures. On constate une influence de la température de l'air sur la température du fluide, induite par les transferts de chaleur entre l'eau et l'air extérieur, occasionnés par la tuyauterie qui connecte le pieu au module de chauffage et le module de chauffage lui-même. Cette influence superpose une perturbation thermique à la relaxation thermique du pieu.

Energie / efficacité	Chauffage	Refroidissement actif	Nette dans terrain
Energie thermique	862 kWh	-199 kWh	663 kWh
Energie électrique	889 kWh		
Efficacité chaudière	97.0 %		

Tableau 4 : Bilan d'énergie relatif au Test 4

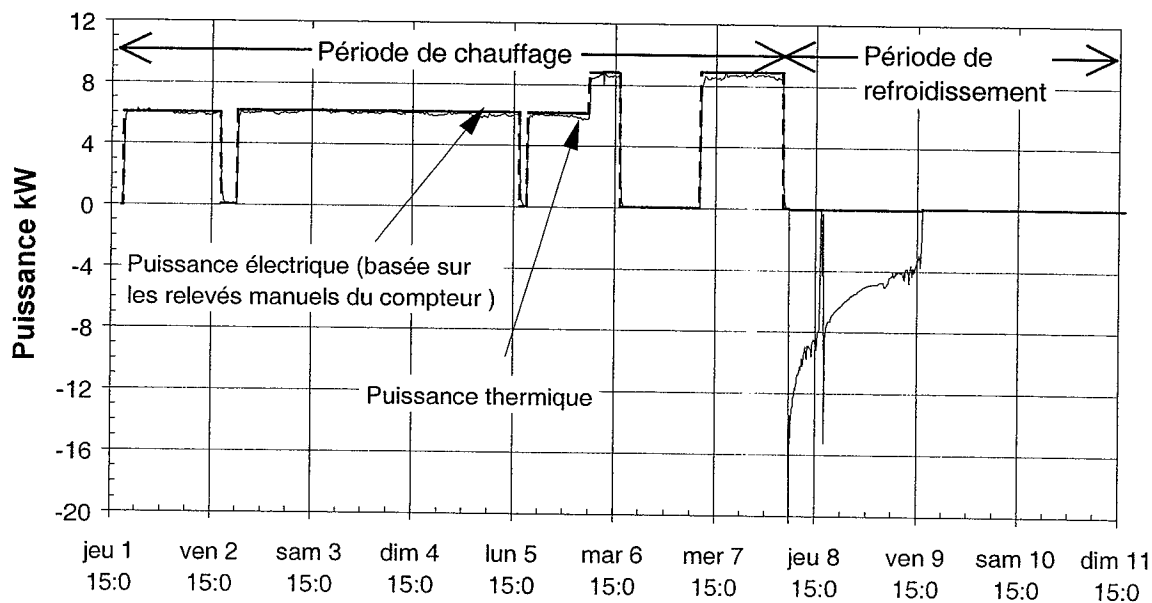
TEST 4 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Octobre 1998

Figure 26 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du Test 4.

TEST 4 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Octobre 1998

Figure 27 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du Test 4.

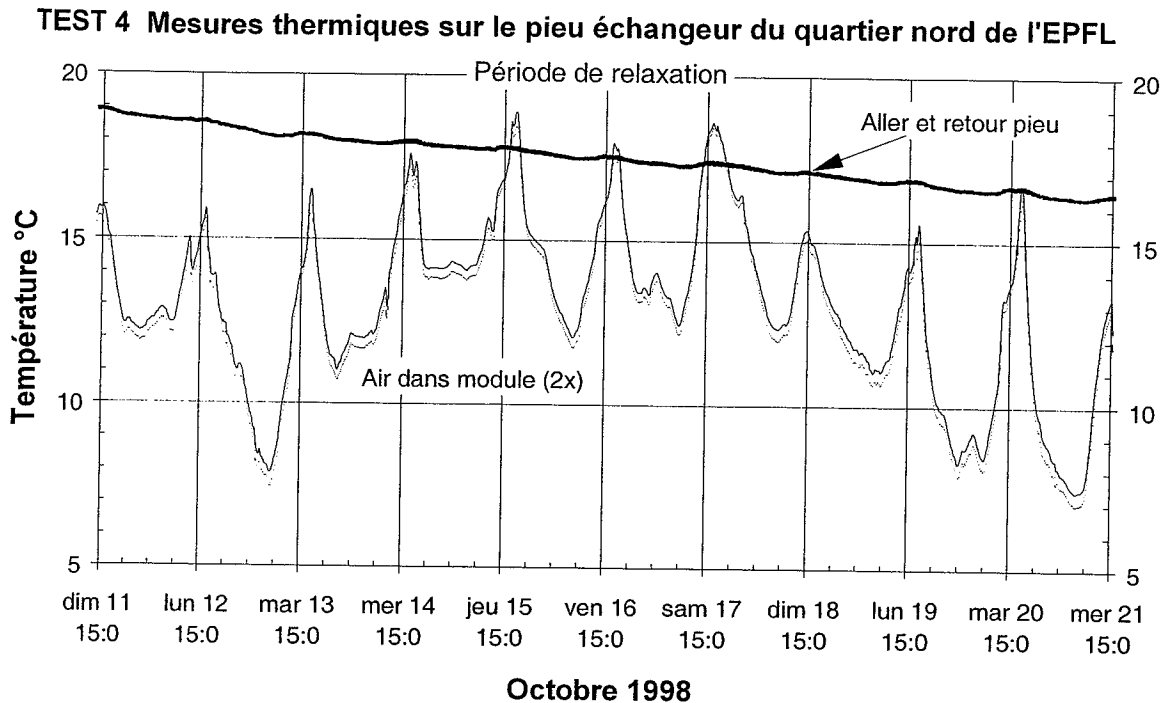


Figure 28 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), et de l'air dans le caisson du module de chauffage lors du Test 4. Les températures sont montrées pour la période de relaxation (ou de refroidissement passif) qui suit la période de chauffage et de refroidissement actif du pieu.

La température mesurée par les capteurs TELEMAT (extensomètres à corde vibrante) le 1er octobre (avant de commencer le chauffage) dans le pieu est en moyenne de 15-16°C. Cette température est très proche de celle de l'eau dans les tubes en PE (15.5°C).

En phase de chauffage (figure 29) on constate, comme dans les tests précédents, une différence de température entre les capteurs posés d'une côté du pieu par rapport à ceux posés de l'autre côté. Le fait d'arrêter le chauffage une heure avant la mesure, diminue cette différence à 2-3°C.

Le capteur T33039 à 15.5 m mesure une température plus élevée que la moyenne dans le pieu (figures 29 et 30).

A la fin du Test 4 (22 octobre), la température dans le pieu est en moyenne de 16.5°C, valeur très proche à la température de l'eau dans les tubes en PE.

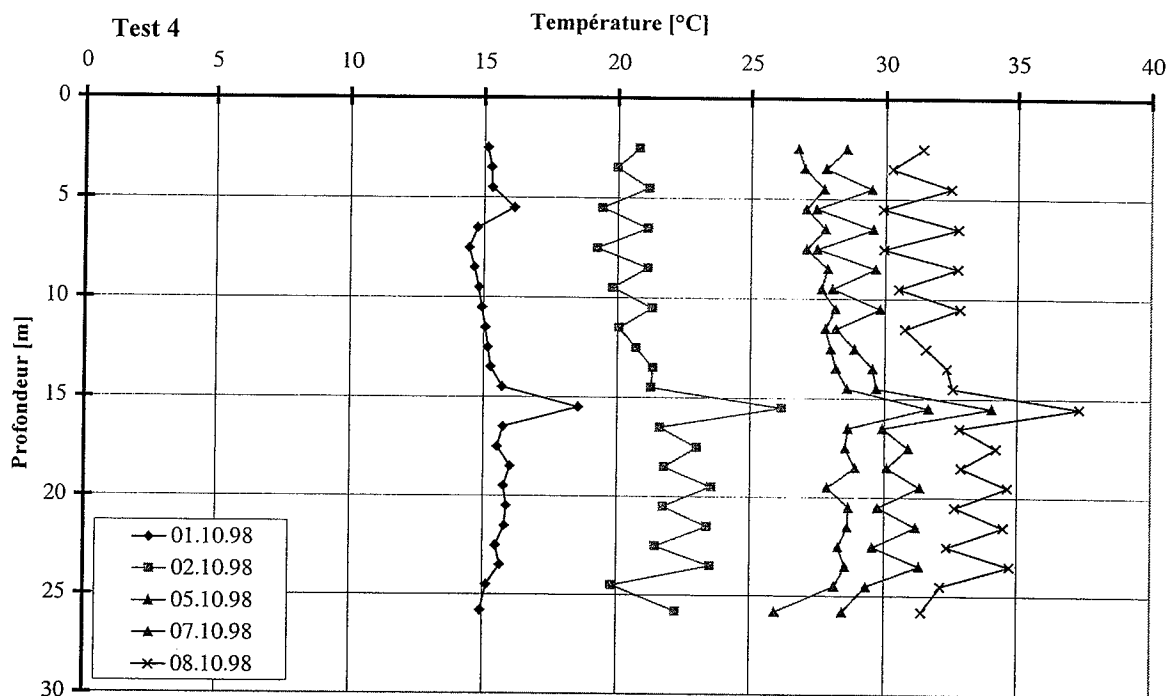


Figure 29 : Test 4 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage.

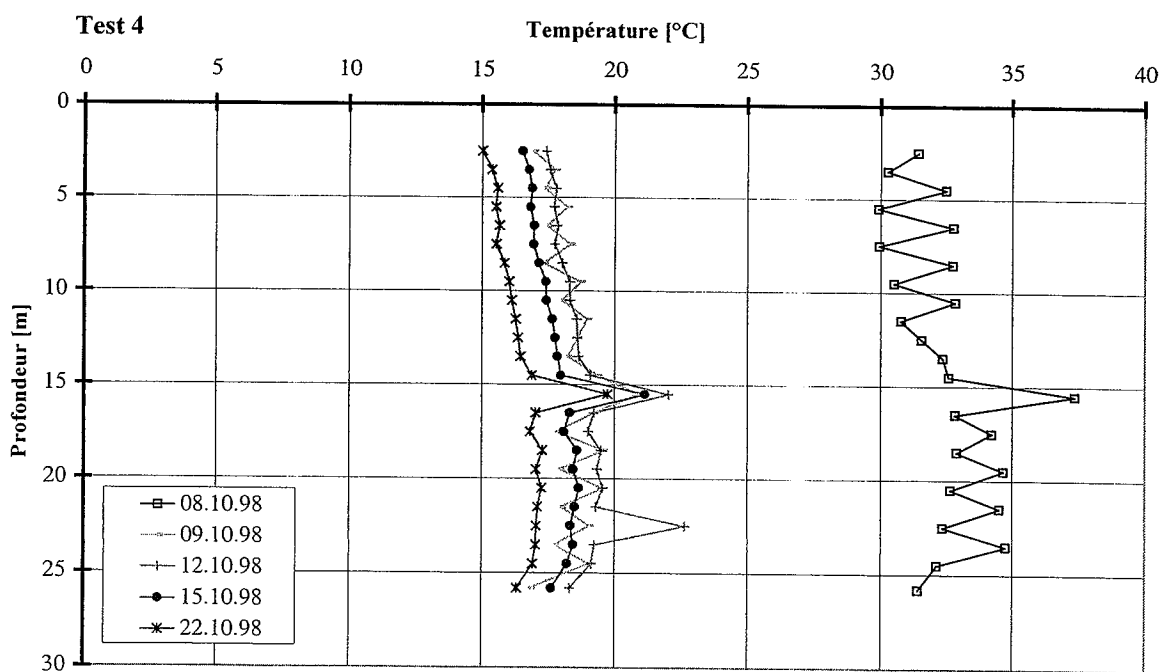


Figure 30: Test 4 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement.

6.2.5 Test 5

La dalle, le parapet et les murs-colonne du troisième étage sont bétonnés lors de l'exécution du test 5 (figure 31, zone grise). Il reste encore un étage et le toit à construire. Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 5 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 10 jours. L'heure d'été est conservée tout au long du test. A partir du dimanche 25 octobre, les heures indiquées sont en avance d'une heure relativement à l'heure d'hiver.

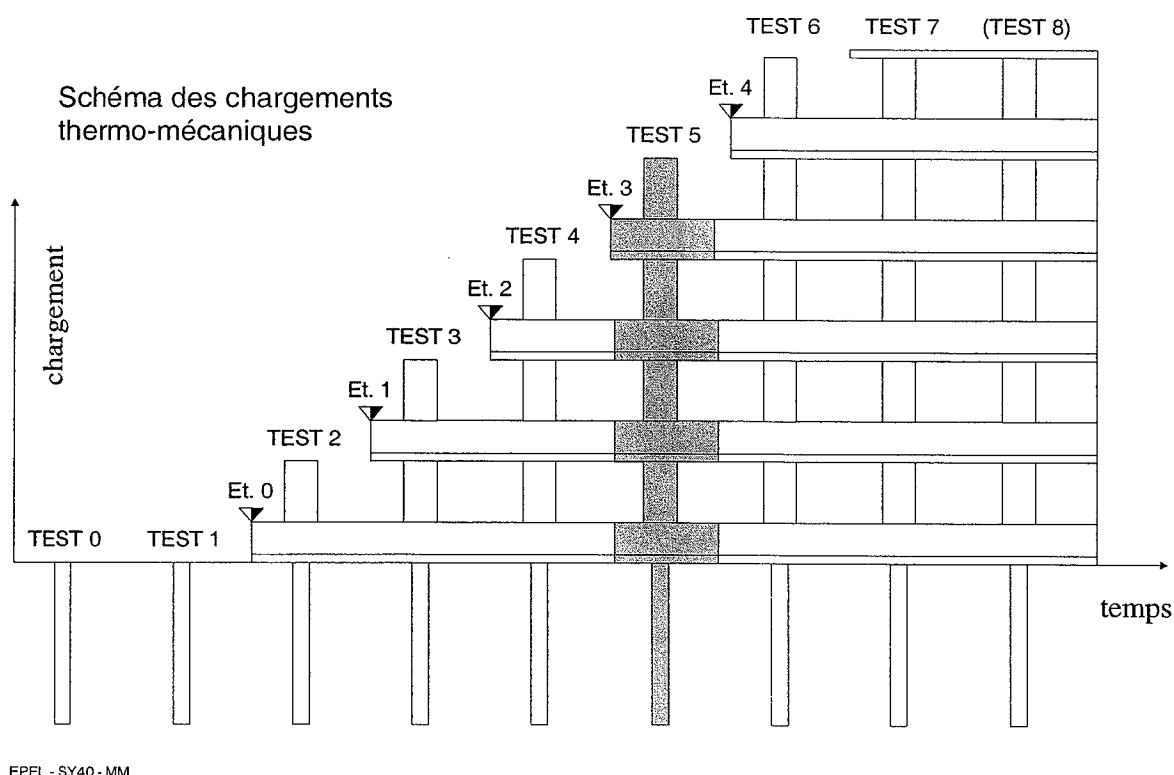


Figure 31 : Etat de construction lors du Test 5.

6.2.3.1 Mesures thermiques relatives au Test 5

Les mesures relatives au module de chauffage sont effectuées de la même manière que pour le Test 3 (les mesures du compteur électrique sont toujours effectuées par relevés manuel). Dans la figure 32, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour le Test 5. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure 33. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Elle est établie sur la base des relevés du compteur électrique. En refroidissement actif, la puissance de refroidissement montre une pointe à 12 kW, qui décroît rapidement à 2.5 kW après deux jours sans interruption. L'eau froide avait une température moyenne d'environ 11 °C. Dans le tableau 5, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour les principales phases du test.

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est mesurée à 16.4°C. La température moyenne du pieu doit être proche de cette valeur. Quinze jours plus tard, soit après dix jours de refroidissement, elle est redescendue à 16.3 °C, soit dessous de sa valeur initiale.

La température moyenne dans la pieu avant le commencement du chauffage (22 octobre 1998) mesurée avec les capteurs TELEMAT est d'environ de 16-17°C. La température maximale atteinte après sollicitation est en moyenne de 32-33°C ($\Delta T=15^\circ\text{C}$). Ces températures sont comparables à celles de l'eau qui circule dans les tubes en PE en incluant toujours la correction de 5.1 °C.

On note, comme dans les tests précédents, toujours une différence de température entre les TELEMAT posés d'un côté du pieu par rapport à ceux posés de l'autre côté. Cette différence comme déjà expliqué pour les tests 2, 3 et 4 est due au fait que certains capteurs sont plus proches des tubes où passe le fluide caloporteur que d'autres (Figure 34).

Comme dans le Test 4, le capteurs T33039 à 15.5 m continue à mesurer une température plus élevées que la moyenne dans le pieu (figures 34 et 35).

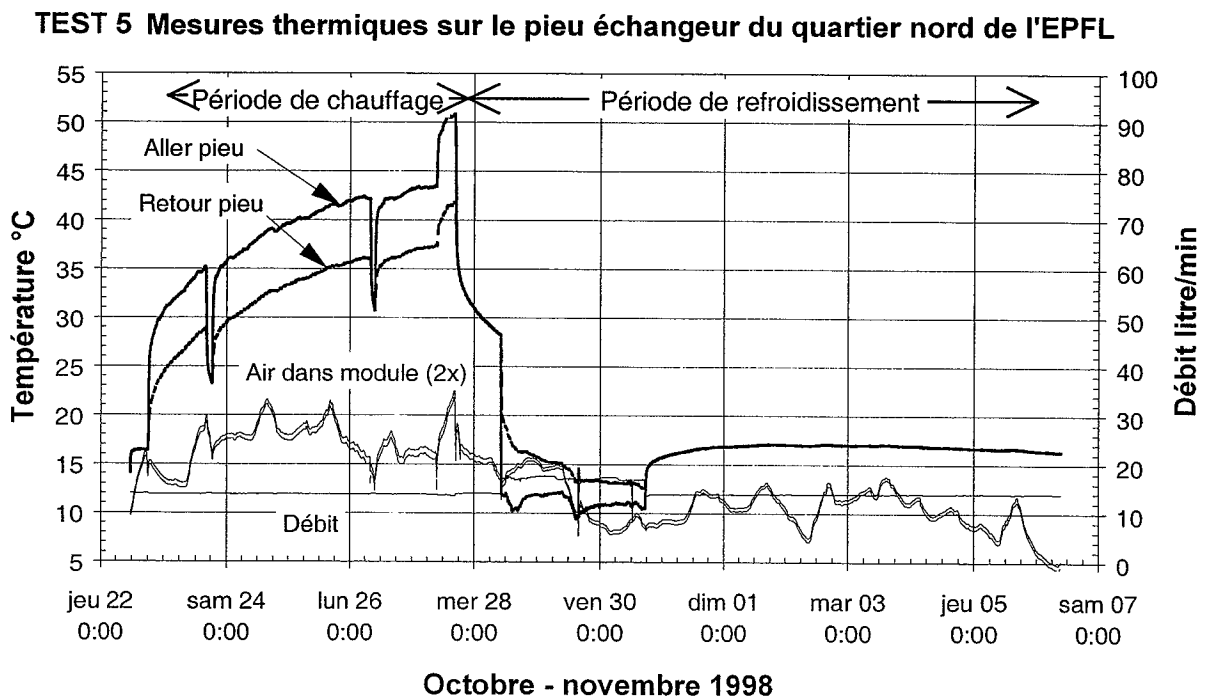
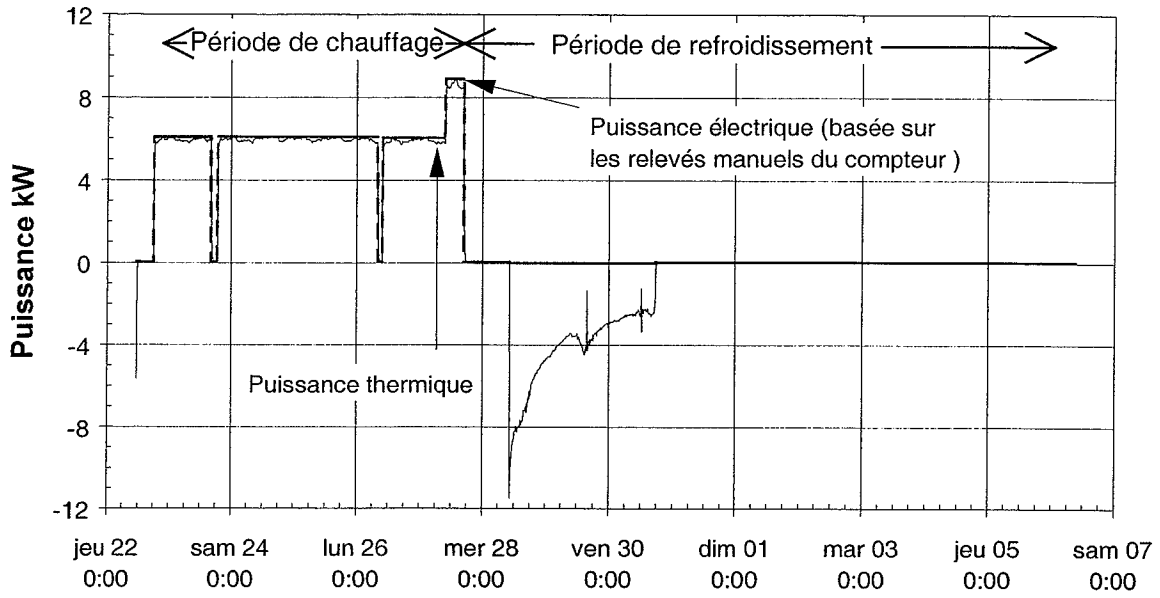


Figure 32 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du test 5.

TEST 5 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Octobre - novembre 1998

Figure 33: Evolution des puissances thermique et électrique lors du Test 5.

Energie / efficacité	Chauffage	Refroidissement actif	Nette dans terrain
Energie thermique	699 kWh	-227 kWh	472 kWh
Energie électrique	717 kWh		
Efficacité chaudière	97.5 %		

Tableau 5: Bilan d'énergie relatif au Test 5.

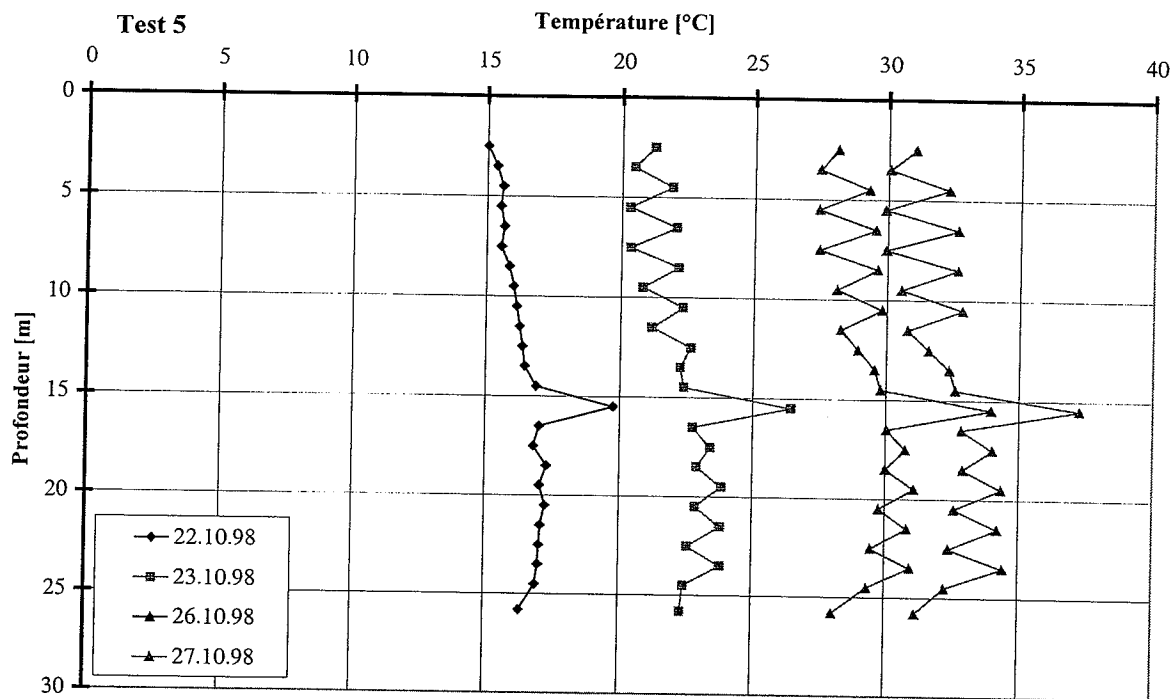


Figure 34 : Test 5 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage.

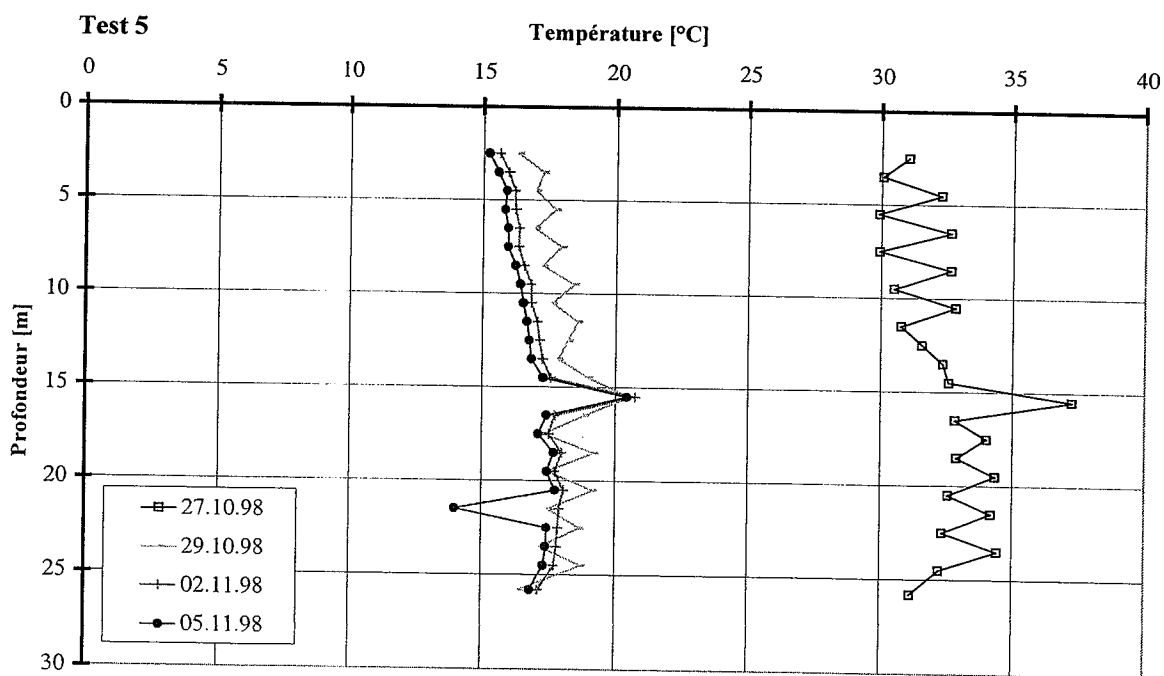


Figure 35 : Test 5 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement.

6.2.6 Test 6

Le dernier étage est construit lors de l'exécution du Test 6 (Figure 36, zone grise). Seul le toit reste à construire. Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 5 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 14 jours. La pompe est enclenchée un jour avant le début du test, en raison de la température extérieure de l'air qui passe régulièrement en dessous de 0°C. La circulation de l'eau permet d'éviter le gel dans les tuyaux, en utilisant le terrain comme source de chaleur. La pompe de circulation ne sera pas arrêtée après la fin du test. Le refroidissement actif du pieu n'est pas réalisé, en raison du risque de gel lorsque l'eau froide du réseau est coupée.

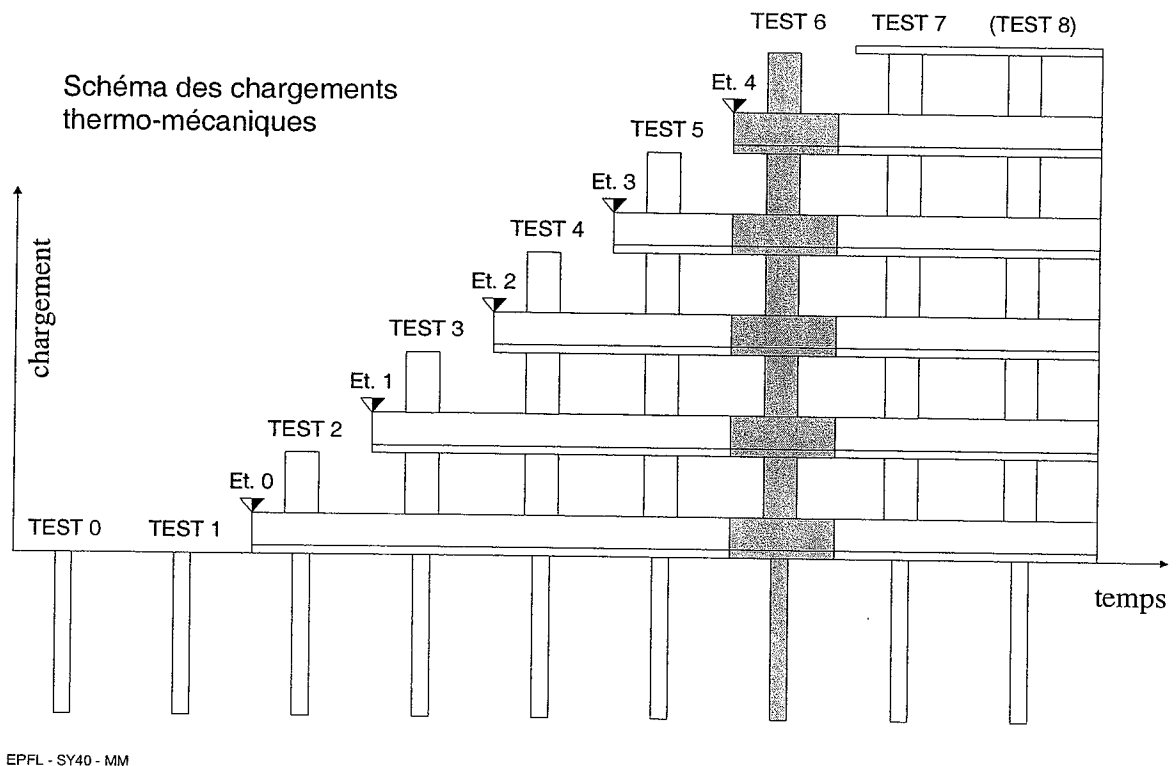
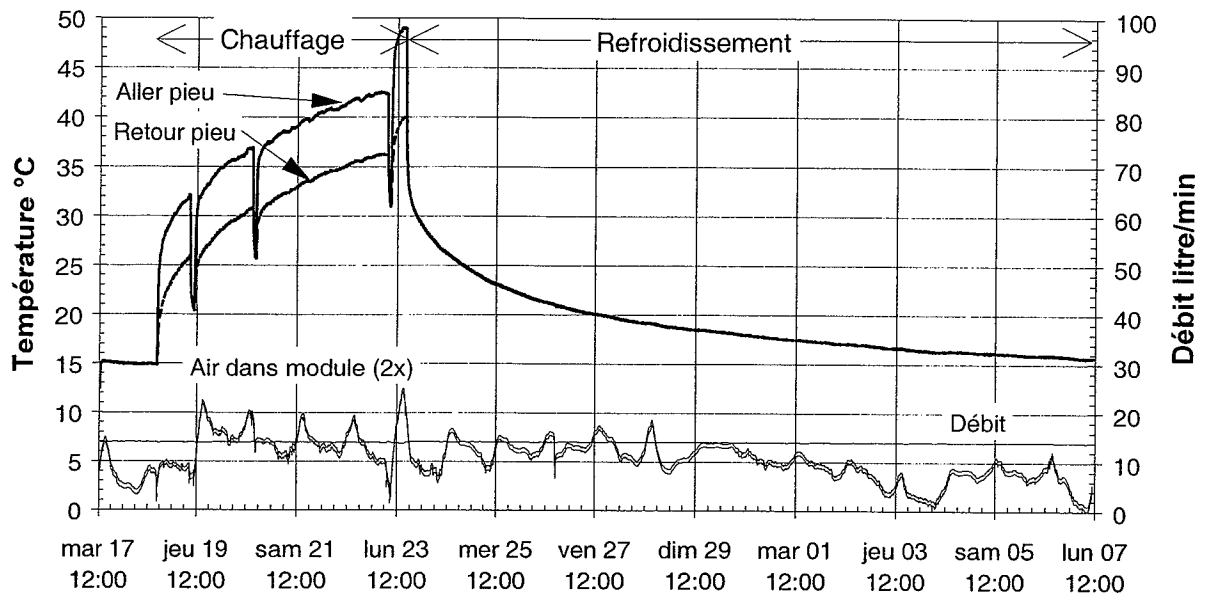


Figure 36 : Etat de la construction lors du Test 6.

6.2.6.1 Mesures thermiques relatives au Test 6

Les mesures relatives au module de chauffage sont maintenant entièrement automatisées. Elles se font comme pour le Test 3, mais avec un enregistrement automatique des impulsions émises par le compteur électrique. Dans la figure 37, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour le Test 6. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure 38. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Dans le tableau 6, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour les principales phases du test.

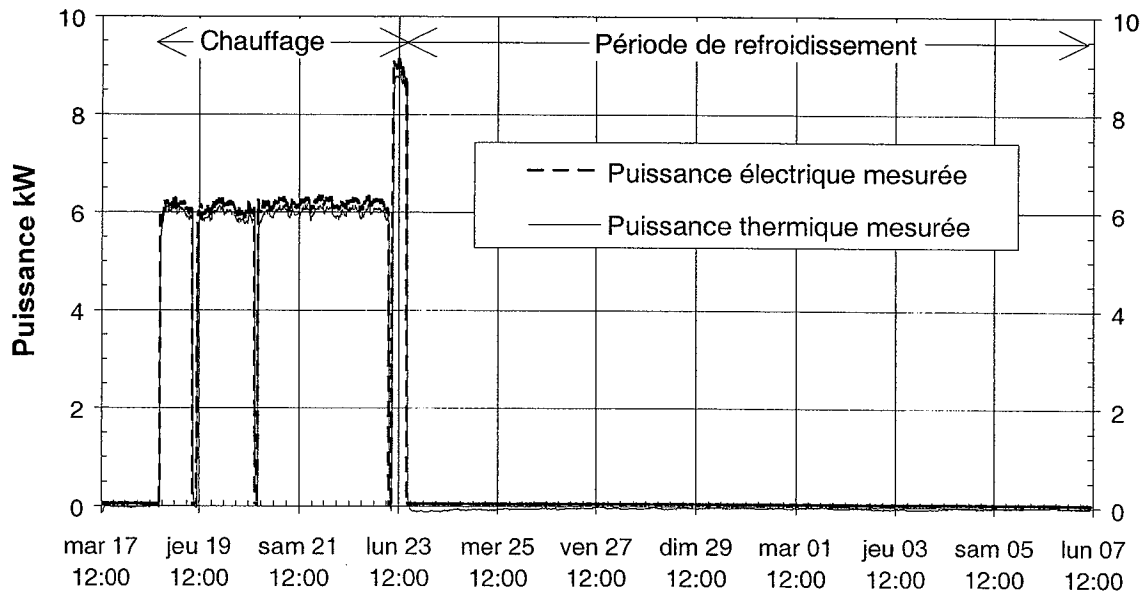
TEST 6 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Novembre - décembre 1998

Figure 37 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) de l'air dans la boîte qui contient le module de chauffage et du débit mesuré lors du test 6.

TEST 6 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Novembre - décembre 1998

Figure 38 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du Test 6.

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est de 14.9°C. La température moyenne du pieu doit être proche de cette valeur. Dix-neuf jours plus tard, soit après 14 jours de refroidissement, elle est redescendue à 15.7°C.

Energie / efficacité	Chauffage	Refroidissement actif	Nette dans terrain
Energie thermique	696 kWh	0 kWh	696 kWh
Energie électrique	717 kWh		
Efficacité chaudière	97.1 %		

Tableau 6 : Bilan d'énergie relatif au Test 6.

La différence de température imposée au pieu pendant le Test 6 est d'environ 15°C (figures 39 et 40). Comme dans les tests précédents, on note toujours une différence de température entre les TELEMAT posés d'un côté du pieu par rapport à ceux posés de l'autre. Cette différence est due au fait que certains capteurs sont plus proches des tubes où passe le fluide caloporteur que d'autres (figure 39).

Le capteur T33039 à 15.5 m mesure une température plus élevée que la moyenne dans le pieu.

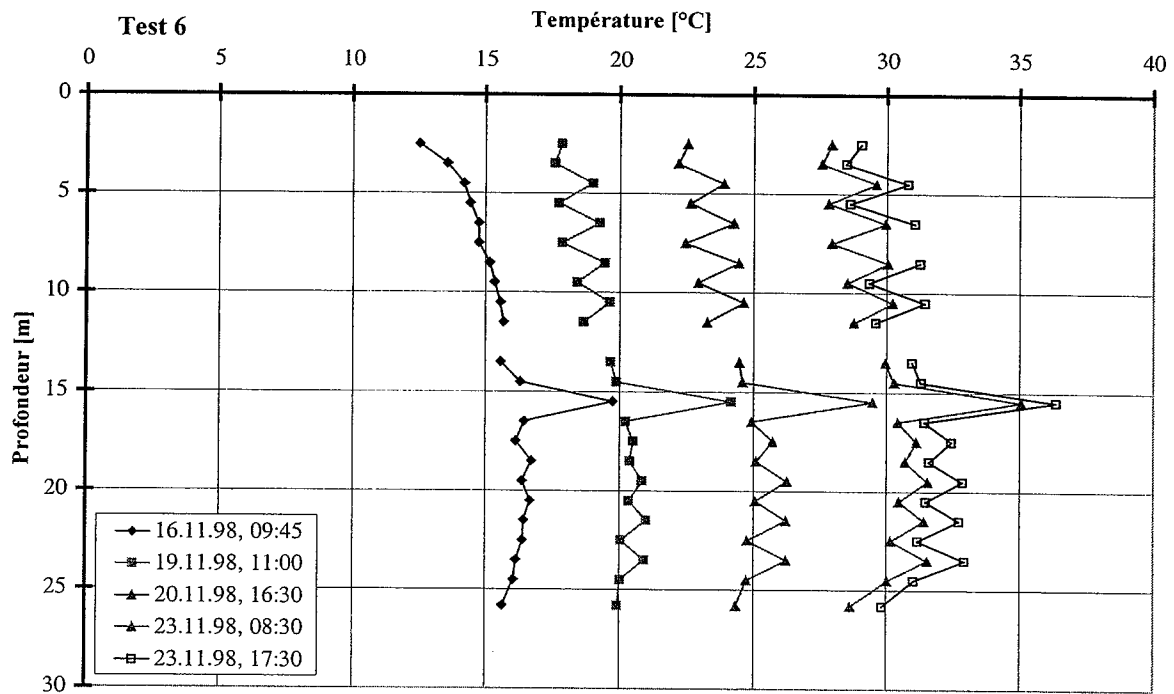


Figure 39 : Test 6 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps, en phase de chauffage.

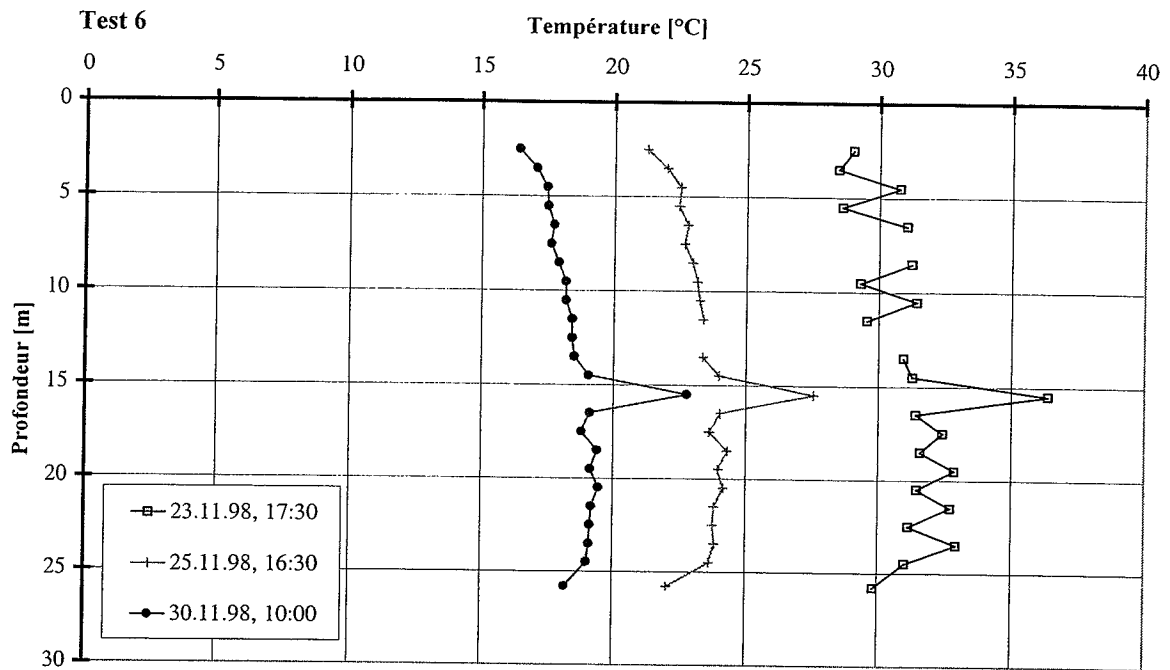


Figure 40 : Test 6 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement.

6.2.7 Test 7 et 8

Le toit du dernier étage est construit lors de l'exécution du test 7 (figure 41, zone grise). Le bâtiment n'est pas encore occupé. Le déroulement du test est résumé dans l'annexe 3. La phase de chauffage a duré 22 jours avec une puissance de chauffage réduite mais continue, de manière à se mettre dans les conditions d'un test de réponse. La phase de refroidissement a été suivie pendant 11 jours. La pompe est enclenchée 13 jours avant le début du test, de manière à suivre l'évolution de la température du terrain. Les mesures de température de l'eau qui circule dans le pieu sont légèrement influencées par la température de l'air extérieur. Toutefois, elles montrent que la température du terrain baisse encore légèrement (de quelques dixièmes de degrés sur 10 jours).

Le refroidissement actif du pieu n'est pas réalisé, en raison du risque de gel lorsque l'eau froide du réseau est coupée.

Le test 8 consiste tout simplement en la mesure de l'état final du pieu. Les mesures faites sont jointes à celles du Test 7.

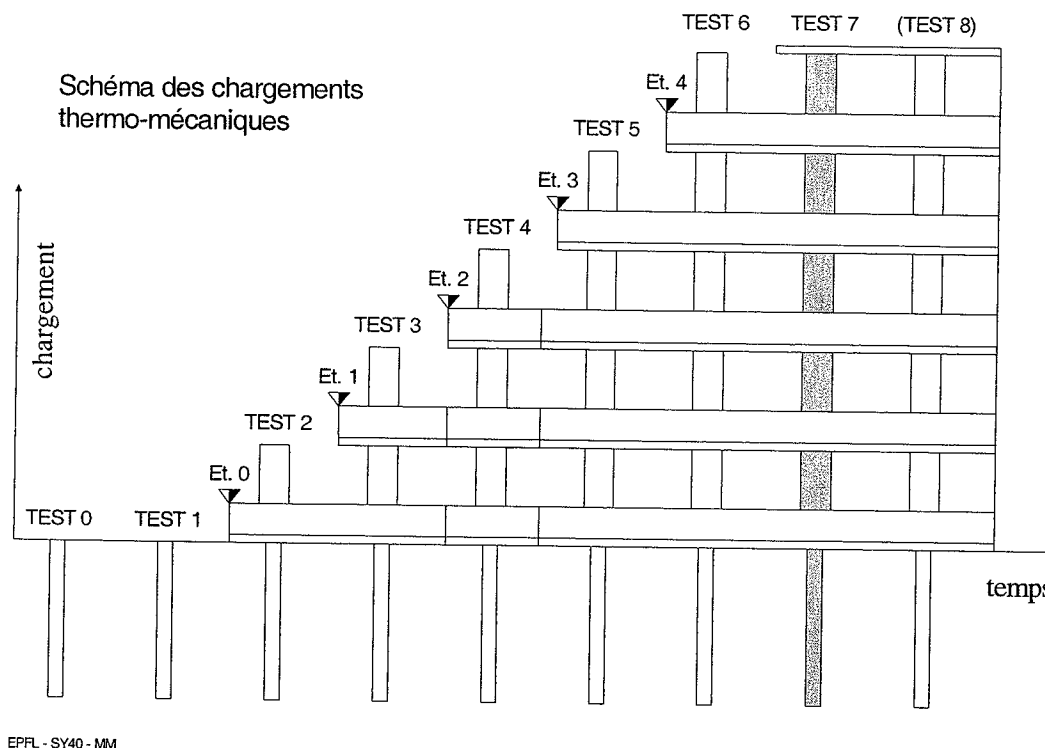


Figure 41 : Etat de la construction lors du Test 7.

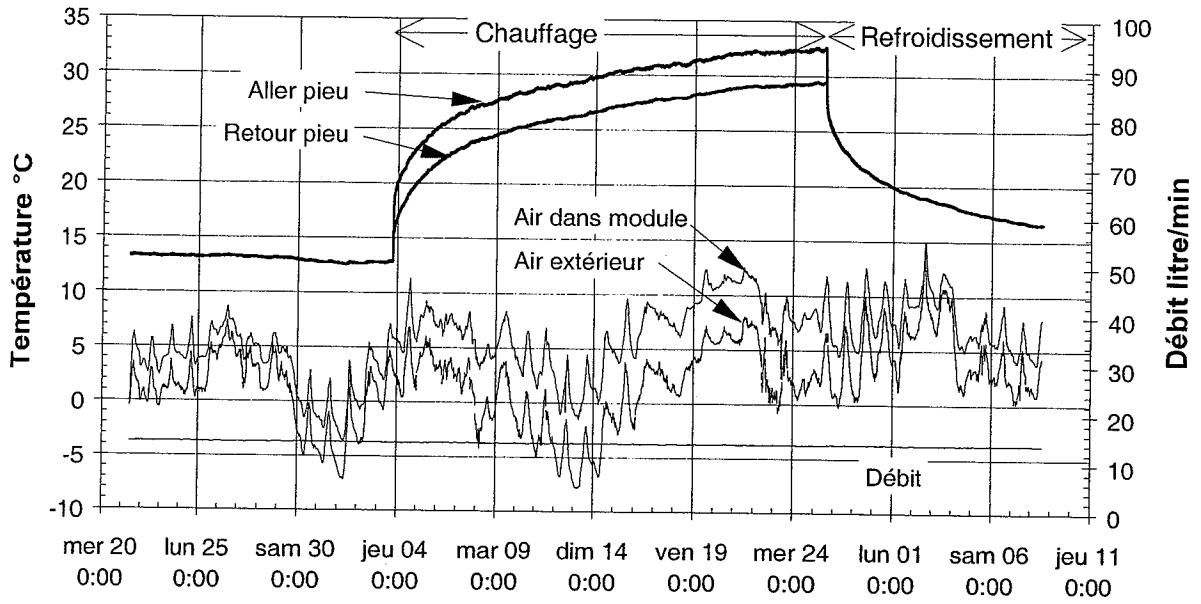
6.2.7.1 Mesures thermiques relatives aux Tests 7 et 8

Les mesures relatives au module de chauffage sont entièrement automatisées. Elles se font comme pour le Test 6, mais avec une sonde qui mesure la température extérieure de l'air plutôt que la température de l'air à l'intérieur du module. Dans la figure 42, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour le Test 7. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure 43. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Dans le tableau 7, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour la phase de chauffage du test.

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est mesurée à environ 13°C. La température moyenne du pieu doit être proche de cette valeur. Trente-cinq jours plus tard, soit après 13 jours de refroidissement, elle est redescendue à 16.6 °C.

La différence de température imposée au pieu pendant le Test 7 est d'environ 15°C (figure 44).

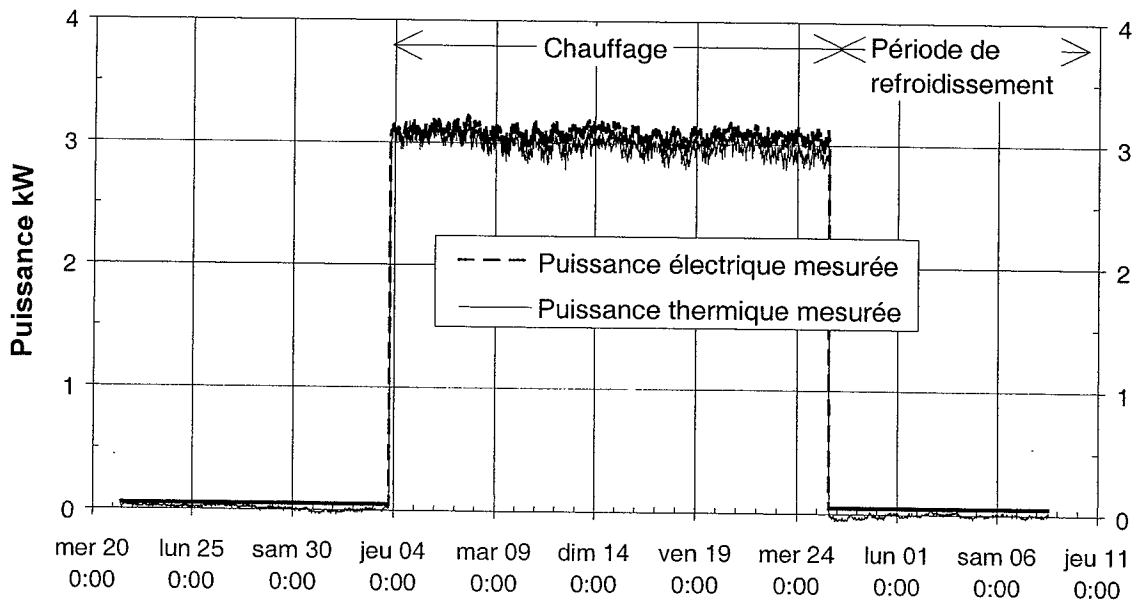
TEST 7 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Janvier - février 1999

Figure 42 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) de l'air dans la boîte contenant le module de chauffage, de l'air extérieur et du débit mesuré lors du Test 7.

TEST 7 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Janvier - février 1999

Figure 43 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du Test 7.

Energie / efficacité	Chauffage	Refroidissement actif	Nette dans terrain
Energie thermique	1'558 kWh	0 kWh	1'558 kWh
Energie électrique	1'610 kWh		
Efficacité chaudière	96.8.1 %		

Tableau 7 : Bilan d'énergie relatif au Test 7.

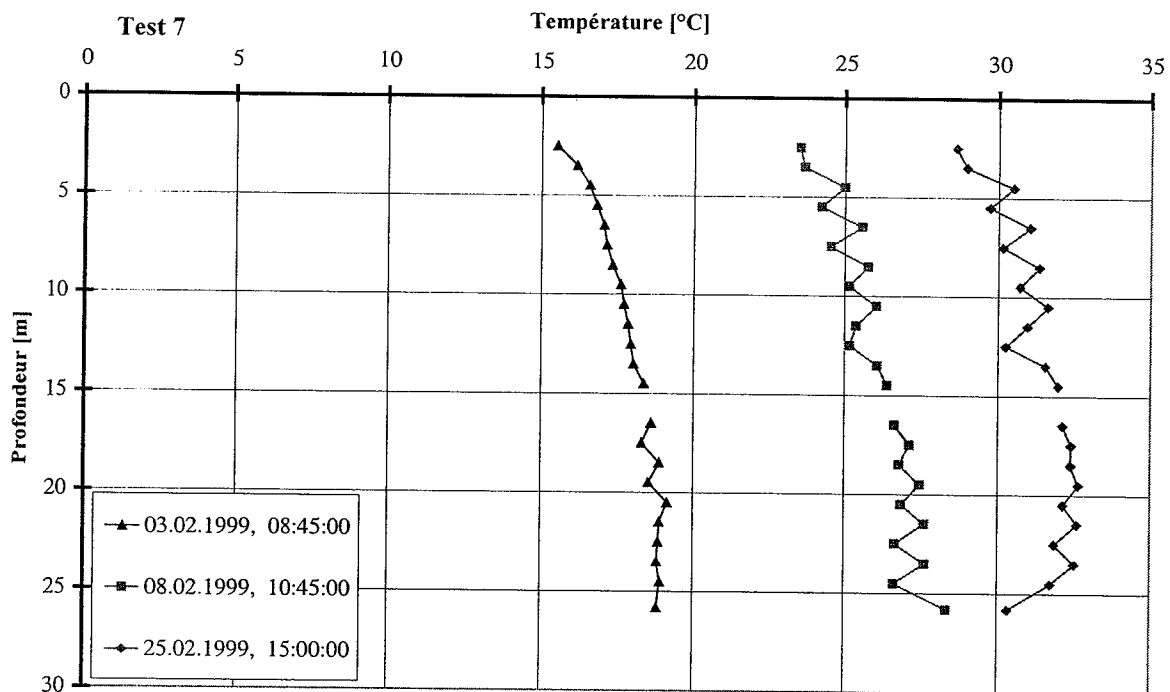


Figure 44 : Test 7 - Variation de la température le long du pieu, en fonction du temps, en phase de chauffage.

La phase de refroidissement est présentée sur la figure 45. On y note un refroidissement générale et relativement uniforme du pieu. L'influence de la température à la surface se fait remarquer par les mesures en tête du pieu. La phase de refroidissement actif liée au Test 7 s'achève en avril 99. Pour le Test 8, une nouvelle mesure sur le pieu a été réalisée en janvier 2000. Elle montre que le pieu continue à se refroidir légèrement.

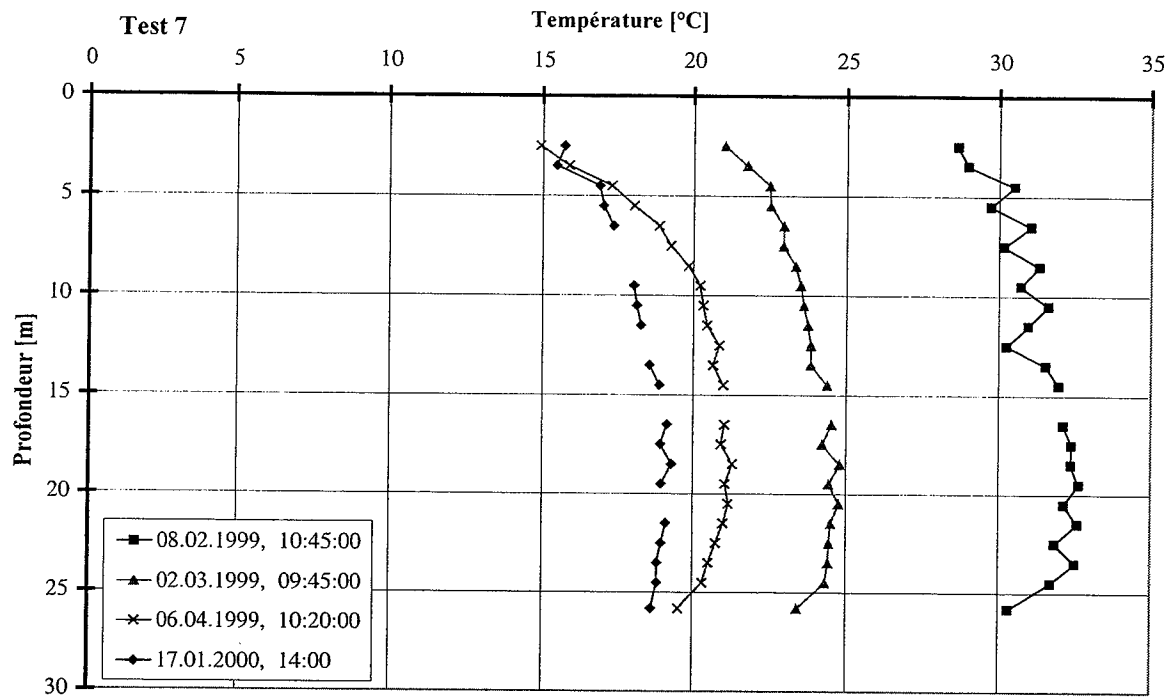


Figure 45 : Tests 7 et 8 - Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement (jusqu'au 6.4.99) et en fonctionnement normal (17.01.00).

6.2.8. Bilan de la sollicitation thermique

La figure 46 résume les valeurs des températures moyennes imposées au pieu au cours des 7 tests. On y retrouve le fait que le gradient thermique imposé au Test 1 était relativement important ($\Delta T=22^{\circ}\text{C}$). Ensuite, on note que le refroidissement du pieu n'est plus entièrement obtenu entre deux tests. Ceci fait que pour un même gradient thermique appliqué, l'intensité de la température est de plus en plus importante au cours des tests. Enfin, à l'aide du module de chauffage spécialement conçu, les températures souhaitées ont pu être appliquées correctement au pieu.

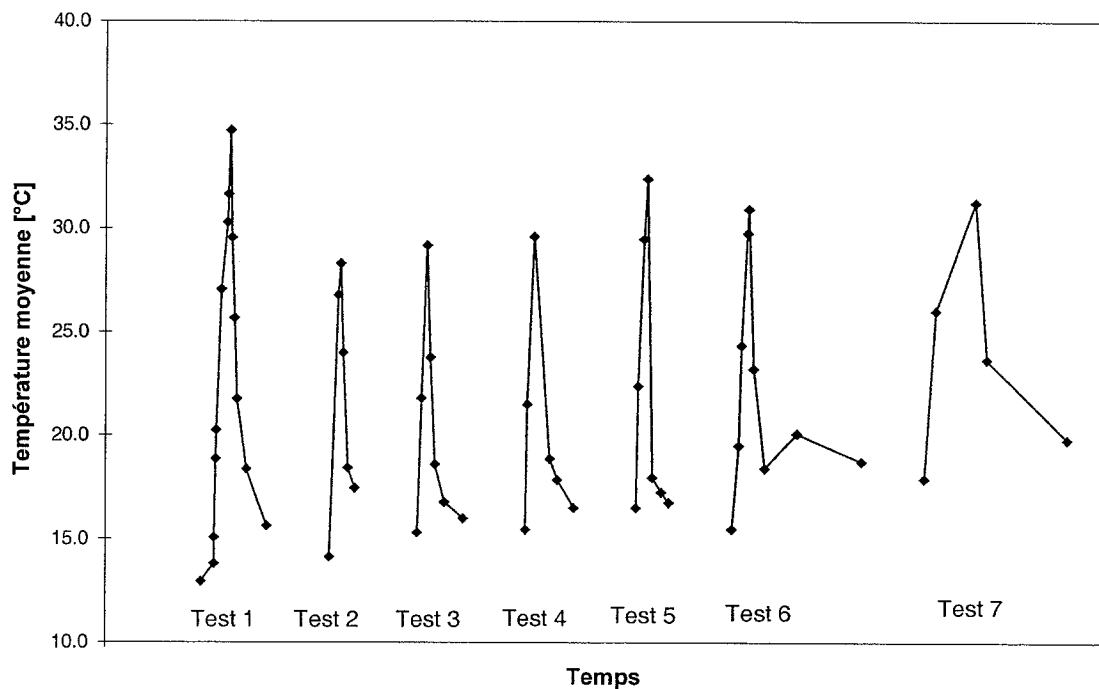


Figure 46 : Températures dans le pieu au cours des Tests

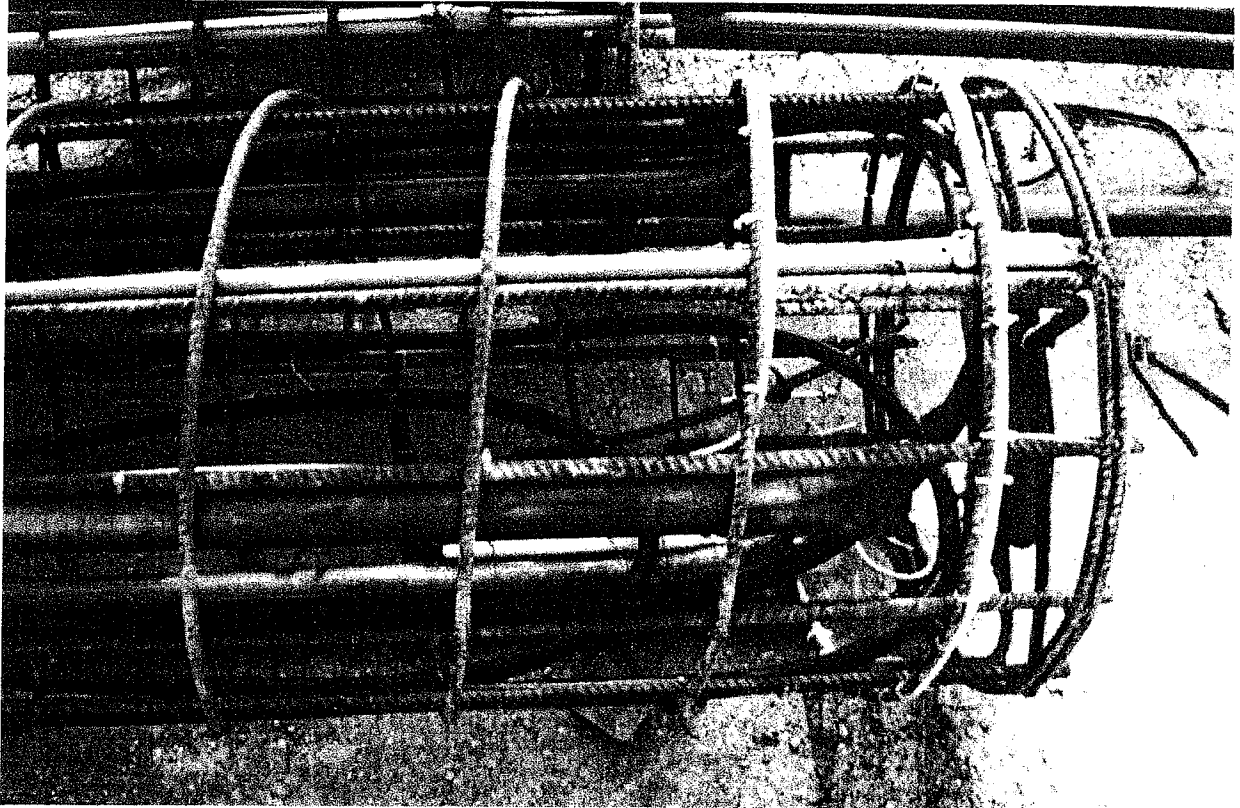


Photo 6 : Détail armature du pieu avec cellule de pression, tubes pour fluide caloporteur, fibres optiques pour mesure déformations verticales et radiales, extensomètres à corde vibrantes et tube en acier pour le carottage sonore

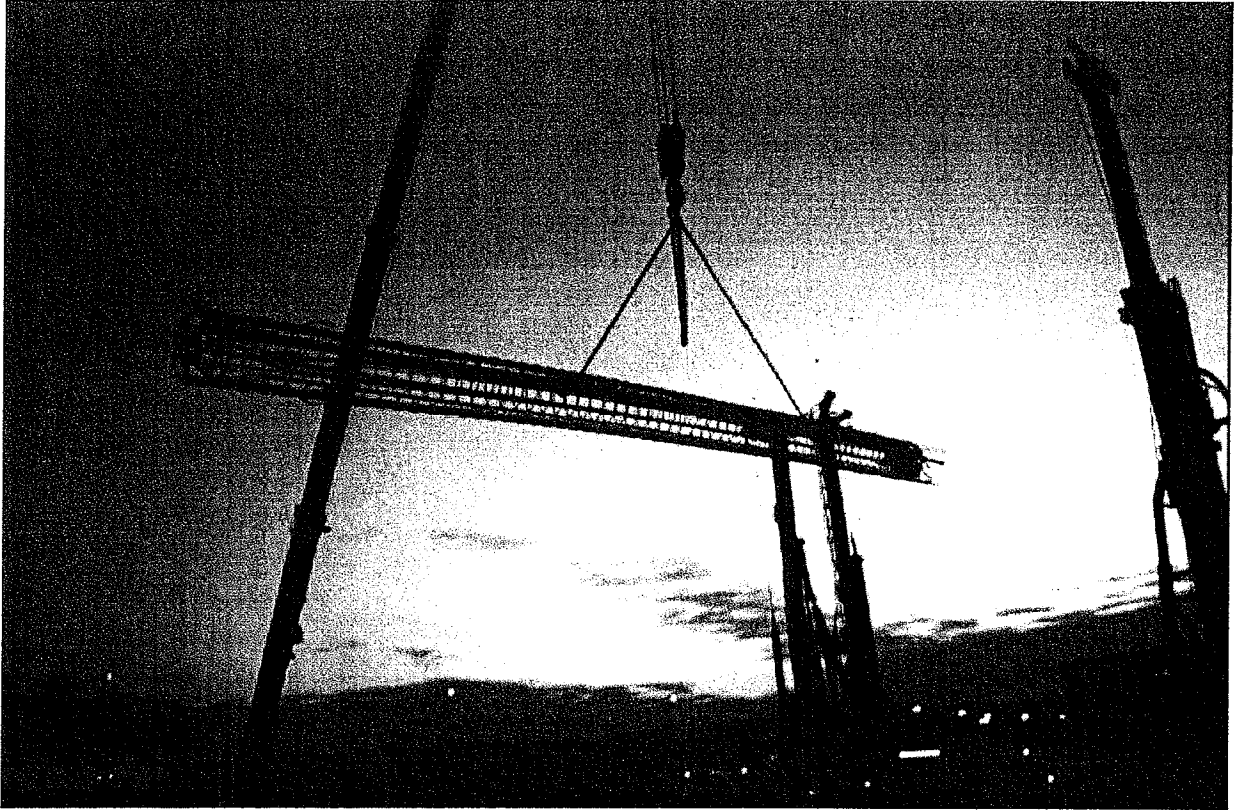


Photo 7 : Transport de la cage d'armature.



Photo 8 : Pose cage d'armature

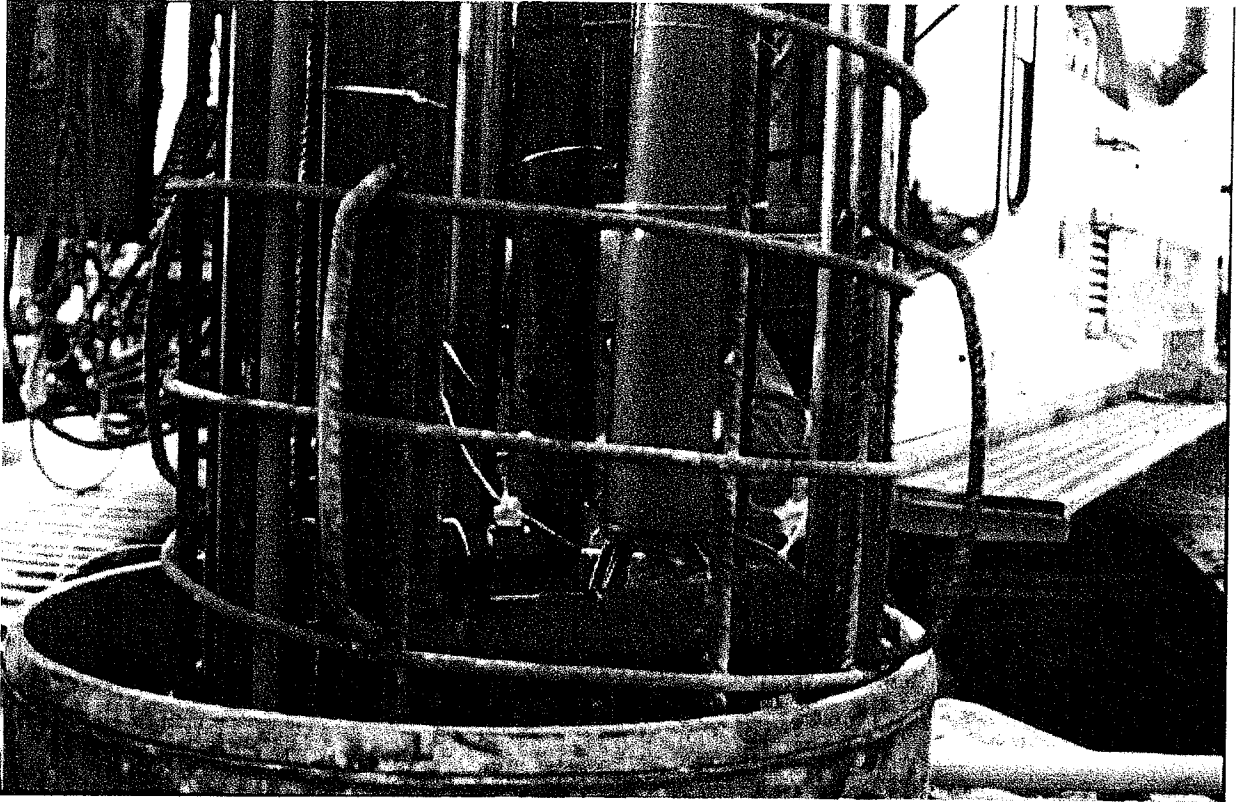


Photo 9 : Détail sommet de la cage d'armature avec les connecteurs du fluide caloporteur avant le bétonnage.

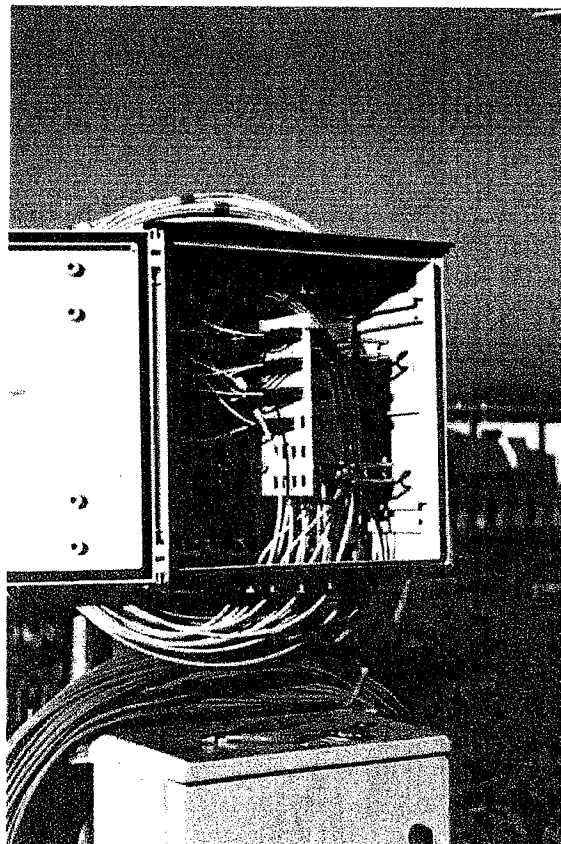


Photo 10 : Centrale de mesure, lieu où aboutissent tous les capteurs

ANNEXE 2 : ETALONNAGE DES CAPTEURS DE MESURE

A2.1 CELLULE HCV

A.2.1.1 Introduction

Avant la pose de la cellule type HCV pour la mesure de la pression en pointe du pieu-test, celle-ci a été étalonnée afin de tenir compte des variations de la température.

A.2.1.2 Description du capteur

La cellule de mesure des pressions totales, type HCV est composée (Figure A.2.1):

1. D'un coussin déformable en acier (ϕ 270 mm, $e = 6$ mm) assoupli à sa périphérie par usinage d'une gorge d'articulation.
2. D'un cylindre en bronze (ϕ 40 mm) renfermant un capteur de pression à corde vibrante.
3. D'un tube en acier assurant la liaison entre les deux éléments précités. Sa longueur est d'environ 430 mm afin d'éviter que le capteur ne perturbe le champ des contraintes au voisinage du coussin.

A.2.1.3 Principe de fonctionnement du capteur

Ce type de capteur permet la mesure des pressions s'exerçant dans les sols, remblais, bétons ou au contact de deux matériaux différents.

Le coussin de la cellule, constitué de deux plaques métalliques circulaires soudées bord à bord, renferme sous une faible épaisseur un fluide. Ce fluide généralement de l'huile désaérée, rempli également le tube de liaison et vient au contact de la membrane déformable.

Une corde vibrante, tendue entre un point fixe du cylindre et la membrane déformable, constitue la partie sensible.

Le développement d'une pression sur le coussin a pour effet de provoquer une déformation axiale de la membrane par l'intermédiaire du fluide. Cette déformation modifie la tension de la corde et, par conséquent, sa fréquence de vibration.

A.2.1.4 Dépouillement des mesures

Une mesure initiale N_0 (fréquence en Hz) doit être faite juste après enfouissement sous faible charge.

Pour le calcul de la pression P (bar) s'exerçant sur le coussin au temps « t », on utilise la formule suivante :

$$P(\text{bar}) = K (N^2 - N_0^2) \quad (1)$$

K : coefficient extensométrique de la cellule calculé lors de l'étalonnage en laboratoire (voir figure A.2.2)

N : fréquence en Hertz mesurée à l'instant « t ».

N_0 : fréquence en Hertz mesurée à l'instant « t_0 ».

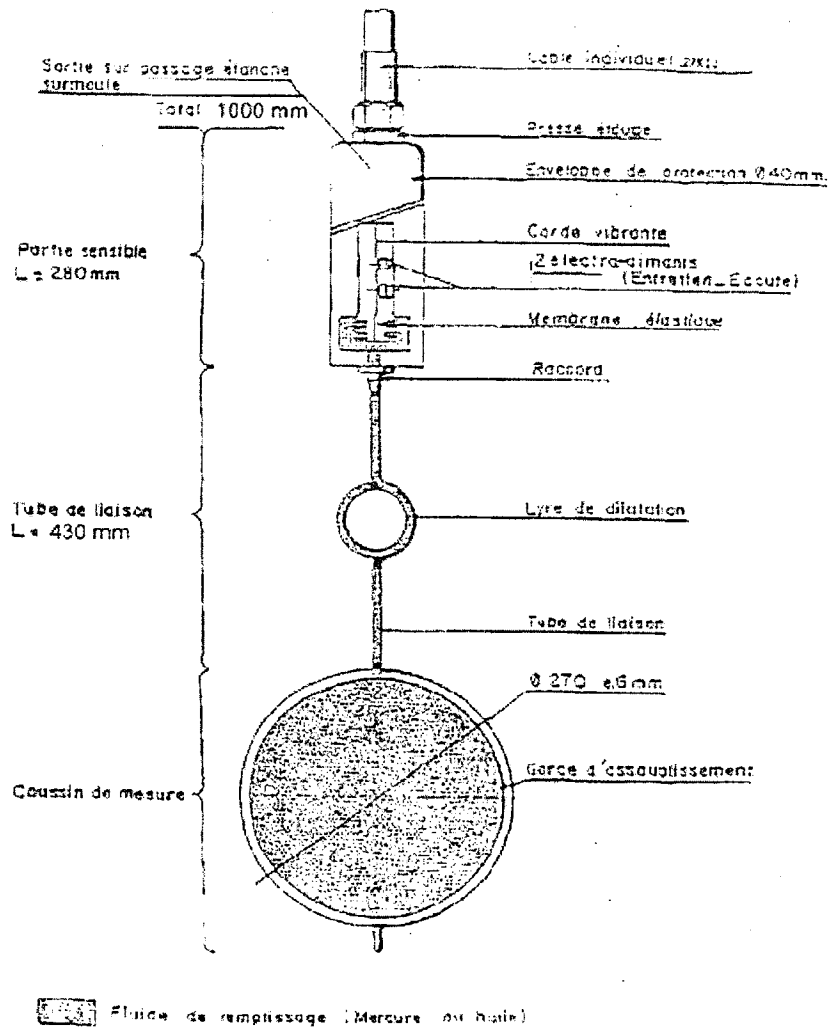


Figure A.2.1 : Cellule de mesure des pressions type HCV (Notice d'utilisation cellule type HCV, TELEMAR).

HCV 50 bar n° 1141

P. atm. (mbar): 1006.9

11 8890

Température (°C): 20.0

Coeff. K = -1.1470E-04
(bar/Hz²)

Erreur max. de linéarité sur F²:

0.16% de l'E.M

Moyenne DF² (Hz²): 42709

Ecart type DF² (Hz²): 288

= 0.67%

P (bar)	F (Hz)	F ² (Hz ²)	DF ² (Hz ²)	U (mV)
0.010	1007.18	1014412	0	16.2
4.882	985.87	971940	42472	16.1
9.786	963.78	928872	43068	16.1
14.689	941.20	885857	43014	16.1
19.592	918.10	842908	42950	16.0
24.496	894.42	799987	42920	15.9
29.399	870.13	757126	42861	15.7
34.302	845.26	714464	42662	15.5
39.206	819.75	671990	42474	15.2
44.109	793.49	629626	42364	14.6
49.012	766.37	587323	42303	14.1

Figure A.2.2: Etalonnage en laboratoire fourni par TELEMAT.

A2.2 ETALONNAGE CELLULE TELEMAT

A.2.2.1 Méthode

Pour voir si une augmentation de la température a une influence sur l'étalonnage du capteur fourni par TELEMAT, on l'a soumis à des charges (1, 2, 4 et 10 bar) avec une presse (Figure A.2.3) à des températures différentes (23, 31 et 47 °C). Le capteur est soumis à la température souhaitée dans un bac d'eau chaude (Figure A.2.4) et puis transporté et mis sous presse pour l'application des charges et prises des mesures.

Le temps entre la sortie du capteur de l'eau chaude et la dernière mesure sous la presse est suffisamment court pour admettre qu'il y a pas de refroidissement du capteur.

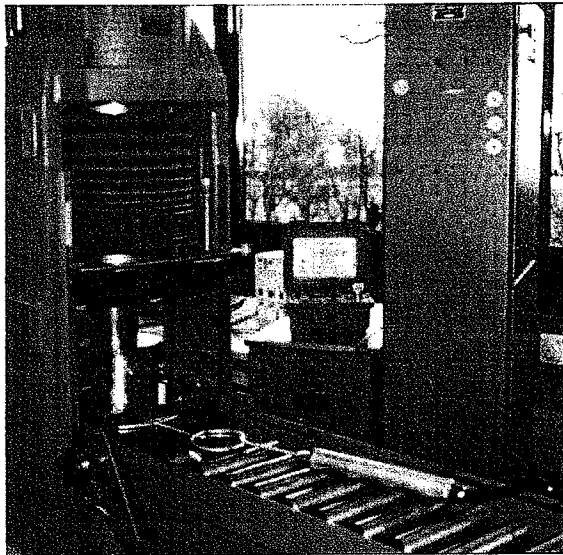


Figure A.2.3 : Presse utilisée pour la vérification de l'étalonnage.



Figure A.2.4 : Bac d'eau chaude.

A.2.2.2 Résultats

Les résultats de l'étalonnage sont résumés dans le tableau A.2.1. Pour chaque température, la pente de la droite de régression (qui correspond au facteur K, formule 1) a été déterminée. La figure A.2.5 montre qu'effectivement ces droites de régression sont parallèles.

Il y a une légère différence (1% à 3%) entre les valeurs de K trouvées ici et celles fournies par TELEMAT, cette erreur est essentiellement due à des imprécisions dans l'application de la charge.

P [bar]	T = 23 °C		T = 31 °C		T = 47 °C	
	F [Hz]	F ² [Hz ²]	F [Hz]	F ² [Hz ²]	F [Hz]	F ² [Hz ²]
0	1005.4	1010729	1010.8	1021777	1018.9	1038157
1	1001.5	1003002	1005.9	1011835	1015.2	1030631
2	995.7	991418	1003.2	1006410	1011.0	1022121
4	989.4	978912	993.1	986248	1000.8	1001601
10	962.3	926021	967.3	935669	976.5	953552
	K [bar / Hz²]	-1.184E-04	K [bar / Hz²]	-1.159E-04	K [bar / Hz²]	-1.169E-04

Tableau A.2.1 : Résultats des essais de vérification de l'étalonnage.

$$P = f(F^2)$$

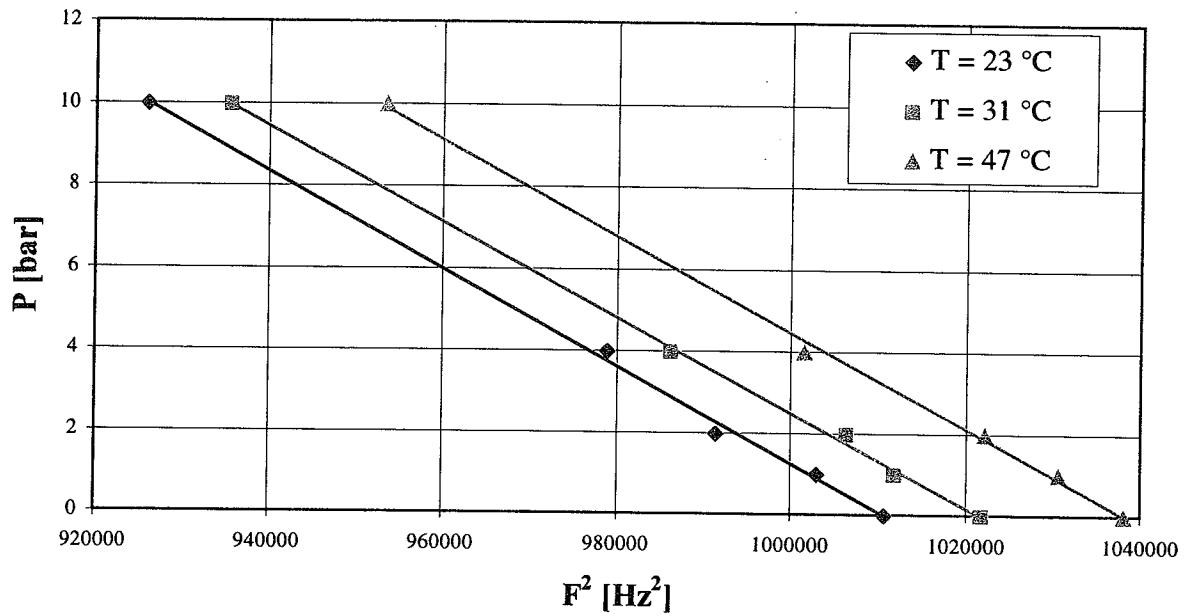


Figure A.2.5 : Courbes d'étalonnage pour des températures de 23, 31, 47 °C

A.2.2.3 Conclusions

Après cet étalonnage en laboratoire, il est possible d'affirmer que la formule (1) est applicable jusqu'à des températures de l'ordre de 50 °C.

A2.3 ETALONNAGE CAPTEURS DE MESURE RELATIFS AU MODULE DE CHAUFFAGE

Les capteurs de mesure relatifs au module de chauffage consistent en 4 sondes de température, un débitmètre et un compteur électrique.

- Sondes de température

Des résistances platines PT100 Almemo sont utilisées pour la mesure des températures. Les mesures des PT100 sont effectuées par le biais de 4 fils, de manière à ne pas dépendre de la résistance propre des fils. L'étalonnage des PT100 a été effectué à plusieurs température (10, 20, 30, 40 et 50°C) dans un bain thermostatique. La température de référence est mesurée par un thermomètre à quartz préalablement étalonné. L'évolution des températures lors de l'étalonnage est montrée dans la figure A2.3.1

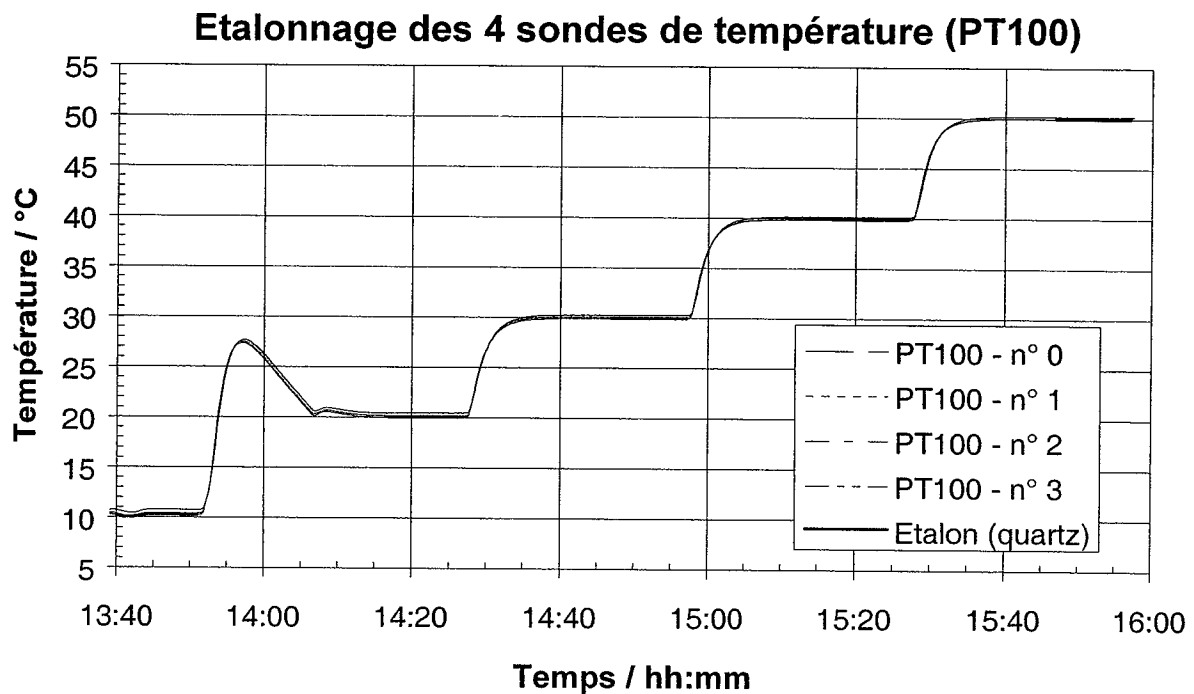


Fig. A7.1 Evolution des températures des 4 sondes de mesure PT100 lors de leur étalonnage.

Les déviations avec la température de référence sont montrées dans la figure A7.2 pour les 4 sondes de température.

Etalonnage des 4 sondes de température (PT100)

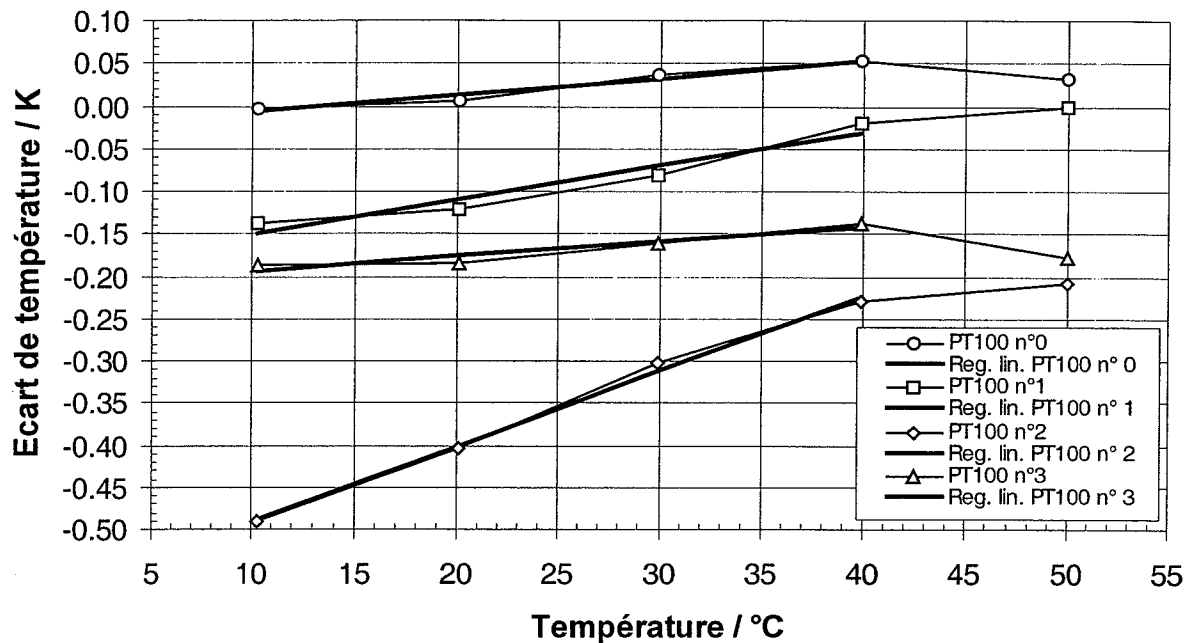


Fig. A2.3.1 Ecart des mesures de température avec la température de référence. Les régressions linéaires sont établies et validés pour l'intervalle de température 10 - 40 °C.

Les valeurs des écarts, définis par $(T_{\text{référence}} - T_{\text{mesurePT100}})$, sont données dans la table A7.1 pour chaque capteur PT100.

Temp. Référence	Ecart PT100 n°0	Ecart PT100 n°1	Ecart PT100 n°2	Ecart PT100 n°3
10.27 °C	0.00 K	-0.14 K	-0.49 K	-0.19 K
20.06 °C	0.01 K	-0.12 K	-0.40 K	-0.19 K
29.97 °C	0.04 K	-0.08 K	-0.30 K	-0.16 K
39.90 °C	0.05 K	-0.02 K	-0.23 K	-0.14 K
50.00 °C	0.03 K	0.00 K	-0.21 K	-0.18 K

Table A7.1 Ecart de température des PT100 relatif à la température de référence. L'écart est défini par $(T_{\text{référence}} - T_{\text{mesurePT100}})$.

La température corrigée est obtenue par la relation (A7.1).

$$T_{\text{corrigé}} = (T_{\text{mesurée}} - \text{BASE}) \times \text{FACTEUR} \quad (\text{A7.1})$$

Les valeurs de BASE et FACTEUR sont données dans la table A7.2 pour chaque capteur des PT100. Ces facteurs de correction ne sont valables que pour des températures comprises entre 10 et 40 °C.

Facteurs de correction	PT100 n°0	PT100 n°1	PT100 n°2	PT100 n°3
BASE	0.0263 K	0.1892 K	0.5809 K	0.2105 K
FACTEUR	1.00196	1.00398	1.00903	1.00171

Table A7.2 Valeur des facteurs de correction BASE et FACTEUR pour les 4 PT100, conformément à la relation A7.1 et pour l'intervalle de température 10 - 40 °C.

Pour les mesures de température supérieures à 40 °C, les températures sont corrigées en se basant sur les corrections à 50 °C et 40 °C. La correction à 40 °C est choisie comme étant la correction obtenue avec la régression linéaire.

- Débitmètre

Le débit d'eau total circulant dans les tubes du pieu est mesuré par le débitmètre Almemo FV A915 au moyen d'une turbine axiale. Le débit est mesurable dans une plage de 2 à 40 litres/min. Un contrôle de la mesure du débit, effectué en pesant l'eau issue d'un débit constant durant un intervalle de temps donné, a permis de confirmer la précision annoncée de 1% des mesures effectuées avec le débitmètre (voir figure A7.3).

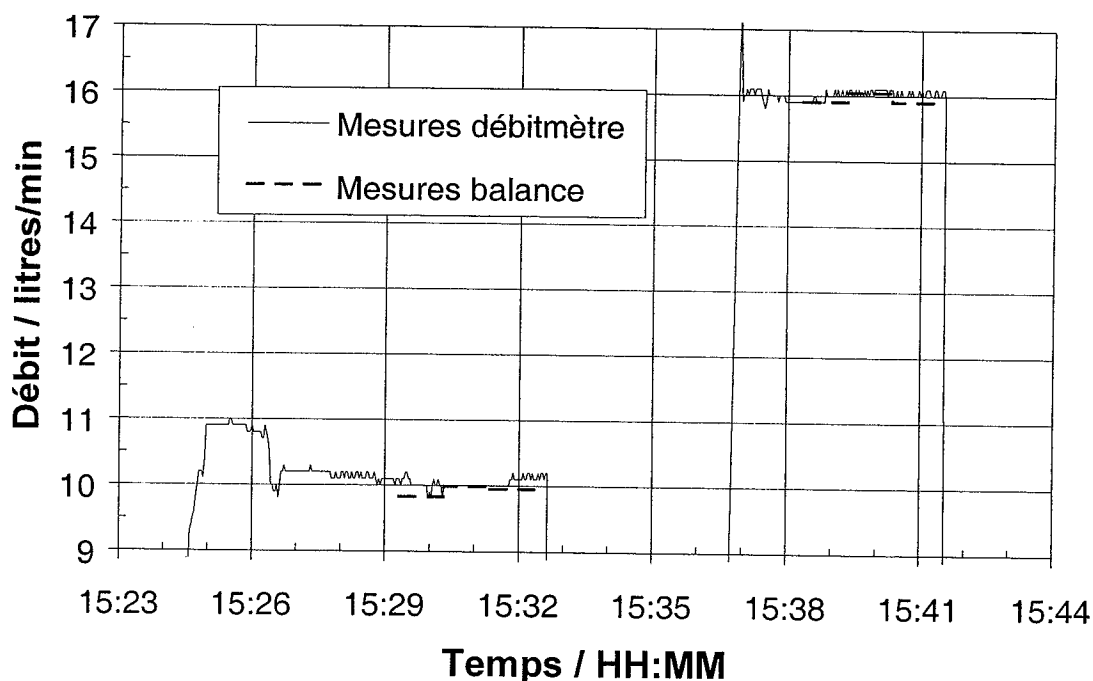


Fig. A7.3 Comparaison des mesures de débit avec le débitmètre et avec la balance.

La température de l'eau était de 14 °C pendant les mesures. Avec une masse volumique de 999.3 kg/m³, la masse mesurée de l'eau est convertie en volume. Globalement, le débitmètre surestime légèrement les mesures effectuées avec la balance (1% à 10 litres/min et 0.4 % à 16 litres/min). Compte tenu de la précision de la mesure de masse (± 0.15 kg) et de la quantité mesurée, la précision de la balance est au mieux de 0.5% à 10 litre/min et de 0.3% à 16 litre/min.

La précision des mesures de débit est conforme à la précision annoncée par le fabricant et ne nécessite pas un étalonnage particulier.

- Compteur électrique

Un compteur électrique Rausher&Stoecklin est utilisé. Le type de compteur utilisé, Wh 3063/640, est un compteur triphasé dont la précision de mesure est annoncée à $\pm 2\%$. Aucun étalonnage n'a été prévu pour ce compteur.

A2.3.2 Capteurs TELEMAT, mesures de température

Les extensomètres à corde vibrante TELEMAT permettent de mesurer la température dans le pieu. Ils sont posés sur la cage d'armature du pieu tous les mètres (Figure 2).

Si on compare les mesures de température de l'eau qui circule dans les tubes en PE avec celles mesurées par les capteurs TELEMAT, il y a en moyenne une différence de 5.1°C (table A7.3).

Dates mesures	Test	Température moyenne dans le pieu mesurée par les capteurs TELEMAT [°C]	Température fluide [°C]	Différence [°C]
08/09/98	3	28.8	23.9	4.9
14/09/98	3	21.8	16.7	5.1
07/10/98	4	33.0	28.0	5.1
12/10/98	4	23.9	18.6	5.3
15/10/98	4	22.9	17.8	5.1
22/10/98	5	21.5	16.4	5.1
02/11/98	5	22.3	17.0	5.3
05/11/98	5	21.8	16.7	5.1

Table A7.3 : Etalonnage capteurs TELEMAT.

En estimant la précision nettement meilleure pour la mesure de la température du fluide, les températures mesurées avec les capteurs TELEMAT seront corrigées de 5.1°C.

Cependant, nous n'arrive pas à nous expliquer cette surestimation systématique des températures par les capteurs TELEMAT. Des tests en laboratoire où des variations de température ont été imposées à un capteur de ce type ont donné des résultats satisfaisants.

Les pistes que nous tentons d'explorer actuellement sont l'effet de la prise du béton sur le capteur et les corrections liées à la longueur des fils et du boîtier de connexion.

ANNEXE 3 : DEROULEMENT DES TESTS THERMO-MECANIKES

Dans cet annexe, une description chronologique est faite sur le déroulement de de sept tests thermo-mécaniques réalisés sur le pieu.

A3.1 Etapes de construction lors du Test 1

Le test 1 correspond à la zone grise de la figure A3.1. Le déroulement du test est résumé dans la table A3.1. La phase de chauffage a duré 7 jours et le suivi de la phase de refroidissement 14 jours. Le pieu a été soumis à une sollicitation thermique $\Delta T=22^{\circ}\text{C}$. Le refroidissement actif est effectué en faisant circuler l'eau froide du réseau dans le pieu après avoir déconnecté la pompe. L'eau froide est généralement coupée durant la nuit et le week-end. Le vendredi 5 juin au matin, une vanne de sécurité s'est ouverte lors de la remise en pression du réseau d'eau froide. Un coup de bélier est certainement à l'origine de l'ouverture de la vanne qui a inondé l'intérieur du module. A partir de cette date, le robinet d'arrivée de l'eau a été fermé tous les soirs pour être progressivement ouvert le lendemain une fois le réseau sous pression. Après la fin du Test 1, un réducteur de pression a été installé sur l'arrivée de l'eau froide et des tuyaux ont été fixés sur les vannes de sécurité pour évacuer l'eau hors de l'enceinte du module de chauffage. Aucun étage n'étant construit, la charge mécanique sur le pieu est nulle. Le test s'est déroulé sans aucun problème.

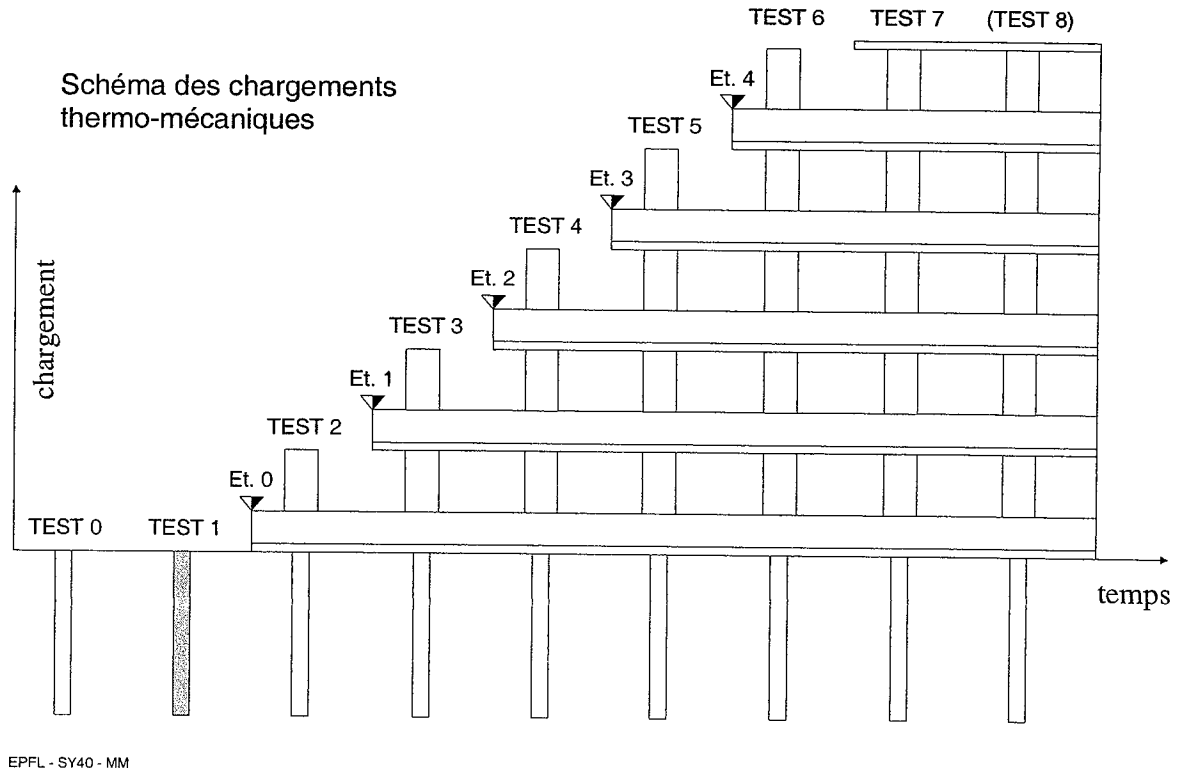


Figure A3.1 : Etat de la construction lors du Test 1.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Jeudi 14 mai 98	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement
Mardi 19 mai 98 12:30	Enclenchement pompe de circulation et chauffage (3 kW)	Chauffage
Mardi 19 mai 98 14:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Mardi 19 mai 98 18:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Mercr. 20 mai 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Mercr. 20 mai 98 14:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Vendr. 22 mai 98 18:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Lundi 25 mai 98 09:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Lundi 25 mai 98 11:20	Chauffage électrique augmenté de 6 à 9 kW	Chauffage
Lundi 25 mai 98 17:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Mardi 26 mai 98 11:20	Thermostat réglé pour limiter la température du fluide caloporteur	Chauffage
Mardi 26 mai 98 15:25	Chauffage arrêté, pompe de circulation enclenchée	Refroidissement passif
Mardi 26 mai 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 27 mai 98 09:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 28 mai 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 28 mai 98 11:30	Pompe arrêtée, circulation avec l'eau froide du réseau	Refroidissement actif
Vendr. 29 mai 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mardi 2 juin 98 17:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mardi 9 juin 98 09:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mardi 9 juin 98 11:30	Eau arrêtée et module de chauffage enlevé	Refroidissement passif

Table A3.1 : Déroulement chronologique du Test 1

A3.2 Etapes de construction lors du Test 2

Ce test a été effectué une fois le radier, le mur-colonne et le parapet du rez-de-chaussée bétonnés (figure A3.2, zone grise). Le déroulement du test est résumé dans la table A2.1. La phase de chauffage a duré 5 jours et la phase de refroidissement a été suivie sur 3 jours. Le pieu a été soumis à une sollicitation thermique $\Delta T=14^{\circ}\text{C}$. Une certaine rigidité est introduite par le radier et le parapet qui bloquent partiellement le déplacement vers le haut quand le pieu est chauffé. Les mesures relatives au module de chauffage ne sont pas automatisées. Les températures du fluide à l'entrée et à la sortie du pieu sont lues sur deux thermomètres.

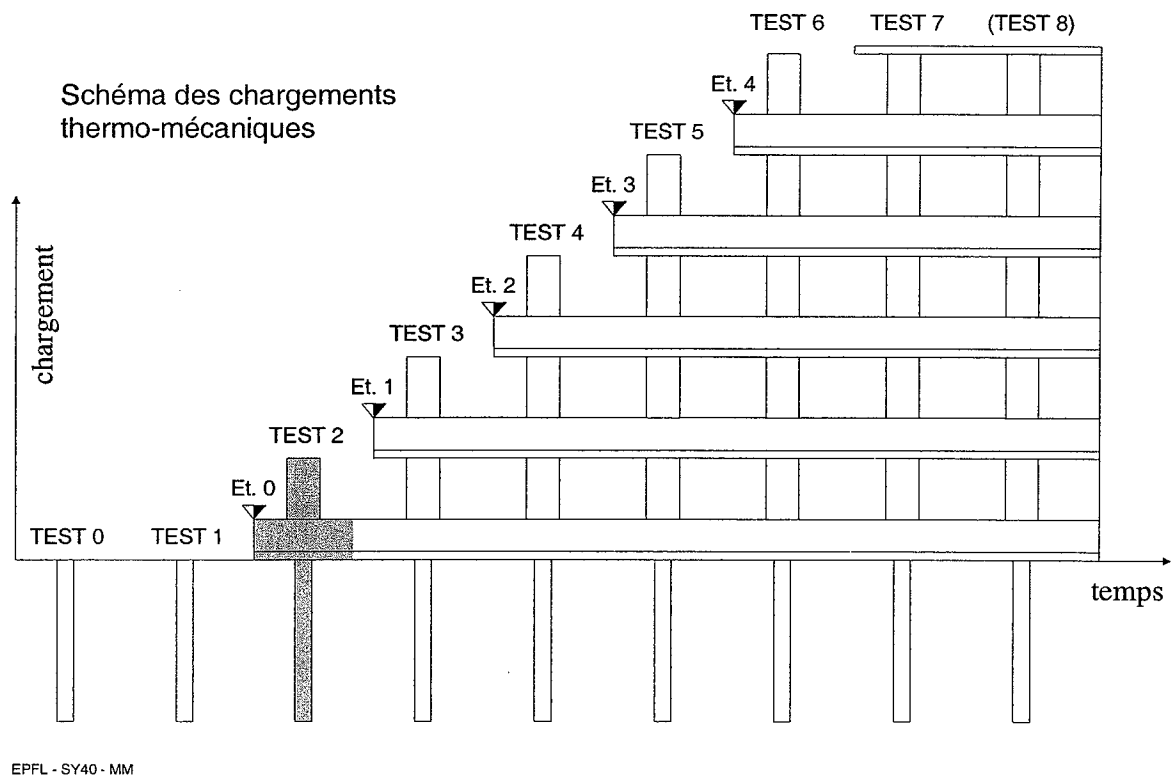


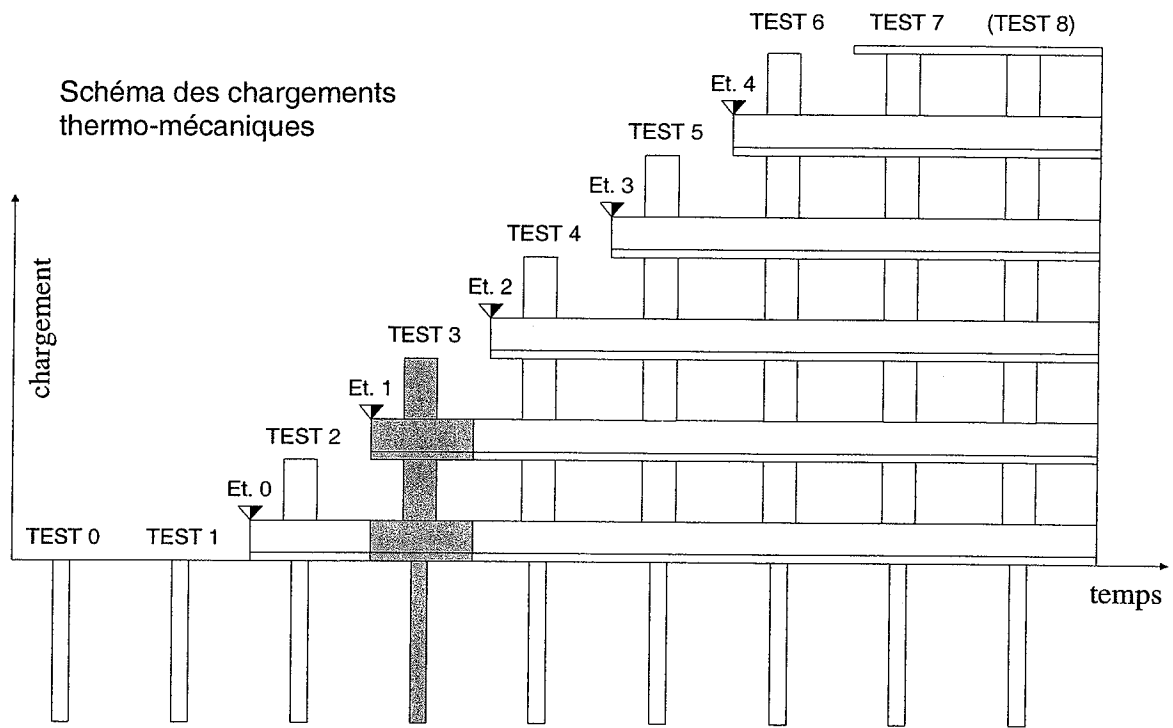
Figure A3.2: Etat de la construction lors du Test 2.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Jeudi 30 juill. 98 11:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Jeudi 30 juill. 98 14:30	Enclenchement pompe de circulation	
Vend. 31 juill. 98 13:40	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage
Lundi 3 août 98 08:12	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Lundi 3 août 98 12:16	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Lundi 3 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mardi 4 août 98 08:49	Chauffage arrêté	Refroidissement passif
Mardi 4 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 5 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 5 août 98 10:55	Pompe arrêtée, circulation avec l'eau froide du réseau	Refroidissement actif
Jeudi 6 août 98 17:15	Eau froide débranchée, circulation en circuit fermé avec la pompe (sans chauffage)	Refroidissement passif
Vend. 7 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Vend. 7 août 98 16:30	Pompe arrêtée, fin des mesures relatives au module de chauffage	
Lundi 10 août 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	

Table A3.2 : Déroulement chronologique du Test 2.

A3.3 Etapes de construction lors du Test 3

Le test 3 commence lorsque la dalle du premier étage est coulée. Sur le pieu agissent donc le poids du radier, des murs-colonne et de la dalle du premier étage (figure A3.3, zone grise). Le déroulement du test est résumé dans la table A3.3. La phase de chauffage a duré 4 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 7 jours. Le pieu a été soumis à une sollicitation thermique $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$. Le test s'est déroulé sans aucun problème.



EPFL - SY40 - MM

Figure A3.3 : Etat de la construction lors du test 3.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Vendr. 14 août 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	
Mercr. 26 août 98 15:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	
Mercr. 2 sept. 98 17:40	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	
Jeudi 3 sept. 98 12:00	Enclenchement pompe de circulation	
Jeudi 3 sept. 98 18:05	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage
Vendr. 4 sept. 98 17:45	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Vendr. 4 sept. 98 18:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 4 sept. 98 21:40	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Lundi 7 sept. 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 7 sept. 98 09:20	Chauffage arrêté	Refroidissement passif
Mardi 8 sept. 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 9 sept. 98 09:15	Pompe arrêtée, circulation avec l'eau froide du réseau	Refroidissement actif
Mercr. 9 sept. 98 14:30	Robinet d'eau fermé (par inconnu)	Refroidissement passif
Mercr. 9 sept. 98 16:30	Robinet d'eau ouvert	Refroidissement actif
Mercr. 9 sept. 98 17:20	Eau froide coupée pour la nuit	Refroidissement passif
Jeudi 10 sept. 98 07:10	Eau froide rétablie (l'eau ne sera pas coupée la nuit du 10 au 11 septembre)	Refroidissement actif
Jeudi 10 sept. 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement actif
Vendr. 11 sept. 98 17:20	Eau froide coupée pour le week-end	Refroidissement passif
Lundi 14 sept. 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 14 sept. 98 08:15	Eau froide débranchée, circulation en circuit fermé avec la pompe (sans chauffage)	Refroidissement passif
Lundi 14 sept. 98 14:15	Pompe arrêtée, fin des mesures relatives au module de chauffage	
Mardi 22 sept 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	

Table A3.3 : Déroulement chronologique du test 3.

A3.4 Etapes de construction lors du Test 4

Ce test débute le 1^{er} octobre date à laquelle la dalle du deuxième étage du bâtiment polyvalent du Quartier Nord de l'EPFL est coulée (figure A4.1, zone grise). Le déroulement du test est résumé dans la table A3.4. La phase de chauffage a duré 7 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 13 jours. La phase de chauffage a duré 2 jours de plus que nécessaire (jusqu'au 8 octobre), en raison d'un oubli des mesures des capteurs du pieu le mardi 6 octobre en fin d'après midi. Pendant ce quatrième test, le pieu est soumis à une sollicitation thermique $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$. Le test s'est déroulé sans aucun problème.

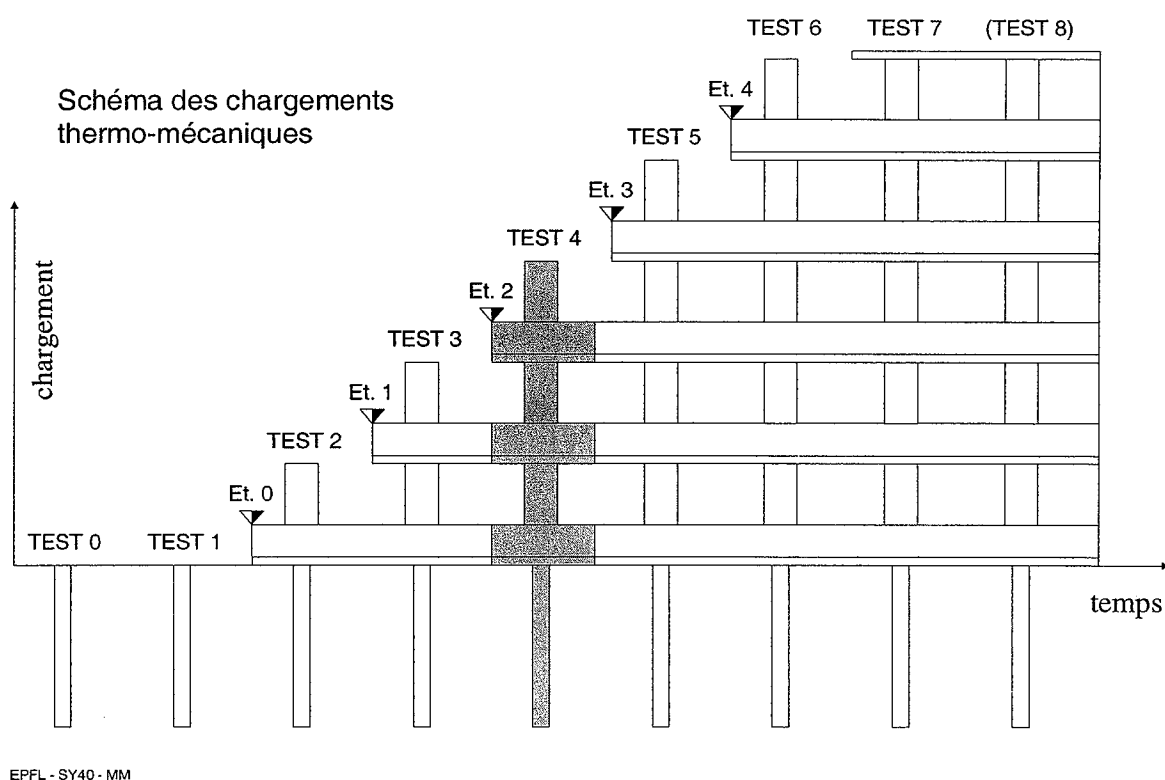


Figure A3.4 : Etape de construction lors du Test 4.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Jeudi 1 oct. 98 17:00	Enclenchement pompe de circulation	
Jeudi 1 oct. 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAR et fibres optiques	
Jeudi 1 oct. 98 18:10	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Vendr. 2 oct. 98 17:15	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Vendr. 2 oct. 98 18:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 2 oct. 98 21:15	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Lundi 5 oct. 98 16:25	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Lundi 5 oct. 98 17:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 5 oct. 98 18:15	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Mardi 6 oct. 98 09:00	Chauffage augmenté de 6 à 9 kW	Chauffage
Mardi 6 oct. 98 16:15	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Mercr. 7 oct. 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 7 oct. 98 11:15	Chauffage rétabli à 9 kW	Chauffage
Jeudi 8 oct. 98 07:05	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Jeudi 8 oct. 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 8 oct. 98 08:45	Pompe arrêtée, circulation avec l'eau froide du réseau	Refroidissement actif
Jeudi 8 oct. 98 16:15	Robinet d'eau fermé (par inconnu)	Refroidissement passif
Jeudi 8 oct. 98 17:05	Robinet d'eau ouvert (l'eau ne sera pas coupée la nuit du 8 au 9 octobre)	Refroidissement actif
Vendr. 9 oct. 98 16:15	Eau froide débranchée, circulation en circuit fermé avec la pompe (sans chauffage)	Refroidissement passif
Vendr. 9 oct. 98 16:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 12 oct. 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 15 oct. 98 16:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 21 oct. 98 15:35	Pompe arrêtée, fin des mesures relatives au module de chauffage	
Jeudi 22 oct. 98 17:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	

Table A3.4 Déroulement chronologique du Test 4.

A3.5 Etapes de construction lors du Test 5

La dalle, le parapet et les murs-colonne du troisième étage sont bétonnés lors de l'exécution du Test 5 (figure A3.5, zone grise). Il reste encore un étage et le toit à construire. La table A5.2 donne le déroulement chronologique du test 5. Le déroulement du test est résumé dans la table A3.5. La phase de chauffage a duré 5 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 10 jours. L'heure d'été est conservée tout au long du test. A partir du dimanche 25 octobre, les heures indiquées sont en avance d'une heure relativement à l'heure d'hiver. La sollicitation thermique est de $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$. Le test s'est déroulé sans aucun problème.

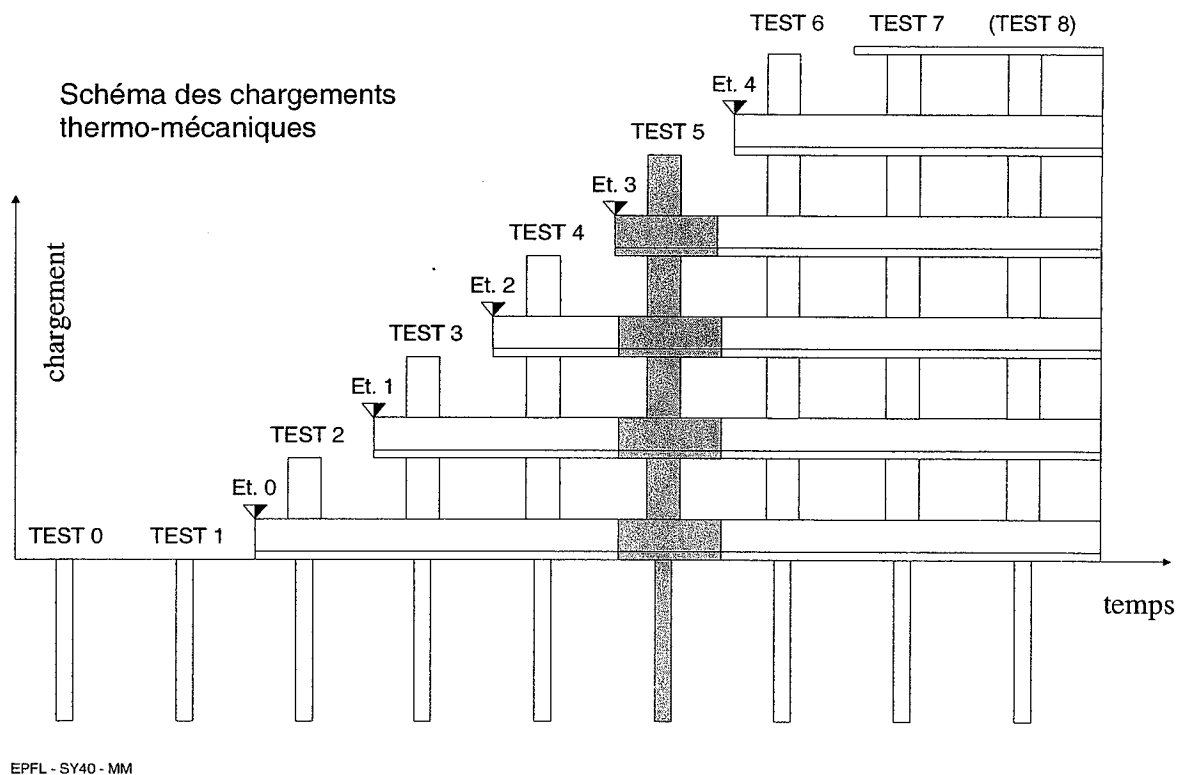


Figure A3.5 : Etat de la construction lors du Test 5.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Jeu. 22 oct. 98 11:30	Enclenchement pompe de circulation	
Jeu. 22 oct. 98 17:20	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	
Jeu. 22 oct. 98 18:20	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage
Vend. 23 oct. 98 16:20	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif

Vendr. 23 oct. 98	17:50	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 23 oct. 98	18:50	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Lundi 26 oct. 98	08:10	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Lundi 26 oct. 98	09:15	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 26 oct. 98	10:00	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Mardi 27 oct. 98	9:50	Chauffage augmenté de 6 à 9 kW	Chauffage
Mardi 27 oct. 98	17:00	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Mardi 27 oct. 98	18:50	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 28 oct. 98	10:30	Pompe arrêtée, circulation avec l'eau froide du réseau (eau pas coupée jusqu'au 30 oct.)	Refroidissement actif
Jeudi 29 oct. 98	17:45	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement actif
Vendr. 30 oct. 98	17:50	Eau froide débranchée, circulation en circuit fermé avec la pompe (sans chauffage)	Refroidissement passif
Lundi 2 nov. 98	10:45	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 5 oct. 98	16:15	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 6 nov. 98	9:40	Pompe arrêtée, fin des mesures relatives au module de chauffage	

Table A3.5: Déroulement chronologique du Test 5.

A3.6 Etapes de construction lors du Test 6

Le dernier étage est construit lors de l'exécution du Test 6 (Figure A3.6, zone grise), seulement le toit doit être encore construit. Le pieu est soumis à une sollicitation thermique $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$. Le test s'est déroulé sans aucun problème, la phase de chauffage a duré 5 jours et le suivi de la phase de refroidissement 14 jours.

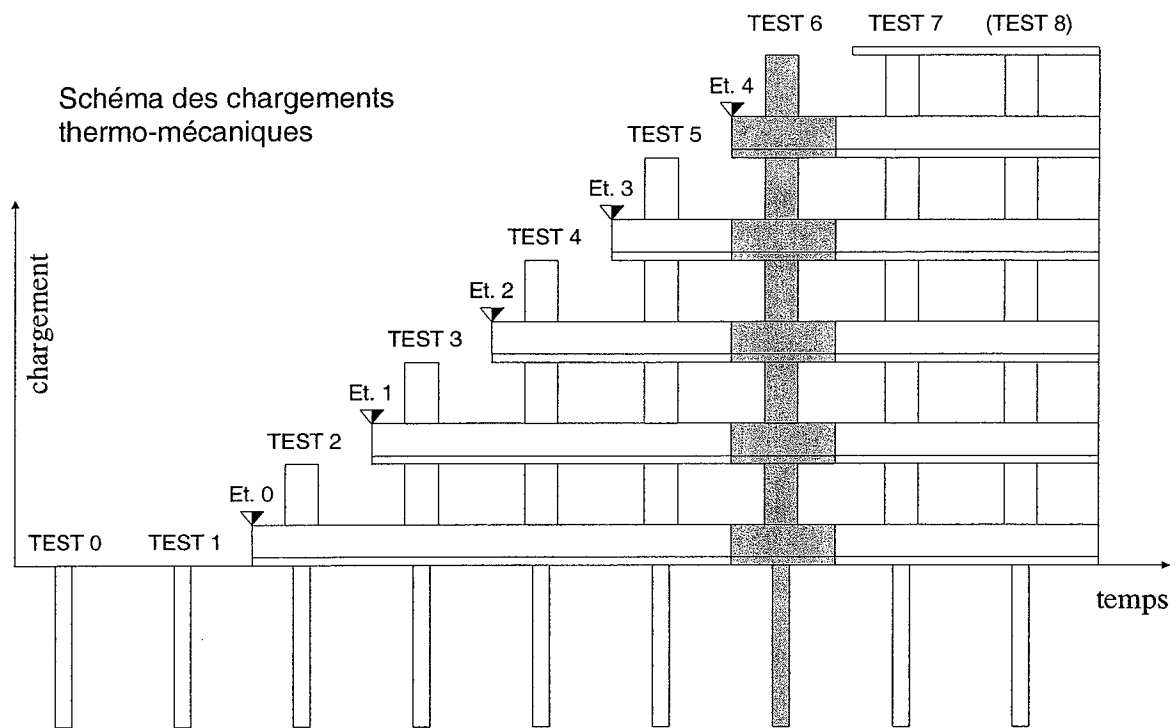
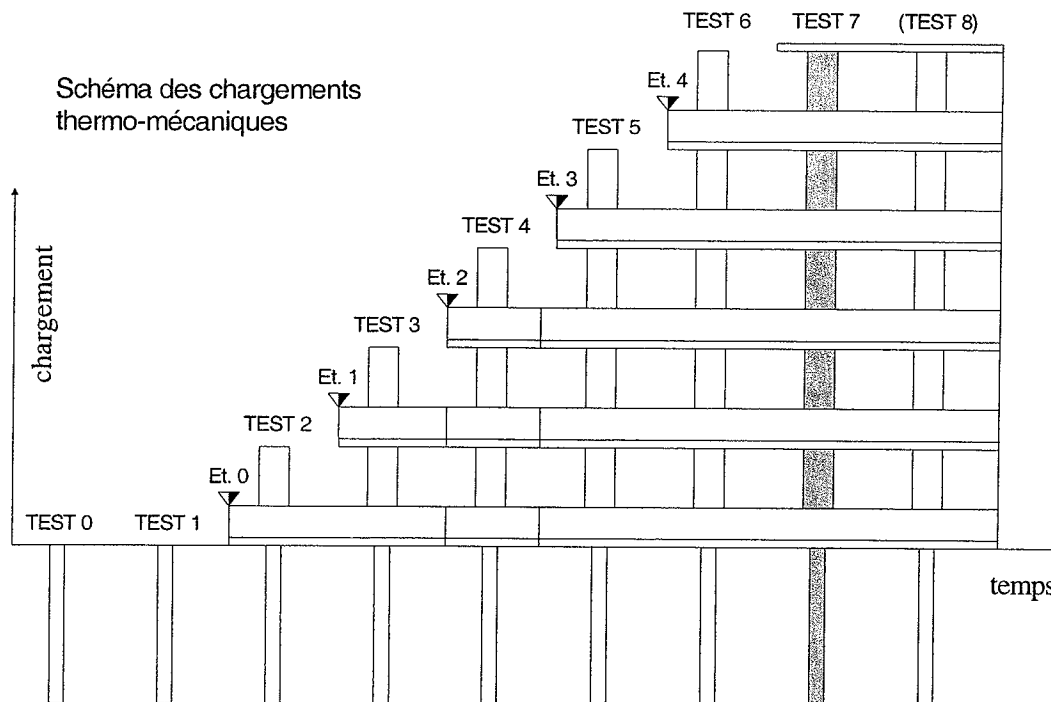


Figure A3.6 : Etat de la construction lors du Test 6.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Lundi 16 nov. 98 09:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Mardi 17 nov. 98 12:30	Enclenchement pompe de circulation	
Mercr. 18 nov. 98 16:50	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage
Jeudi. 19 nov. 98 08:50	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Jeudi 19 nov. 98 10:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 19 nov. 98 11:00	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Vendr. 20 nov. 98 15:10	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Vendr. 20 nov. 98 16:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 20 nov. 98 16:40	Chauffage rétabli à 6 kW	Chauffage
Lundi 23 nov. 98 07:20	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif



EPFL - SY40 - MM

Lundi 23 nov. 98	08:30	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 23 nov. 98	09:00	Chauffage rétabli à 9 kW	Chauffage
Lundi 23 nov. 98	16:00	Chauffage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Lundi 23 nov. 98	17:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercr. 24 nov. 98	16:30	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 30 nov. 98	10:00	Mesures capteurs TELEMAT et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 7 déc. 98	11:00	Fin des mesures relatives au module de chauffage. La pompe reste enclenchée.	

Table A3.6: Déroulement chronologique du Test 6.

A3.7 Etapes de construction lors du Test 7

Le toit du dernier étage est construit lors de l'exécution du test 7 (Figure A3.7, zone grise). Le bâtiment n'est pas encore occupé. Le déroulement du test est résumé dans la table A3.7. La phase de chauffage a duré 22 jours avec une puissance de chauffage réduite mais continue, de manière à se mettre dans les conditions d'un test de réponse. La phase de refroidissement a été suivie pendant 11 jours.

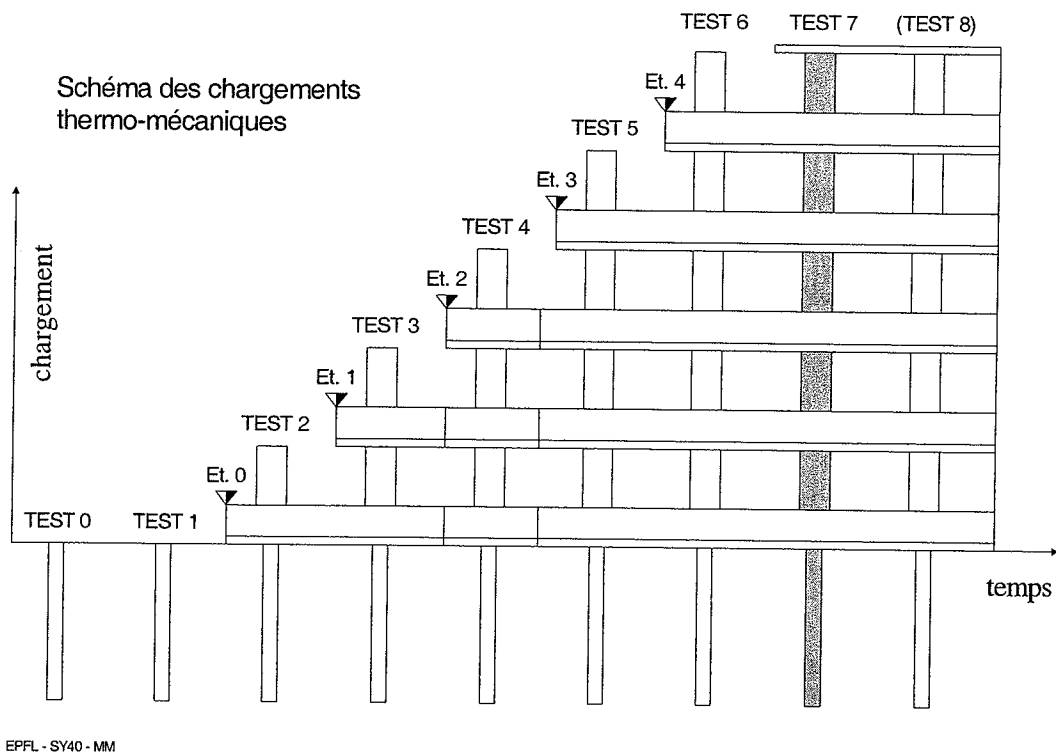


Figure A3.7 : Etat de la construction lors du test 7.

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Jeudi 21 janv. 99 9:50	Début des mesures relatives au module de chauffage. La pompe est déjà enclenchée.	Chauffage
Janvier 99	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Mercr. 3 féb. 99 18:10	Enclenchement chauffage électrique, 3 kW	Refroidissement passif
Jeudi. 25 fév. 99 13:20	Chauffage arrêté	
février 99	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 8 mars 99 14:00	Fin des mesures relatives au module de chauffage. La pompe reste enclenchée.	

Table A3.7: Déroulement chronologique du test 7.

ANNEXE 4 : CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES SOLS

OFFICE FEDERAL
DE L'ENERGIE
3003 BERNE

N/réf. GG/gg/ Etude No SY40

Lausanne, le mardi 23 juin 1998

PIEUX THERMIQUES

Messieurs,

Le 1^{er} avril 1998, vous nous avez remis sept échantillons en vrac concernant l'étude citée en référence afin que nous déterminions leur nature, leur courbe granulométrique et leurs limites d'Atterberg. De plus, la résistance au cisaillement triaxial au moyen de notre nouveau système GDS et la compressibilité à l'oedomètre avec trois températures différentes ont été déterminées sur trois de ces échantillons. Le détail de la procédure d'essai a été décidé d'un commun accord entre M. Lyesse Laloui et le personnel de notre laboratoire.

Identification

Le poids volumique des particules solides a été déterminé sur trois échantillons. Les résultats de ces essais sont donnés dans le tableau ci-dessous:

<i>Echantillon</i>				<i>Identification</i>
<i>N°</i>	<i>Profondeur (m)</i>	<i>Sondage No</i>	<i>Type d'échantillon reçu</i>	<i>Masse volumique des grains ρ_s [$t \cdot m^{-3}$]</i>
1	12.0	1	En vrac	2.769
2	16.0	1	En vrac	2.735
4	22.0	1	En vrac	2.743

Granulométrie

Les dessins No : SY40/1 à 7 donnent la courbe granulométrique complète des six échantillons analysés, ainsi que leurs limites de consistance et leur classification selon la méthode U.S.C.S. avec l'ancienne et la nouvelle norme SN 670'008.

Compressibilité

Les dessins No : SY40/8 à 10 donnent les résultats complets des trois essais de compressibilité exécutés à l'appareil oedométrique avec une température ambiante de 20° Celsius, effectués sur des échantillons carottés à l'aide d'une bague tranchante.

Résistance au cisaillement triaxial à l'appareil GDS

Les dessins No : SY40/11 à 13, A à D donnent les résultats complets des trois essais de rupture à l'appareil triaxial GDS exécutés sur trois échantillons confectionnés à la teneur en eau et à la densité apparente en place. Pour se faire les éprouvettes ont été préparées dans un tube de diamètre 50 mm., puis consolidés de manière isotrope puis cisailés jusqu'à la rupture en non drainé mais avec mesure de la pression interstitielle pour deux d'entre eux et en drainé pour le troisième.

Nous restons à votre disposition pour tout renseignement complémentaire et vous prions d'agréer, Messieurs, l'expression de nos sentiments distingués.

L'Ingénieur chargé de l'étude :



G. Gruaz

Annexes mentionnées + facture N° 0112/

Protocoles des résultats d'essais

No étude : SY40
Titre de l'étude : Pieux thermiques
Commettant : BCF - EPFL ET OFEN BERNE
Annexe(s) à notre lettre du : 23 juin 1998
Selon votre commande du : 26 mars 1998

Protocoles annexés :

No éprouvette	Essai	Nbre pages du protocole
SY40- 01	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 02	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 03	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 04	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 05	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 06	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 07	Essai de granulométrie complète avec limites d'Atterberg	1
SY40- 08	Essai de compressibilité à l'oedomètre à 20 °C	1
SY40- 09	Essai de compressibilité à l'oedomètre à 20 °C	1
SY40- 10	Essai de compressibilité à l'oedomètre à 20 °C	1
SY40- 11 -A à D	Essai de rupture à l'appareil triaxial GDS	4
SY40- 12 -A à D	Essai de rupture à l'appareil triaxial GDS	4
SY40- 13 -A à D	Essai de rupture à l'appareil triaxial GDS	4

Les protocoles annexés ne peuvent être reproduits *partiellement* qu'avec notre accord écrit. Dans les notes de calcul ou documents de dimensionnement, la provenance des paramètres géotechniques résultants des essais doit être signalée.

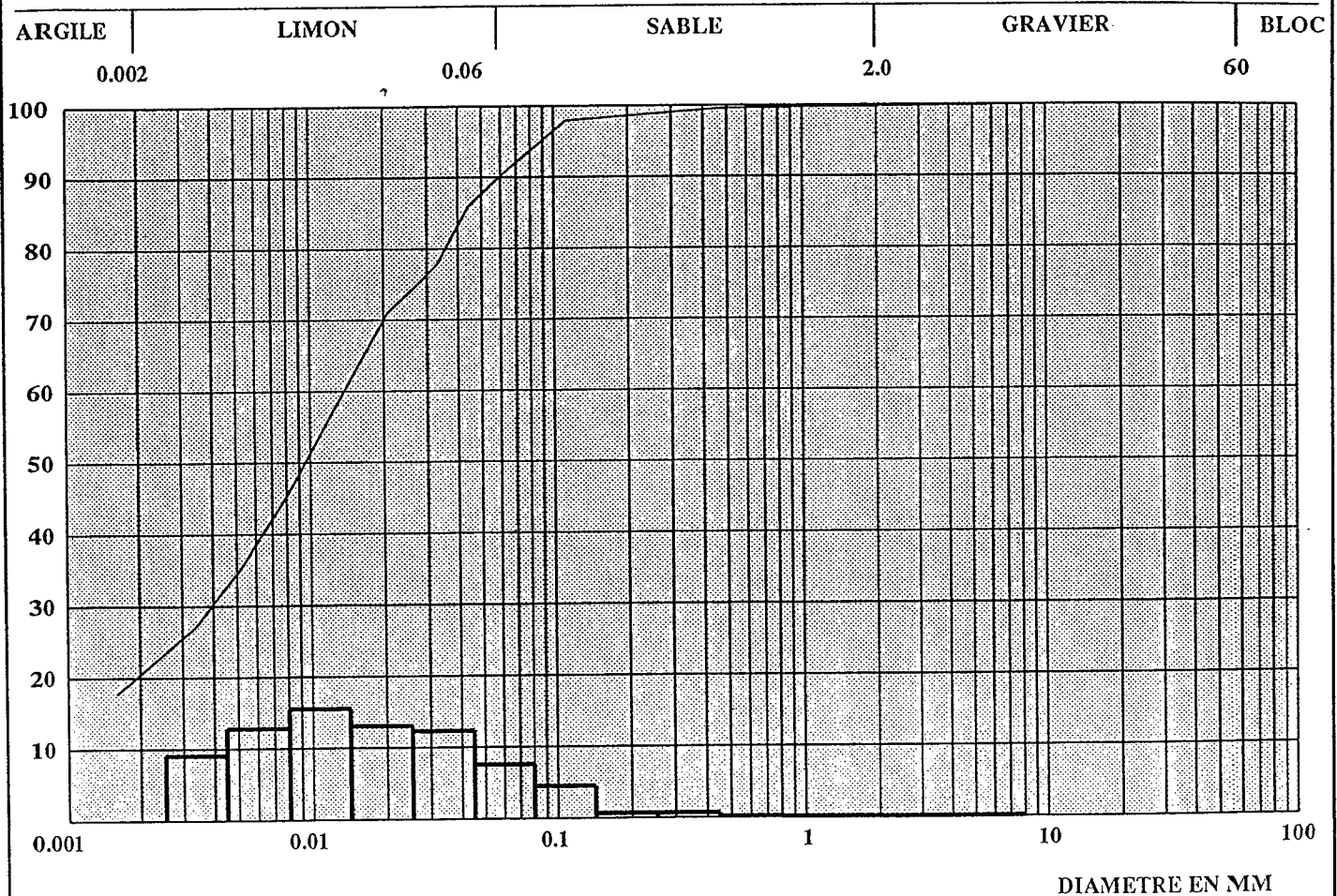
Le solde des échantillons que vous nous avez remis sera conservé six mois; après ce délai et à moins que cela n'ait été convenu autrement, il sera détruit.

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY40 -1 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN BERNE		
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	12.0	VRAC	S1-a		26.3.98	16/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE		L. LALOUI		X. R.		

Masse Tamisée [g]	Tamisat	Fréquence
669.2	—	□



USCS		W _L	I _p	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CM	31.6	15.1	69.7	0.000		

Observations :

6.3 Champs de déformation

Les champs thermiques appliqués au pieu, couplés au poids des étages du bâtiment, engendrent des déformations et des contraintes dans celui-ci. La mesure des déformations a été possible à l'aide des capteurs posés et fait l'objet de ce paragraphe. Celle des contraintes sera en partie présentée dans le paragraphe suivant (mesure de la pression).

6.3.1 Test 1

Pendant le Test 1, la déformation des fibres optiques et des capteurs TELEMAT C110, la température et la pression au fond du pieu ont été mesurés à 14 périodes: une mesure initiale le 14 mai 1998, 8 mesures en phase de chauffage et 5 en phase de refroidissement.

Tous les capteurs ont fonctionné normalement sauf le capteur TELEMAT (n°T33034) qui ne permet plus que la mesure de la température.

Des cinq capteurs à fibres optiques pour la mesure des déformations radiales seulement deux donnent des valeurs exploitables (FO 574 à 21m et FO 573 à 16m). Les trois autres capteurs donnent des valeurs difficilement exploitables.

La figure 47 représente les déformations le long du pieu pour différentes températures en phases de chauffage et refroidissement. On y note en particulier, que les intensités des dilatations thermiques sont étroitement liées aux couches géologiques. Ceci nous permet de limiter par la suite la présentation des résultats à quatre capteurs représentant chacune des couches.

Les figures 48 et 49 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAT et les fibres optiques.

On peut noter que pour une augmentation de la température, une déformation positive (donc allongement) est mesurée par tous les capteurs. Une très bonne concordance existe entre les champs thermiques et les déformations engendrées.

En outre, on constate que la valeur de la déformation après refroidissement (dernière mesure) ne revient pas à sa valeur initiale (avant chauffage). La cause de cette différence est principalement due au fait que la température à la fin de l'essai n'est pas la même que celle du début, le pieu ne s'étant pas refroidi complètement (figure 46).

La déformation thermique engendrée est de type thermo-élastique linéaire (figure 50).

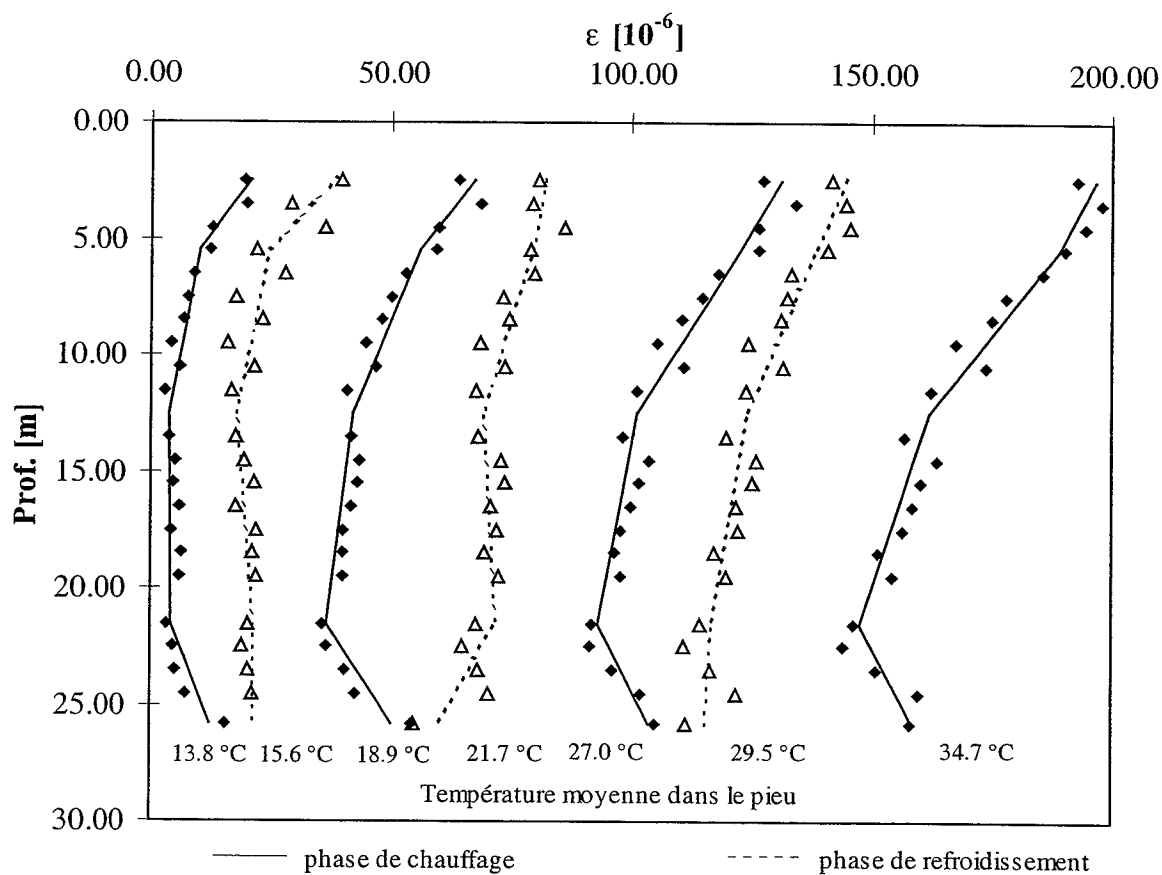


Figure 47 : Evolution des déformations en fonction de la température (Test 1).

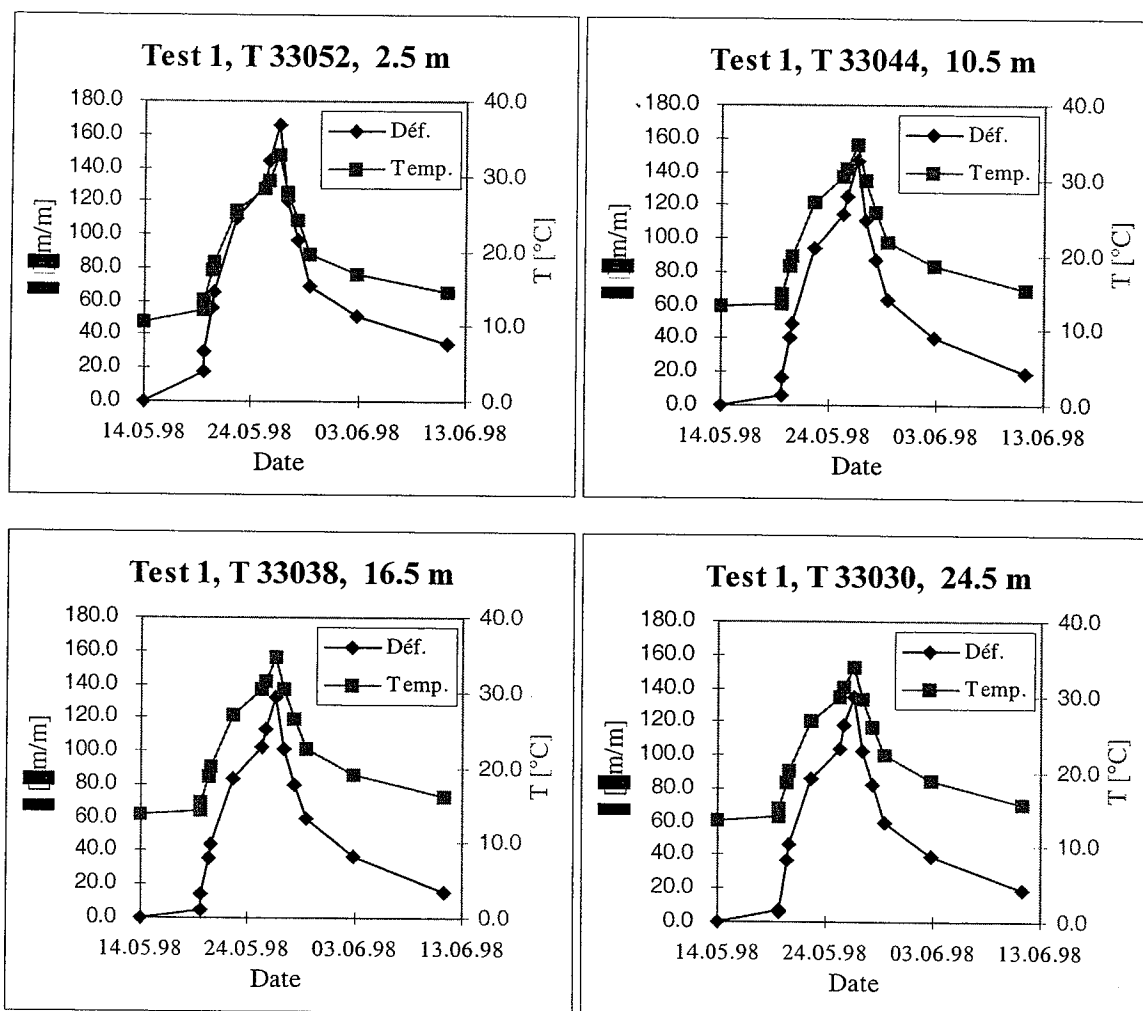


Figure 48 : Déformation et température en fonction du temps mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 1.

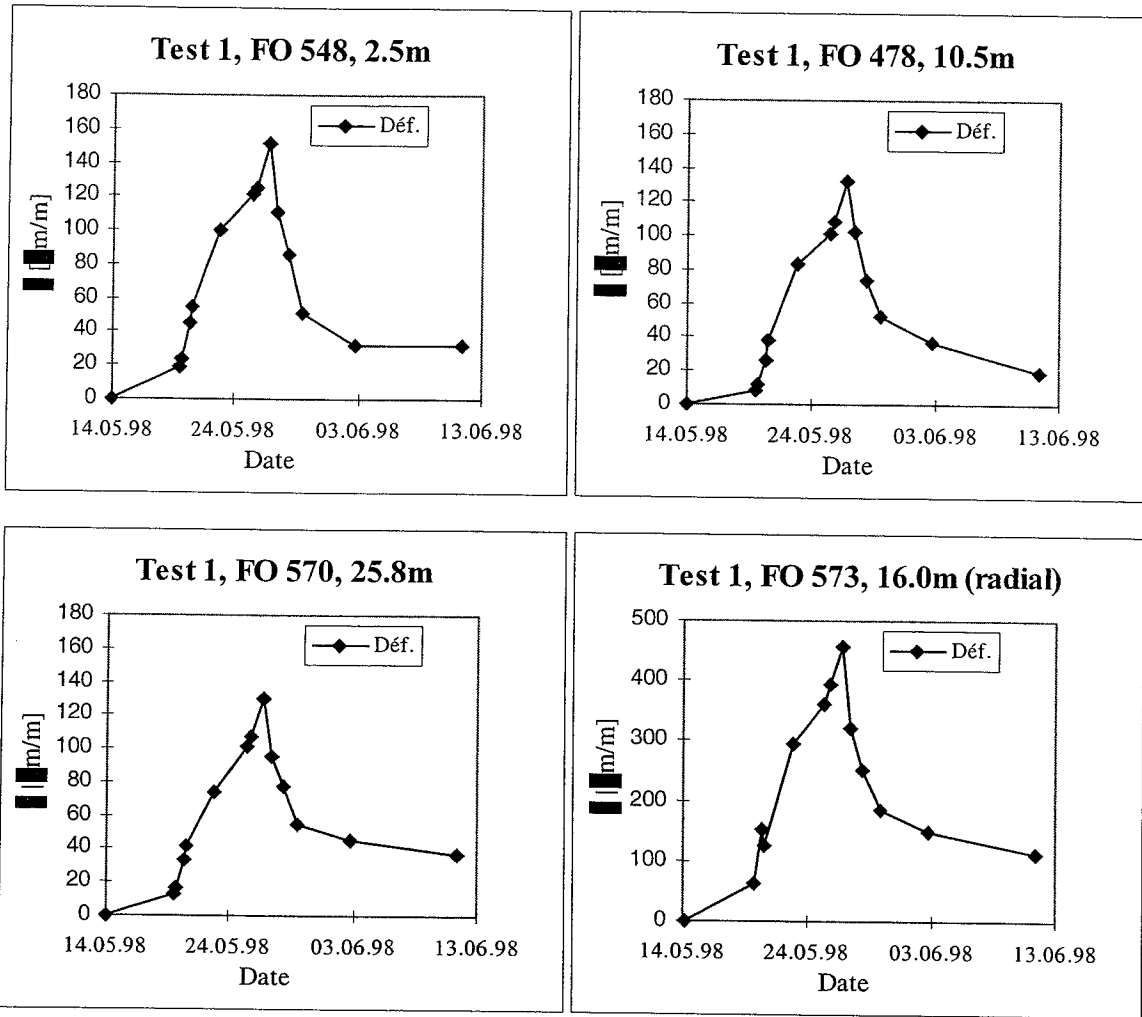


Figure 49 : Déformations mesurées par fibres optiques (FO 548, FO 478, FO 570, FO573) - Test 1.

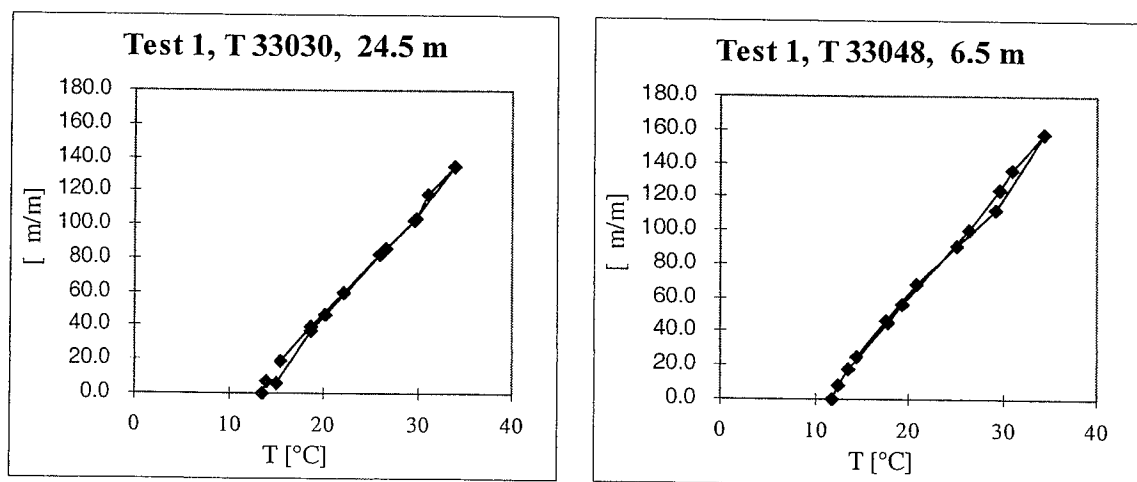


Figure 50 : Evolution de la dilatation thermique en phases de charge et décharge-Test 1.

6.3.2 Test 2

Tous les capteurs (TELEMAC, FO) ont bien fonctionné sauf le capteur T33034 qui ne permet pas de mesurer la déformation et les capteurs à fibres optiques FO 575, FO 572, FO 571 pour la mesure de la déformation radiale qui ne donnent pas des valeurs exploitables.

Les figures 51 et 52 représentent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques. Tous les capteurs donnent une déformation positive (allongement) lors de l'augmentations de la température.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure 53 où la déformation est dessinée en fonction de la température.

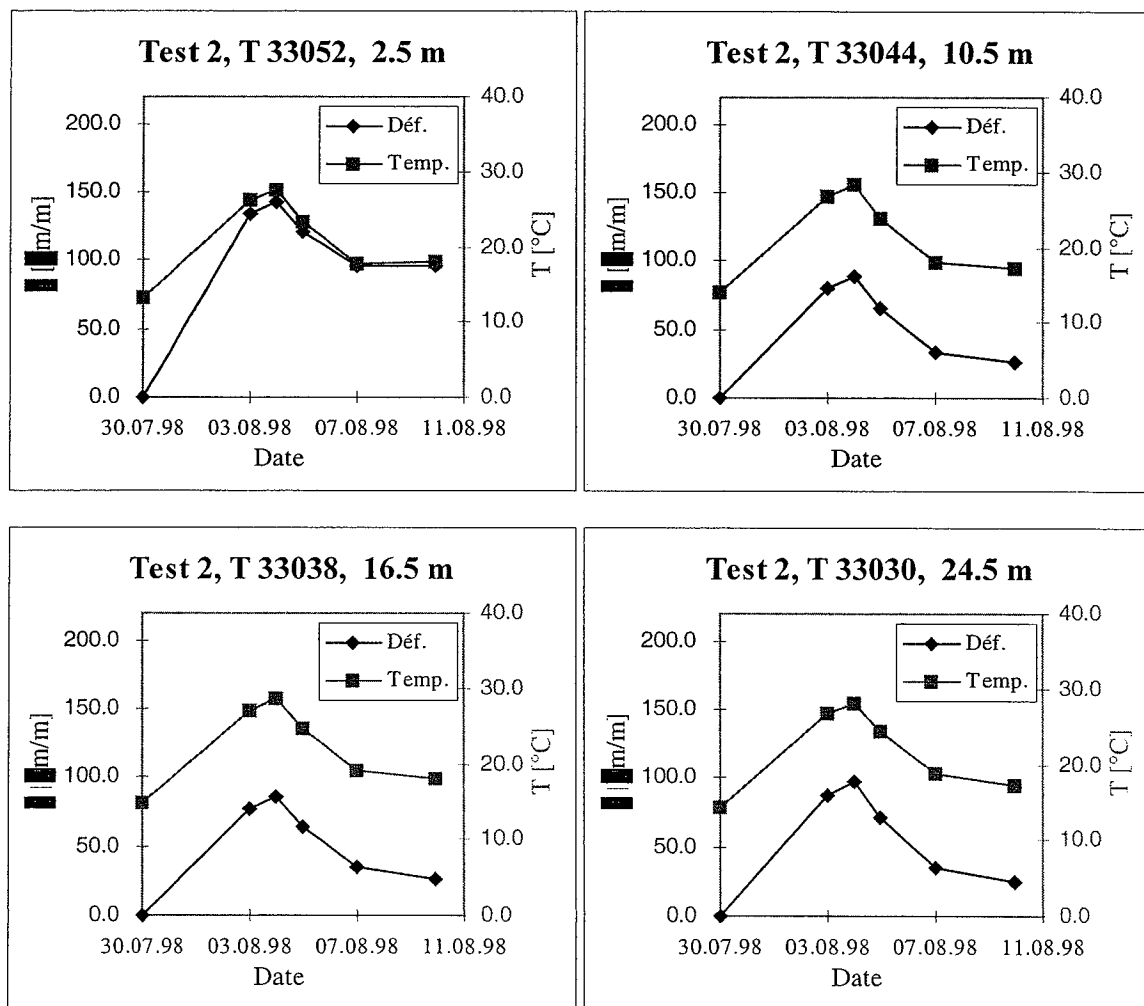


Figure 51 : Test 2 - Déformation et température en fonction du temps mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

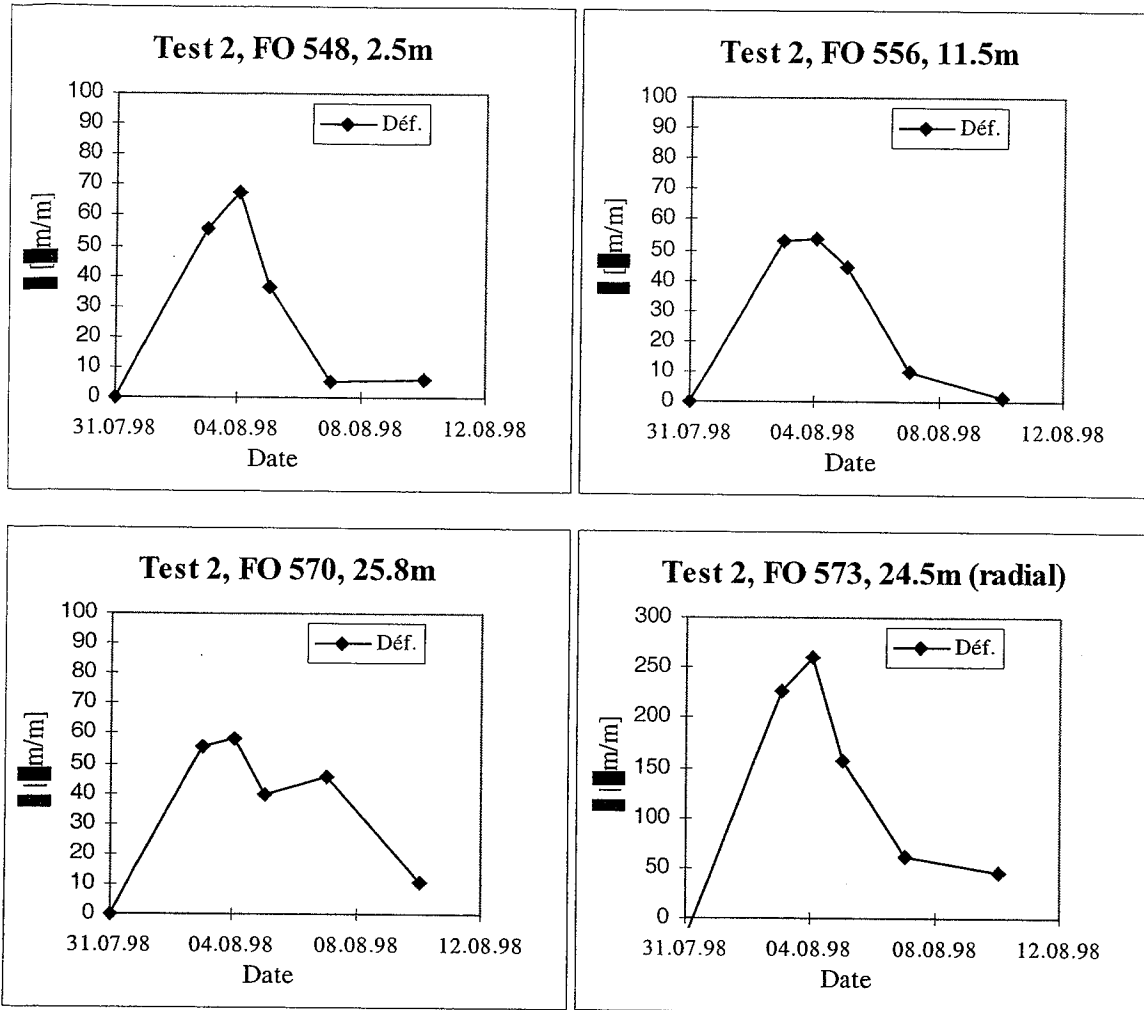


Figure 52: Test 2 - Déformations mesurées par fibres optiques (FO548, FO556, FO570, FO573).

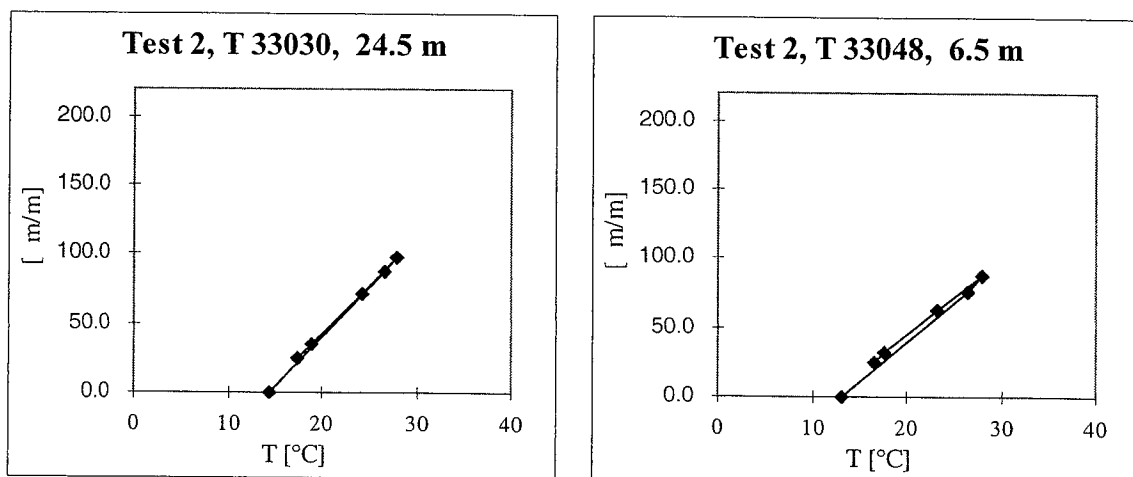


Figure 53: Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAT (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 2.

6.3.3 Test 3

L'ensemble des capteurs a été opérationnel à l'exception de :

- T 33034 qui permet seulement la mesure de la température et pas celle de la déformation.
- FO 575, 572, 571 qui ne donnent pas de résultats exploitables pour la mesure des déformations radiales.
- Du 14.8.98 au 2.10.98, le capteur T 33042 à 12.5 m de profondeur n'a pas permis la mesure de la température.

Les figures 54 et 55 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les capteurs TELEMAC et les fibres optiques. L'intensité maximale de la déformation thermique est inférieure à celle mesurée pendant le Test 1 du fait que la différence de température appliquée au pieu est plus faible (15°C contre 22°C dans le Test 1), en plus une partie de la déformation thermique est empêchée par la partie du bâtiment déjà construite.

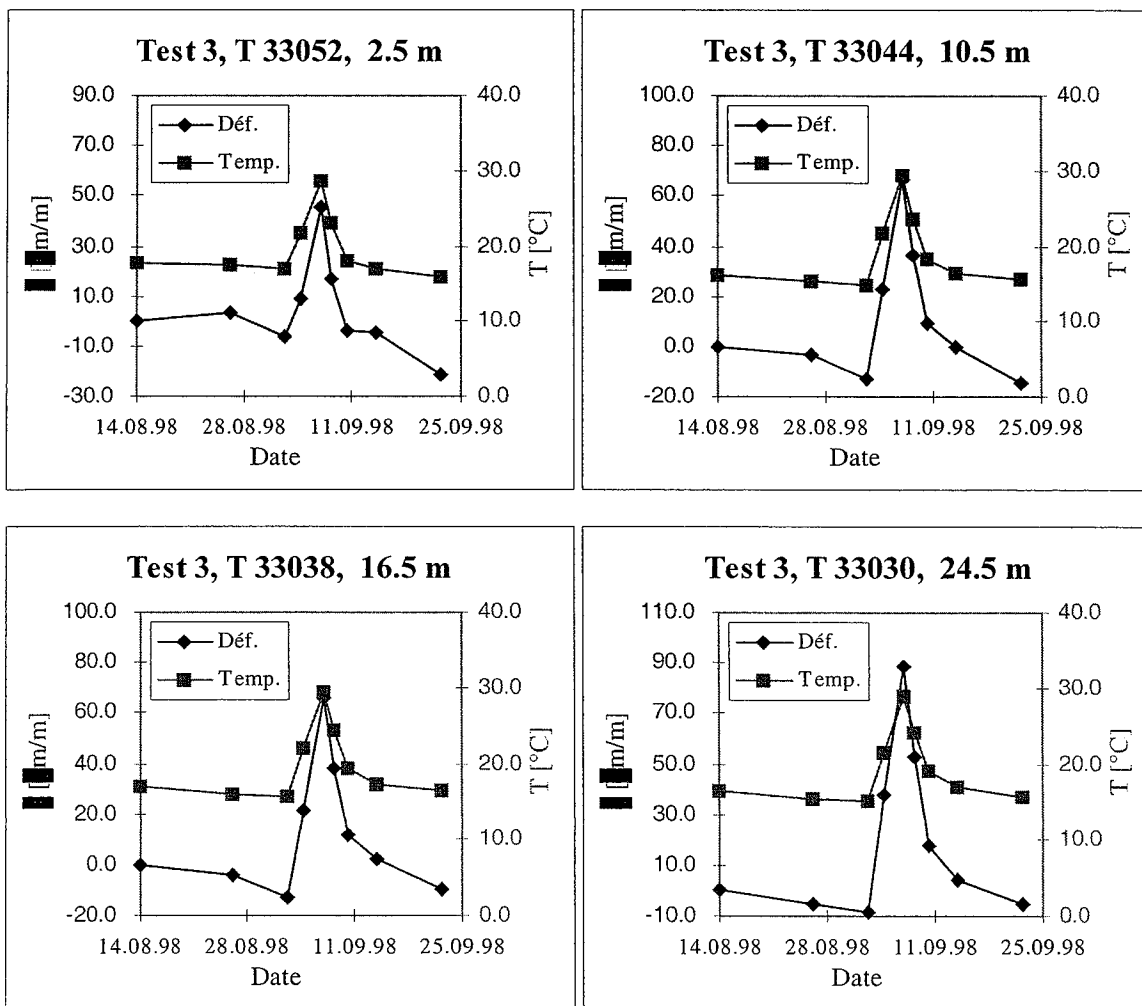


Figure 54 : Test 3 - Déformation et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

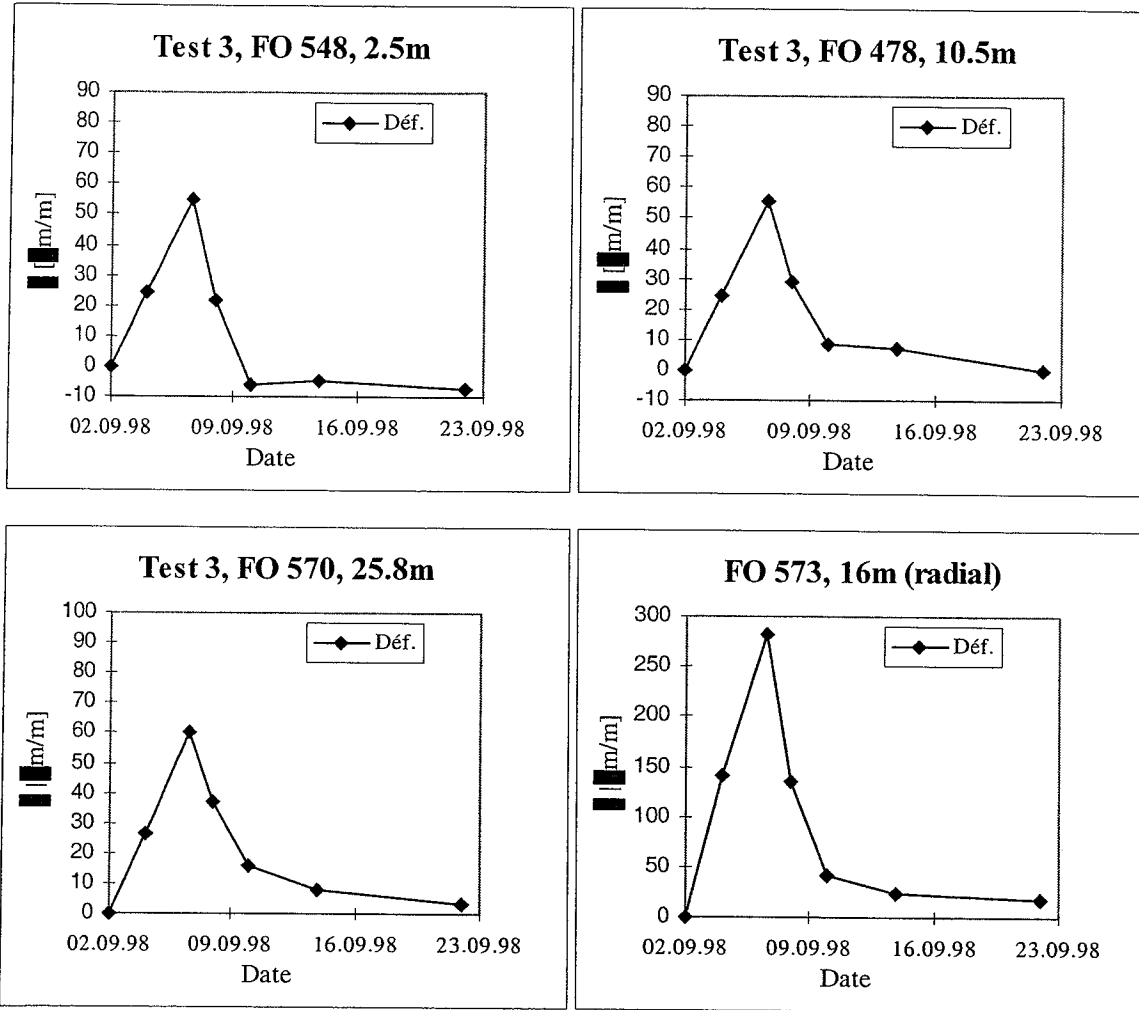


Figure 55 : Test 3 - Déformations mesurés par fibres optiques (FO548, FO478, FO570, FO573).

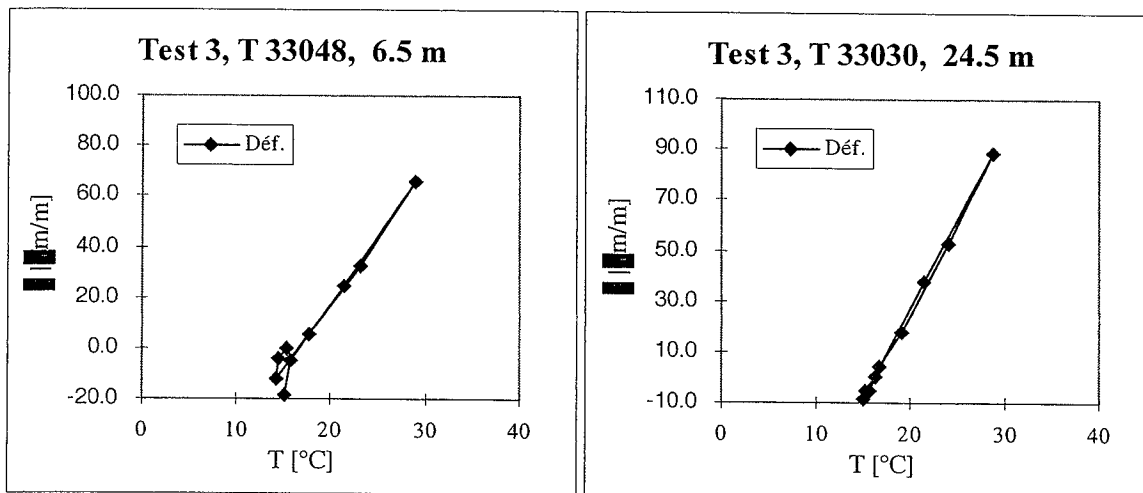


Figure 56 : Test 3 - Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAT (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m).

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure 56 où la déformation est dessinée en fonction de la température.

6.3.4 Test 4

Sur les 58 capteurs, seuls les capteurs suivants ont des problèmes :

- T33034 (à 20.5 m) permet seulement la mesure de la température.
- T33042 (à 12.5 m) ne fonctionne plus.
- FO 554 (à 8.5 m) à partir du 9.10.98 ne fonctionne plus correctement.
- FO 575, FO 572, FO 571: ne donnent pas des valeurs exploitables pour le calcul des déformations radiales.

Sur les graphiques des figures 57 et 58, on constate deux valeurs de pic de déformation et température (TELEMAC), la première le 5 octobre et l'autre le 8 octobre. En effet, le 7 octobre, quand il a été décidé d'arrêter le chauffage, les mesures de déformation, prévues le 6 octobre, n'ont pas pu être effectuées. Pour cette raison, il a été décidé de réchauffer le pieu encore 1 jour pour permettre cette dernière mesure.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure 59 où la déformation est dessinée en fonction de la température.

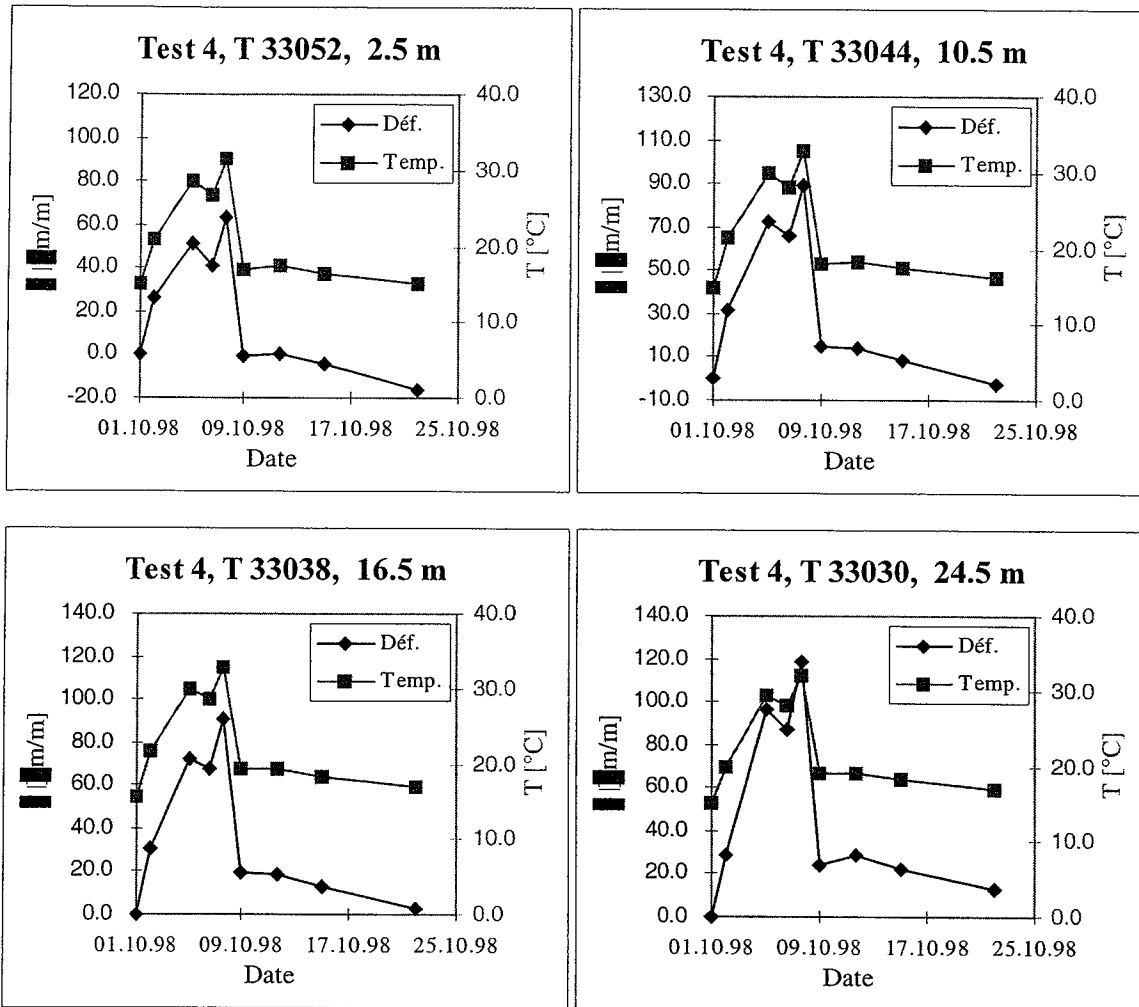


Figure 57 : Test 4 - Déformations et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAT (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

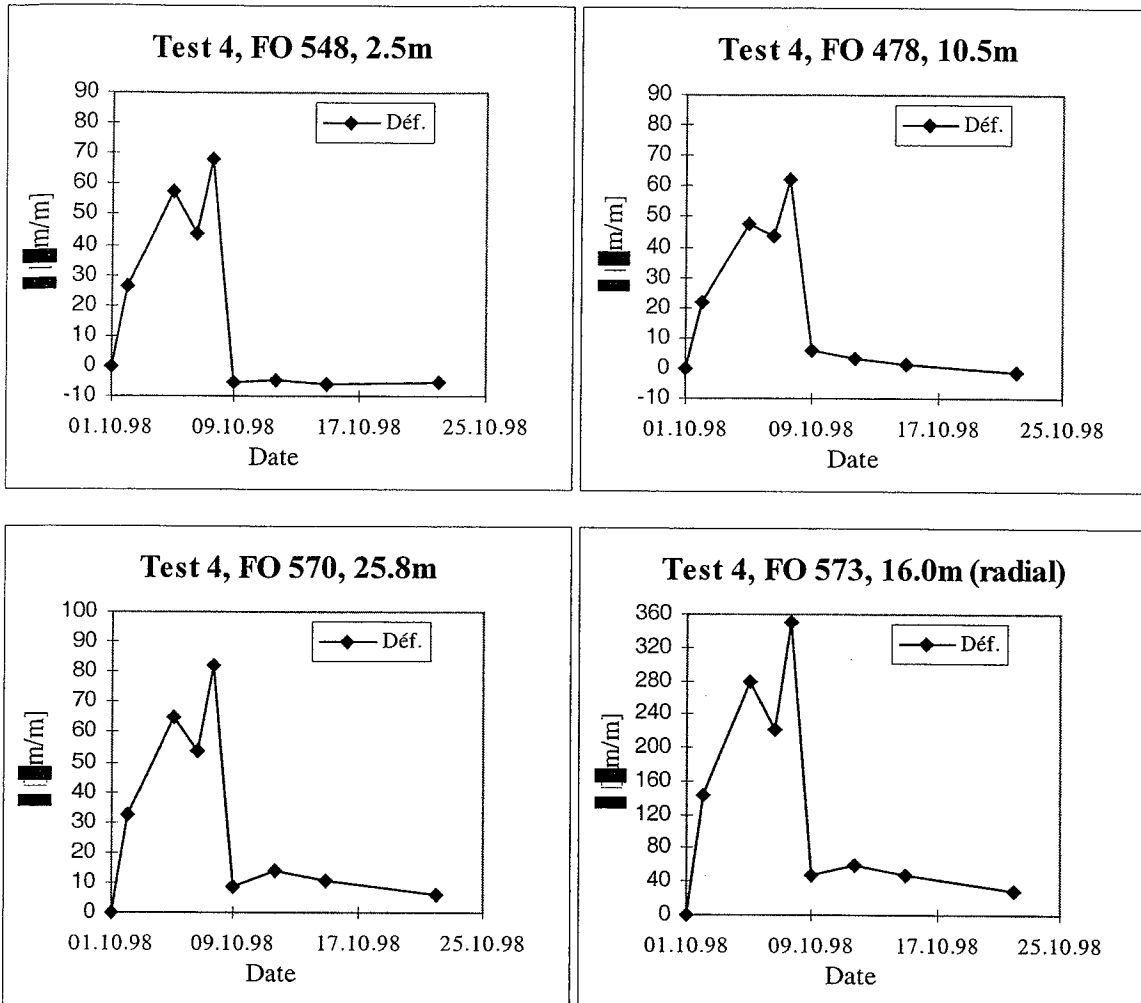


Figure 58 : Test 4 - Déformations mesurés par fibres optiques (FO548, FO478, FO 570, FO573).

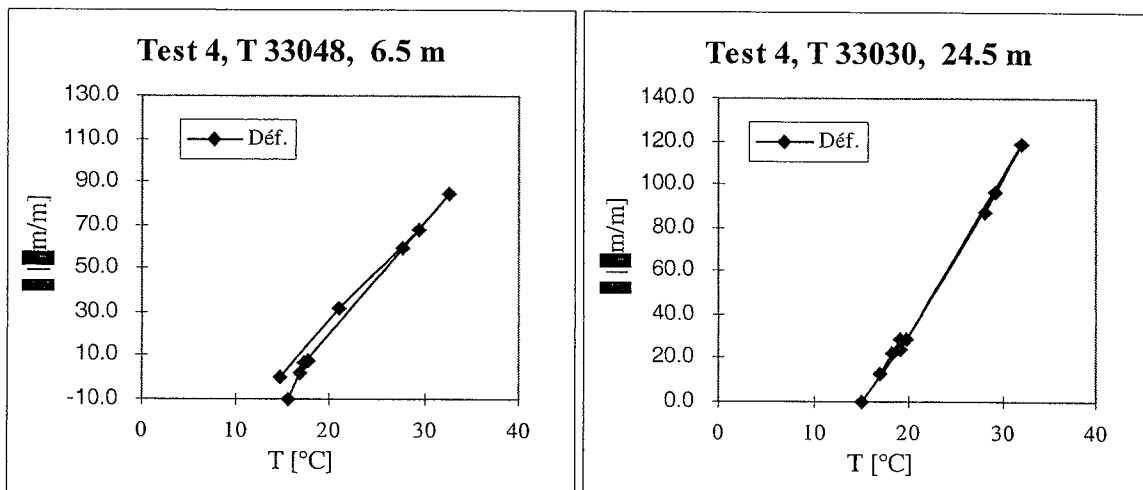


Figure 59 : Test 4 - Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAT (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m).

6.3.5 Test 5

En plus des capteurs défectueux au Test 4, le capteur FO 557 (à 12.5m) ne fonctionnent plus correctement. Les figures 60 et 61 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement reste réversible, comme le montre la figure 62 où la déformation est dessinée en fonction de la température.

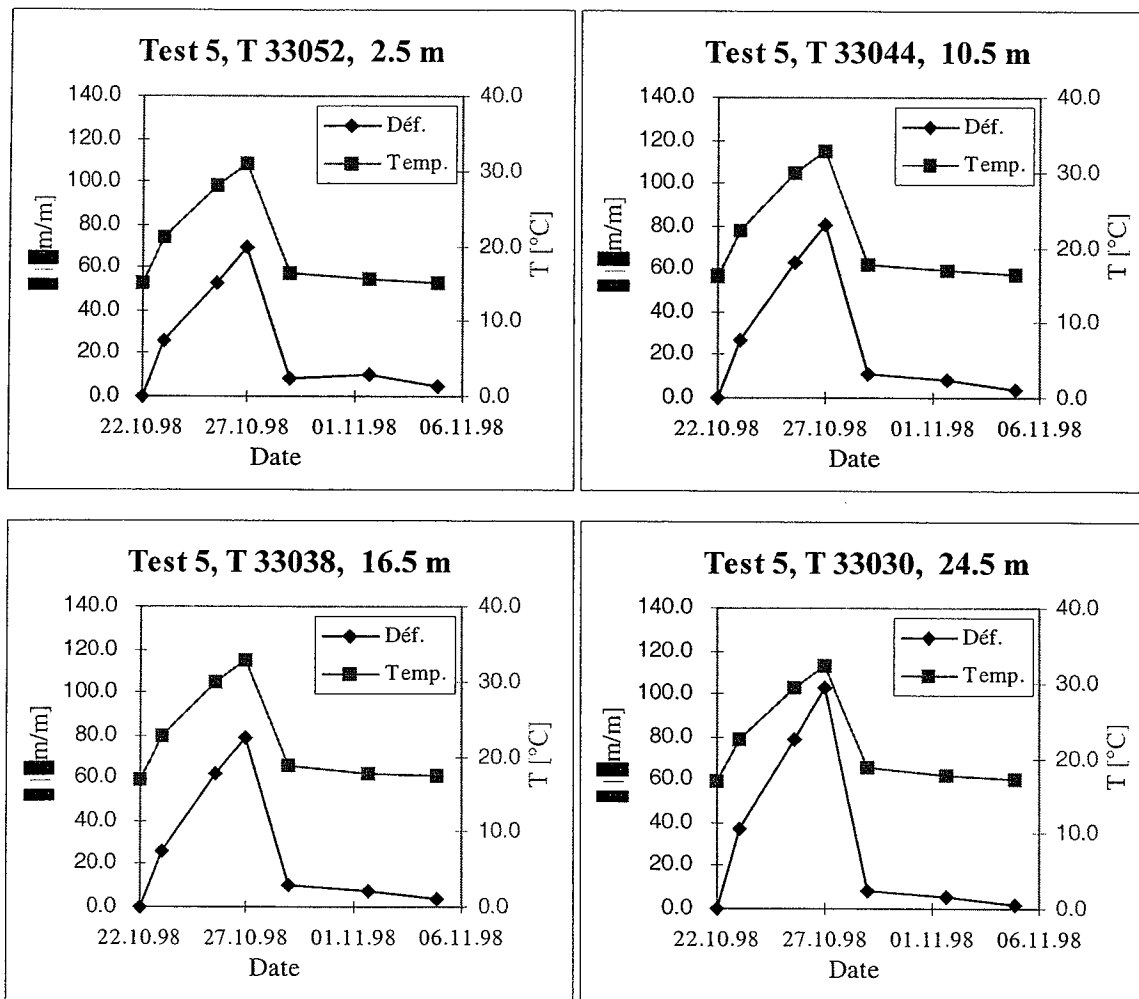


Figure 60 : Test 5 - Déformations et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

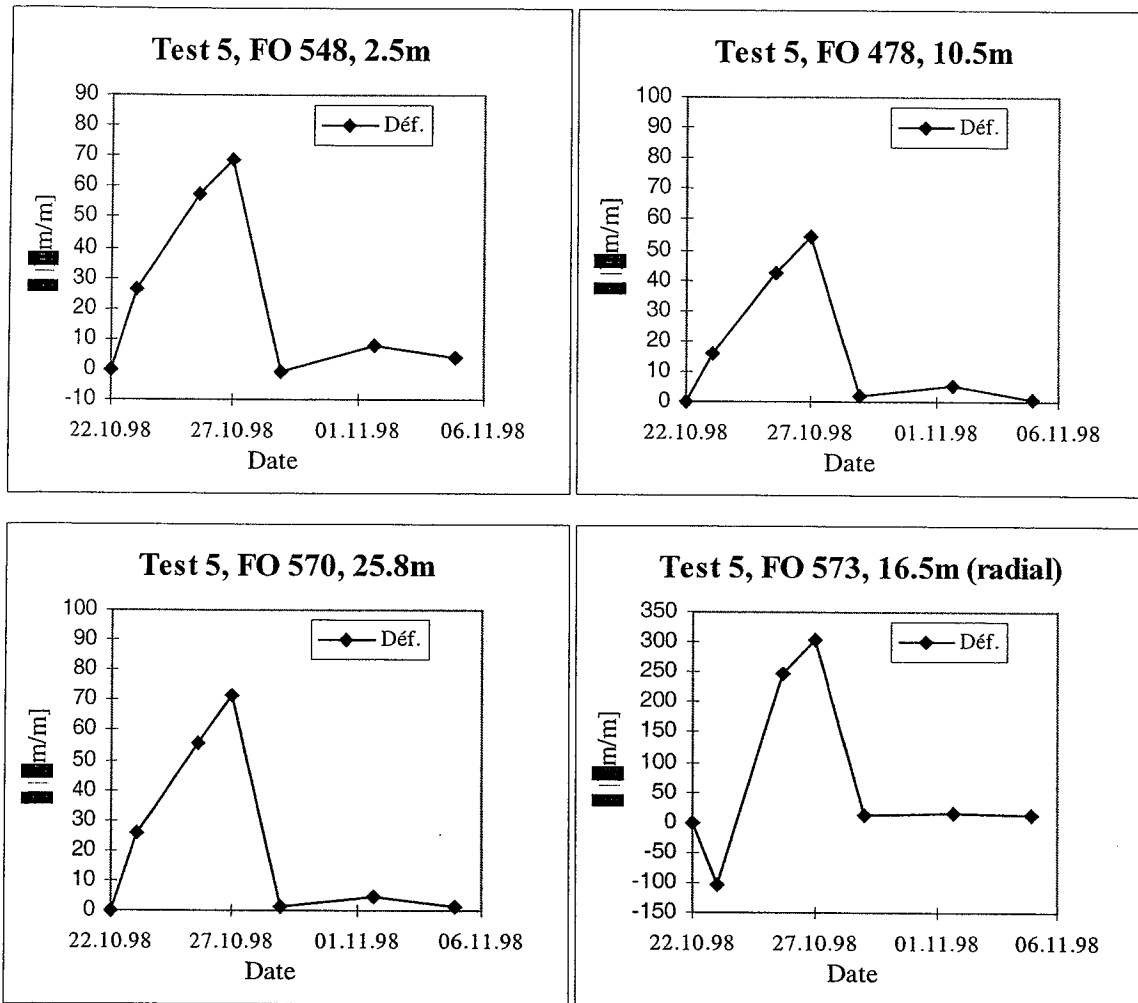


Figure 61: Test 5 - Déformations mesurés par fibres optiques (FO548, FO478, FO570, FO573).

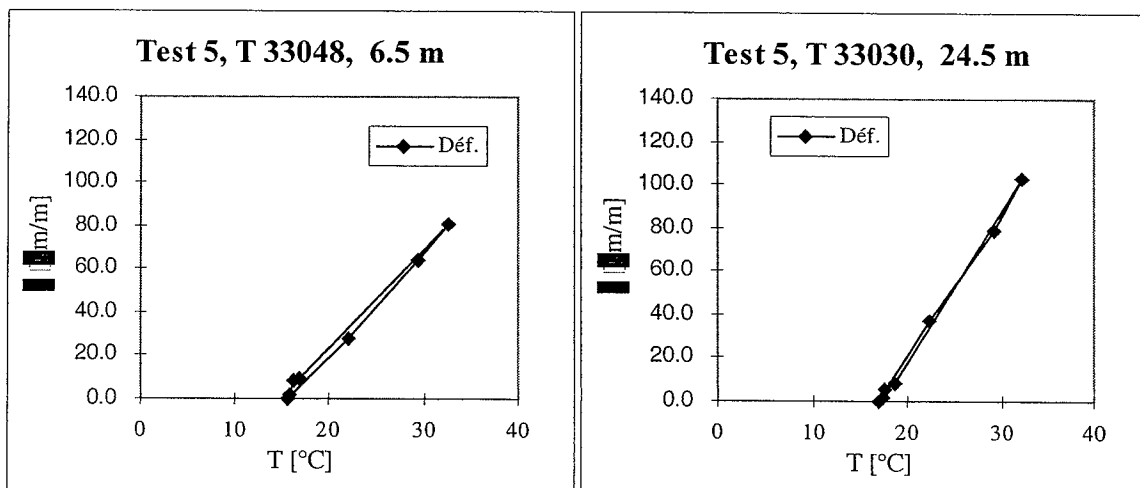


Figure 62 : Test 5 - Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAT (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m).

6.3.6 Test 6

Les capteurs qui ont des problèmes ou qui ne fonctionnent pas correctement sont les mêmes que ceux du Test 5. Les figures 63 et 64 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement reste réversible, comme le montre la figure 65.

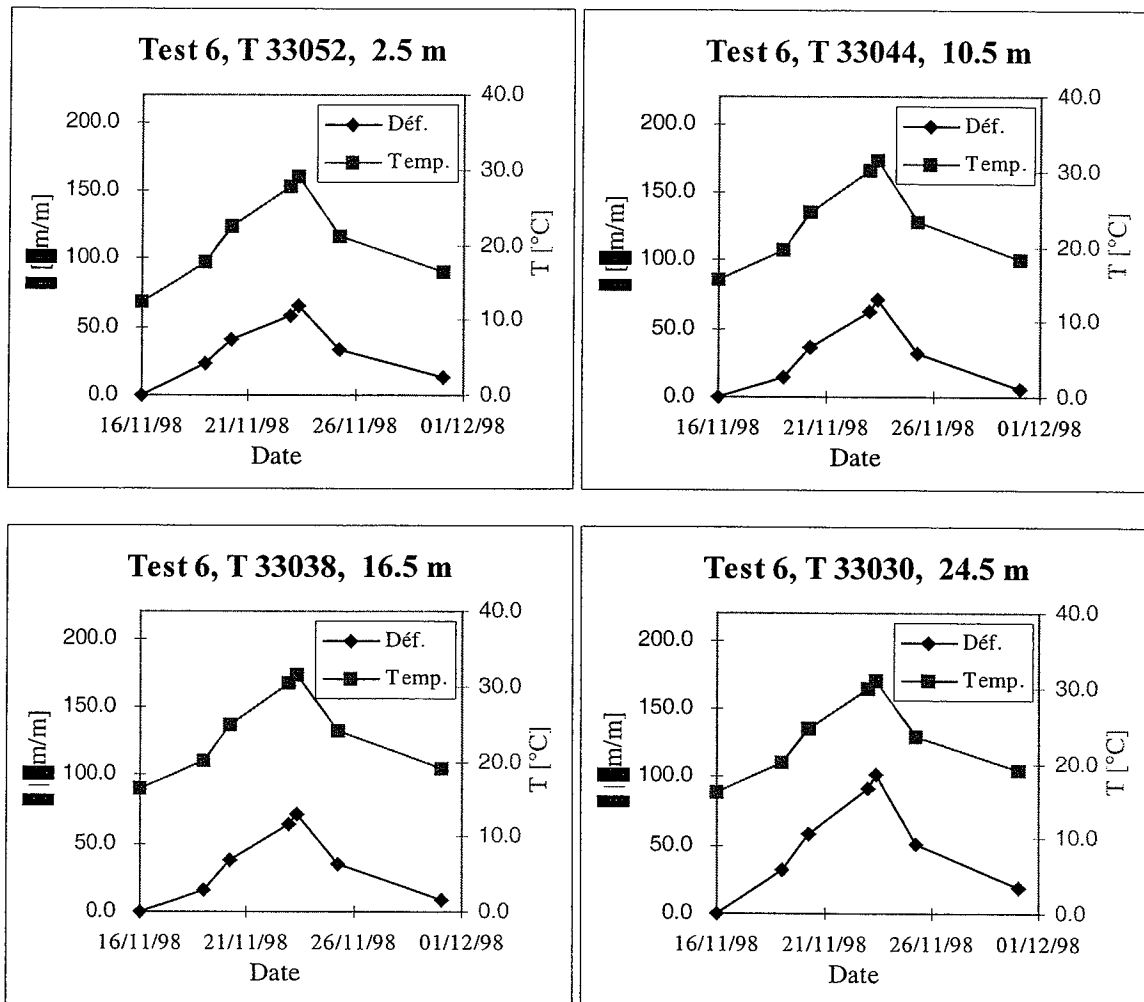


Figure 63 : Test 6 - Déformations et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

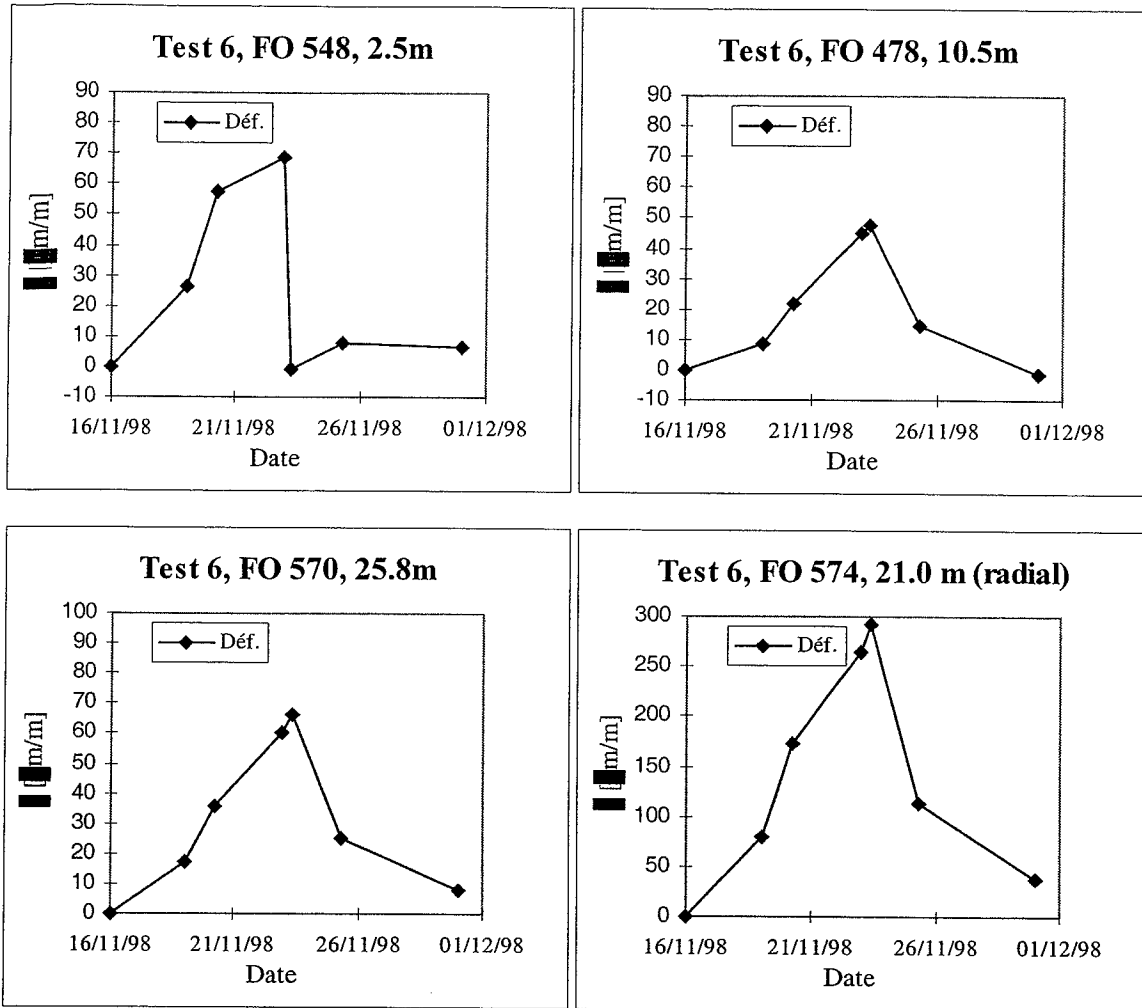


Figure 64 : Test 6 - Déformations mesurées par fibres optiques (FO 548, FO 478, FO 570, FO574).

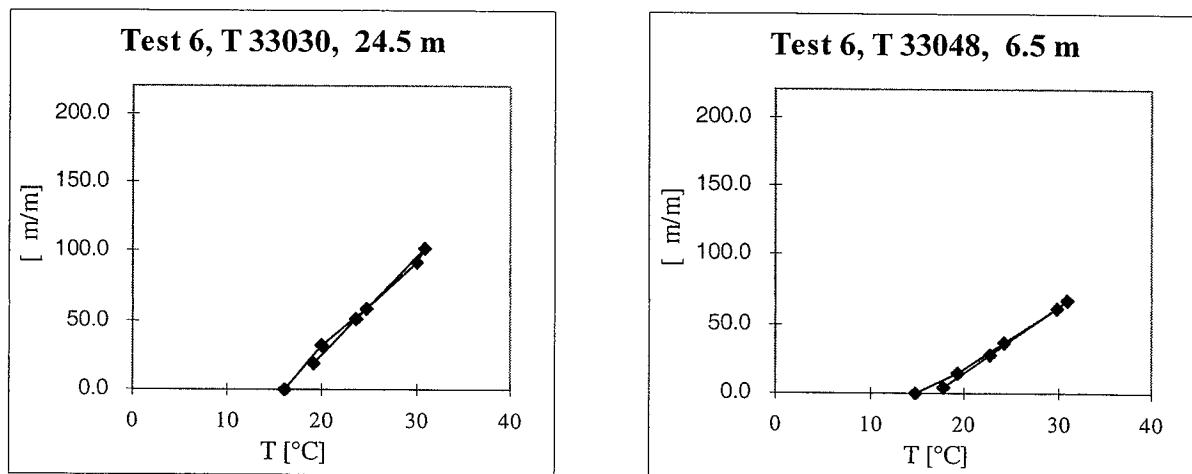


Figure 65 : Test 6 - Déformation en fonction de la température mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m).

6.4 Mesures de pression

La cellule de pression n'a pas donné satisfaction et n'a pas répondu à nos attentes en terme d'évaluation de la valeur de la charge à la pointe. Il nous a été difficile de trouver la raison exacte à ce dysfonctionnement mais deux hypothèses semblent probables. La première est que lors de la mise en place dans le pieu, le type de contact qui s'est produit entre l'armature et le fond du pieu n'a pas permis à la cellule de se mettre en pression. La deuxième serait tout simplement le fait qu'aucune charge n'arrive sur la pointe du pieu !

Dans la suite de cette section, on reproduit tout de même les mesures faites au cours des essais.

6.4.1 Test 1

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure pratiquement aucune variation de pression au cours de ce Test comme le montre la figure 69.

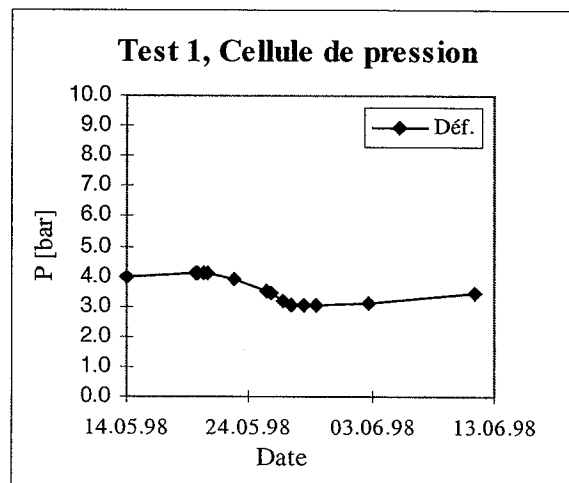


Figure 69: Pression au fond du pieu, cellule de pression TELEMAC type CVC.

6.4.2 Test 2

La cellule de pression ne mesure pratiquement aucune variation au cours du test 2 comme le montre la figure 70. La valeur du 30/7/98 est sûrement due à une erreur de mesure.

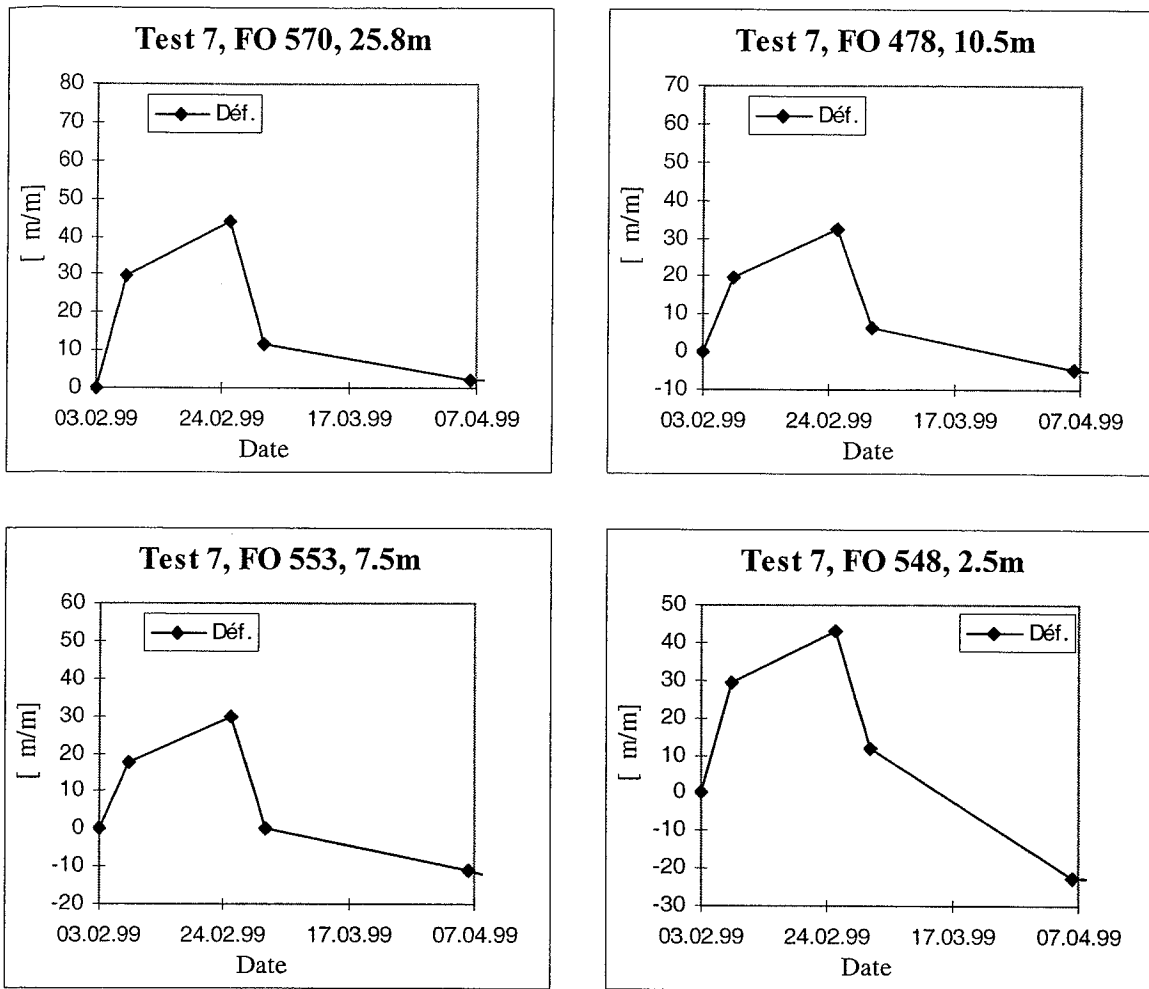


Figure 67 : Test 7 - Déformations mesurées par fibres optiques (FO 548, FO 478, FO 570, FO574).

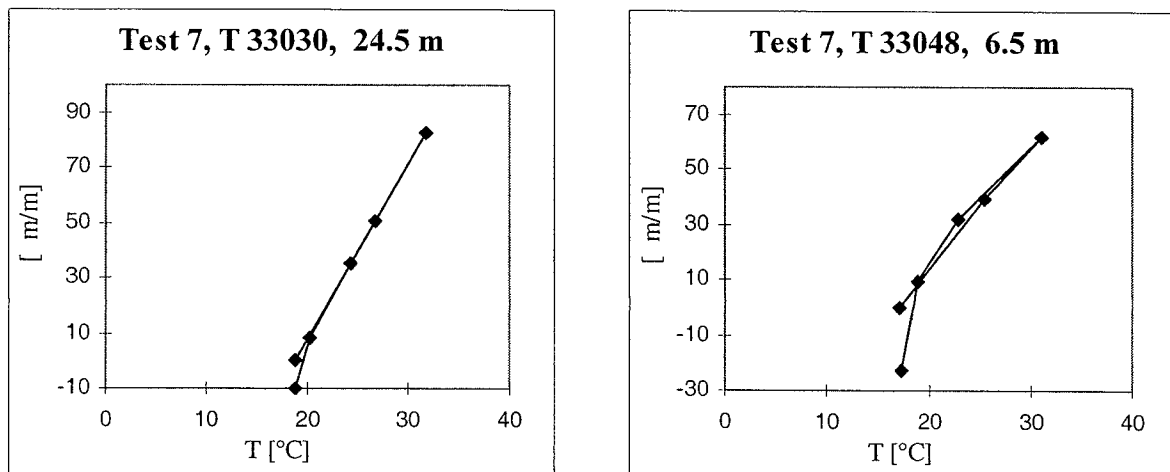


Figure 68 : Test 7 - Déformation en fonction de la température mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m).

6.3.7 Test 7

Les résultats obtenus au cours de ce test suscitent le même type de commentaire que pour les précédents. Les figures 66 et 67 montrent les valeurs des déformations et des températures aux profondeurs caractéristiques des couches géologiques. Les déformations thermiques restent élastiques linéaires (figure 68).

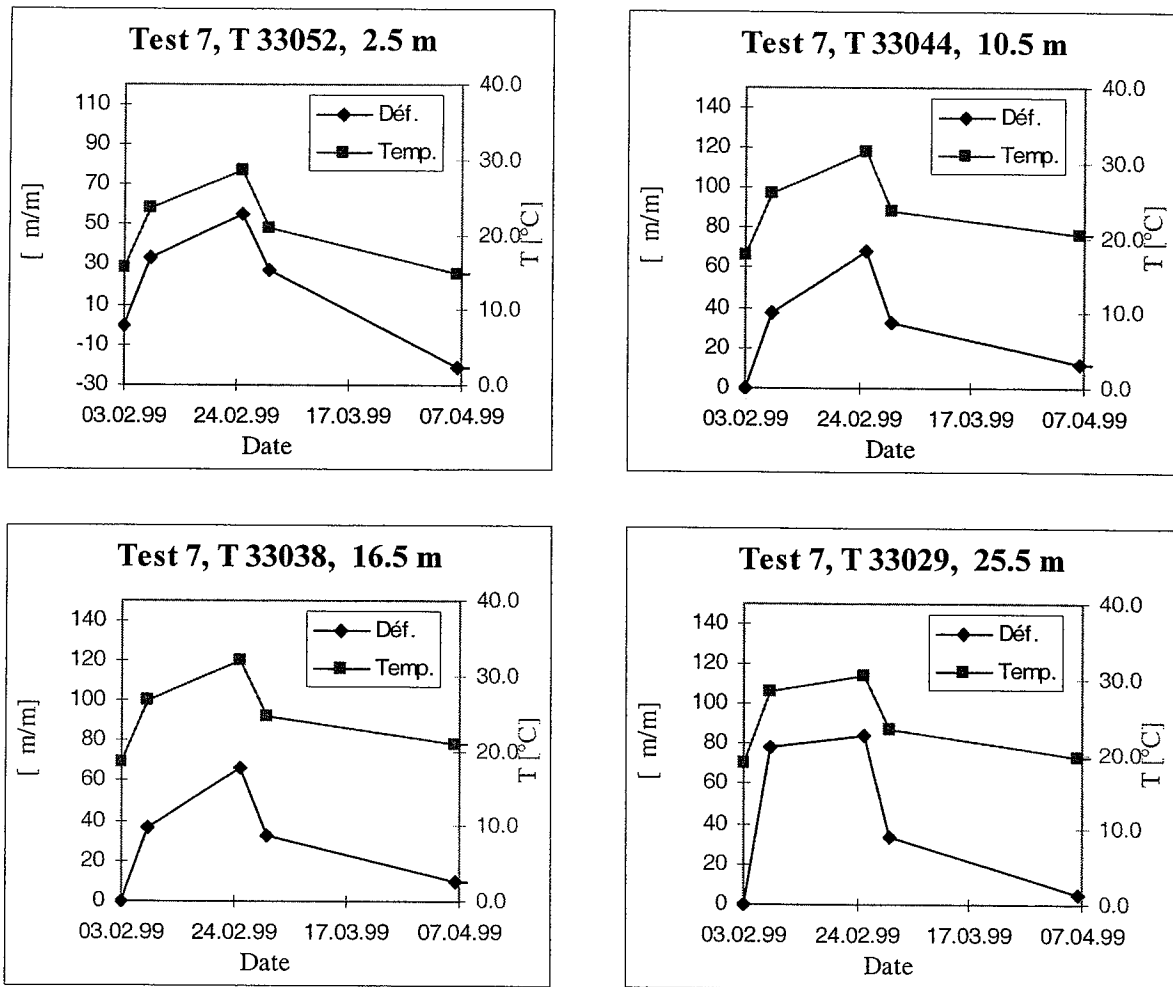


Figure 66 : Test 7 - Déformations et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m).

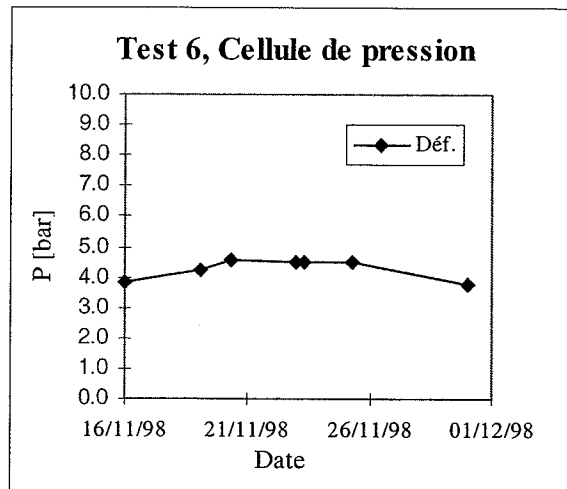


Figure 74 : Pression au fond du pieu. Test 6.

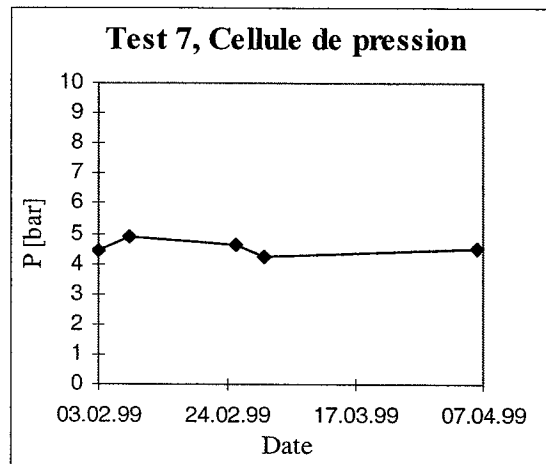


Figure 75 : Pression au fond du pieu. Test 7.

6.5 Mesures de nivellement

Par des moyens topographiques, le déplacement vertical de la tête du pieu a été suivi au cours des tests. Les résultats sont regroupés sur la figure 76. On observe l'important déplacement mesuré au cours du Test 1. Suite à la construction de la dalle, le repère de référence a été déplacé à partir du Test 2. Les mesures suivantes donnent les valeurs des déplacements d'origine thermique au cours de chaque test suivies du tassement produit par la construction du bâtiment.

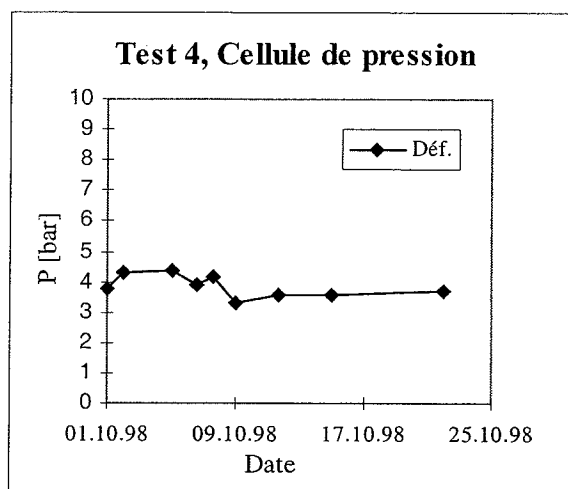


Figure 72: Test 4 - Pression au fond du pieu

6.4.5 Test 5

Les mesures faites au cours de ce test sont sur la figure 73.

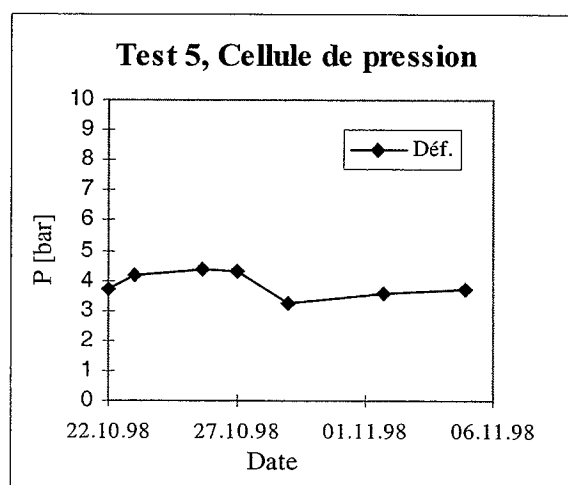


Figure 73 : Pression au fond du pieu, Test 5.

6.4.6 Tests 6, 7 et 8

La cellule de pression ne mesure pas de variations de pression significatives au cours de ces trois tests (figures 74 et 75). La dernière mesure faite (Test 8 – 14.01.00) confirme les observations précédentes en indiquant la valeur de 5.4 bars.

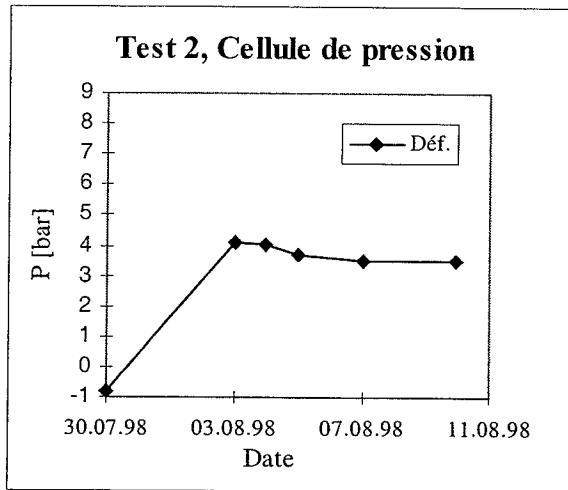


Figure 70: Pression au fond du pieu, Test 2.

6.4.3 Test 3

La cellule de pression montre une petite augmentation de la pression au fond du pieu (voir figure 71). Cette variation de pression de 4.3-3.6 = 0.7 bar correspond à une augmentation de la force en point du pieu d'environ 45 kN, valeur très faible.

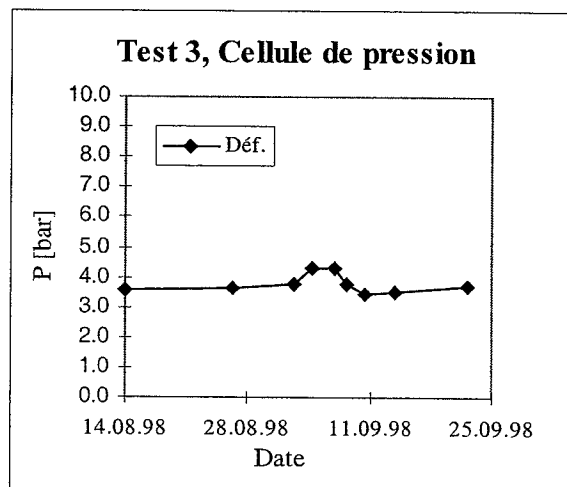


Figure 71 : Pression au fond du pieu, Test 3.

6.4.4 Test 4

Avec l'augmentation de la température dans le pieu, et ainsi sa dilatation, on constate une légère augmentation de la pression sur la pointe du pieu comme le montre la figure 72. Cette variation de pression reste est très faible.

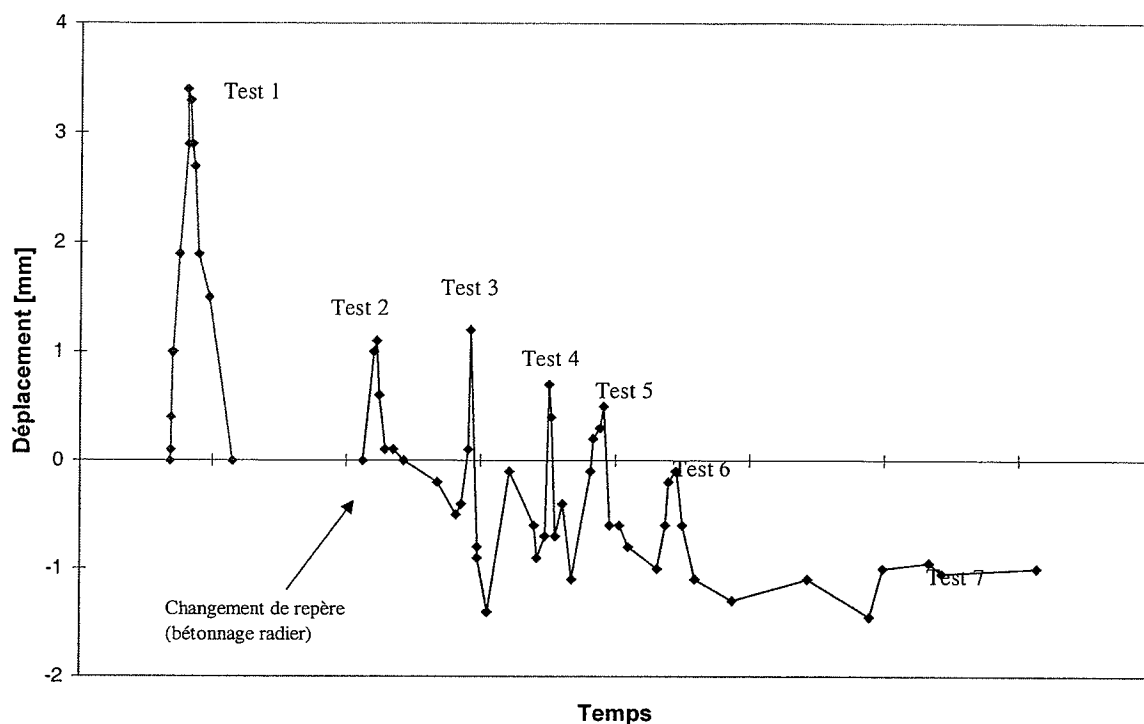


Figure 76 : Déplacement vertical de la tête du pieu - mesure topographique.

6.6 Synthèse des résultats

Comme cela a été présenté dans ce paragraphe, il a été possible de reproduire dans ce test des conditions d'essai semblables à celles que subirait un pieu échangeur en conditions réelles. Les températures imposées par le module de chauffage ont été mesurées aux différents niveaux du pieu. Les déformations thermo-mécaniques radiales et verticales engendrées ont été quantifiées tous les mètres à l'aide de deux techniques de mesures, en plus un nivellement en tête du pieu a été réalisé. Les quatre capteurs en tête de pieu devraient maintenant permettre d'estimer la valeur de la charge reçue par ce pieu test.

Enfin, une mesure de la charge en pointe a été tentée mais les résultats ne permettent pas de supposer une quelconque conclusion.

7. Tests complémentaires

Des tests complémentaires ont été réalisés pour déterminer un certain nombre de caractéristiques nécessaires à l'analyse des résultats de mesure.

7.1 Carottages soniques

Le carottage sonique est basé sur la mesure du temps de propagation d'une onde sonore entre deux tubes en acier verticaux fixés contre l'armature du pieu pendant sa construction. Les tubes sont remplis d'eau. Deux sondes soniques, un émetteur et un récepteur, sont placées dans deux tubes différents. Une onde sonore envoyée par l'émetteur est reçue par le récepteur dans le tube opposé. Le temps de parcours de l'onde dans le béton est mesuré à chaque profondeur, en connaissant la distance entre l'émetteur et le récepteur, il est donc possible de trouver la vitesse de propagation de l'onde dans le béton (C).

La vitesse de propagation de l'onde dans le béton est donnée par (Strain & Williams, 1991) :

$$C = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad \text{Eq. 1}$$

C : vitesse de propagation de l'onde dans le béton [m/s]

ρ : densité du béton (25 t/m³)

E : module d'élasticité dynamique du béton [MPa]

ν : coefficient de Poisson [-]

L'équation (1) permet de trouver la valeur du module de Young en fonction de la vitesse de propagation :

$$E = C^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Eq. 2}$$

Le pieu test a été équipé de trois tubes en acier de 2" pour le carottage sonique. Ils sont fixés à la cage d'armature comme le montre la figure 77.

8. Premières analyses des résultats

Cette analyse des résultats constitue la première étape de l'exploitation de la formidable base de données constituée avec ce test in-situ. A partir de là, la suite des travaux dans ce domaine devraient s'atteler d'une part, à la mise au point de recommandations pratiques quant aux précautions à prendre dans la réalisation de pieux échangeurs, et d'autre part, au développement et la validation d'un outil numérique de dimensionnement énergétique et géotechnique d'ouvrages avec pieux échangeurs.

Dans cette logique, et comme première contribution à l'exploitation et l'analyse des résultats, on présente dans ce chapitre les principales influences de la température sur le pieu à travers : i) l'évaluation du degré de liberté de la structure (ou autrement de la dilatation thermique effective), ii) la mobilisation du frottement latéral qu'induisent les déformations thermiques à l'interface sol-pieu (cas du Test 1), iii) évaluation des contraintes supplémentaires induites dans le pieu par les déformations thermiques empêchées (cas du Test 2).

8.1 Dilatation thermique

L'application d'une charge thermique à une structure libre comme celle de la figure 79 la dilate. Dans le cas où elle n'est plus entièrement libre (frottement latéral, bords bloqués,...) une partie de cette déformation sera empêchée. La déformation produite dans ce cas (ε_g , notée déformation gênée) est une fraction de la déformation (ε_l) notée sur une structure libre de se déformer. Le rapport de la déformation thermique gênée à la déformation thermique libre dans la direction envisagée sera appelé taux de liberté de la structure, et noté n :

$$n = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_l} \quad \text{Eq. 4}$$

La valeur de n est comprise entre 0 (structure complètement bloquée) et 1 (le cas de référence, Test 1 en ce qui nous concerne).

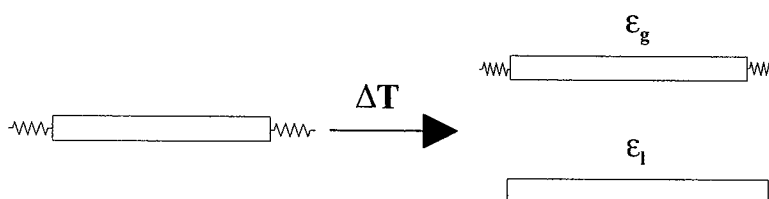


Figure 79 : Représentation schématique des déformations thermiques dans une structure

La déformation thermique gênée due à un écart de température ΔT est :

$$\varepsilon_g = n \cdot \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 5}$$

Avec β un coefficient de dilatation thermique du pieu déterminé pour les conditions du cas référentiel.

La variation de contrainte d'origine thermique est alors proportionnelle à la déformation empêchée (différence entre la déformation thermique mesurée ε_g et la déformation libre ε_l) :

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_l - \varepsilon_g) \quad \text{Eq. 6}$$

- Cas des mesures extensométriques

Dans le cas des mesures avec extensomètre à corde vibrante noyé dans le béton du pieu, et sous l'effet d'une variation de température ΔT , la déformation libre de la corde est :

$$\varepsilon_l = \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 7}$$

avec β le coefficient de dilatation thermique de la structure supposée libre.

La déformation gênée de la corde sera la même que celle du support (pieu):

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{t_0} + n \cdot \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 8}$$

avec ε_{t_0} déformation du support d'origine autre que thermique.

La contrainte dans la corde de l'extensomètre est définie par :

$$\sigma_c = E_c \cdot k \cdot (f^2 - f_0^2) \quad \text{Eq. 9}$$

E_c est le module d'élasticité de la corde (en acier), k le coefficient extensométrique (fourni par le fabricant pour chaque type de corde vibrante) et f la fréquence de vibration de la corde.

En appliquant les Eq. 6, 7 et 8, la contrainte interne de la corde serait :

$$\sigma_c = E_c \cdot (\varepsilon_{t_0} + (1-n) \cdot \beta \Delta T) \quad \text{Eq. 10}$$

Les Eq. 6 et 10 vont permettre d'exprimer les déformations en fonction des variations de fréquence :

$$(\varepsilon_{t_0} + (1-n) \cdot \beta \Delta T) = k \cdot (f^2 - f_0^2) \quad \text{Eq. 11}$$

Alors la déformation libre serait avec la présence d'un champ thermique:

$$\varepsilon_l = k \cdot (f^2 - f_0^2) + \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 12}$$

Et de même pour la déformation gênée:

$$\varepsilon_g = k \cdot (f^2 - f_0^2) + (n\beta) \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 13}$$

Si les conditions de mesure sont telles qu'il est permis de supposer les déformations non thermiques comme nulle ($\varepsilon_{t_0} \cong 0$), ce qui est le cas au cours de chaque cycle thermique de nos tests, il est alors possible de déterminer le terme $n\beta$ à partir de l'expression de l'équation 13, les autres termes étant supposés connus.

L'évaluation des contraintes supplémentaires générées se fait ainsi:

- Test 1: le pieu est chauffé avec $\Delta T = 22^\circ\text{C}$. Il est libre de se déplacer longitudinalement et le seul empêchement au développement de la déformation

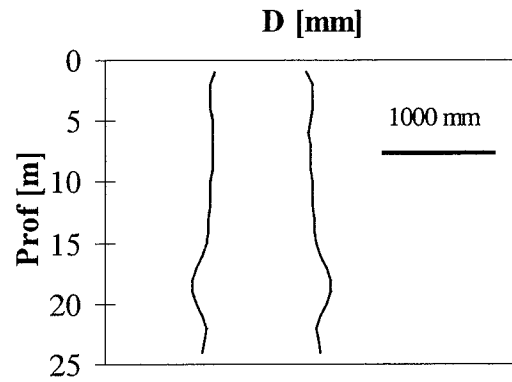


Figure 78 : PIT. Diamètre du pieu en fonction de la profondeur.

7.2 Caractérisation du comportement mécanique du sol

Des échantillons ont été prélevés au moment du creusement du pieu à trois profondeurs caractéristiques des couches géologiques du site (12, 16 et 22m). Une analyse géotechnique complète en laboratoire a été menée. Elle a compris des essais d'identification (granulométrie et limites d'Atterberg), des essais oedométriques à 20 et 40 °C et des essais triaxiaux. Avec ces données, il est possible de déterminer les paramètres de modèles constitutifs avancés pour la réalisation de simulations numériques aux éléments finis.

Les résultats obtenus sont regroupés dans l'Annexe 4.

thermique est le contact sol-pieu (le bâtiment n'est pas encore construit, figure 7). Comme c'est le cas référentiel, sa déformation sera considérée comme la déformation libre :

$$\varepsilon_i = \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 14}$$

β est ainsi le coefficient de dilatation thermique du pieu déterminé dans les conditions du Test 1.

La contrainte engendrée dans ces conditions sera supposée nulle. Cette hypothèse reste valable tant qu'on est dans le domaine élastique où le principe de superposition des contraintes est applicable.

- Tests 2 à 7 : la déformation gênée (mesurée) est égale à :

$$\varepsilon_{g,i} = n_i \cdot \beta \cdot \Delta T, i = 2, \dots, 7 \quad \text{Eq. 15}$$

La contrainte supplémentaire dans le pieu est alors égale à :

$$\sigma = E_c \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot (1 - n_i), i = 2, \dots, 7 \quad \text{Eq. 16}$$

8.1.1 Influence des conditions thermo-mécanique sur le coefficient ($n\beta$)

Les mesures des températures et des déformations aux différents niveaux du pieu permettent de quantifier la valeur du coefficient de dilatation ($n\beta$) ainsi que l'influence de l'état de contrainte sur ce coefficient.

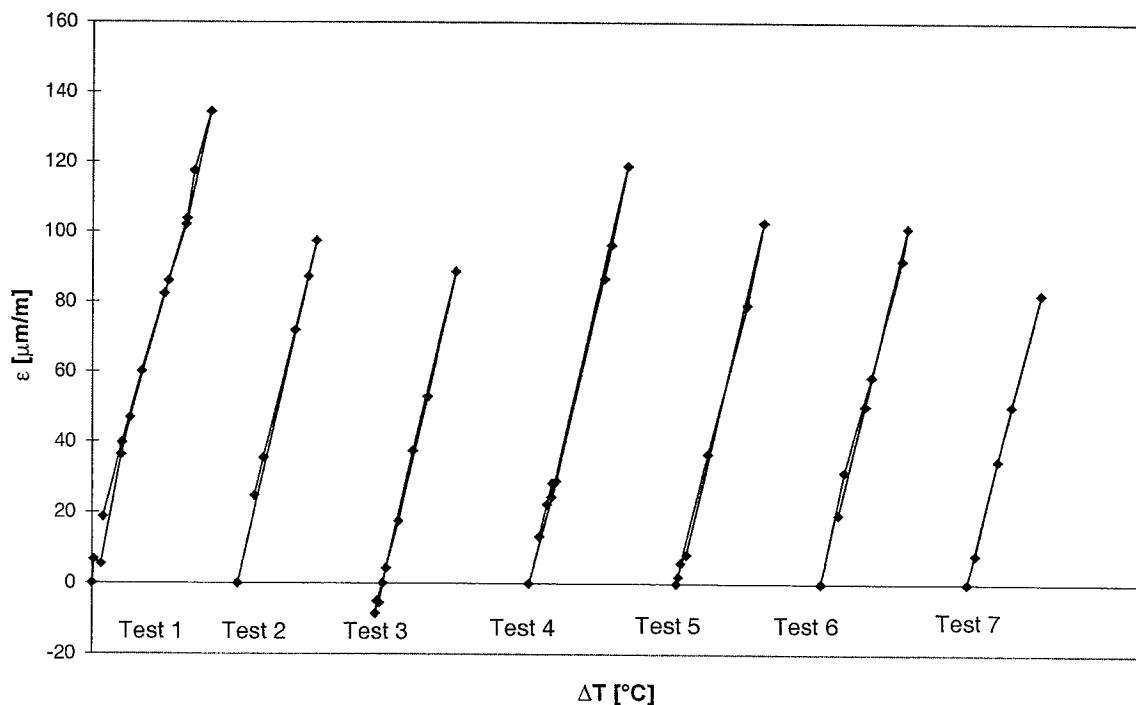


Figure 80 : Influence de l'état de contraintes sur le coefficient $n\beta$

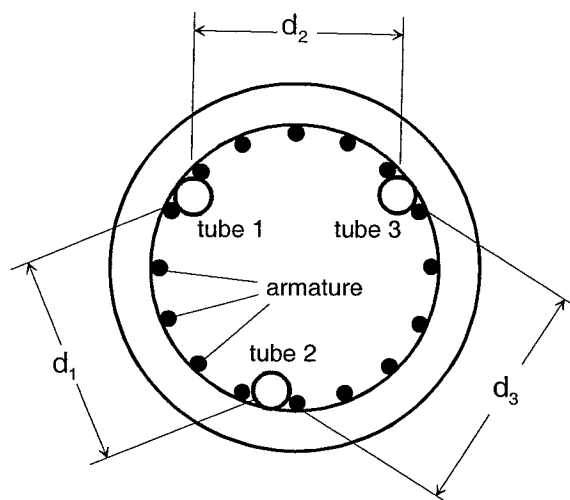


Figure 77 : Emplacement des tubes pour le carottage sonore dans le pieu-test

A chaque essai de carottage sonore, pour une profondeur donnée, on détermine trois valeurs du module d'élasticité pour les trois trajets (tube 1 \rightarrow tube 2, tube 1 \rightarrow tube 3, tube 2 \rightarrow tube 3).

Résultats fournis par De Cérenville

Afin de réaliser ce test, nous avons mandaté le bureau De Cérenville. Les résultats fournis sont donnés en Annexe 6. Ils montrent que la vitesse de l'onde sonore dans le béton (donc le module d'élasticité) varie peu avec la profondeur. De l'analyse de la disparité des mesures des modules, il semblerait qu'un module d'élasticité constant sur toute la longueur du pieu pourrait être admis dans les analyses de détermination des efforts.

Trois essais de carottage sonore ont été effectués à trois dates avec des températures du pieu différentes (température moyenne du pieu mesuré par les capteurs TELEMAT).

Pour chaque trajet (1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 3) et pour chaque date de l'essai, la vitesse moyenne est donnée et à l'aide de l'équation (2), il est possible de calculer le module d'élasticité du pieu.

Résultats de module fournis par De Cérenville se basent sur l'hypothèse d'un coefficient de Poisson (ν) égal à 0. Cependant, comme en pratique un coefficient de Poisson de 0.16 est admis pour le béton, on a rajouté une colonne où on a calculé les modules avec cette dernière hypothèse. Le tableau 8 donne les résultats obtenus.

Date	Température moyenne dans le pieu [°C]	E [MPa] ($\nu = 0$)	E _{corr} [MPa] ($\nu = 0.16$)
24/02/98	23	19965	18750
25/05/98	35	17115	16070
03/06/98	24	21556	20240

Tableau 8 : Résultats des carottages soniques (De Cérenville).

Après que ces estimations aient été réalisées, et nos premières analyses des résultats faites (chapitre 8), De Cérenville nous a remis un nouveau rapport dans lequel les évaluations des modules d'élasticité ont été revues et corrigés (Annexe 6).

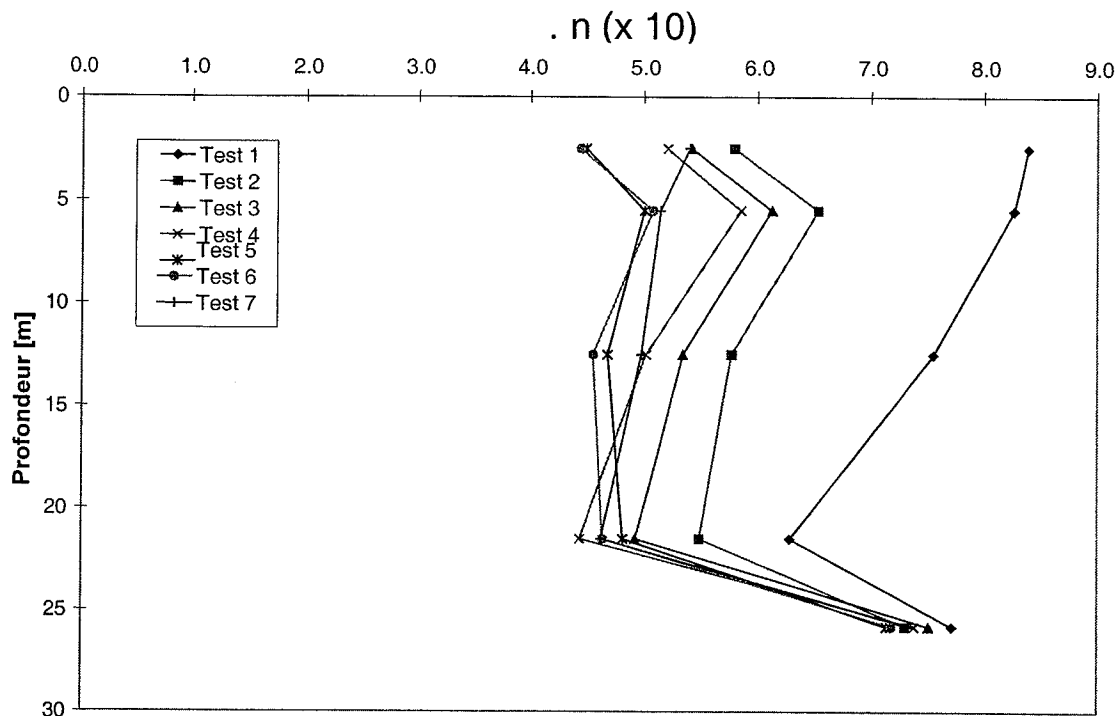


Figure 82 : Evolution lissée du coefficient n en fonction des étapes de construction

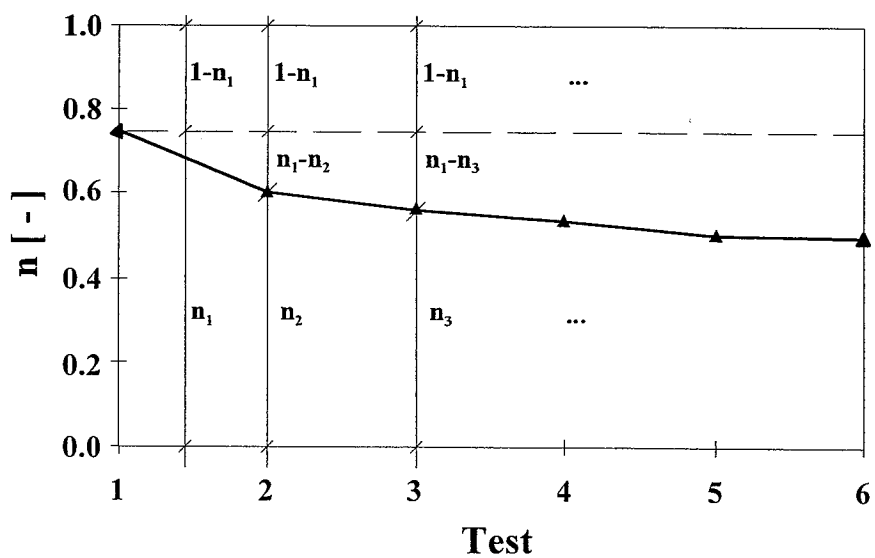


Figure 83 : Taux de liberté de la structure.

Pour la suite des analyses, le Test 1 sera considéré comme le cas référentiel.

- Test 2

La valeur moyenne du coefficient $n\beta$ est de $6.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ avec un écart-type de $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Le déplacement du pieu est partiellement empêché par le radier.

Sur la figure 80, on donne à titre d'exemple le comportement du pieu à la profondeur de 24.5 m. Pour la gamme de contraintes atteintes à cette profondeur, le coefficient ($n\beta$) semble indépendant de la charge.

8.1.2 Valeurs du facteur ($n\beta$)

Afin d'avoir une première quantification du facteur n , on fait l'hypothèse d'un coefficient de dilatation du pieu $\beta = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. On représente sur la figure 81 les valeurs estimées du coefficient (n) en fonction de la profondeur aux différentes étapes de construction. On observe que cette valeur est la plus forte pour le Test 1 et qu'elle diminue ensuite progressivement. De plus cette valeur est plus importante en tête de pieu. Les mêmes résultats sont repris sur la figure 82 avec un lissage par couche géologique.

La figure 83 montre la valeur du taux de liberté de la structure (n) (valeur moyenne sur l'ensemble des capteurs TELEMAC pour une mesure à une température donnée) en fonction de l'évolution de la construction de l'immeuble. On y constate que le frottement pieu-sol empêche déjà la déformation thermique de se développer entièrement dès le Test 1 ($n=0.75$). Avec la construction du bâtiment et pour le type d'encastrement du pieu-test, on note un facteur n qui diminue (déformation empêchée plus importante) et se stabiliser autour d'une valeur de 0.5 pour les derniers étages construits. Ce qui signifie que la moitié de la déformation d'origine thermique est empêchée à la fin de la construction. Elle va se transformer ainsi en contrainte « thermique » supplémentaire dans le pieu.

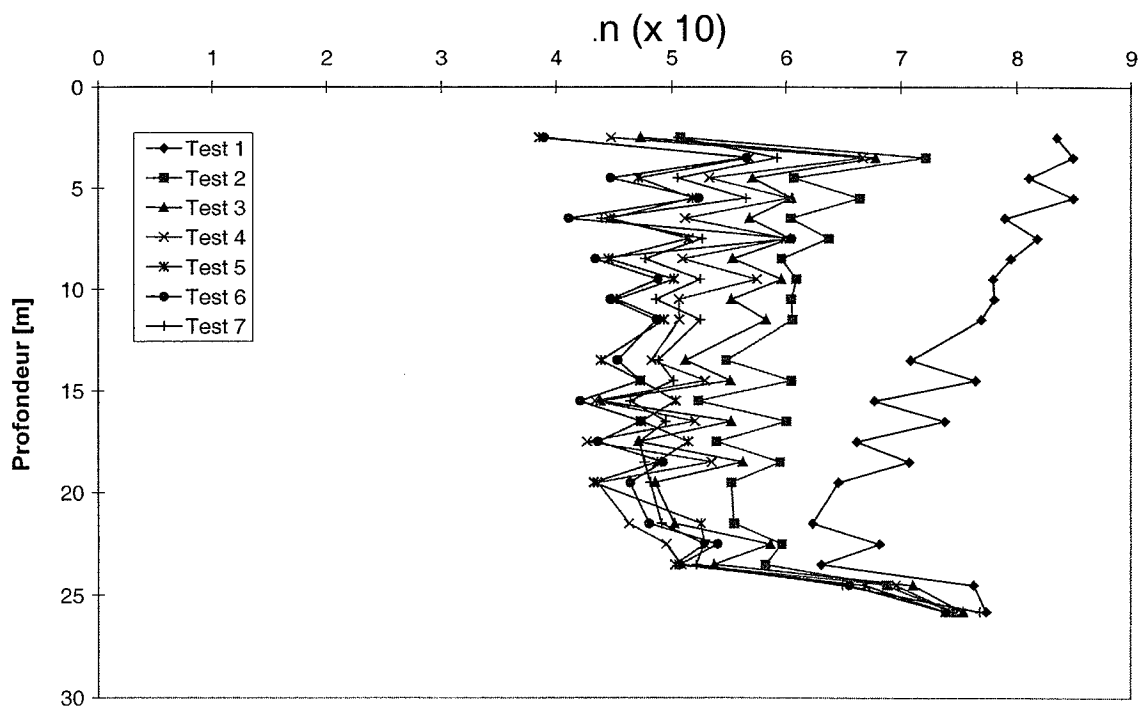


Figure 81: Evolution du coefficient n en fonction des étapes de construction

Bien que nous n'ayons pas utilisés les nouvelles valeurs, nous les donnons dans le tableau 9 en y ajoutant les valeurs du module pour $\nu = 0.16$.

Date	Température moyenne dans le pieu [°C]	E [MPa] ($\nu = 0$)	E _{corr} [MPa] ($\nu = 0.16$)
24/02/98	23	28068	26357
25/05/98	35	27206	25547
03/06/98	24	31097	29201
25/05/99	19	31948	30000

Tableau 9 : Résultats des carottages soniques corrigés (De Cérenville).

Le module d'élasticité du pieu (E_{pieu}) doit aussi tenir compte de l'acier d'armature. Pour cela, on a utilisé la relation suivante pour déterminer ce module d'élasticité du pieu :

$$E_{\text{pieu}} = E_{\text{béton}} \cdot \left[1 + \varphi \cdot \frac{E_{\text{acier}}}{E_{\text{béton}}} \right] \quad \text{Eq. 3}$$

E_{pieu} : module d'élasticité du pieu [MPa]

$E_{\text{béton}}$: module d'élasticité du béton [MPa]

E_{acier} : module d'élasticité de l'acier d'armature [MPa]

φ : pourcentage d'armature [-]

Le module d'élasticité du pieu calculé avec les premières valeurs (tableau 8) à une température de 24°C est de 23900 MPa. Cette valeur sera retenue pour les premières analyses des résultats avec l'hypothèse que la température n'a pas d'influence sur les modules.

7.2 Test d'intégrité du pieu (PIT™)

En date du 27 mai 1998, un contrôle par réflexion pour vérifier l'intégrité du pieu et sa géométrie a été réalisé avec la méthode de réflexion PIT. Aucun défaut de qualité n'a été constaté à l'exception d'un élargissement de la section du pieu en profondeur. La représentation du diamètre du pieu en fonction de la profondeur est donnée à la figure 78. A partir de ce résultat, une section moyenne constante de 6080 cm² sera considérée dans la suite des analyses.

- Test 3

La construction du premier étage rend le pieu encore plus hyperstatique (il est plus empêché de s'allonger que dans le Test 2). Pour cette raison, la valeur du coefficient $n\beta$ diminue par rapport au Test 2 ($5.7 \cdot 10^{-6} \pm 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

- Test 4

Le coefficient $n\beta$ est de $5.3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ avec un écart-type de $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. La valeur de ce coefficient diminue au fur et à mesure que le bâtiment est construit.

- Test 5

Le coefficient $n\beta$ est de $5.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ avec un écart-type de $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. La valeur de ce coefficient diminue au fur et à mesure que le bâtiment est construit.

- Test 6

Le coefficient $n\beta$ est le même que celui trouvé pendant le Test 5 c'est à dire de $5.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ avec un écart-type de $0.8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Le fait d'avoir construit un étage en plus, par rapport au Test 5, n'a pas changé le degré d'hyperstaticité du pieu. Il est donc possible que la valeur de $n\beta$ sera la même quand le bâtiment sera complètement terminé.

8.2 Mobilisation du frottement latéral

Comme on l'a vu, l'augmentation de la température provoque un déplacement du pieu par rapport au sol. Une mobilisation du frottement sur l'interface pieu-sol sera alors effective afin de résister à ce cisaillement. On se propose dans cette section, d'évaluer l'évolution de la mobilisation du frottement latéral avec la température pour le cas du Test 1.

Les courbes de mobilisation du frottement peuvent être obtenues à partir de (voir Vulliet & Meyer, 1999) :

$$q_s(z) = \frac{A \cdot E_{pile}}{\pi \cdot D} \cdot \frac{\Delta \varepsilon(z)}{dz_i} \quad \text{Eq. 17}$$

où D est le diamètre du pieu et dz_i l'épaisseur de la couche i . Le diamètre du pieu et le module d'élasticité seront supposés constants et égaux aux valeurs initiales données dans le paragraphe 7.

Le frottement latéral mobilisé mesuré dans le Test 1 est représenté sur la figure 84 (exploitation de l'équation 17). A titre de rappel, la sollicitation thermique est de 22°C pour ce test.

Le tableau 10 donne une comparaison entre le frottement latéral mobilisé sous l'effet thermique et celui mobilisé dans le test d'essai de charge (De Cérenville Géotechnique, 1997) et qui a servi aux dimensionnements du projet.

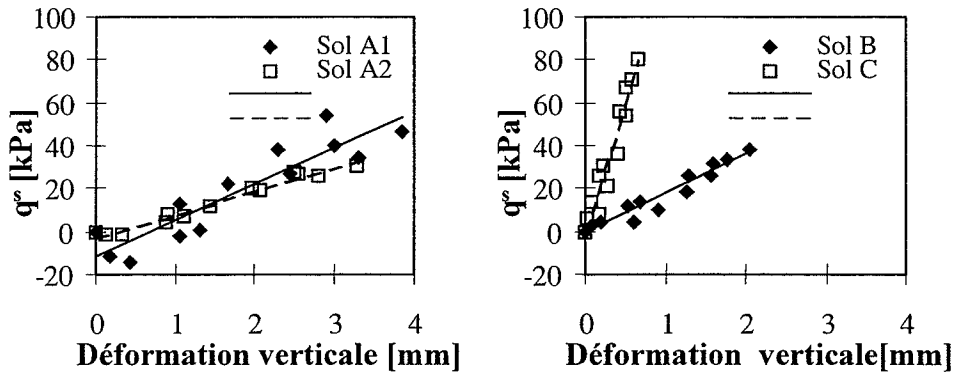


Figure 84 : Mobilisation du frottement latéral des couches A₁, A₂, B et C pour une sollicitation thermique de 22°C. Test 1

Couches	Mobilisation du frottement latéral	
	Test 1, ΔT=22°C	Valeurs de projet
A ₁	≈40 kPa	0
A ₂	≈30 kPa	0
B	≈40 kPa	30 kPa
C	≈80 kPa	165 kPa

Tableau 10 : Frottement latéral mobilisé (Test 1) – Résultats et valeurs de projet

Ce résultat montre qu’une sollicitation thermique ΔT de 22°C a un effet significatif sur la mobilisation du frottement latéral. L’allure des courbes indique que la mobilisation est encore dans sa première phase (linéaire) et que le frottement n’est pas complètement mobilisé. A l’exception de la couche (C), le frottement déduit de nos calculs est supérieur aux valeurs de projet admissibles.

8.3 Contraintes supplémentaires dans le pieu

Avant de déterminer l’intensité des contraintes supplémentaires générées dans le pieu par la sollicitation thermique, il est important de connaître la valeur de la charge mécanique transmise au pieu par la structure.

8.3.1 Charge mécanique

La charge statique est imposée au pieu par le poids du bâtiment. Connaissant le diamètre du pieu et son module d’élasticité, les quatre extensomètres au sommet du pieu permettent d’estimer la charge reprise par le pieu. La figure 85 représente la charge statique déduite des mesures au sommet du pieu (Q₀) à la fin de la construction de chaque étage du bâtiment (à la température initiale de 11°C) comparée à celle évaluée par le bureau Passera et Pedretti lors du dimensionnement du bâtiment.

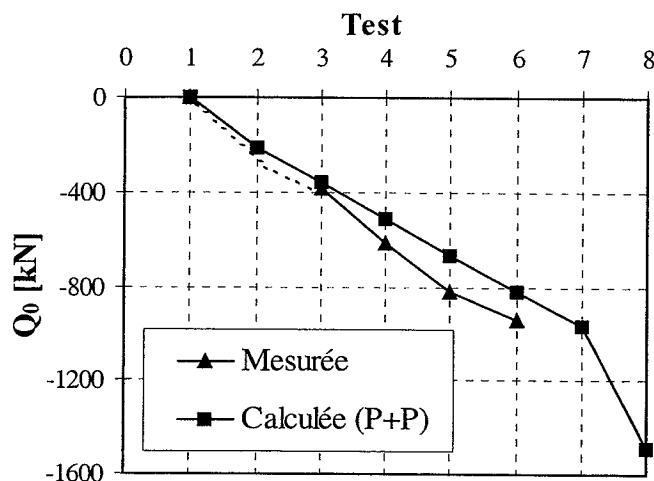


Figure 85 : Charge transmise par la structure au sommet du pieu

8.3.2 Répartition de la charge dans le pieu

La déformation axiale (verticale) ε_1 est mesurée tous les mètres dans le pieu. Il est donc possible d'estimer la répartition de la charge Q_1 avec la profondeur :

$$Q_1(z) = \varepsilon_1(z) \cdot A \cdot E_{pile} \tag{Eq. 18}$$

avec z la direction verticale, A la section du pieu et E_{pile} le module d'élasticité du pieu.

La figure 86 montre la répartition des charges transmises par la structure dans le pieu au cours de la construction des différents étages. Ce résultat est obtenu avec l'hypothèse d'un module d'élasticité et d'une section constants. Il est rappelé que la compression est négative.

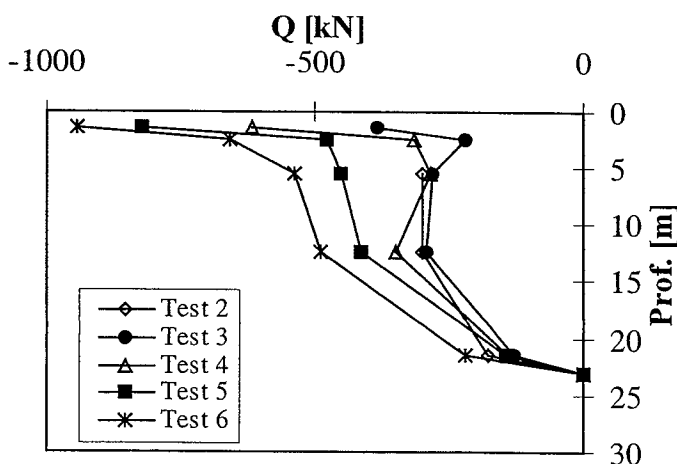


Figure 86 : Répartition du poids du bâtiment dans le pieu après la construction de chaque étage.

8.3.3. Contraintes thermiques

Avec la construction du bâtiment (à partir du Test 2), les conditions aux limites mécaniques limitent les dilatations thermiques. La partie empêchée se transforme en contrainte qu'on désigne de « thermique » (figure 87).

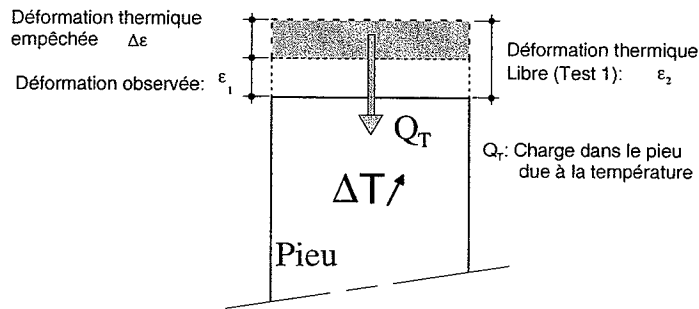


Figure 87 : Contraintes thermiques dans le pieu

Le facteur (n), indiquant la part de limitation dans la déformation thermique, vaut dans le cas du Test 2 (valeur moyenne sur tous les capteurs):

$$n = 0.60 \pm 0.06$$

La charge d'origine thermique ajoutée dans le pieu est :

$$Q_T = E_{pile} \cdot (1 - n) \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot A \quad \text{Eq. 19}$$

et la charge totale dans le pieu devient ainsi :

$$Q_{TOT} = Q_T + Q \quad \text{Eq. 20}$$

avec Q_T la charge dans le pieu due à la sollicitation thermique, et Q la charge générée par le poids de la structure.

Dans le Test 2, la charge thermique ajoutée pour un $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ est $Q_T = 1000$ kN (exploitation de l'équation 20). Cette valeur est plus importante que la charge mécanique générée par le 1^{er} étage du bâtiment ($Q = 300$ kN, figure 86).

8.4 Synthèse des premières analyses

L'analyse du frottement latéral mobilisé lors de la dilatation thermique du pieu au Test 1, et des contraintes supplémentaires engendrées dans le pieu dans le Test 2 indique clairement le type d'influence que peut avoir la sollicitation thermique sur le comportement du pieu. Ce même type d'analyse devrait être fait pour l'ensemble des Tests.

9. Conclusion

Les pieux thermiques offrent une bonne opportunité pour l'utilisation d'une énergie environnementale pour les aspects de chauffage et refroidissement. Plusieurs installations de ce type existent déjà en Suisse (Pago à Grabs, 600 kW, Kino à Buchs, 70 kW, Wohnanlage Malerva à Sargans, 70 kW) et à l'étranger (plus de 300 en Europe). Malgré cela, **aucune connaissance scientifique** n'existe sur l'influence de la température sur le comportement des pieux. Ceci représente un handicap quand il s'agit de convaincre un maître de l'ouvrage du bien-fondé d'une telle technologie.

Ce projet s'est donc intéressé à cet aspect du comportement thermo-mécanique des pieux échangeurs. L'approche s'est faite par un essai de charge in-situ couplant les sollicitations thermiques et mécaniques. L'objectif est qu'à partir de la base de données expérimentales recueillies, il serait possible d'établir par la suite, d'une part, des recommandations pratiques quant à l'utilisation des pieux comme échangeurs de chaleur, et d'autre part, de développer un outil numérique de dimensionnement énergétique et géotechnique des pieux échangeurs.

La conception du test, l'équipement du pieu, sa mise en place et le développement du module de chauffage ont été des opérations préalables dont la réussite était indispensable à la réalisation du projet. La phase la plus délicate a été sans conteste la mise en place de l'armature et le bétonnage dans les conditions très difficiles d'un chantier en pleine activité. Cette première phase s'est bien déroulée et la mise en route a été possible dans les délais (condition importante liée à l'avancement du chantier).

Les essais de sollicitation thermique effectués sur le pieu sont au nombre de huit, soit pratiquement après la construction de chaque étage du bâtiment. La variation de température appliquée au pieu à chaque test était de 15°C, sauf lors du Test 1 où cette variation était de 22°C. Plus de 50 capteurs de déformations radiales et verticales, de température et de pressions ont été installés pour suivre le comportement du pieu.

En plus de toutes les mesures directes sur le pieu, des données complémentaires nécessaires ont été déterminées telles les modules d'élasticité du pieu (par carottages soniques), dimensions et qualité du pieu (par contrôle avec la méthode de réflexion) et les caractéristiques géotechniques des couches géologiques (identifications, essais oedométriques et triaxiaux).

L'objectif principal de constituer une base de données expérimentales dans des conditions réelles des pieux échangeurs a complètement été atteint. Ainsi, on dispose maintenant d'informations dont l'analyse devrait permettre de répondre aux questions relatives à l'effet de la température sur le comportement du pieu.

En une première analyse des résultats, on s'est intéressé à évaluer l'intensité de la mobilisation du frottement latéral au cours du Test 1 ($\Delta T=22^\circ\text{C}$). Il s'avère que cette mobilisation est tout à fait significative et pourrait atteindre les valeurs limites de résistance.

Par la suite, l'estimation du coefficient d'hyperstaticité du pieu (n) a permis de montrer qu'au fur et à mesure que le bâtiment est construit, la valeur de ce coefficient diminuait, ce qui correspond à un empêchement progressif du pieu de se déplacer. Ceci se traduit directement par l'augmentation de la charge sur le pieu. Cette augmentation a été quantifiée dans le cas du Test 2. Elle correspond à une contrainte de compression relativement importante.

En résumé de cette première analyse des résultats, on retient que les variations thermiques induisent deux effets significatifs sur les pieux. Le premier est celui de l'augmentation de la mobilisation du frottement latéral due à la dilatation. Le second est celui d'un effort supplémentaire qui s'ajoute dans le pieu dû à la partie de la dilatation empêchée.

Malgré le fait que les deux effets induits par la température ont eus une importance significative dans le cas de notre test, l'intégrité du pieu ainsi que celle du bâtiment n'ont jamais été affectées par les sollicitations thermiques imposées. Ceci est lié au surdimensionnement du pieu, et au fait que la résistance par frottement latéral ne représente que 30% de sa portance.

Il est donc possible de conclure que les effets thermiques ont une réelle importance sur le comportement des fondations profondes, et qu'il est donc important d'en tenir compte dans le dimensionnement. Ceci ne limite en rien la faisabilité de telles réalisations.

Des recommandations pratiques quant aux aspects à prendre en compte dans les projets avec pieux échangeurs, et le développement d'outils numériques interactifs pour les dimensionnements énergétiques et géotechniques pourraient être réalisés à partir d'une analyse approfondie des résultats obtenus dans ce projet. Ils constitueront une aide précieuse dans le développement de cette technologie d'avenir.

11. Publications liées au projet (et jointes au rapport)

- FROMENTIN A., PAHUD D., LALOU L. & MORENI M., Pieux échangeurs : conception et règles de prédimensionnement, Revue française de génie civil, volume 3, n°6, pp. 387-421, 1999.
- LALOU L., MORENI M., FROMENTIN A., PAHUD D. & STEINMANN G., Heat Exchanger Pile: Effect of the Thermal Sollicitations on its Mechanical Properties, « European Geothermal Conference » - Bulletin D'Hydrogéologie, n°17, pp. 331-340, Ed. F.-D. Vuataz, 1999.
- LALOU L., MORENI M., FROMENTIN A., PAHUD D. & VULLIET L., In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile, 4th International conference on Deep Foundation Practice, pp 273-279. Singapore, 1999.

12. Références

- De Cérenville, 1997. *Extension Quartier Nord, Message 96*. Rapport Géotechnique SM/AB-M7262B.
- LALOU L., Quartier Nord EPFL - Projet "Pieux échangeurs" - Test en conditions réelles du comportement d'un pieu soumis à des sollicitations thermiques, Document interne, LMS SY40, EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.
- Passera & Pedretti, 1998. *Bâtiment polyvalent*. Extrait note de calcul - Vérification du pieu n° 68.
- STRAIN R. T. & WILLIAMS H.T., Interpretation of Sonic Coring results : A research project, Proc. 4th International Deep Foundations Institute Conference, Balkema, pp 633-640, 1991.
- VULLIET L. & MEYER A. 1999. The Vigner Tunnel : Determining contact laws from static load tests on piles. XIIth European conference on soil mechanics and foundation engineering.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Illustrations de la mise en place de l'instrumentation du pieu

ANNEXE 2 : Etalonnages des capteurs de mesure

ANNEXE 3 : Déroulement des tests

ANNEXE 4 : Caractérisation géotechnique des sols

ANNEXE 5 : Résultats des mesures

ANNEXE 6 : Mesures soniques des modules de rigidité (Rapport de De Cérenville)

ANNEXE 1 : ILLUSTRATIONS DE L'INSTRUMENTATION DU PIEU

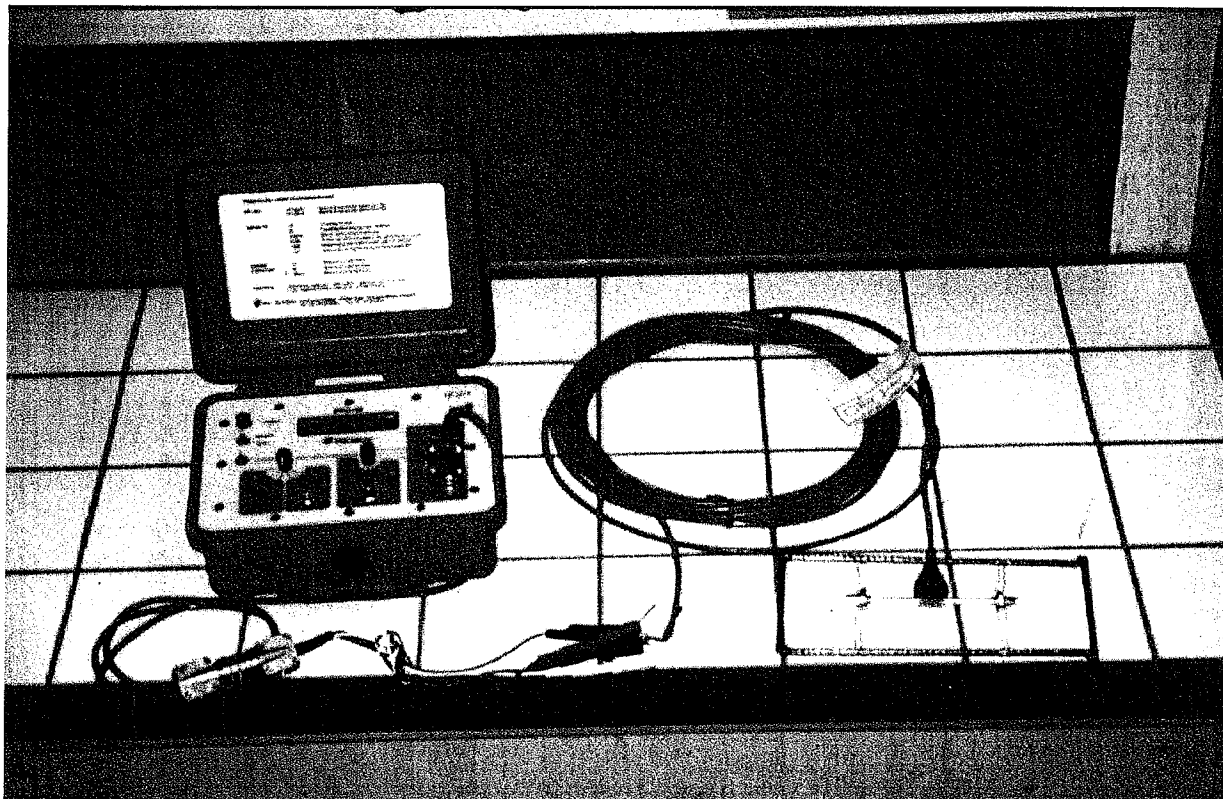


Photo 1 : Capteur TELEMAT C110 pour les mesures de déformation et température.

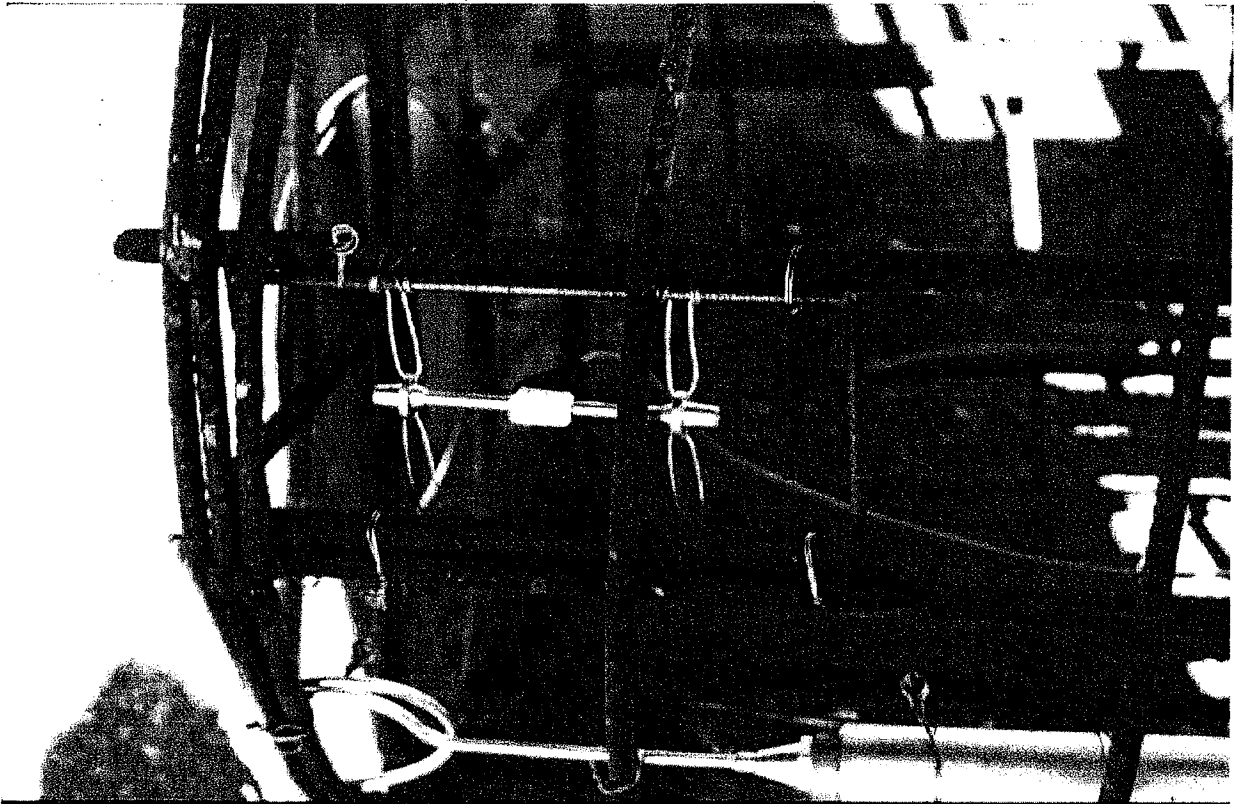


Photo 2 : Capteur TELEMAC C110 posé sur la cage métallique.

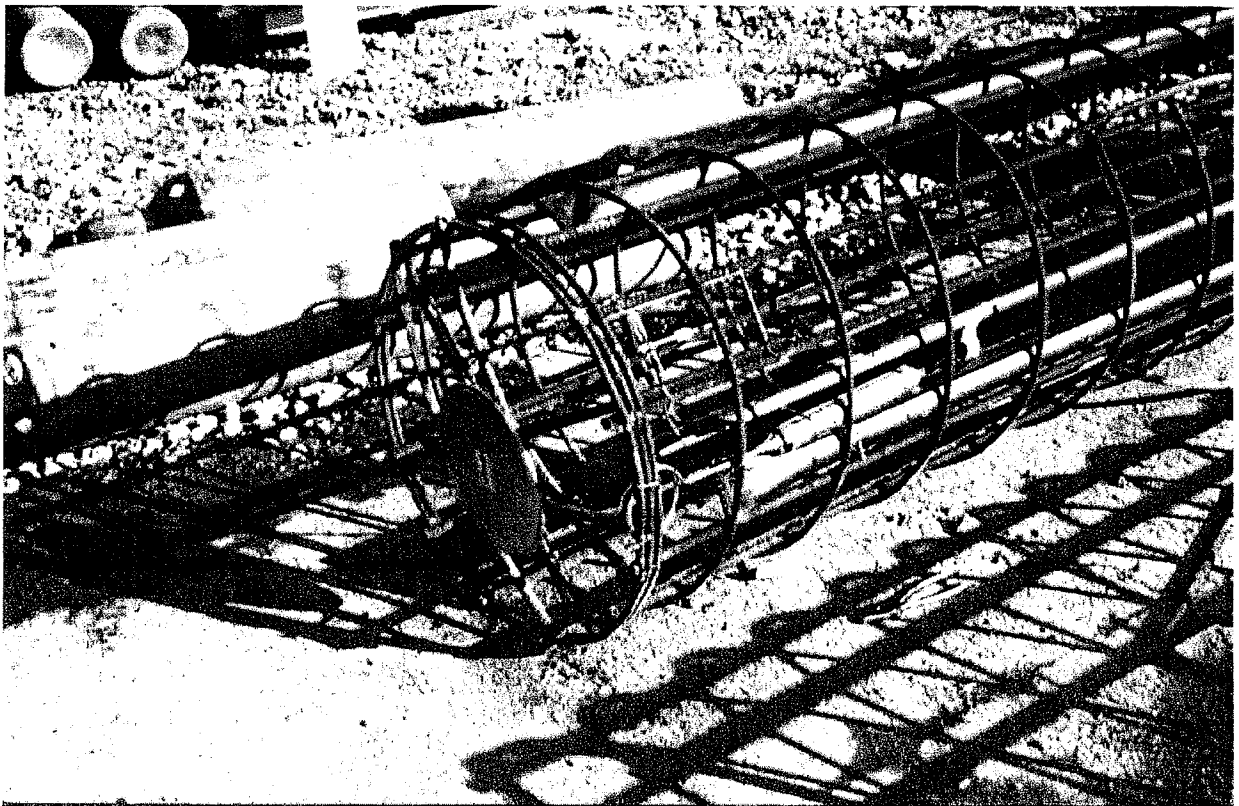


Photo 3 : Cellule de pression TELEMAC type HCV à la base de l'armature



Photo 4 : Fibre optique pour la mesure de la déformation radiale.

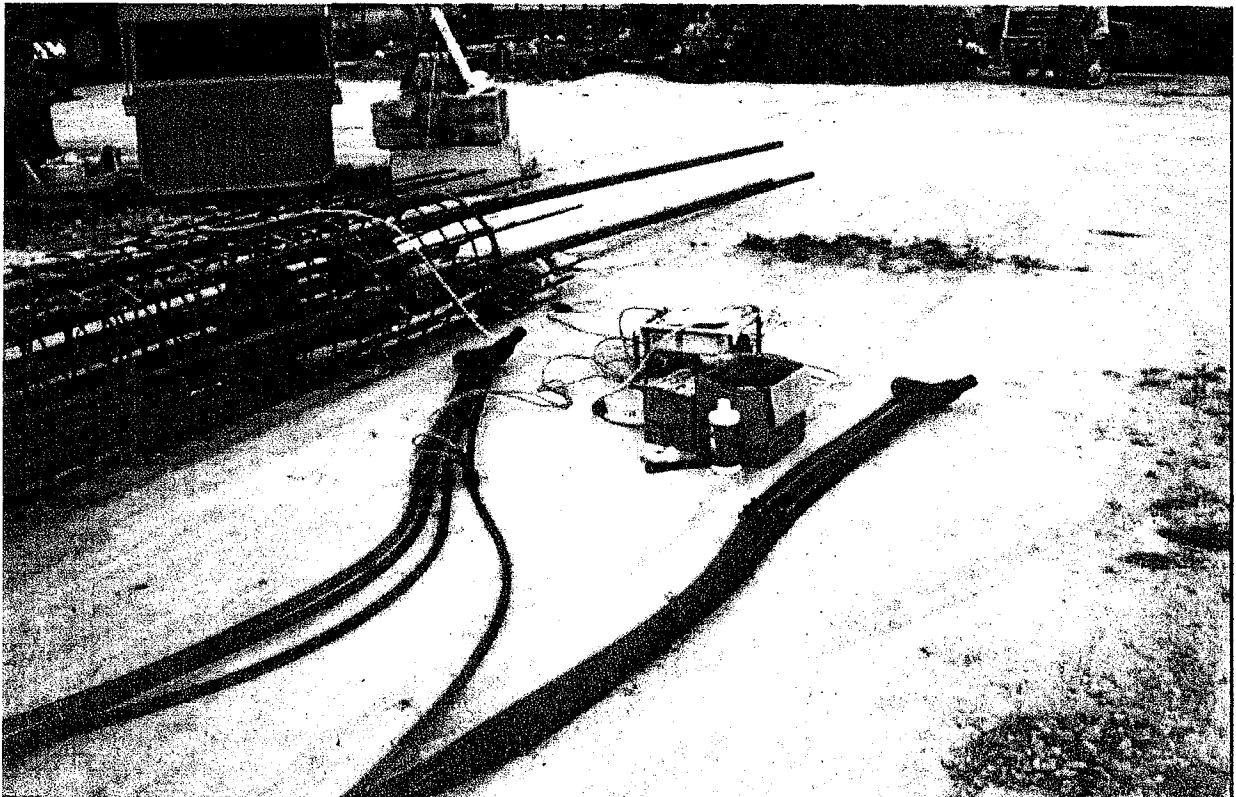


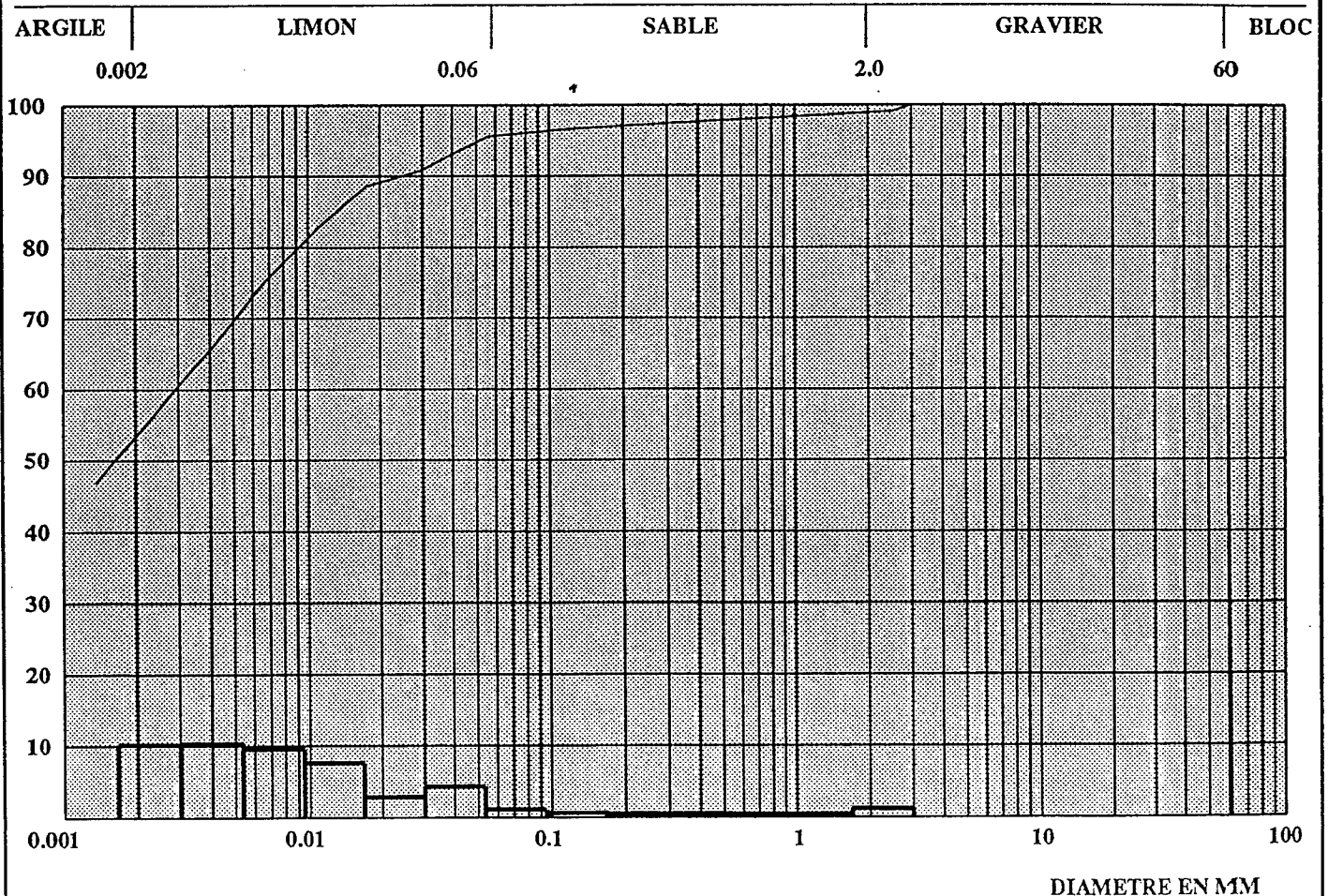
Photo 5 : Vue de la phase de pose des tubes pour fluide caloporteur

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY 40-2 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN BERNE		
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	16.0	VRAC	S1-a		26.3.98	17/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE		G. GRUAZ		LG		

Masse Tamisée [g]	Tamisé	Fréquence
485.0	—	□



USCS		W _L	I _p	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CM	48.2	29.1	89.0	0.000		

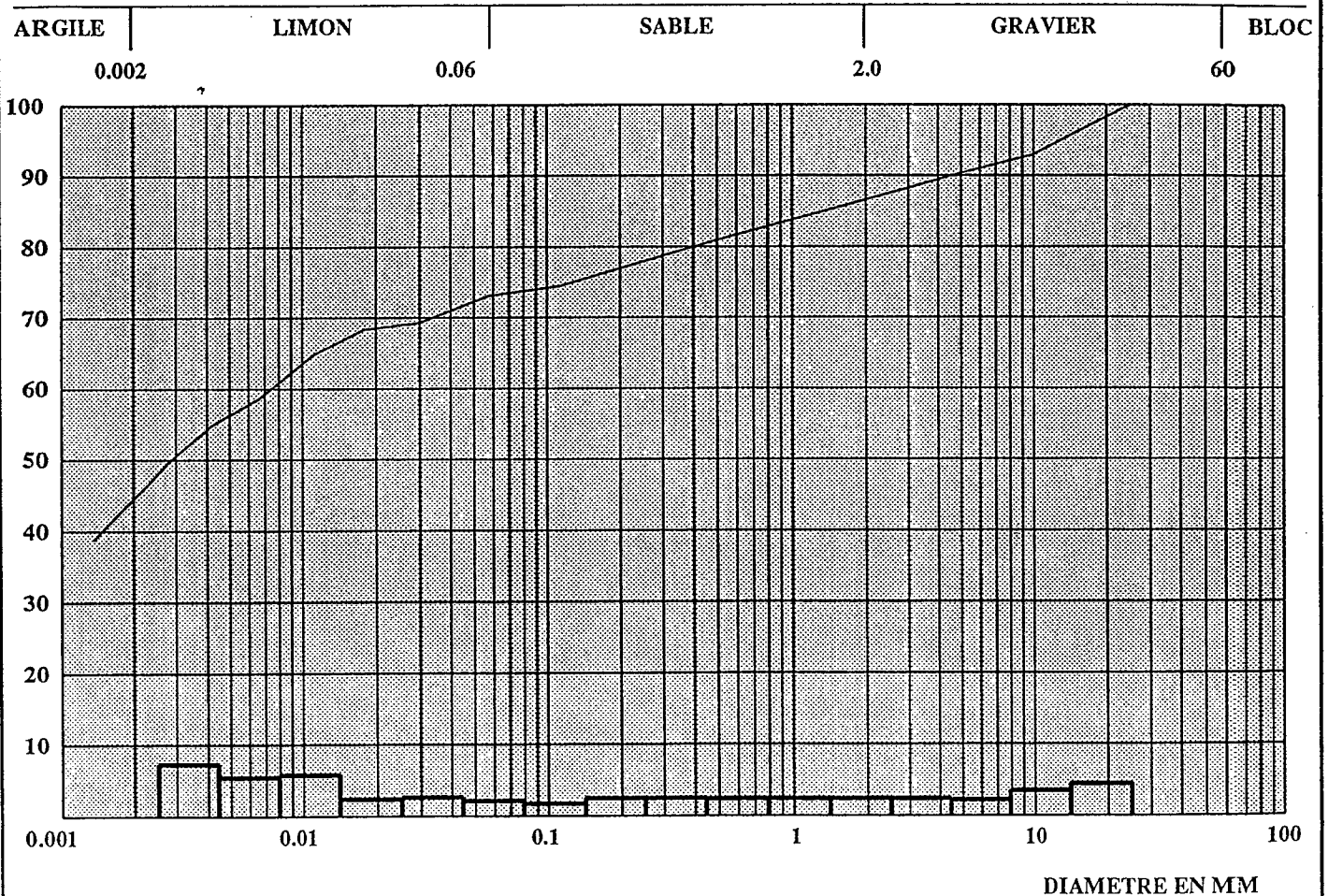
Observations :

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY 40-3 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN BERNE		
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	20.0	VRAC	Sl-a		26.3.98	17/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE		G. GRUAZ		LG		

Masse Tamisée [g]	Tamisé	Fréquence
894.4	—	□



USCS		W _L	I _p	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CM	37.8	17.8	68.5	0.000		

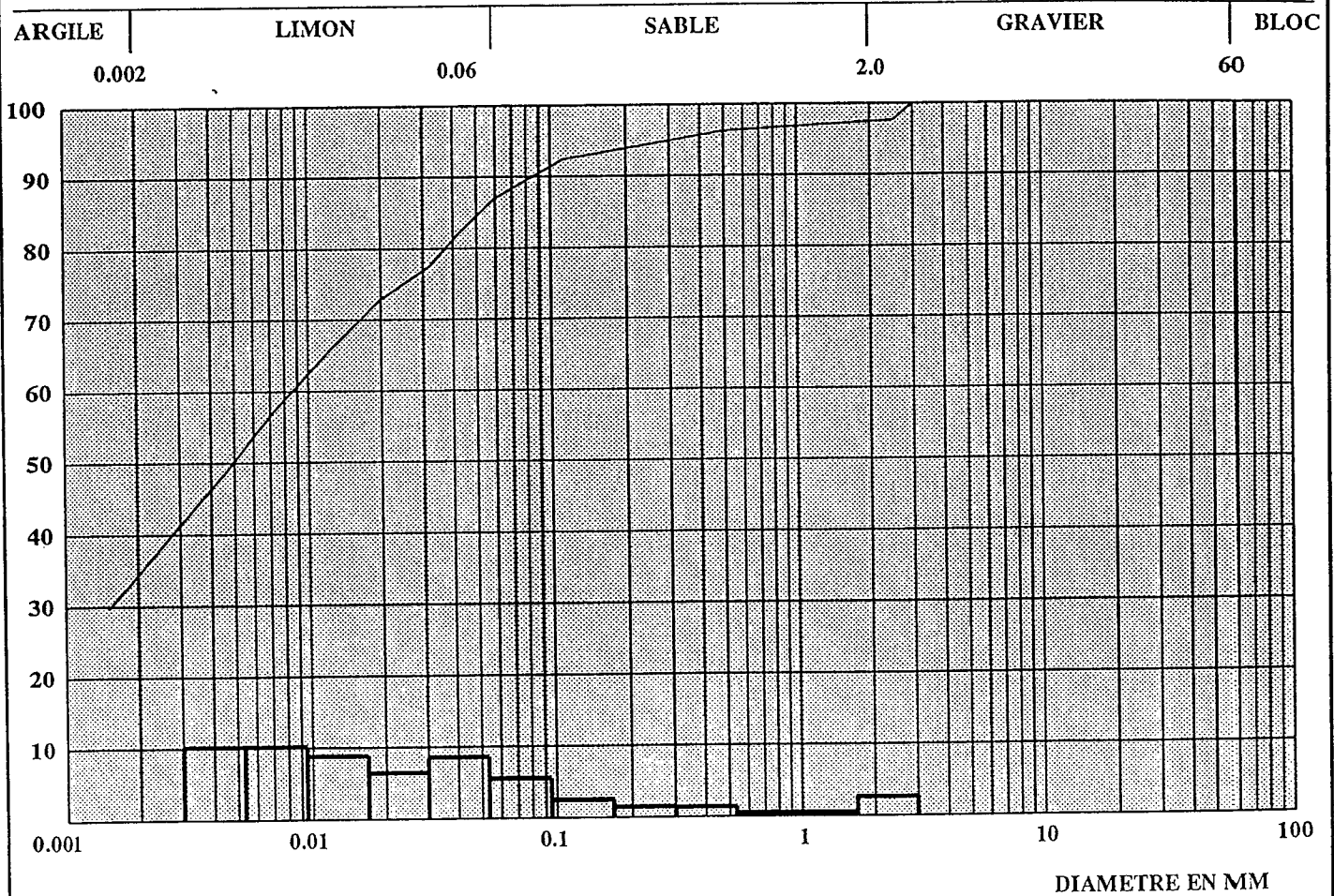
Observations :

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY40 -4 -1	PIEUX THERMIQUE			BCF-EPFL, OFEN BERNE		
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	22.0	VRAC	S1-a		26.3.98	15/ 7/98
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérat.
				nom	signature	
CHAMBRE HUMIDE				G. GRUAZ		ST

Masse Tamisée [g]	Tamiset	Fréquence
909.5	—————	□



USCS		W _L	I _P	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CM	31.8	13.2	72.9	0.000		

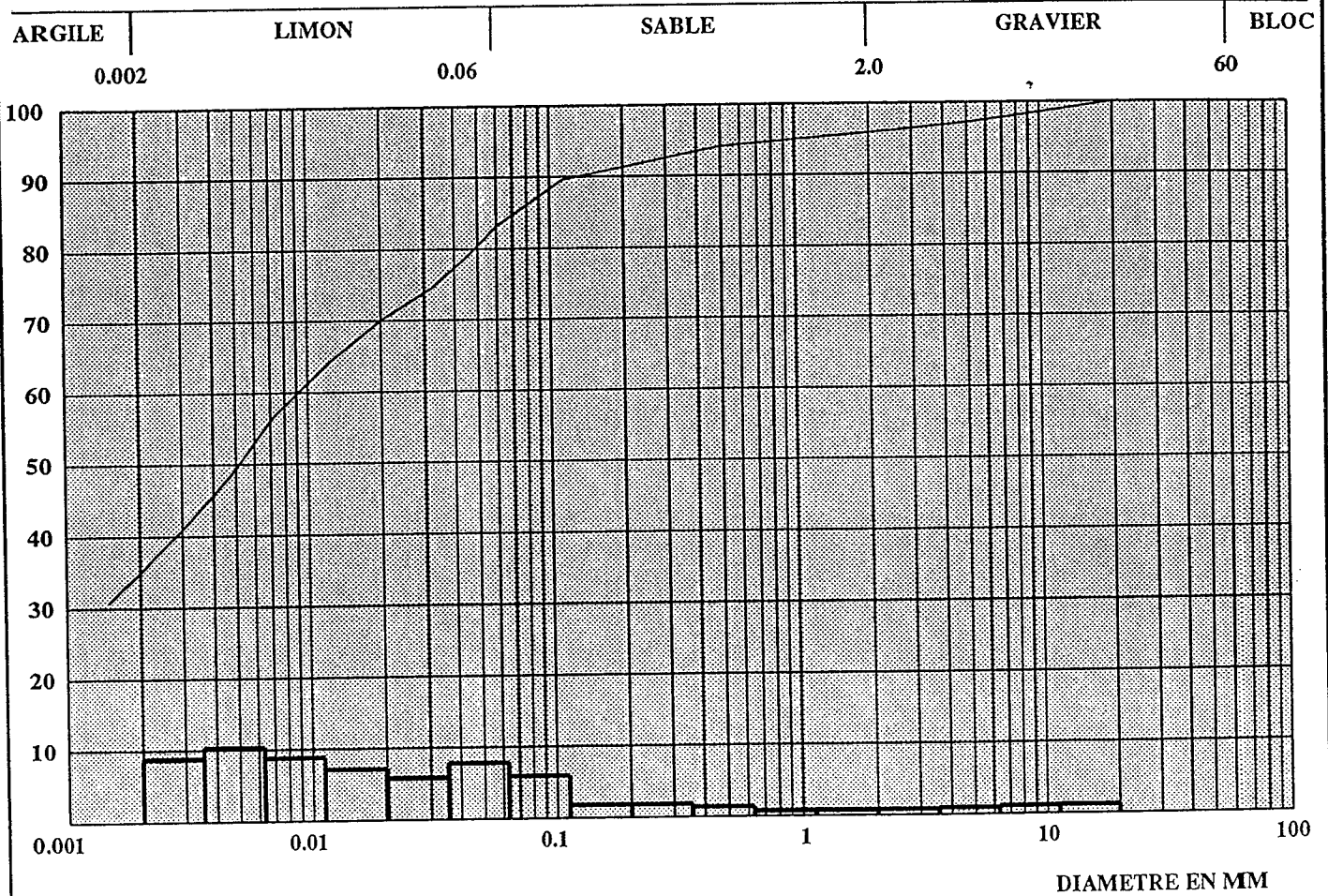
Observations :

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Commandant		Date récept. échantillon	Date essai
				nom	adresse		
SY 40-5 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN BERNE			
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par			
1	25.0	VRAC	Ls-a			26.3.98	17/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.			
		nom	signature				
CHAMBRE HUMIDE		G. GRUAZ		LG			

Masse Tamisée [g]	Tamiséat	Fréquence
1020.5	—	□



USCS		W _L	I _P	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CL	25.8	8.1	70.0	0.000		

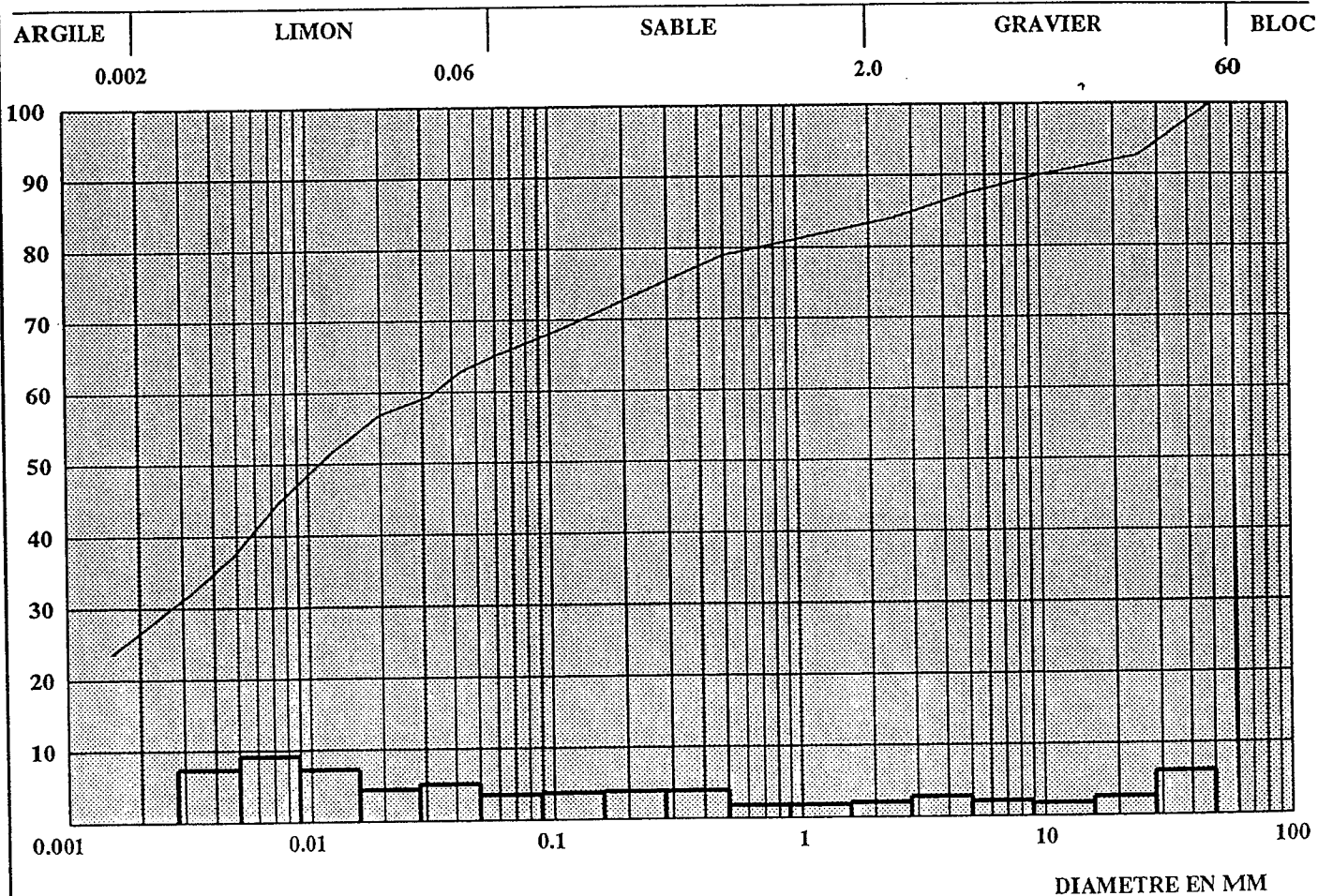
Observations :

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude			Committant		Date récept. échantillon	Date essai
				nom	adresse		
SY40 -6 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN BERNE			
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par			
1	26.0	VRAC	Sl-a			26.3.98	17/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.			
		nom	signature				
CHAMBRE HUMIDE		G. GRUAZ		J. C.			

Masse Tamisée [g]	Tamisé	Fréquence
2738.9	—————	⎓



USCS		W _L	I _p	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ASTM D2487	SN 670 008						
CL	CM	31.7	16.4	56.8	0.000		

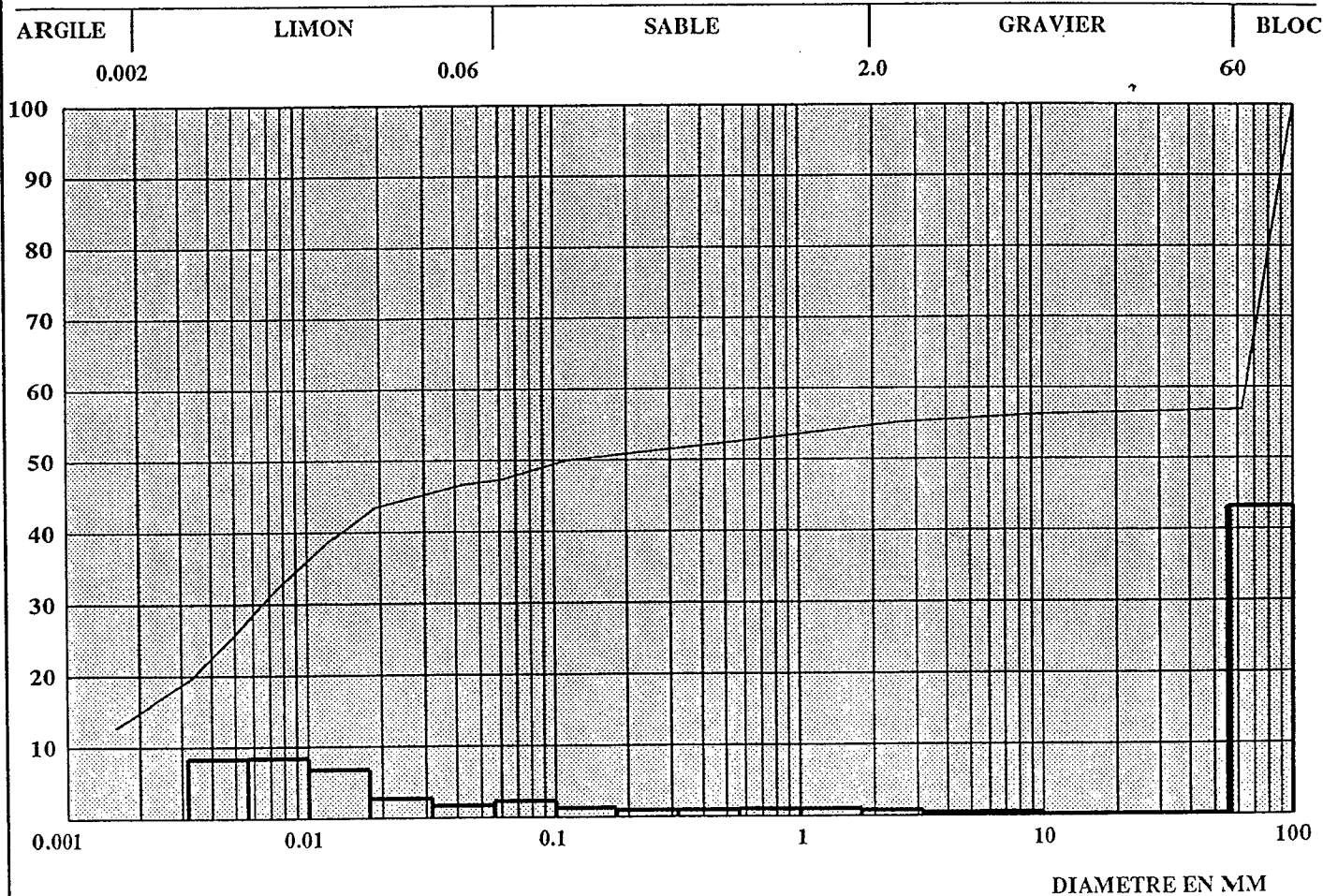
Observations :

GRANULOMETRIE

Exécuté selon SN 670 810, SN 670 816, LMS+R ES.250 et LMS+R ES.260

No éprouvette	Titre de l'étude	Commettant				
		nom		adresse		
SY40 -7 -1	PIEUX THERMIQUES	BCF-EPFL, OFEN BERNE				
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	27.0	VRAC	S1-a		26.3.98	18/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE		G. GRUAZ		LG		

Masse Tamisée [g]	Tamiset	Fréquence
4514.6	_____	<input type="checkbox"/>



USCS		W _L	I _p	% < 0.02 mm	D ₁₀ mm	C _{ud}	C _{cd}
SN 670 008a ~ASTM D2487	SN 670 008						
SC-CL	SC	37.0	19.4	43.6	0.000		

Observations : DIAMETRE MAXIMUM: 120mm

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

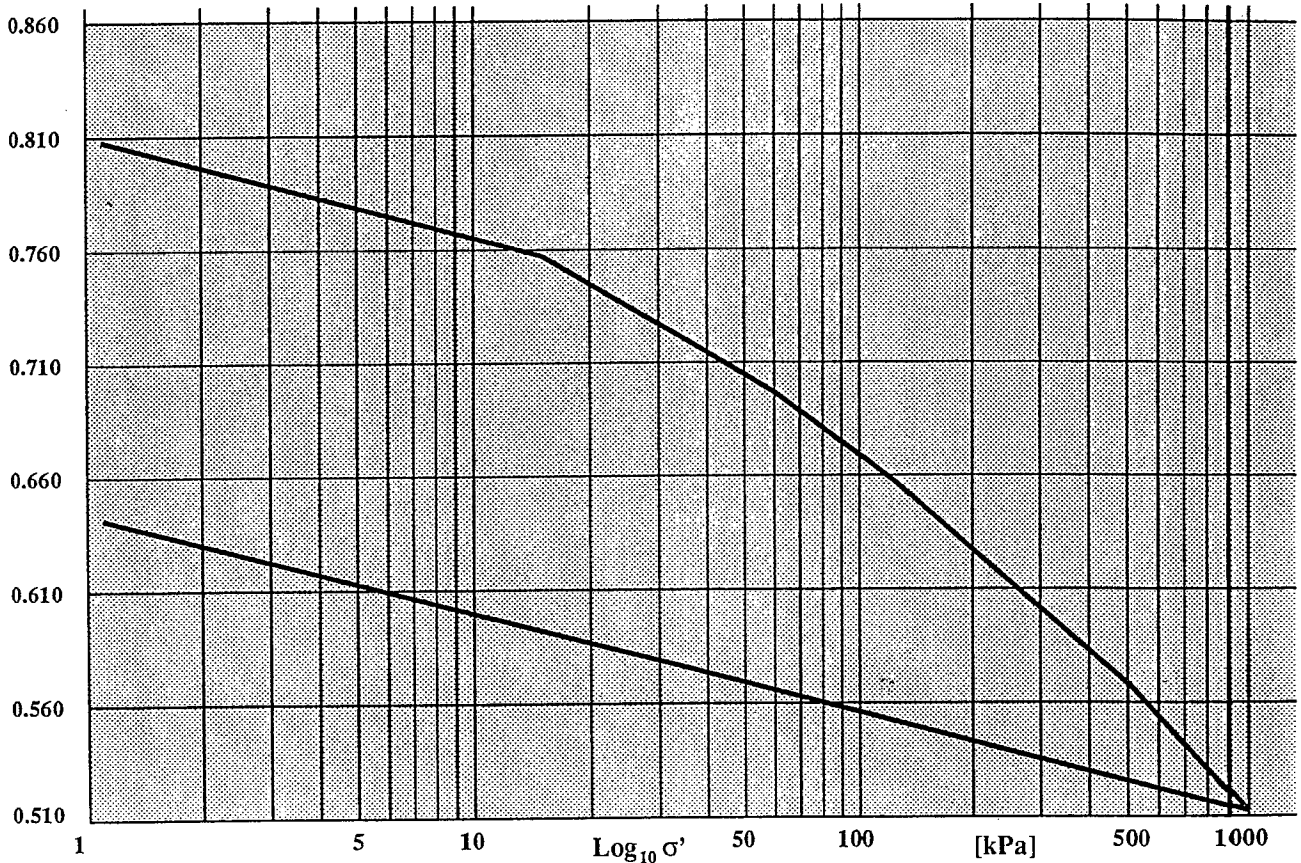
CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant				
				nom	adresse			
SY40 -1 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL ET OFEN BERN				
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai		
1	12.0	VRAC (MORCEAUX)	L s varvé		26.3.98	23/ 6/98		
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérat.		
CHAMBRE HUMIDE		CAROTTAGE		nom	signature			
				L. LALOUI		XR		
Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t.m ⁻³]	ρ_{init} [t.m ⁻³]	$\rho_{sat init}$ [t.m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
15.43	60.0	0.810	2.77	1.98	1.98	29.4	29.2	23.2

Indice des vides: e [-]

Echelle No 5



σ'	1.1	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	1.1			[kPa]
e	0.808	0.757	0.697	0.657	0.613	0.569	0.513	0.641			[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	0.49	1.30	2.77	4.71	9.06	14.01	11.73				[kPa]
pente	0.045	0.101	0.125	0.146	0.148	0.186	0.044				[-]
c_v	.87E-07	.24E-06	.27E-06	.40E-06		.33E-07	.41E-07				[m ² s ⁻¹]
k	.18E-08	.18E-08	.99E-09	.84E-09		.24E-10	.35E-10				[m s ⁻¹]

σ'											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$											[kPa]
pente											[-]
c_v											[m ² s ⁻¹]
k											[m s ⁻¹]

Observations :
ESSAI A 20°C

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

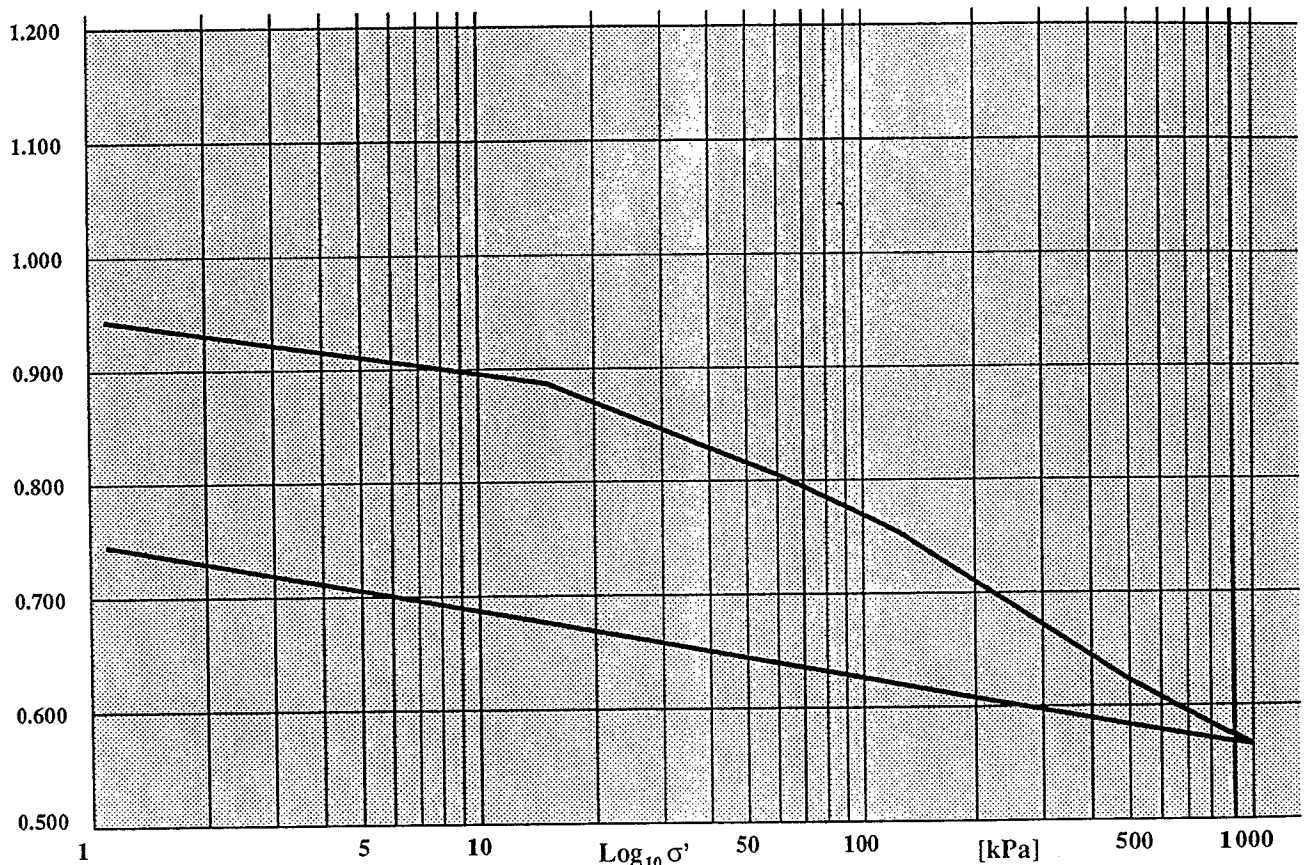
Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom		adresse
SY40 -2 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL ET OFEN BERN		
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
1	16.0	VRAC (MORCEAUX)	A 1		26.3.98	18/ 6/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE	CAROTTAGE	L. LALOUI		XR		

Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t m ⁻³]	ρ_{init} [t m ⁻³]	$\rho_{sat init}$ [t m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
15.59	60.0	0.948	2.74	1.89	1.88	35.1	34.6	27.2

Indice des vides: e [-]

Echelle No 4



σ'	1.1	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	1.1			[kPa]
e	0.943	0.887	0.805	0.754	0.689	0.622	0.565	0.745			[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	0.47	1.03	2.27	3.41	6.31	14.14	8.67				[kPa]
pente	0.050	0.136	0.162	0.213	0.222	0.191	0.061				[-]
c_v	.18E-07	.34E-07	.36E-07	.46E-07		.66E-07	.12E-07				[m ² s ⁻¹]
k	.37E-09	.32E-09	.16E-09	.14E-09		.46E-10	.13E-10				[m s ⁻¹]

σ'											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$											[kPa]
pente											[-]
c_v											[m ² s ⁻¹]
k											[m s ⁻¹]

Observations :
ESSAI A 20 °C

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

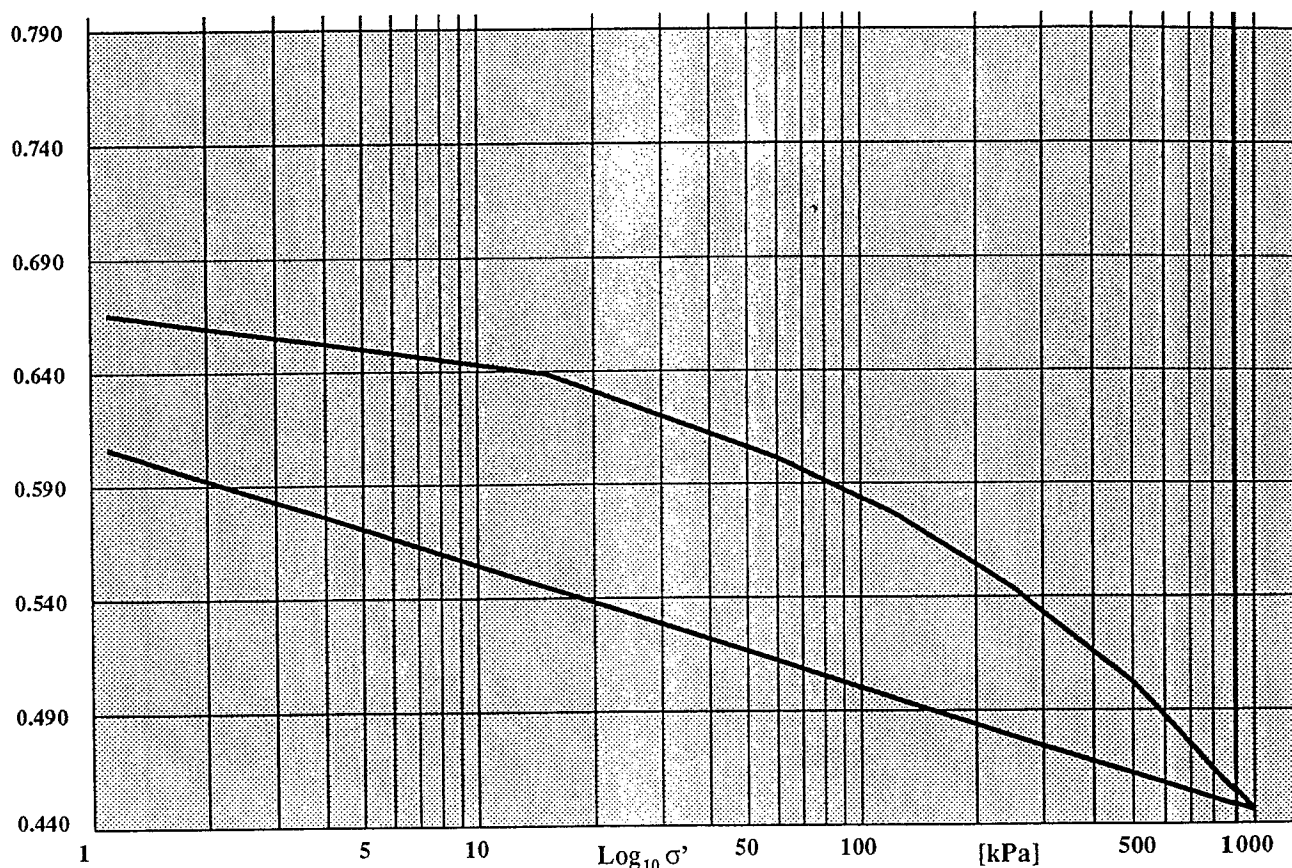
CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No épreuve	Titre de l'étude			Commandant				
				nom	adresse			
SY40 -4 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL ET OFEN BERN				
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai		
1	22.0	VRAC (MORCEAUX)	L -s VARVE		26.3.98	18/ 6/98		
Mode conservation	Mode préparation épreuve(s)	Ingénieur responsable		Opérat.				
		nom	signature					
CHAMBRE HUMIDE	CAROTTAGE	L. LALOUI		XR				
Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t m ⁻³]	ρ_{init} [t m ⁻³]	$\rho_{sat init}$ [t m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
15.35	60.0	0.652	2.74	2.04	2.07	22.0	23.8	22.1

Indice des vides: e [-]

Echelle No 5



σ'	1.1	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	1.1			[kPa]
e	0.666	0.639	0.601	0.576	0.544	0.502	0.446	0.606			[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	0.86	1.96	4.08	6.16	9.26	13.32	8.99				[kPa]
pente	0.024	0.062	0.080	0.106	0.138	0.187	0.054				[-]
c_v	.28E-07	.73E-07	.98E-07	.12E-06	.16E-06	.26E-07	.15E-07				[m ² s ⁻¹]
k	.32E-09	.37E-09	.24E-09	.20E-09	.17E-09	.20E-10	.16E-10				[m s ⁻¹]

σ'											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$											[kPa]
pente											[-]
c_v											[m ² s ⁻¹]
k											[m s ⁻¹]

Observations :
ESSAI A 20°C

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

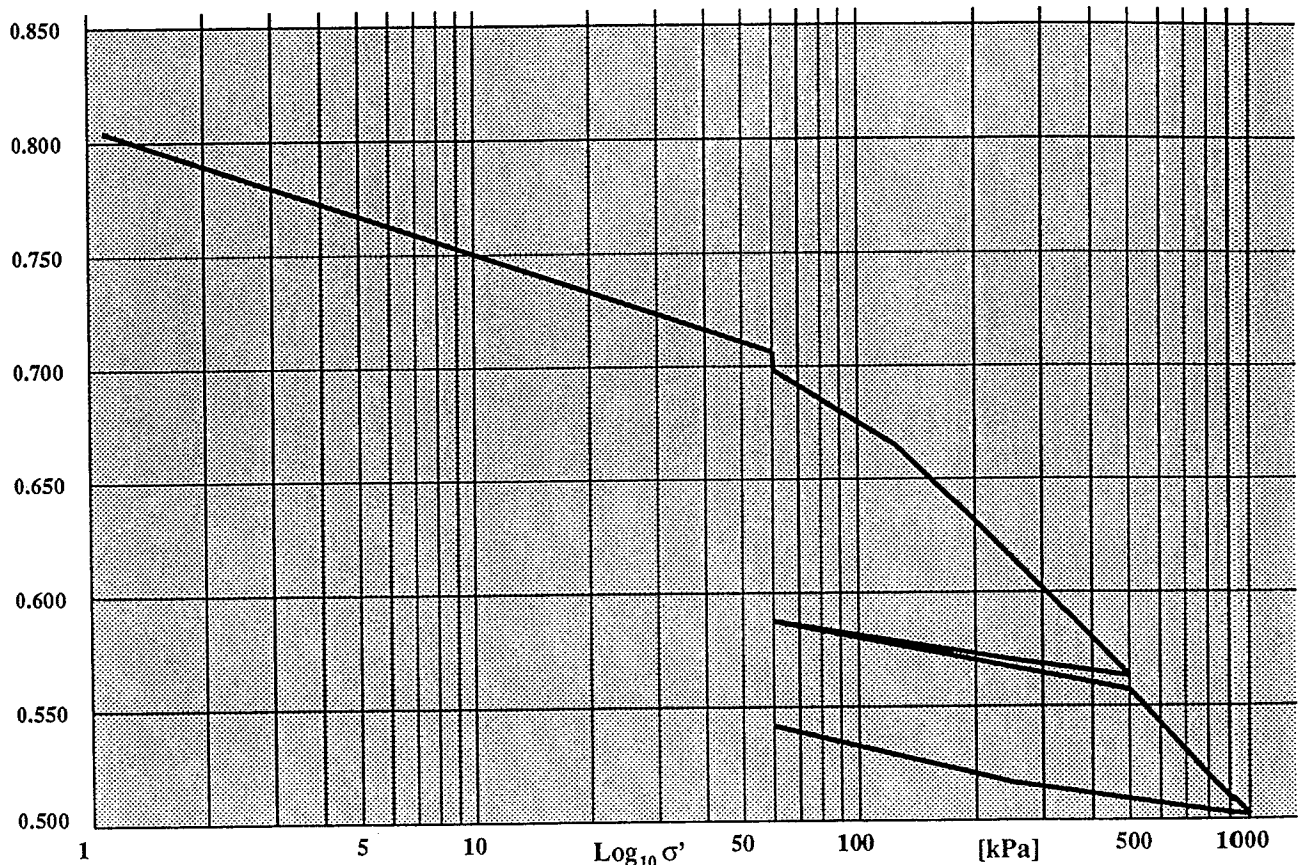
Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom		adresse
SY40 -4 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN-BERNE		OFEN-BERNE
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
P68	12.0 m	CAROTTE	L a		21.7.98	5/10/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable			Opérat.	
		nom		signature		
CHAMBRE HUMIDE	CAROTTAGE	L. LALOU			XR	

Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t m ⁻³]	ρ_{ind} [t m ⁻³]	$\rho_{sat,init}$ [t m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat,init}$ [%]	$w_{sat,final}$ [%]
19.90	80.0	0.807	2.77	2.00	1.98	30.5	29.1	19.6

Indice des vides: e [-]

Echelle No 5



σ'	1.1	60.0	60.5	125.0	250.0	500.0	250.0	60.0	500.0		[kPa]
e	0.804	0.706	0.698	0.665	0.615	0.563	0.570	0.588	0.557		[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	1.08	0.10	3.29	4.19	7.72	54.48	17.11	22.76			[kPa]
pente	0.056	2.242	0.105	0.165	0.174	0.024	0.028	0.033			[-]
c_v	.98E-07	.95E-10	.33E-06	.15E-06	.27E-06	.84E-08	.41E-07	.35E-08			[m ² s ⁻¹]
k	.90E-09	.90E-11	.10E-08	.36E-09	.36E-09	.15E-11	.24E-10	.16E-11			[m s ⁻¹]

σ'	500.0	1000.0	250.0	60.0							[kPa]
e	0.557	0.502	0.516	0.542							[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	14.10	76.58	11.41								[kPa]
pente	0.183	0.024	0.041								[-]
c_v	.23E-06	.53E-07	.29E-06								[m ² s ⁻¹]
k	.17E-09	.70E-11	.26E-09								[m s ⁻¹]

Observations :

ESSAI A 40°C, PALIERS A 60 kPa (CHANGEMENTS DE TEMPERATURE) NON TRAITES

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

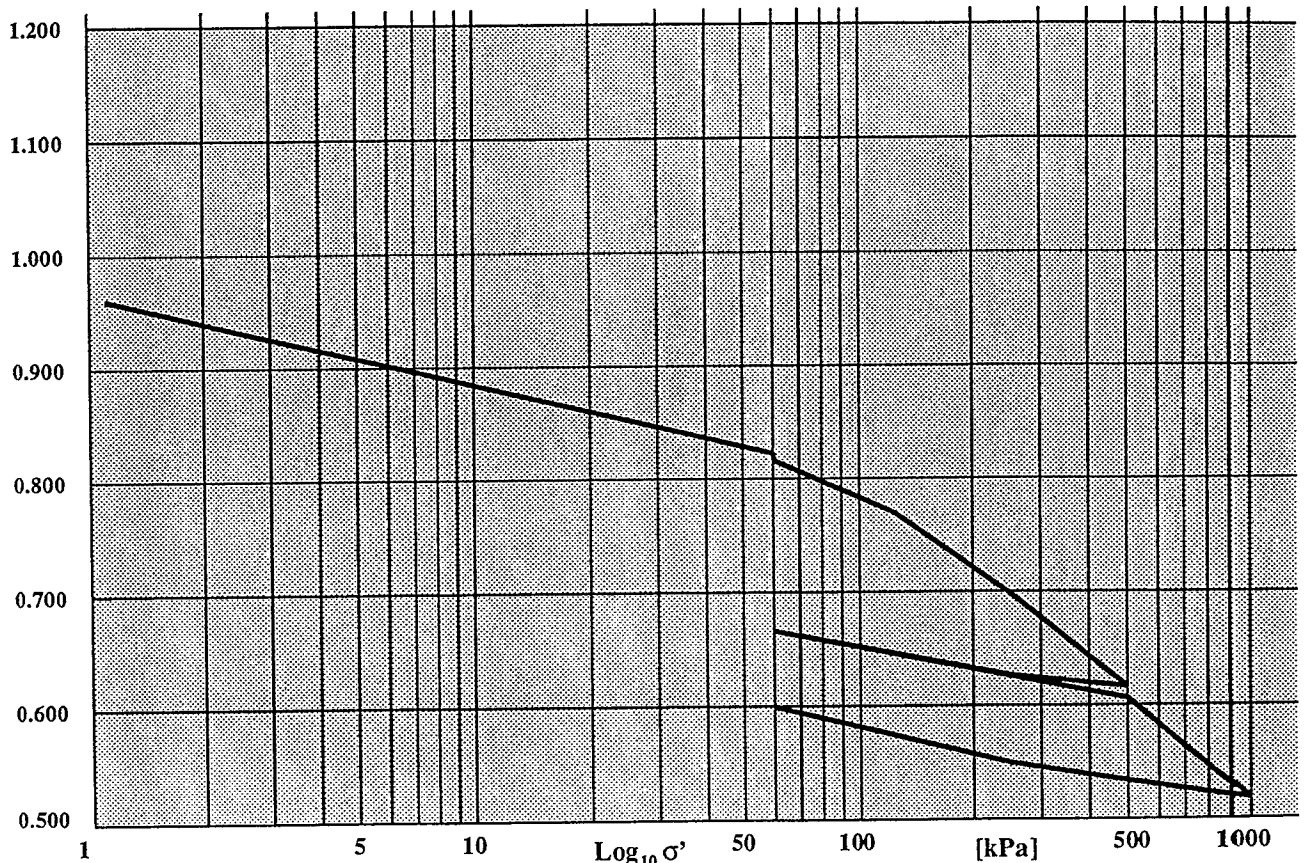
Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant			
				nom		adresse	
SY40 -5 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN-BERNE		OFEN-BERNE	
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai	
P68	16.0 m	CAROTTE	L a		21.7.98	6/10/98	
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérat.	
				nom	signature		
CHAMBRE HUMIDE		CAROTTAGE		L. LALOU		ST	

Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t m ⁻³]	ρ_{init} [t m ⁻³]	$\rho_{sat init}$ [t m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
20.15	80.0	0.963	2.74	1.88	1.87	36.3	35.2	21.9

Indice des vides: e [-]

Echelle No 4



σ'	1.1	60.0	60.5	125.0	250.0	500.0	250.0	60.0	500.0		[kPa]
e	0.960	0.822	0.816	0.769	0.698	0.616	0.626	0.666	0.606		[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$		0.83	0.13	2.50	3.14	5.17	39.50	7.85	12.27		[kPa]
pente		0.079	1.838	0.149	0.234	0.273	0.034	0.063	0.065		[-]
c_v		.19E-07	.81E-10	.49E-07	.65E-07	.85E-07	.46E-07	.77E-07	.20E-06		[m ² s ⁻¹]
k		.22E-09	.59E-11	.20E-09	.21E-09	.16E-09	.12E-10	.98E-10	.16E-09		[m s ⁻¹]

σ'	500.0	1000.0	250.0	60.0							[kPa]
e	0.606	0.518	0.550	0.599							[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$		9.12	36.18	5.91							[kPa]
pente		0.293	0.052	0.080							[-]
c_v		.93E-07	.29E-06								[m ² s ⁻¹]
k		.10E-09	.80E-10								[m s ⁻¹]

Observations :

ESSAI A 40°C, PALIERS A 60 kPa (CHANGEMENTS DE TEMPERATURE) NON TRAITES

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

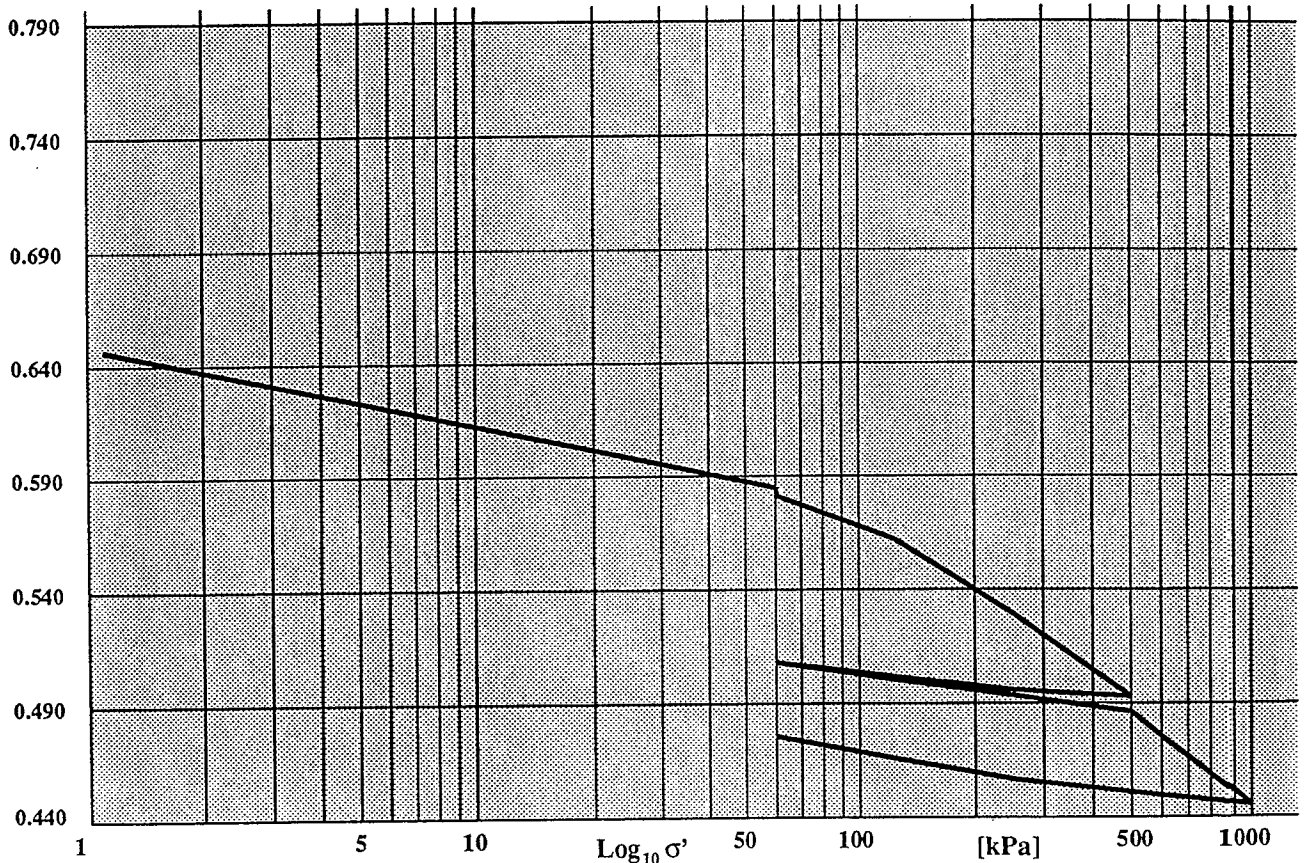
Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom		adresse
SY40 -6 -1	PIEUX THERMIQUES			BCF-EPFL, OFEN-BERNE		OFEN-BERNE
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai
P68	22.0 m	CAROTTE	L a		21.7.98	6/10/98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.		
		nom	signature			
CHAMBRE HUMIDE	CAROTTAGE	L. LALOU		ST		

Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [$t \cdot m^{-3}$]	ρ_{init} [$t \cdot m^{-3}$]	$\rho_{sat init}$ [$t \cdot m^{-3}$]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
20.55	80.0	0.647	2.74	2.04	2.05	22.7	23.6	17.3

Indice des vides: e [-]

Echelle No 5



σ'	1.1	60.0	60.5	125.0	250.0	500.0	250.0	60.0	500.0		[kPa]
e	0.646	0.585	0.581	0.562	0.529	0.493	0.496	0.508	0.486		[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	1.57	0.21	5.34	5.95	10.50	129.35	23.17	30.43			[kPa]
pente	0.035	1.023	0.061	0.109	0.121	0.010	0.020	0.024			[-]
c_v	.70E-07	.17E-06	.11E-06	.93E-07	.22E-06	.40E-07	.36E-06	.44E-09			[$m^2 \cdot s^{-1}$]
k	.44E-09	.79E-08	.20E-09	.16E-09	.21E-09	.31E-11	.15E-09	.14E-12			[$m \cdot s^{-1}$]

σ'	500.0	1000.0	250.0	60.0							[kPa]
e	0.486	0.445	0.457	0.476							[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	18.21	96.61	14.57								[kPa]
pente	0.136	0.019	0.031								[-]
c_v	.19E-08	.22E-07	.25E-06								[$m^2 \cdot s^{-1}$]
k	.11E-11	.22E-11	.17E-09								[$m \cdot s^{-1}$]

Observations :

ESSAI A 40°C, PALIERS A 60 kPa (CHANGEMENTS DE TEMPERATURE) NON TRAITES

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

Page 1/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude			Committant	
				nom	adresse
SY40-1	Pieux Thermiques EPFL			BCF - EPFL et OFEN	Berne
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Date réception échantillon	Date essai
1/	12 m	vrac	Limon sableux argileux var	26.03.98	14.05.98
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérateur	
		nom	signature		
Chambre climatique	reconstitué dans tube	G.Gruaz		GG	

CONSOLIDATION							$\rho_s [t^*m^{-3}] = 2.769$							
σ_c [KPa]	avant consolidation						après consolidation							
	H init [mm]	D init [mm]	ω init [%]	ρ_d init [t^*m ⁻³]	S_r init [%]	e_0 [-]	dVc/V [%]	H final [mm]	D final [mm]	ω final [%]	ρ_d final [t^*m ⁻³]	S_r final [%]	e_c [-]	
300	100.0	50.0	26.5	1.597	100	0.73	11.9	95.8	47.9	19.0	1.813	100	0.53	
400	102.0	50.0	26.5	1.580	98	0.75	13.1	97.3	47.7	18.2	1.818	97	0.52	
500	103.0	50.0	26.0	1.587	97	0.75	13.3	98.2	47.7	17.7	1.829	95	0.51	

COMPRESSION				Type de l'essai: consolidé/drainé								
σ_c [KPa]	Remaniement	vitesse déf. [mm*min ⁻¹]	Contrepress. [Kpa]	résistance ultime								
				σ_3' [KPa]	σ_1' [KPa]	q [KPa]	P' [KPa]	u [KPa]	ϵ_l [%]	ϵ_v [%]	σ_1'/σ_3' [-]	
300	0	0.005	0	305	891	587	500	0	17.1	2.9	2.93	
400	0	0.005	0	401	1171	770	658	0	19.1	3.5	2.92	
500	0	0.005	0	503	1488	985	831	0	17.7	3.6	2.96	

PARAMETRES													
σ_c [KPa]	élastiques				Mohr-Coulomb		Drucker-Prager		Cam-Clay				
	E [MPa]	ν [-]	G [MPa]	K [MPa]	c' [KPa]	ϕ' [°]	α [°]	k [KPa]	M [-]	κ [-]	λ [-]	Γ [-]	N [-]
300	104.5	0.22	66.99	62.15	0.00	29.5	13.0	0.00	1.18	0.01	0.08	0.68	0.73
400	173.7		111.31	103.28								0.68	
500	290.5		186.14	172.71								0.68	

avec: $E = E_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^n$ $G = \frac{E}{2(1-\nu)}$ $\alpha = \frac{\tan\phi'}{\sqrt{3(3-\sin\phi')}}$ $M = \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'}$ $\Gamma = N - (\lambda - \kappa) \ln 2$

$n = 2.0198$ $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ $k = \frac{6c'\cos\phi'}{\sqrt{3(3-\sin\phi')}}$ $\kappa = (1+e_c) \cdot \frac{K}{P}$

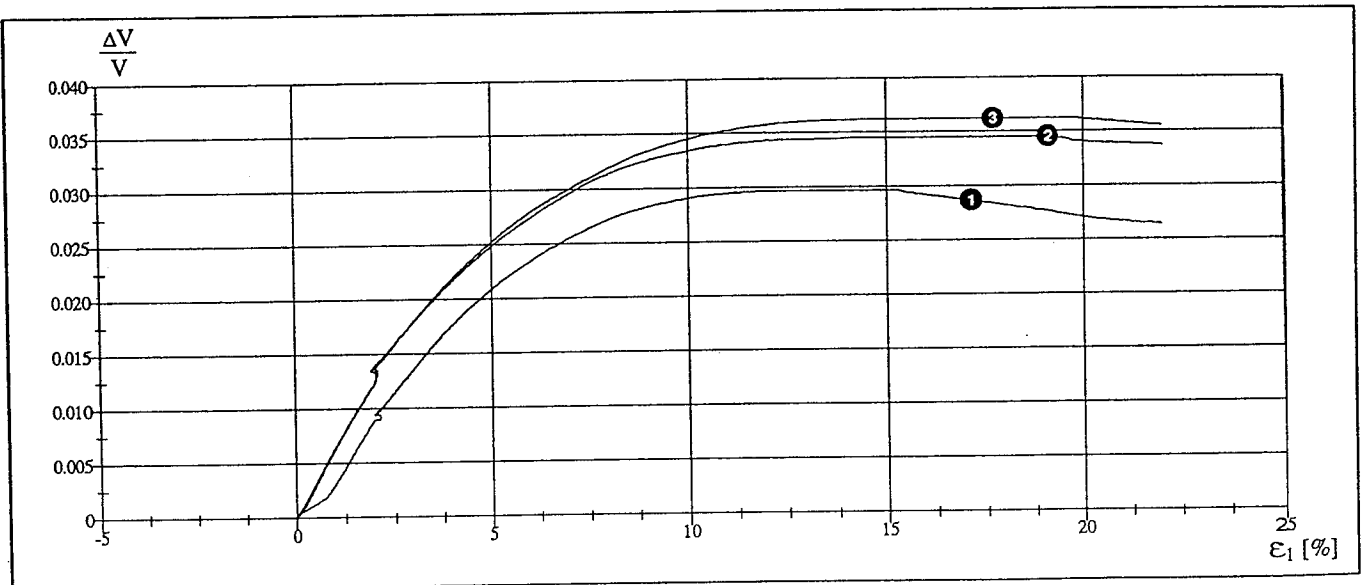
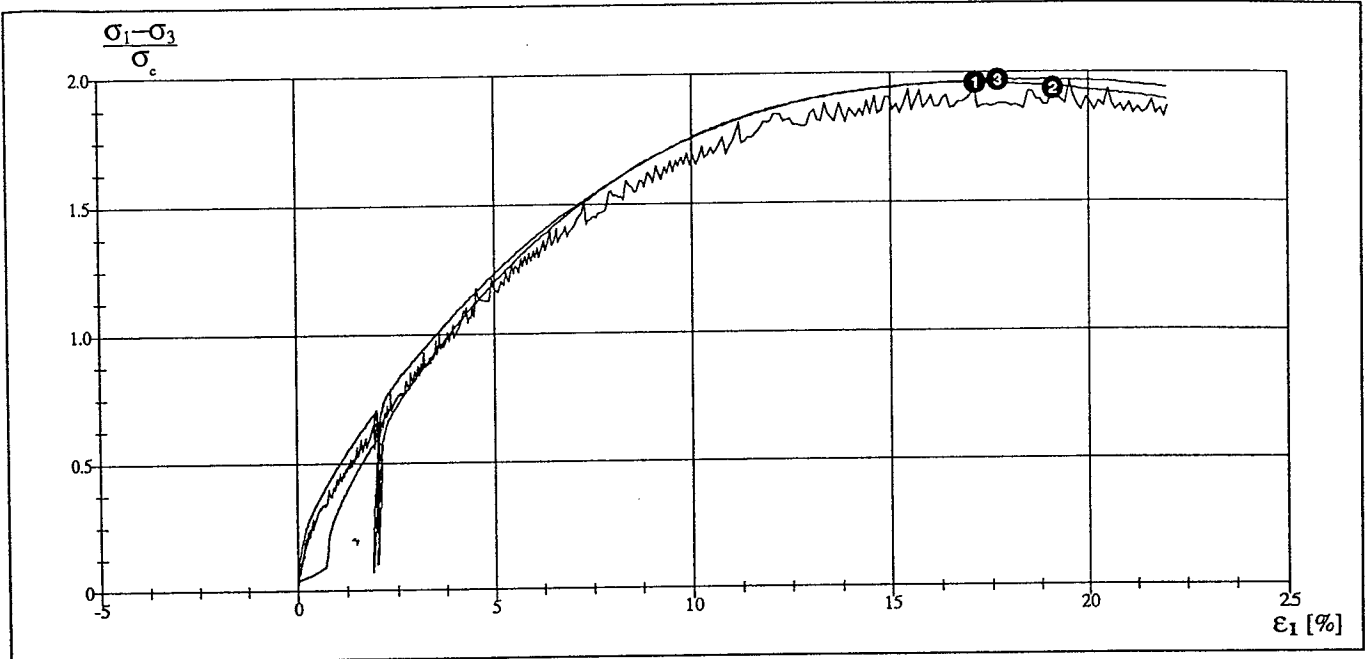
Observations:

Page 2/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-1	Pieux Thermiques EPFL		GG	14.05.98



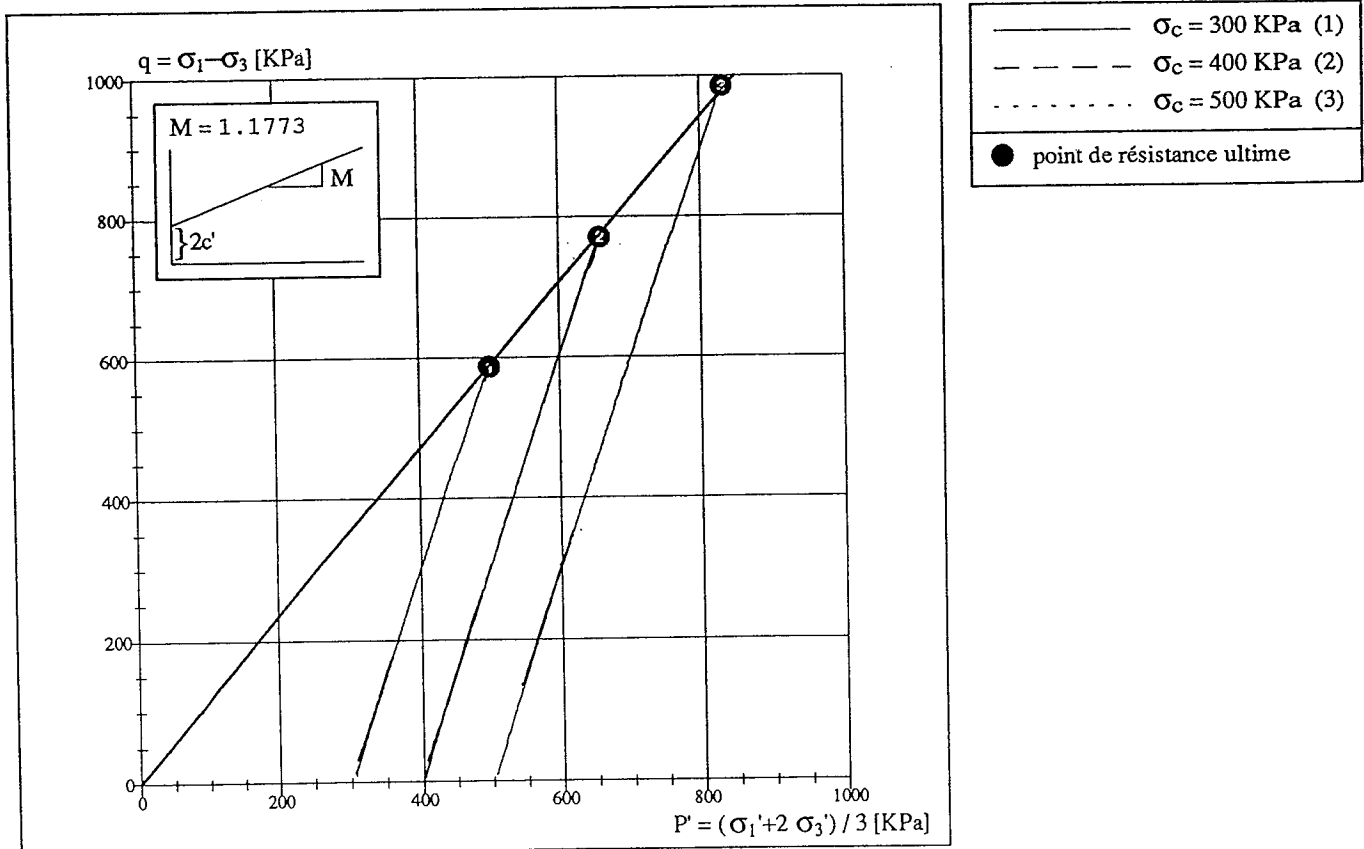
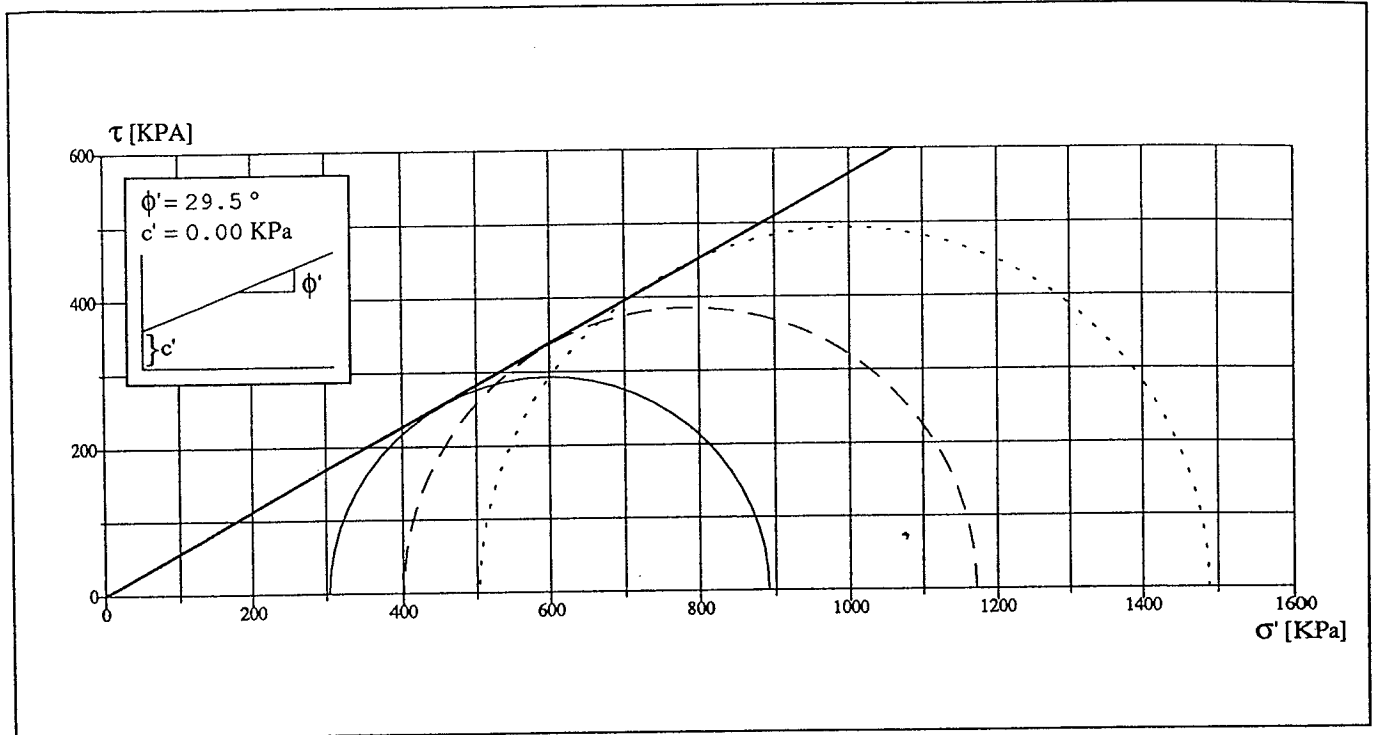
$\sigma_c = 300$ KPa (1)	●	point de résistance ultime
$\sigma_c = 400$ KPa (2)		
$\sigma_c = 500$ KPa (3)		

Page 3/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

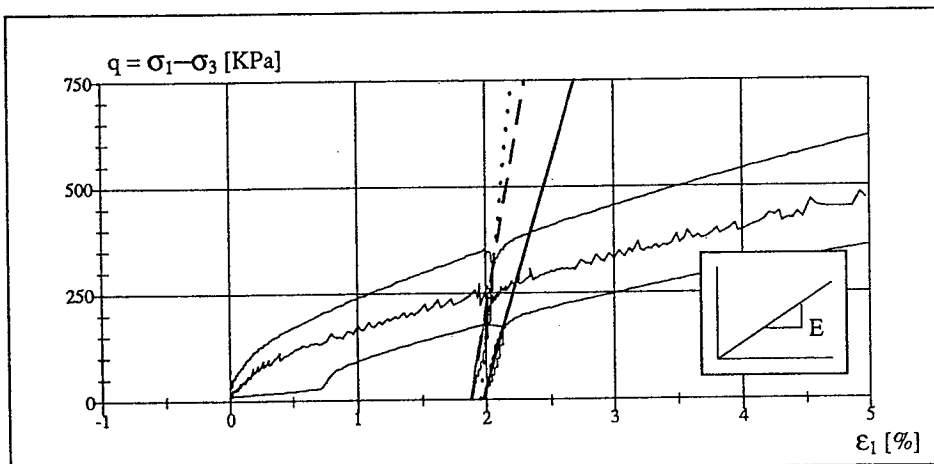
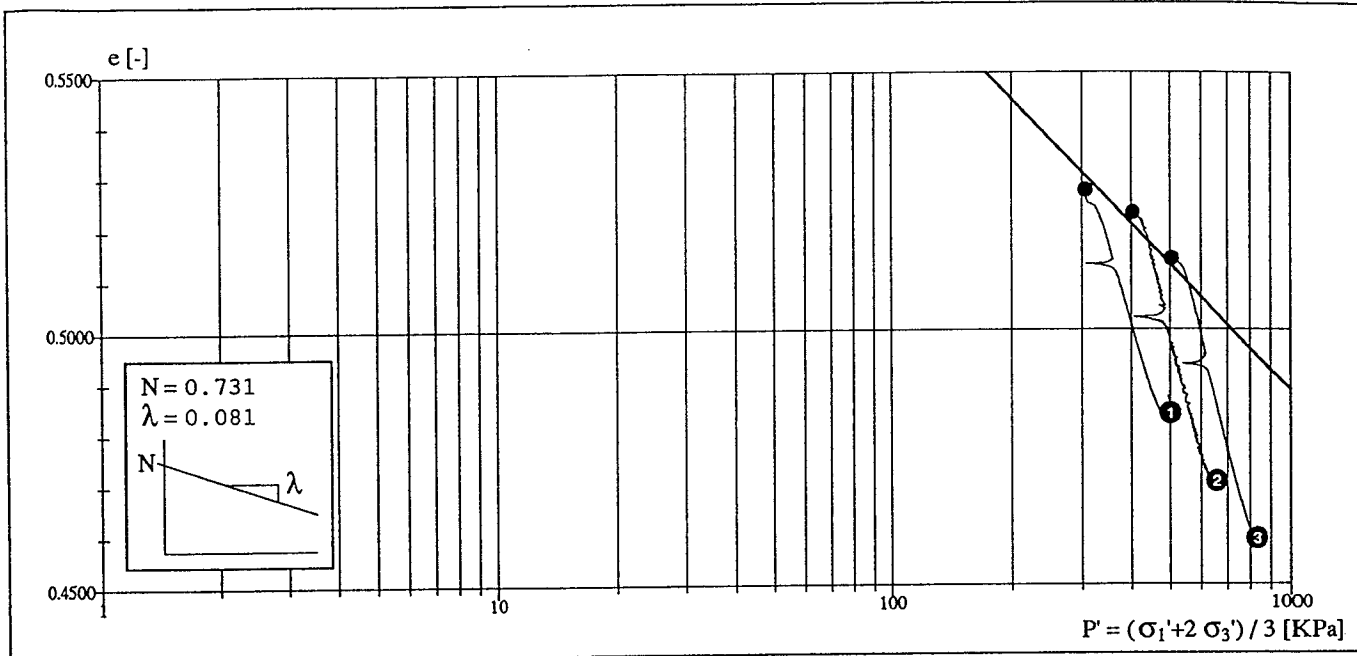
No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-1	Pieux Thermiques EPFL		GG	14.05.98



LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

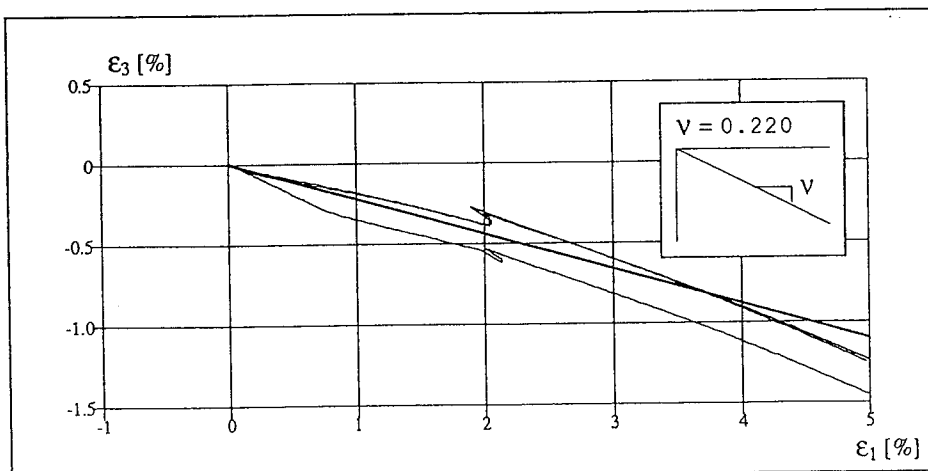
No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-1	Pieux Thermiques EPFL		GG	14.05.98



P = σ_c	E
300	104.54
400	173.72
500	290.50

} n = 2.0198

- $\sigma_c = 300$ KPa (1)
- $\sigma_c = 400$ KPa (2)
- $\sigma_c = 500$ KPa (3)
- point de résistance ultime
- point de départ



Page 1/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETCS F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY40-2	Pieux Thermiques EPFL			BCF - EPFL et OFEN	Berne	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Date réception échantillon	Date essai
1/	16 m	vrac	Limon très argileux		26.03.98	19.05.98
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérateur
				nom	signature	
Chambre climatique		reconstitué dans tube		G.Gruaz		GG

CONSOLIDATION							$\rho_s [t^*m^{-3}] = 2.735$						
σ_c [KPa]	avant consolidation						après consolidation						
	H init [mm]	D init [mm]	ω init [%]	ρ_d init [t^*m ⁻³]	S_r init [%]	e_0 [-]	dVc/V [%]	H final [mm]	D final [mm]	ω final [%]	ρ_d final [t^*m ⁻³]	S_r final [%]	e_c [-]
300	103.0	50.0	32.8	1.433	99	0.91	13.7	98.0	47.6	23.2	1.661	98	0.65
400	111.5	50.0	34.2	1.405	99	0.95	15.8	105.3	47.2	22.9	1.668	98	0.64
500	102.0	50.0	31.4	1.468	99	0.86	16.8	95.9	47.0	19.9	1.765	99	0.55

COMPRESSION				Type de l'essai: consolidé/non-drainé							
σ_c [KPa]	Remaniement	vitesse déf. [mm*min ⁻¹]	Contrepress. [Kpa]	résistance ultime							
				σ_3' [KPa]	σ_1' [KPa]	q [KPa]	P' [KPa]	u [KPa]	ϵ_1 [%]	ϵ_v [%]	σ_1'/σ_3' [-]
300	0	0.003	0	177	422	246	258	120	15.5	0.0	2.39
400	0	0.003	0	242	563	321	349	160	13.8	0.0	2.33
500	0	0.003	0	282	662	380	409	220	12.7	0.0	2.35

PARAMETRES													
σ_c [KPa]	élastiques				Mohr-Coulomb		Drücker-Prager		Cam-Clay				
	E [MPa]	ν [-]	G [MPa]	K [MPa]	c' [KPa]	ϕ' [°]	α [°]	k [KPa]	M [-]	κ [-]	λ [-]	Γ [-]	N [-]
300	50.6	0.50	-	-	6.94	22.8	9.8	8.49	0.89	-	0.42	-	1.70
400	53.1		-	-						-		-	
500	76.0		-	-						-		-	
avec:													
$E = E_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^n$		$G = \frac{E}{2(1-\nu)}$		$\alpha = \frac{\tan\phi'}{\sqrt{3(3-\sin\phi')}}$		$M = \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'}$		$\Gamma = N - (\lambda - \kappa) \ln 2$					
n = 0.8689		$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$		$k = \frac{6c'\cos\phi'}{\sqrt{3(3-\sin\phi')}}$		$\kappa = (1+e_c) \cdot \frac{K}{P}$							

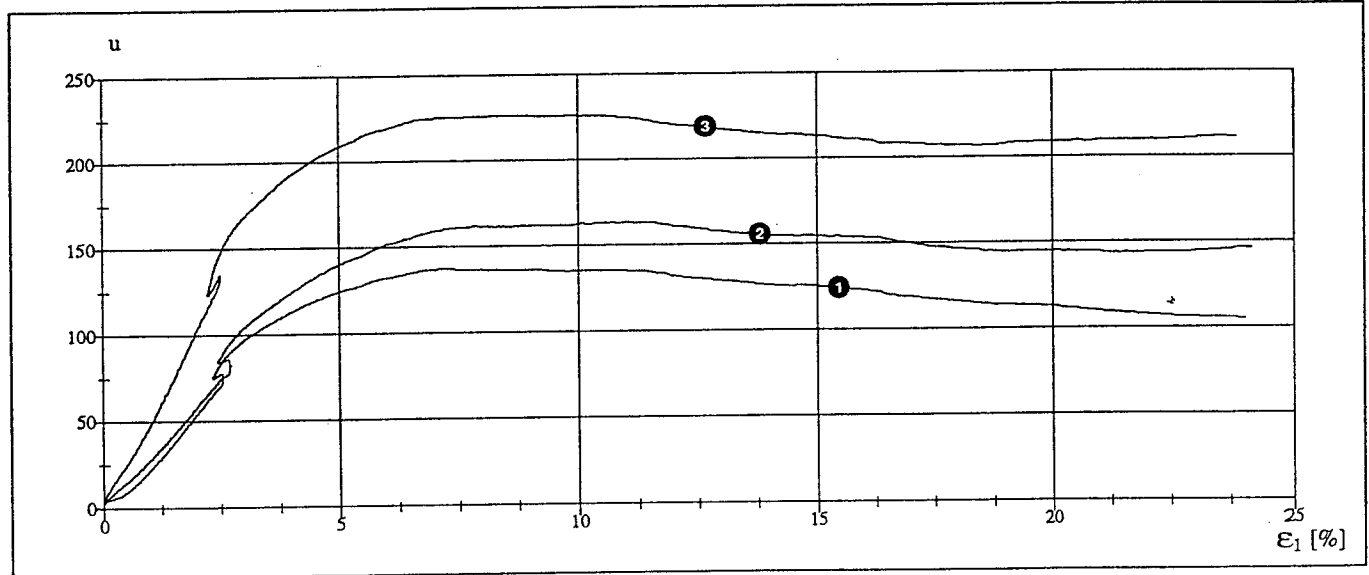
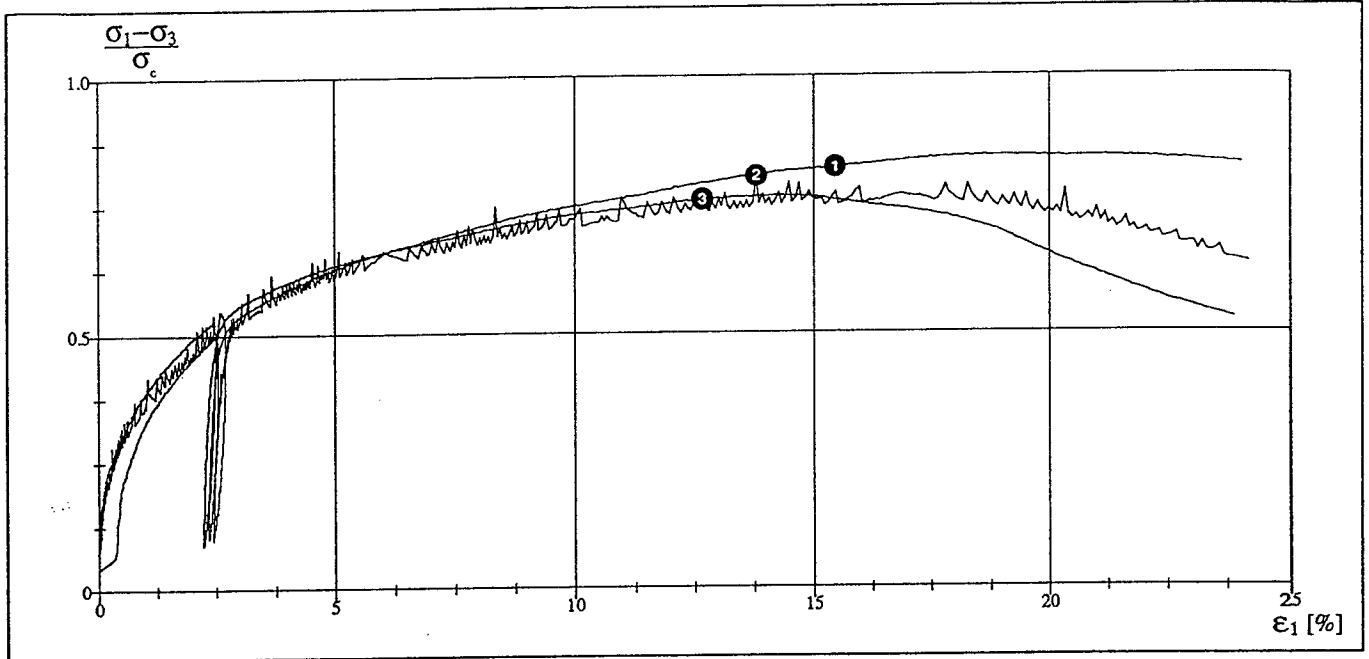
Observations: Le temps de consolidation a été très long et l'on a décidé d'effectuer un essai CU à la place de CD

Page 2/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETCS F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-2	Pieux Thermiques EPFL		GG	19.05.98



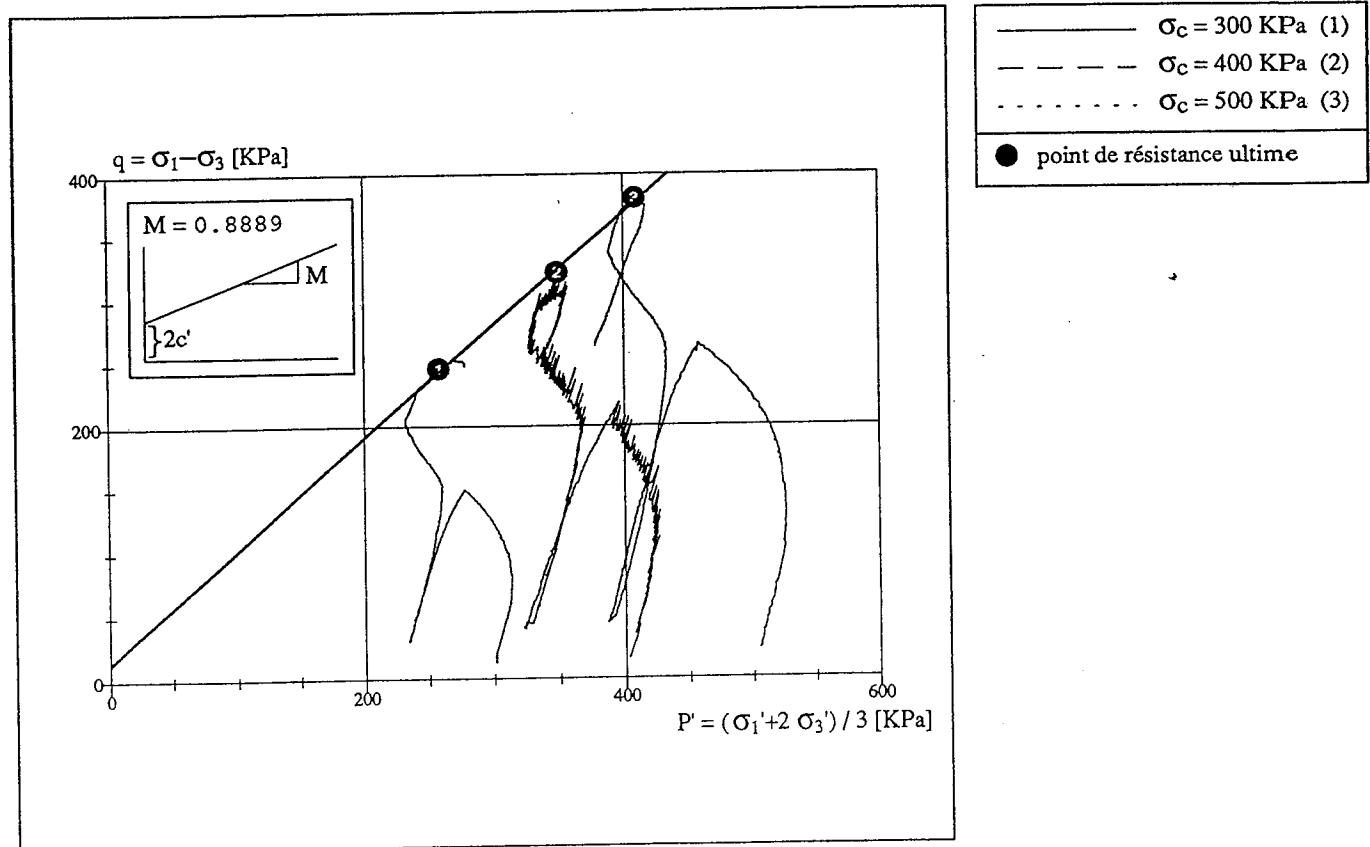
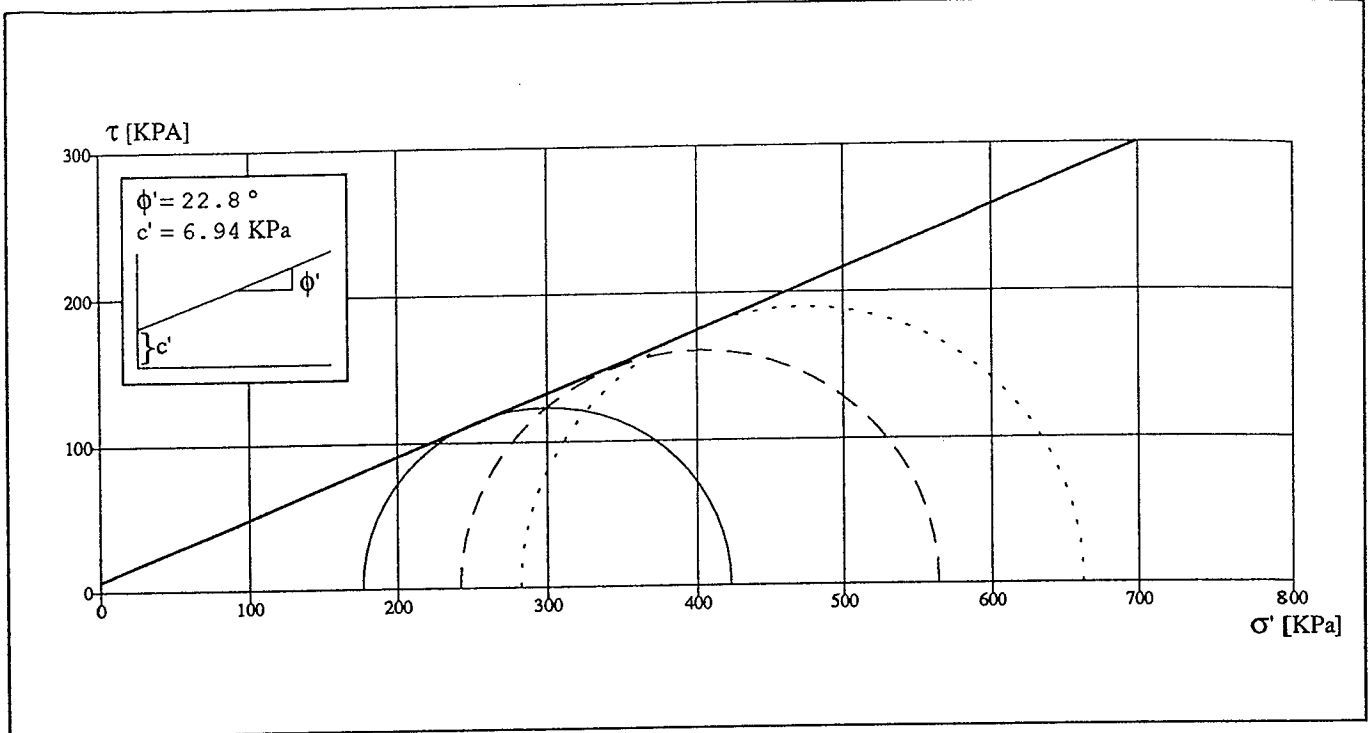
	σ _c = 300 KPa (1)	●	point de résistance ultime
	σ _c = 400 KPa (2)		
	σ _c = 500 KPa (3)		

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-2	Pieux Thermiques EPFL		GG	19.05.98

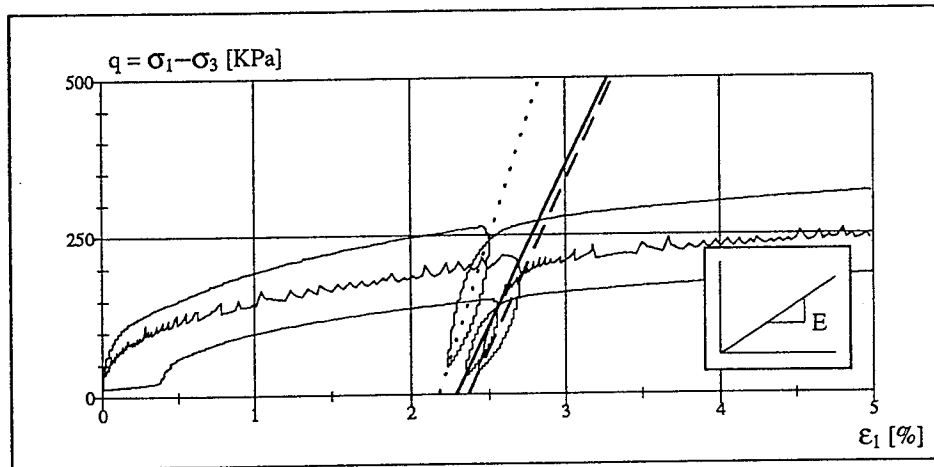
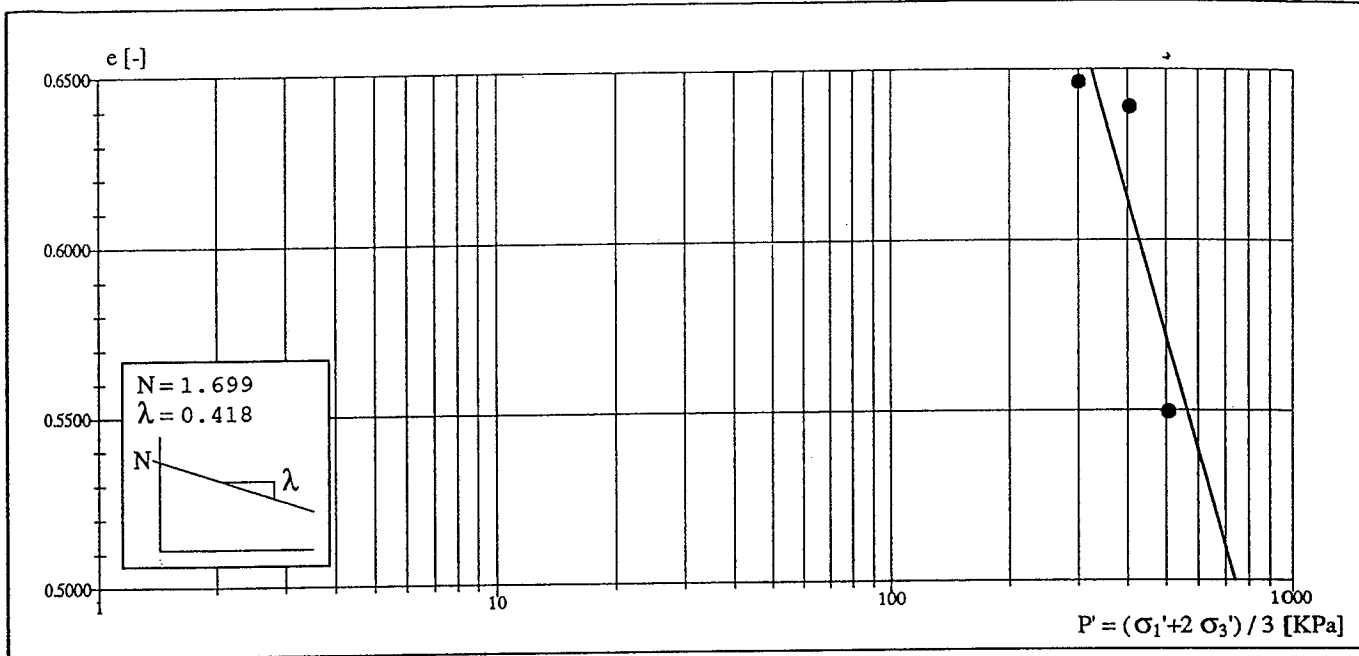


Page 4/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETCS F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-2	Pieux Thermiques EPFL		GG	19.05.98



$P = \sigma_c$	E
300	50.64
400	53.05
500	75.96

$n = 0.8689$

	$\sigma_c = 300$ KPa (1)
	$\sigma_c = 400$ KPa (2)
	$\sigma_c = 500$ KPa (3)
	point de résistance ultime
	point de départ

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL
COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETCS F1.97

No épreuve	Titre de l'étude			Commettant		
				nom	adresse	
SY40-4	Pieux Thermiques EPFL			BCF - EPFL et OFEN	Berne	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Date réception échantillon	Date essai
1/	m	vrac	Limon argileux - sableux		26.03.98	03.06.98
Mode conservation		Mode préparation épreuve(s)		Ingénieur responsable		Opérateur
				nom	signature	
Chambre climatique		reconstitué dans tube		G.Gruaz		

CONSOLIDATION							$\rho_s [t^*m^{-3}] = 2.743$						
σ_c [KPa]	avant consolidation						après consolidation						
	H init [mm]	D init [mm]	ω init [%]	ρ_d init [t^*m ⁻³]	S_r init [%]	e_0 [-]	dVc/V [%]	H final [mm]	D final [mm]	ω final [%]	ρ_d final [t^*m ⁻³]	S_r final [%]	e_c [-]
300	96.0	50.0	26.1	1.598	100	0.72	12.9	91.7	47.7	18.0	1.835	100	0.50
400	96.0	50.0	26.6	1.584	100	0.73	14.1	91.3	47.5	17.7	1.844	100	0.49
500	96.0	50.0	25.7	1.608	100	0.71	15.1	90.9	47.3	16.2	1.895	100	0.45

COMPRESSION				Type de l'essai: consolidé/non-drainé								
σ_c [KPa]	Remaniement	vitesse déf. [mm^*min ⁻¹]	Contrepress. [Kpa]	résistance ultime								
				σ_3' [KPa]	σ_1' [KPa]	q [KPa]	P' [KPa]	u [KPa]	ϵ_l [%]	ϵ_v [%]	σ_1'/σ_3' [-]	
300	0	0.008	0	171	454	284	265	130	11.6	0.0	2.66	
400	0	0.008	0	246	622	376	371	150	12.6	0.0	2.53	
500	0	0.008	0	298	758	461	451	200	10.3	0.0	2.55	

PARAMETRES													
σ_c [KPa]	élastiques				Mohr-Coulumb		Drücker-Prager		Cam-Clay				
	E [MPa]	v [-]	G [MPa]	K [MPa]	c' [KPa]	ϕ' [°]	α [°]	k [KPa]	M [-]	κ [-]	λ [-]	Γ [-]	N [-]
300	57.9	0.50	-	-	14.14	24.2	10.5	17.25	0.95	-	0.20	-	1.01
400	79.5		-	-									
500	113.9		-	-									

avec: $E = E_0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^n$ $G = \frac{E}{2(1-\nu)}$ $\alpha = \frac{\tan \phi'}{\sqrt{3(3-\sin \phi')}}$ $M = \frac{6 \sin \phi'}{3-\sin \phi'}$ $\Gamma = N - (\lambda - \kappa) \ln 2$

$n = 1.3341$ $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ $k = \frac{6c' \cos \phi'}{\sqrt{3(3-\sin \phi')}}$ $\kappa = (1+e_c) \cdot \frac{K}{P}$

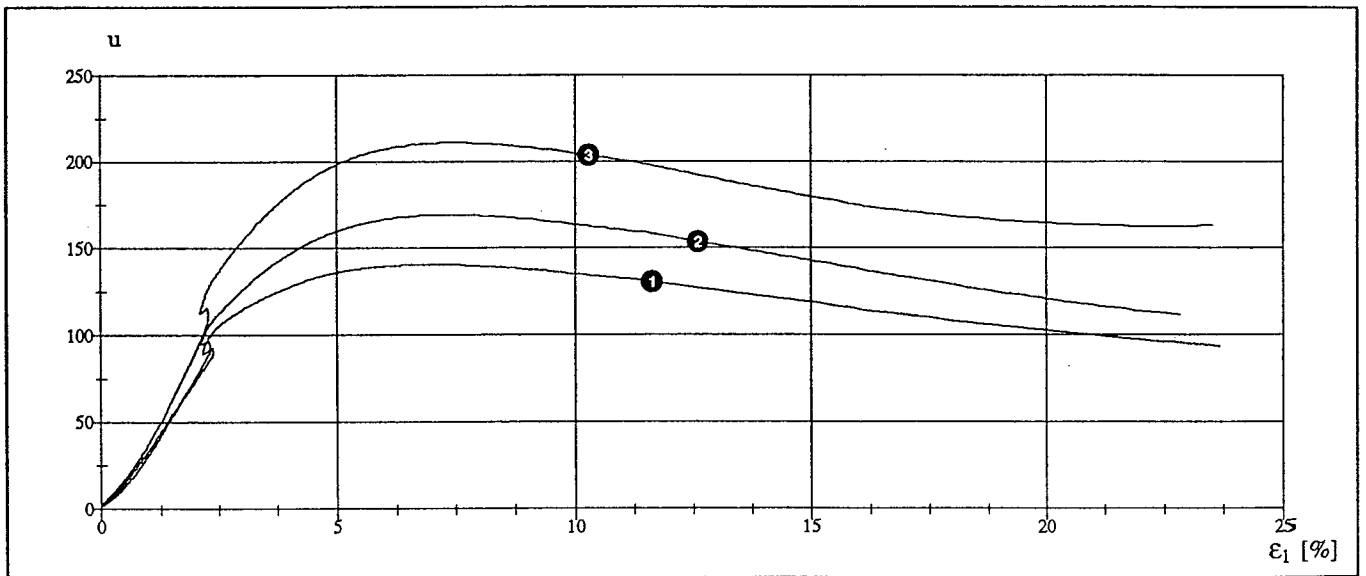
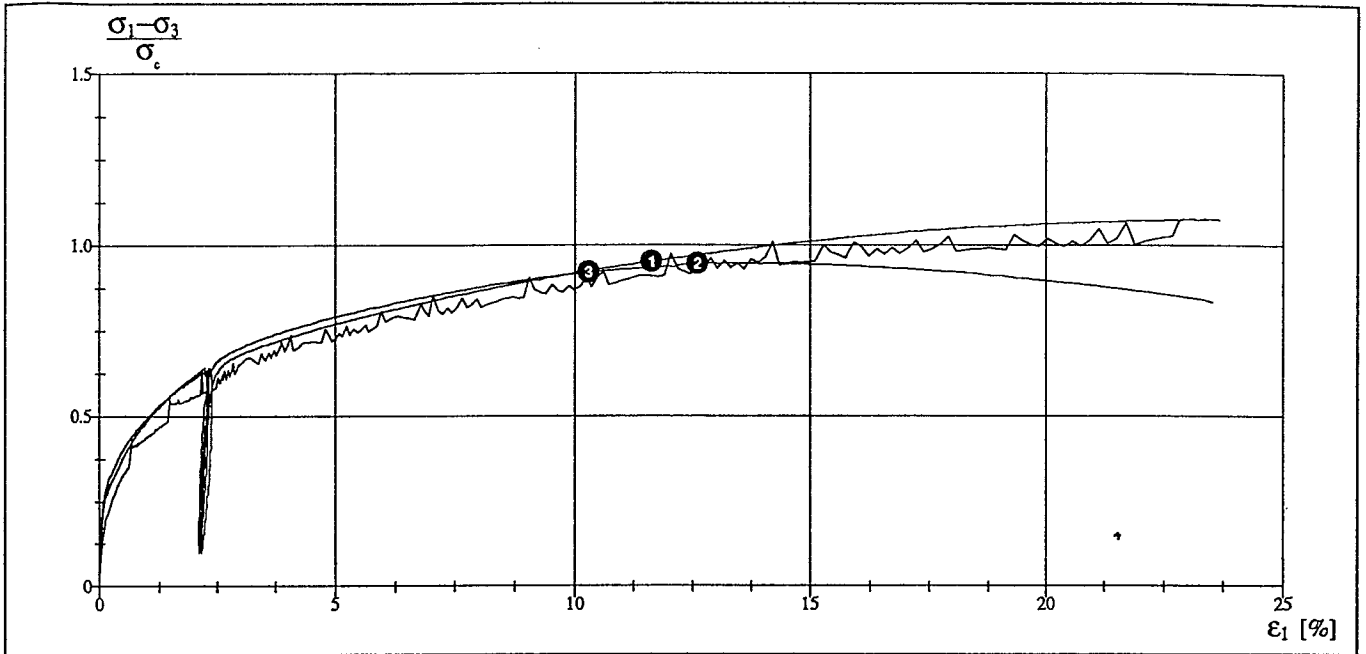
Observations: Vu le temps de consolidation il a été décidé d'effectuer un essai CU à la place de l'essai CD prévu

Page 2/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-4	Pieux Thermiques EPFL			03.06.98

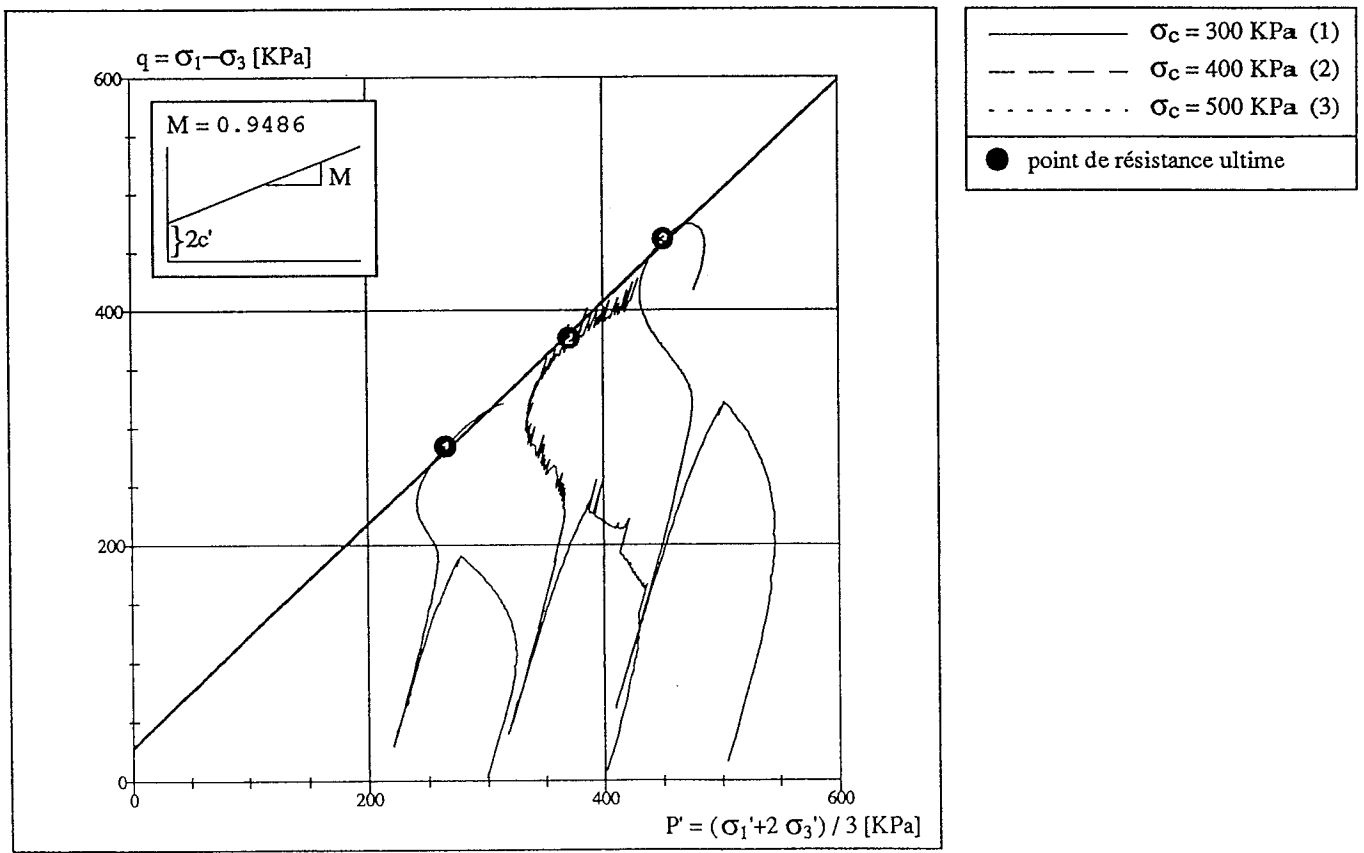
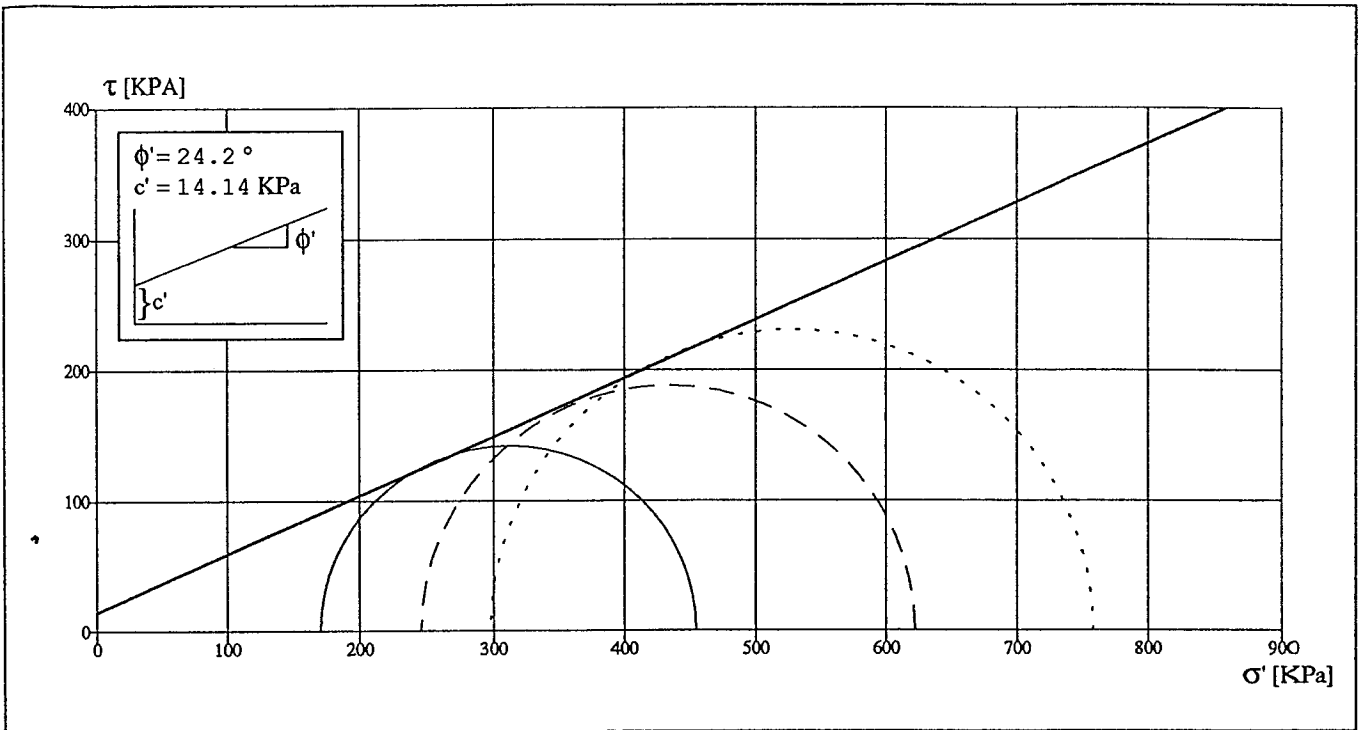


—	σ _c = 300 KPa (1)	●	point de résistance ultime
—	σ _c = 400 KPa (2)		
—	σ _c = 500 KPa (3)		

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETC5 F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature Ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-4	Pieux Thermiques EPFL			03.06.98

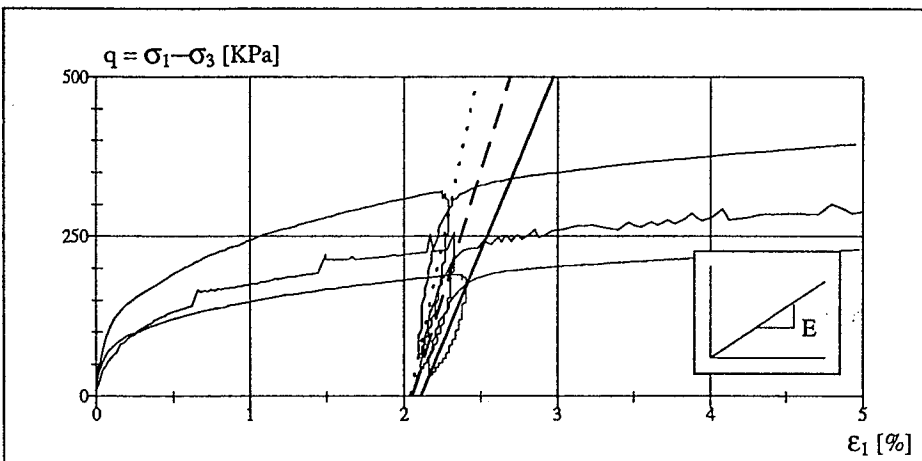
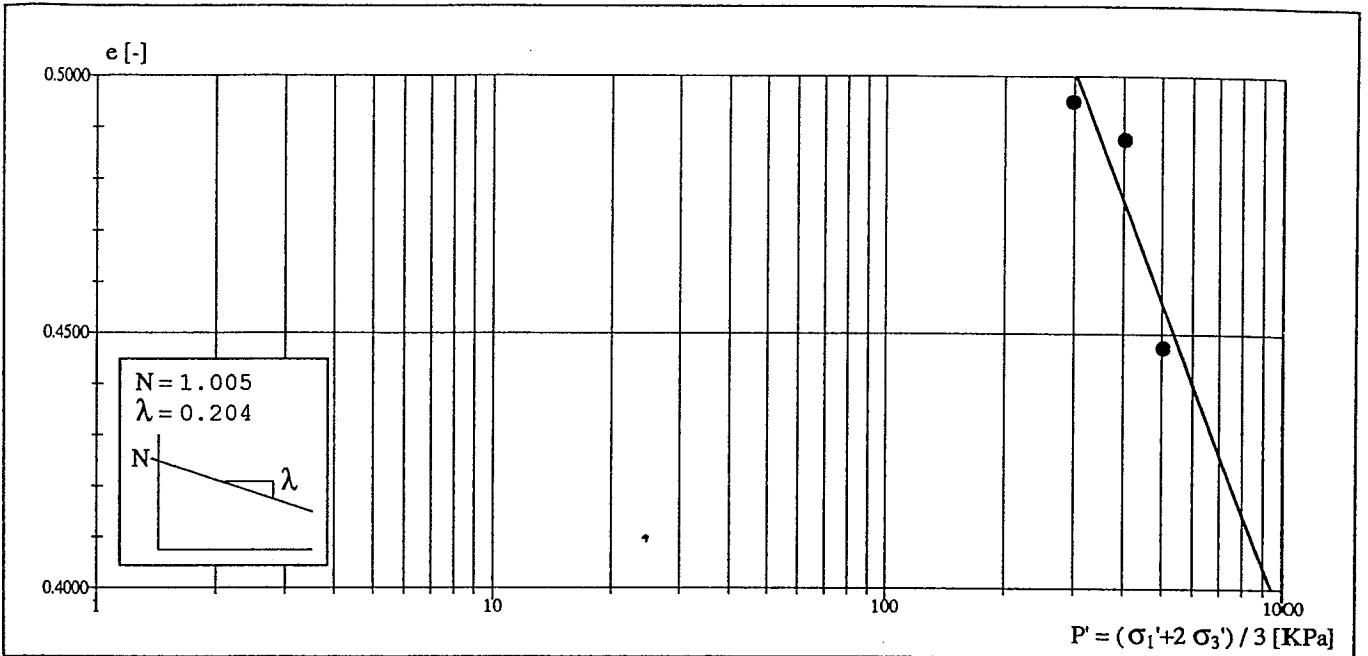


Page 4/4

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL COMPRESSION TRIAXIALE AXISYMETRIQUE

Exécuté selon la norme ISSMFE-ETCS F1.97

No éprouvette	Titre de l'étude	Signature Ingénieur	Opérateur	Date essai
SY40-4	Pieux Thermiques EPFL			03.06.98



P=σ _c	E
300	57.88
400	79.45
500	113.94

} n = 1.3341

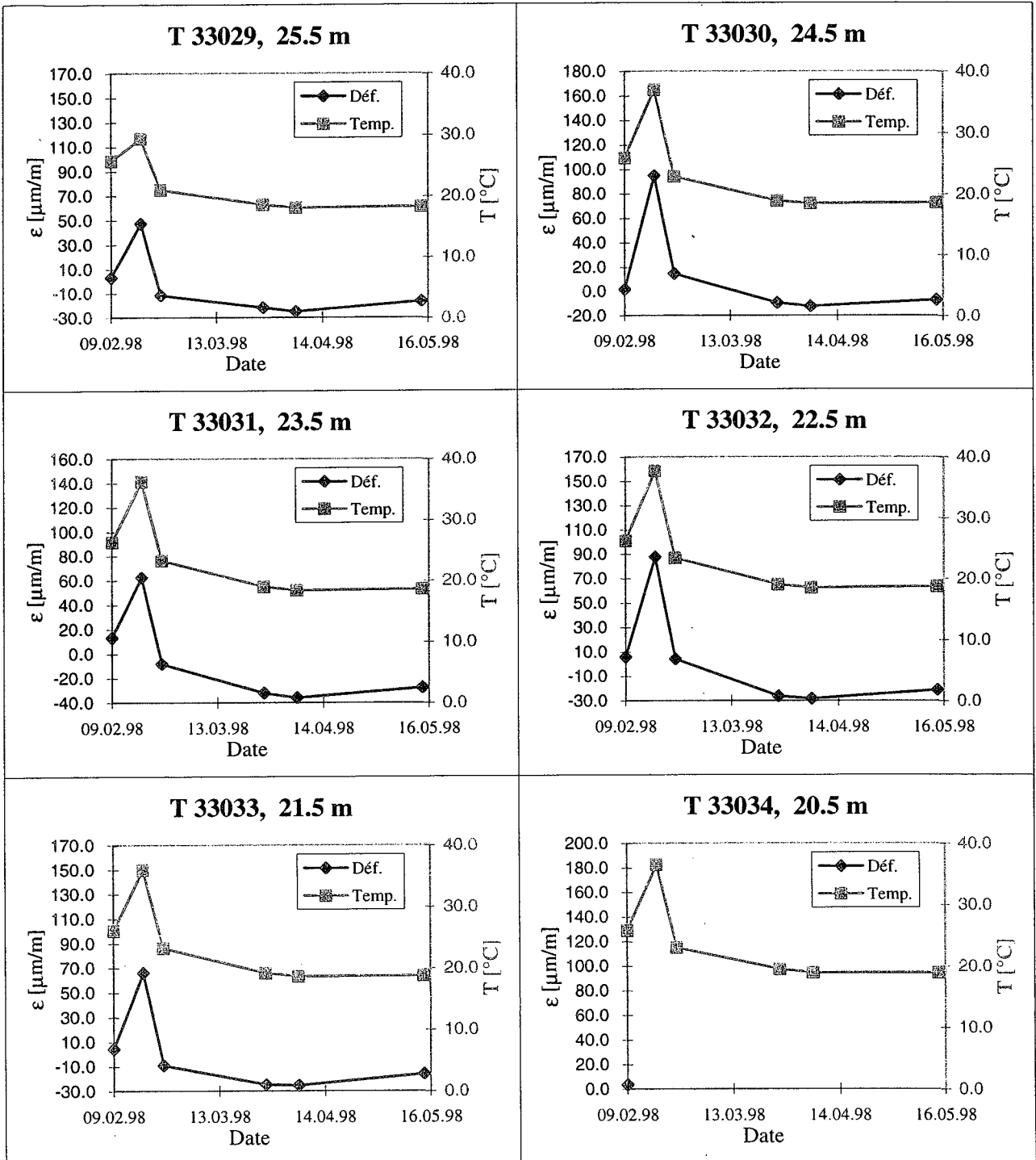
	σ _c = 300 KPa (1)
	σ _c = 400 KPa (2)
	σ _c = 500 KPa (3)
	point de résistance ultime
	point de départ

ANNEXE 5 : RESULTATS DES MESURES



Pieu thermique - SY40
 TEST0

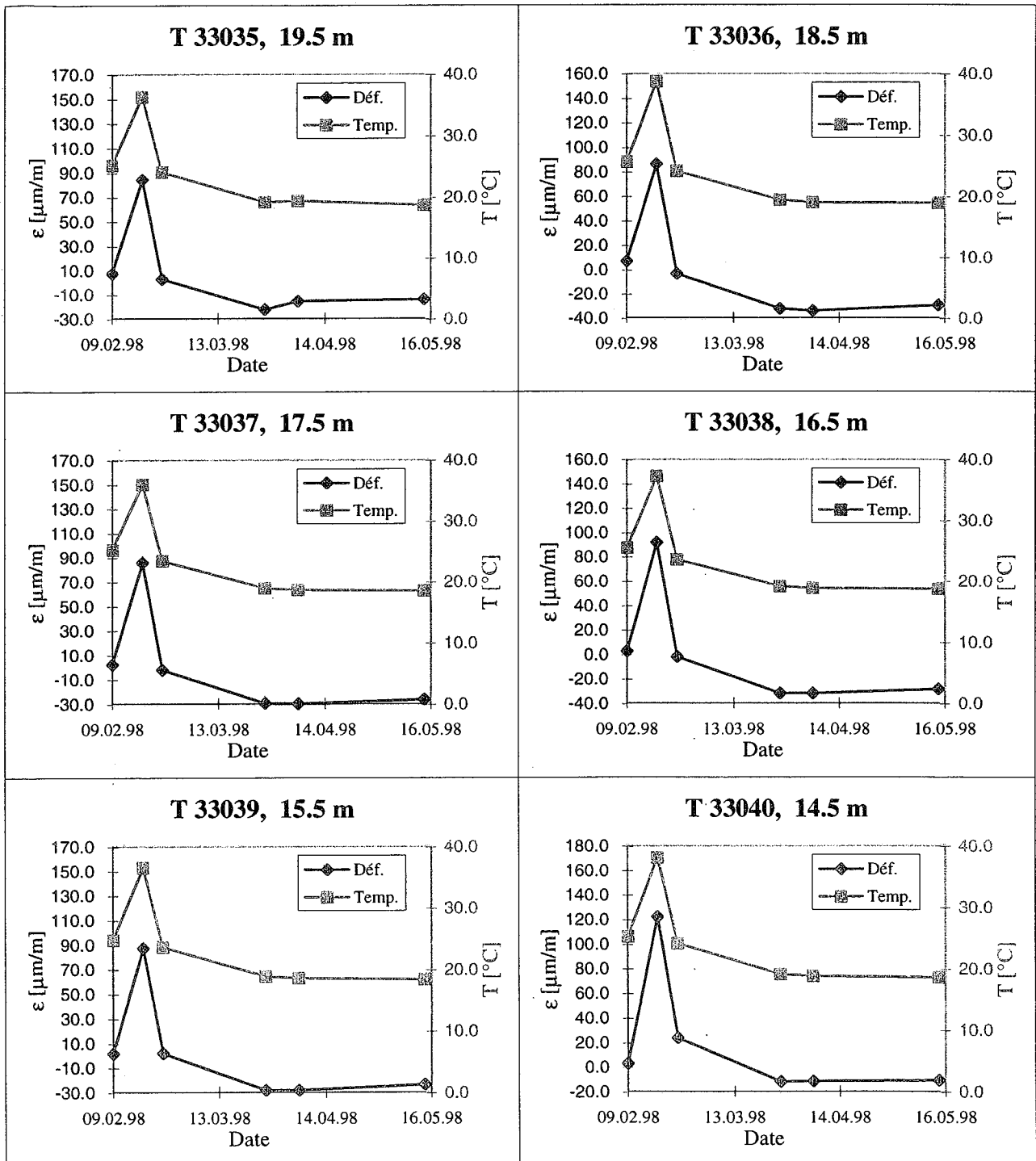
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST0

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



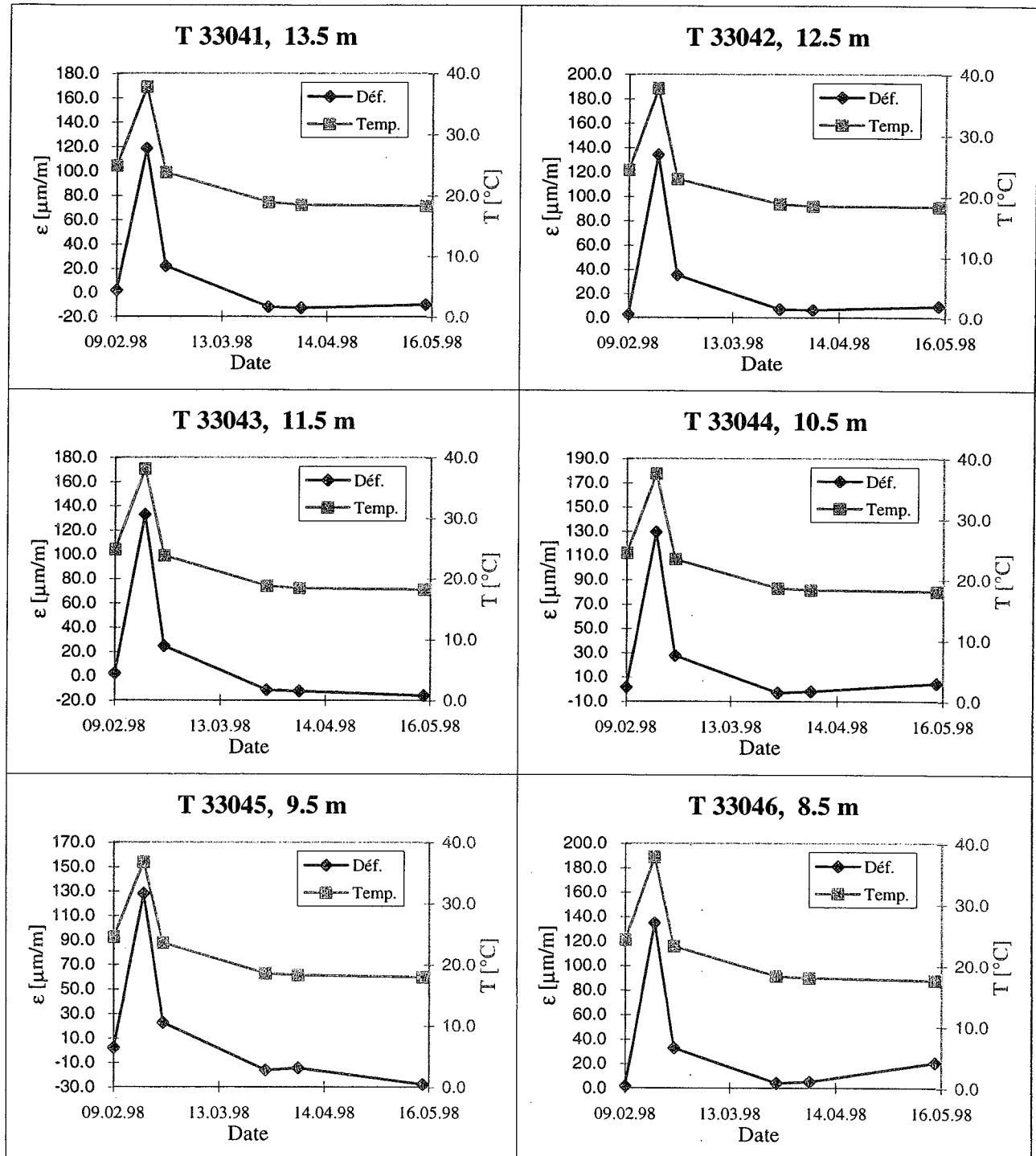
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

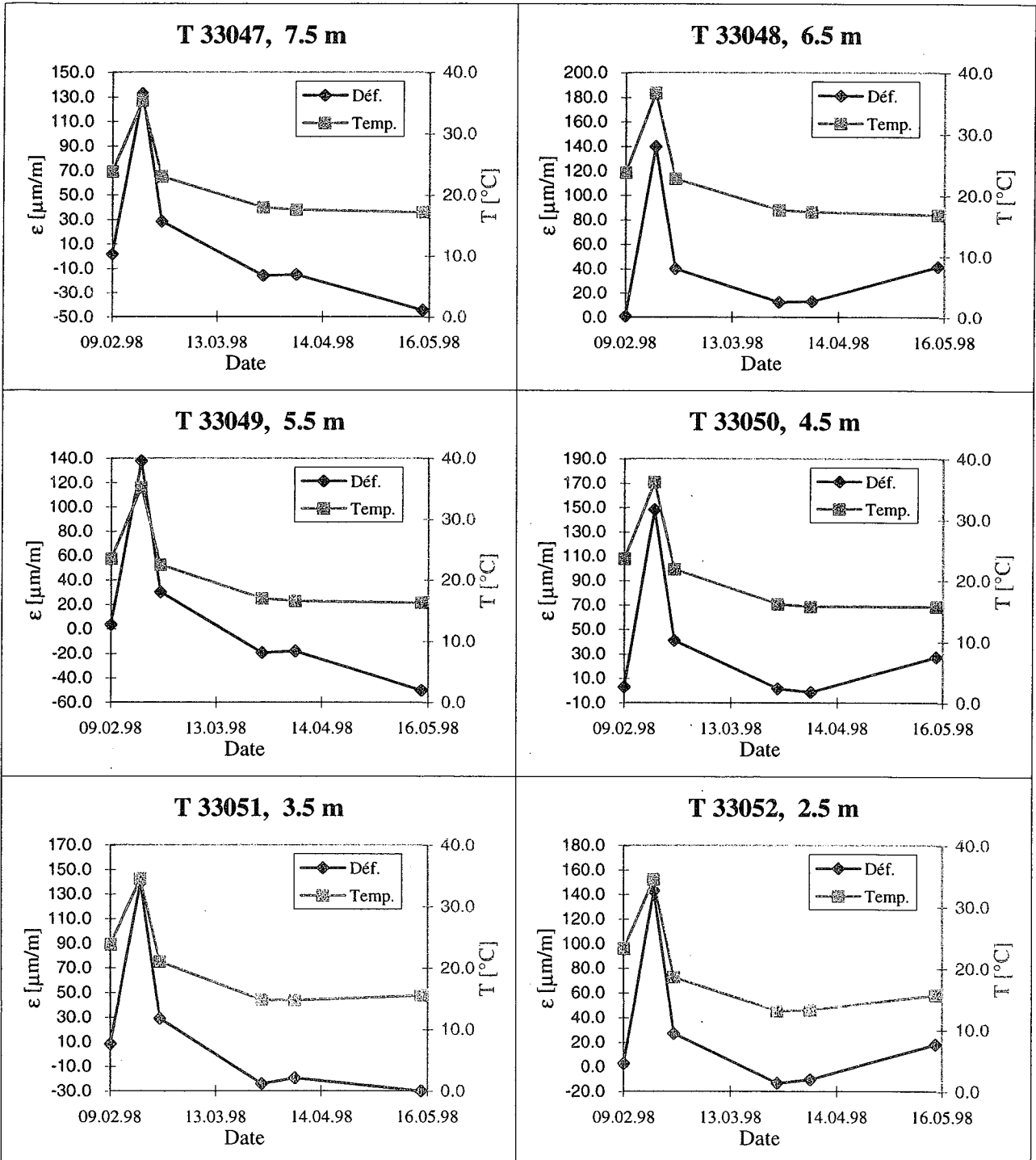
Pieu thermique - SY40
 TEST0

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST0

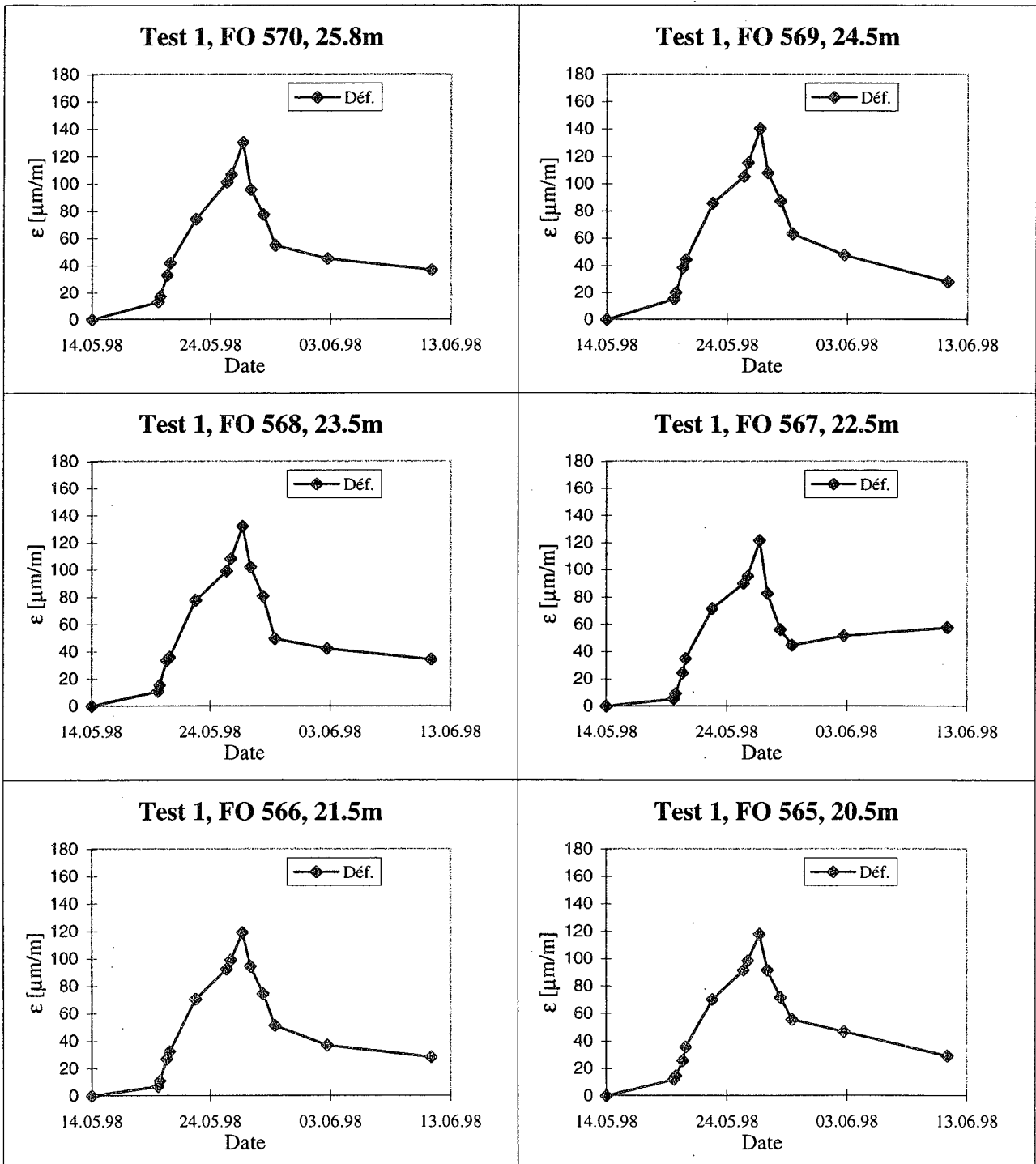


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST1

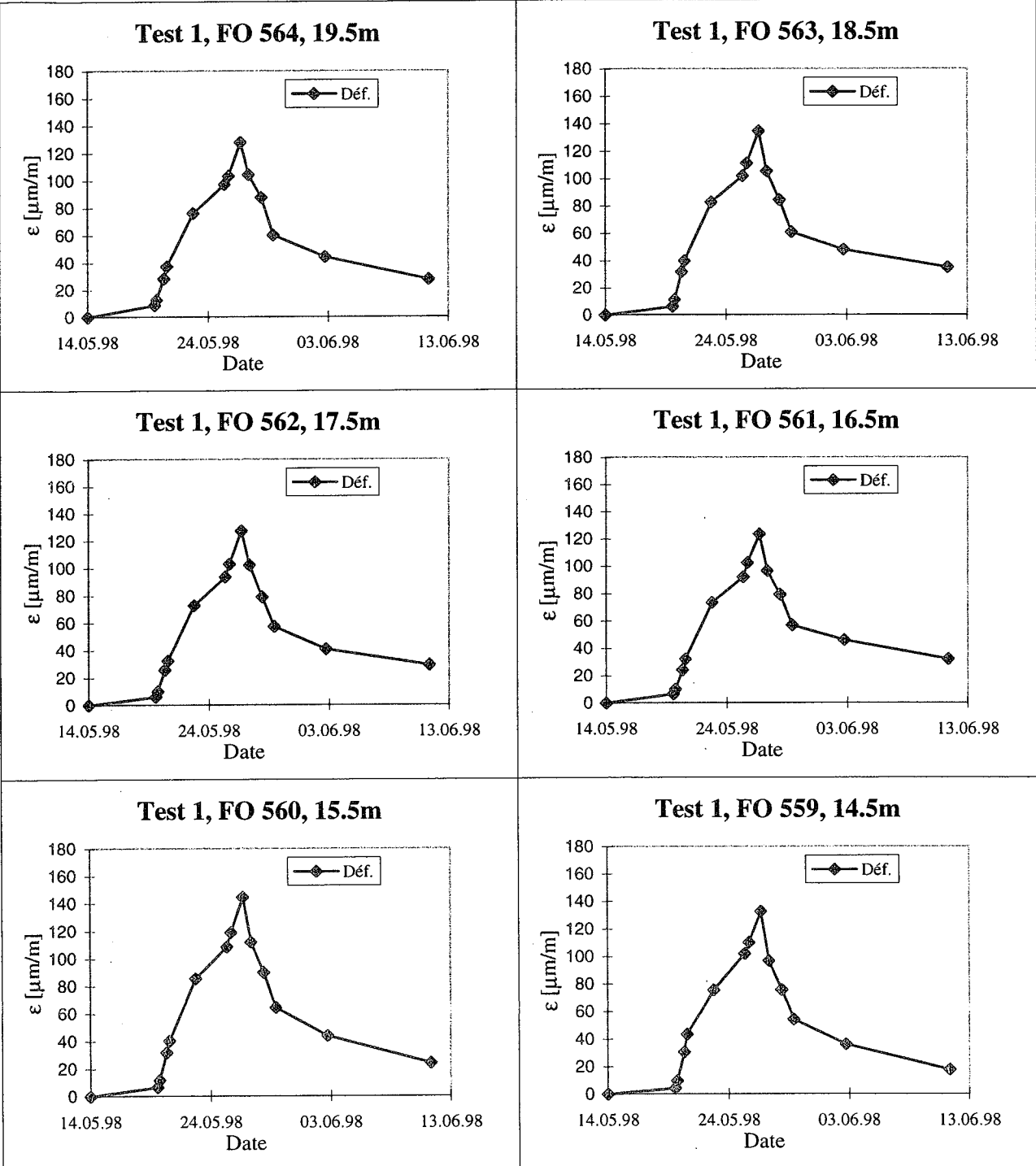


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



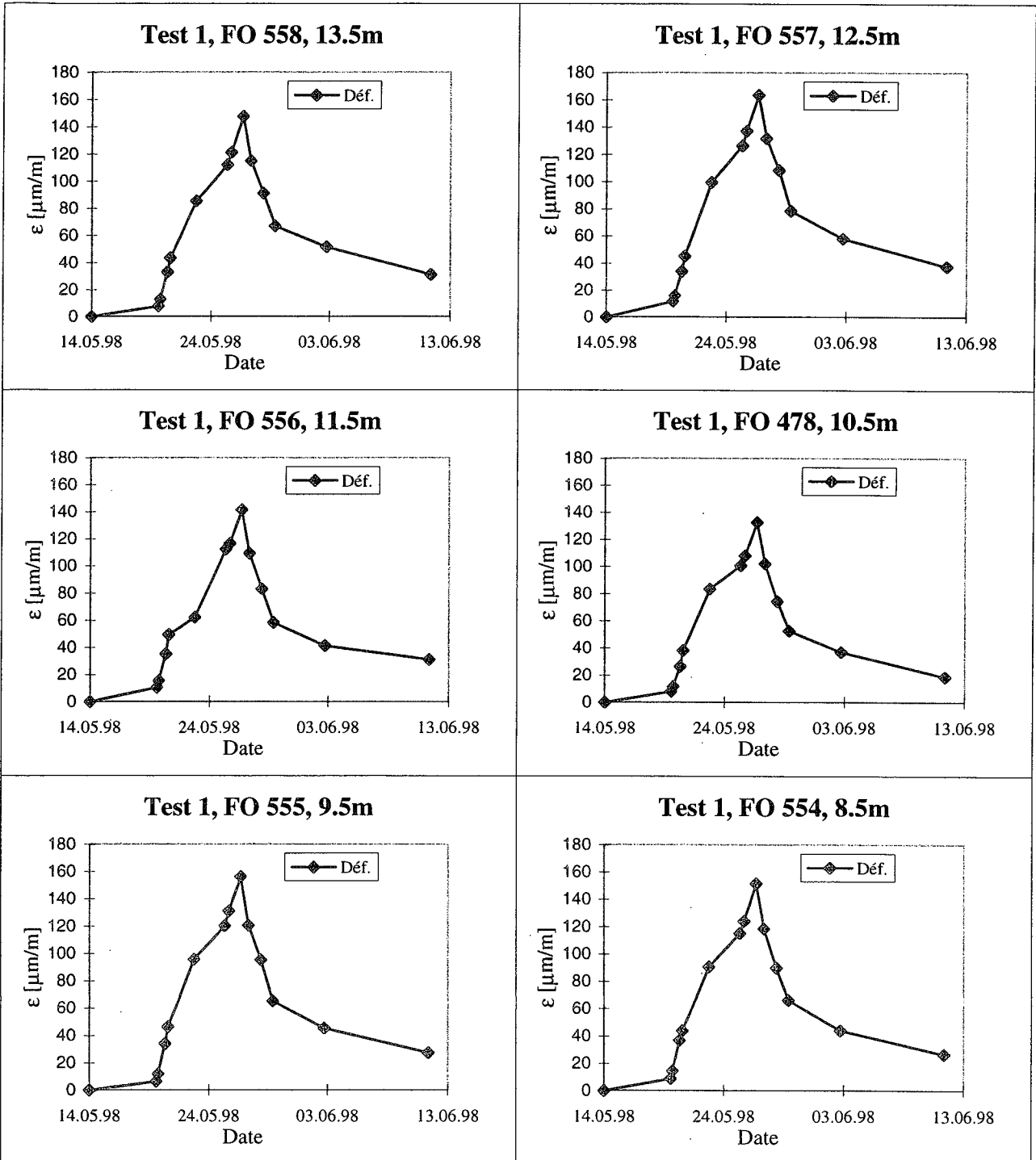
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST1





Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST1

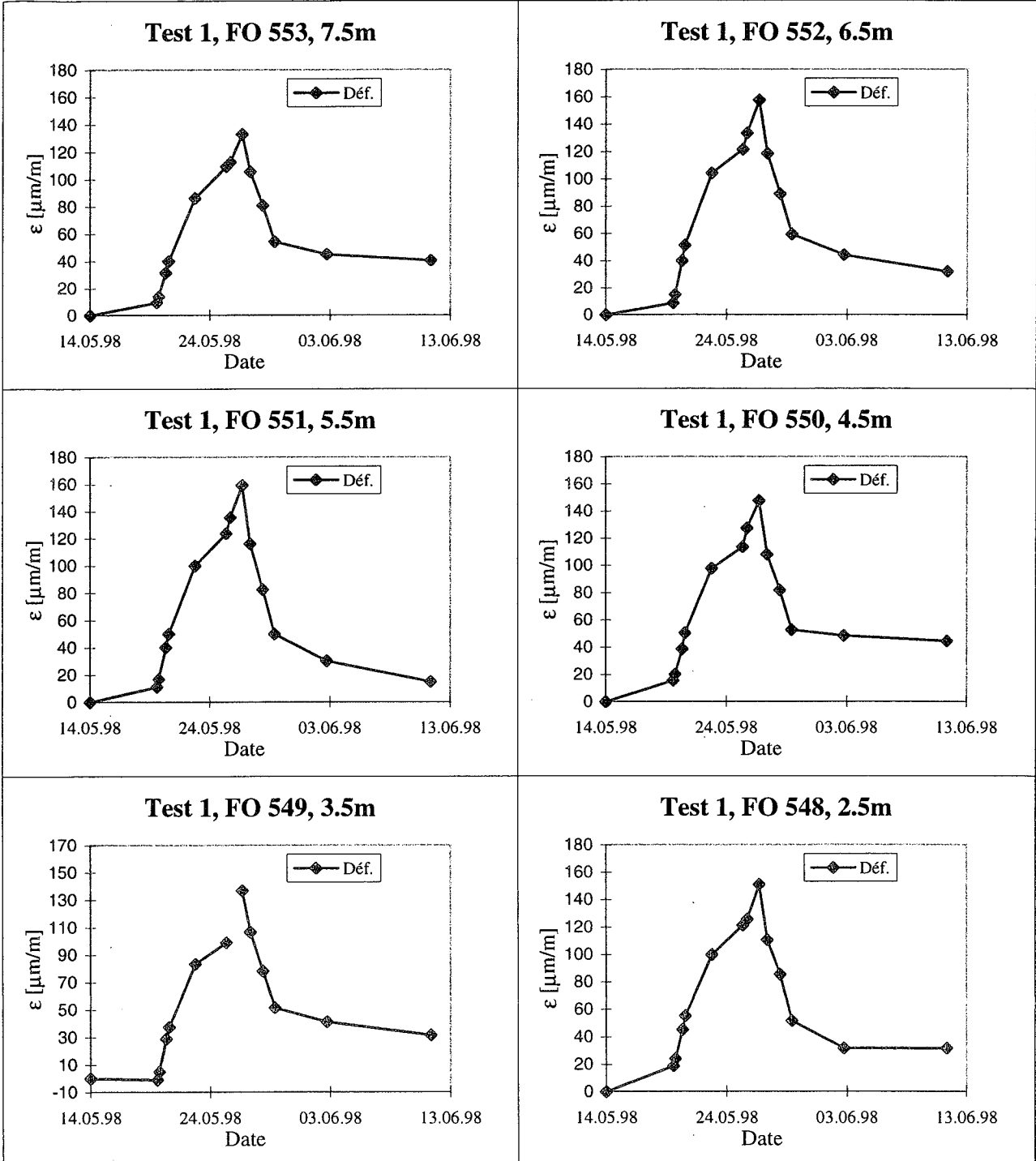


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



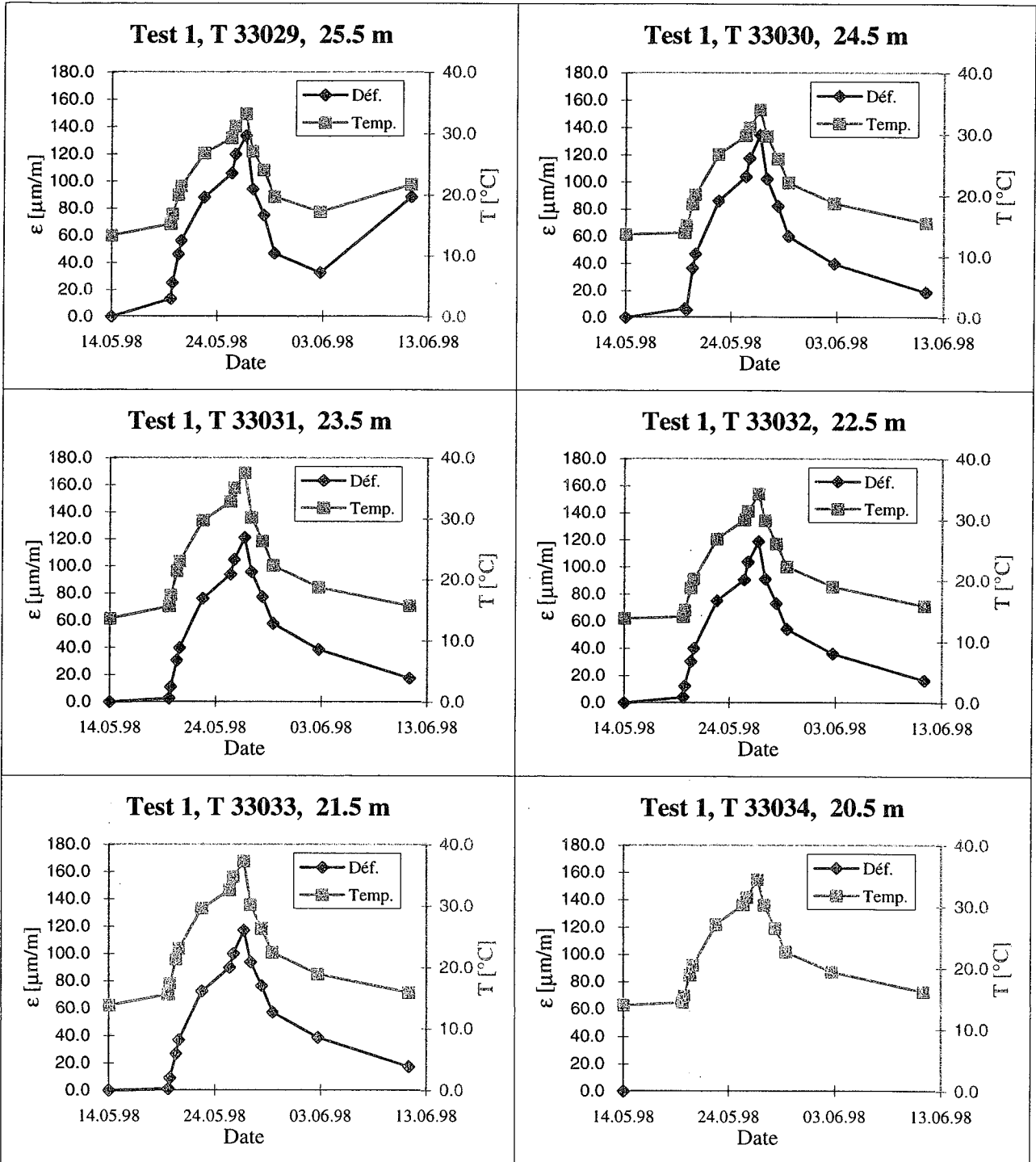
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST1





Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST1



DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)

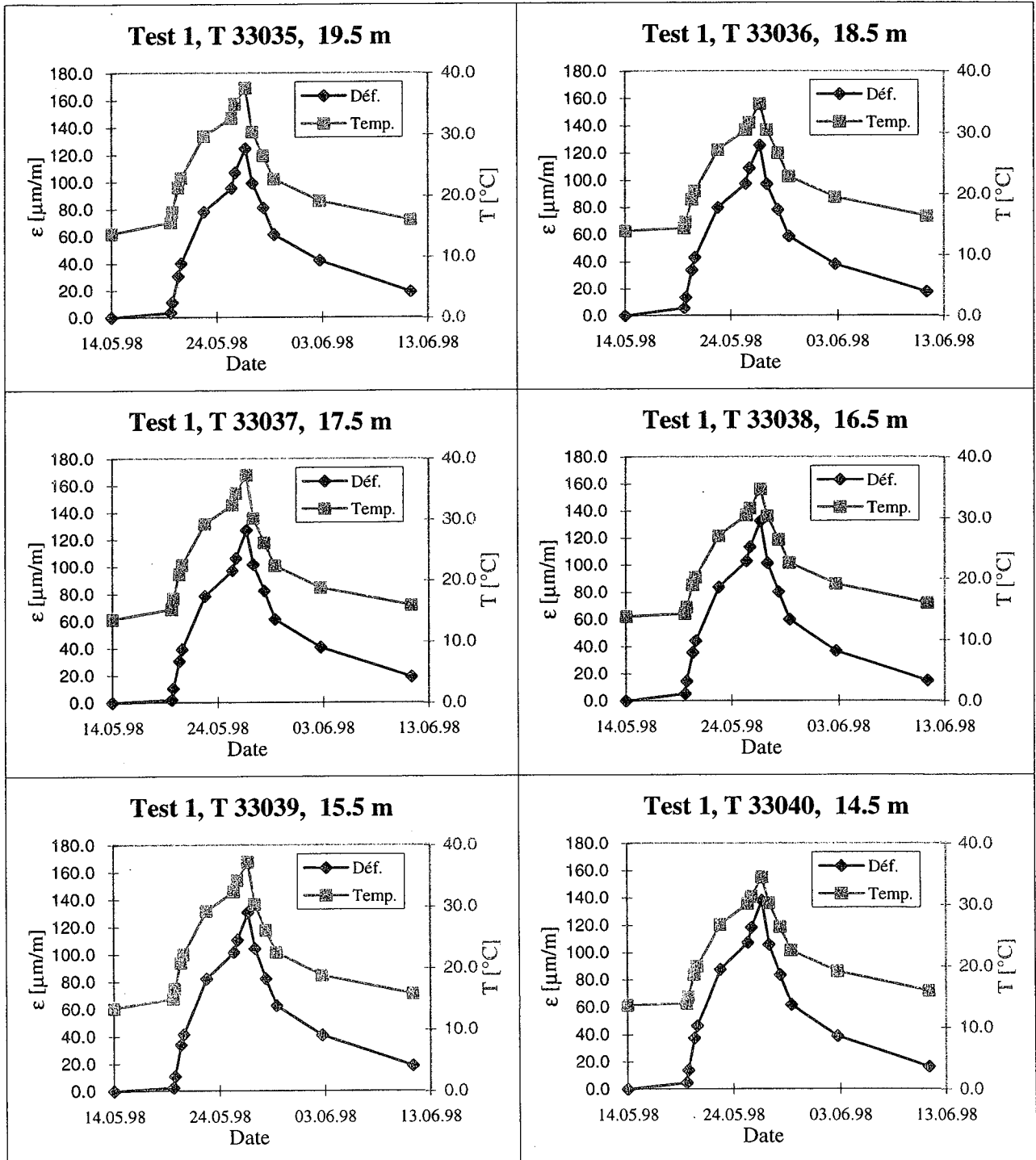


ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

TEST1



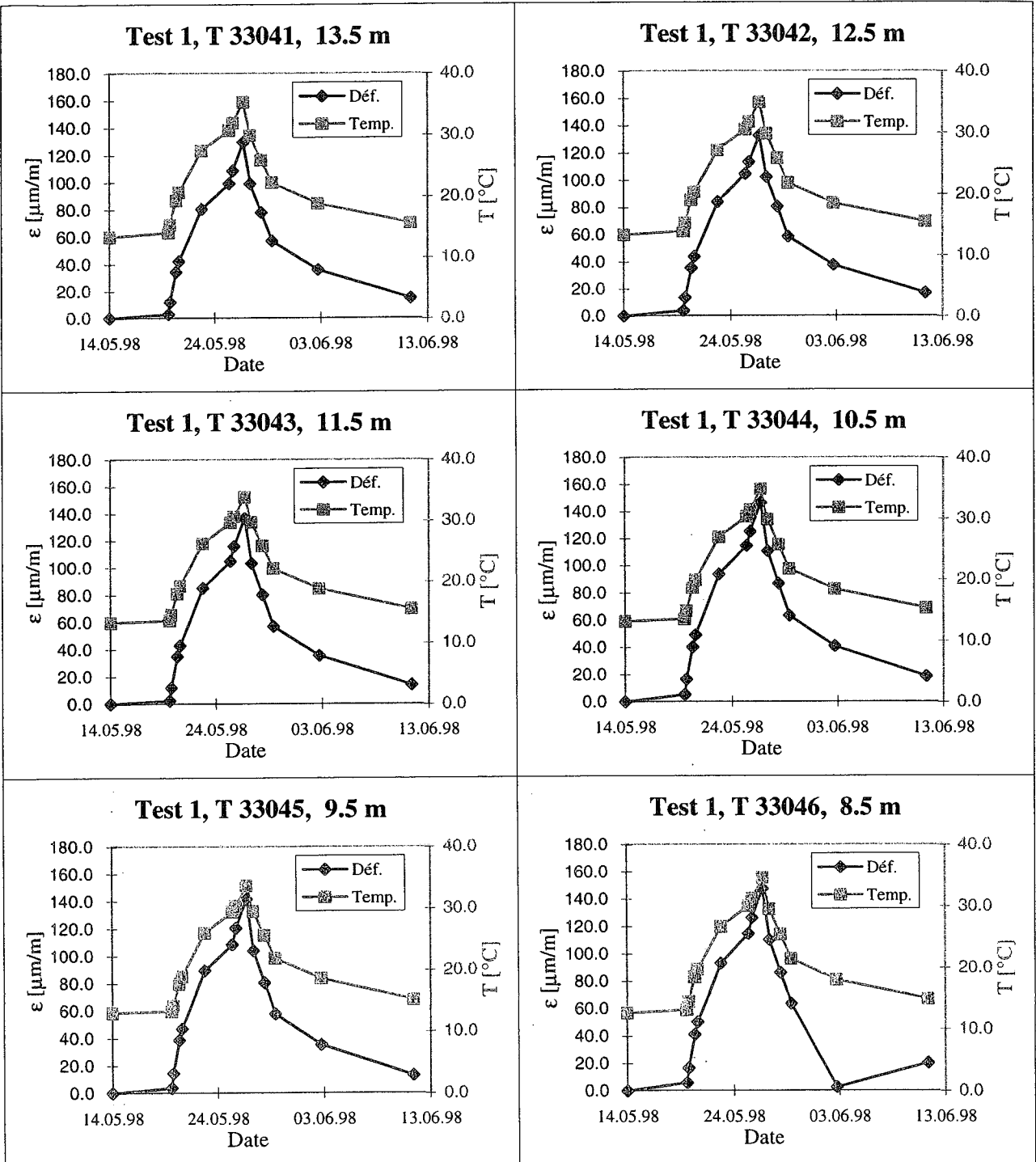
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST1

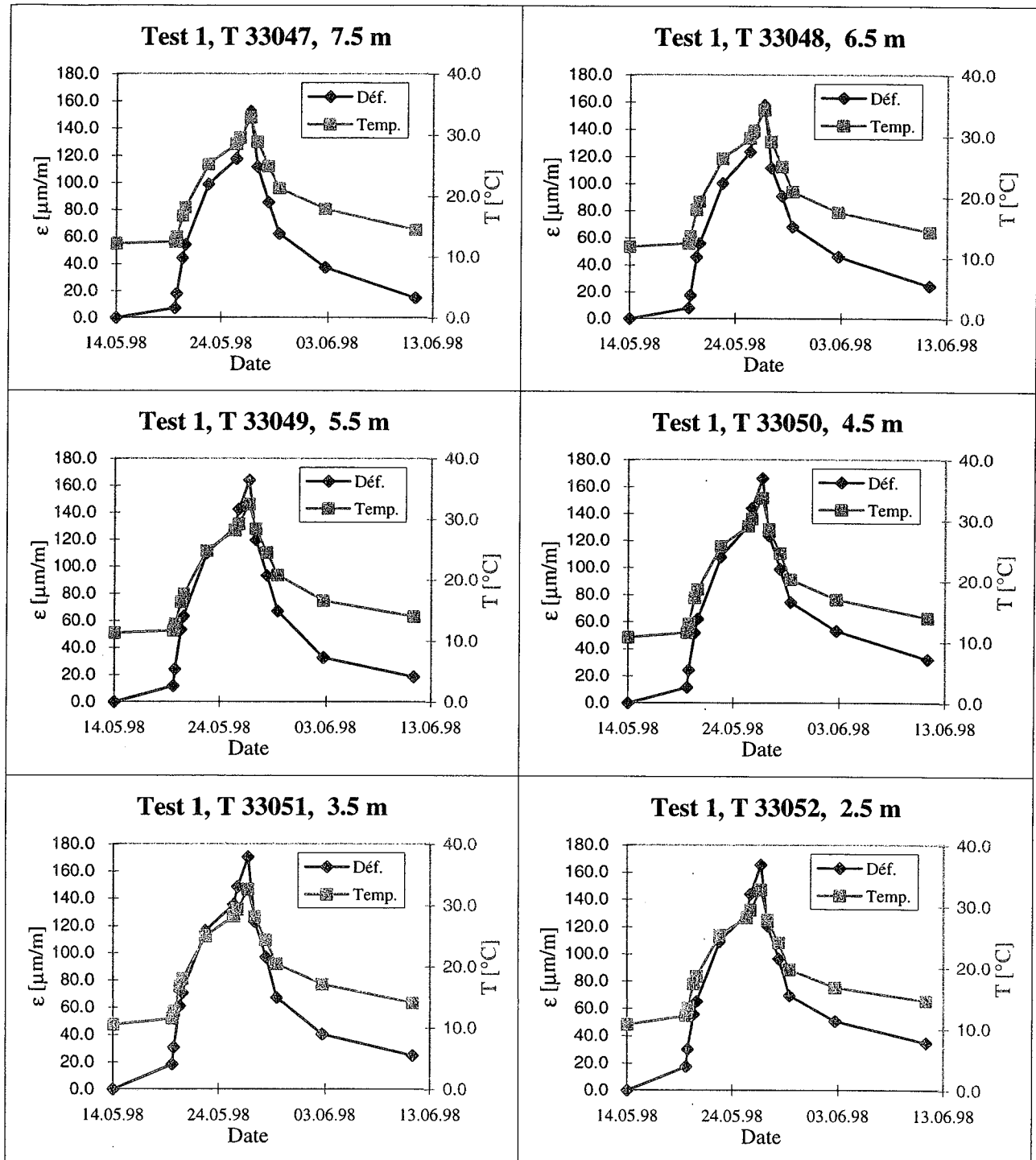
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST1

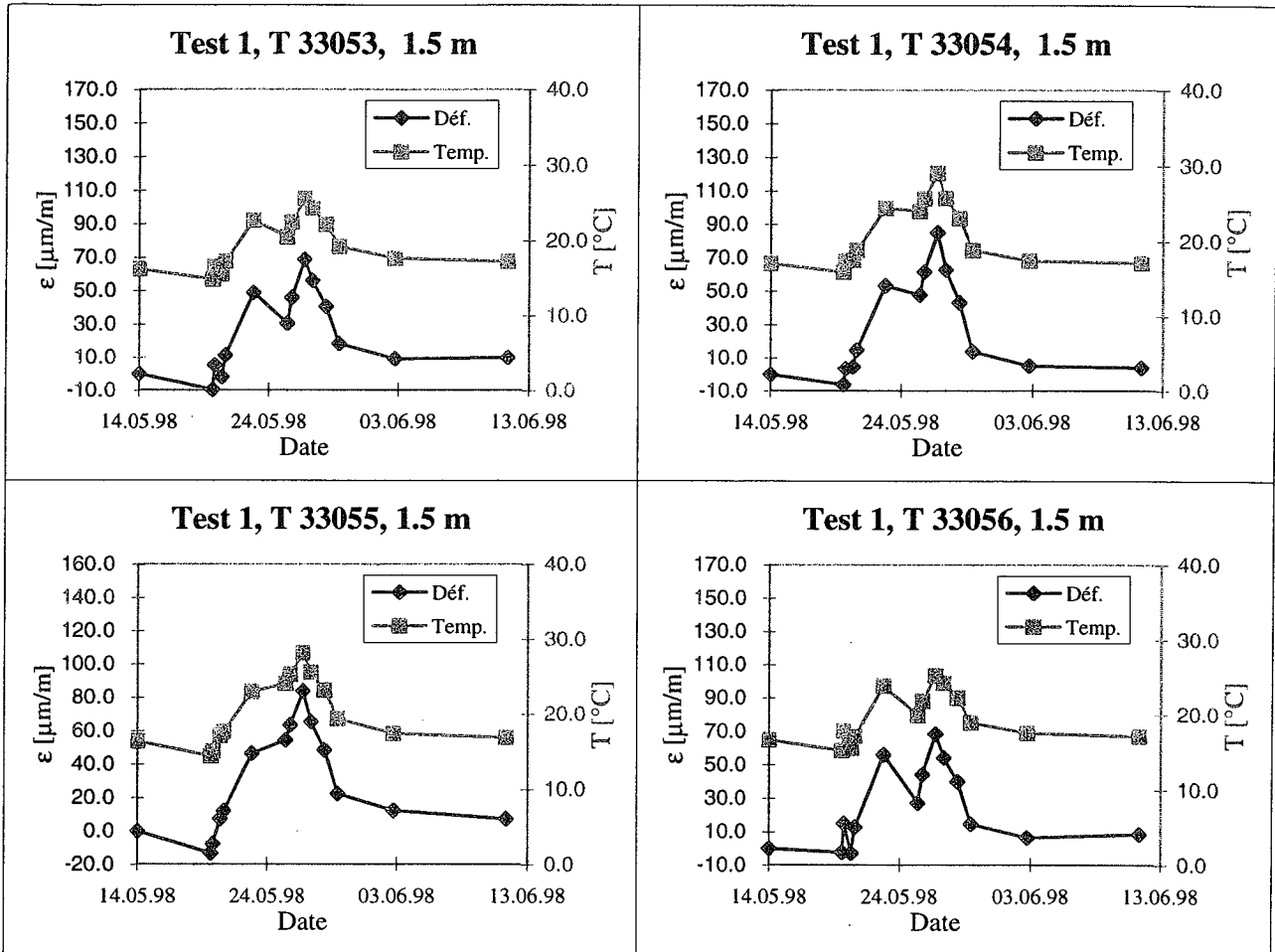
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

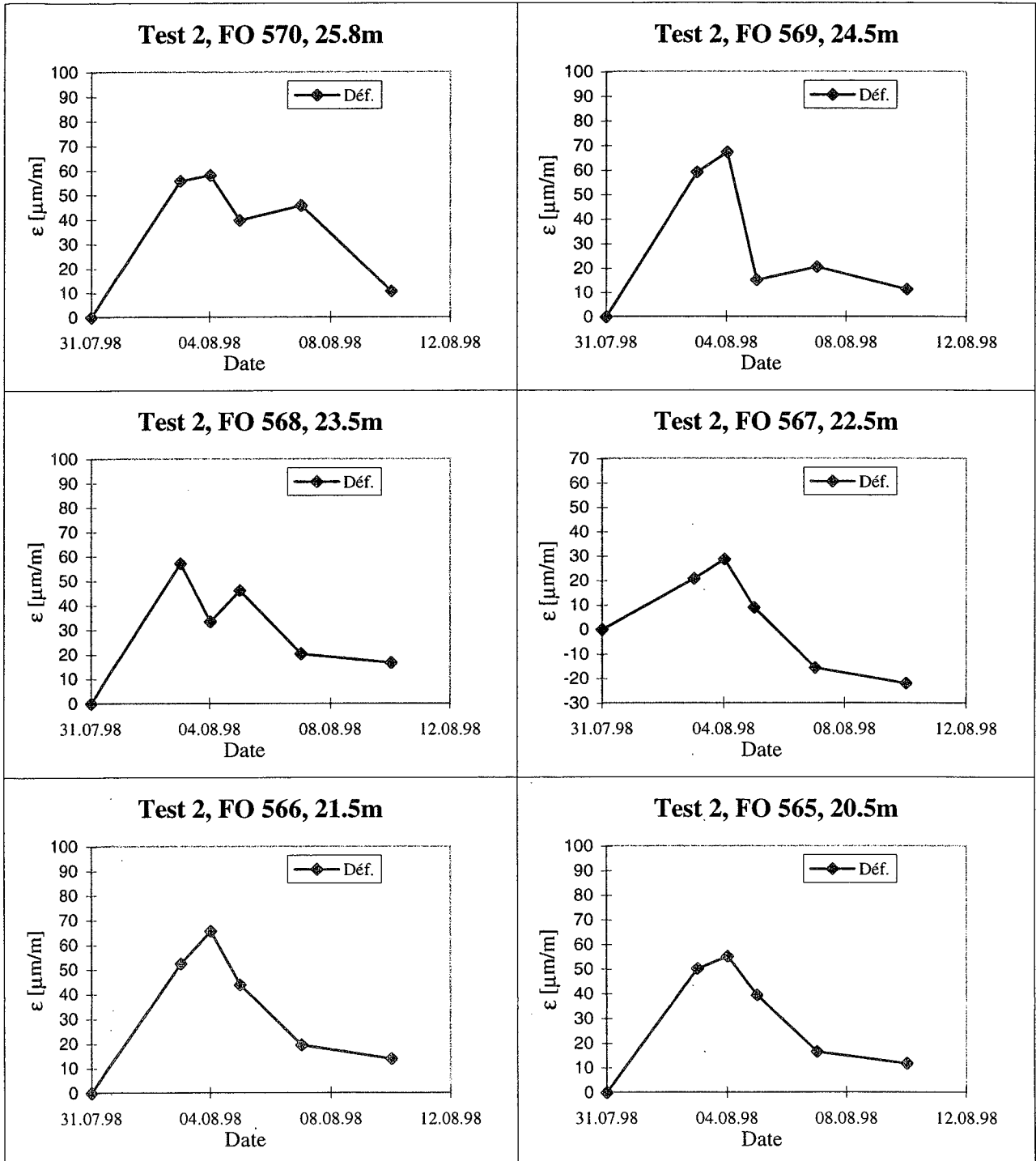


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST2



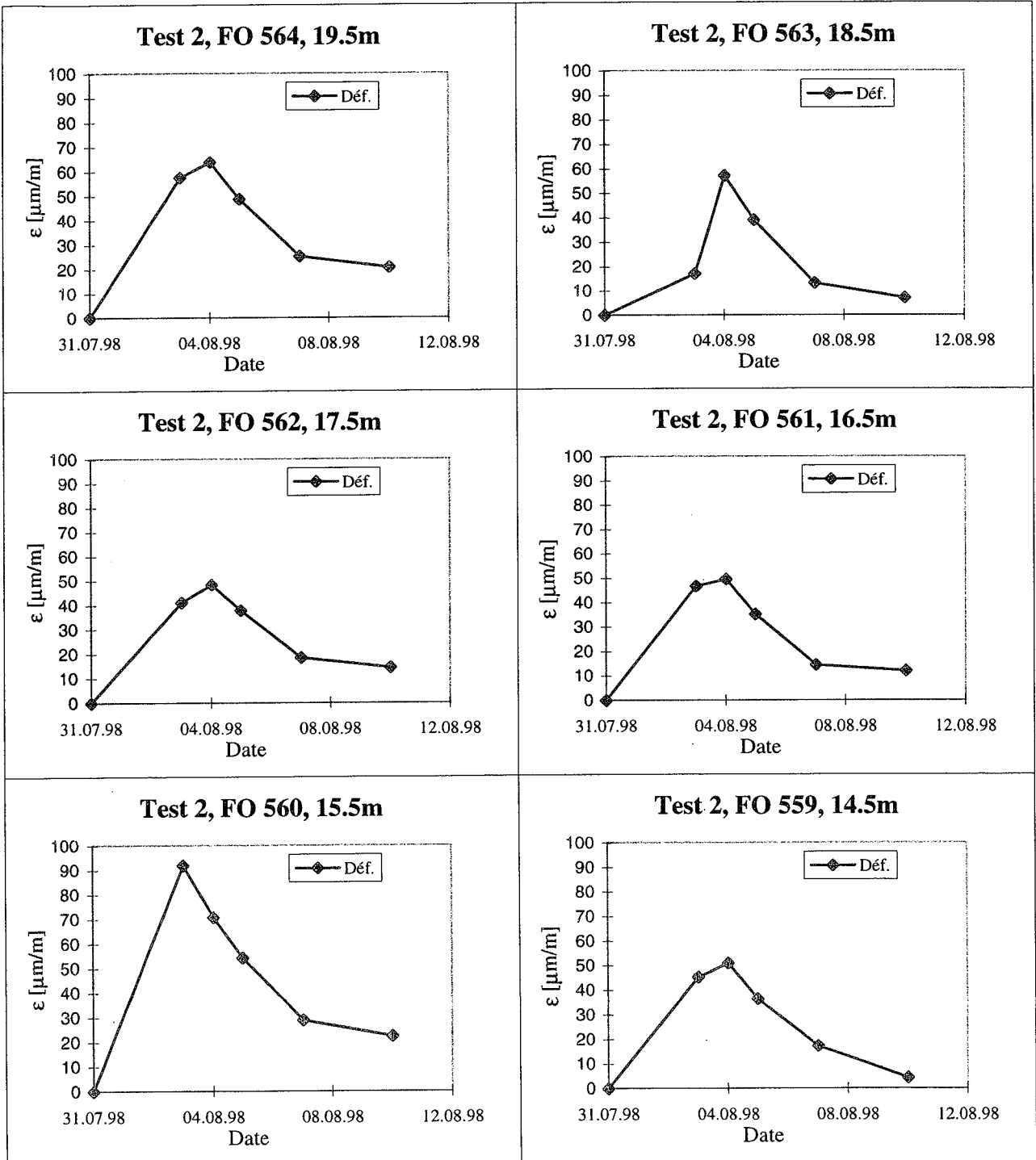
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
TEST2

Capteurs à fibres optiques

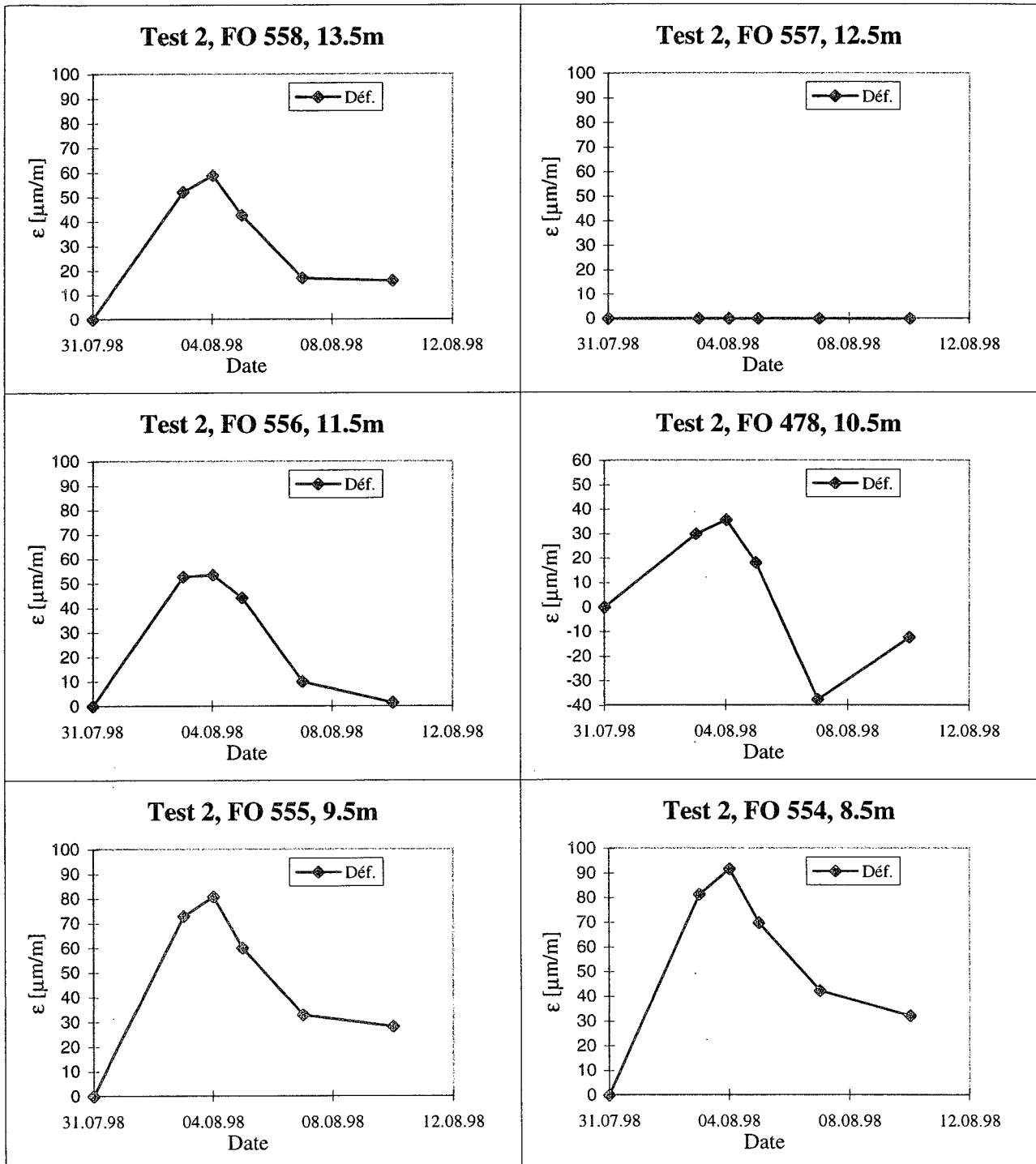


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST2

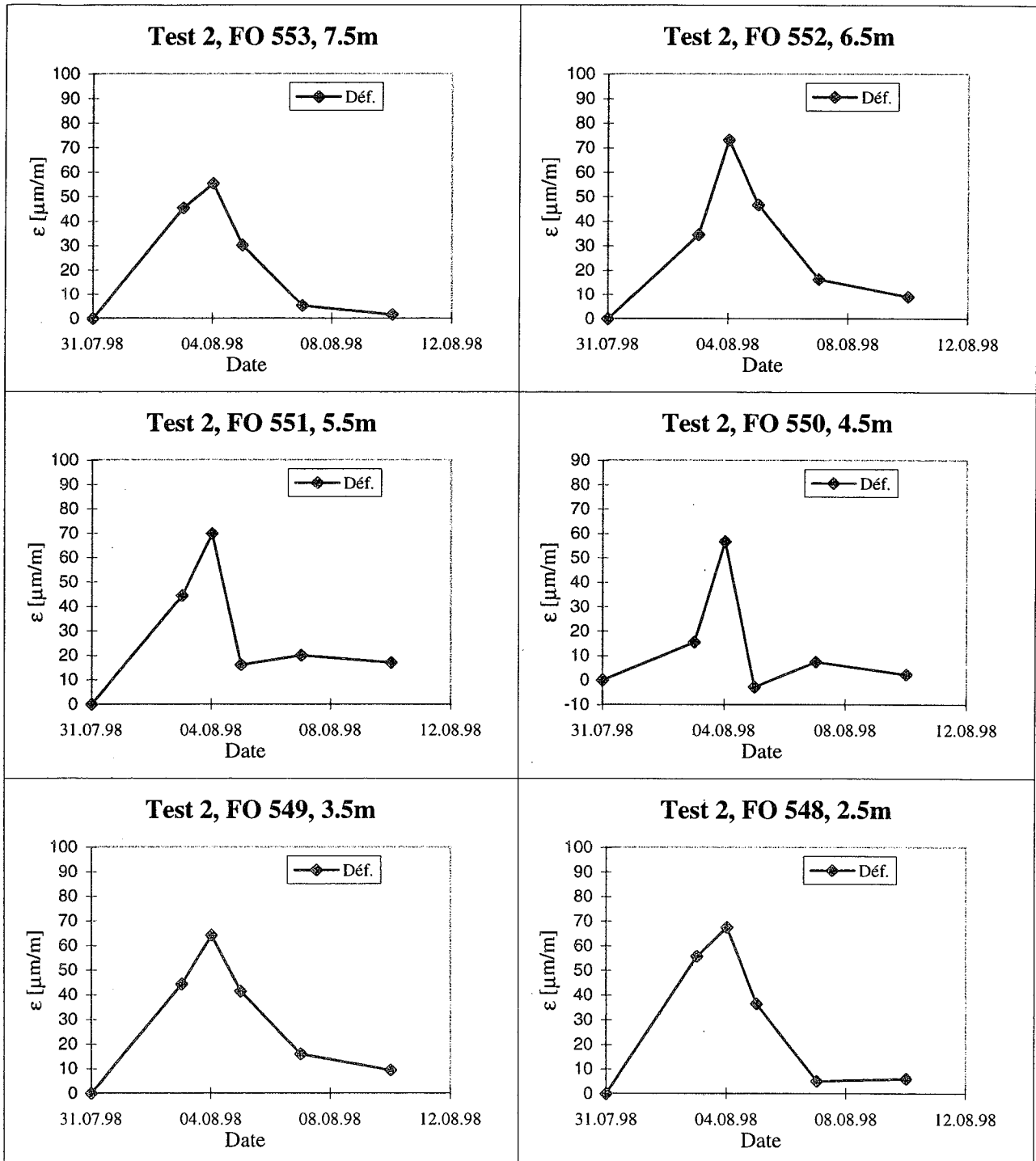


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST2



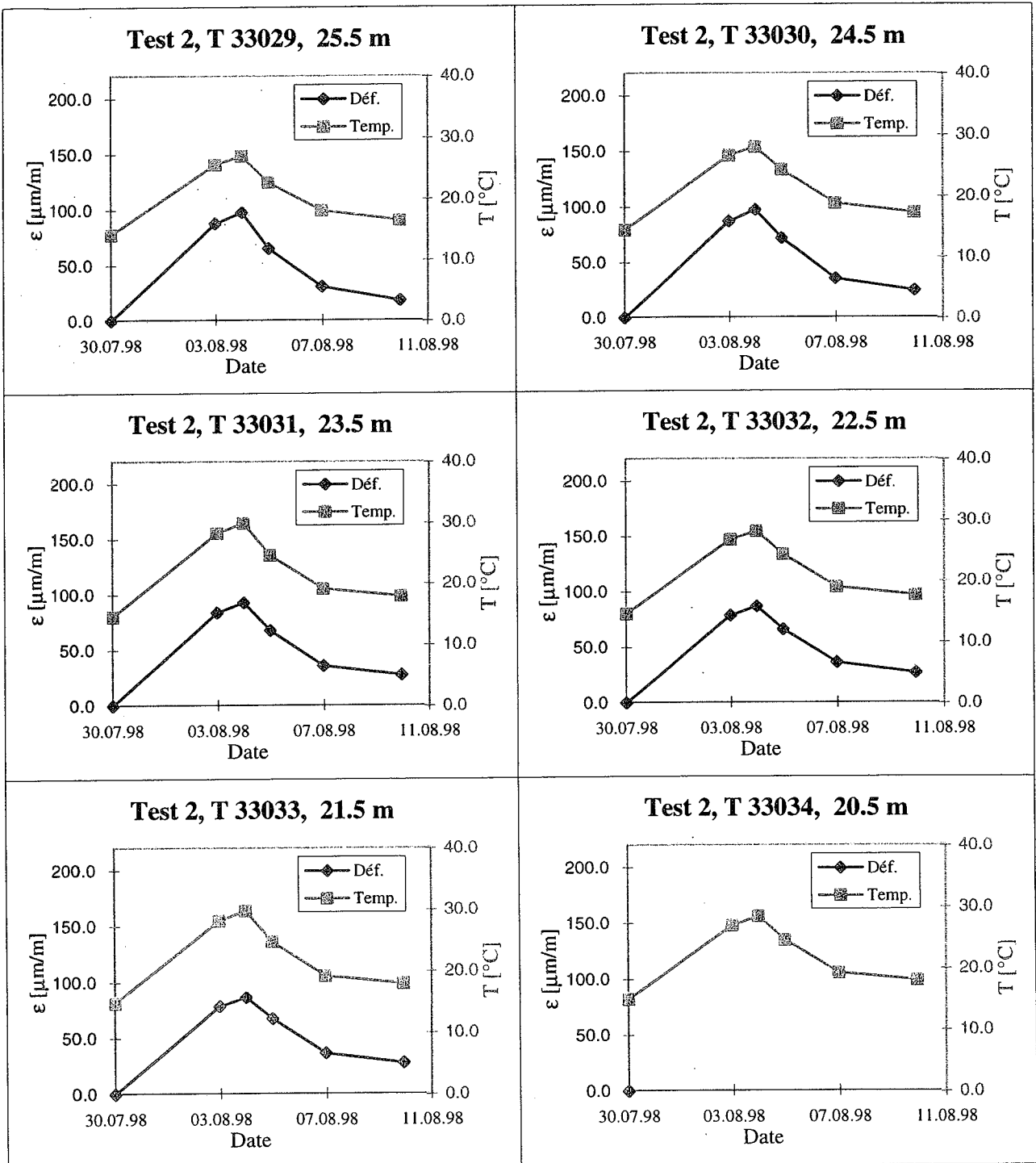
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

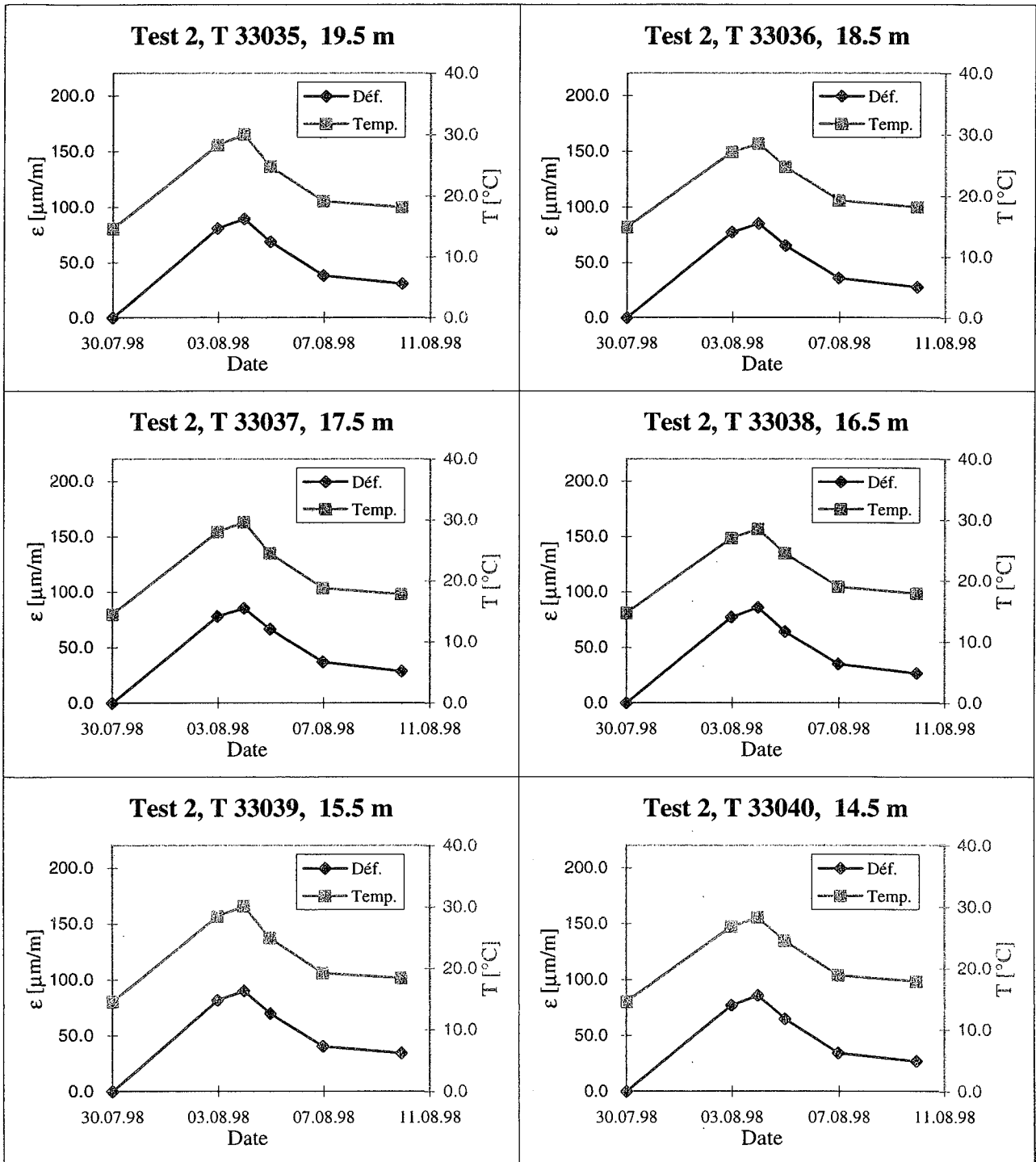
Pieu thermique - SY40
TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



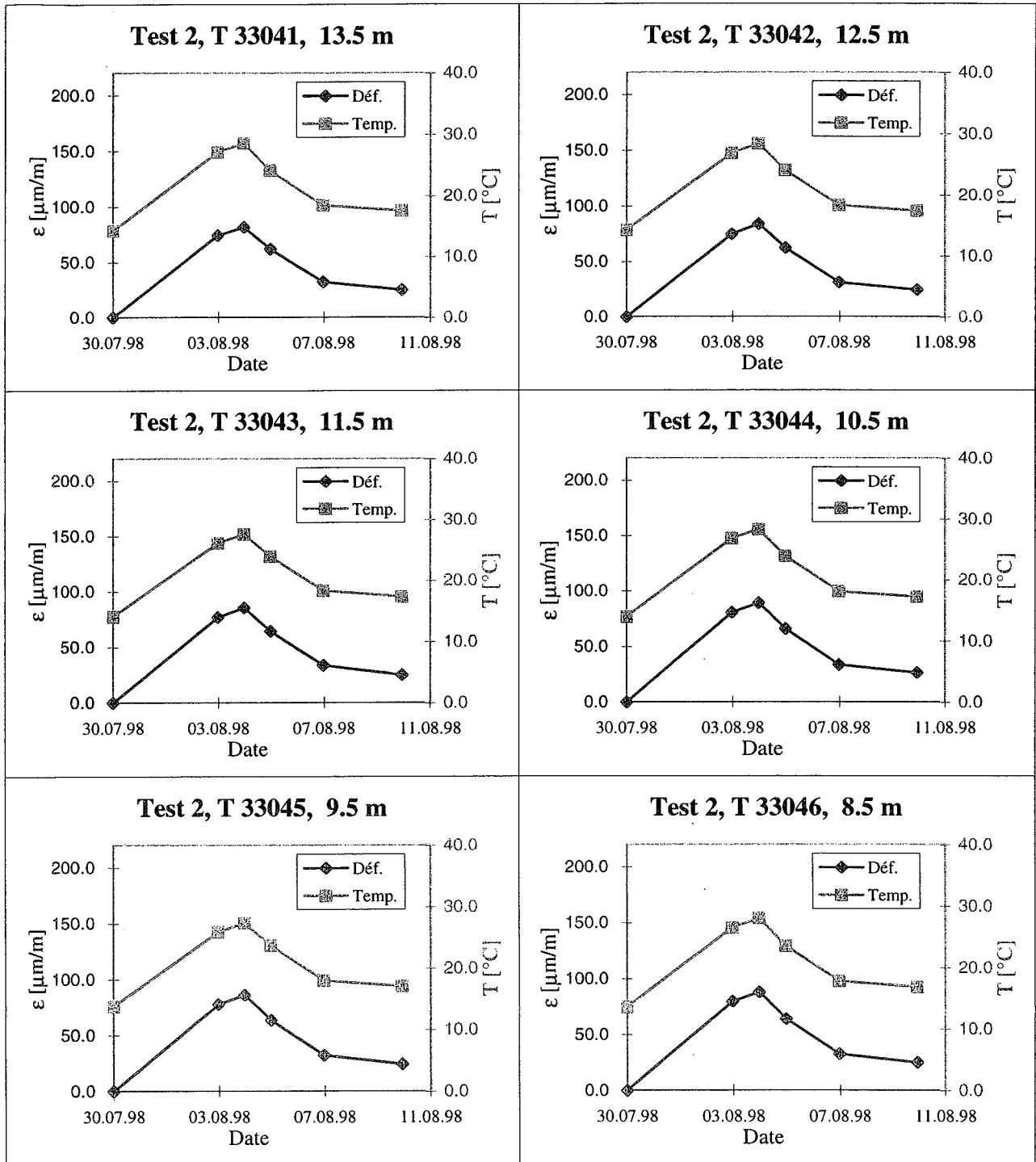


Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST2





Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST2

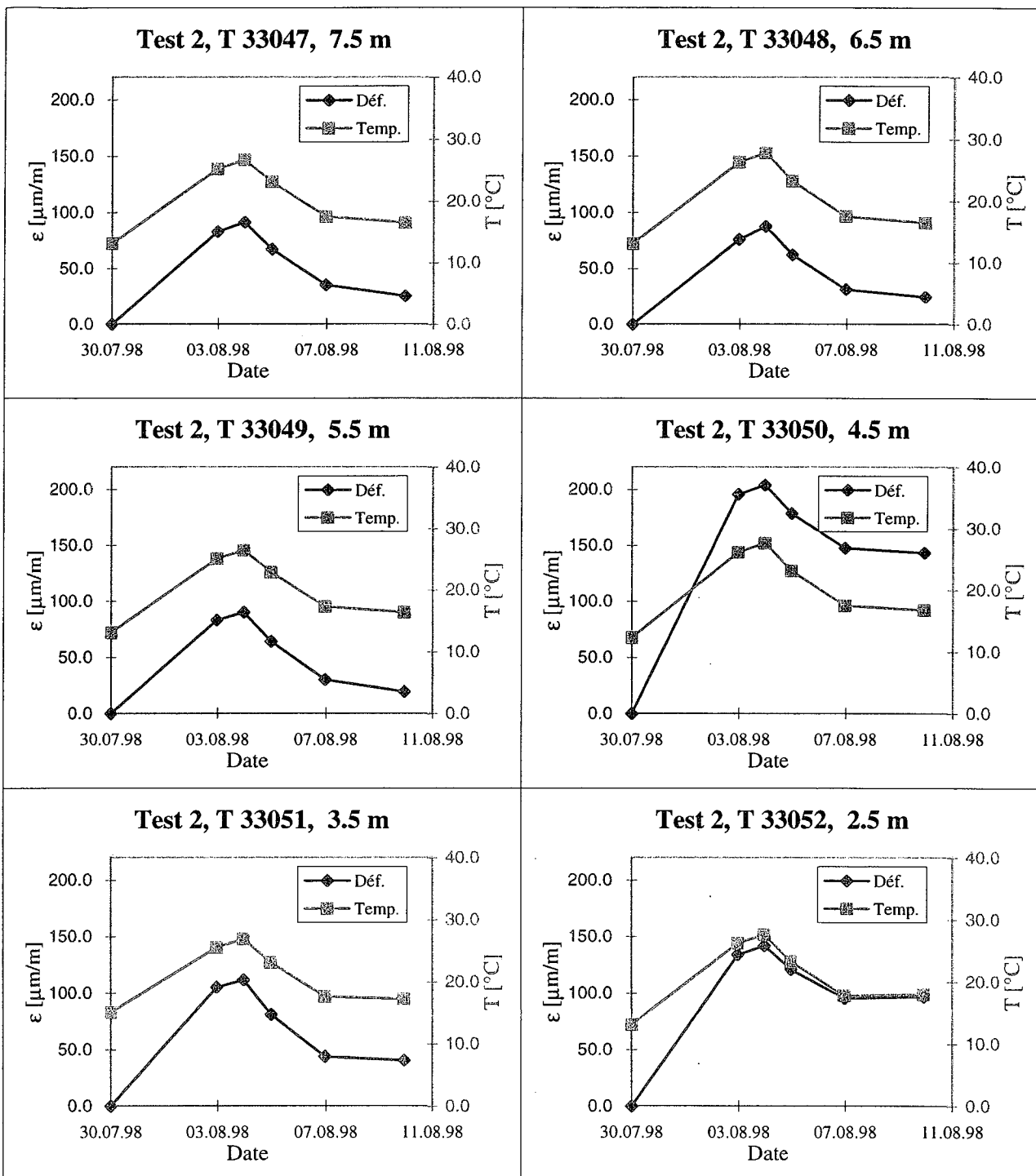


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST2



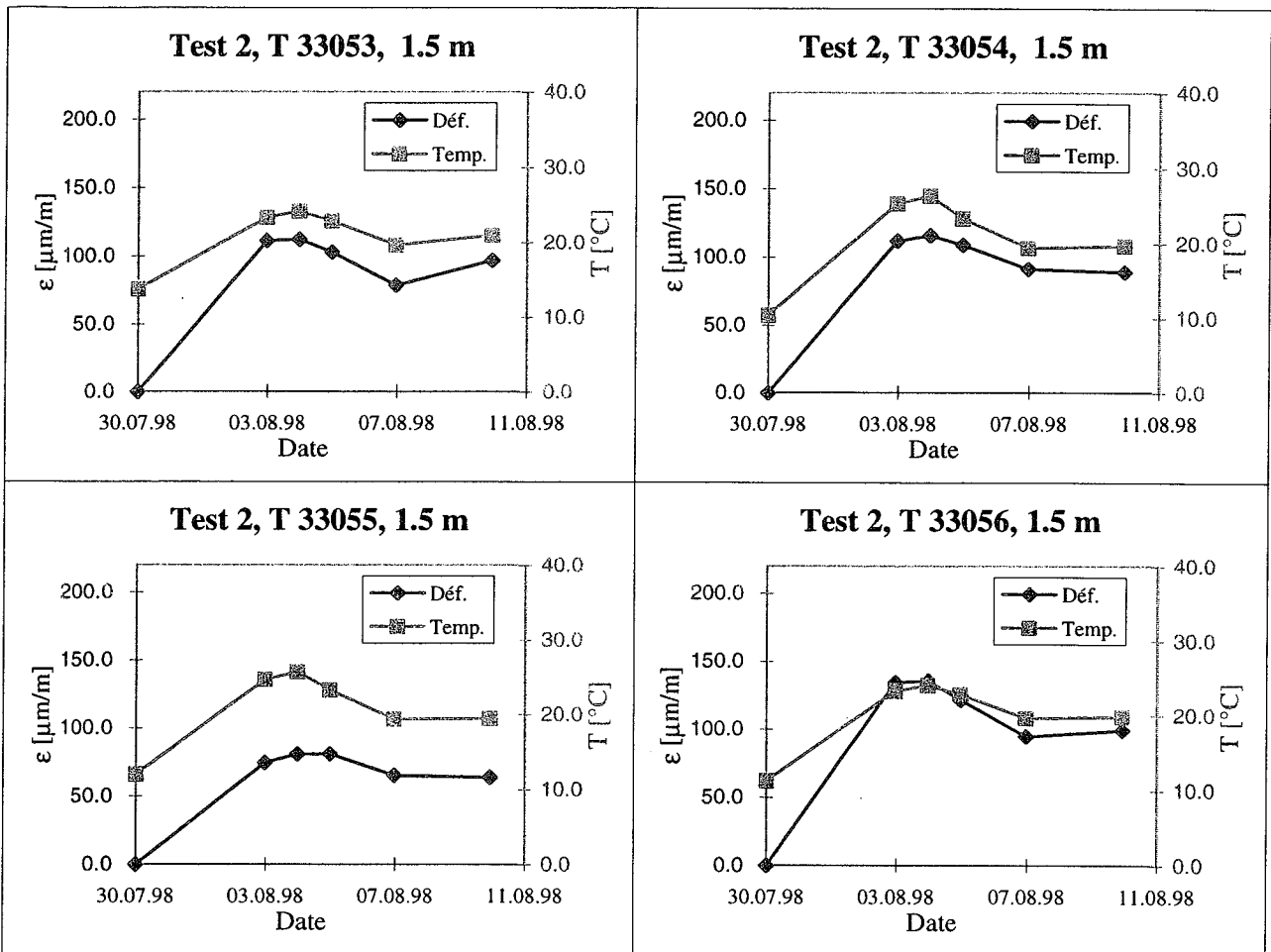
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

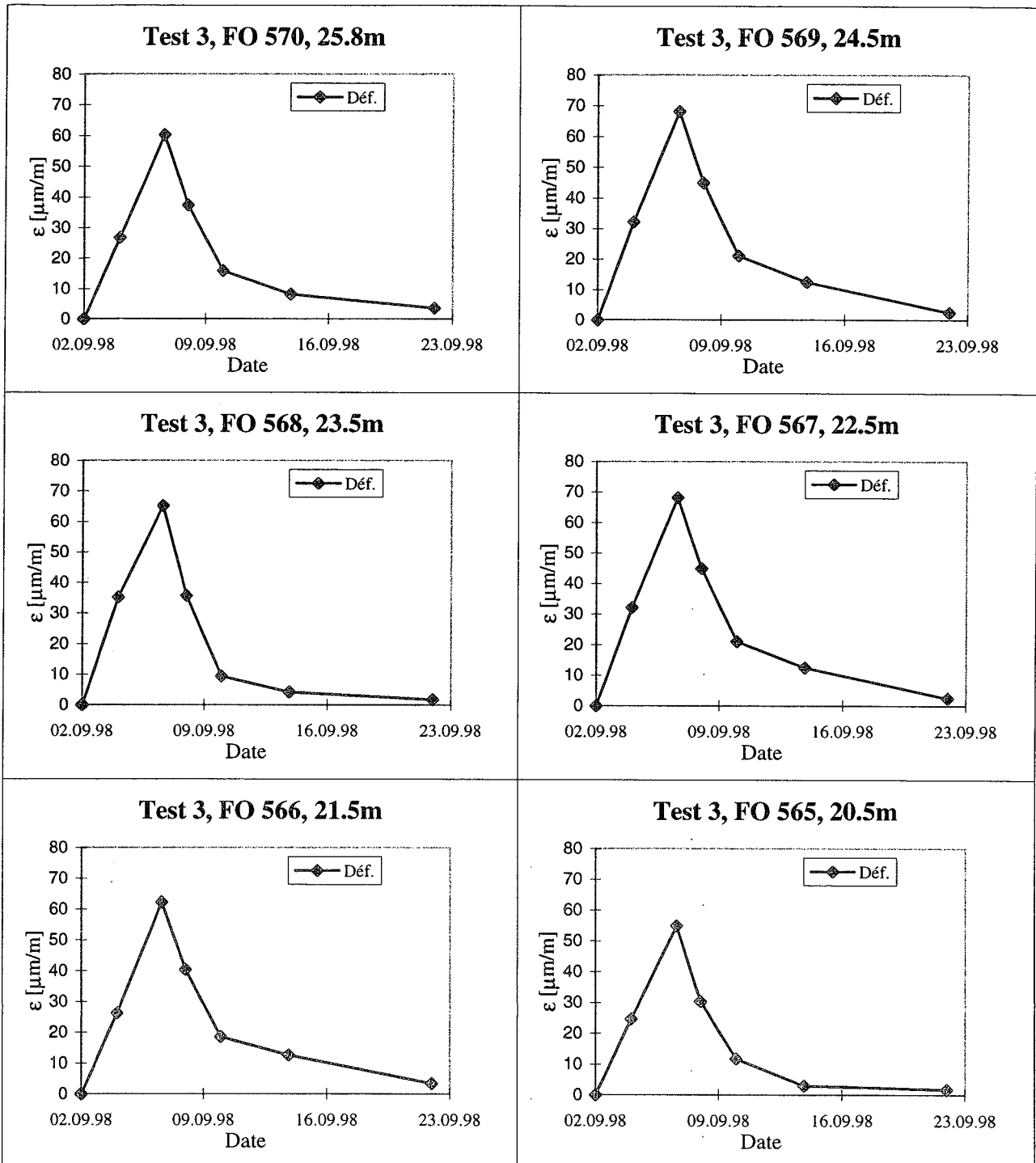


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST3

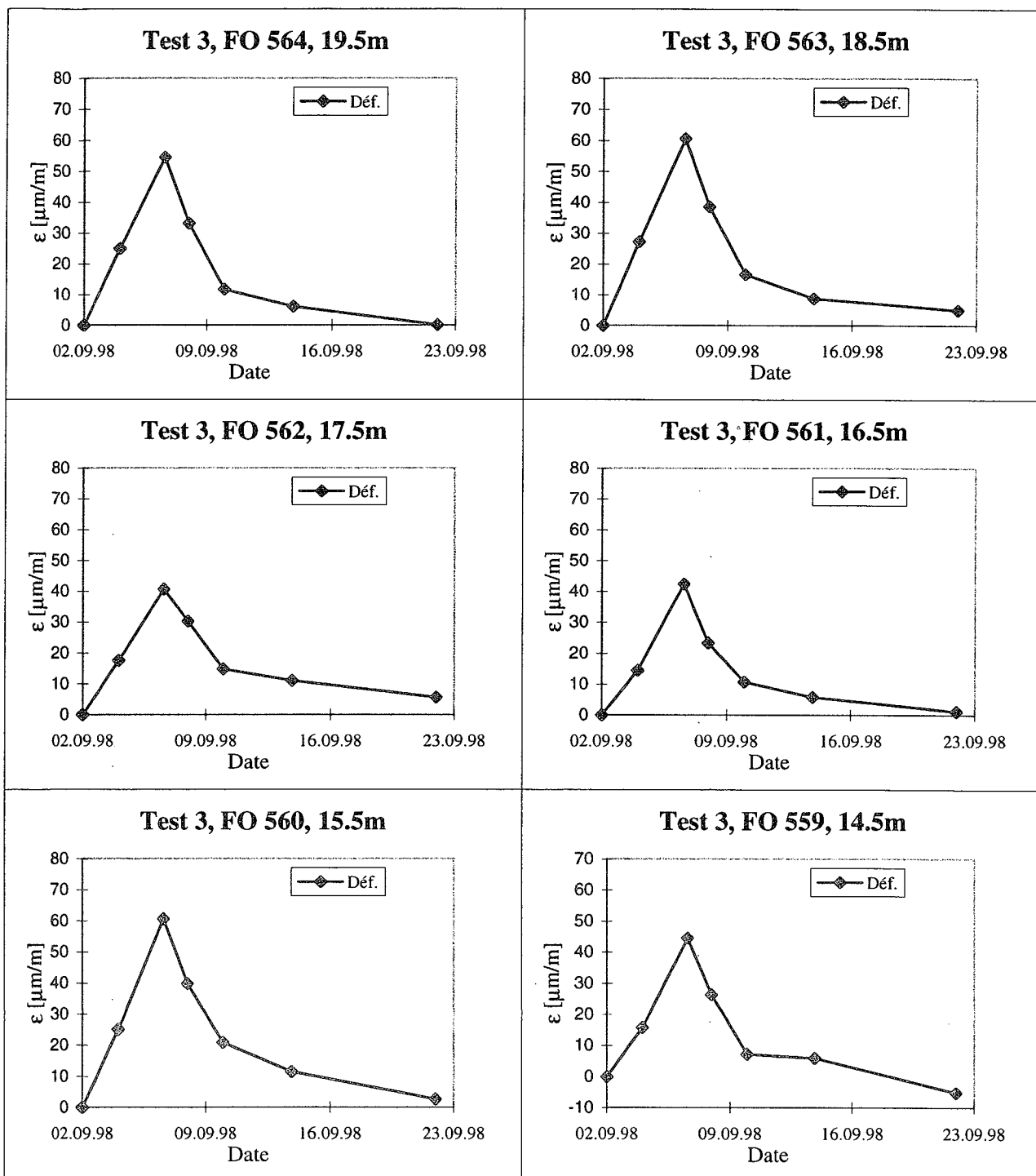


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST3

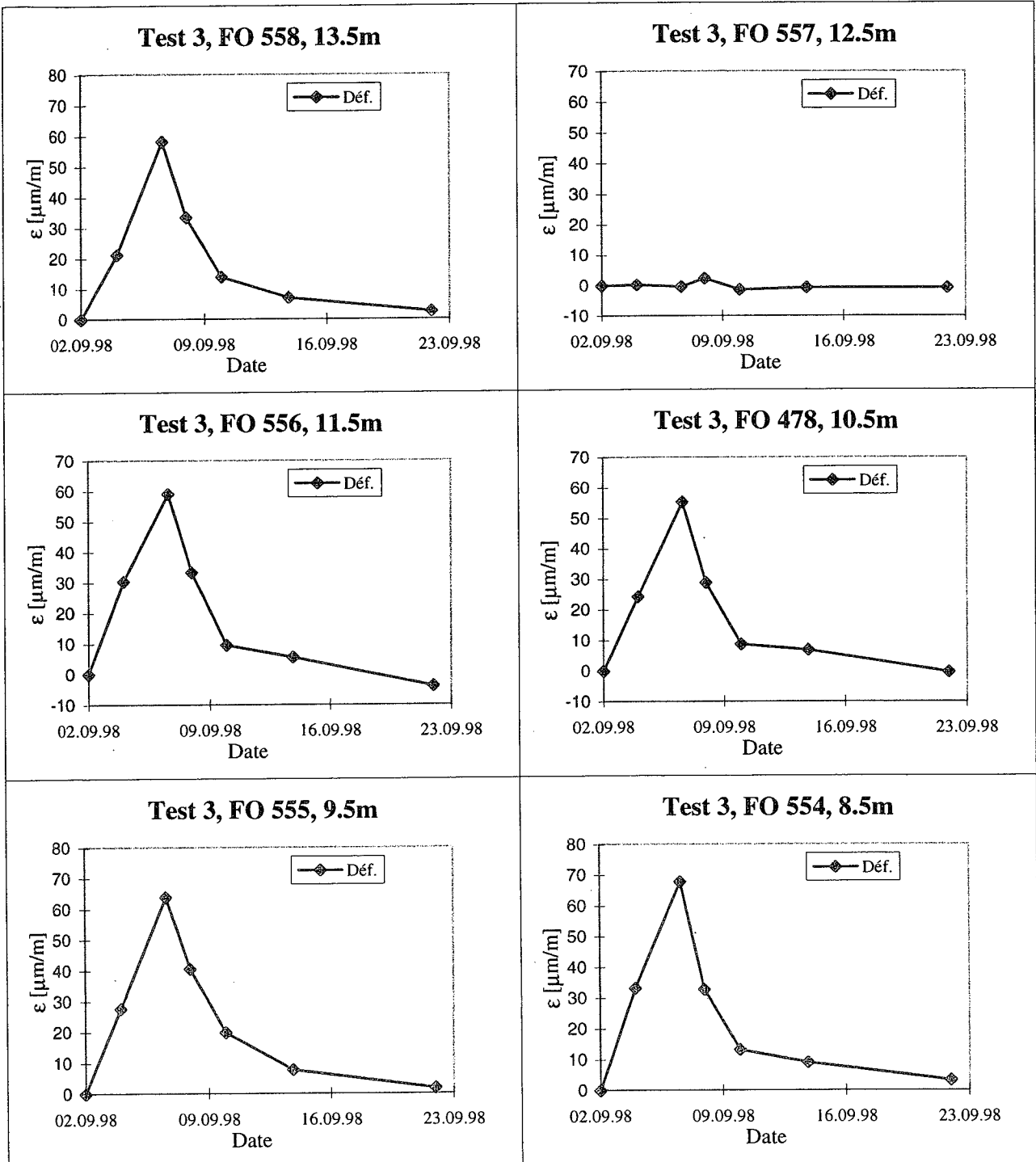


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
TEST3

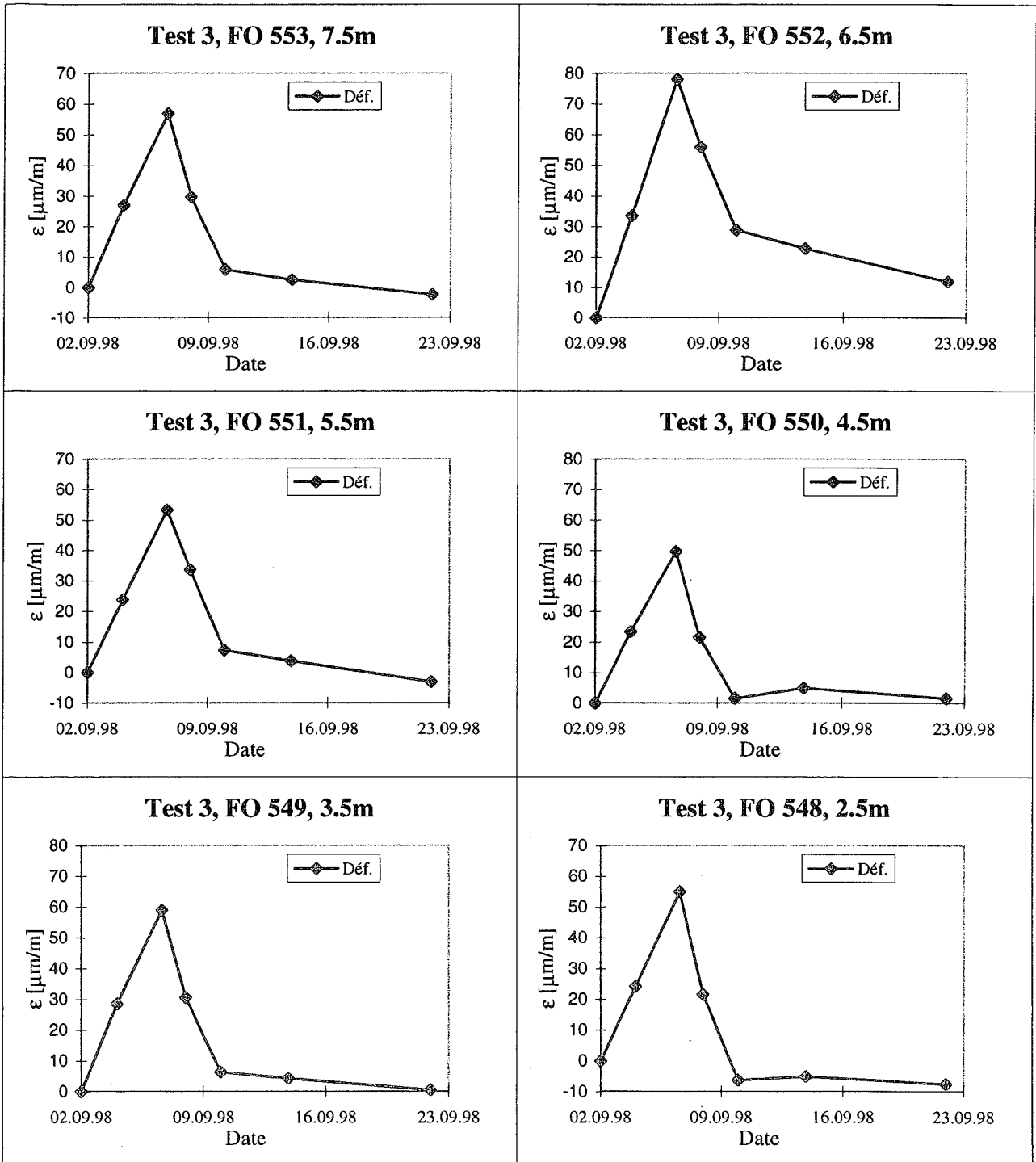


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST3



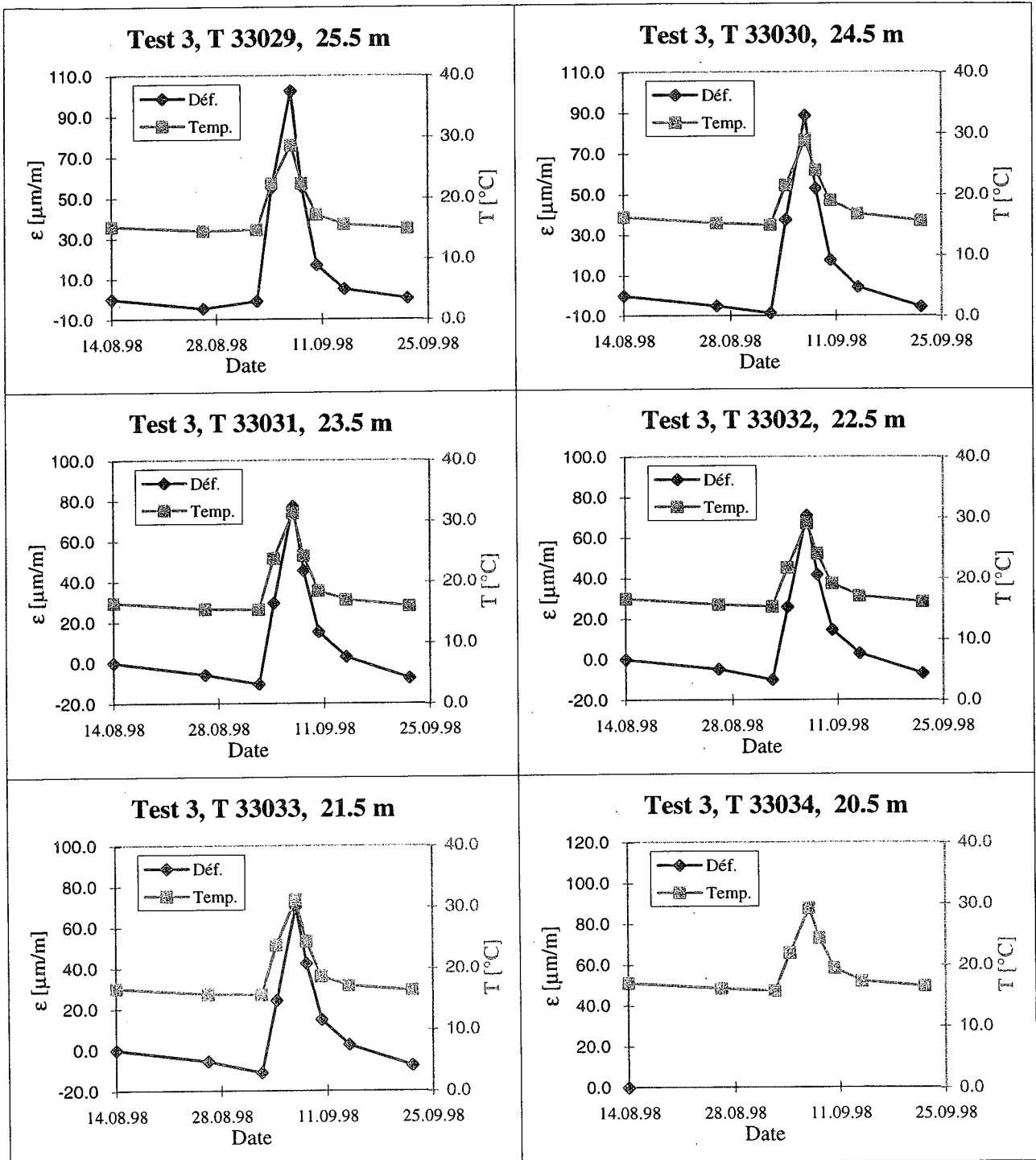
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



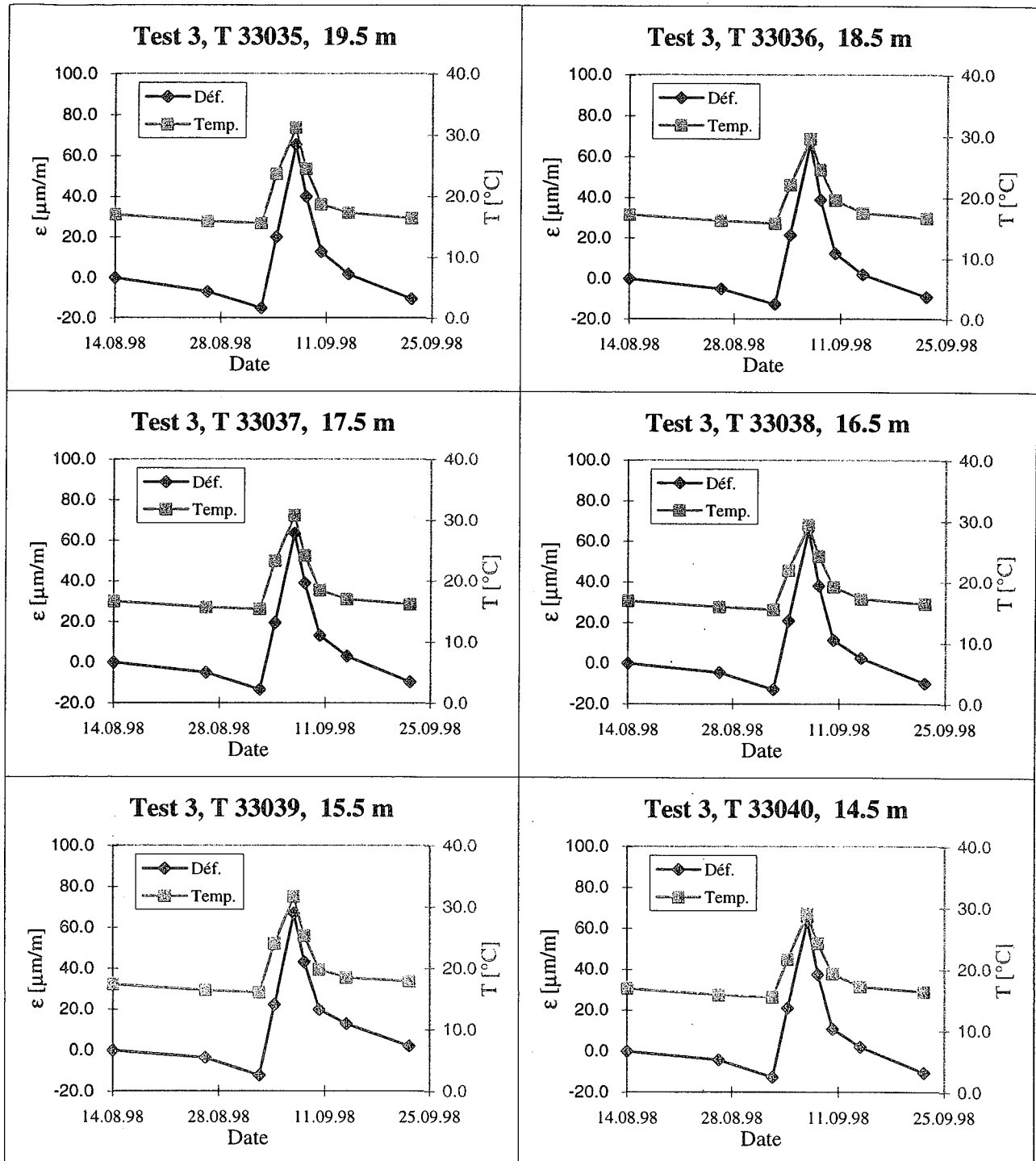
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



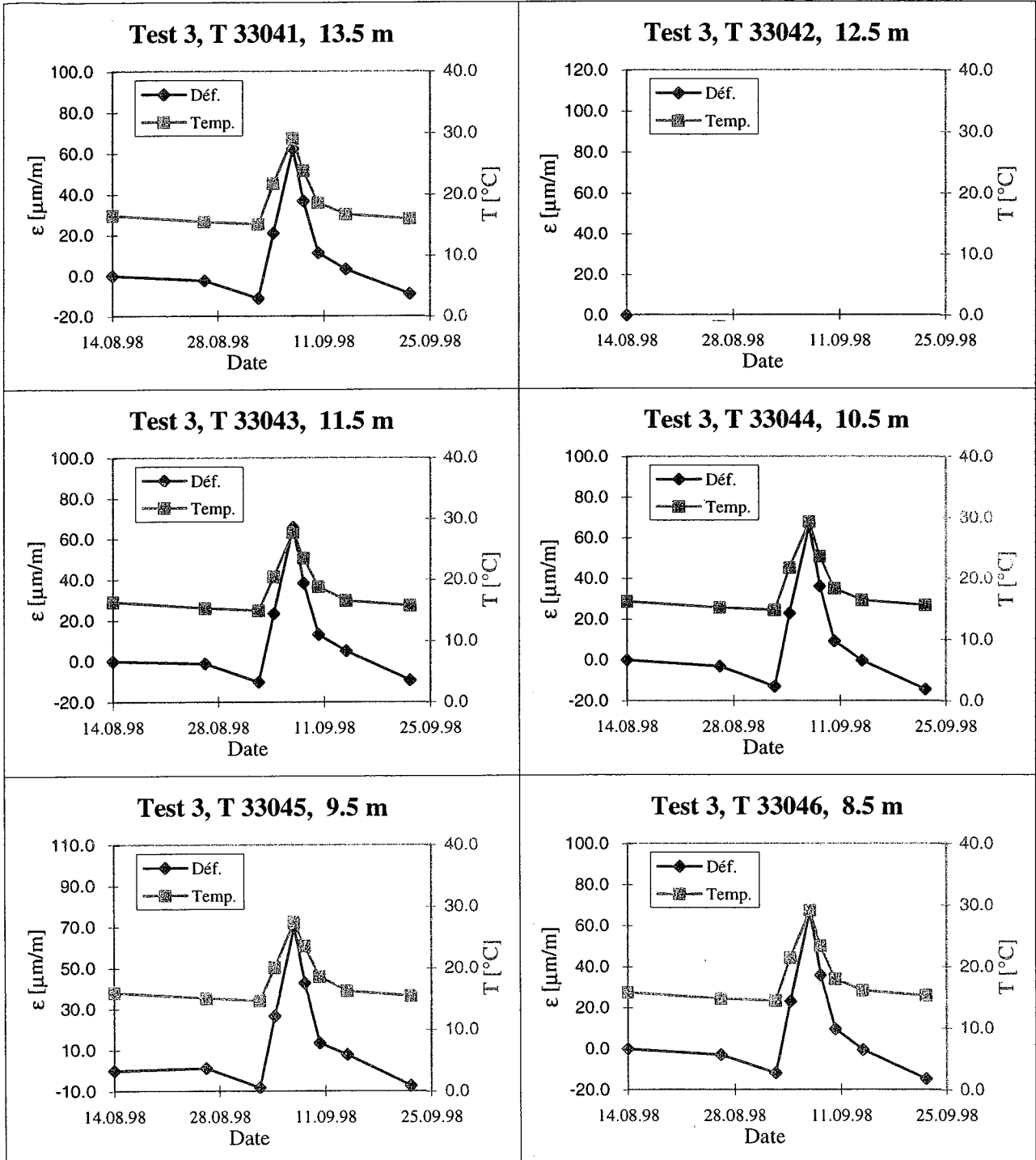
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



Pieu thermique - SY40
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

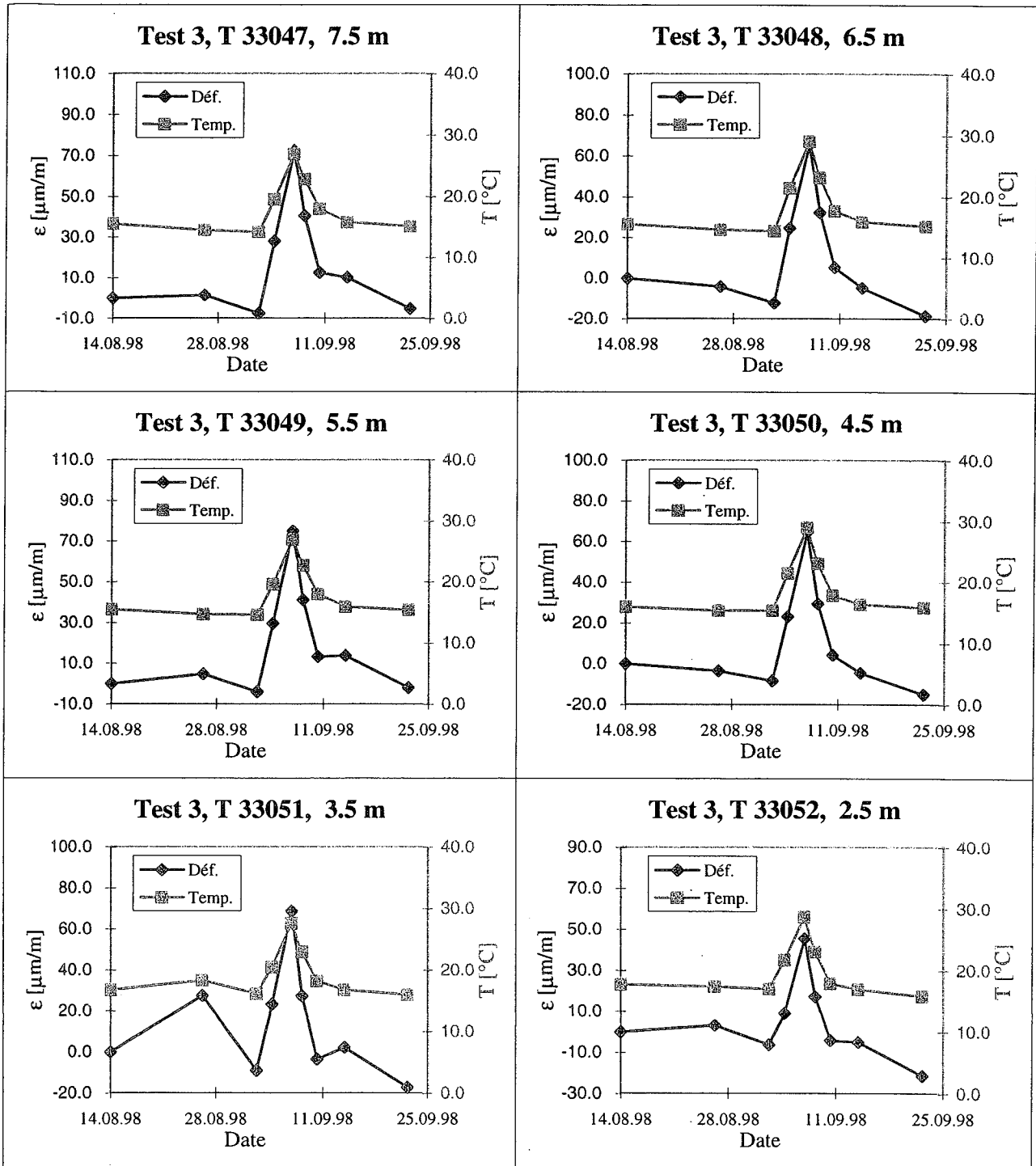
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE





Pieu thermique - SY40
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

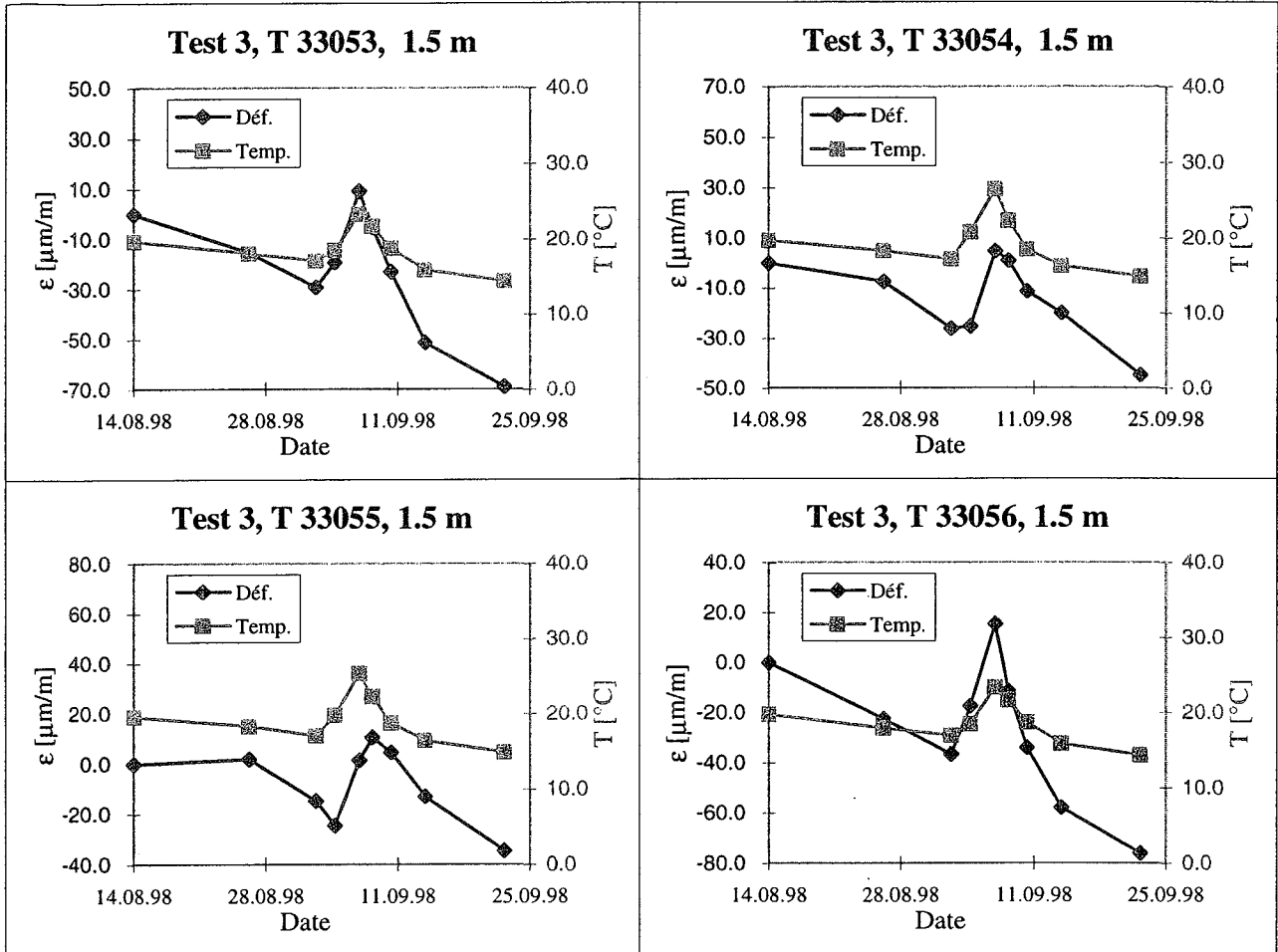


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)
 TEST3

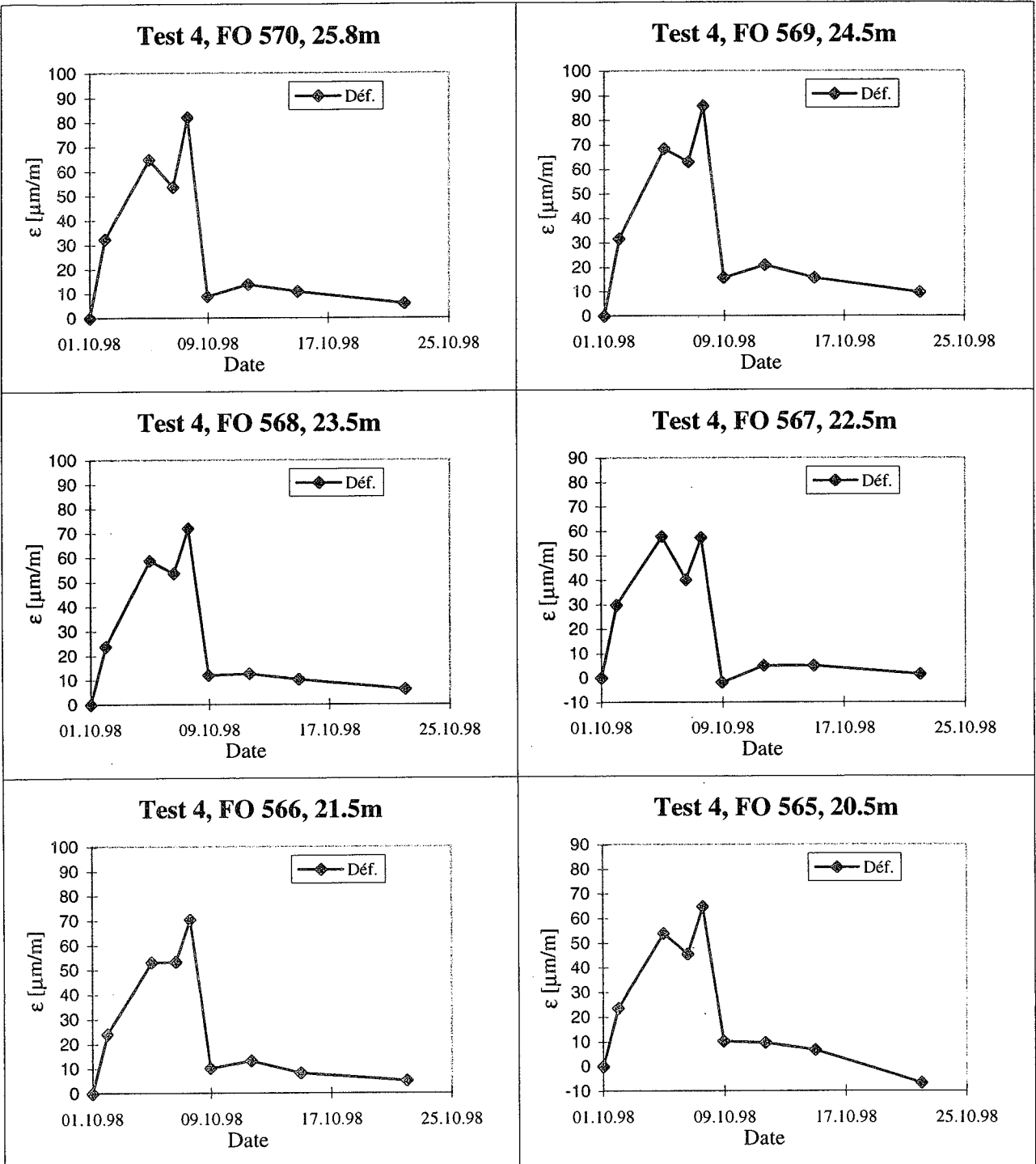


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST4

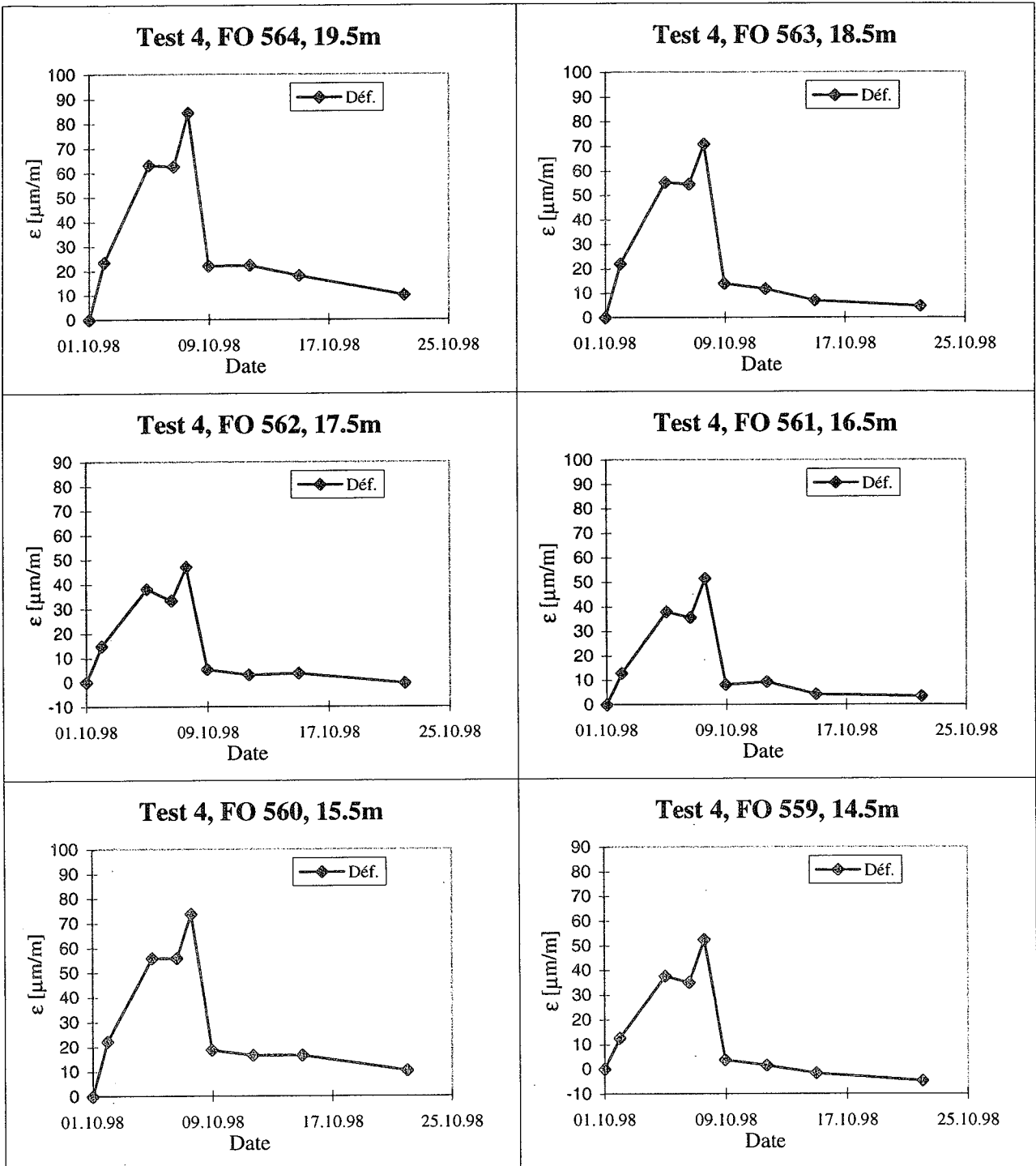


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST4

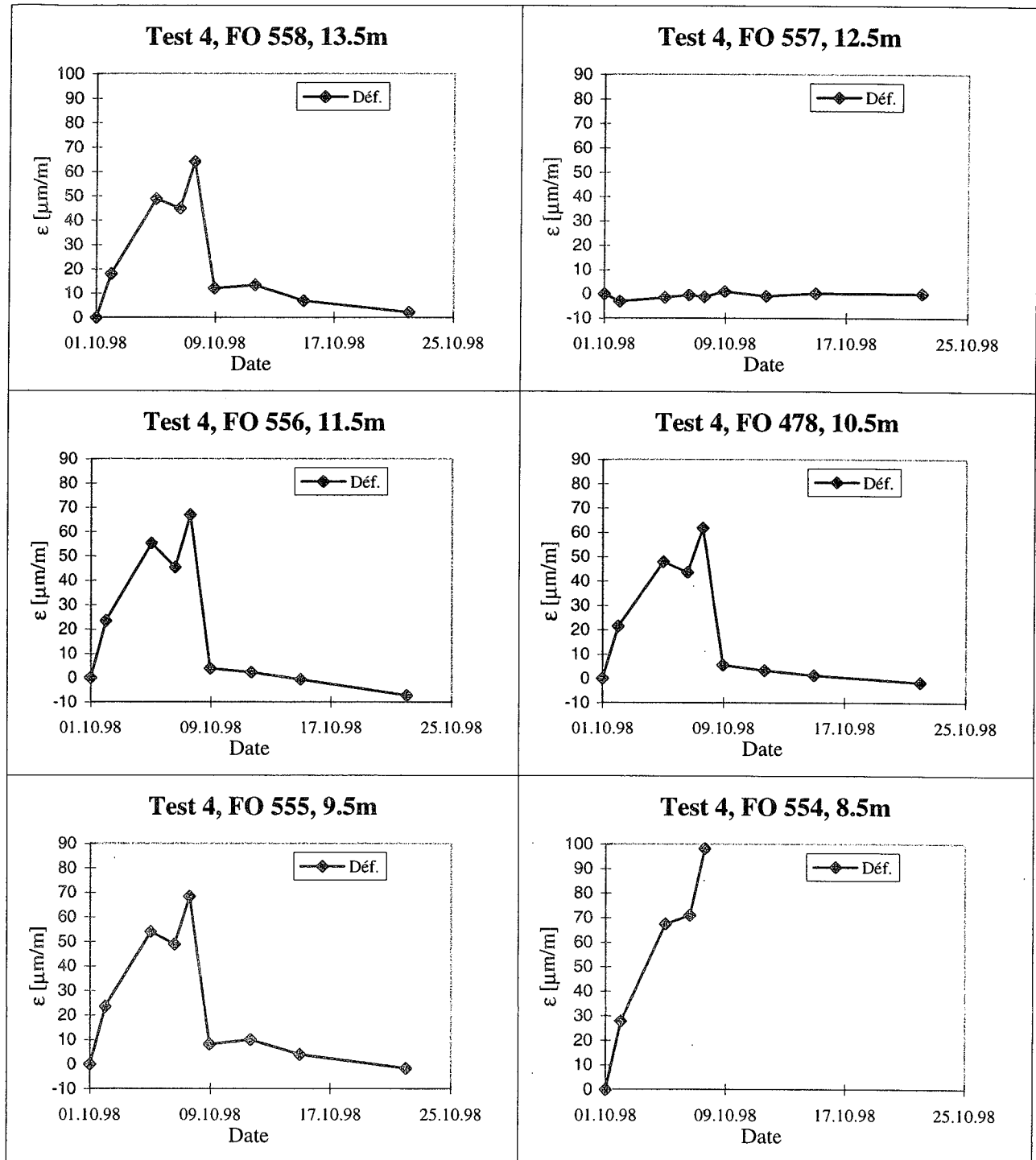


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST4

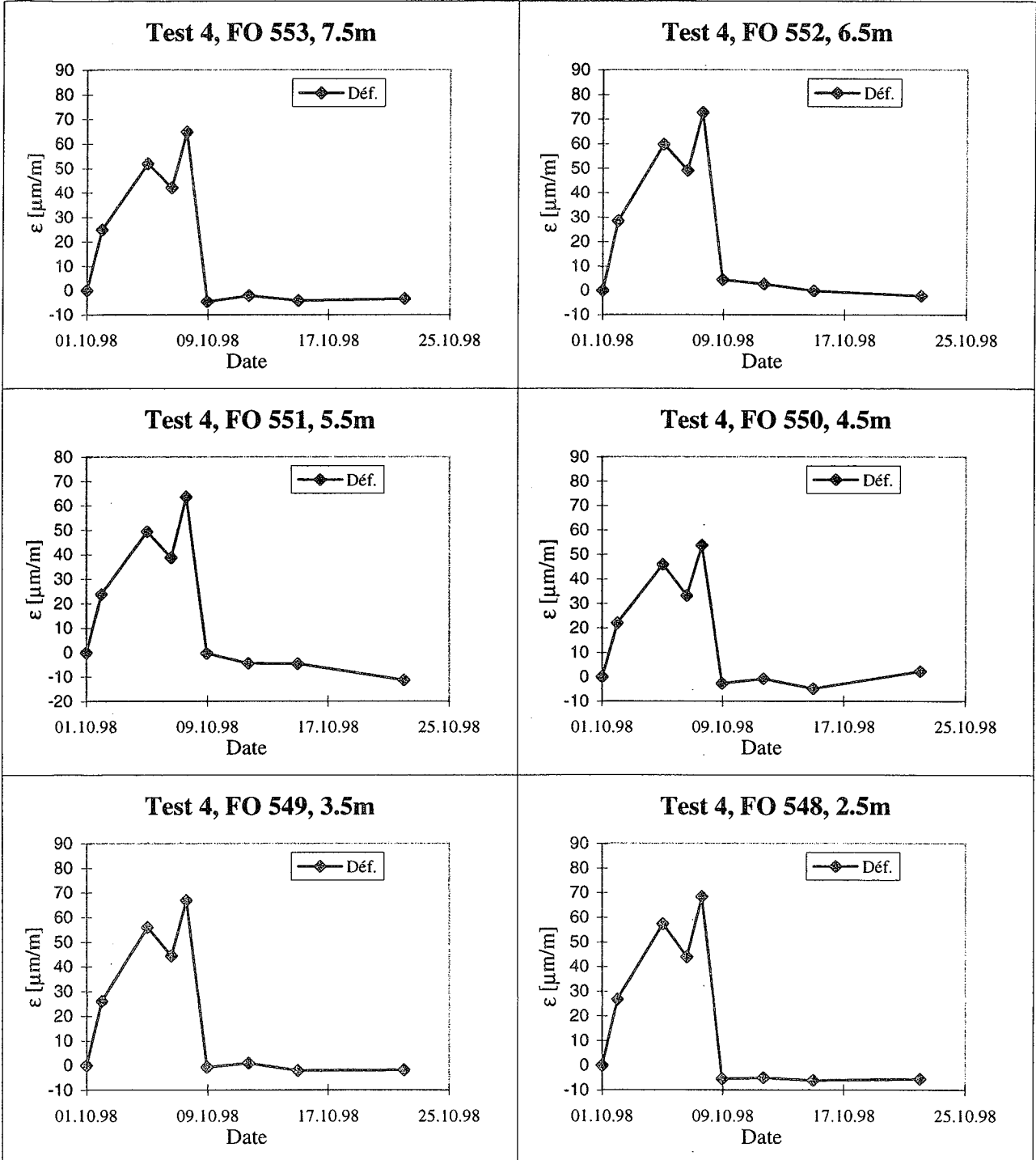


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

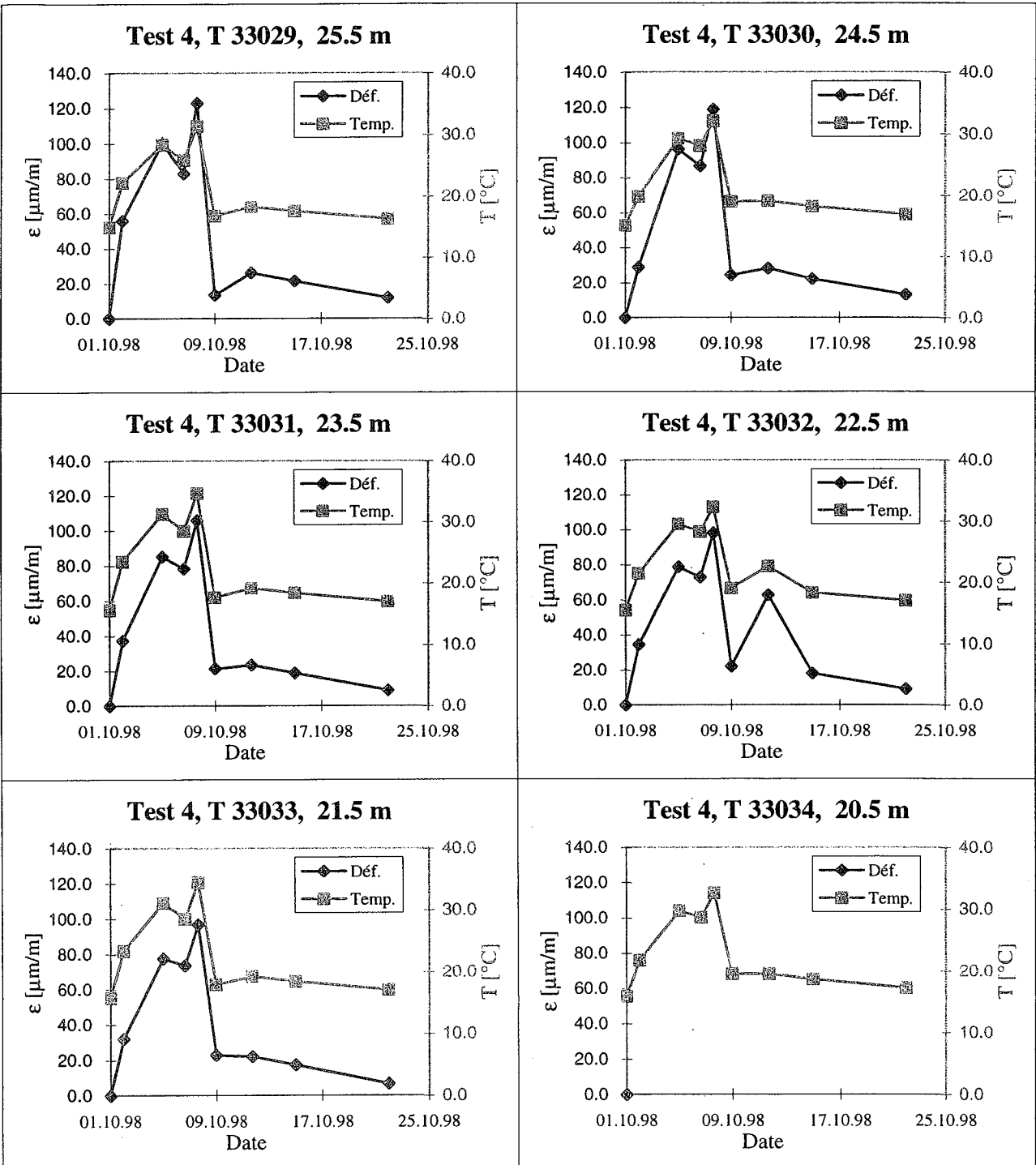
Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST4





Pieu thermique - SY40
 TEST4

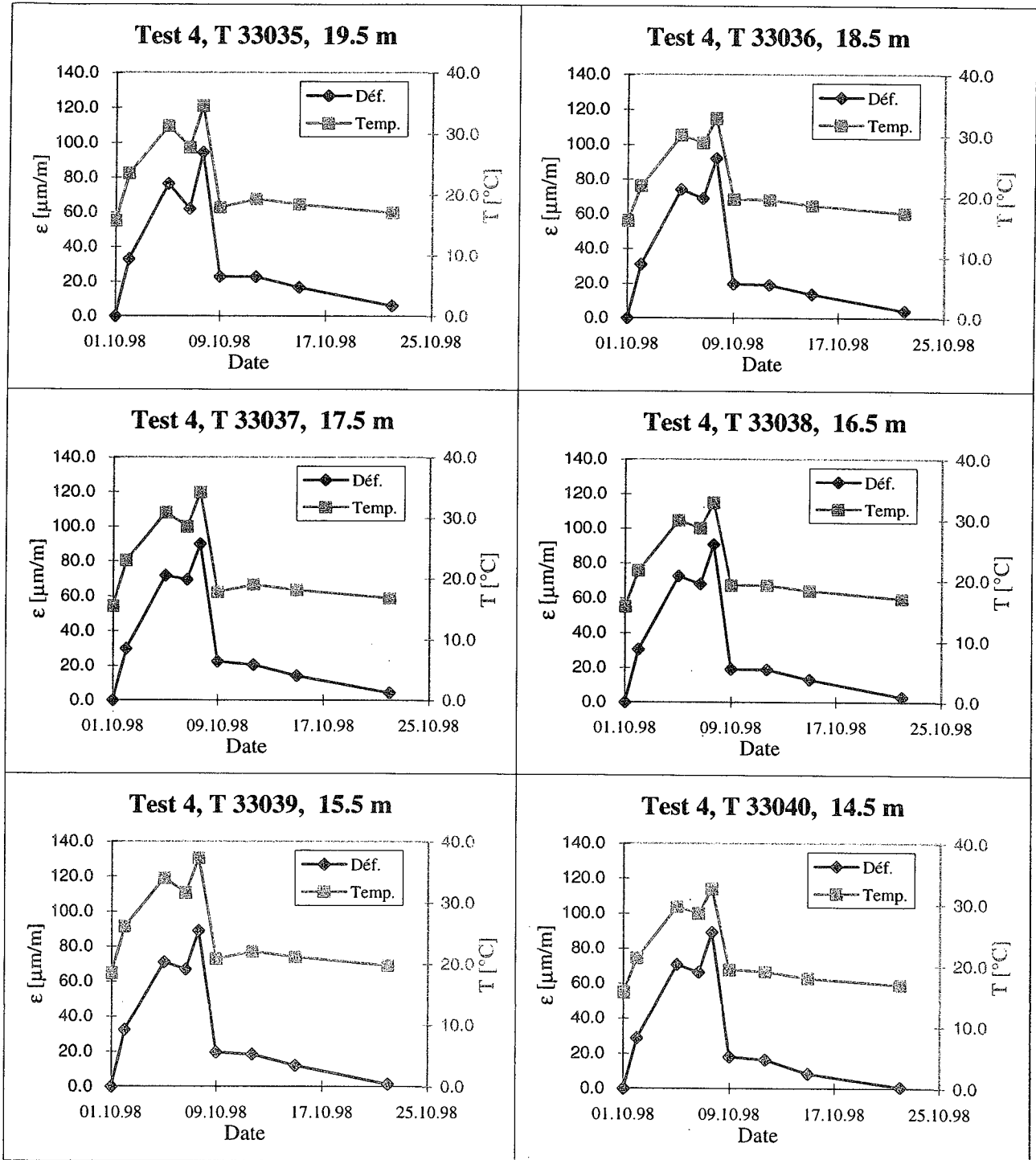
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST4

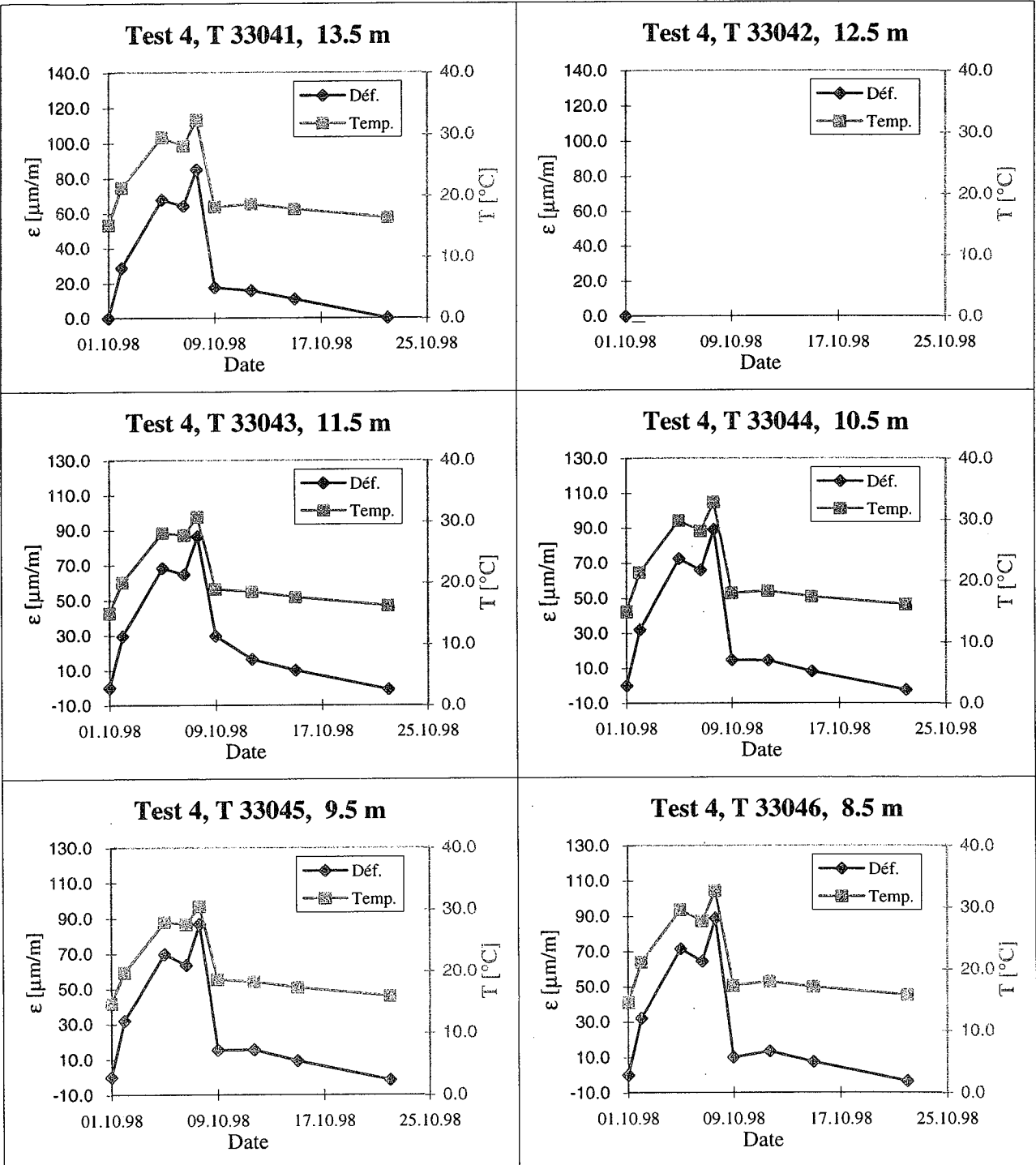
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST4

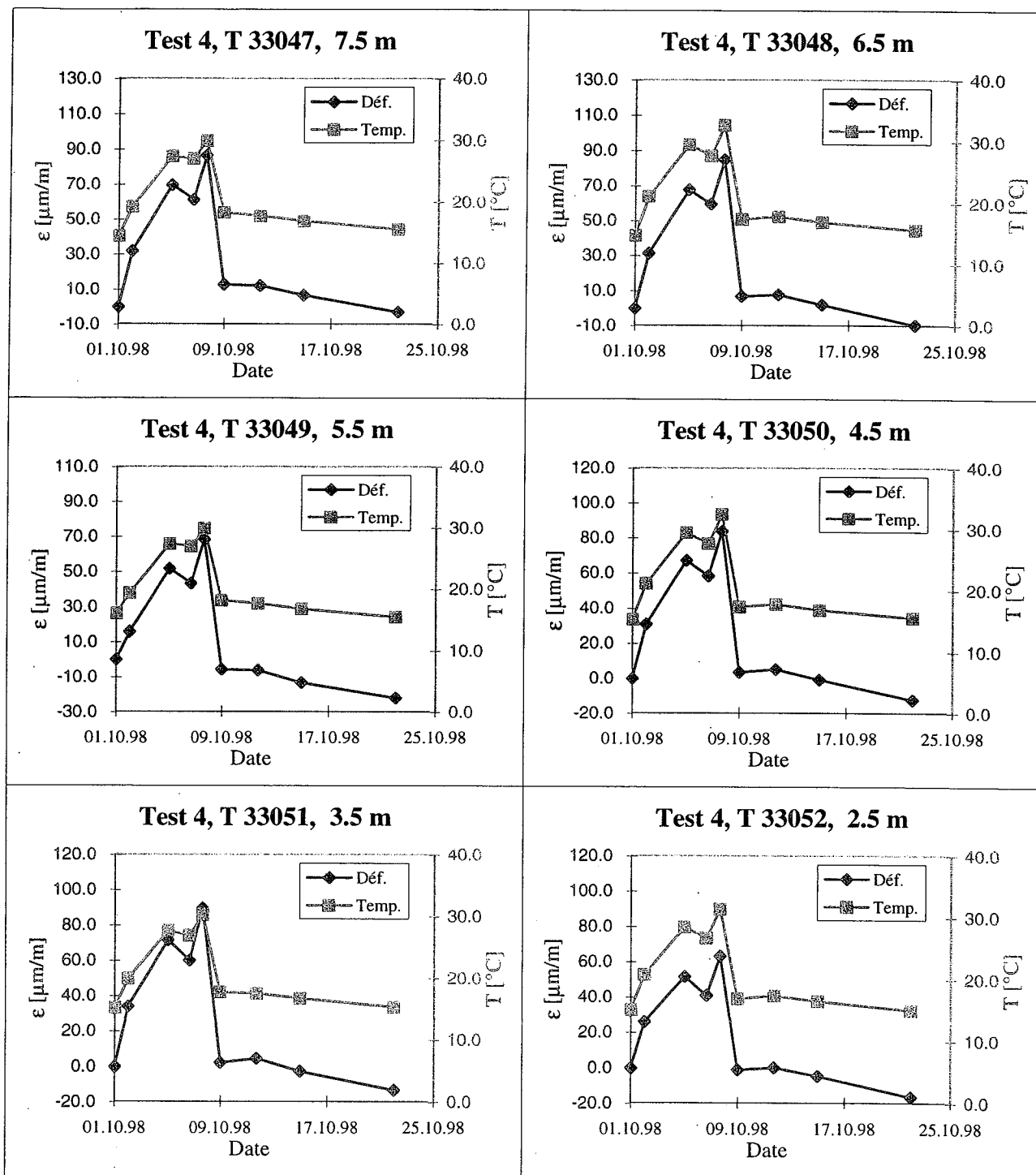
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST4

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



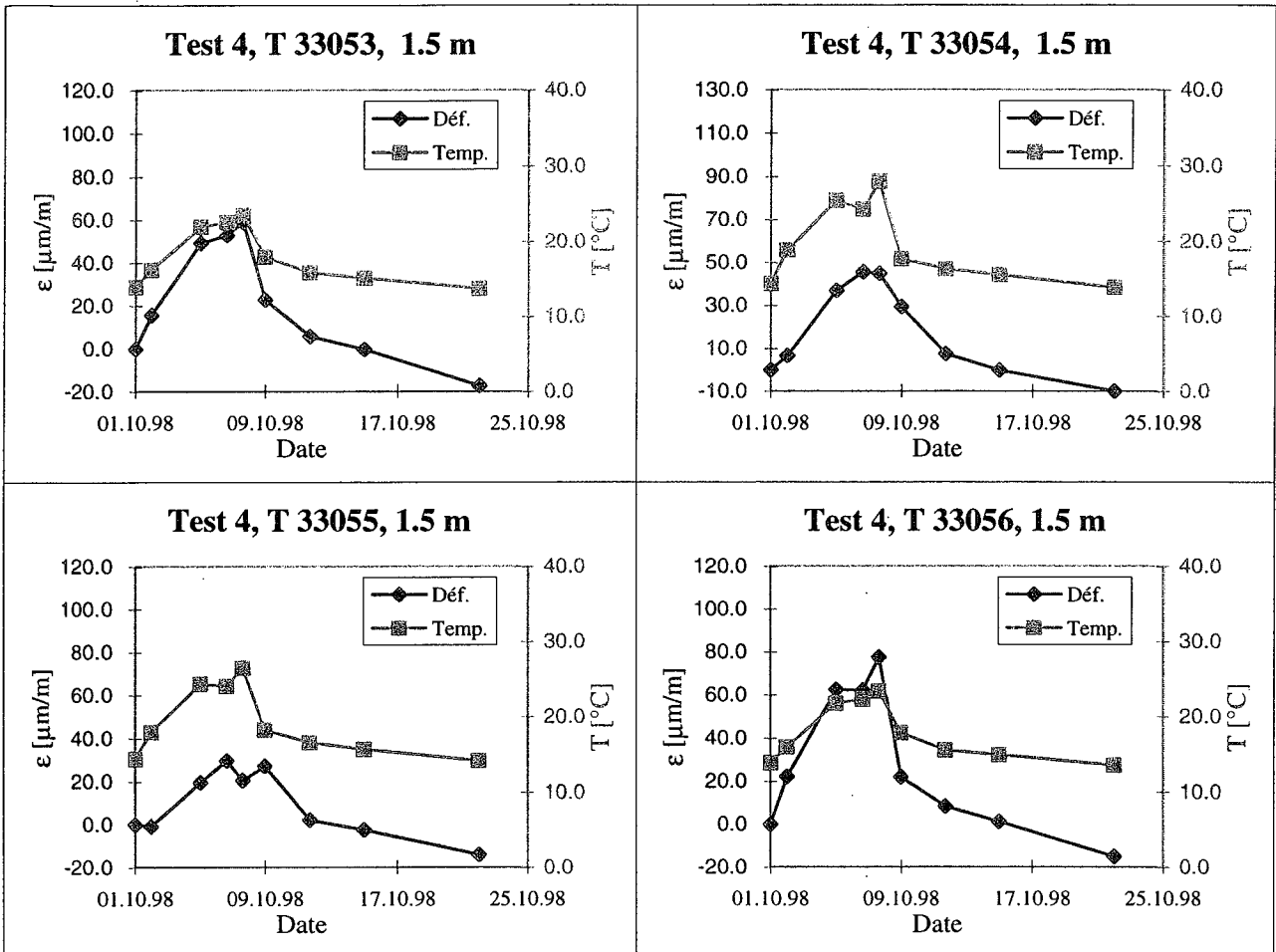
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST4

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

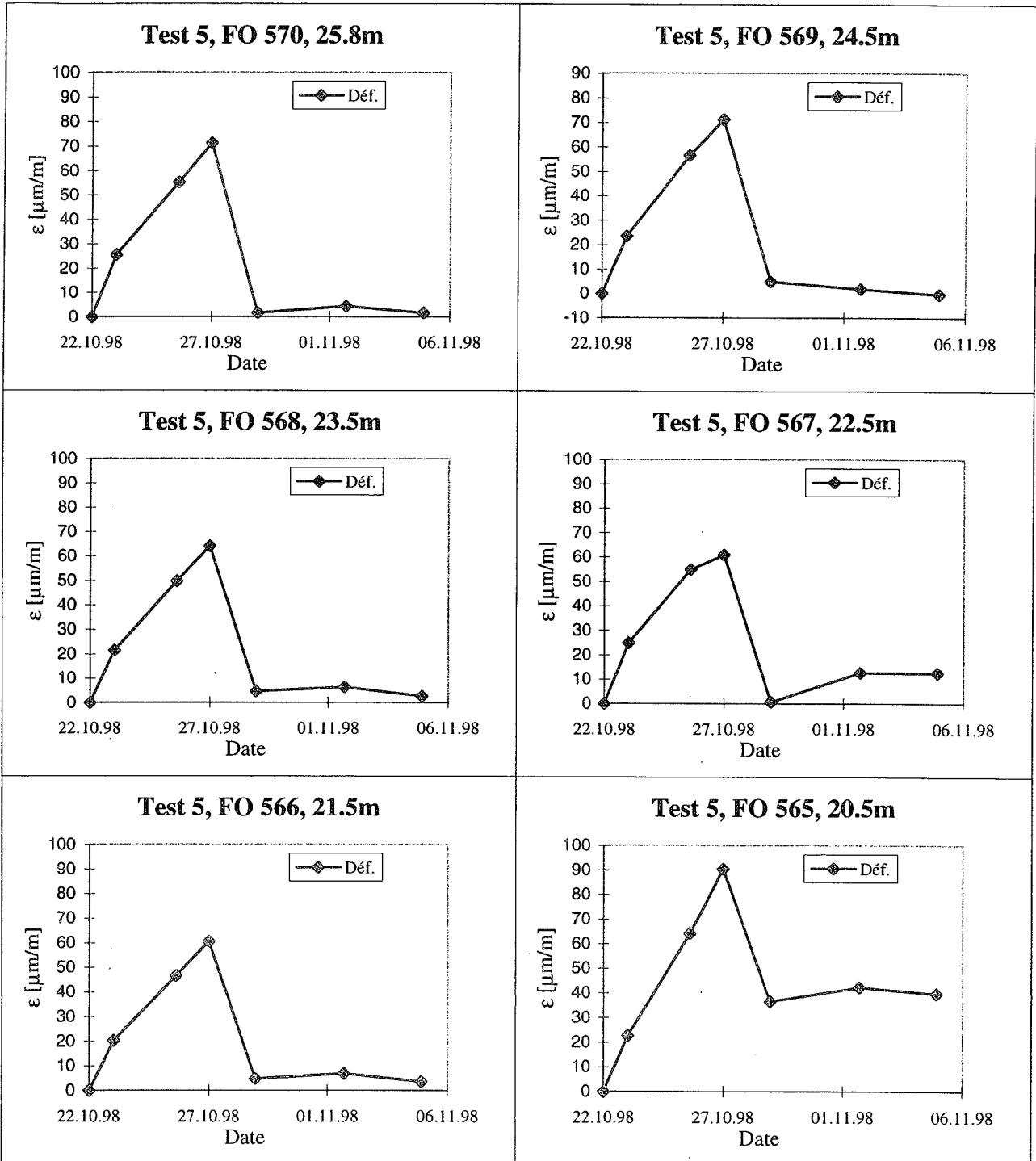


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST5

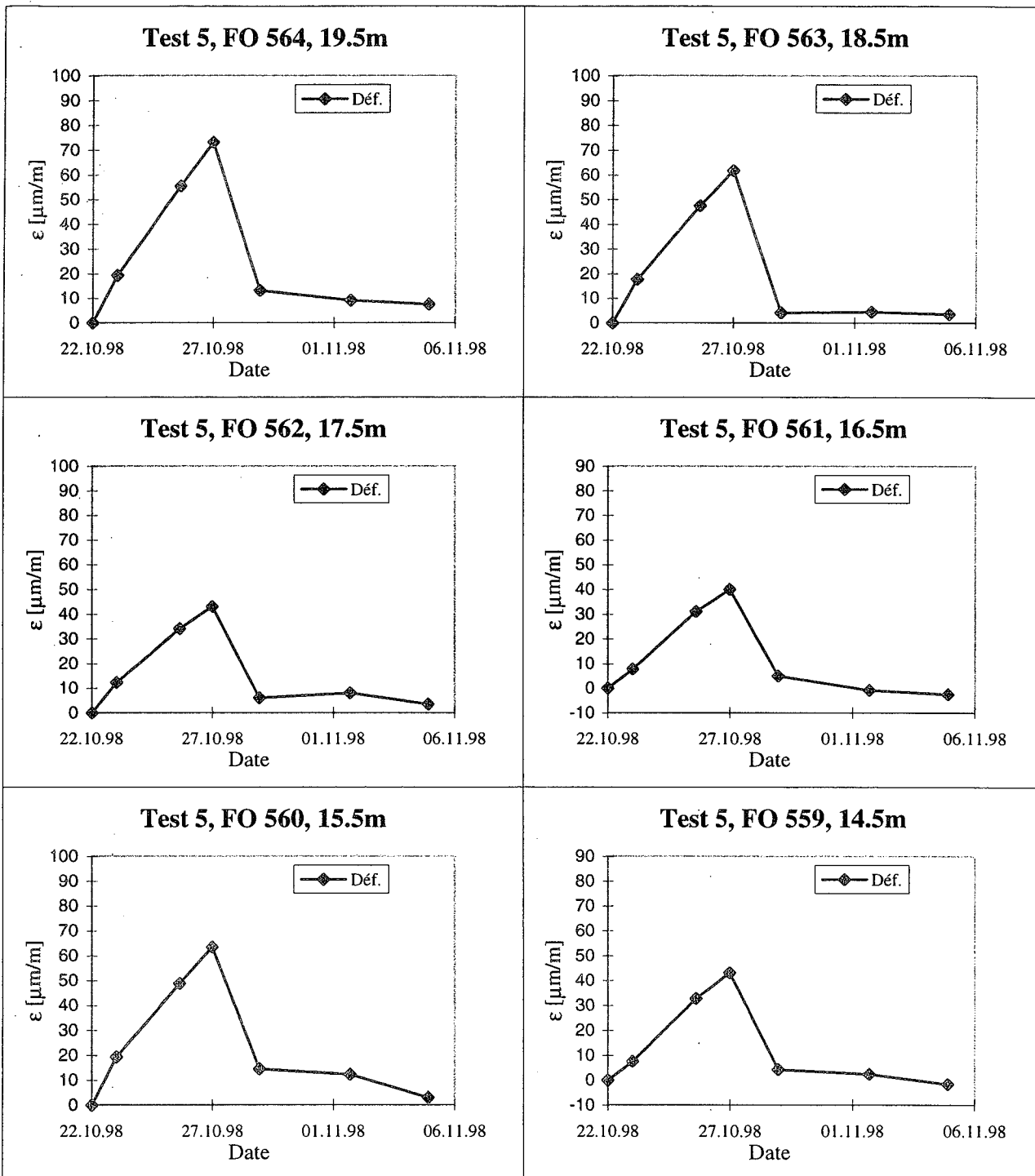


DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST5

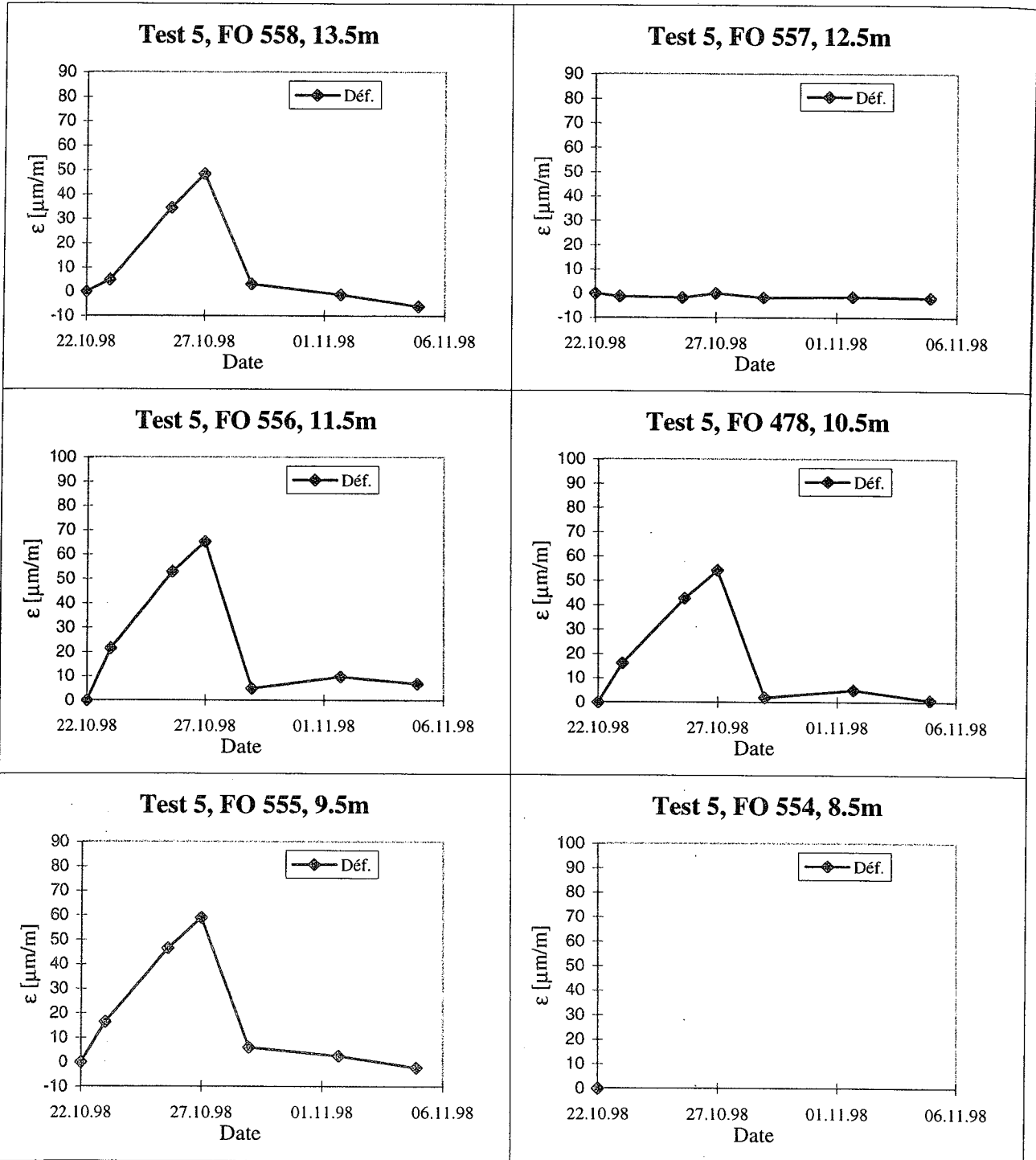


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



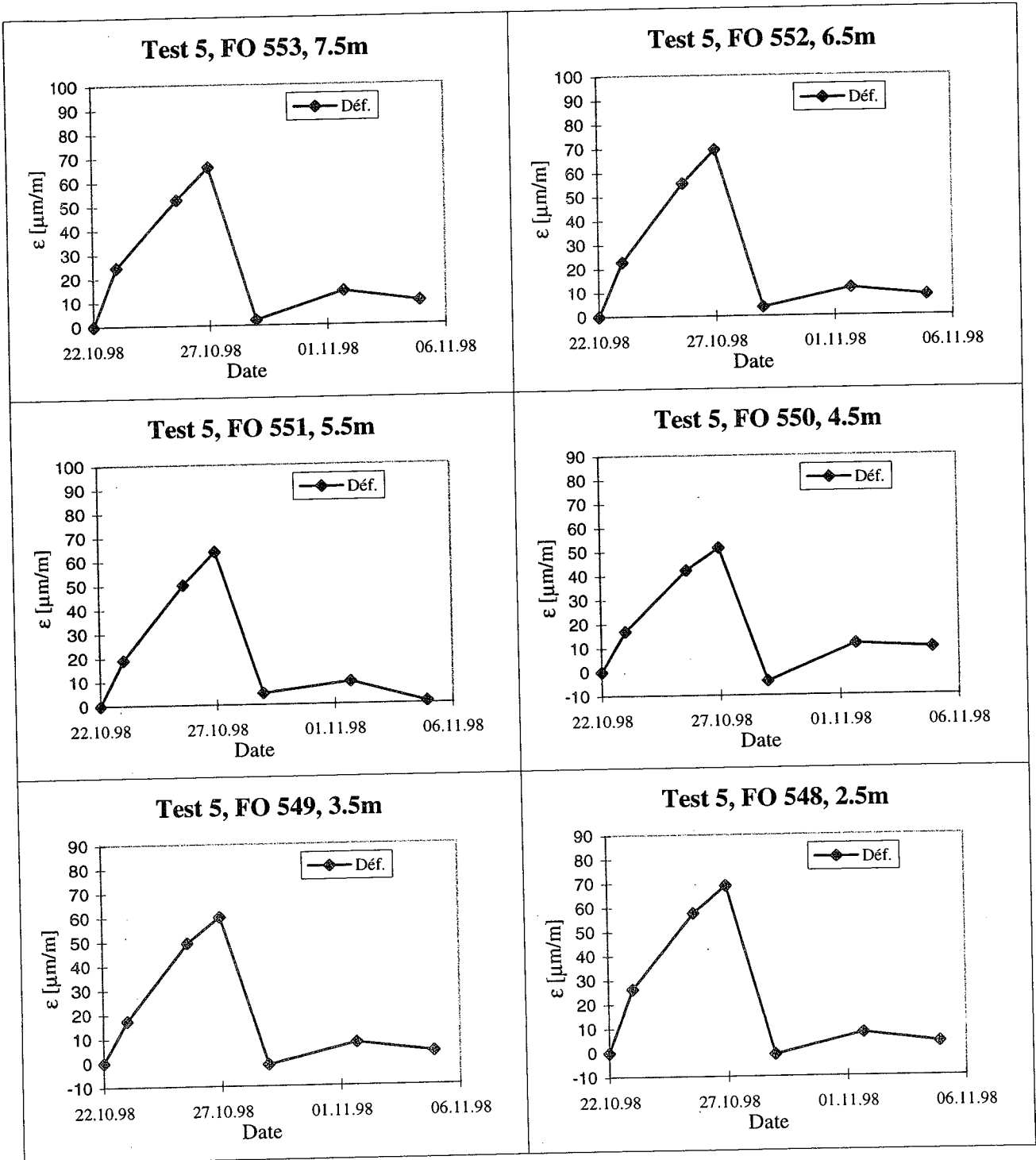
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST5





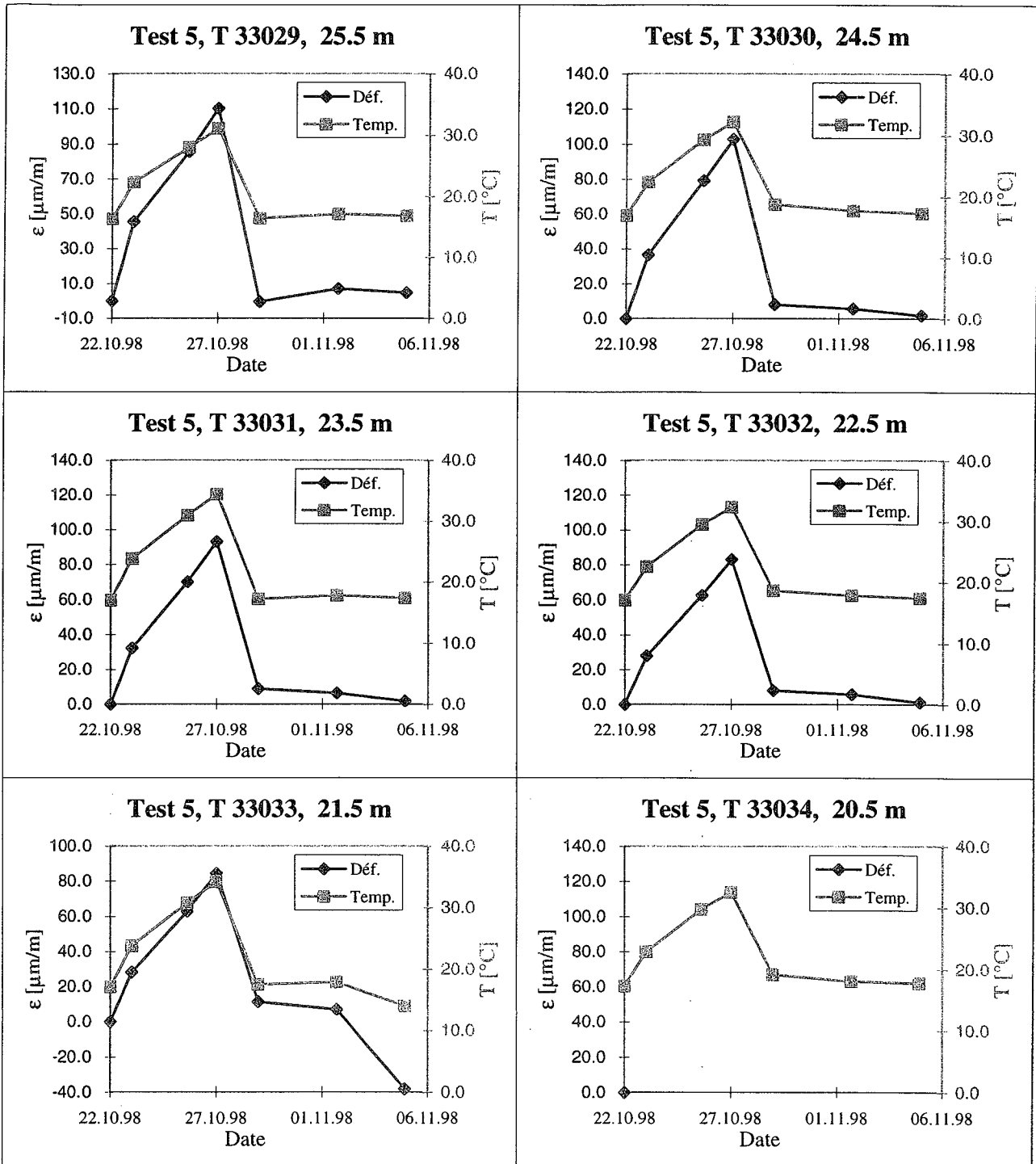
Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
TEST5





Pieu thermique - SY40
 TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



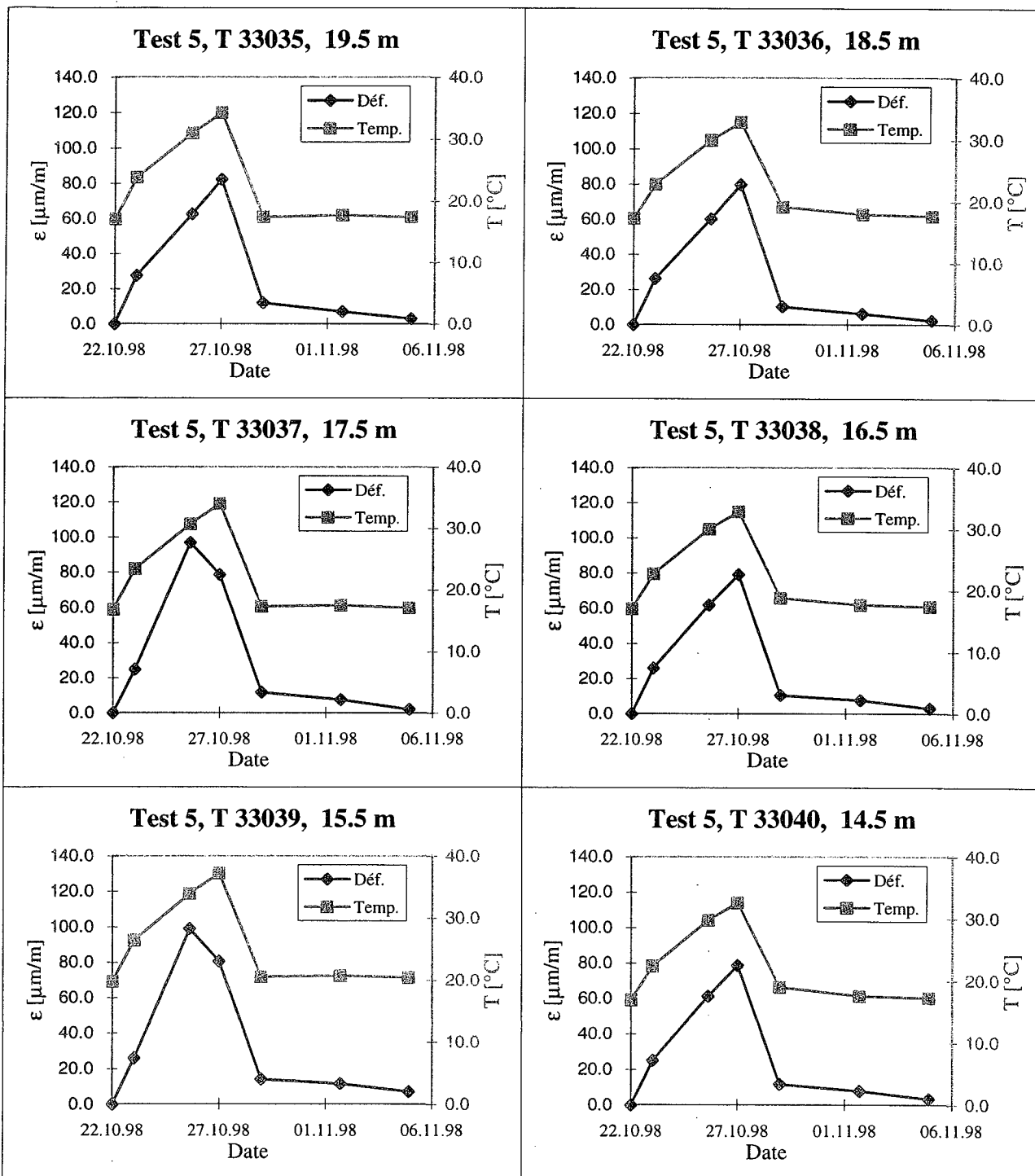
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



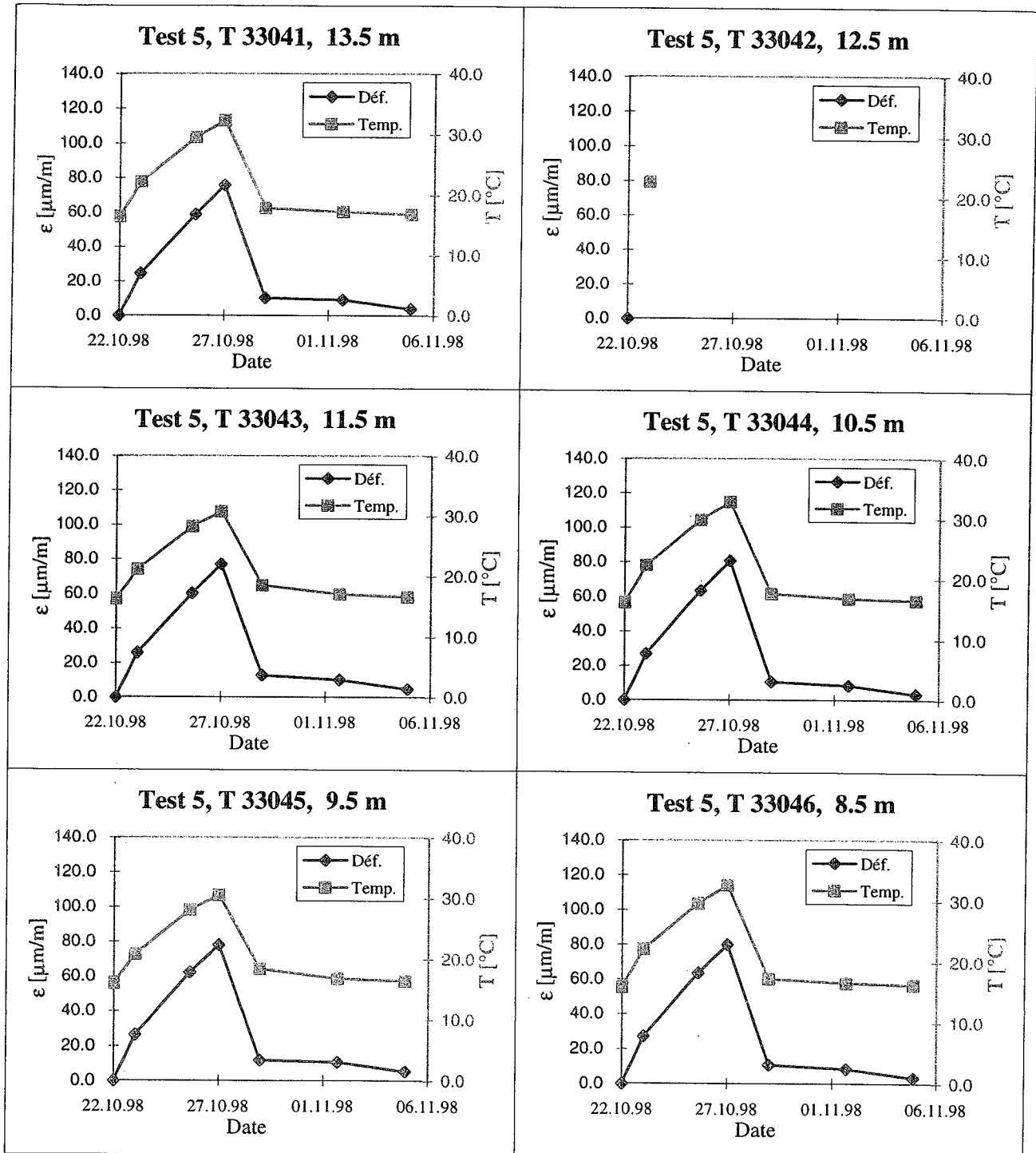
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
TEST5

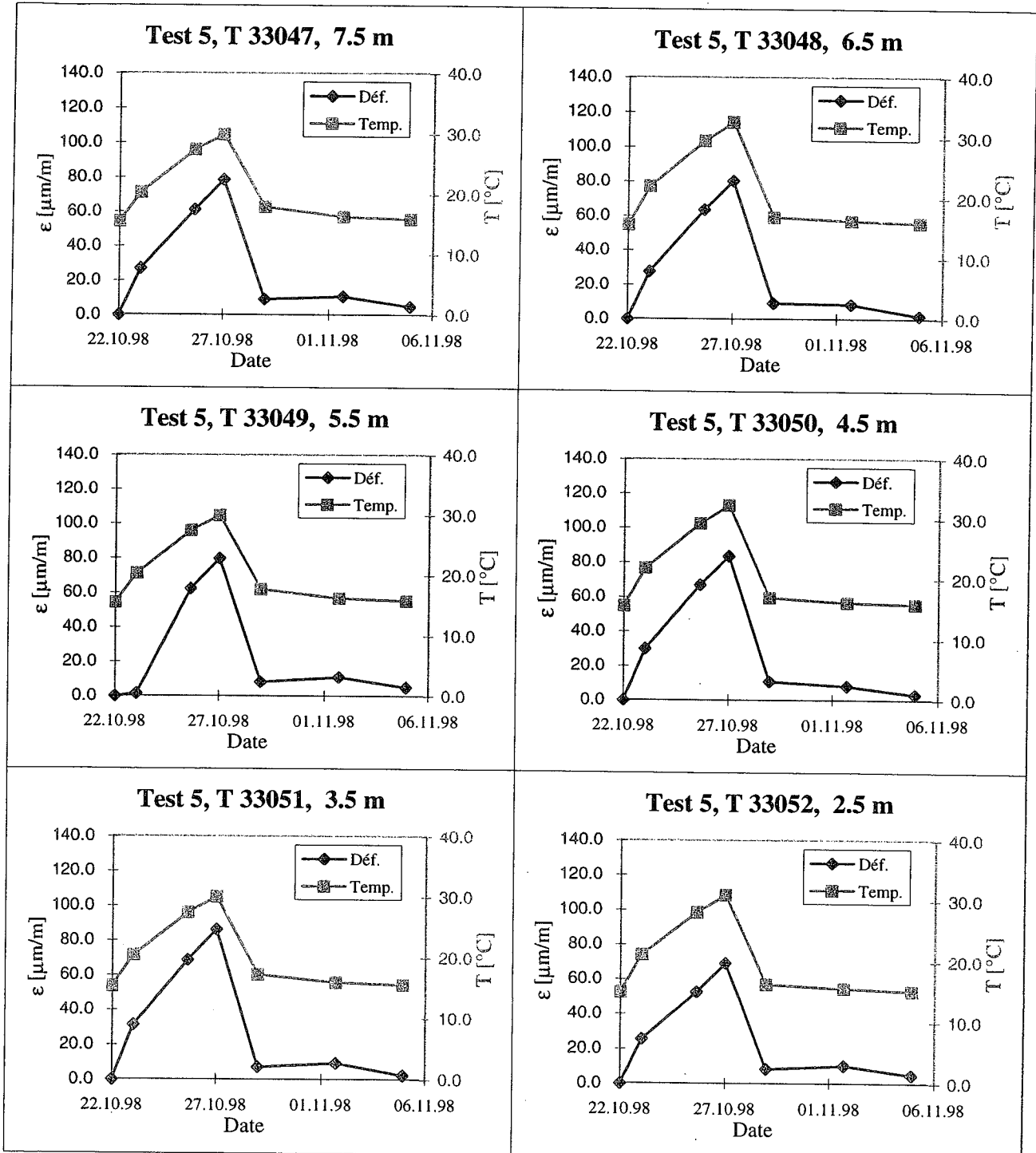
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



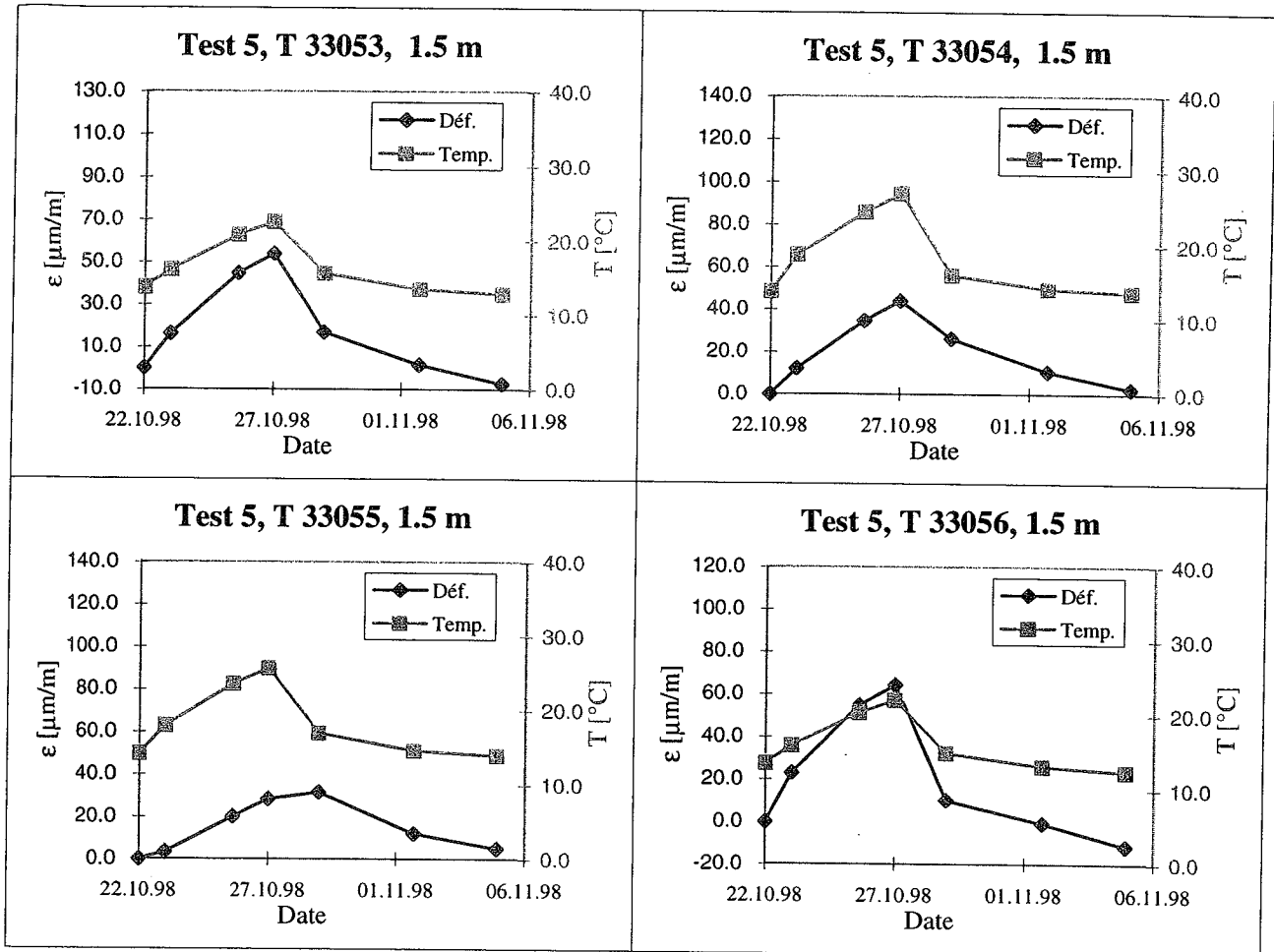
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

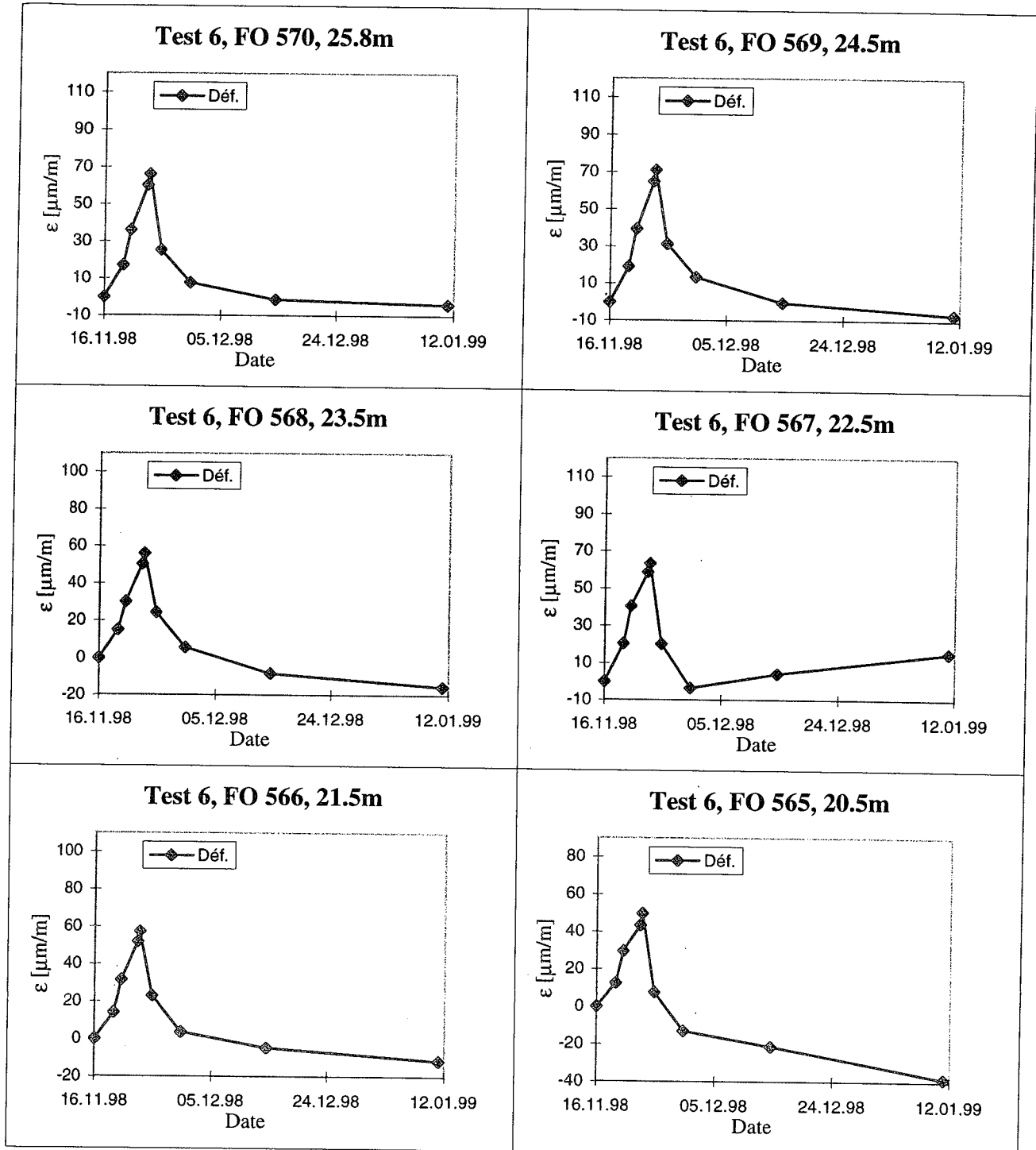


DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST6



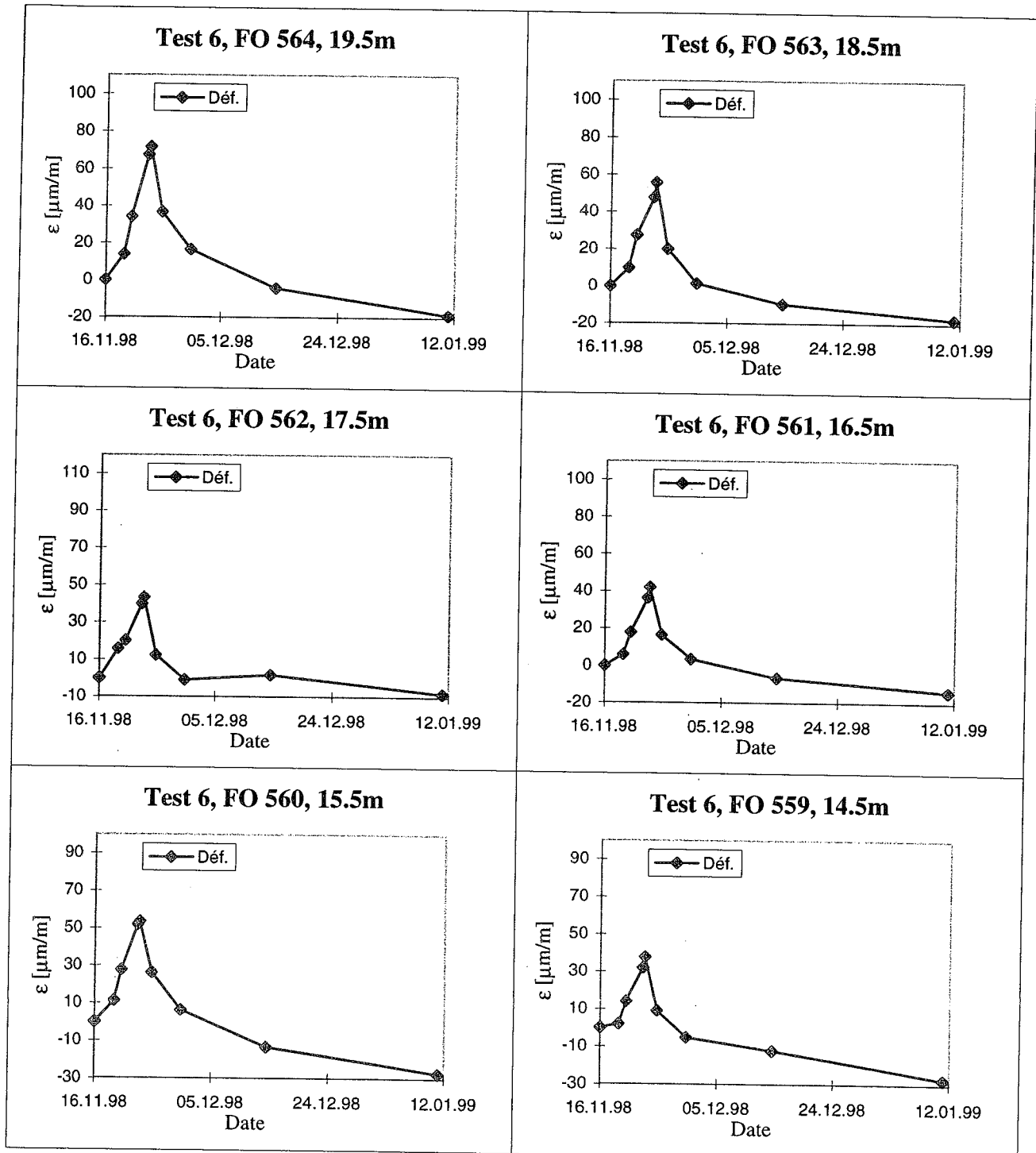
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

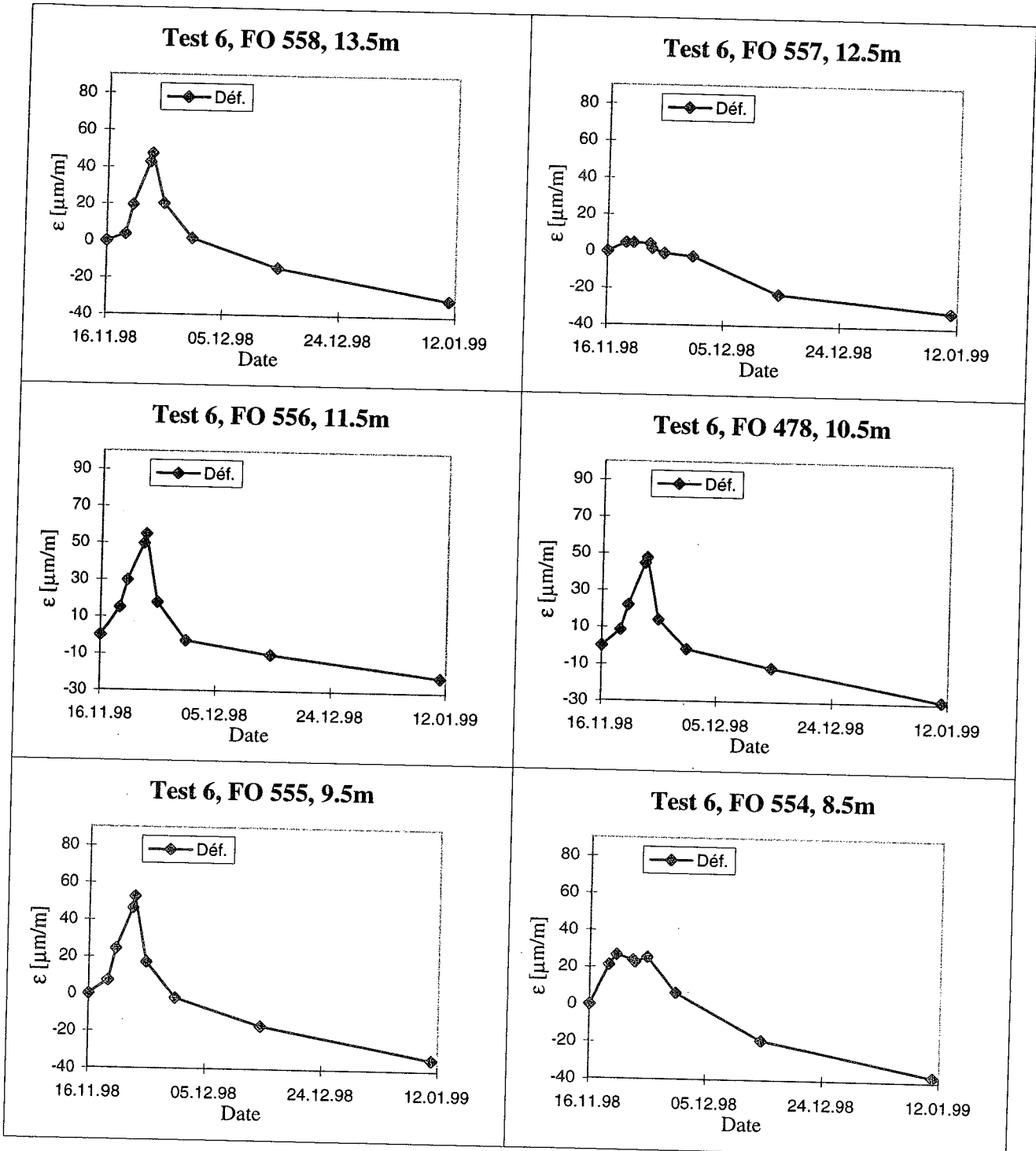
Pieu thermique - SY40
TEST6

Capteurs à fibres optiques



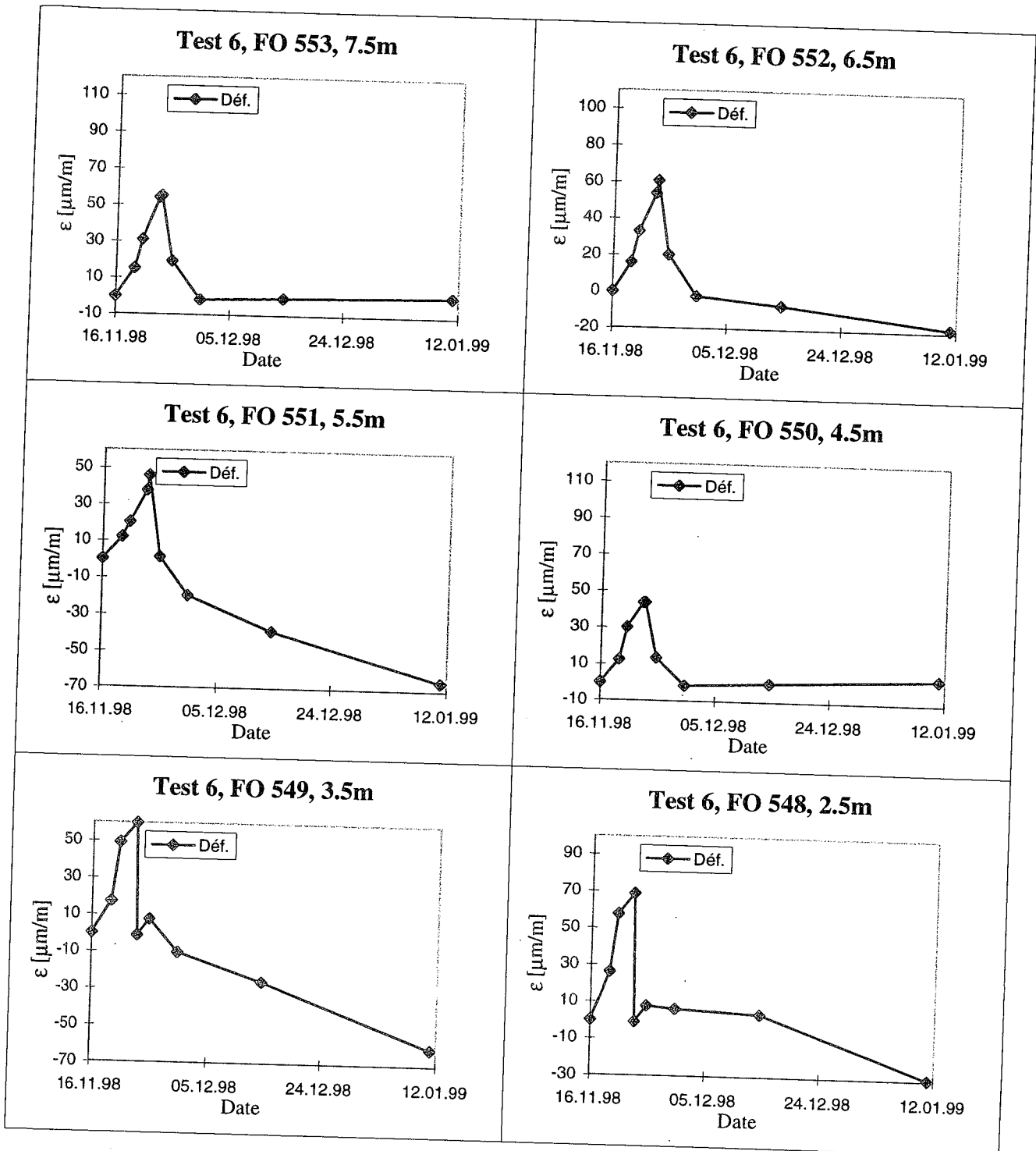


Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST6





Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST6



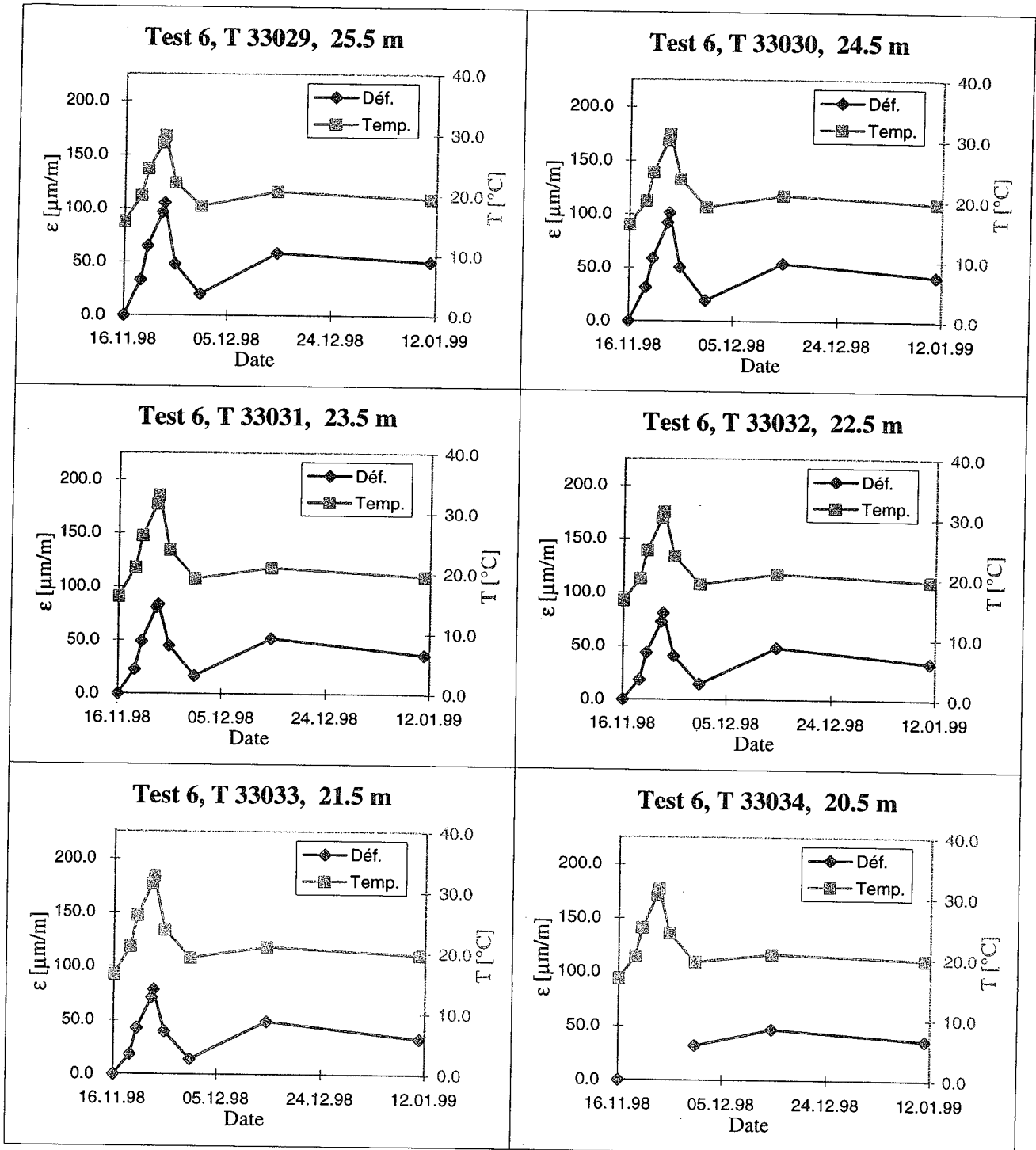
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



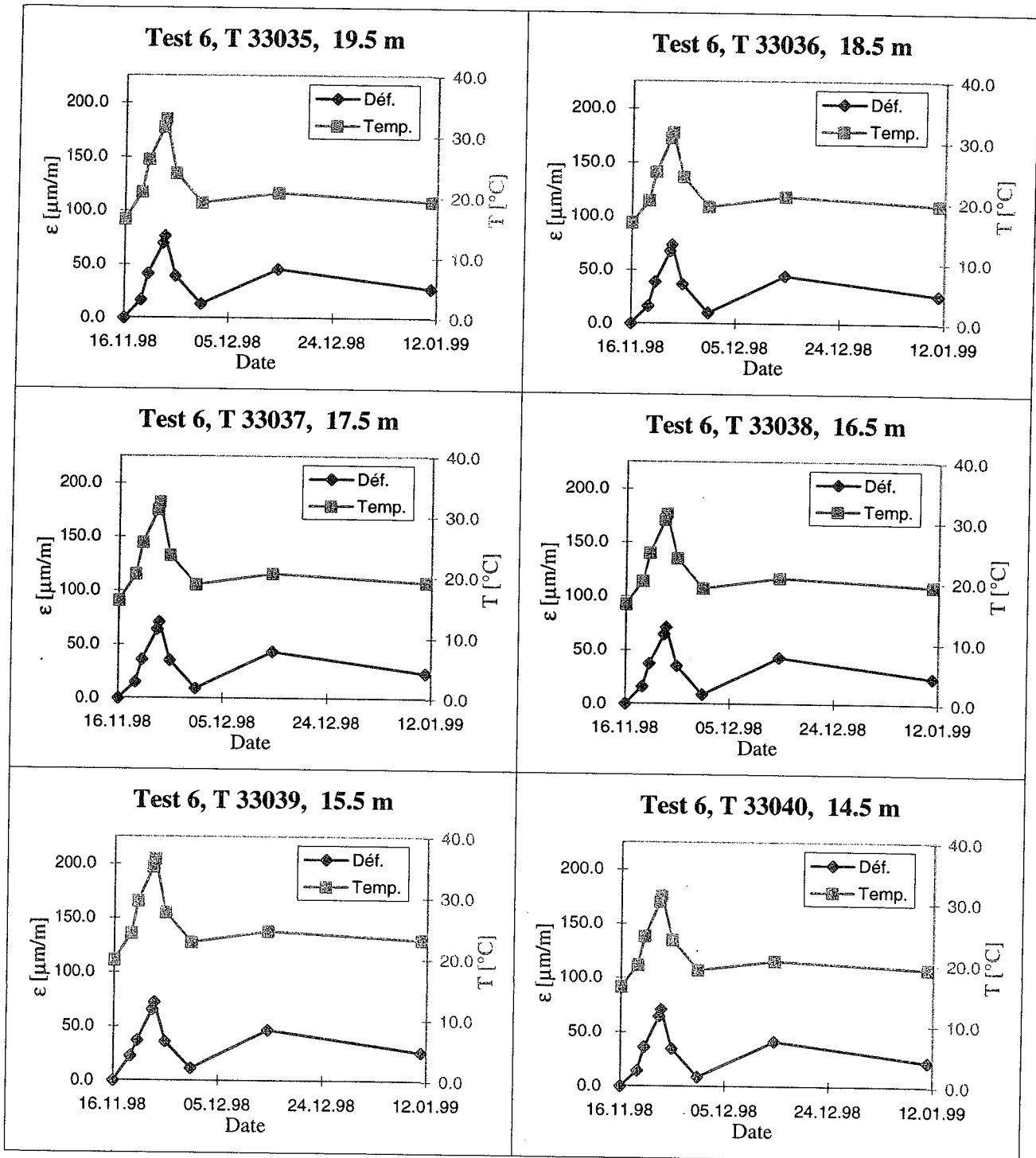
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST6

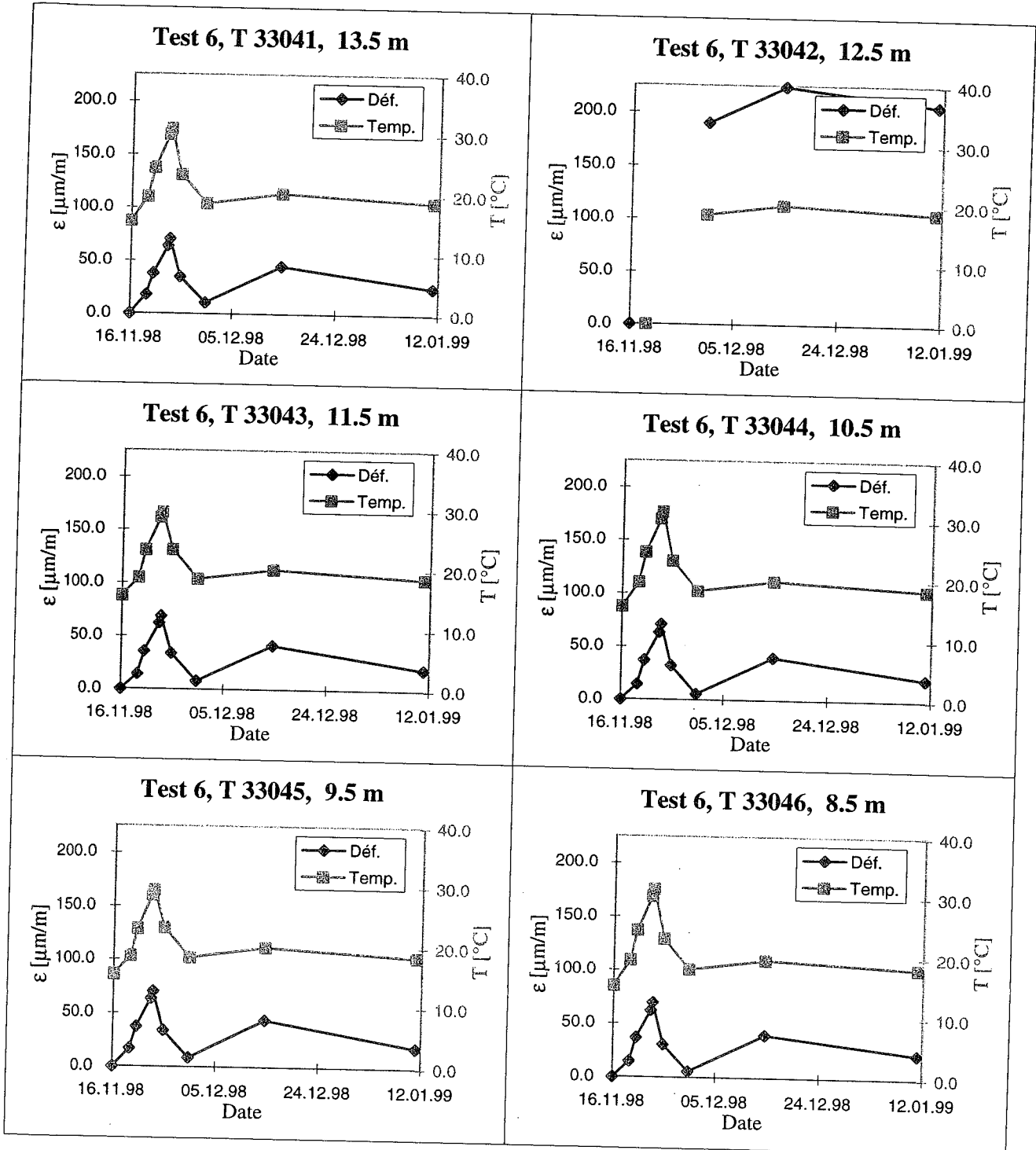
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST6

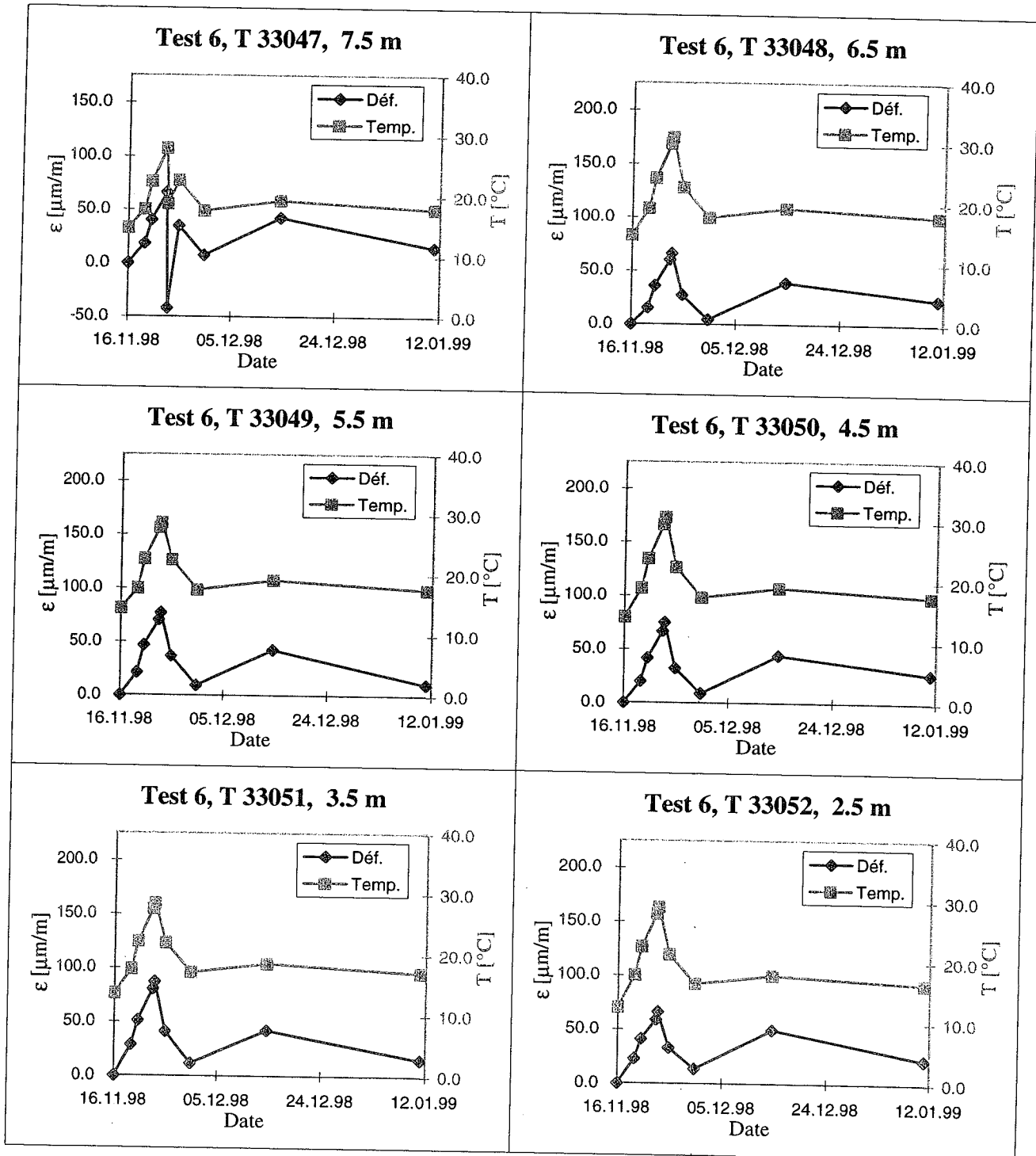
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





Pieu thermique - SY40
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



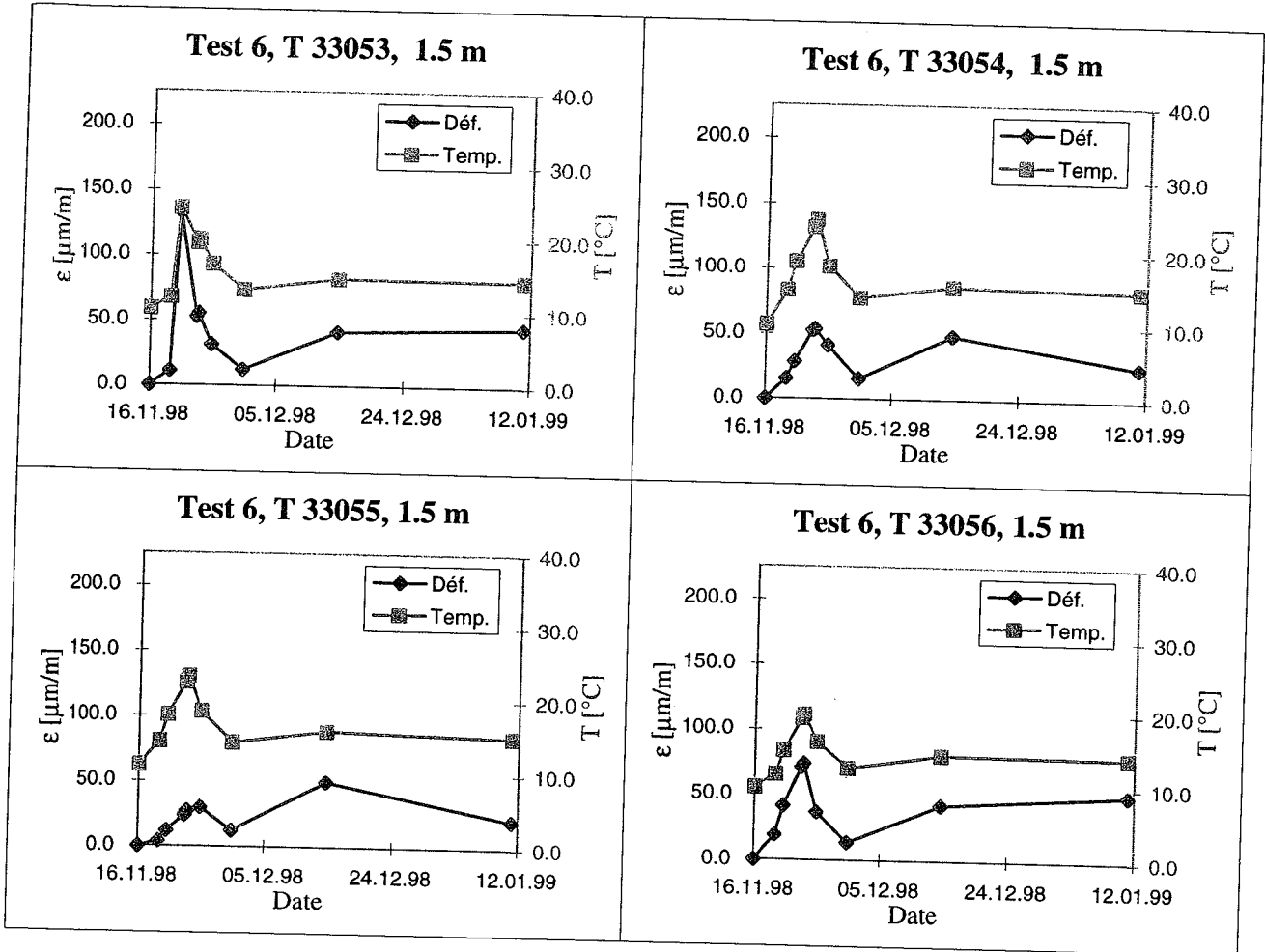
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



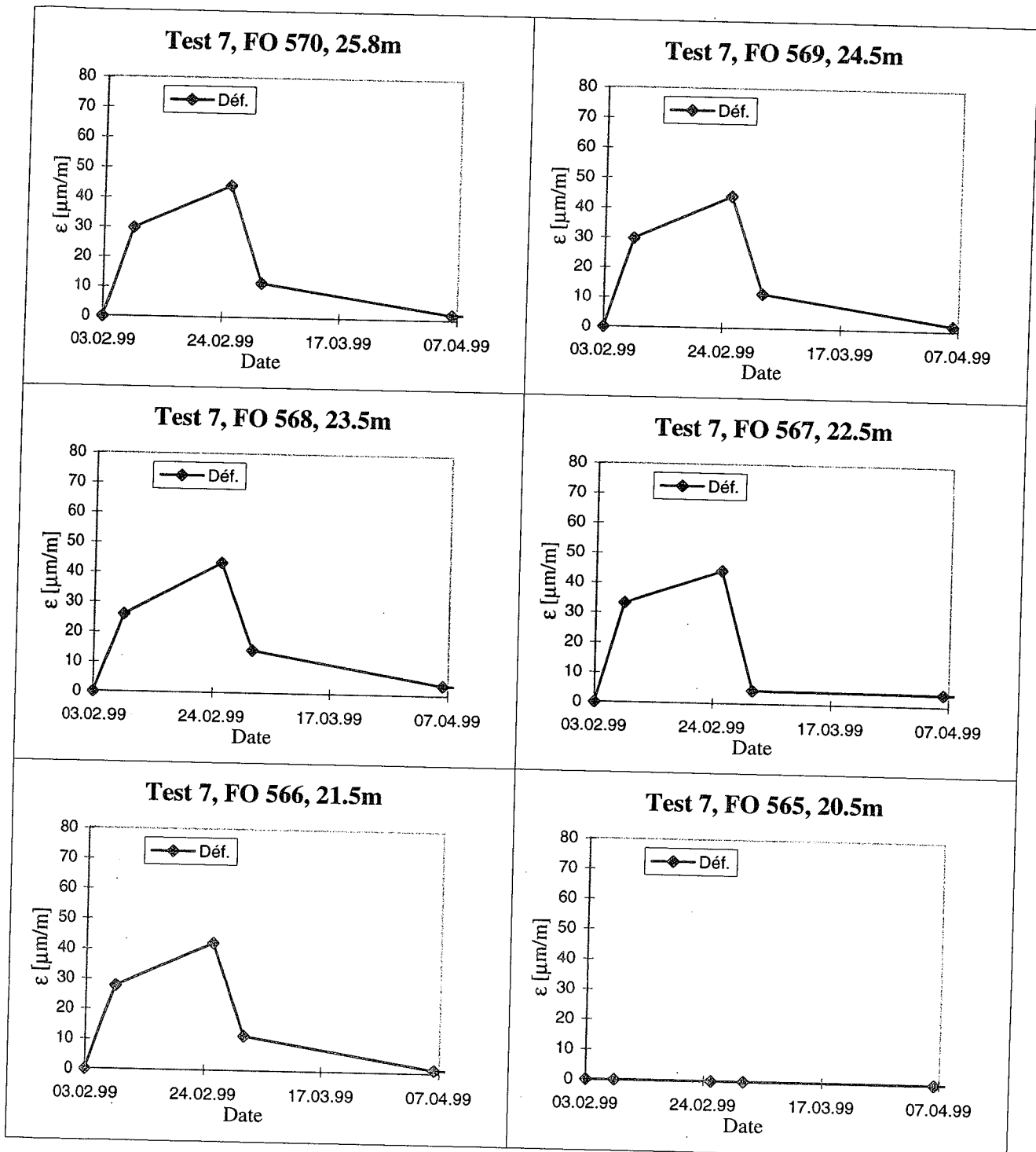
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



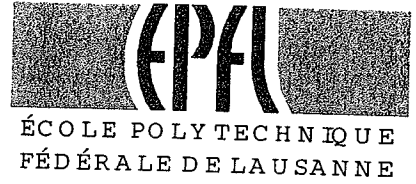
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST7

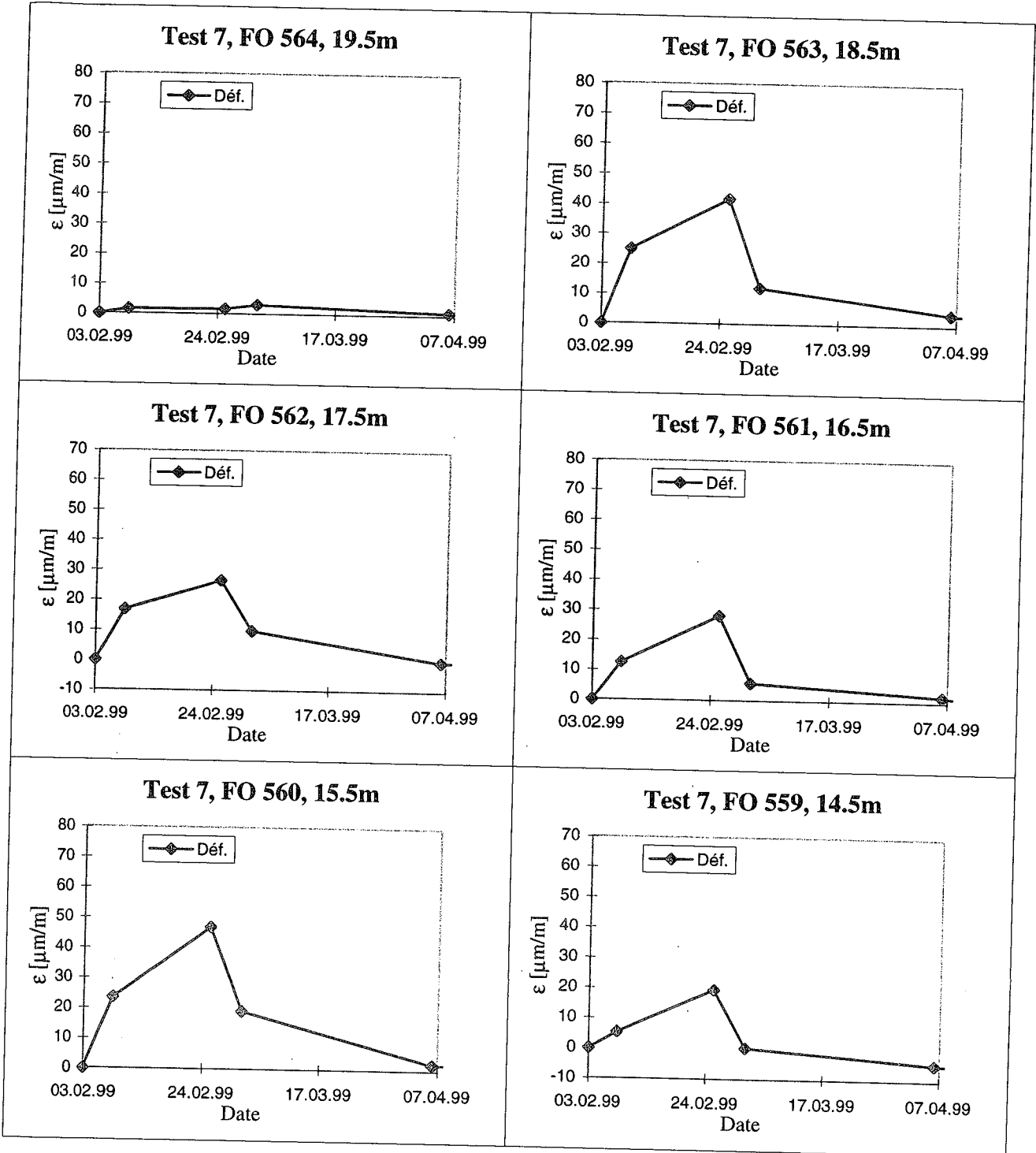
Capteurs à fibres optiques



DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST7



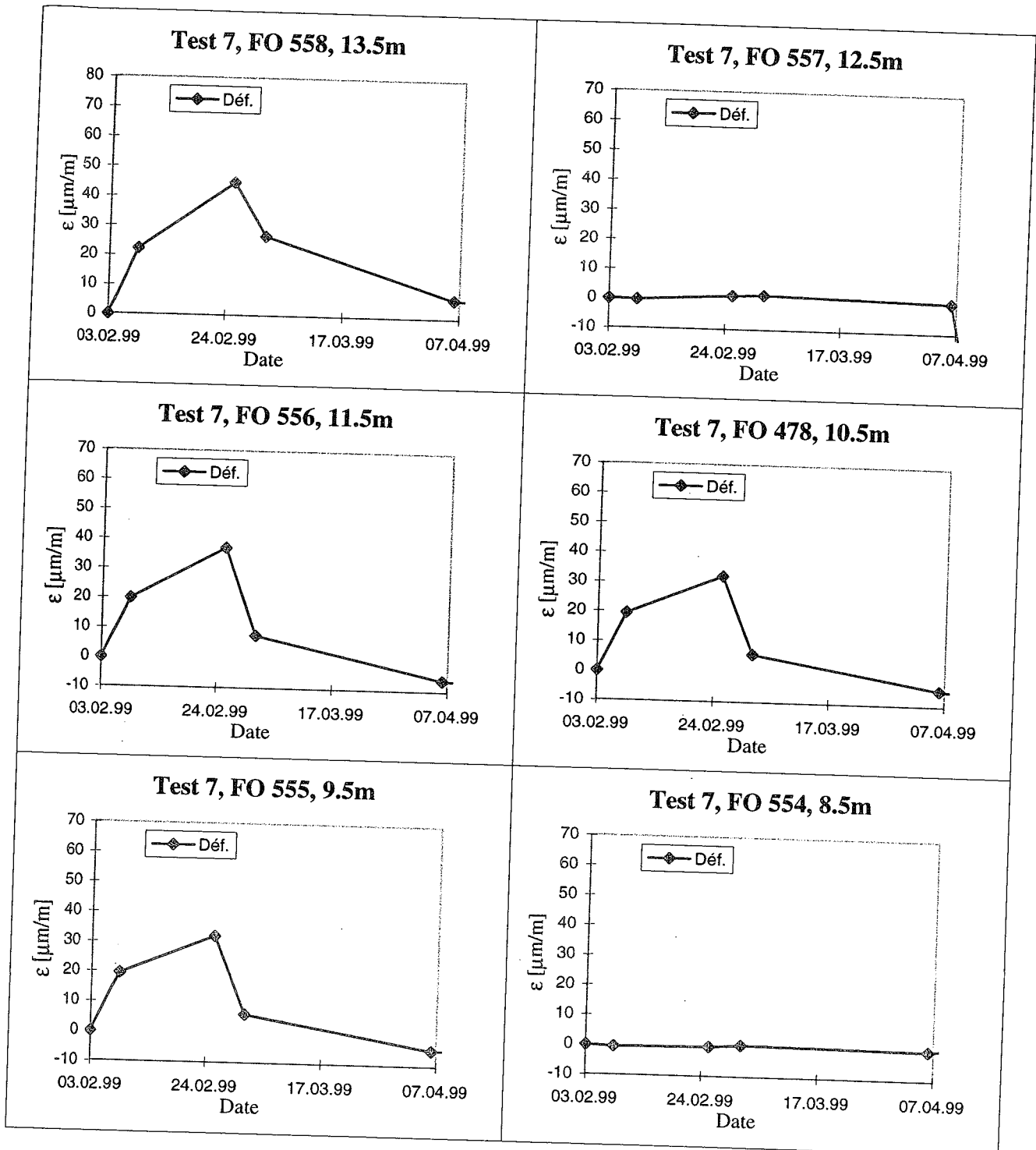
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



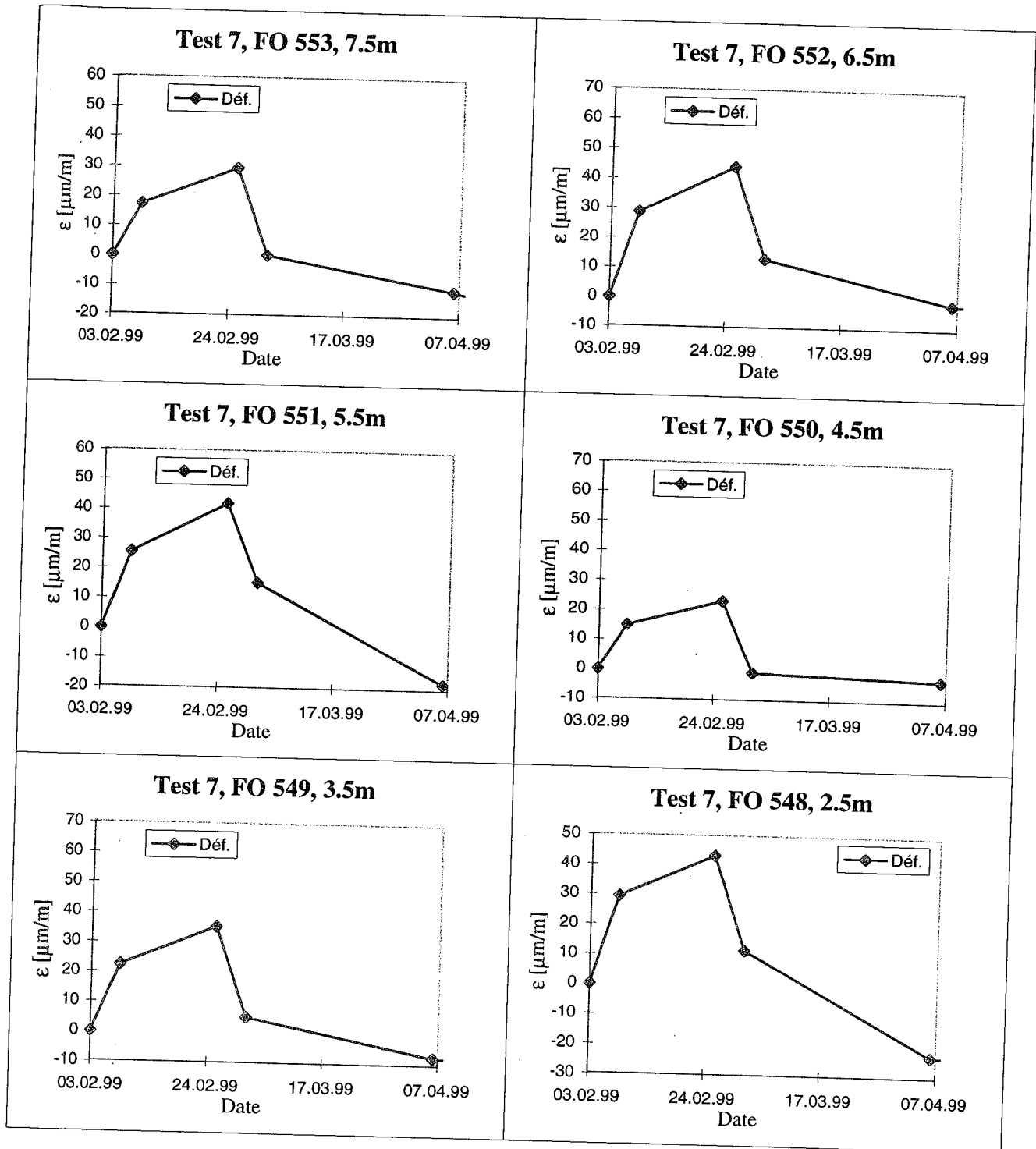
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST7

Capteurs à fibres optiques



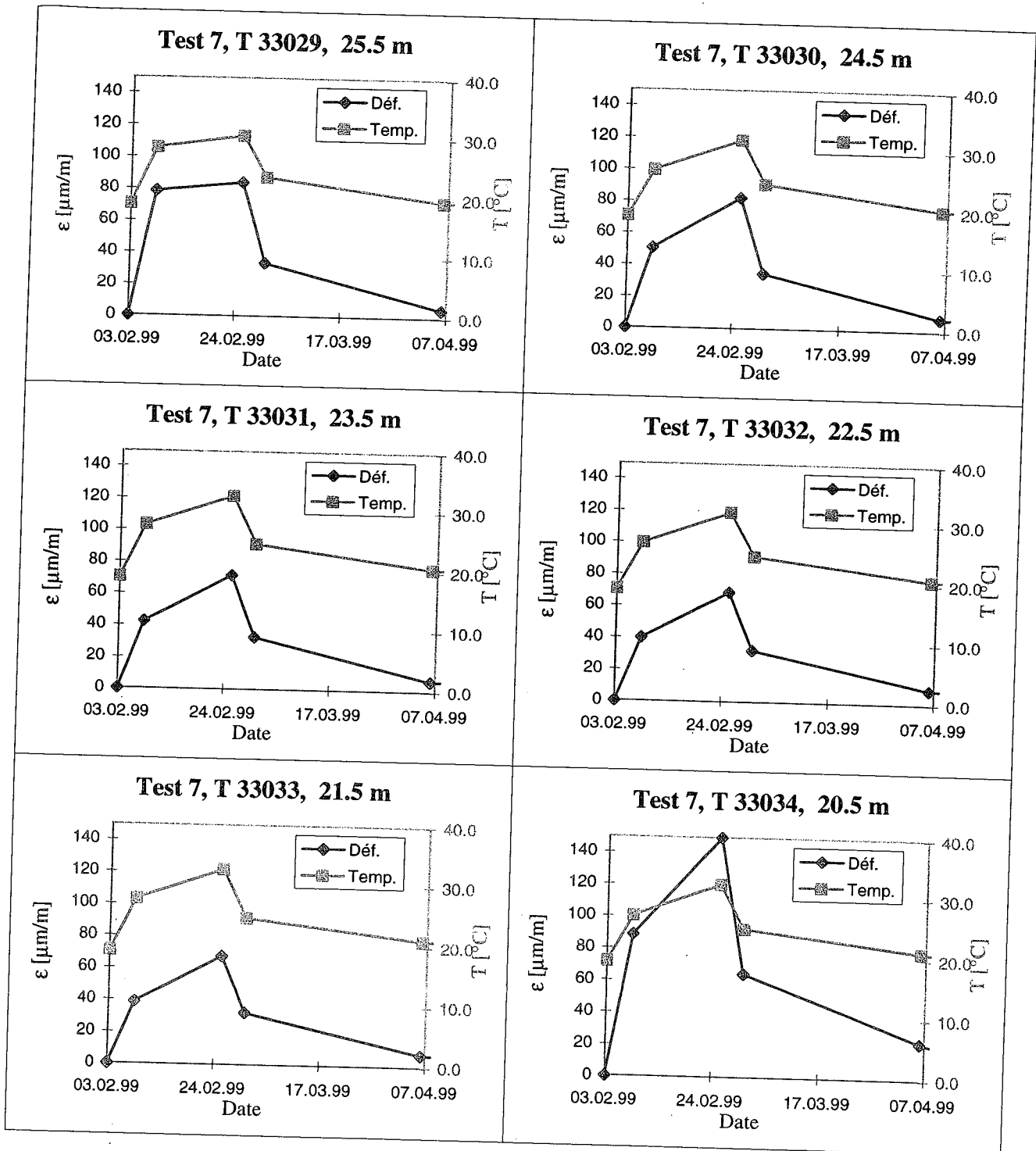
Pieu thermique - SY40 Capteurs à fibres optiques
 TEST7





Pieu thermique - SY40
 TEST7

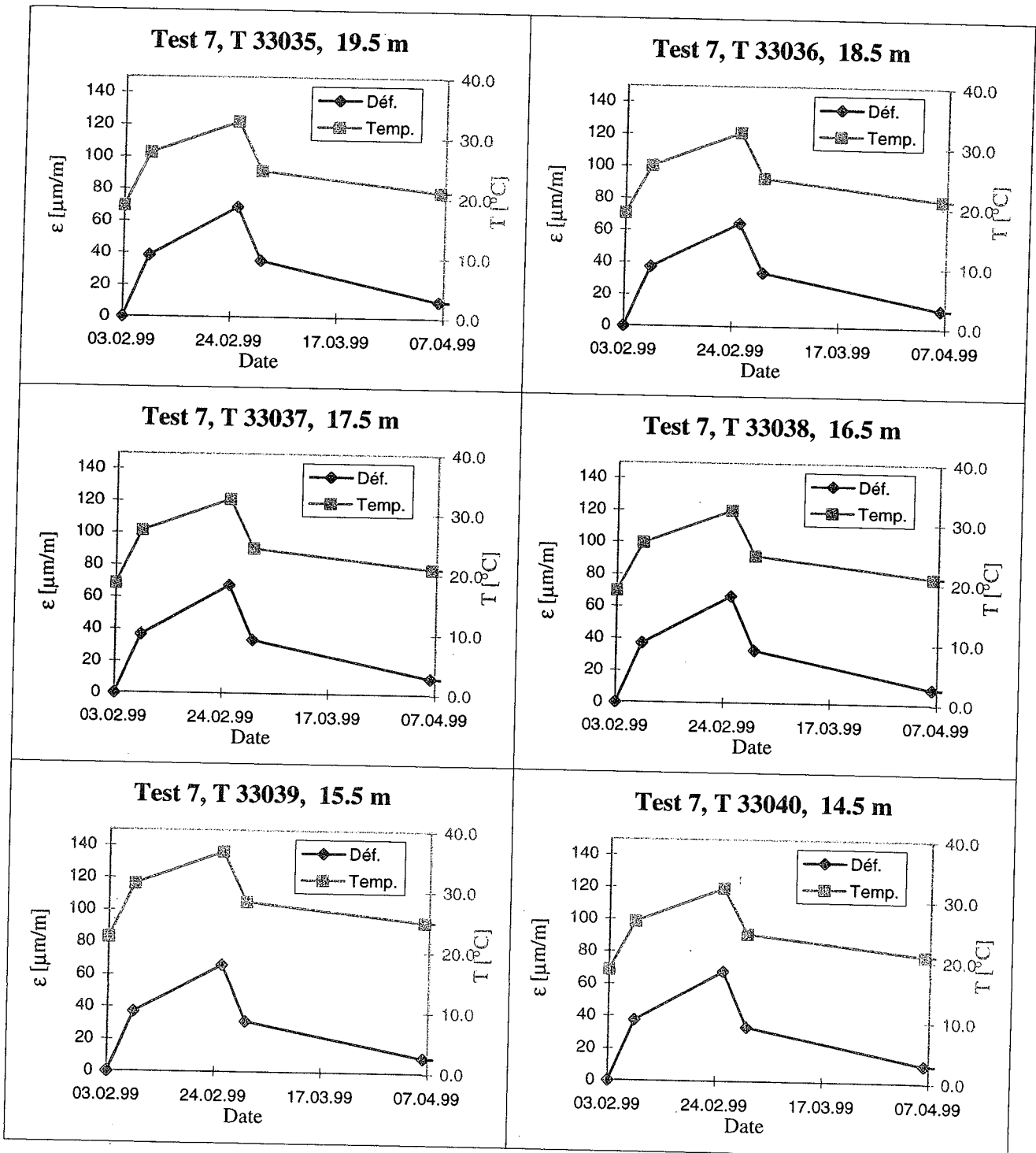
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





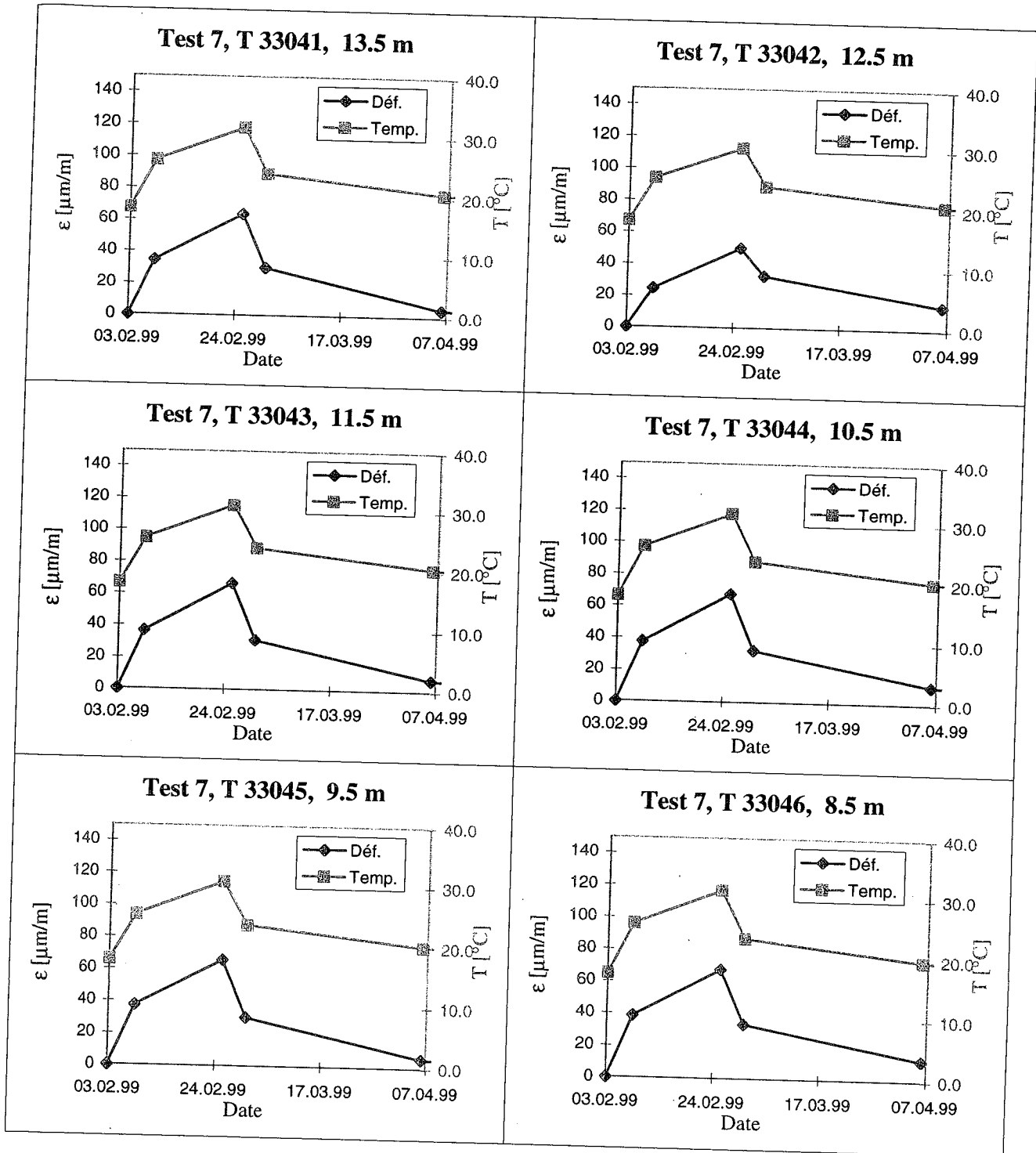
Pieu thermique - SY40
 TEST7

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



Pieu thermique - SY40
 TEST7

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



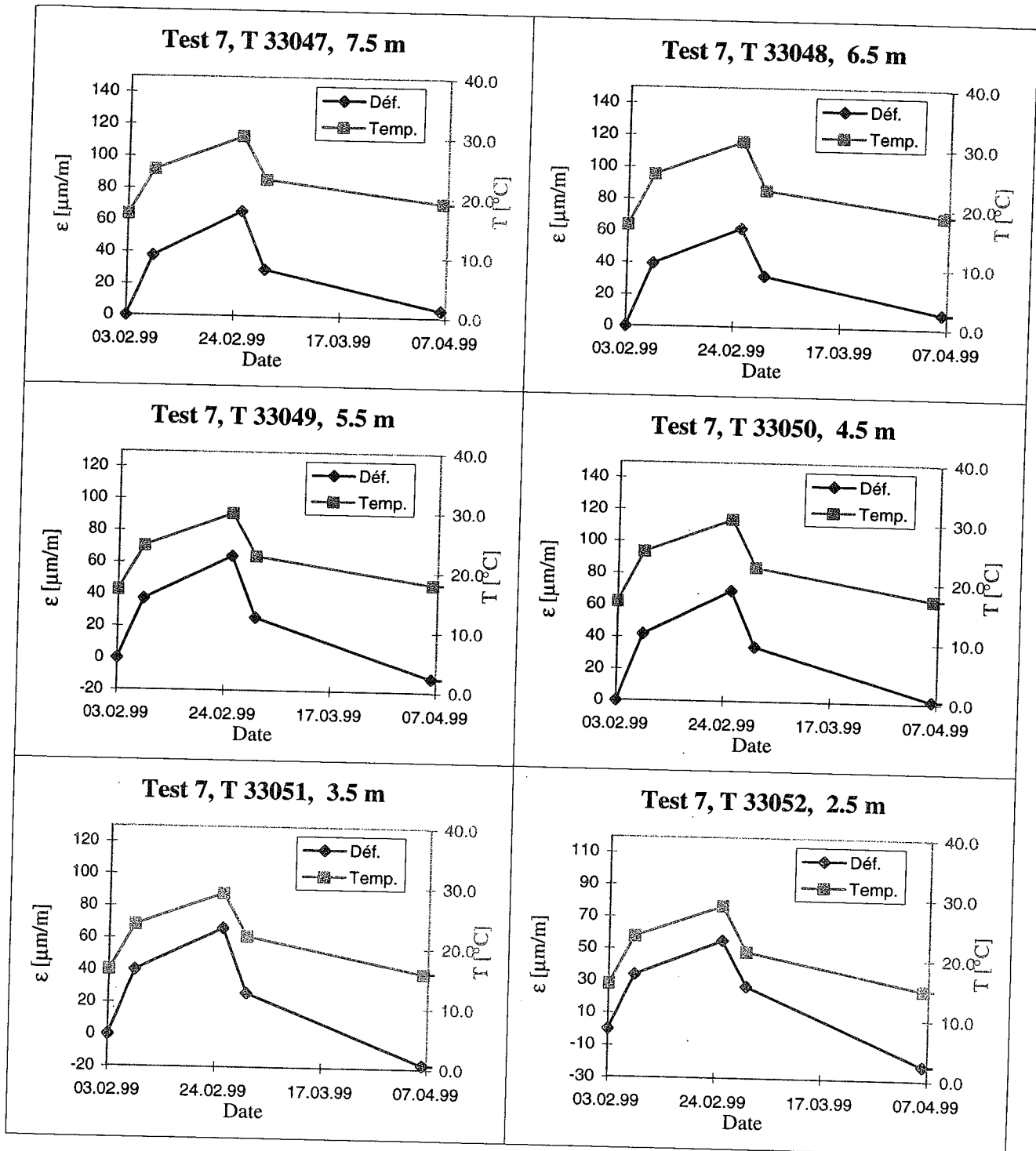
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



Pieu thermique - SY40
 TEST7

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE



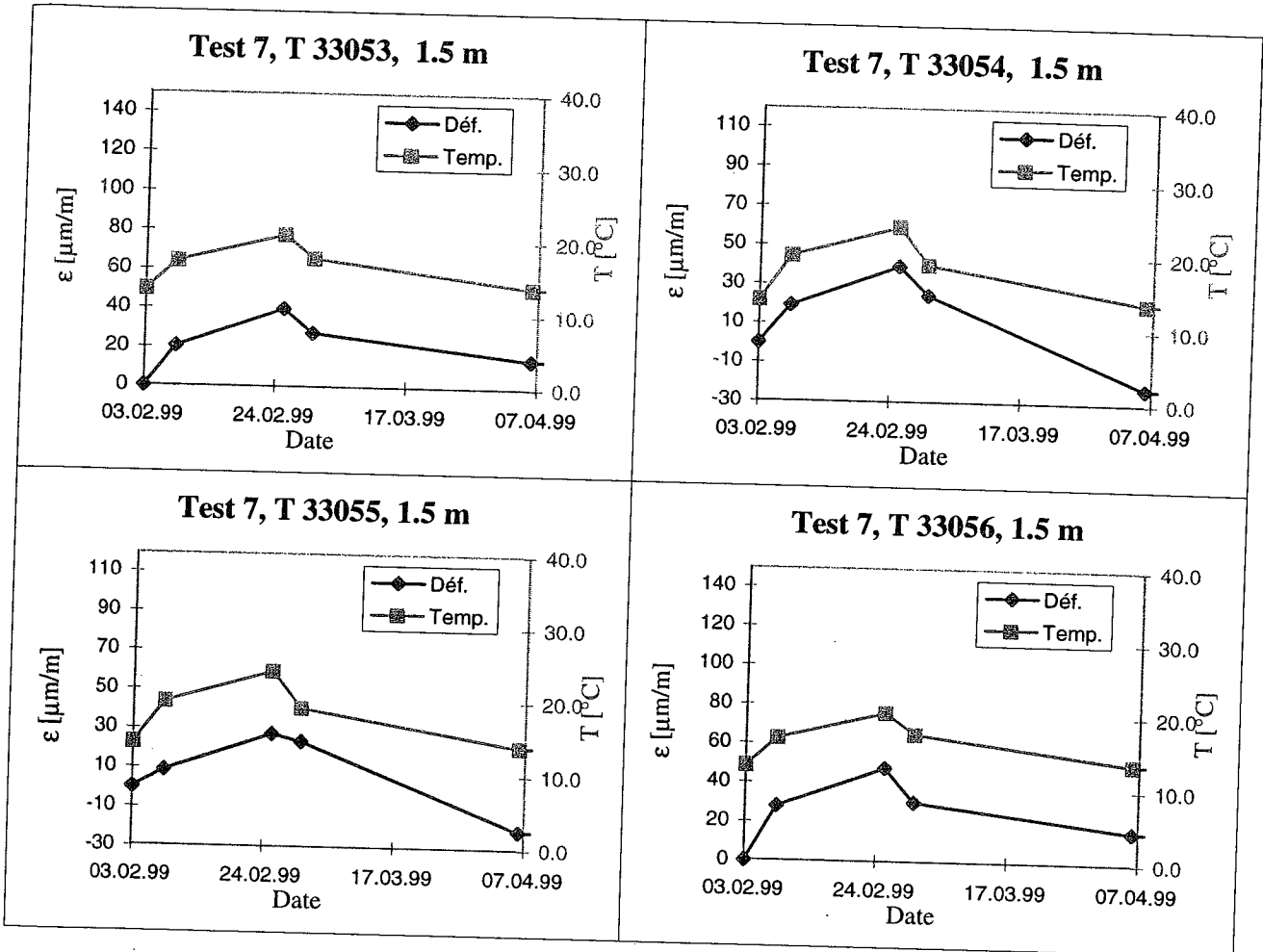
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40
 TEST7

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



**ANNEXE 6 : MESURES SONIQUES DES MODULES DE RIGIDITÉ
(RAPPORT DE DE CÉRENVILLE)**

M. G. Steinmann
 EPFL – LMS
 GCB (Ecublens)

CH – 1015 Lausanne

M8611
 L. Perret-Gentil

Ecublens, le 22 juin 1999

Concerne : Erreurs dans les rapports de mesure d'auscultation sonique du pieu thermique n°68

Monsieur,

Dans le cadre de nos processus d'assurance qualité, nous avons mis à jour une erreur, dans les deux derniers rapports de mesures qui vous ont été envoyés, ainsi que dans le document « Tableau récapitulatif des mesures ». Cette erreur est la suivante :

Rapp.MIS.8611 du 04.06.98 :

- Erreur des distances entre les tubes (dans la rubrique « Distance ») en haut de page du rapport graphique de mesure ultrasonique.

Rapp.MIS.8611 du 28.05.99 :

- Erreur des distances entre les tubes (dans la rubrique « Distance ») en haut de page du rapport graphique de mesure ultrasonique.

Annexe.Rapp.MIS07.8611 (livrée hors rapport) :

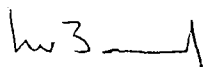
- Erreur des distances entre les tubes dans la colonne « ΔL [m] »
- Répercussions de l'erreur dans la colonne « vitesse [m/s] »
- Répercussions de l'erreur dans la colonne « module d'élasticité »

Nous avons contrôlé et corrigé les documents erronés mentionnés ci-dessus. Nous vous prions de bien vouloir éliminer les documents suivants, et les remplacer selon les informations de la liste ci-dessous :

- Le rapport de mesure Rapp.MIS.8611 du 4.06.98 (concernant la mesure du 03.06.98) doit être éliminé et remplacé par le Rapp.MIS.8611 du 15.06.99 (concernant la mesure du 03.06.98).
- Le rapport de mesure Rapp.MIS.8611 du 28.05.99 (concernant la mesure du 25.05.99) doit être éliminé et remplacé par le Rapp.MIS.8611 du 15.06.99 (concernant la mesure du 25.05.99).
- Tous les « tableaux récapitulatifs des mesures » doivent être éliminés et remplacés par le « Tableau récapitulatif des mesures » du 22.06.99.

Nous vous prions de nous excuser, et nous tenons à votre entière disposition pour répondre à vos éventuelles questions.

M.Baud RT-SEM



L.Perret-Gentil RQ-SEM



Annexe : documents de remplacement mentionnés ci-dessus en 4 exemplaires.

Rapport de mesures in situ

rapp.MIS.8611

Client

Raison sociale : EPFL – LMS
 Nom, prénom: M.G.Steinmann
 Adresse : GCB (Ecublens)
 Ville : 1015 Lausanne

Mandant

Raison sociale : EPFL – LMS
 Nom, prénom: M.G.Steinmann
 Adresse : GCB (Ecublens)
 Ville : 1015 Lausanne

Site

Localisation : Ecublens
 Nom de l'ouvrage : Quartier nord – EPFL – Pieu thermique n°68

Programme de mesures

Auteur du programme de mesures : M.G.Steinmann

Date des mesures: 03.06.98

Opérateurs: VH

Liste des mesures commandées (avec mention de la norme en vigueur) :

- Auscultation sonique (norme NF P 94-160-1) *

Remarques (Ecart aux normes, conditions particulières de travail, mesures sous-traitées, etc.)

- *essai non accrédité
- différence entre le diamètre intérieur des tubes et le diamètre extérieur des sondes : 30mm
- pieu thermique chauffé à 17°C

ATTENTION :

- ce rapport annule et remplace le rapport Rapp.MIS.8611 du 04.06.98

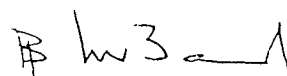

Note: Le Service d'Essais et Mesures (SEM) de De Cérenville Géotechnique SA n'est pas responsable de la pose et du fonctionnement des équipements qu'il n'a pas installés.

Annexes

- Plan de situation avec position des tubes (1 page)
- Légende des graphiques de mesure (1 page)
- Graphique de l'auscultation sonique (2 pages)

Ecublens, le 15.06.99

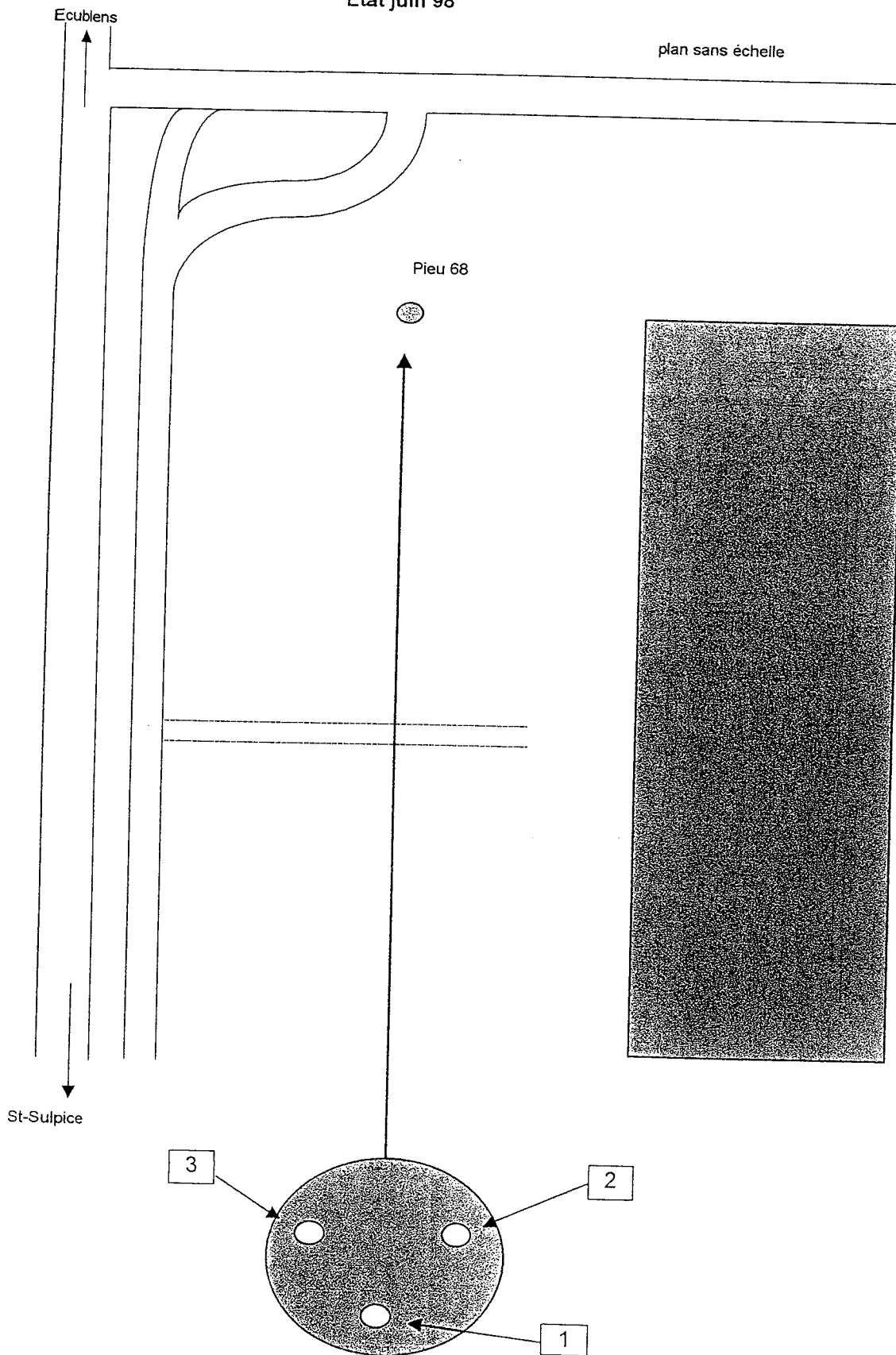
DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

Mandat: 8611

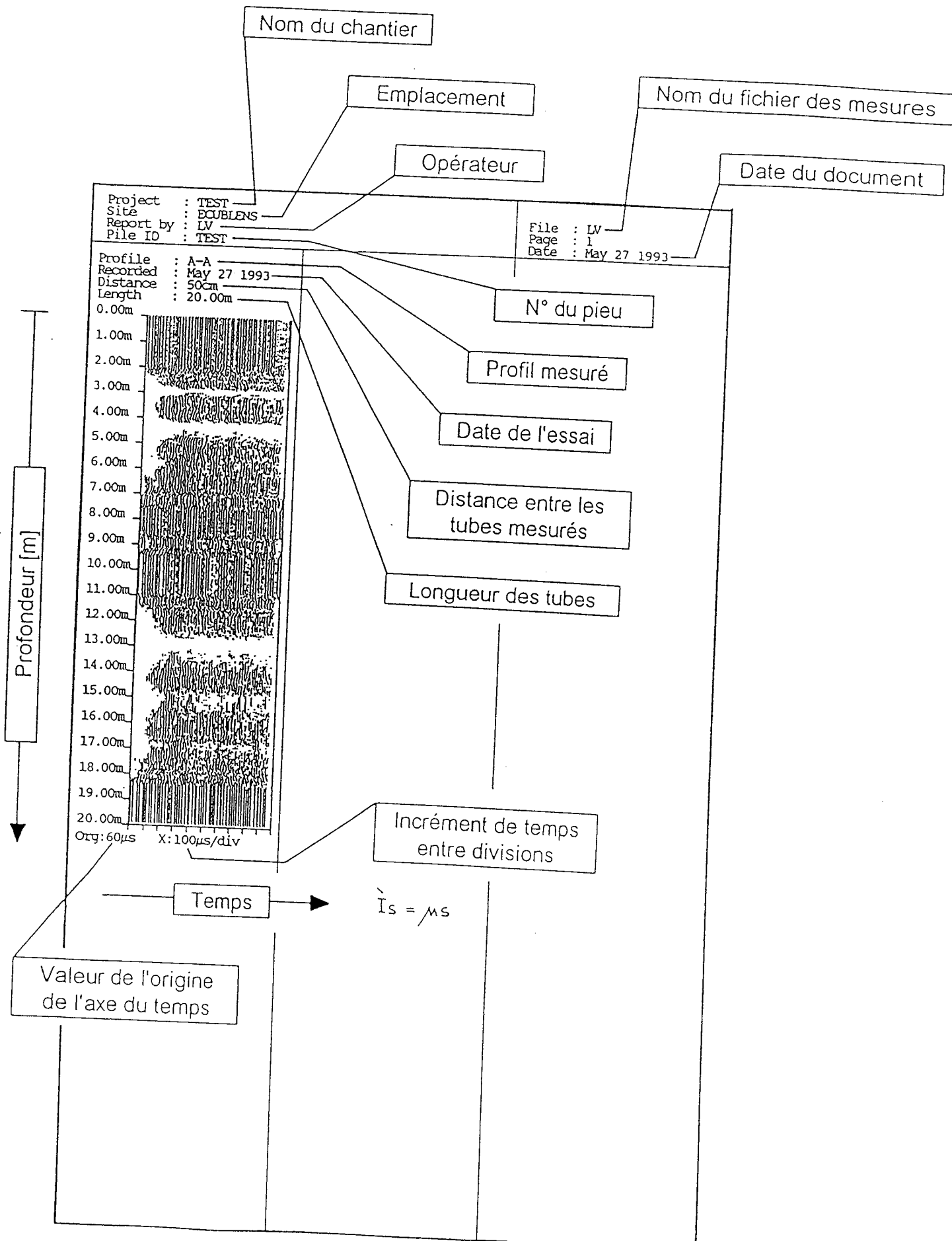
Site: EPFL, pieu thermique n°68
Etat juin 98

plan sans échelle



CAROTTAGE SONIQUE

Legende des protocoles de mesure



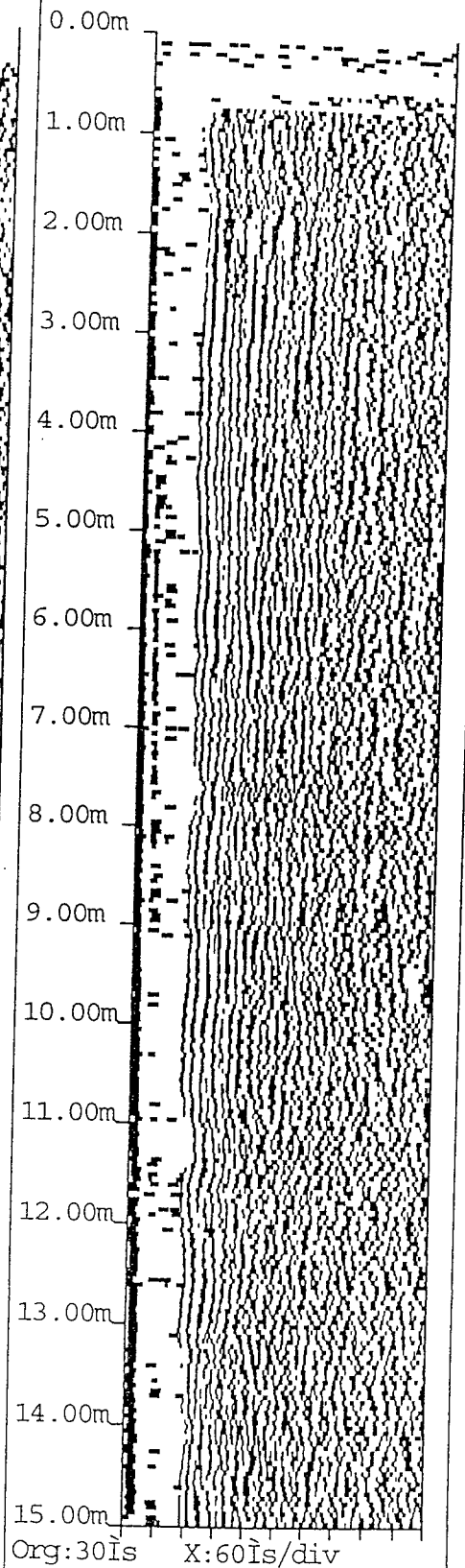
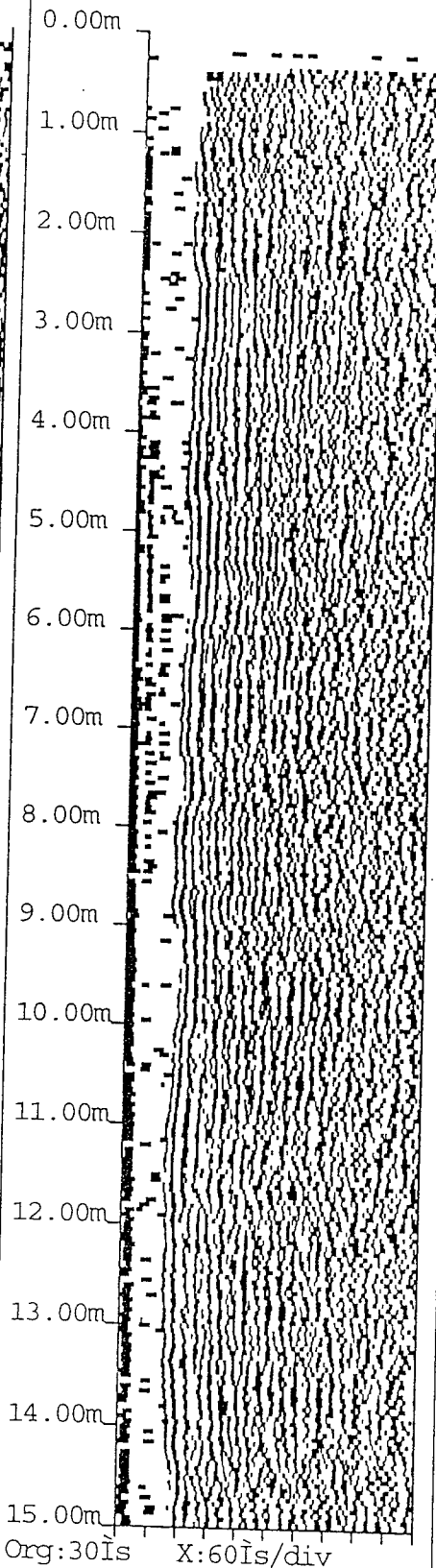
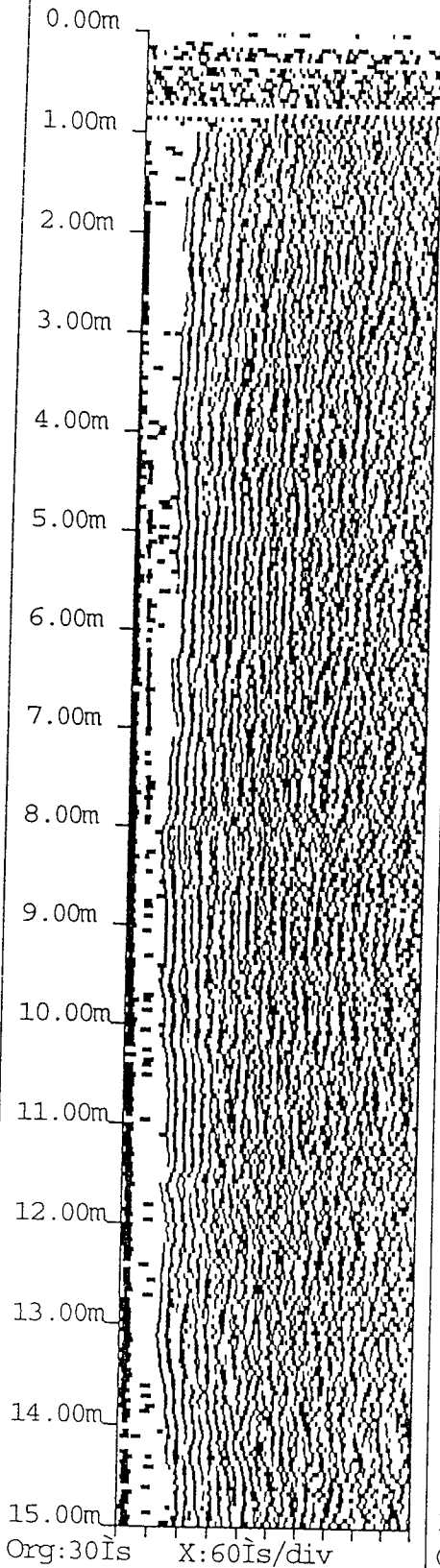
Project : M8611 EPFL - PIEU THERMIQUE 68
Site : EPFL
Report by : VH
Pile ID : 68

File : A
Page : 1
Date : Jun 14 1999

Profile : 1-2
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 35cm
Length : 24.95m

Profile : 1-3
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 39cm
Length : 24.65m

Profile : 2-3
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 37cm
Length : 24.90m



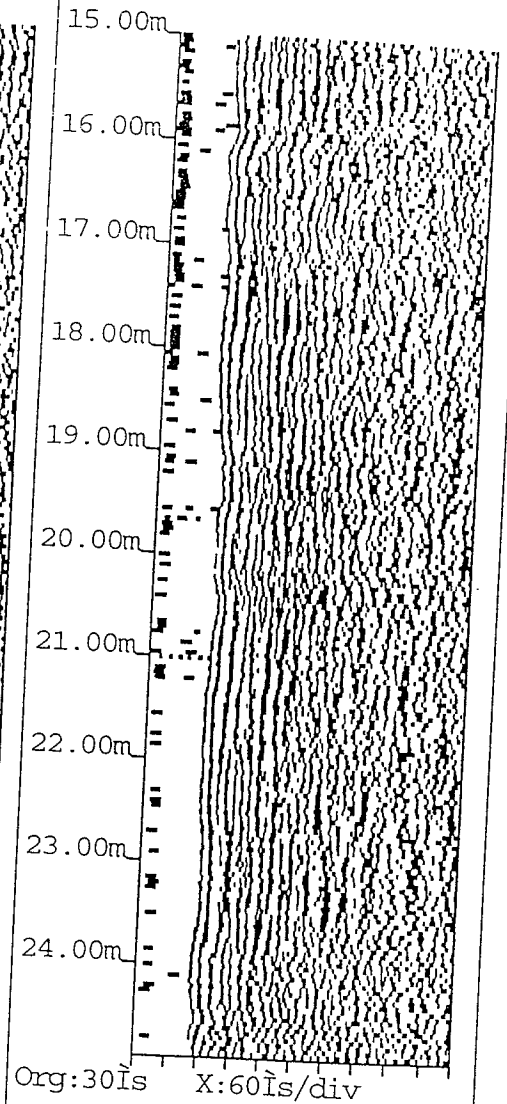
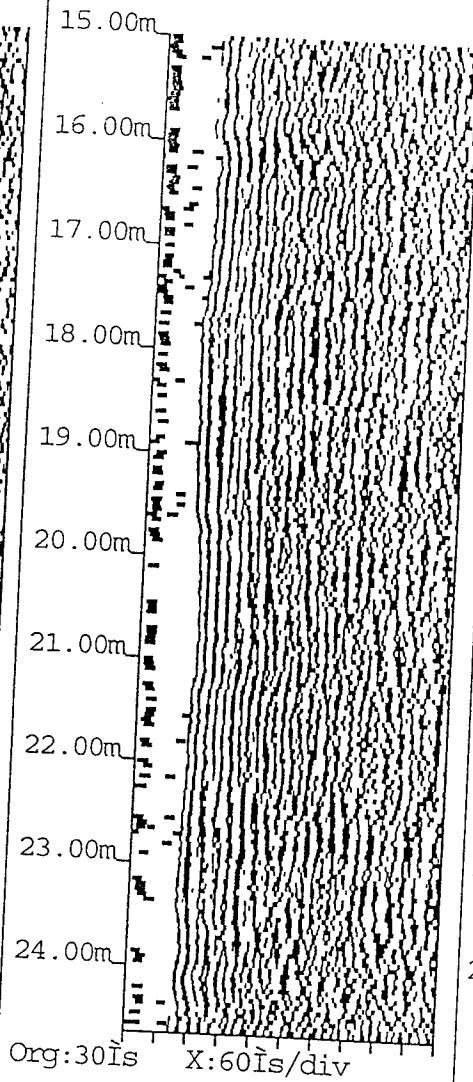
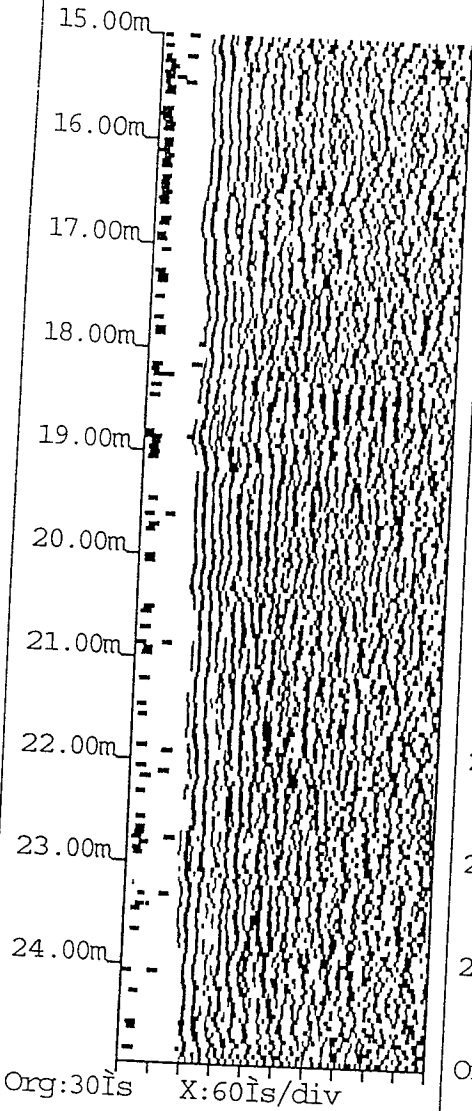
Project : M8611 EPFL - PIEU THERMIQUE 68
Site : EPFL
Report by : VH
Pile ID : 68

File : A
Page : 2
Date : Jun 14 1999

Profile : 1-2
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 35cm

Profile : 1-3
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 39cm

Profile : 2-3
Recorded : Jun 03 1998
Distance : 37cm



Rapport de mesures in situ

rapp.MIS.8611

Client

 Raison sociale : EPFL – LMS
 Nom, prénom: M.G.Steinmann
 Adresse : GCB (Ecublens)
 Ville : 1015 Lausanne

Mandant

 Raison sociale : EPFL – LMS
 Nom, prénom: M.G.Steinmann
 Adresse : GCB (Ecublens)
 Ville : 1015 Lausanne

Site

 Localisation : Ecublens
 Nom de l'ouvrage : Quartier nord – EPFL – Pieu thermique n°68

Programme de mesures

Auteur du programme de mesures : M.G.Steinman

Date des mesures: 25.05.99

Opérateurs: PHM

Liste des mesures commandées (avec mention de la norme en vigueur) :

- Auscultation sonique (norme NF P 94-160-1) *

Remarques (Ecart aux normes, conditions particulières de travail, mesures sous-traitées, etc.)

- *essai non accrédité
- différence entre le diamètre intérieur des tubes et le diamètre extérieur des sondes : 30mm
- pieu thermique chauffé à 14°C

ATTENTION :

- ce rapport annule et remplace le rapport Rapp.MIS.8611 du 28.05.99.
- la numérotation des tubes et des profils n'est pas la même que sur les rapports précédents.

Note: Le Service d'Essais et Mesures (SEM) de De Cérenville Géotechnique SA n'est pas responsable de la pose et du fonctionnement des équipements qu'il n'a pas installés.

Annexes

- Plan de situation avec position des tubes (1 page)
- Légende des graphiques de mesure (1 page)
- Graphique de l'auscultation sonique (2 pages)

Ecublens, le 15.06.99

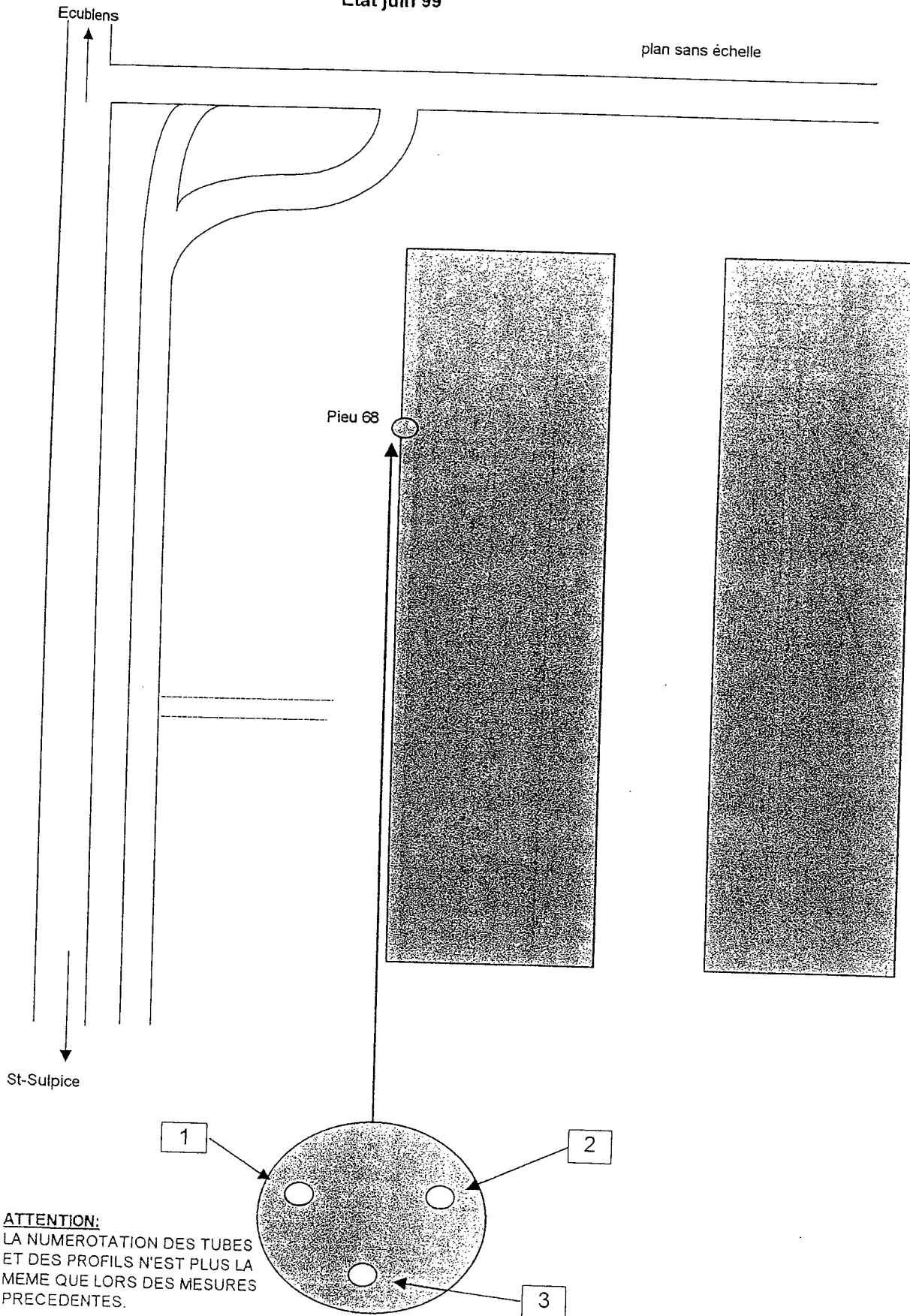
DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA




Mandat: 8611

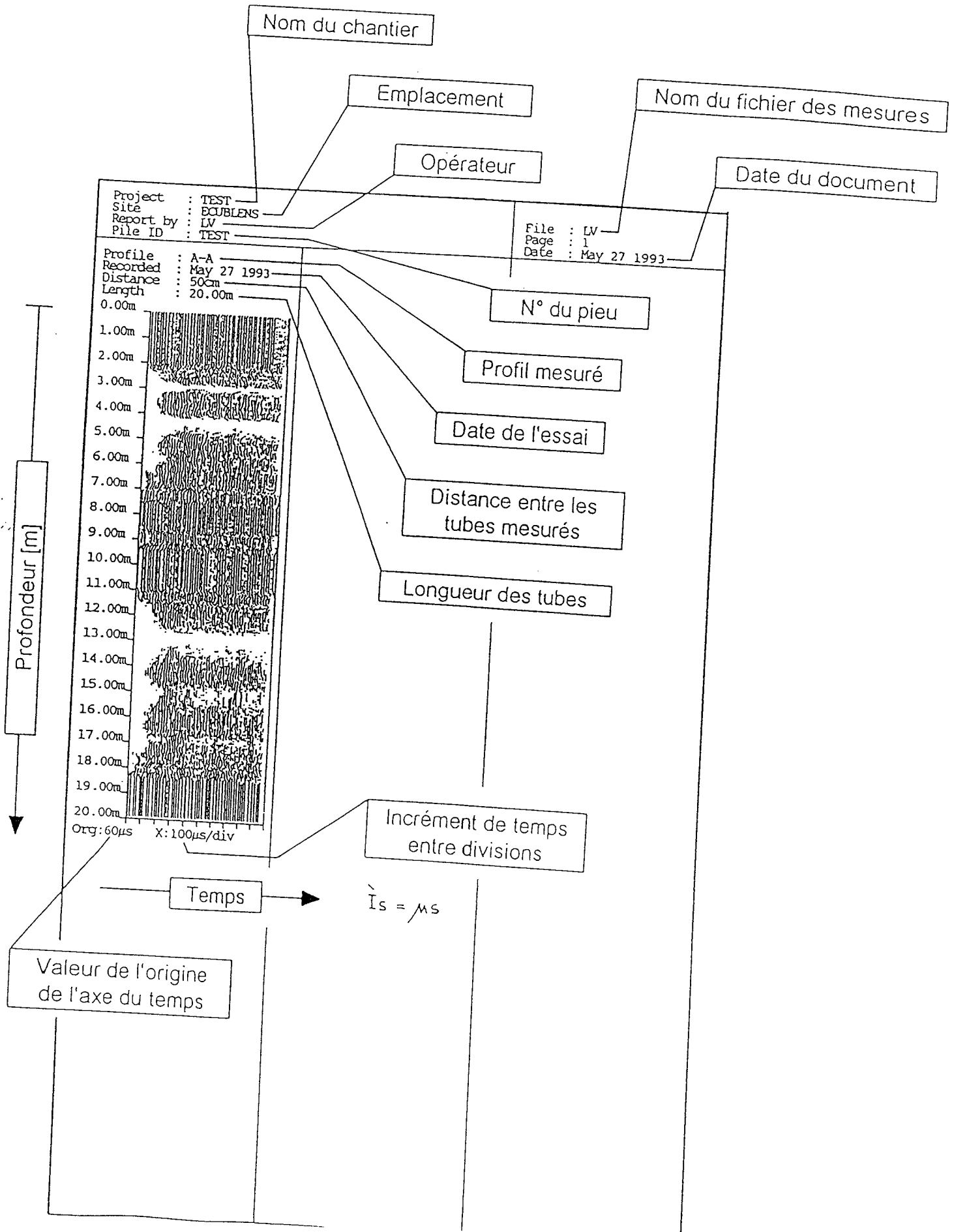
Site: **EPFL, pieu thermique n°68**
Etat juin 99

plan sans échelle



CAROTTAGE SONIQUE

Legende des protocoles de mesure



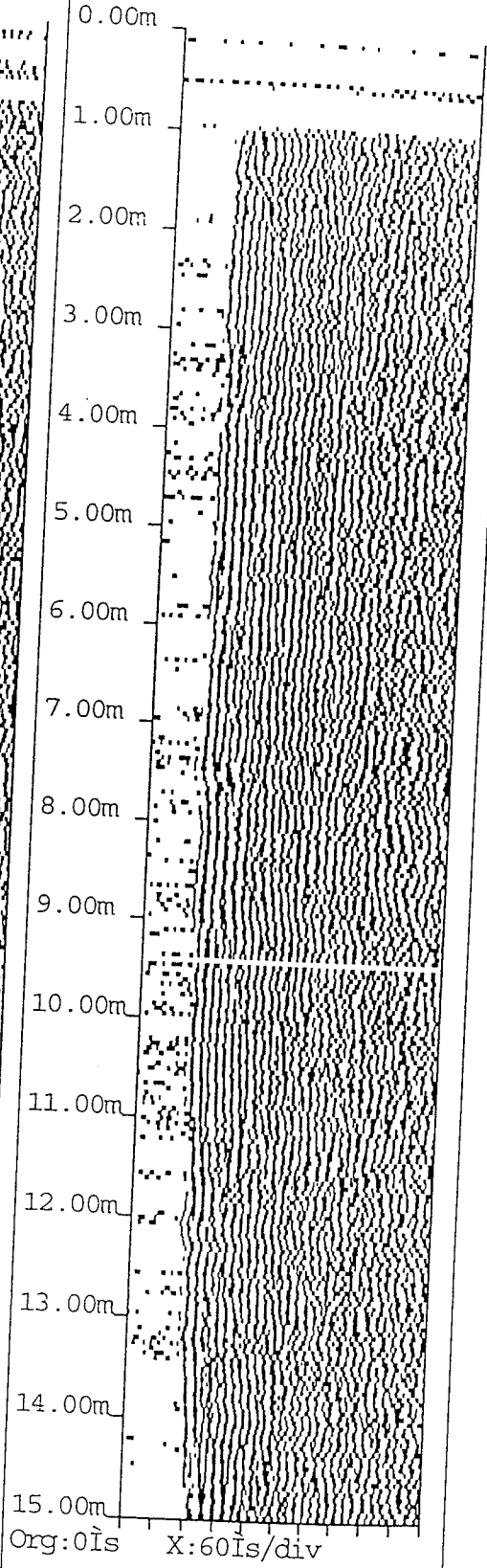
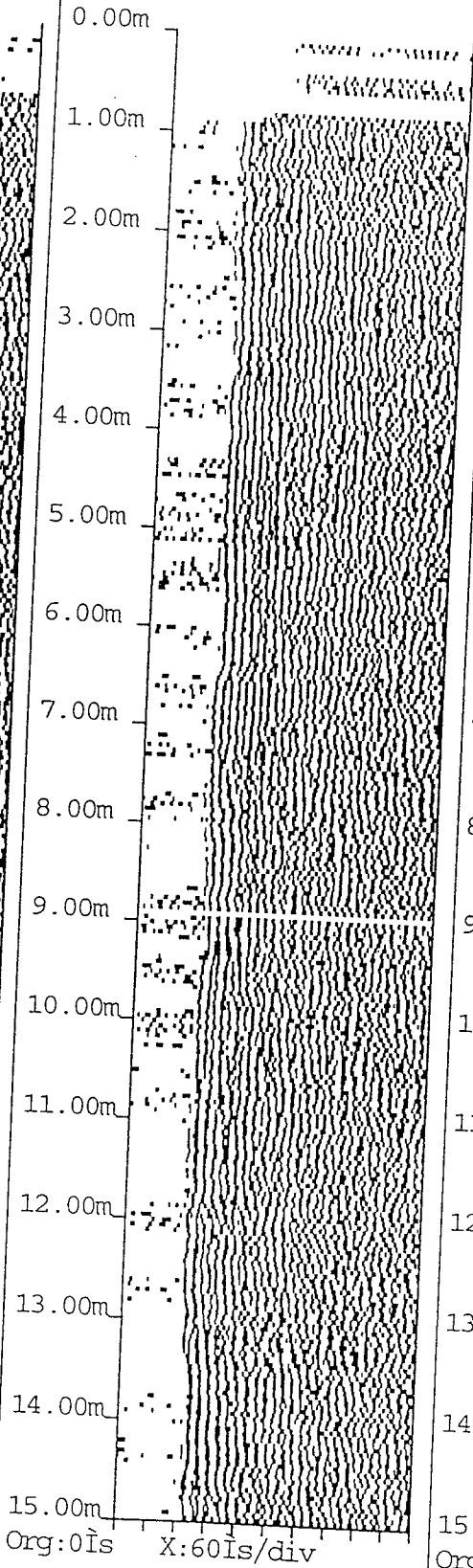
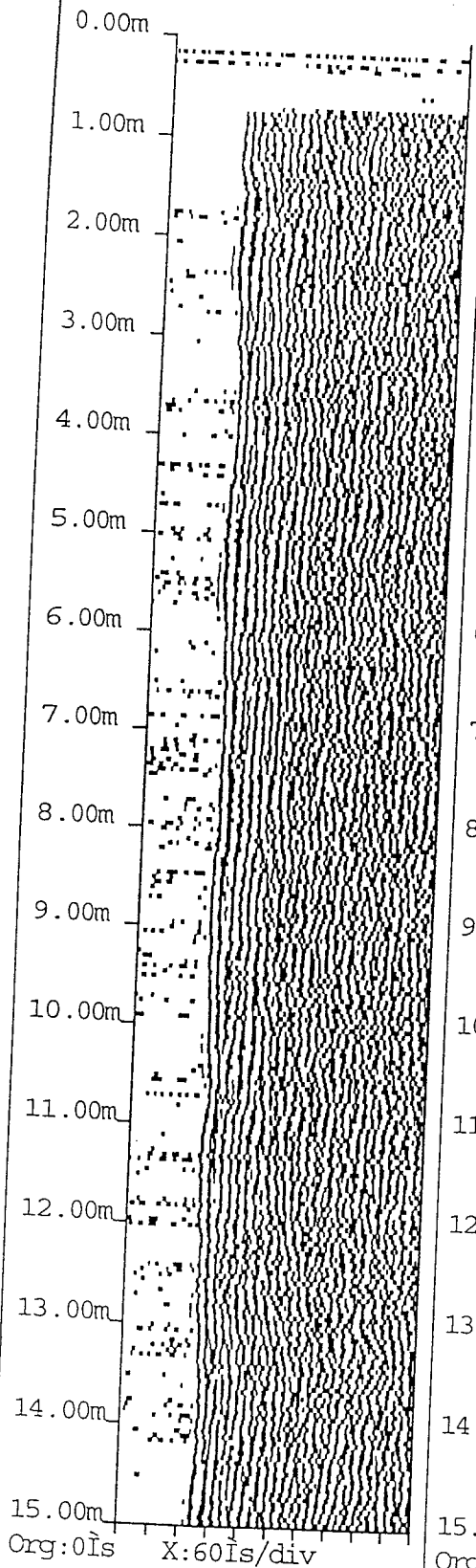
Project : M8611 EPFL - PIEU THERMIQUE 68
Site : EPFL
Report by : PHM
Pile ID : 68

File : A
Page : 1
Date : Jun 14 1999

Profile : 1-2
Recorded : May 25 1999
Distance : 37cm
Length : 25.65m

Profile : 3-1
Recorded : May 25 1999
Distance : 39cm
Length : 25.65m

Profile : 2-3
Recorded : May 25 1999
Distance : 35cm
Length : 25.65m



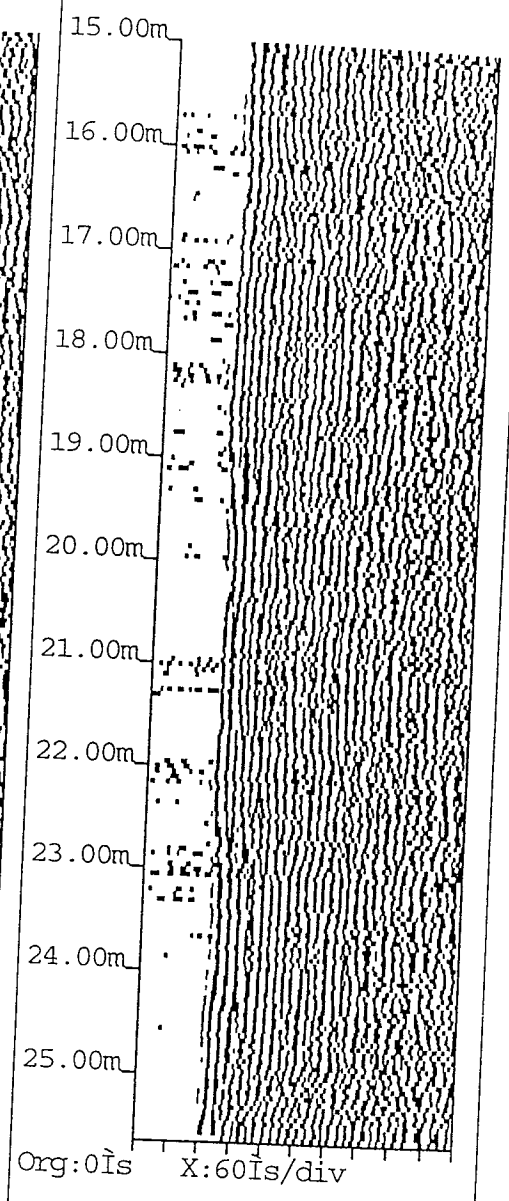
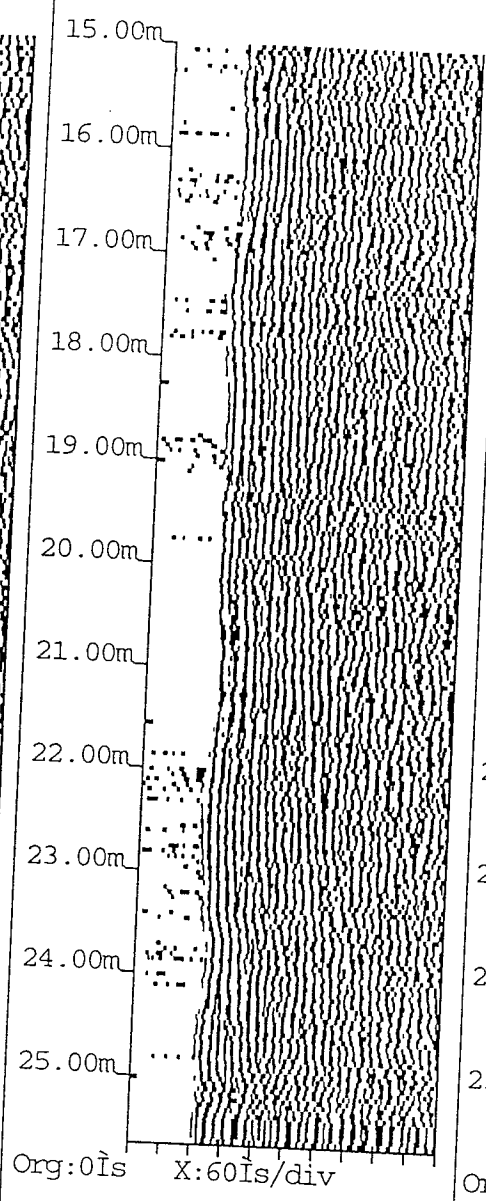
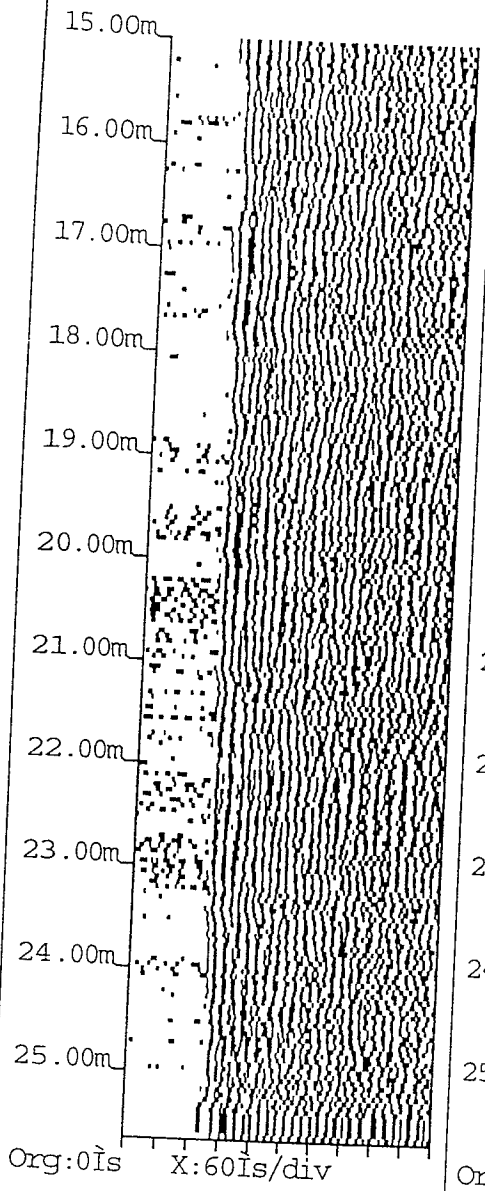
Project : M8611 EPFL - PIEU THERMIQUE 68
Site : EPFL
Report by : PHM
Pile ID : 68

File : A
Page : 2
Date : Jun 14 1999

Profile : 1-2
Recorded : May 25 1999
Distance : 37cm

Profile : 3-1
Recorded : May 25 1999
Distance : 39cm

Profile : 2-3
Recorded : May 25 1999
Distance : 35cm



Annexe Rapp.MIS07. 8611

Auscultation sismique dans les pieux

Tableau récapitulatif des mesures

DE CERENVILLE
GÉOTECHNIQUE

Mandat: 8611

Site: Pieu thermique, EPFL

Date	Pieu N°	Longueur [m]		ΔL [m]	Nombre de tubes	trajet	Vitesse [m/s]			Module d'élasticité [Mpa]			Remarques	
		tubes	béton				moy	min	max	moy	min	max		$\Sigma E/3$
24.02.98	68	26.40	25.9	0.41	3	1-2	3'328	2'929	3'727	3'320	28'086	21'441	34'731	Température du pieu 17°C
		26.40		3'546		3'000	4'091	32'170	22'500		41'839	28'068		
		26.33		3'088		2'867	3'308	23'948	20'544		27'352			
25.05.98	68	26.40	25.9	0.41	3	1-2	2'944	2'733	3'154	3'269	21'773	18'678	24'867	Mesure initiale Température du pieu à 30°C
		26.40		3'777		3'462	4'091	35'898	29'956		41'839	27'206		
		26.33		3'088		2'867	3'308	23'948	20'544		27'352			
03.06.98	68	26.40	25.9	0.41	3	1-2	3'627	3'154	4'100	3'497	33'446	24'867	42'025	Température du pieu 17°C
		26.40		3'777		3'462	4'091	35'898	29'956		41'839	31'097		
		26.33		3'088		2'867	3'308	23'948	20'544		27'352			
25.05.99	68	26.40	25.9	0.41	3	1-2	3'327	3'071	3'583	3'501	27'843	23'584	32'101	Température du pieu 14°C
		26.40		4'231		3'462	5'000	46'228	29'956		62'500	31'948		
		26.33		2'944		2'733	3'154	21'773	18'678		24'867			

Attention: Sur le graphique des résultats de l'auscultation sismique du 25.05.99, la numérotation des profils est différente que lors des mesures précédentes (24.02.98 - 25.05.98 - 03.06.98).
Sur le document présent, la conversion des profils à déjà été effectuée.

Sur tableau récapitulatif		Sur le rapp.MIS.8611	
des mesures (document présent)		du 28.05.99 (plan et graphique)	
1-2		2-3	
1-3		1-3	
2-3		1-2	

Note: Les distances entre les tubes (ΔL) ne correspondent pas à celles qui se trouvent sur les graphiques et plans des rapports. Ceci est dû à l'ajout d'un facteur de correction (correction de distance entre les sondes et correction de vitesse de propagation du signal dans l'eau)

Annexe Rapp.MIS07. 8611 (re/RT,RQ) - V1.1

Reproduction partielle interdite sans l'accord de De Cérenville Géotechnique SA - Le rapport ne concerne que l'objet soumis à la mesure

Ecublens, le 22.06.99

Page 1 de 1