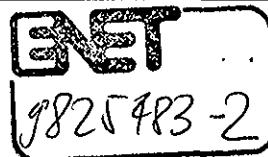




Bundesamt für Energie  
Office fédéral de l'énergie  
Ufficio federale dell'energia  
Swiss Federal Office of Energy

Programme  
géothermie      Proj. # 25'483  
                    Vertr. # 66'100



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

## **Rapport intermédiaire de janvier 1999**

rédigé par  
**M. Moreni, Dr L. Laloui, 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

Un pieu 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). Des capteurs de force, de déformation et de température ont été installés afin d'évaluer l'effet de sollicitations thermiques sur la statique du pieu.

La phase initiale du projet comprenait la conception et la réalisation du pieu échangeur ainsi que son instrumentation; cette phase s'est terminée à la fin du mois de mai 1998 et a fait l'objet de la majeur partie du premier rapport intermédiaire. La phase suivante, qui se termine à la fin de février 1999, concerne une série de sollicitations thermiques appliquées au pieu, appelées tests. Comme le bâtiment était en construction, le poids supporté par le pieu augmentait entre chaque test. Cette double sollicitation produit le couplage thermo-mécanique.

Ce rapport contient la présentation de toutes les mesures effectuées à ce jour lors des tests. Ces derniers sont au nombre de six, effectués entre la construction de chaque étage du bâtiment. La variation de température appliquée au pieu était de 15°C à chaque test, sauf pour le premier dont la variation de température était de 22°C (la base du bâtiment n'était pas encore construite). Les températures, les contraintes et les déformations induites par les sollicitations thermiques et mécaniques ont été mesurées à différentes profondeurs du pieu. 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.

La dernière phase du projet (mars 99 - décembre 99) portera sur l'interprétation des mesures afin d'évaluer l'influence d'une variation de température sur la portance du pieu.

## Abstract

A pile 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 into the pile (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 and is described in detail in the first intermediate report. The next phase, which ends at the end of February 1999, is comprised of series of thermal solicitations applied in the pile, called tests. Due to the construction of the building, the weight on the pile increases between each test.

This report contains the presentation of all the measurements done till end January. Six thermal solicitations, called tests, 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). The temperatures and deformations induced by the thermal and mechanical solicitations were measured and the stresses calculated at different depths in the pile.<sup>1</sup> 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 phase of the project (March 99 - December 99) 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.

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

## Table des matières :

1. Introduction .....	4
2. Cadre de l'étude .....	4
3. Objectif du projet .....	5
4. Etude du comportement thermo-mécanique d'un pieu .....	5
4.1 Différentes phases du projet déjà réalisées .....	6
4.2 Tests complémentaires .....	8
4.2.1 Carottages soniques .....	8
4.2.2 Test d'intégrité du pieu .....	8
5. Conclusion de la phase 1 .....	8
6. Publications .....	9
7. Références .....	9

## ANNEXES

- ANNEXE 1 : *Test 1 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 2 : *Test 2 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 3 : *Test 3 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 4 : *Test 4 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 5 : *Test 5 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 6 : *Test 6 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.*
- ANNEXE 7 : *Etalonnages*
- ANNEXE 8 : *Carottage sonique et contrôle par réflexion*

## 1. Introduction

Ce document est le deuxième rapport intermédiaire du projet « Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques ». Il porte sur la période du 1 août 1998 au 31 janvier 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 comprenait la conception et la réalisation du pieu échangeur ainsi que son instrumentation; 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 (Lalou et al., 1998).

La phase suivante, qui se terminera à la fin de juin 1999, porte sur l'application au pieu de cycles couplés de sollicitation thermo-mécanique en mesurant les déformations et les contraintes induites par la variation de température et le poids de l'immeuble.

La dernière phase du projet (mars 99 - décembre 99) portera, en plus de l'acquisition des données, sur l'interprétation des mesures afin d'évaluer l'influence de la variation de température sur la portance du pieu.

Ce rapport concerne la réalisation des tests thermo-mécaniques sur le pieu et la présentation de toutes les mesures thermiques et mécaniques réalisées jusqu'au 31.1.99. Chaque test est présenté sous la forme d'une annexe (**ANNEXES 1-6**).

## 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.

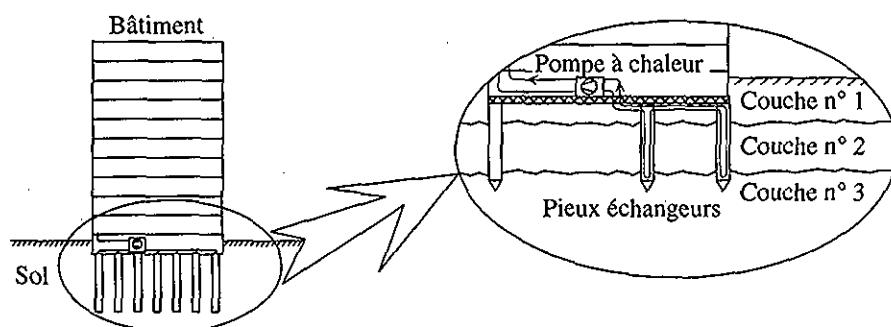


Figure 1 : Schéma d'un système de chauffage avec pieux échangeurs.

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 et à l'étranger, mais aucune connaissance scientifique n'existe sur le comportement statique du pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques.

### **3. Objectif du projet**

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) est 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 permettre la validation des calculs de prédiction du comportement du pieu en présence d'un champ de température (Laloui, 1998).

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.

### **4. Etude du comportement thermo-mécanique d'un pieu**

Le pieu test est un des pieux de fondation d'un nouveau bâtiment (100 m de longueur et 30 m de largeur) de 5 étages. Le pieu dit de « validation » est long de 26 m et il a un diamètre de 88 cm. Il est équipé avec échangeurs de chaleur et de différents capteurs qui permettent de suivre son comportement sous l'effet combiné de la charge de l'immeuble (sollicitation mécanique) et des variations de température (Figure 2).

Les capteurs installés dans le pieu sont au nombre de 58 (pour l'instrumentation du pieu voir le premier rapport intermédiaire, Laloui et al., 1998) :

- 1 cellule de pression (type HCV TELEMAC™)
- 29 fibres optiques (SMARTECT™)
- 28 extensomètres à corde vibrante (type C110 TELEMAC™)

Le projet s'articule en trois phases distinctes:

- **phase 0: conception et réalisation du pieu échangeur et de son instrumentation;**
- **phase 1: cycles de sollicitation thermo-mécaniques du pieu et acquisition des données;**
- **phase 2: analyse des mesures et interprétation des résultats.**

Capteur C110 n° 33034 défectueux

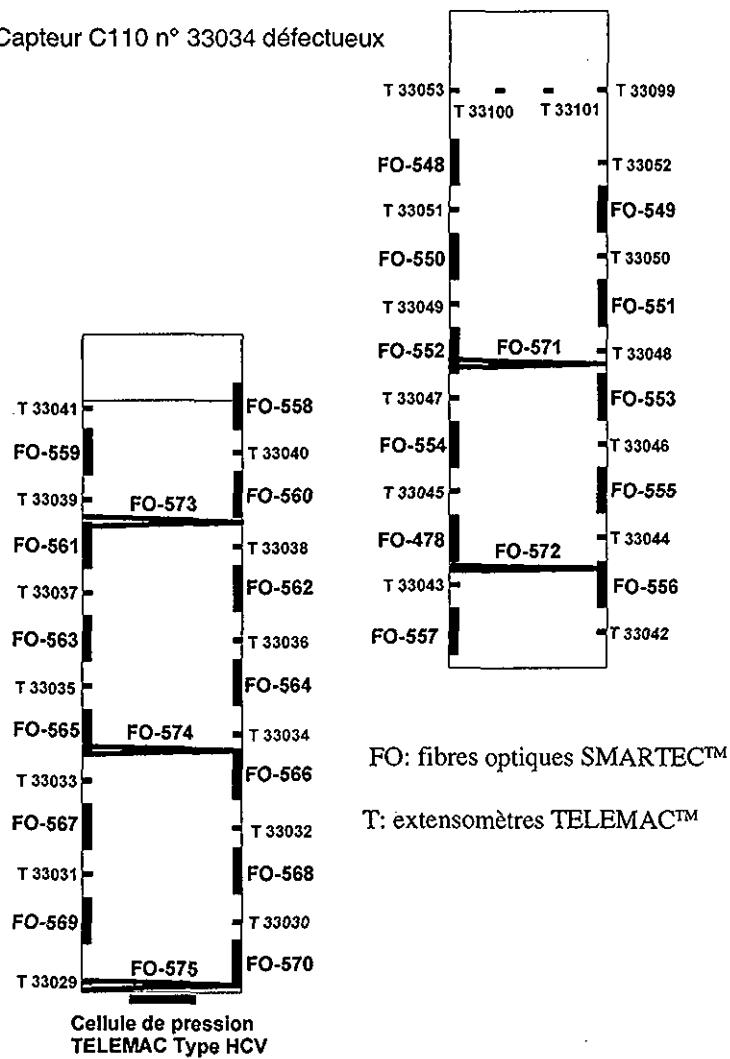


Figure 2 : Equipement du pieu thermique EPFL (cage d'armature scindée en deux)

#### 4.1 Différentes phases du projet déjà réalisées

##### Phase 0: janvier - mai 1998 (1<sup>er</sup> 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 dans le pieu 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. Les informations détaillées relatives à la phase 0 se trouvent dans le 1<sup>er</sup> rapport intermédiaire (Laloui *et al.*, 1998).

##### Phase 1: mai 1998 - juin 1999 (objet du présent rapport)

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 3). Le premier correspond au pieu "libre": le radier du bâtiment n'étant pas encore coulé. Le pieu ne subit aucune charge mécanique autre que son poids propre. Les

Capteur C110 n° 33034 défectueux

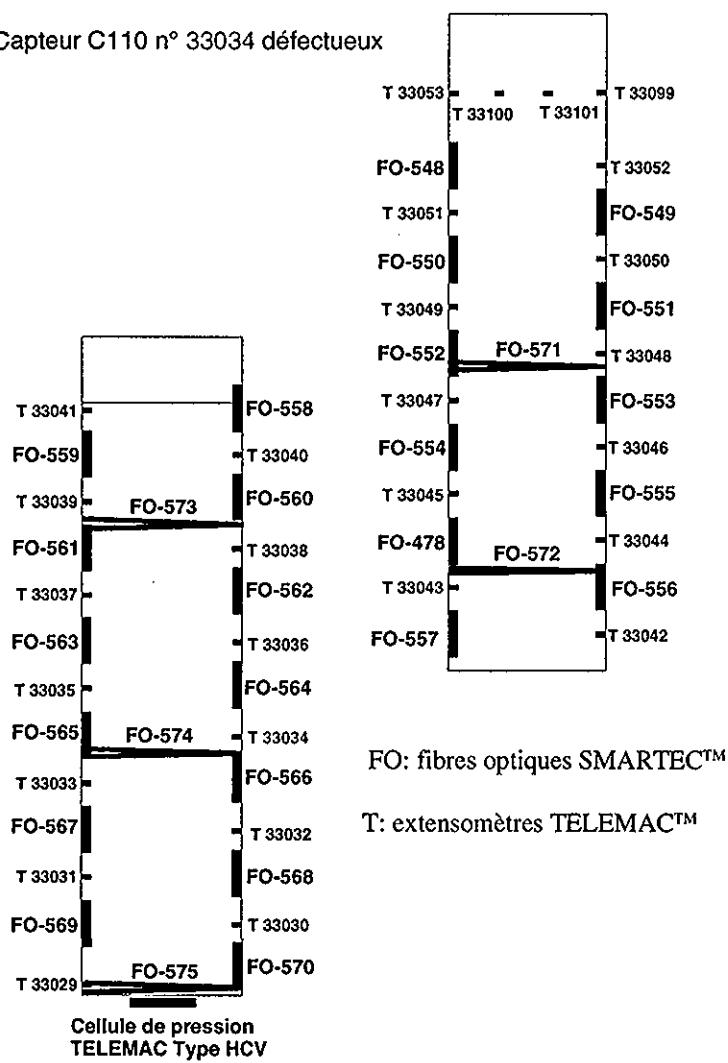


Figure 2 : Equipement du pieu thermique EPFL

#### 4.1 Différentes phases du projet déjà réalisées

##### Phase 0: janvier - mai 1998 (1<sup>er</sup> 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 dans le pieu 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. Les informations détaillées relatives à la phase 0 se trouvent dans le 1<sup>er</sup> rapport intermédiaire (Laloui *et al.*, 1998).

##### Phase 1: mai 1998 - juin 1999 (objet du présent rapport)

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 3). Le premier correspond au pieu "libre": le radier du bâtiment n'étant pas encore coulé. 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 est prévu une fois le bâtiment terminé, lorsque la charge mécanique sur le pieu aura atteint sa valeur nominale.

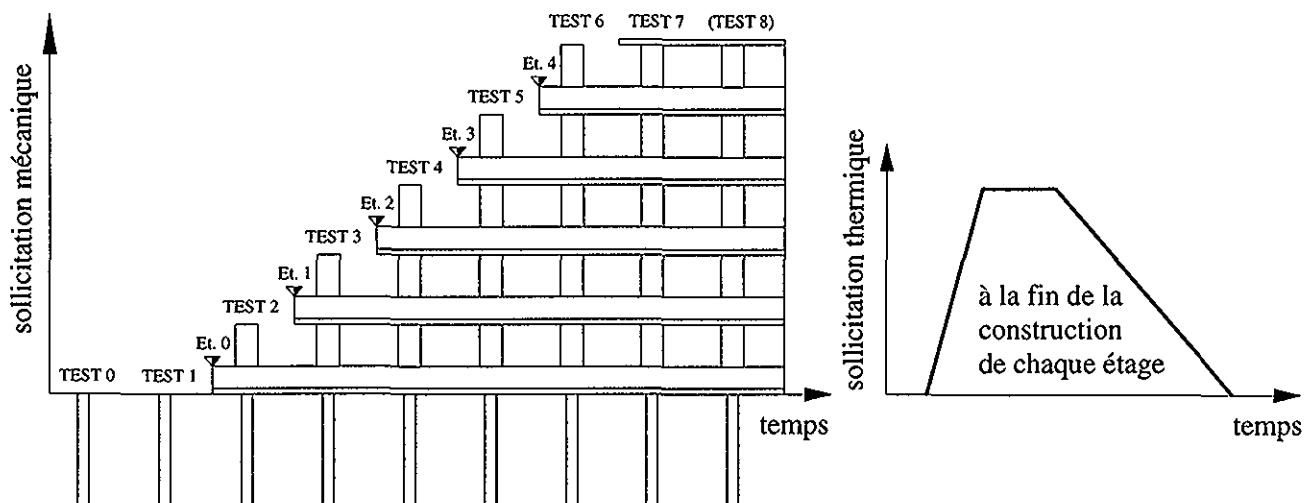


Figure 3 : Tests de chargement thermo-mécaniques.

Pour chaque test (ce qui correspond à la fin de la construction d'un étage) une sollicitation thermique est appliquée au pieu (chauffage-refroidissement). Les capteurs du pieu sont alors 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. A ce jour, les tests 1 à 6 ont été effectués.

La Table 1 résume les caractéristiques de chaque test thermo-mécanique, les ANNEXES 1-6 présentent en détails les mesures thermiques et mécaniques.

ANNEXE	Test	Date	Etapes de construction	$\Delta T [^{\circ}C]$
1	1	mai - juin 98	pieu libre	22
2	2	juillet-août 98	radier	15
3	3	septembre 98	dalle du 1 <sup>er</sup> étage	15
4	4	octobre 98	dalle du 2 <sup>ème</sup> étage	15
5	5	octobre-novembre 98	dalle du 3 <sup>ème</sup> étage	15
6	6	novembre-décembre 98	dalle du 4 <sup>ème</sup> étage	15

Table 1 : les caractéristiques de chaque test thermo-mécanique.

## 4.2 Tests complémentaires

### 4.2.1 Carottages soniques

Pour déterminer l'évolution des rigidités du pieu sous l'effet thermique des carottages soniques ont été exécutés (ANNEXE 8).

La Table 2 résume les résultats des carottages soniques effectués à ce jour.

Date	Température moyenne dans le pieu [°C]	Module d'élasticité moyen [MPa]	Module d'élasticité corrigé* [MPa]
24 février 1998	23	19965	18750
25 mai 1998	35	17115	16070
3 juin 1998	24	21556	20240

Table 2 : Résultats des carottages soniques. \* Voir ANNEXE 8.

Pour les détails des calculs des modules d'élasticité voir l'ANNEXE 8 .

### 4.2.2 Test d'intégrité du pieu

En date du 27 mai 1998, un contrôle du pieu a été réalisé avec la méthode de réflexion PIT. Aucun défaut de qualité n'a été constaté sauf un élargissement de la section du pieu à 19-20 m de profondeur (ANNEXE 8).

## 5. Conclusions de la phase 1

Dans cette phase du projet, les tests thermo-mécaniques effectués sur le pieu sont au nombre de six, soit 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.

A chaque test un relevé des mesures thermiques relatives au chauffage (températures, débit, puissances électrique et thermique) est effectué. Les déformations et températures du pieu sont aussi mesurées pendant chaque test à l'aide des capteurs posés dans le pieu.

Pour déterminer le module d'élasticité du pieu et sa qualité des carottages soniques et un contrôle avec la méthode de réflexion ont été exécutés.

A chaque test il a été possible d'estimer le coefficient d'hyperstaticité du pieu (n). Il a été montré qu'au fur et à mesure que le bâtiment est construit, la valeur de ce coefficient diminuait, ce qui montre que le pieu est de plus en plus empêché de se déplacer. Pour cette raison une charge supplémentaire est engendrée dans le pieu.

Le grand nombre de mesures effectuées sous des conditions différentes (charge statique et thermique) permettra d'évaluer, dans la phase 2, l'influence d'une variation de température sur la portance du pieu.

## **6. Publications**

FROMENTIN A., PAHUD D., LALOUI L. & MORENI M., Pieux échangeurs : conception et règles de prédimensionnement, article soumis à la Revue française de génie civil, 1999.

LALOUI L., MORENI M., FROMENTIN A., PAHUD D. & STEINMANN G., Heat Exchanger Pile: Effect of the Thermal Solicitations on its Mechanical Properties, article soumis à « European Geothermal Conference », Basel 1999.

## **7. Références**

LALOUI L., MORENI M., STEINMANN G., FROMENTIN A., PAHUD D., Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques, Premier rapport intermédiaire, Office fédéral de l'énergie, Bern, Suisse, 1998.

FROMENTIN A., PAHUD D., LALOUI L., MORENI M., KAPP C. ET ROTH K., Pieux échangeurs - QN EPFL. Etude préliminaire de faisabilité technique et économique, rapport interne LMS SY40 / LASEN 120.105, EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.

LALOUI L., Quartier Nord EPFL - Projet "Pieux échangeurs" Test en conditions réelles du comportement d'un pieu soumis à des sollicitations thermiques, demande de financement, LMS SY40, EPFL, Lausanne, Suisse, 1998.

STRAIN R. T. & WILLIAMS H.T., Interpretation of Sonic Coring results : A research project, Proc. 4<sup>th</sup> International Deep Foundations Institute Conference, Balkema, pp 633-640, 1991.

**Liste des ANNEXES**

ANNEXE 1 : Test 1 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 2 : Test 2 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 3 : Test 3 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 4 : Test 4 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 5 : Test 5 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 6 : Test 6 sur le pieu échangeur du Quartier Nord de l'EPFL.

ANNEXE 7 : Etalonnages

ANNEXE 8 : Carottage sonique et contrôle par réflexion

# **ANNEXE 1**

## **TEST 1**

## ANNEXE 1, TEST1

### TEST 1 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A1.1 Etape de construction lors du test 1

Le premier test a été effectué environ trois mois après le bétonnage du pieu. Le pieu ne reprend aucune charge verticale sauf son poids propre. En effet le radier, le parapet et les murs colonne du rez-de-chaussée ne sont pas encore coulés (figure A1.1. zone grise). Si une charge thermique est appliquée au pieu, il a la possibilité de se déplacer vers le haut vu qu'il n'est pas bloqué par la superstructure.

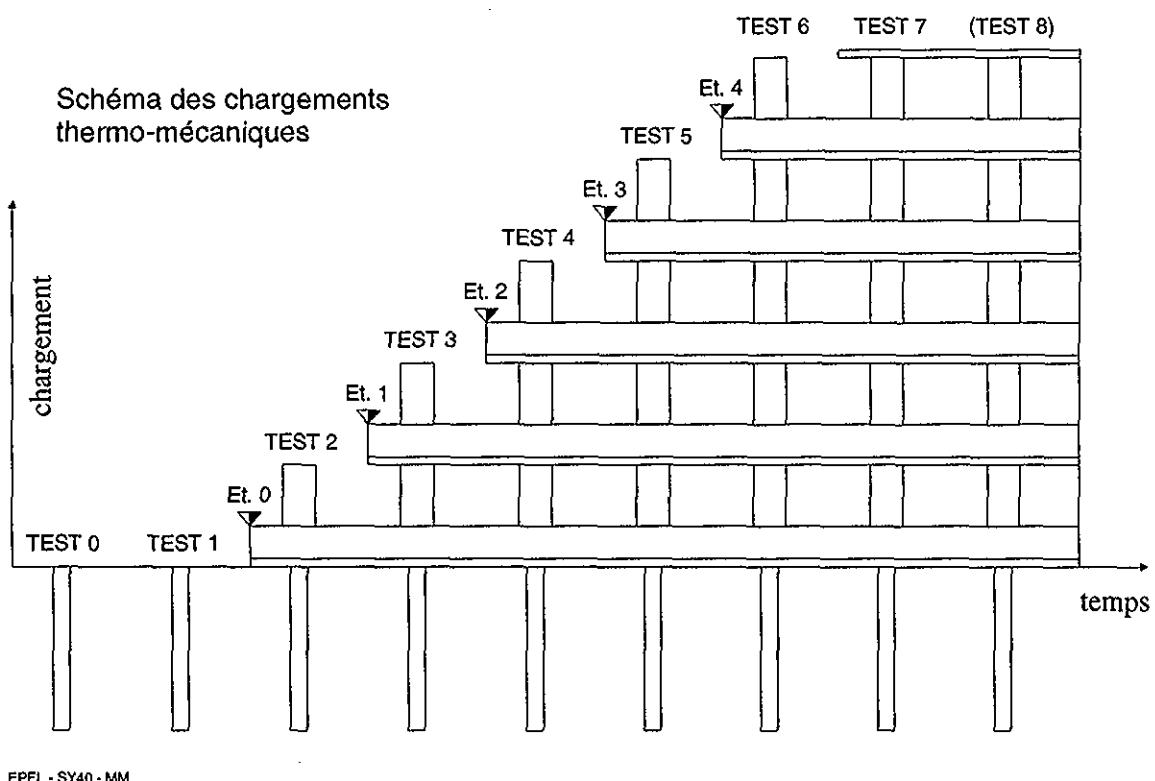


Figure A1.1 : Etape de construction lors du test 1.

#### A1.2 Déroulement chronologique du test 1

Le déroulement du test est résumé dans la table A1.1. 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 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 bâlier 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.

## ANNEXE 1, TEST1

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
Mercre. 20 mai 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Chauffage
Mercre. 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
Mercre. 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 A1.1 : Déroulement chronologique du test 1.

## ANNEXE 1, TEST1

### A1.3 Mesures thermiques relatives au test 1

Les mesures relatives au module de chauffage ne sont pas encore automatisées. 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 A1.2), 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".

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

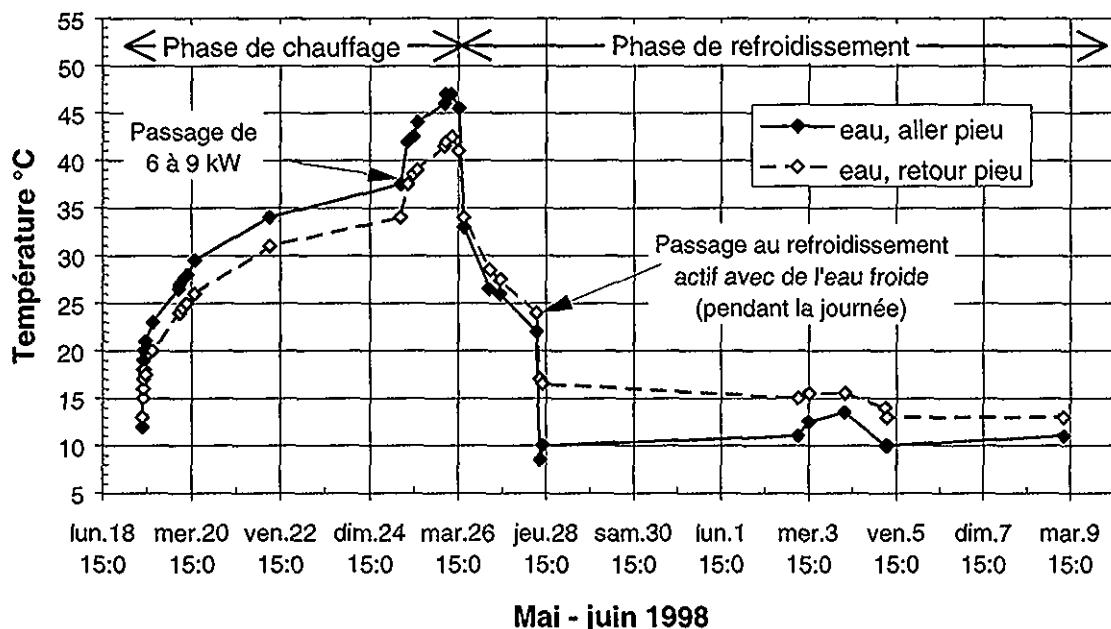


Figure A1.2 : Evolution des températures de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) lors du test 1.

Les figures A1.3 et A1.4 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 7). En moyenne les températures mesurées avec les capteurs TELEMAC sont de 5.1°C plus hautes. Les valeurs des températures reparties sur les figures A1.3 et A1.4 sont déjà corrigées.

La température du pieu (mesurée par les capteurs TELEMAC) est d'environ 13-14 °C avant de commencer à chauffer le pieu. La température maximale moyenne mesurée dans le pieu pendant ce test est de 35 °C. La différence de température appliquée au pieu est alors d'environ 22°C.

En phase de chauffage (figure A1.3) les températures varient beaucoup d'un mètre à l'autre et de façon alternée sur la longueur du pieu. Cette différence de température est due au fait que les capteurs TELEMAC d'une partie du pieu sont plus proches des tubes en PE où passe le fluide caloporteur que ceux de l'autre partie.

## ANNEXE 1, TEST1

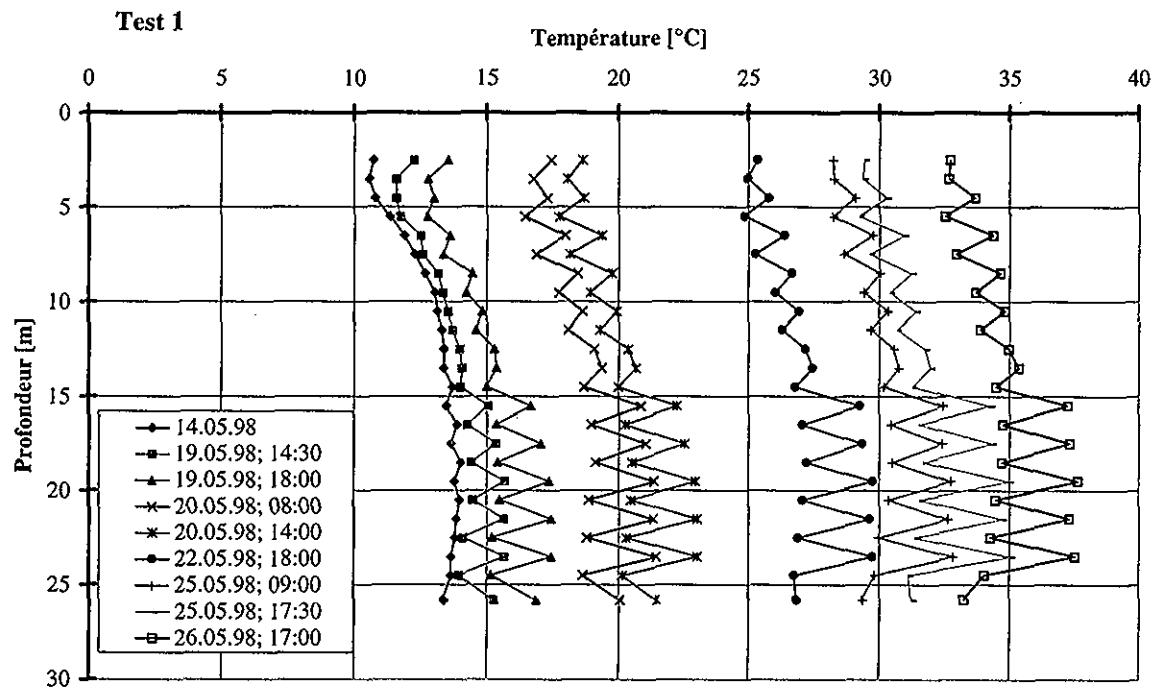


Figure A1.3 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage. Test 1.

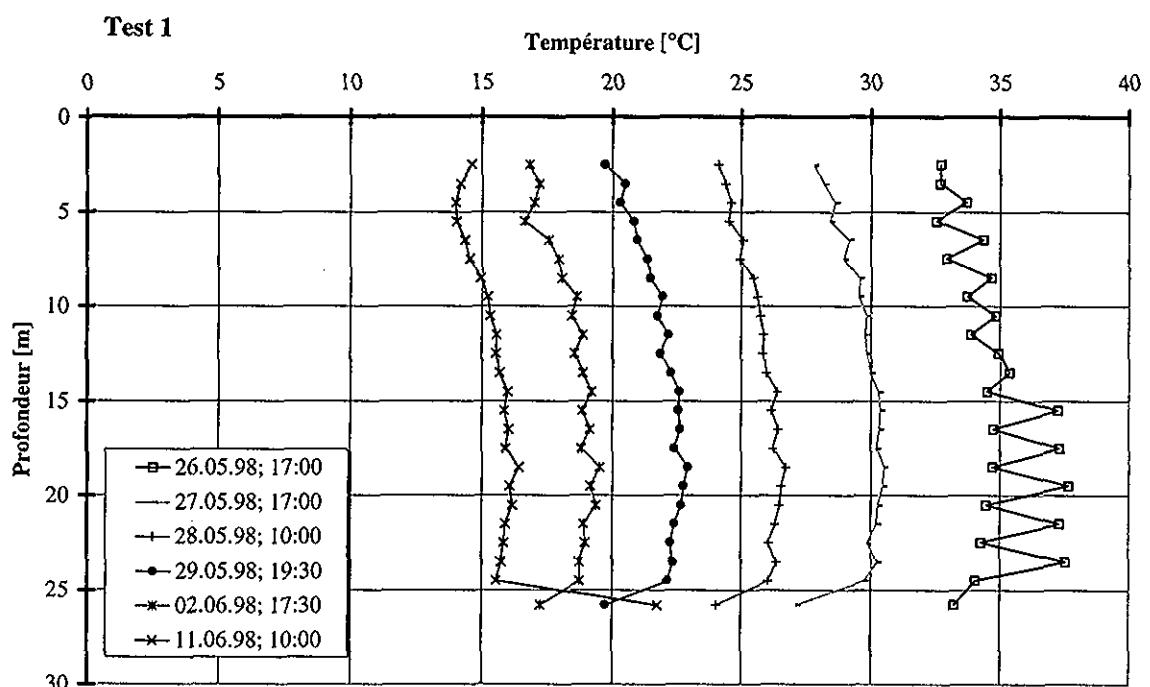


Figure A1.4 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 1.

## ANNEXE 1, TEST1

### A1.4 Mesures mécaniques relatives au test 1

Pendant le test 1 la déformation des fibres optiques et des capteurs TELEMAC, la température et la pression au fond du pieu ont été mesurées 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 fonctionnent normalement sauf le capteur TELEMAC (n°T33034, Figure 2) qui ne permet pas la mesure de la déformation.

Des cinq capteurs à fibres optiques pour la mesure des déformations radiales seuls deux donnent des valeurs exploitables (FO 574 à 21m et FO 573 à 16m). Les trois autres capteurs donnent des valeurs difficilement exploitable, en effet les déformations mesurées par ces fibres optiques ne montrent pas une dilatation (en phase de chauffage) et une rétraction (en phase de refroidissement) du pieu.

Les figures A1.5 et A1.6 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

On note bien que pour une augmentations de la température une déformation positive (donc allongement) est mesurée par tous les capteurs.

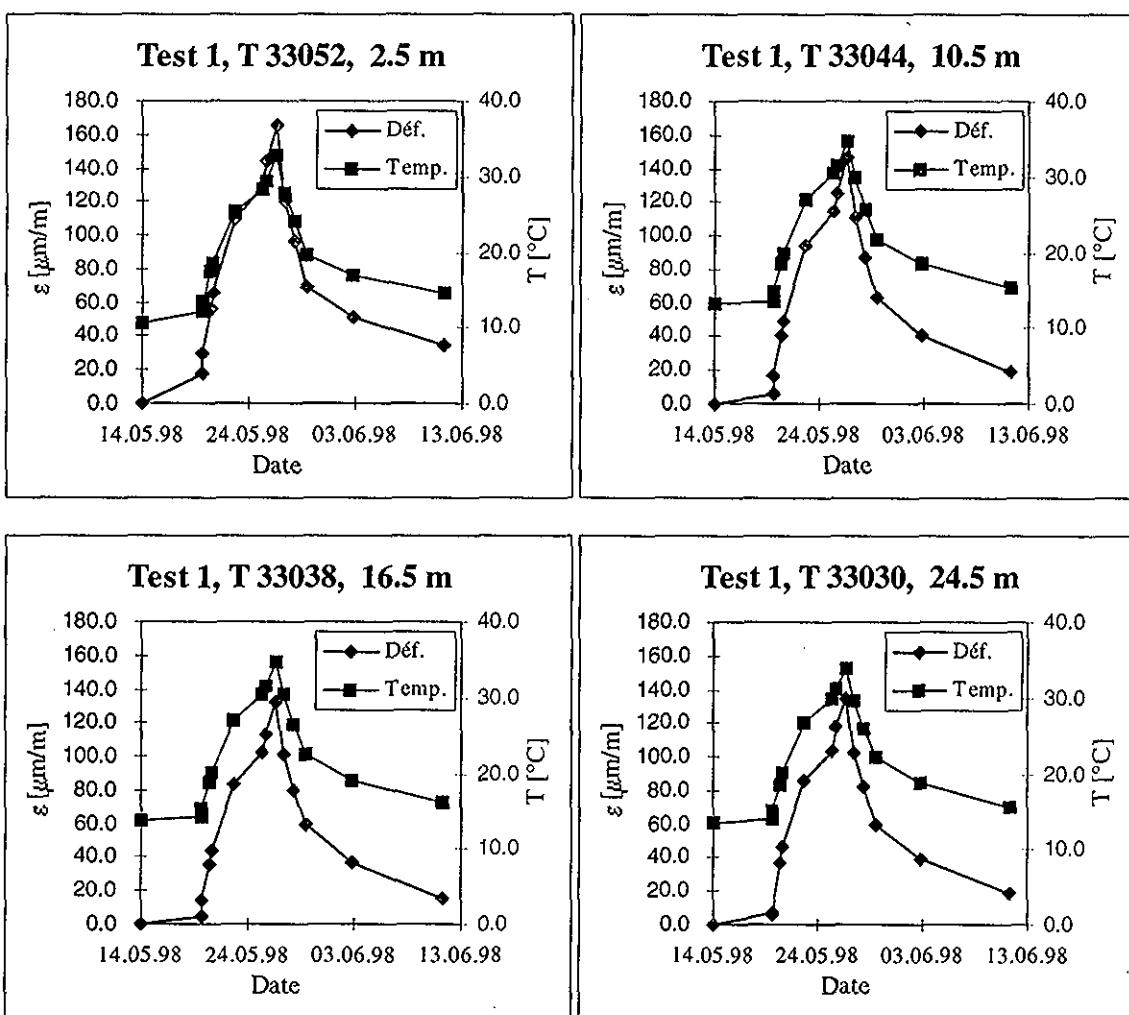


Figure A1.5 : Déformation et température en fonction du temps mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 1.

## ANNEXE 1, TEST1

En outre, on constate que la valeur de la déformation après refroidissement (dernière mesure) ne revient pas à la 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 refroidit complètement.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure A1.7 où la déformation est dessinée en fonction de la température. La pente de cette courbe est  $n\beta$  où  $n$  est le degré d'hyperstaticité du pieu ( $n=1$  pieu isostatique,  $n=0$  pieu hyperstatique) et  $\beta$  le coefficient de dilatation thermique du béton. La valeur moyenne du coefficient  $n\beta$  obtenue de tous les capteurs TELEMAC est de  $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  avec un écart-type de  $0.7 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

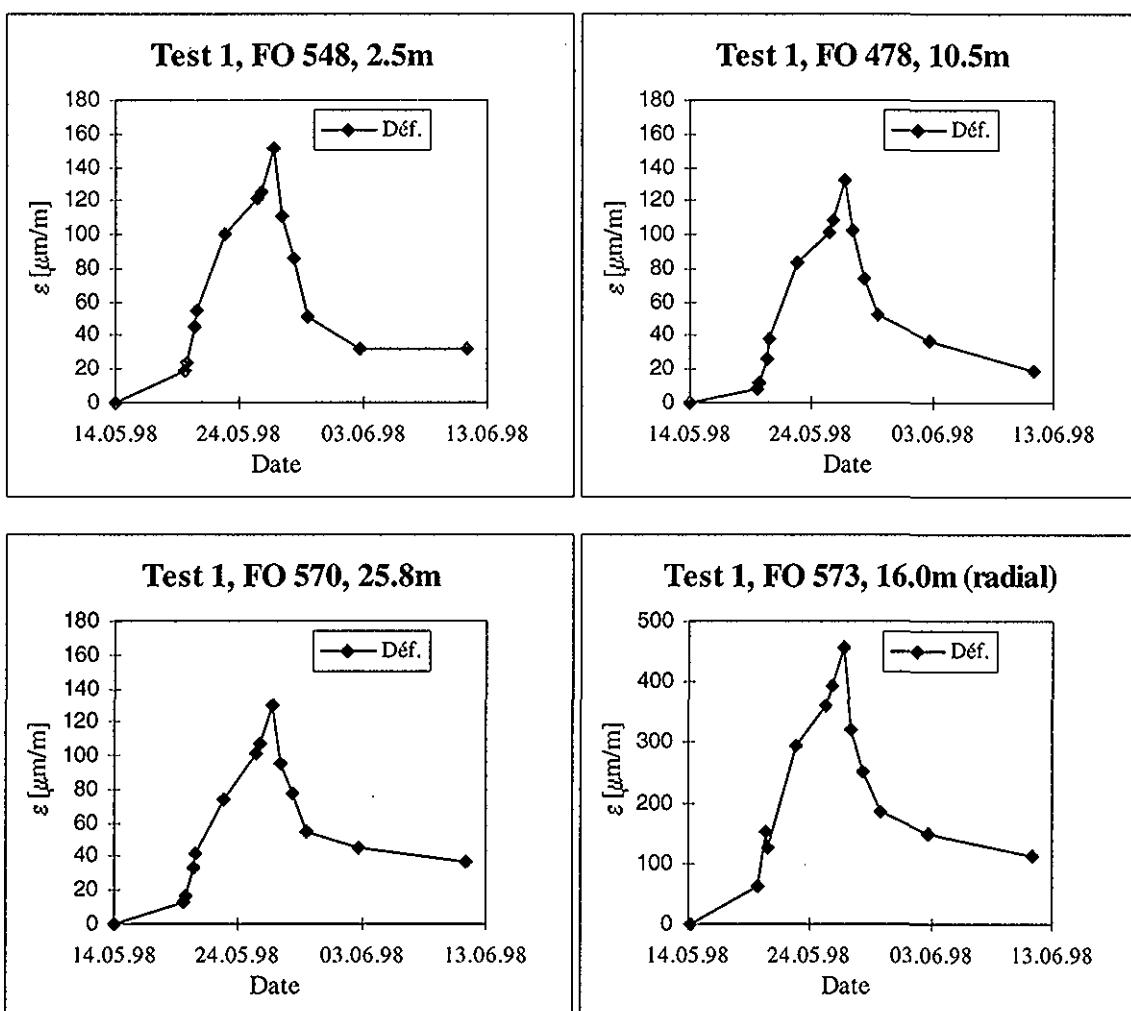


Figure A1.6: Déformations mesurées par fibres optiques (FO548, FO478, FO570, FO573).Test 1.

## ANNEXE 1, TEST1

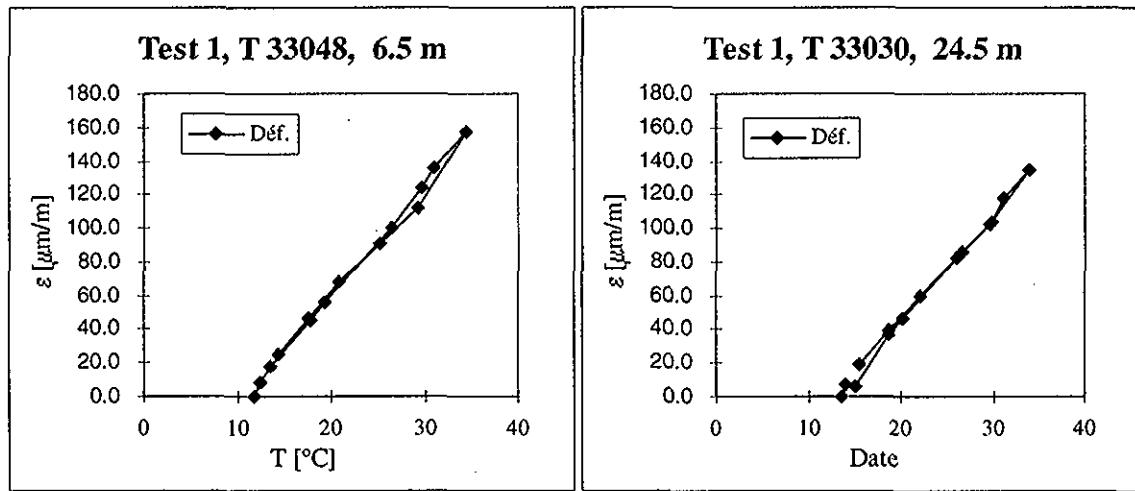


Figure A1.7 : Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 1.

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure pratiquement aucune variation de pression au cours du test 1 comme le montre la figure A1.8.

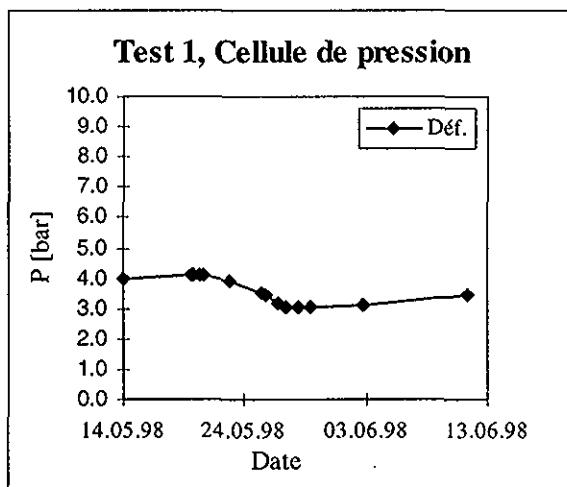


Figure A1.8 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test1

La totalité des mesures effectuées au cours du test 1 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

### A1.4 Conclusion

Pendant le premier test, le pieu est soumis à une sollicitation thermique ( $\Delta T=22^{\circ}\text{C}$ ). Aucun étage étant construit, la charge mécanique sur le pieu est nulle. Le test s'est déroulé sans aucun problème, la phase de chauffage a duré 7 jours et le suivi de la phase de refroidissement 14 jours.

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.

Les températures mesurées par les capteurs TELEMAC sont corrigés de  $5.1^{\circ}\text{C}$ . Les capteurs TELEMAC et les fibres optiques ont un taux de fonctionnement d'environ 95% et ils

## **ANNEXE 1, TEST1**

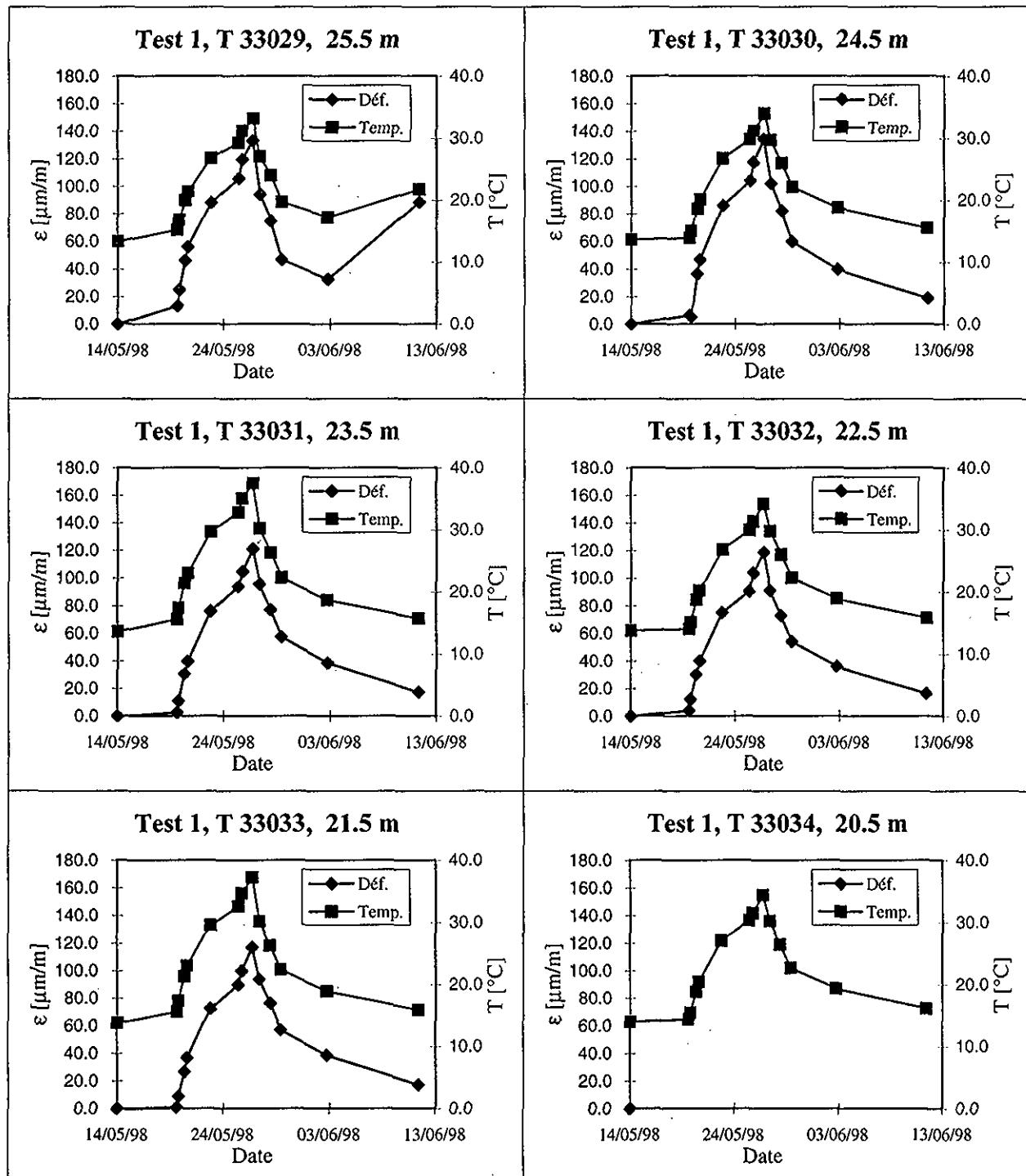
montrent une dilatation du pieu en phase de chauffage et un rétraction en phase de refroidissement. Le comportement est réversible avec un coefficient  $n\beta$  de  $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure aucune variation de pression.

Ce test est important pour l'évolution de la mobilisation du frottement latéral sous l'effet thermique.

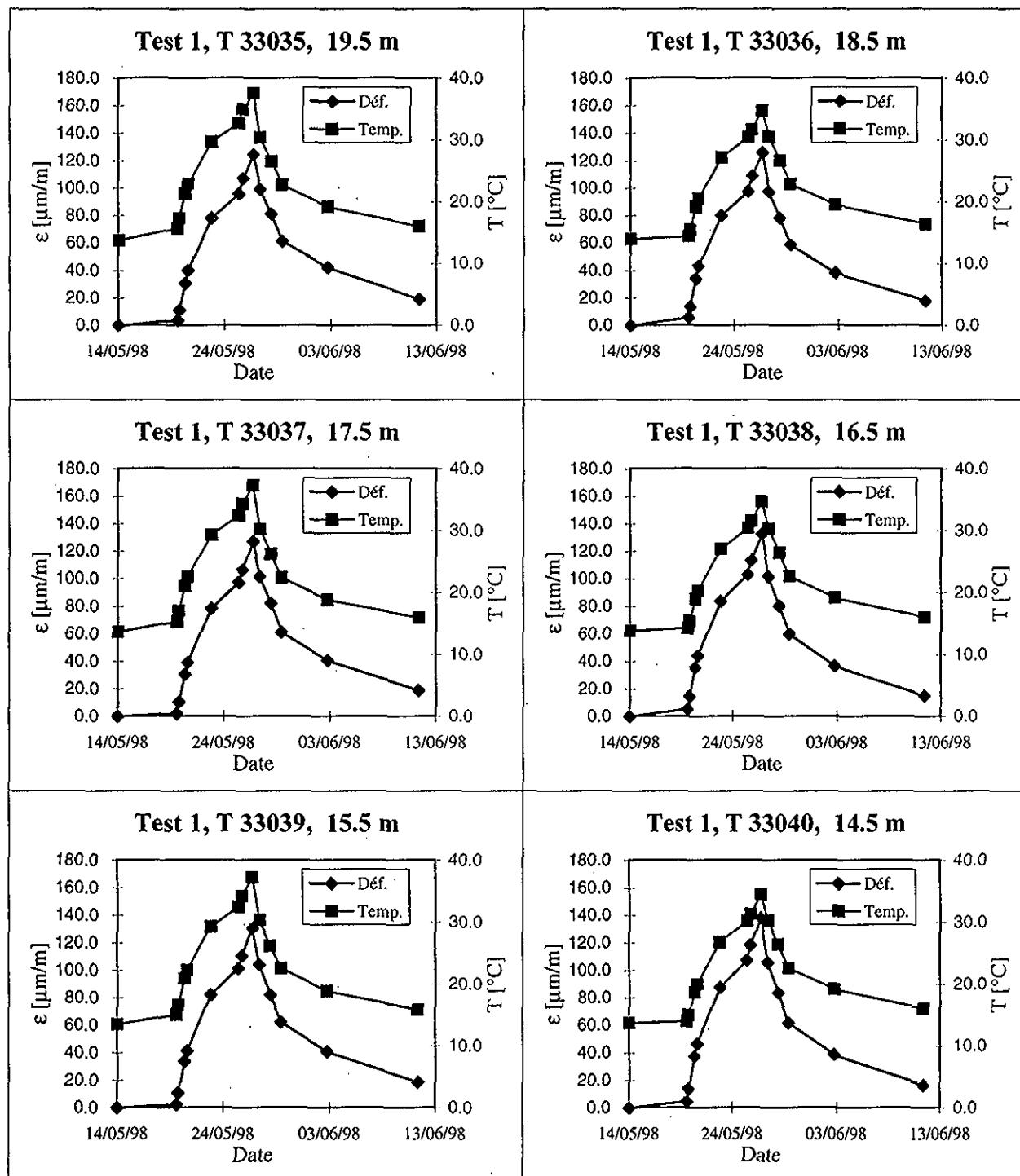
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



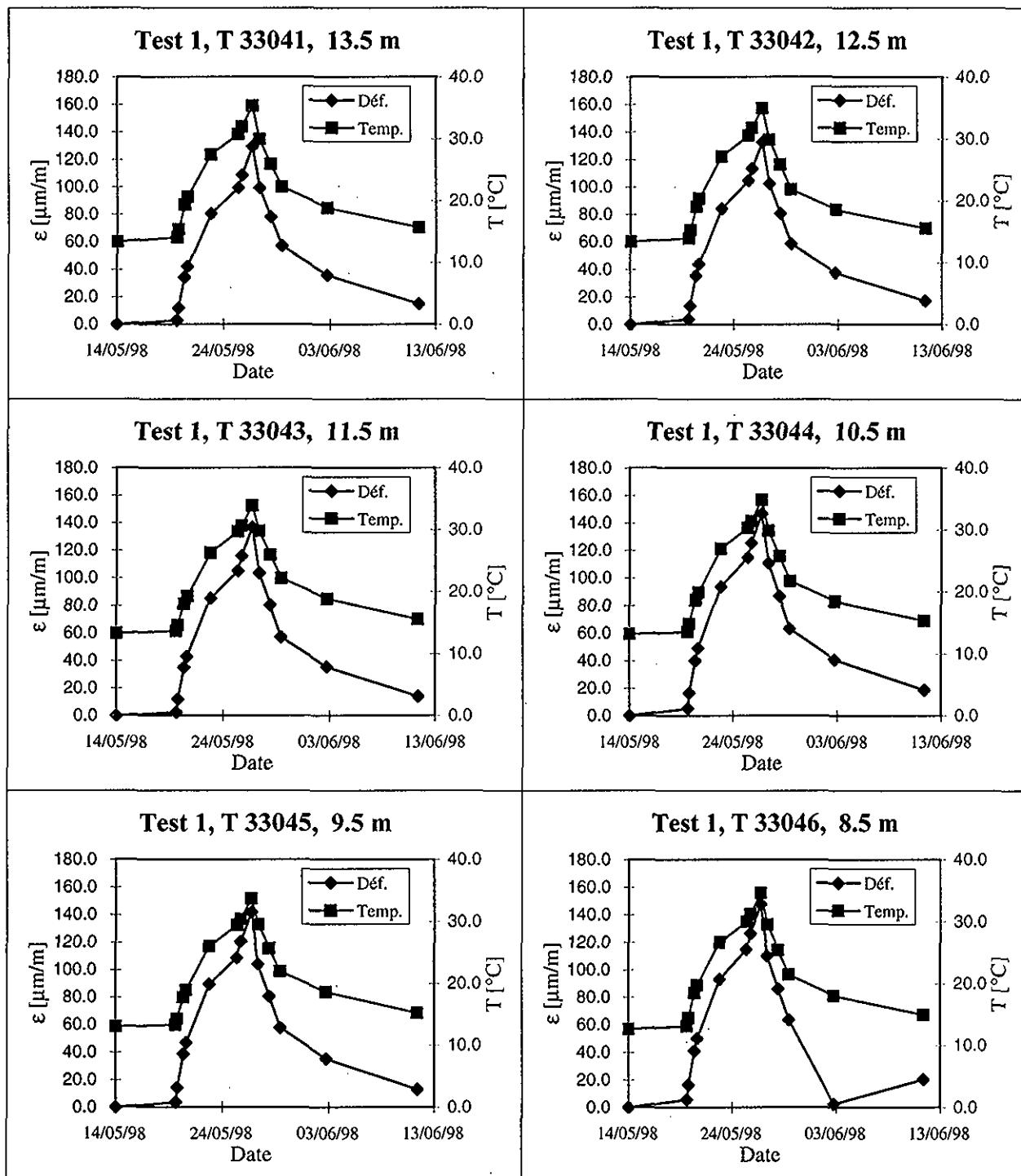
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



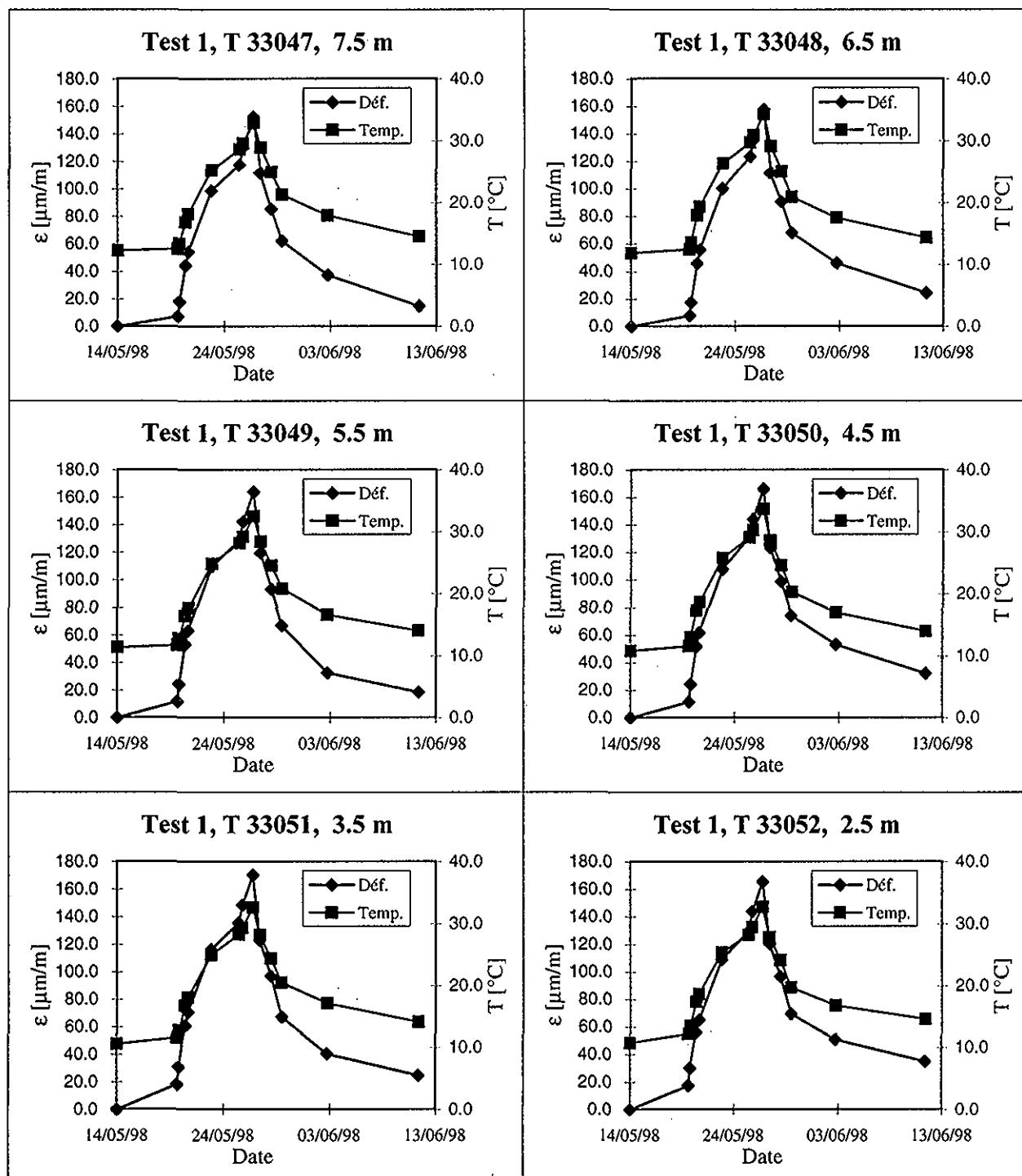
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



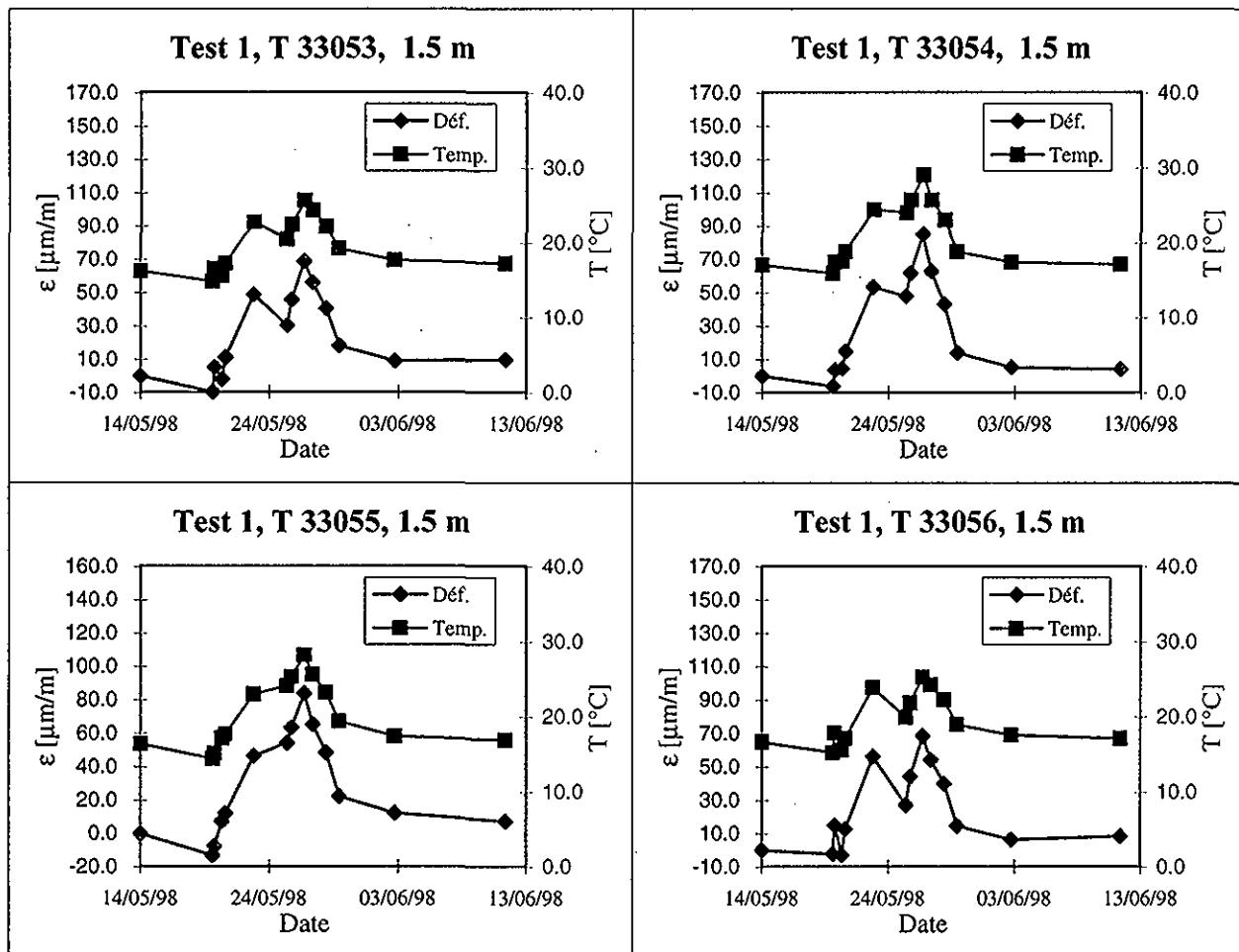
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



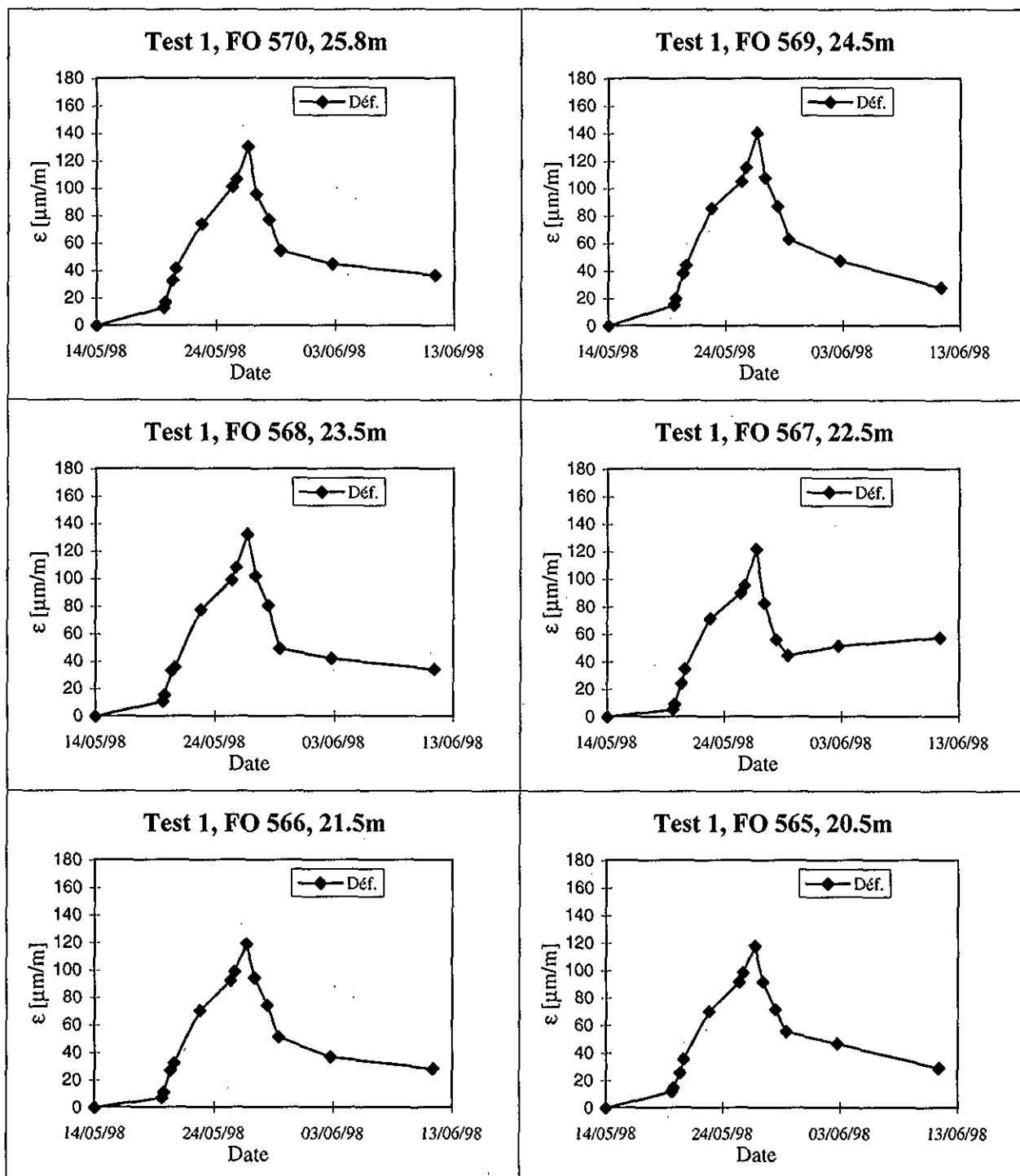
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



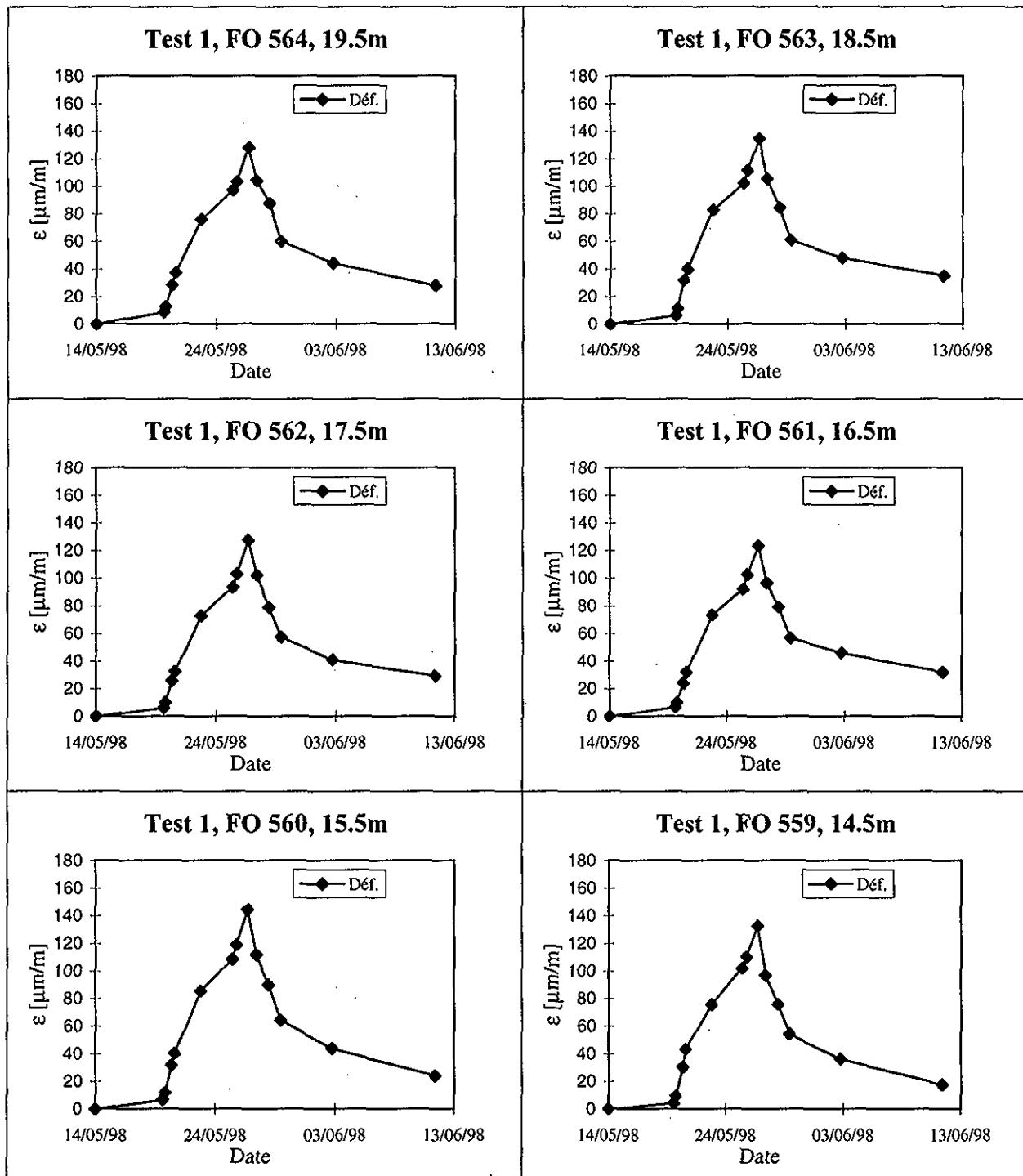
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs à fibres optique



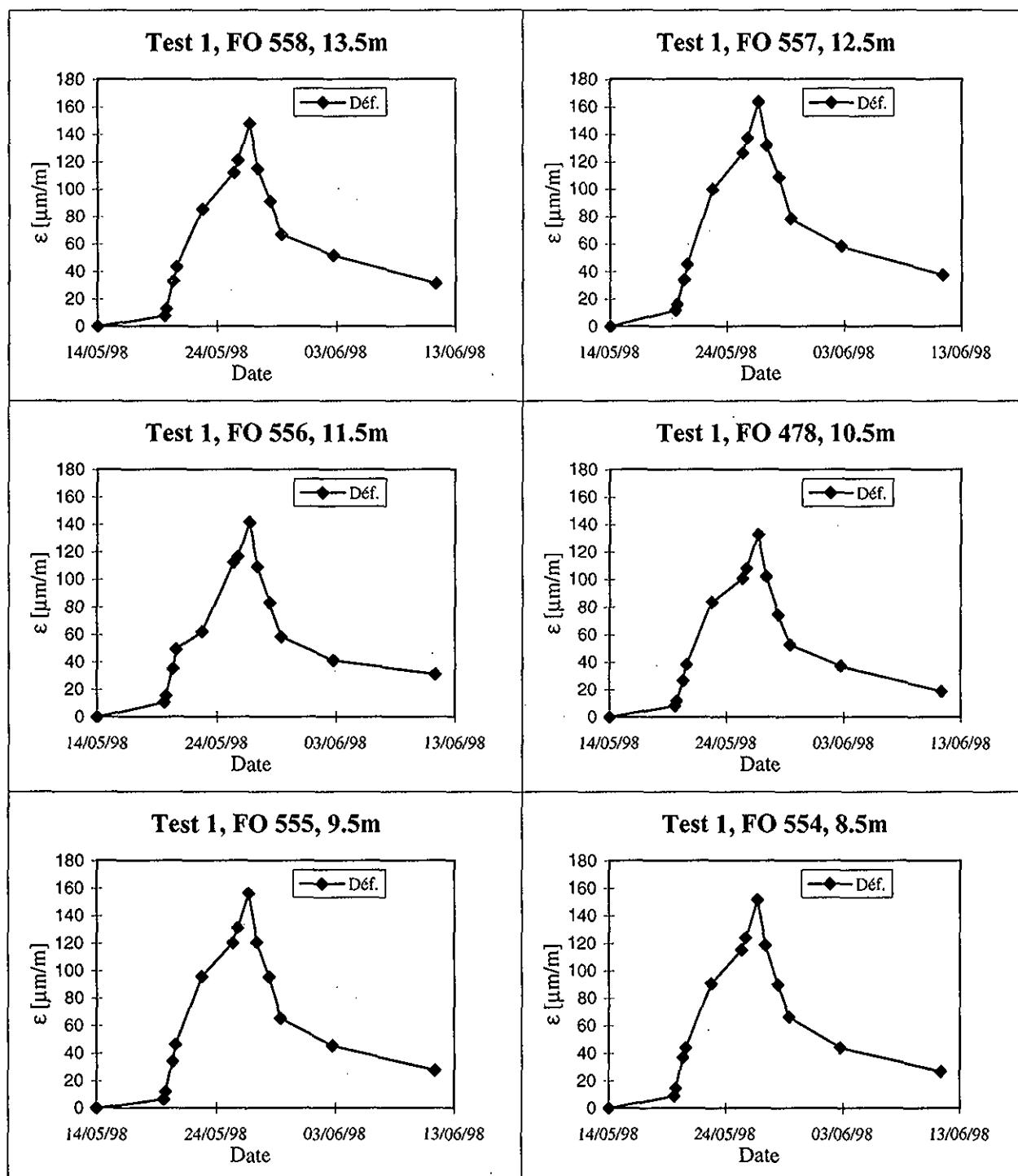
Pieu thermique - SY40  
 TEST1

Capteurs à fibres optique



Pieu thermique - SY40  
 TEST1

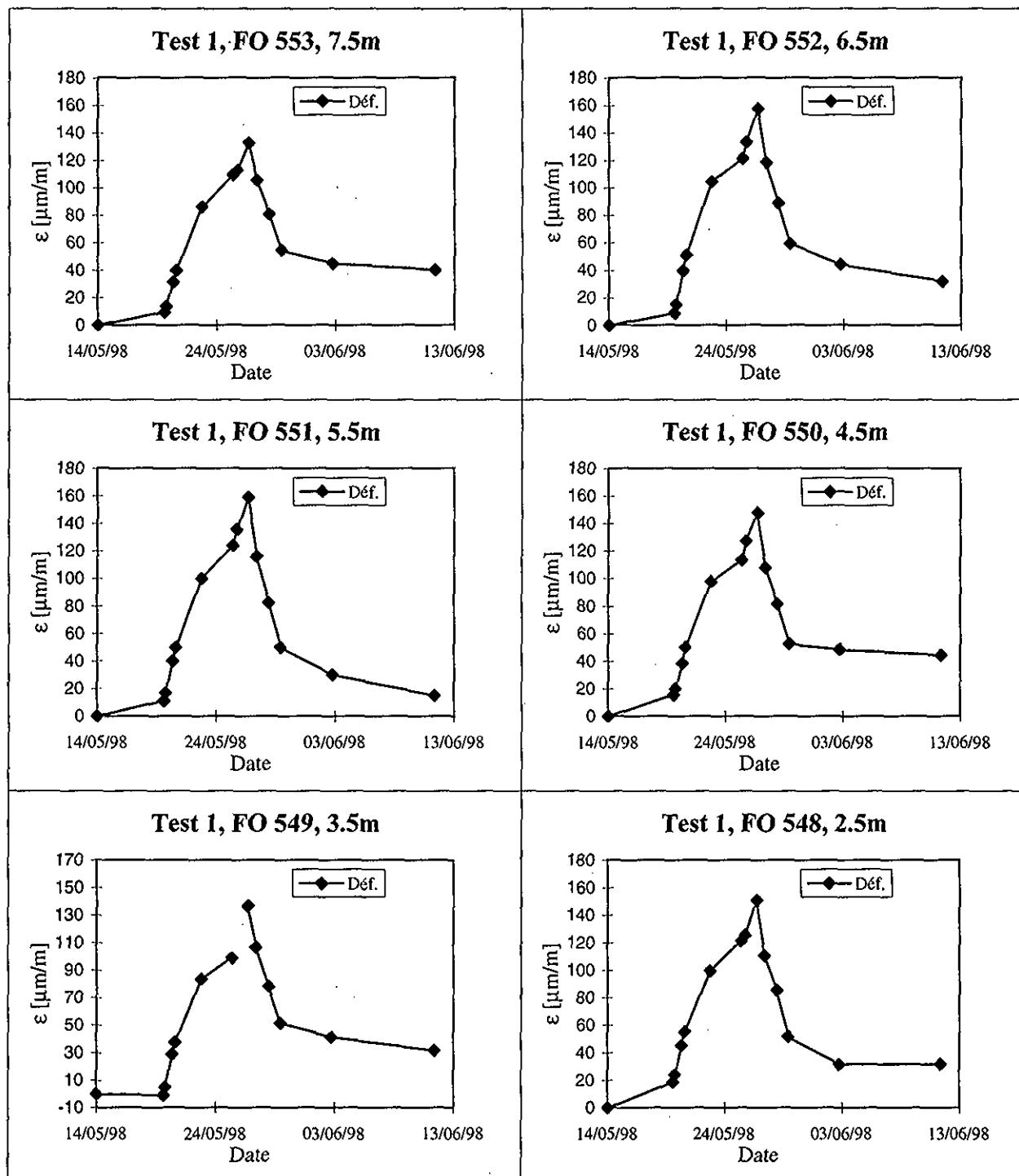
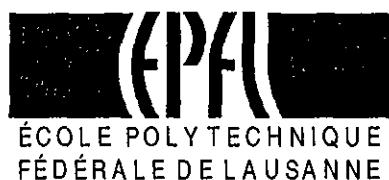
Capteurs à fibres optique



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

Pieu thermique - SY40  
TEST 1

Capteurs à fibres optique



## **ANNEXE 2**

## **TEST 2**

## **ANNEXE 2, TEST 2**

## TEST 2 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A2.1 Etape de construction lors du test 2

Une fois le radier, le mur-colonne et le parapet du rez-de-chaussée bétonnés on a effectué le deuxième test (figure A2.1, zone grise). Le poids propre de ces deux parties est très faible, donc la charge appliquée au pieu est pratiquement nulle (comme pour le test 1). Dans ce cas une certaine rigidité est introduite par le radier et le parapet qui bloquent partiellement le déplacement vers le haut quand le pieu est chauffé. Ceci constitue la principale différence avec le test 1.

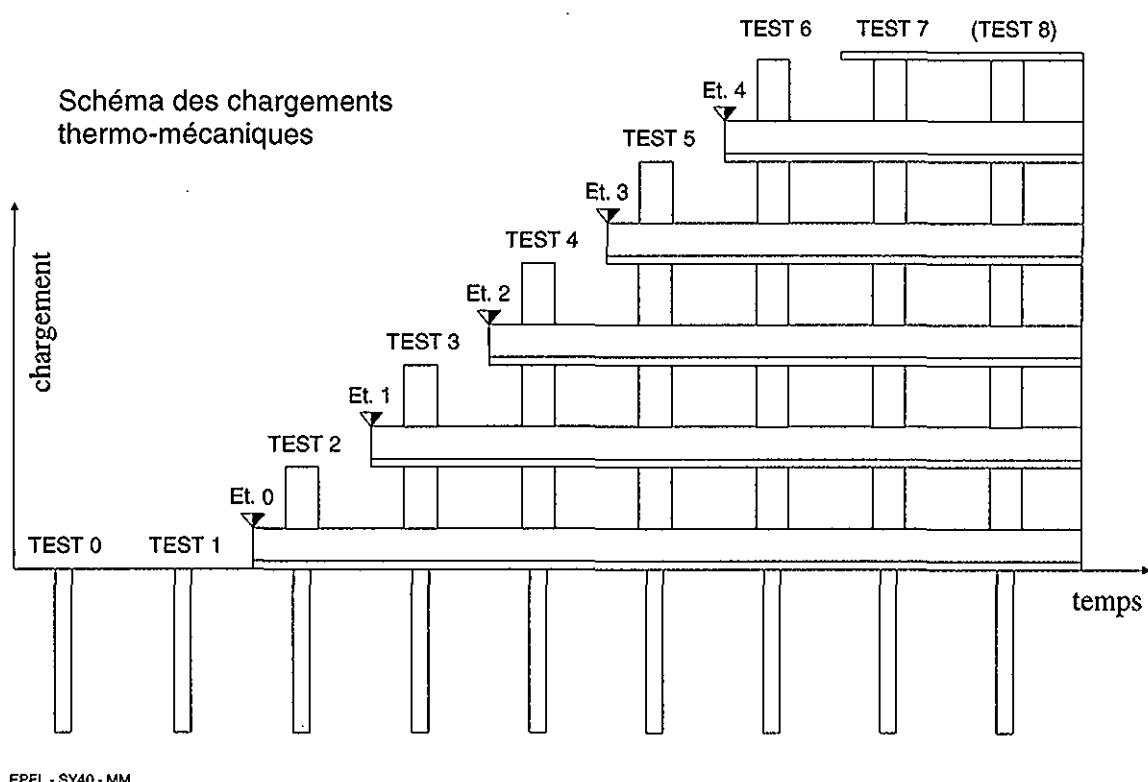


Figure A2.1 :Etape de construction lors du test 2.

#### A2.2 Déroulement chronologique du test 2

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. 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 pendant le test 1 en phase de chauffage. 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

## ANNEXE 2, TEST 2

autour des tubes en plastique qui contiennent le fluide caloporteur, ce qui accentue fortement l'hétérogénéité des températures à l'intérieur du pieu.

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	Chaudage
Lundi 3 août 98 08:12	Chaudage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Lundi 3 août 98 12:16	Chaudage rétabli à 6 kW	Chaudage
Lundi 3 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mardi 4 août 98 08:49	Chaudage arrêté	Refroidissement passif
Mardi 4 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 5 août 98 10:45	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 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 chaudage)	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 A2.1 : Déroulement chronologique du test 2.

### A2.3 Mesures thermiques relatives au test 2

Les mesures relatives au module de chauffage sont toujours effectuées par relevés manuels. 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 A2.2. 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.

## ANNEXE 2, TEST 2

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

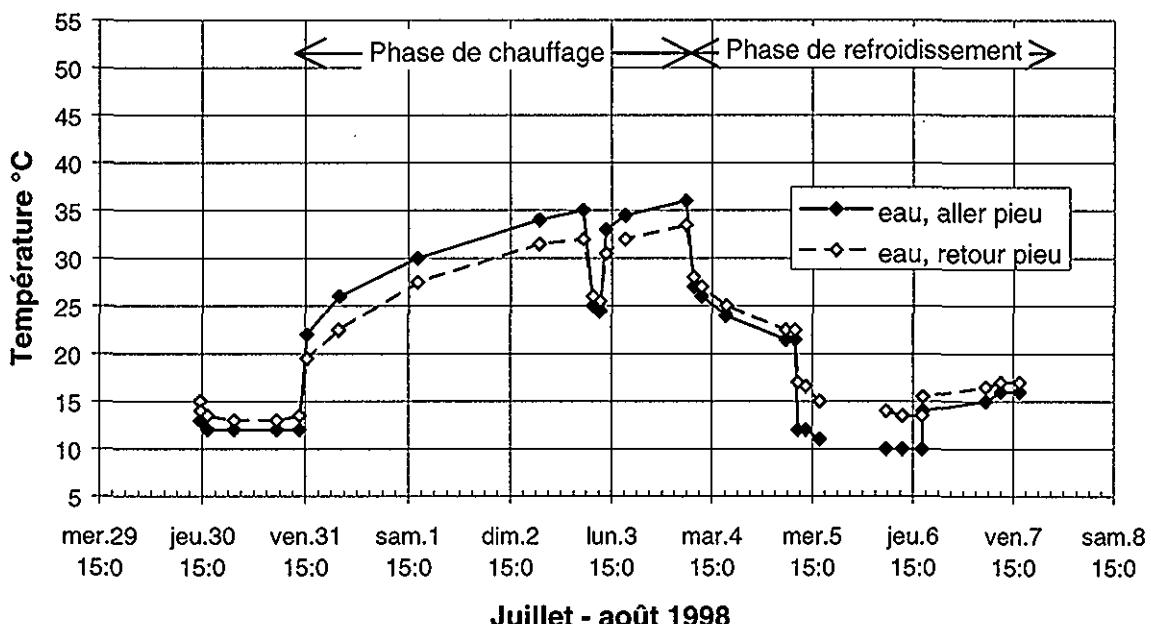


Figure A2.2 : Evolution des températures de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour) lors du test 2.

L'évolution des températures en fonction de la profondeur pendant le test 2 sont montrés sur les figures A2.3 et A2.4. Pour rappel (voir ANNEXE 7) 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 conformément à ce qui a été convenu par le bureau Passera Pedretti, ingénieur civil responsable du bâtiment.

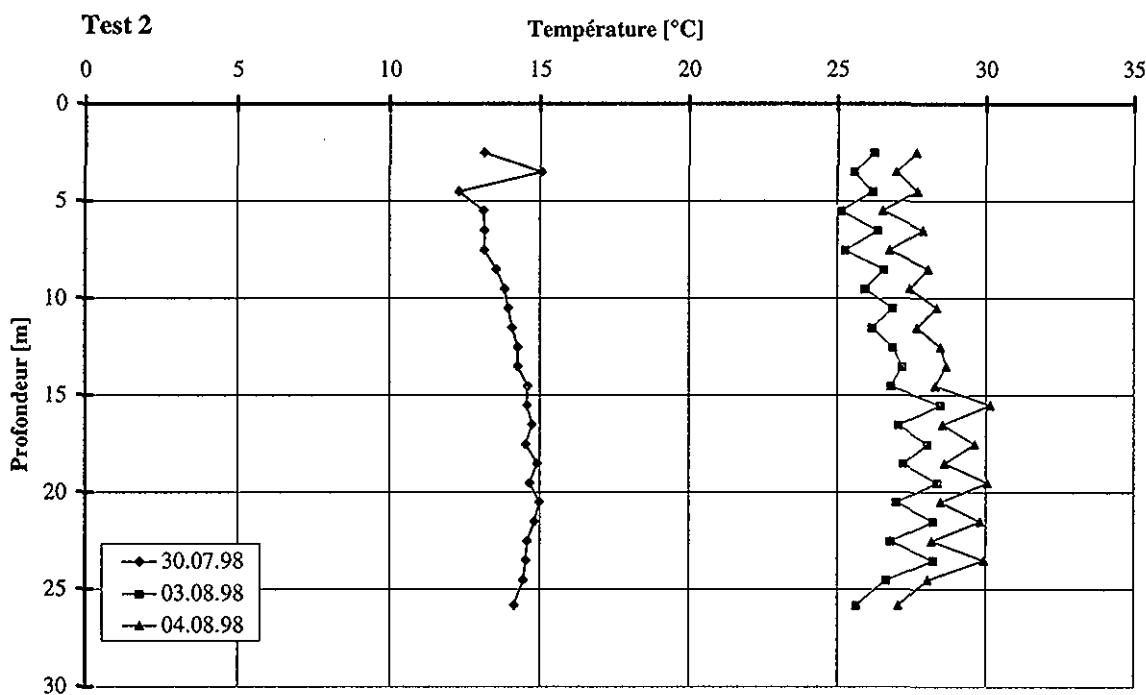


Figure A2.3 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage. Test 2.

## ANNEXE 2, TEST 2

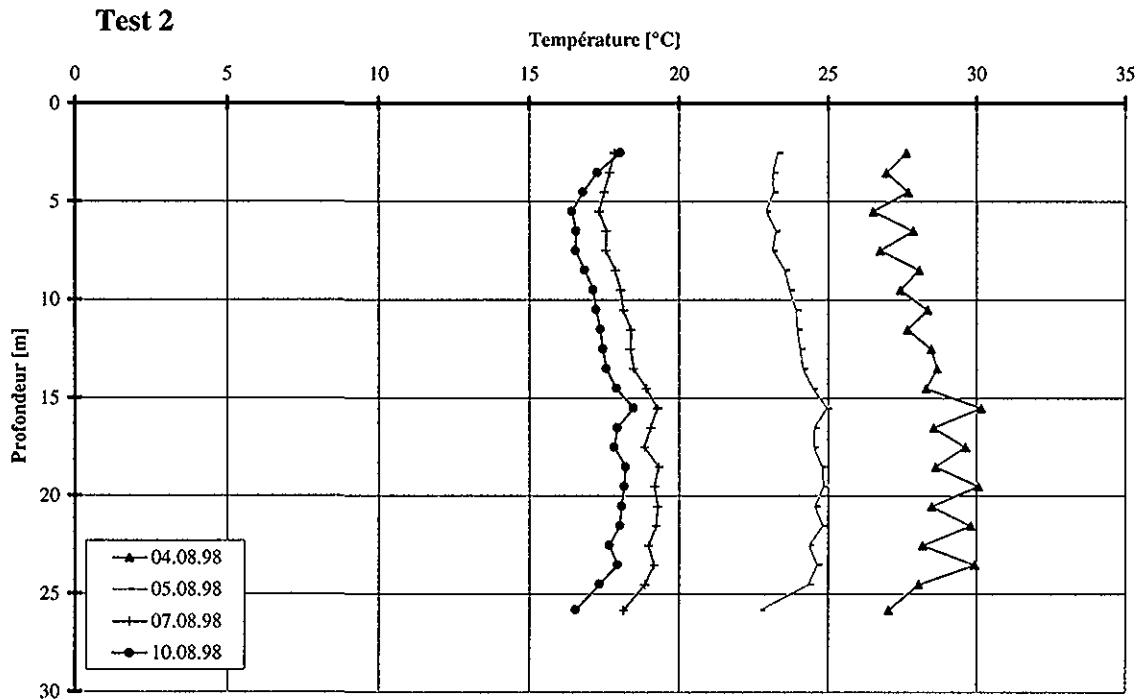


Figure A2.4 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 2.

### A2.4 Mesures mécaniques relatives au test 2

Tous les capteurs (TELEMAC, FO) continuent à bien fonctionner 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 donnent des valeurs pas exploitable.

Les figures A2.5 et A2.6 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

On note bien que pour une augmentations de la température une déformation positive (donc allongement) est mesurée par tous les capteurs.

## ANNEXE 2, TEST 2

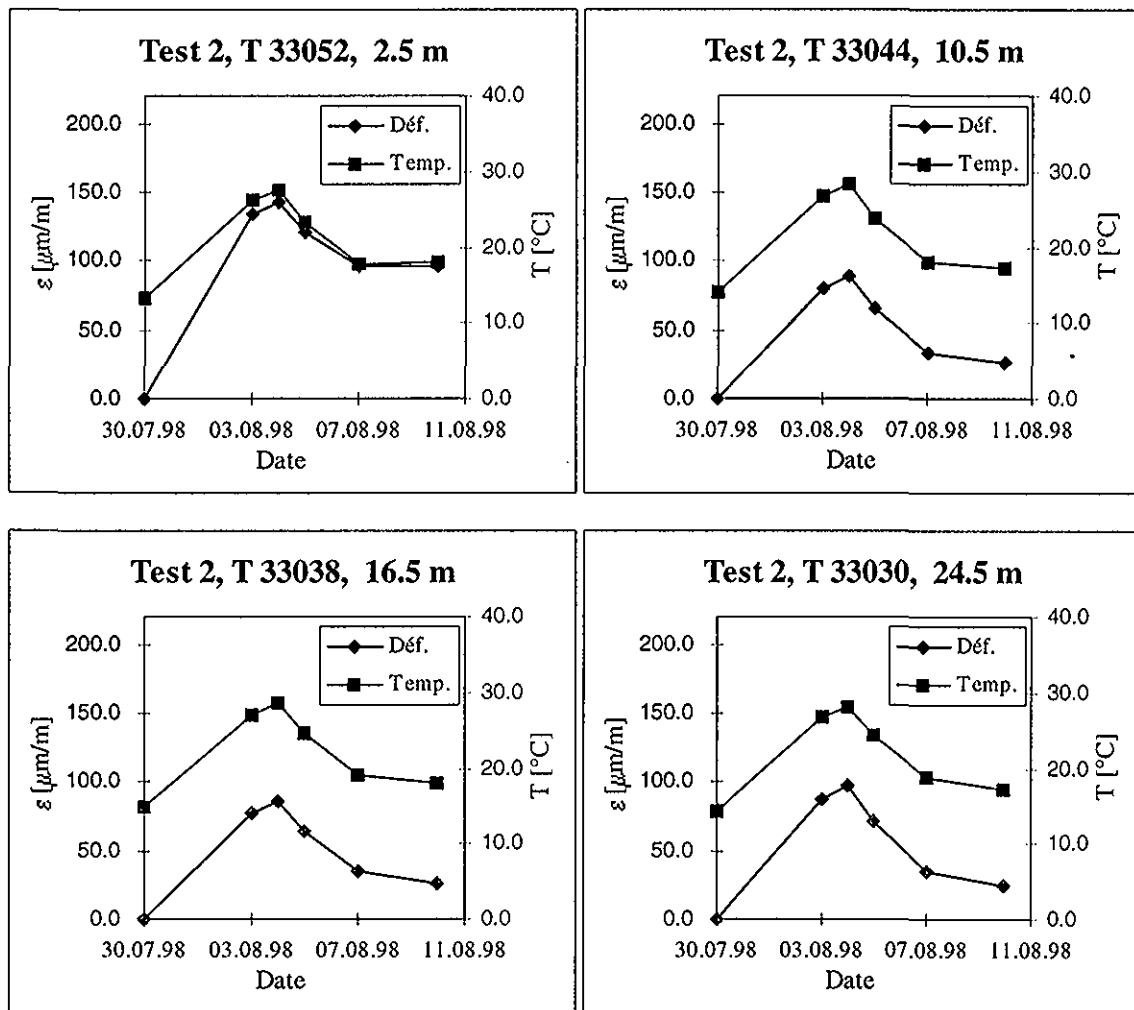


Figure A2.5 : Déformation et température en fonction du temps mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés au profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 2.

## ANNEXE 2, TEST 2

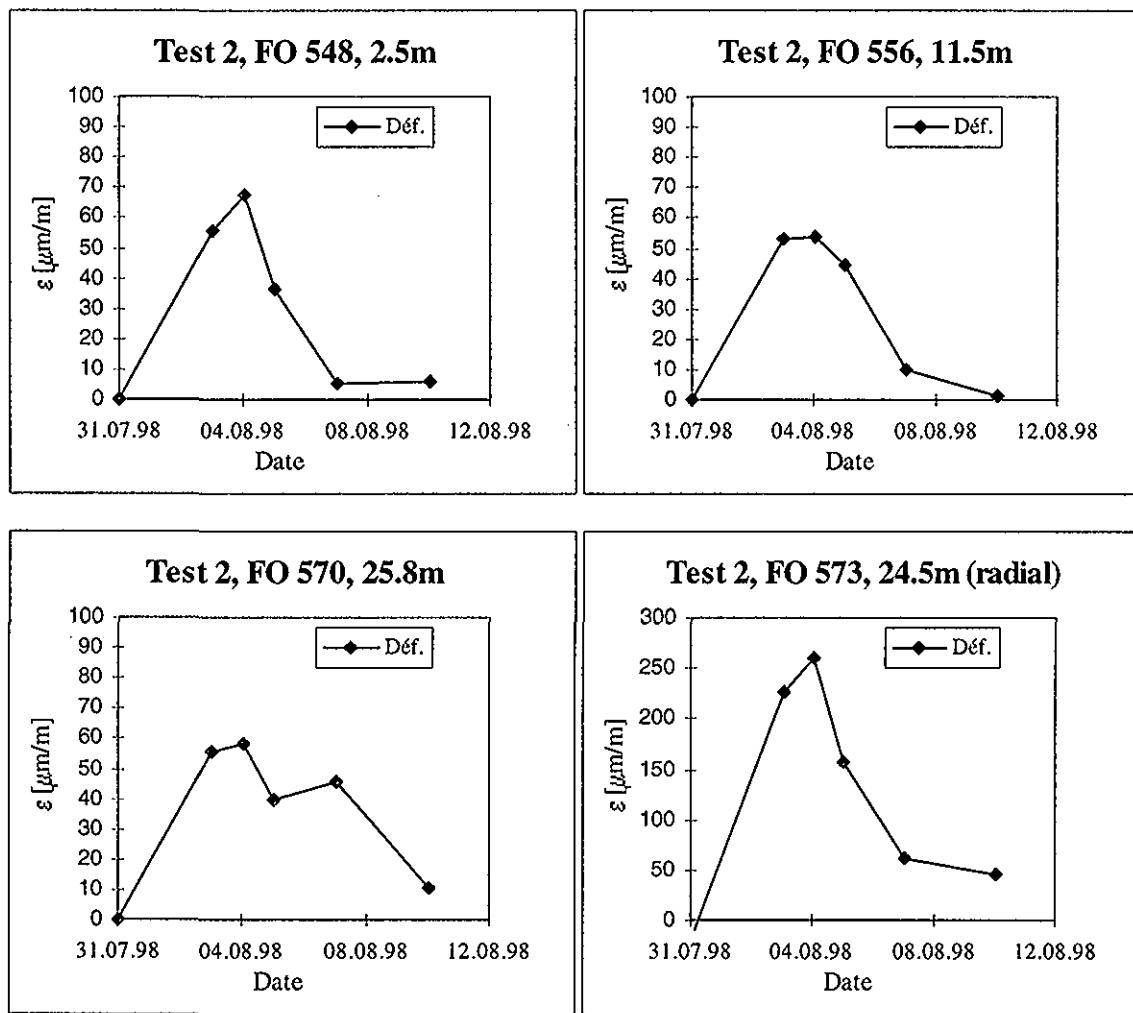


Figure A2.6: Déformations mesurées par fibres optiques (FO548, FO556, FO570, FO573).  
Test 2.

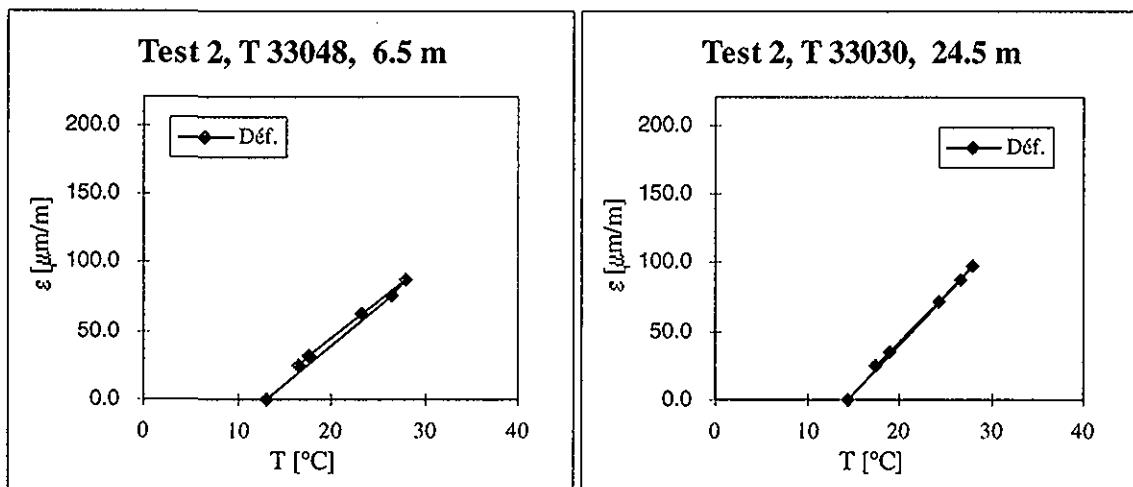


Figure A2.7 : Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 2.

## ANNEXE 2, TEST 2

En outre, on constate que la valeur de la déformation après refroidissement (dernière mesure) ne revient pas à la 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 refroidit complètement.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure A2.7 où la déformation est dessinée en fonction de la température. La valeur moyenne du coefficient  $n\beta$  (défini dans l'ANNEXE 1) est de  $6.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  avec un écart-type de  $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Dans le cas du test 2 le déplacement du pieu est partiellement empêché par le radier (pieu plus hyperstatique donc  $n$  diminué), pour cette raison la valeur de  $n\beta$  diminue par rapport au test 1.

Cet empêchement engendrée dans le pieu une force de compression supplémentaires. Une analyse quantitative des forces de compression supplémentaires sera réalisée dans la phase 2 du projet.

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure pratiquement aucune variation de pression au cours du test 2 comme le montre la figure A2.8. La valeur du 30/7/98 est sûrement due à une erreur de mesure.

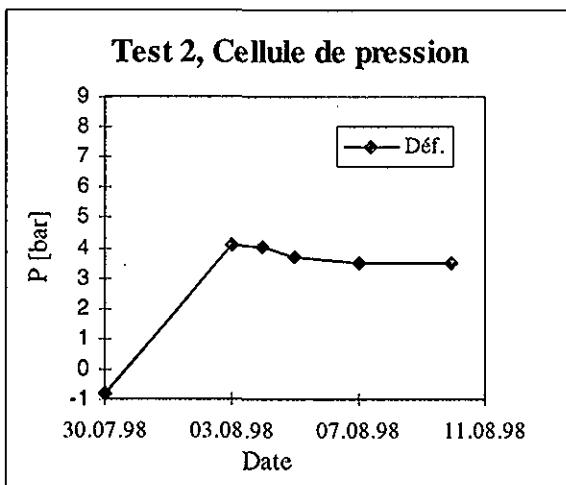


Figure A2.8 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test 2.

La totalité des mesures effectuées au cours du test 2 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

### A2.4 Conclusion

Pendant le deuxième test, le pieu est soumis à une sollicitation thermique ( $\Delta T=14^\circ\text{C}$ ). Dans ce cas une certaine rigidité est introduite par le radier et le parapet qui bloquent partiellement le déplacement vers le haut quand le pieu est chauffé. Le test s'est déroulé sans aucun problème, la phase de chauffage a duré 5 jours et le suivi de la phase de refroidissement 3 jours.

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.

Les températures mesurées par les capteurs TELEMAC sont corrigées de  $5.1^\circ\text{C}$ . Les capteurs TELEMAC et les fibres optiques ont un taux de fonctionnement d'environ 95% et ils

## **ANNEXE 2, TEST 2**

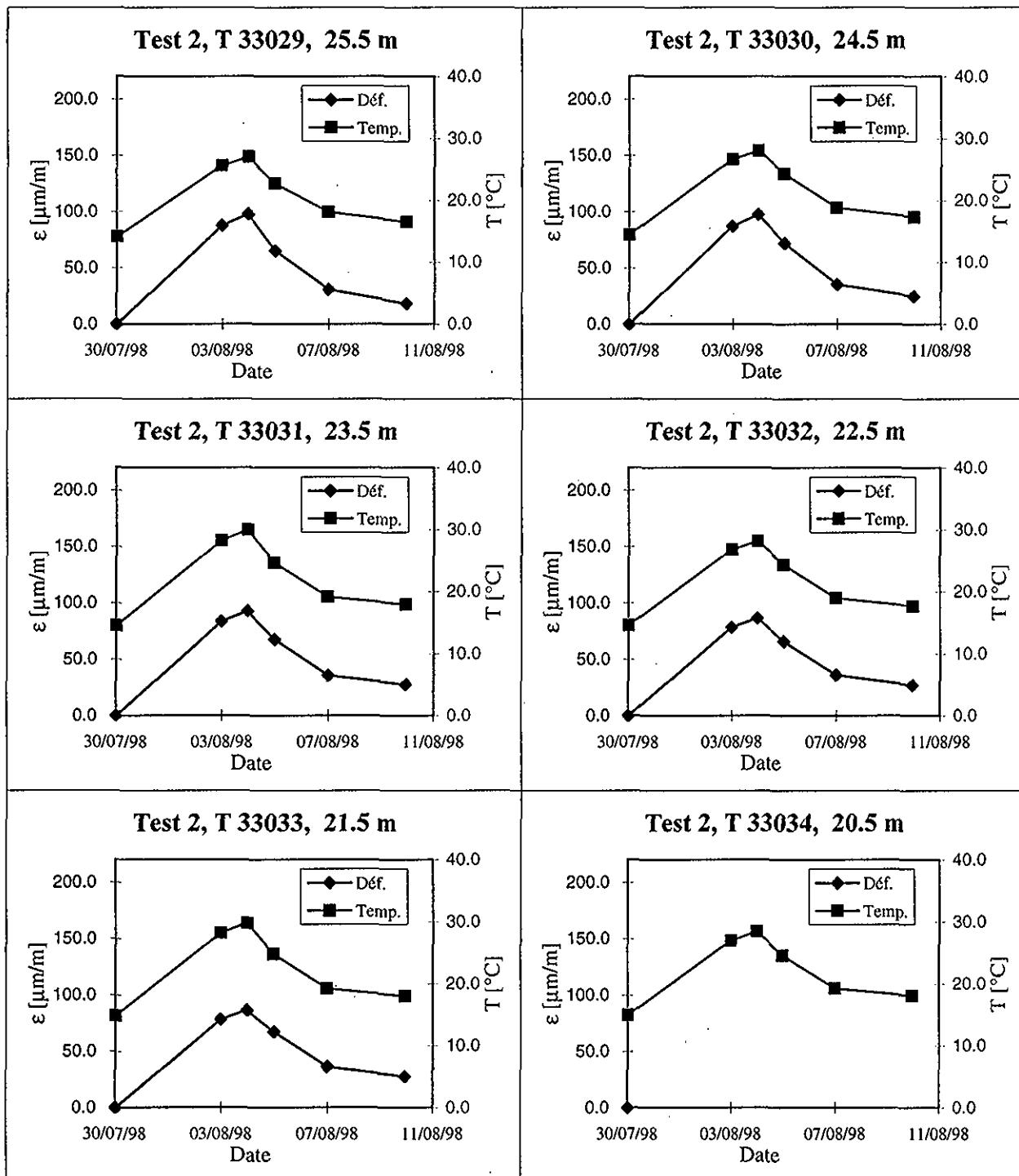
montrent une dilatation du pieu en phase de chauffage et une rétraction en phase de refroidissement. Le comportement est réversible avec un coefficient  $n\beta$  de  $6.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure aucune variation de pression.

Une force de compression supplémentaires est engendrée dans le pieu du fait de l'empêchement d'une partie du déplacement vers le haut.

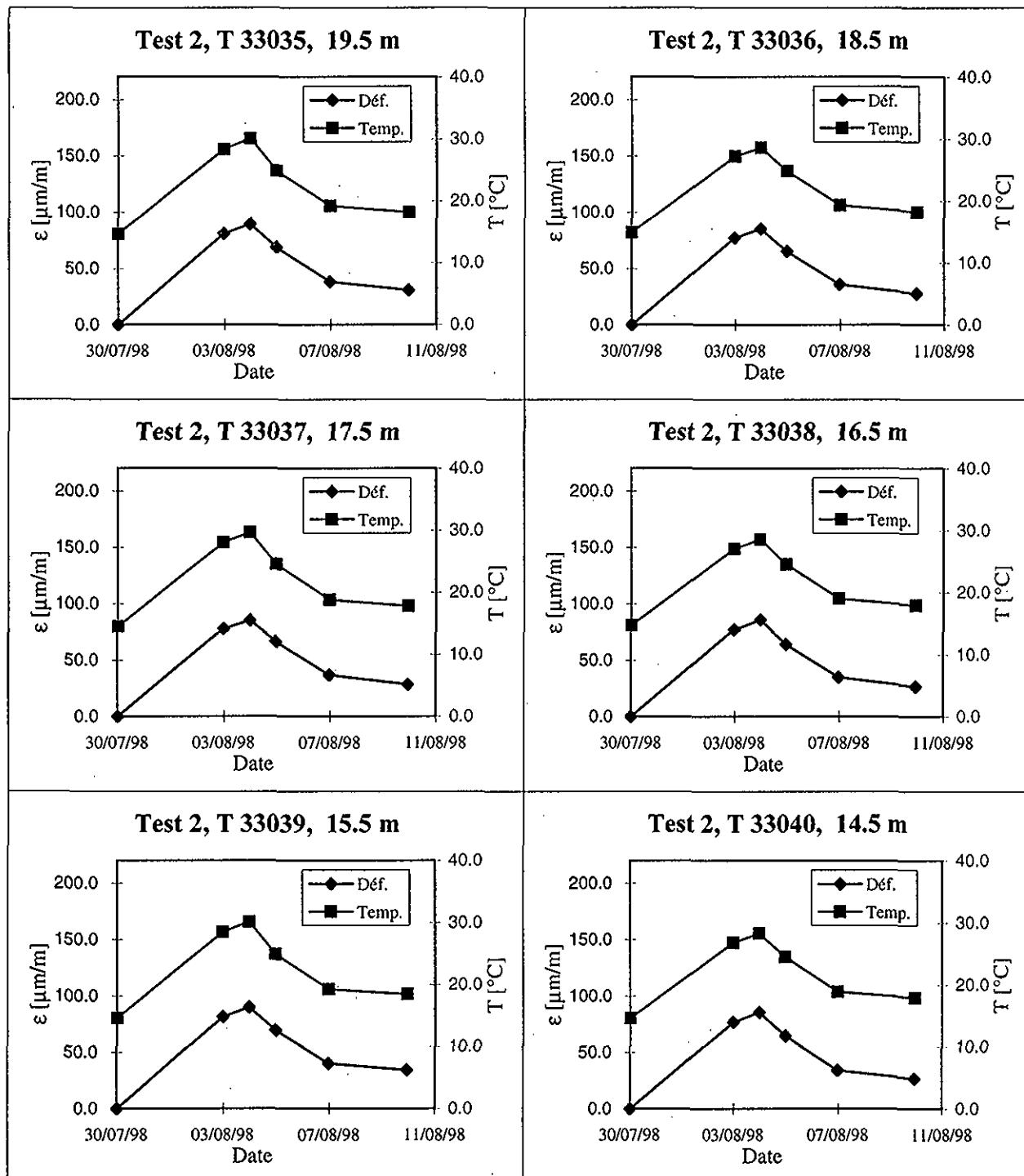
Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



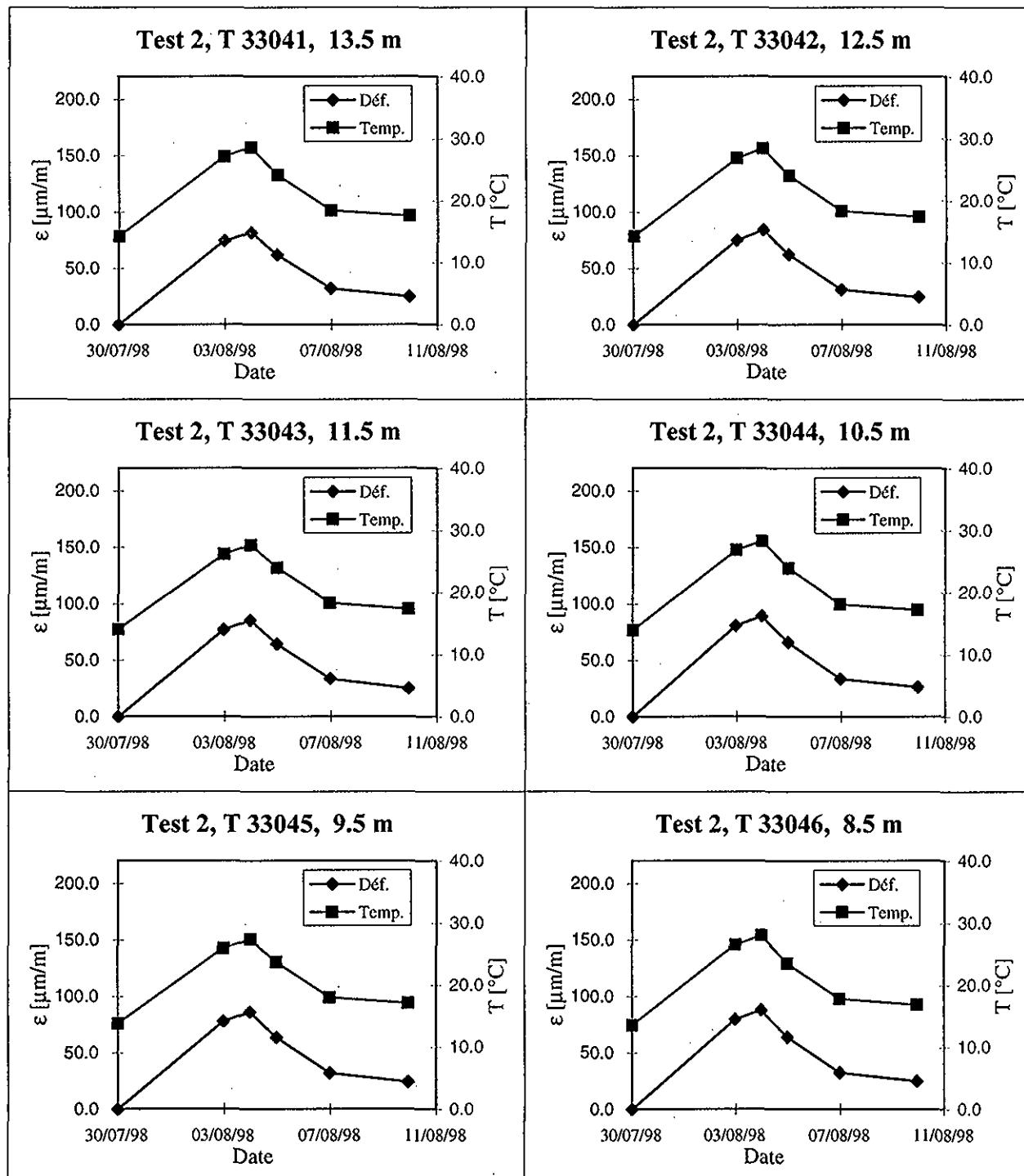
Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



## TEST2

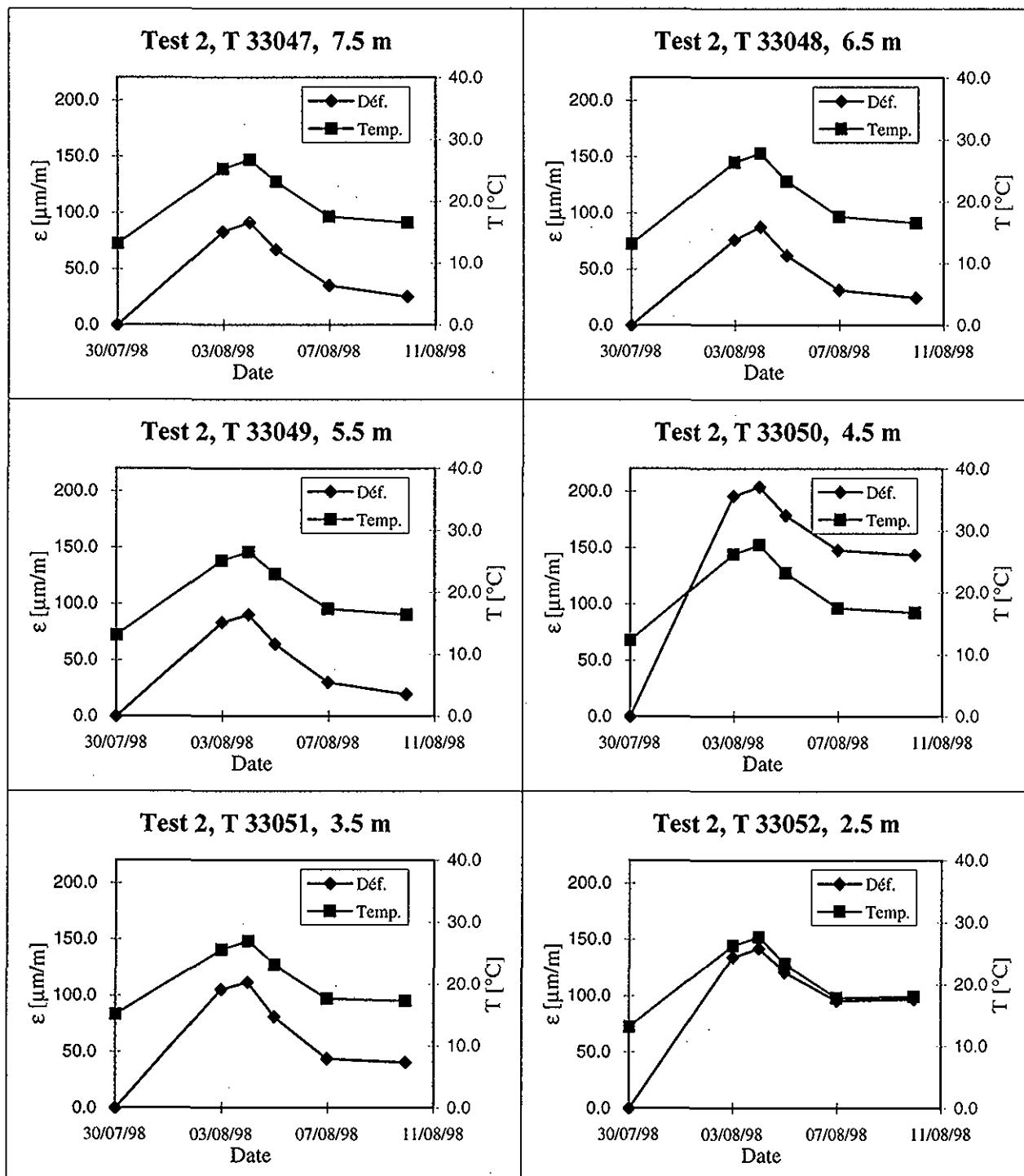
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
 ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS  
 Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

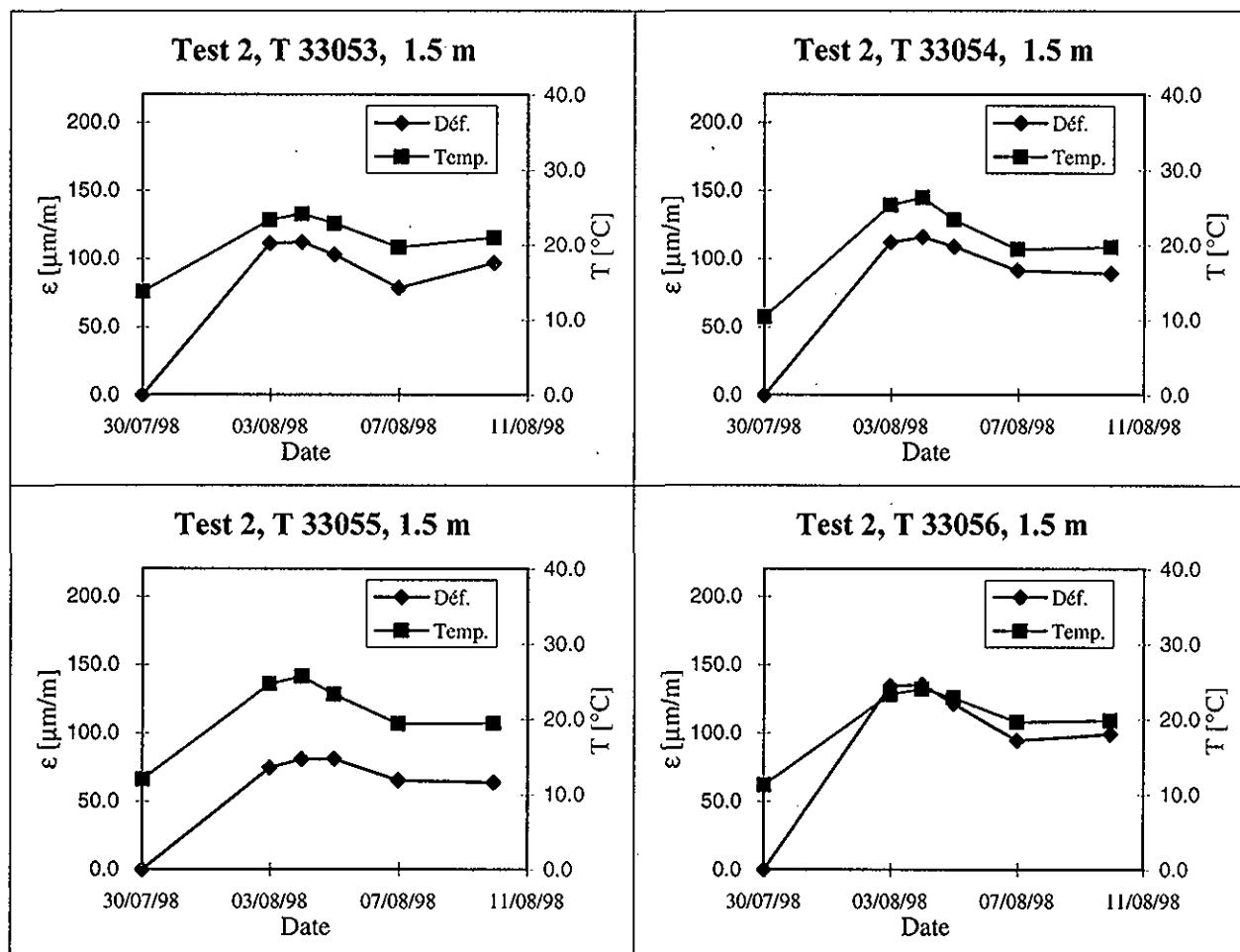
Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



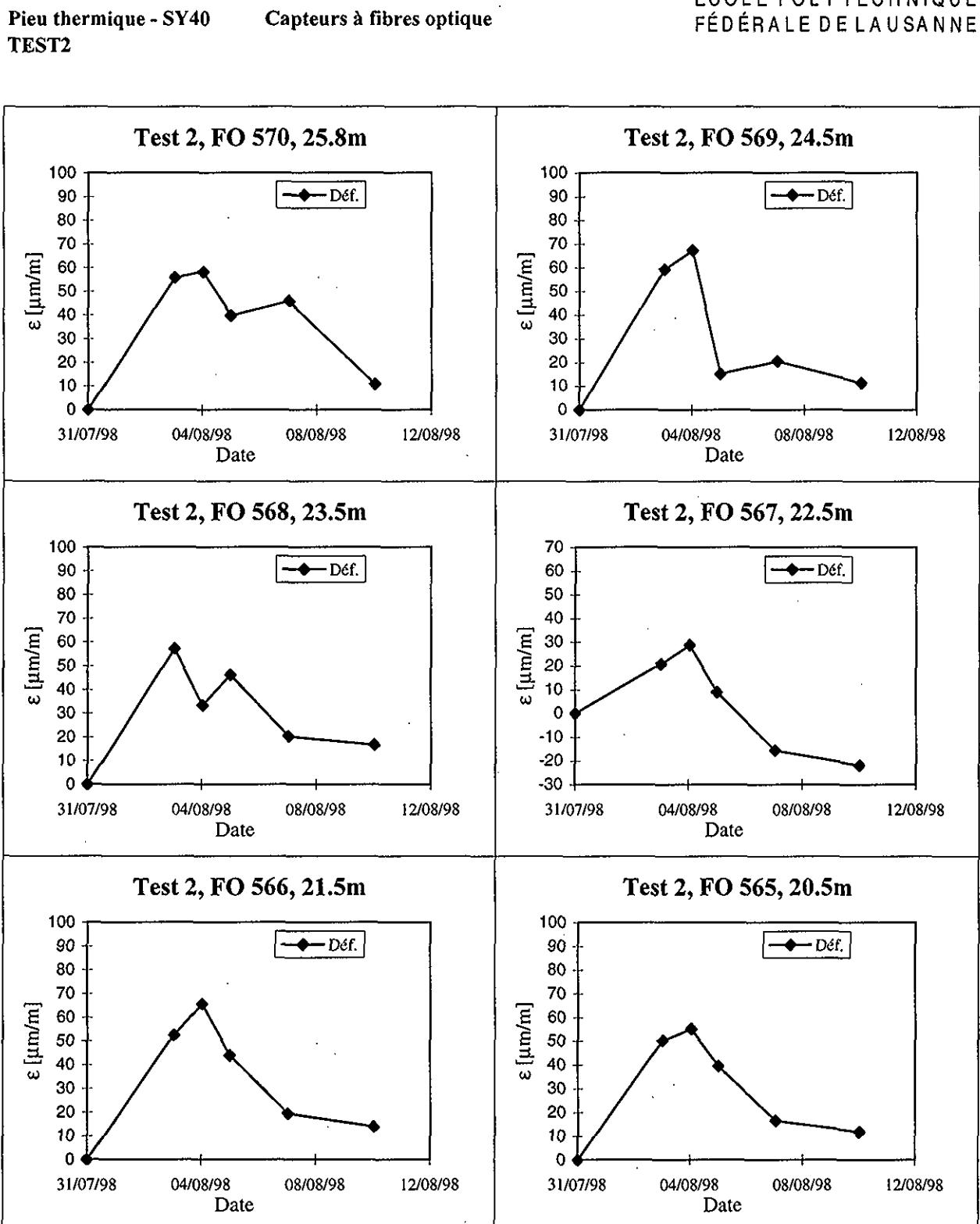
Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



Pieu thermique - SY40  
 TEST2

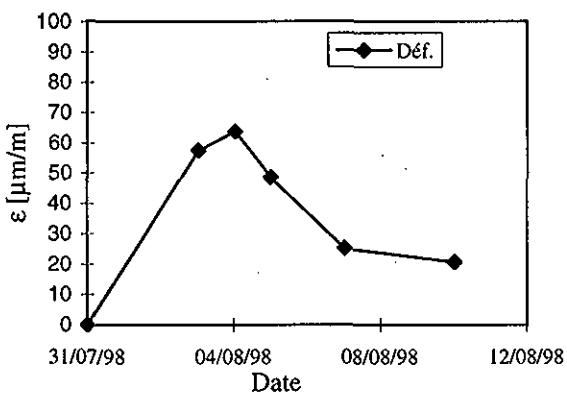
Capteurs à fibres optique



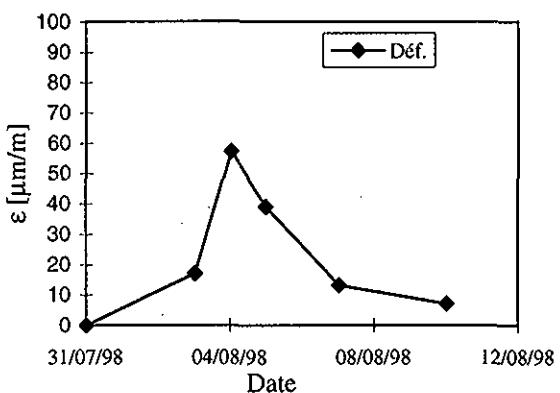
Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs à fibres optique

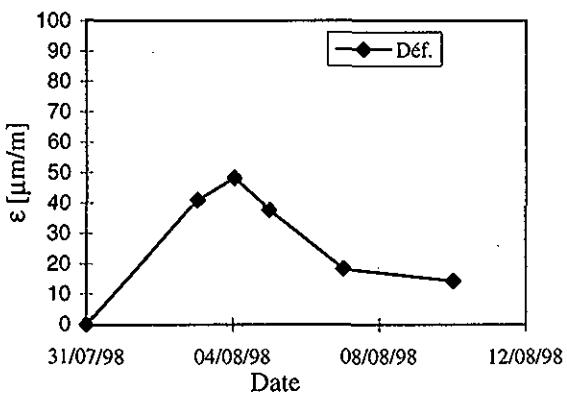
Test 2, FO 564, 19.5m



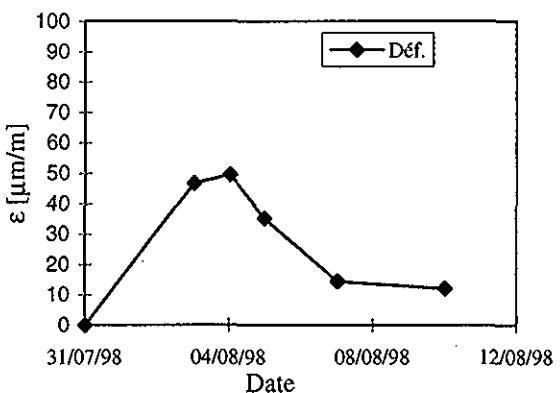
Test 2, FO 563, 18.5m



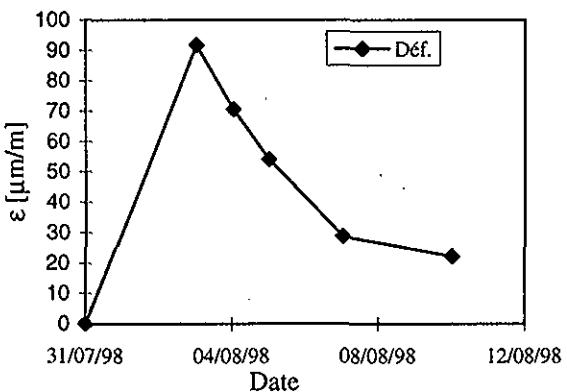
Test 2, FO 562, 17.5m



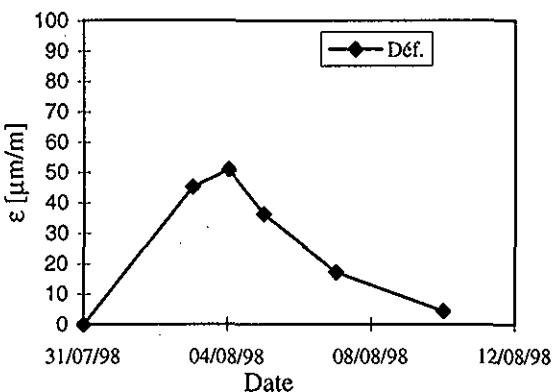
Test 2, FO 561, 16.5m



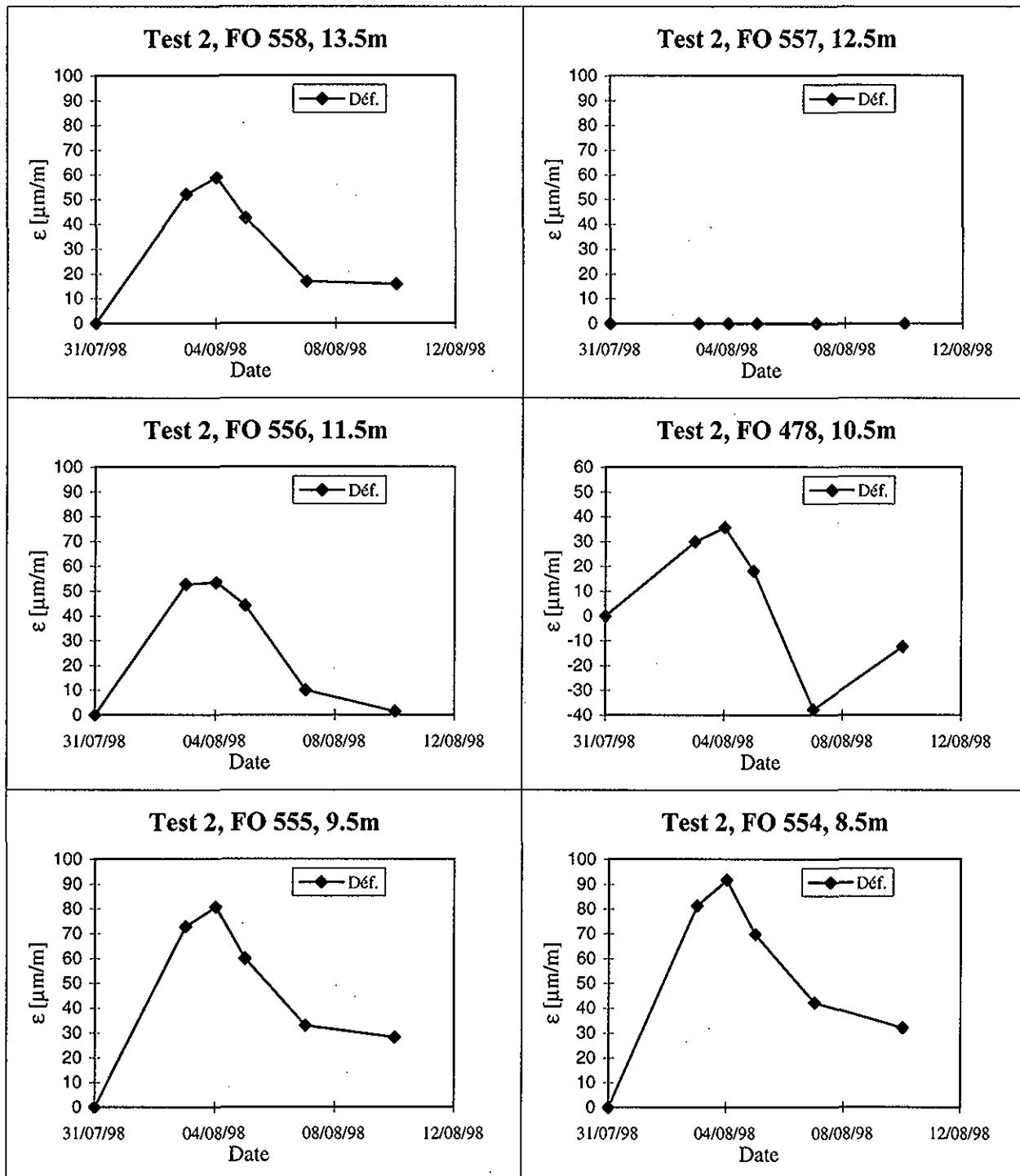
Test 2, FO 560, 15.5m



Test 2, FO 559, 14.5m

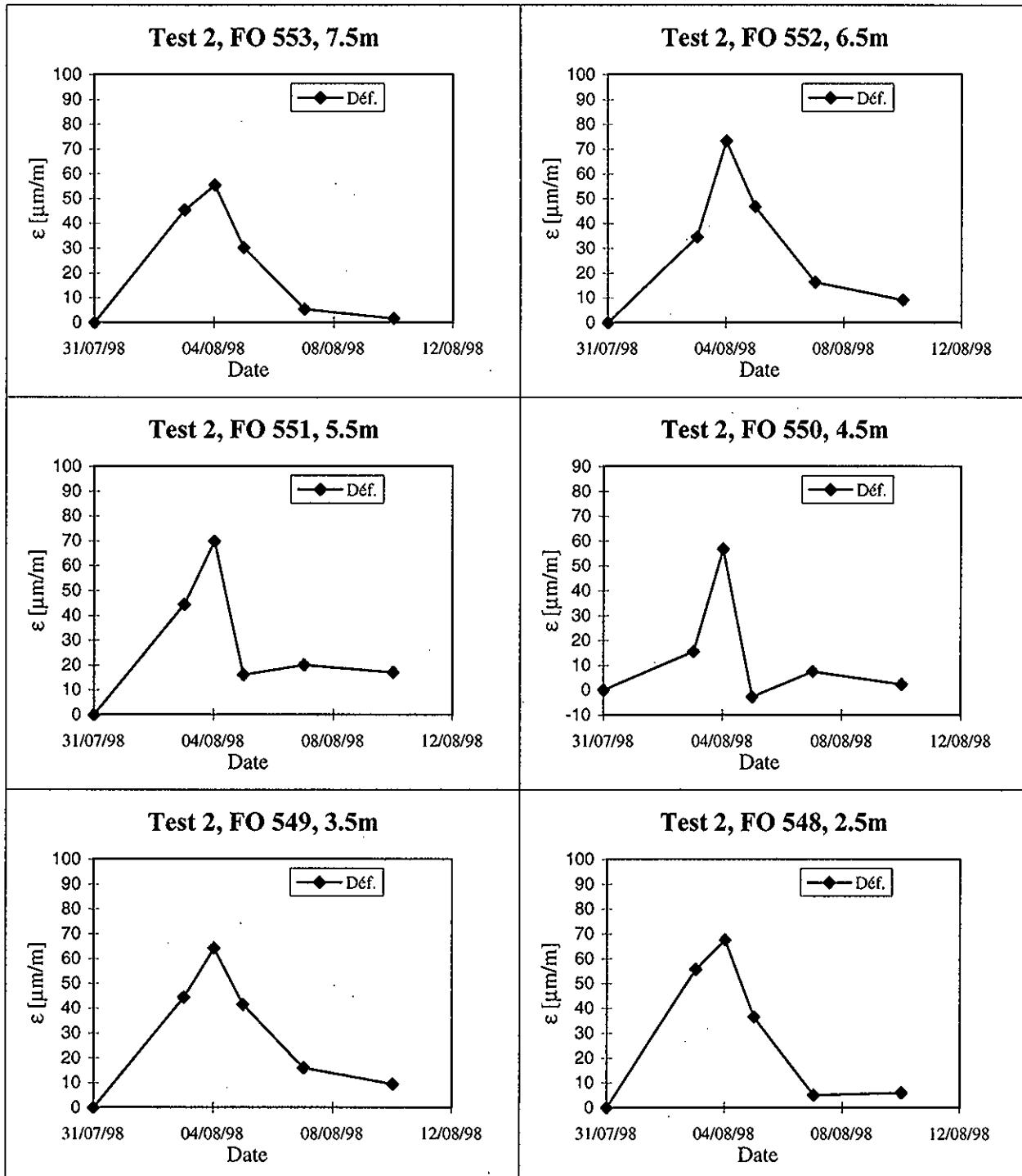


Pieu thermique - SY40      Capteurs à fibres optique  
 TEST2



Pieu thermique - SY40  
 TEST2

Capteurs à fibres optique



# **ANNEXE 3**

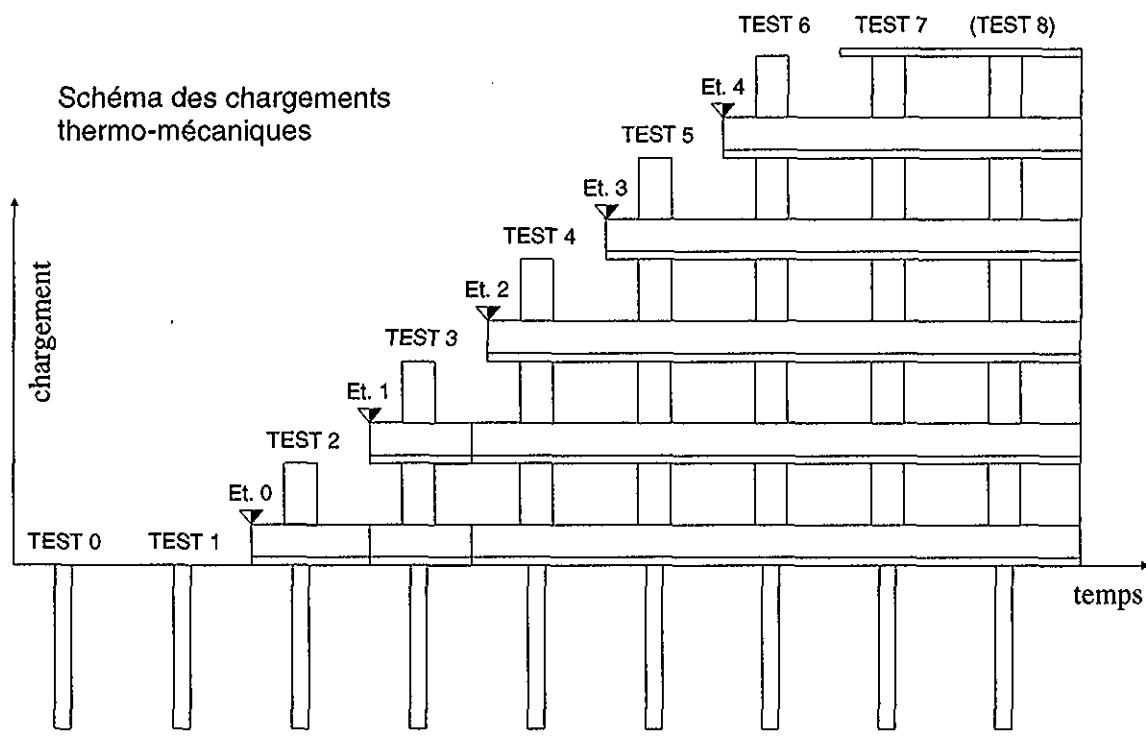
## **TEST 3**

## ANNEXE 3, TEST 3

### TEST 3 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A3.1 Etape 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 A3.1, zone grise).



EPFL - SY40 - MM

Figure A3.1 : Etape de construction lors du test 3.

#### A3.2 Déroulement chronologique du test 3

Le déroulement du test est résumé dans la table A3.1. La phase de chauffage a duré 4 jours et la phase de refroidissement a été suivie pendant 7 jours.

### ANNEXE 3, TEST 3

Date	Evénement	Etat de fonctionnement
Vendr. 14 août 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Mercr. 26 août 98 15:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Mercr. 2 sept. 98 17:40	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Jeudi 3 sept. 98 12:00	Enclenchement pompe de circulation	
Jeudi 3 sept. 98 18:05	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chaussage
Vendr. 4 sept. 98 17:45	Chaussage arrêté pour la mesure des capteurs dans le pieu	Refroidissement passif
Vendr. 4 sept. 98 18:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 4 sept. 98 21:40	Chaussage rétabli à 6 kW	Chaussage
Lundi 7 sept. 98 08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 7 sept. 98 09:20	Chaussage arrêté	Refroidissement passif
Mardi 8 sept. 98 17:00	Mesures capteurs TELEMAC 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 TELEMAC 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 TELEMAC 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 TELEMAC et fibres optiques	

Table A3.1 : Déroulement chronologique du test 3.

## ANNEXE 3, TEST 3

### A3.3 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 l'aller et 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 A3.2, 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 A3.3, 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 table A3.2, 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 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

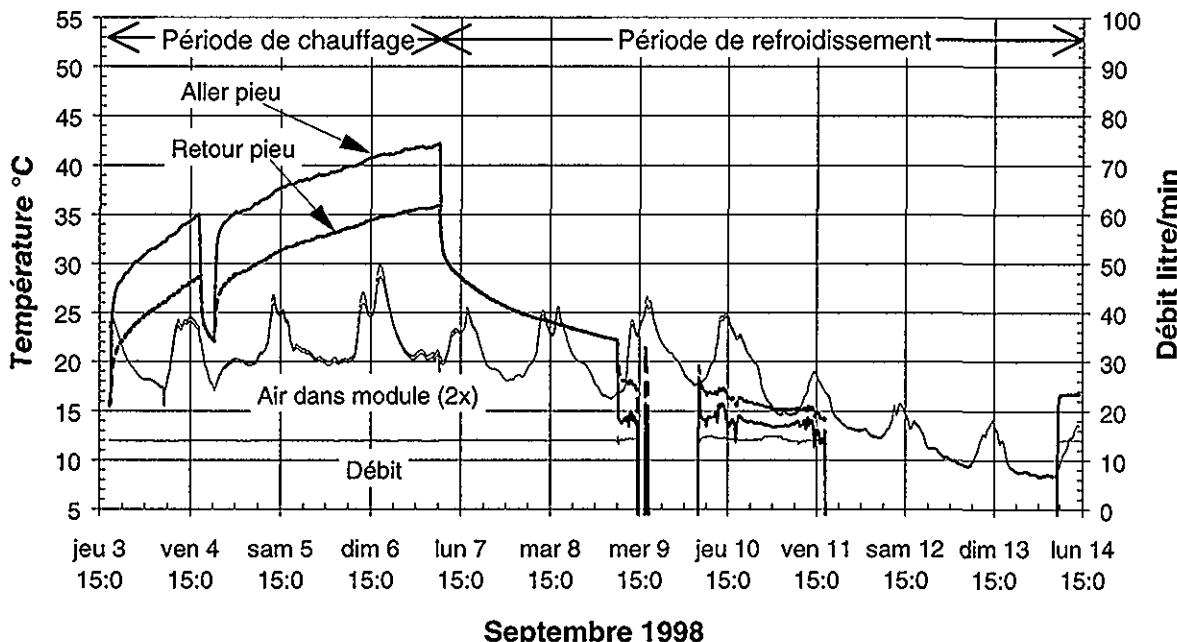
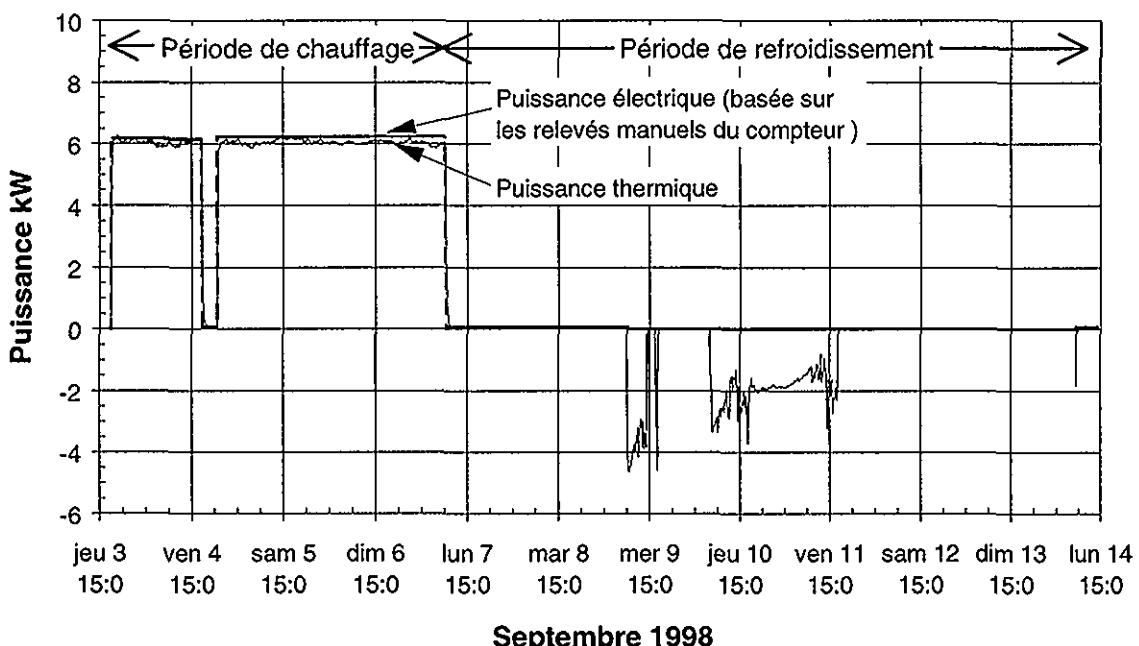


Figure A3.2 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du test n° 3.

## ANNEXE 3, TEST 3

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



Septembre 1998

Figure A3.3 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du test n° 3.

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

Table A3.2 Bilan d'énergie relatif au test 3

L'évolution de la température en fonction de la profondeur, mesurée par les capteurs TELEMAC, est montrée dans les graphiques A3.4 et A3.5. Les valeurs moyennes des températures dans le pieu sont comparables à celles de l'eau qui circule dans les tubes en PE après la correction de 5.1°C (ANNEXE 7).

En phase de chauffage (figure A3.4) 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 proche de ces tubes, ils mesurent des températures plus élevées.

### ANNEXE 3, TEST 3

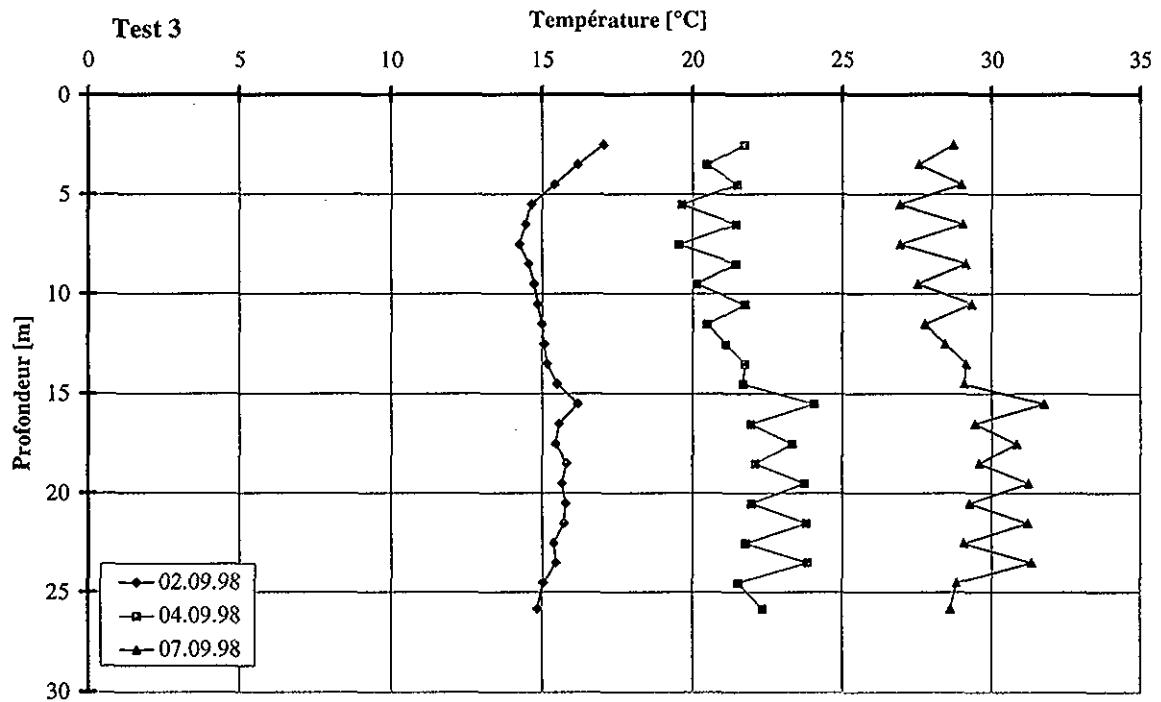


Figure A3.4 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage. Test 3.

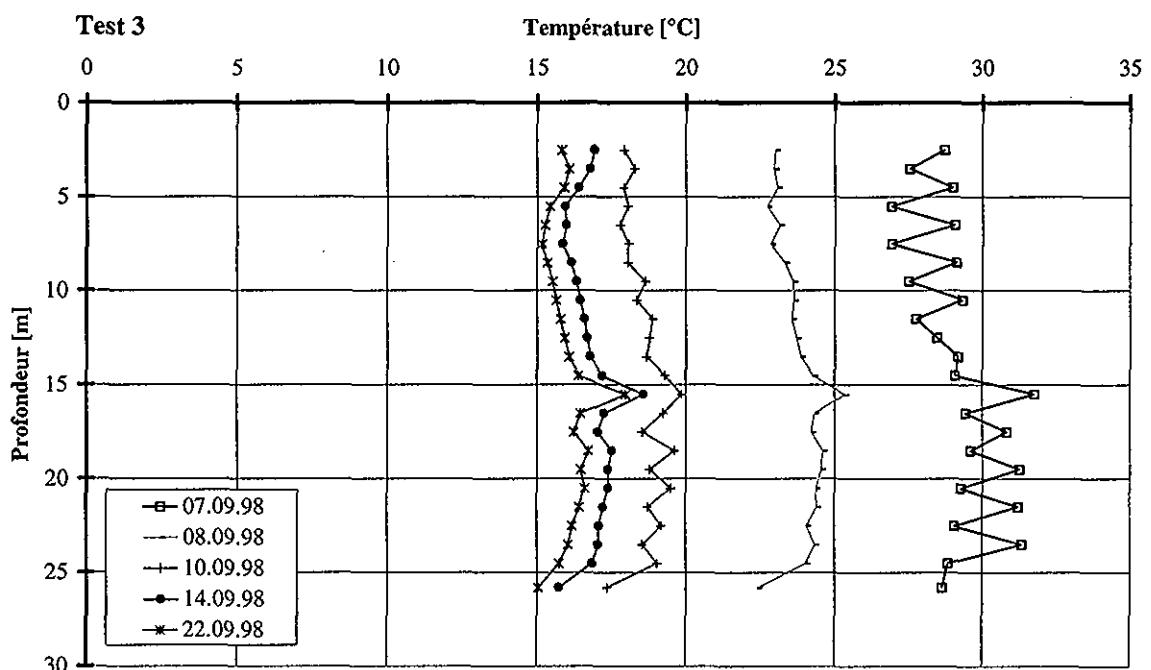


Figure A3.5 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 3.

## ANNEXE 3, TEST 3

### A3.4 Mesures mécaniques relatives au test 3

L'ensemble des capteurs sont toujours opérationnels 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 des 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 A3.6 et A3.7 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les capteurs TELEMAC et les fibres optiques.

On note bien que pour une augmentations de la température une déformation positive (donc un allongement) est mesurée par tous les capteurs.

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 dans le test 3 et 22°C dans le test 1), en plus une partie de la déformation thermique est empêchée par la partie du bâtiment déjà construite.

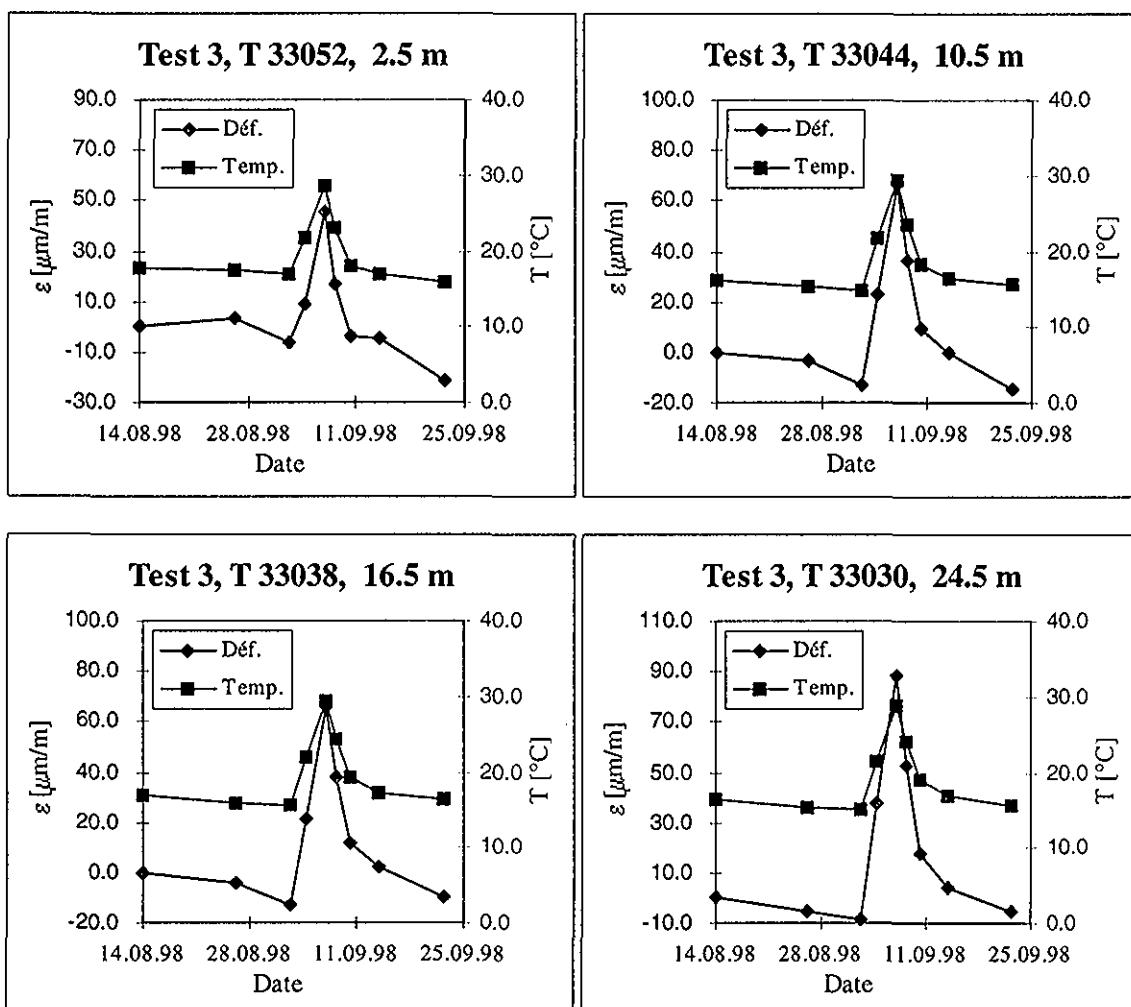


Figure A3.6 : Déplacement et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés au profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 3.

### ANNEXE 3, TEST 3

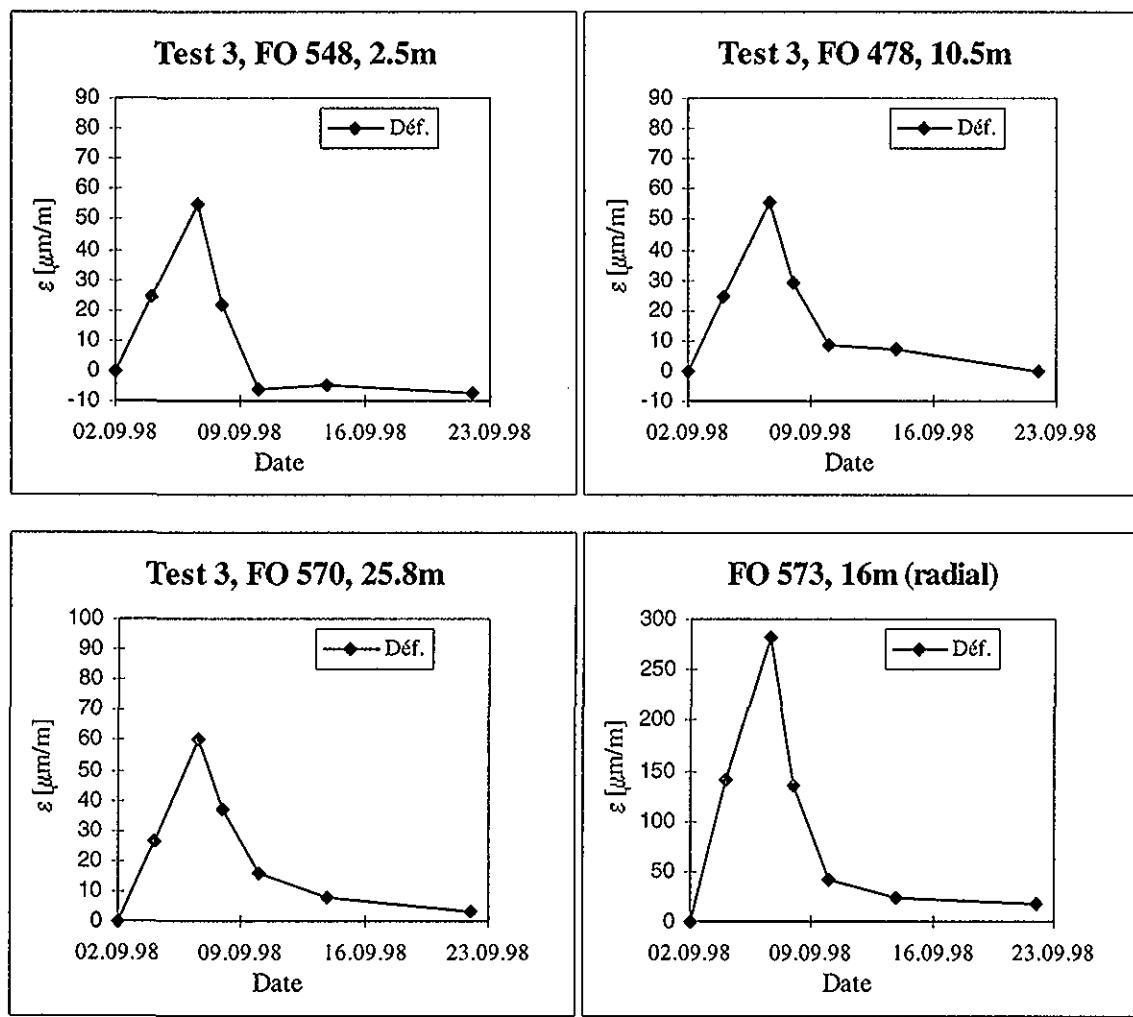


Figure A3.7 : Déplacements mesurés par fibres optiques (FO548, FO478, FO570, FO573).  
Test 3.

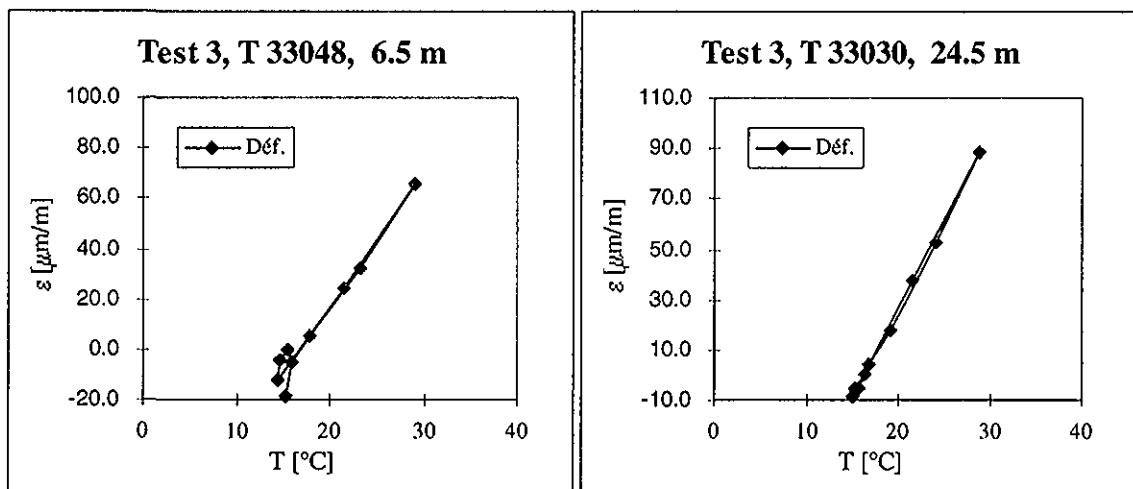


Figure A3.8 : Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 3.

### ANNEXE 3, TEST 3

En outre, on constate que la valeur de la déformation après refroidissement (dernière mesure) ne revient pas à la 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 n'a pas eu le temps de se refroidir complètement.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure A3.8 où la déformation est dessinée en fonction de la température. La construction du premier étage rend le pieu encore plus hyperstatique (il est plus empêché que dans le test 2) pour cette raison la valeur du coefficient  $n\beta$  diminue par rapport au test 2 ( $5.7 \cdot 10^{-6} \pm 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). La force supplémentaire dans le pieu sera plus grande que dans le test 2.

La cellule de pression montre une petite augmentation de la pression au fond du pieu (voir figure A3.9). 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.

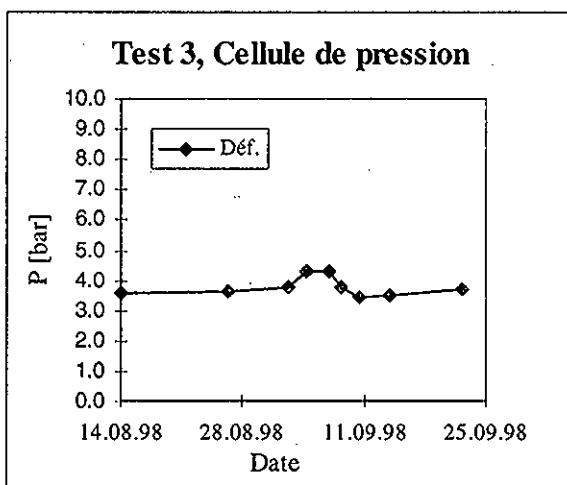


Figure A3.9 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test 3.

La totalité des mesures effectuées au cours du test 3 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

#### A3.4 Conclusion

Pendant le troisième test, 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 4 jours et le suivi de la phase de refroidissement 7 jours.

Les mesures relatives au module de chauffage sont automatisées à l'exception des mesures du compteur électrique. Un datalogger permet de mesurer et d'enregistrer les températures et les débits « aller » et « retour » de l'eau.

Les températures mesurées par les capteurs TELEMAC sont corrigées de  $5.1^\circ\text{C}$ . Les capteurs TELEMAC et les fibres optiques ont un taux de fonctionnement d'environ 95% et ils montrent une dilatation du pieu en phase de chauffage et un rétraction en phase de refroidissement. Le comportement est réversible avec un coefficient  $n\beta$  de  $5.7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (valeur plus basse de celle trouvée dans le test 2, le pieu est donc plus hyperstatique).

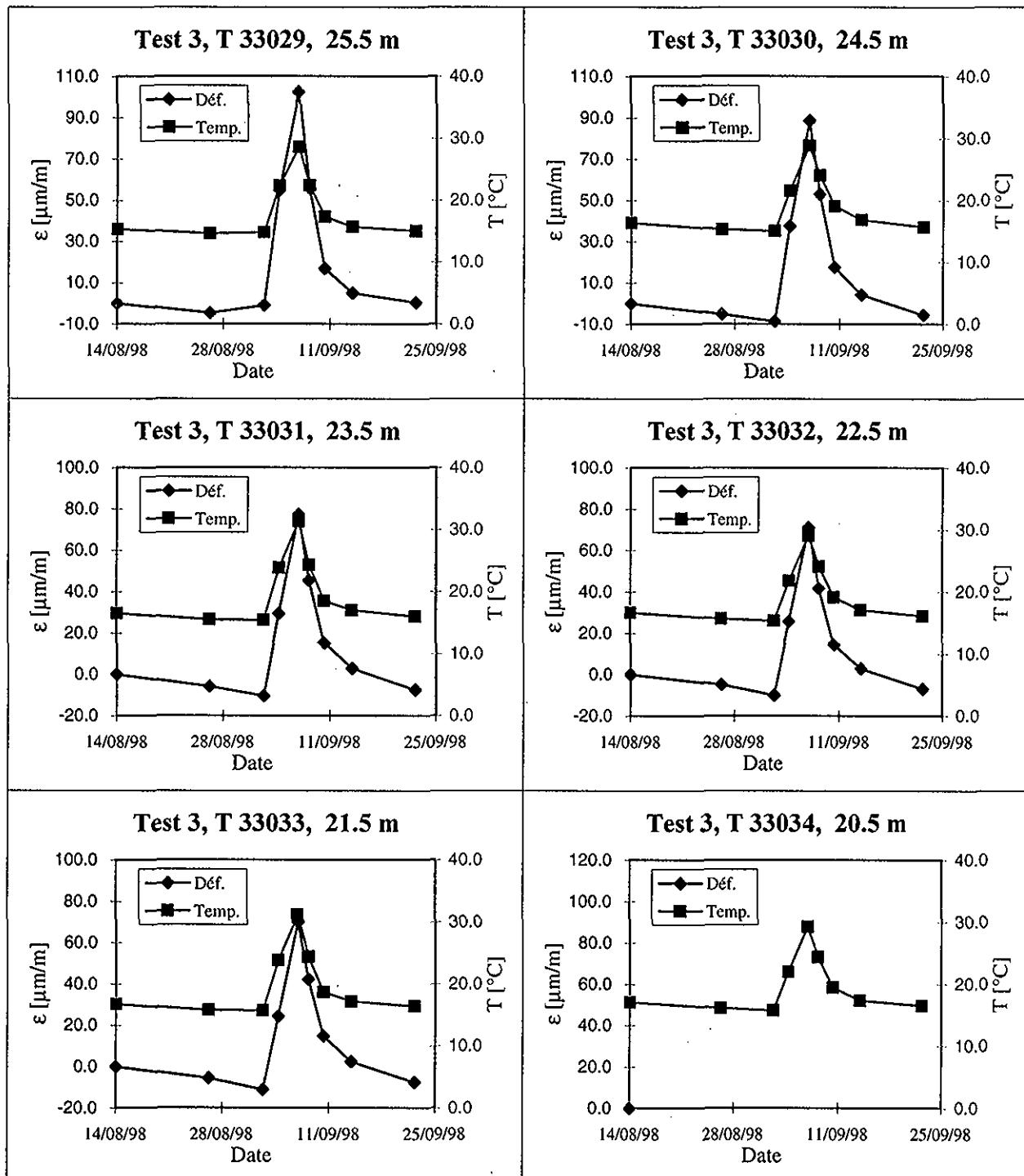
### **ANNEXE 3, TEST 3**

La cellule de pression sous la pointe du pieu ne mesure aucune variation de pression.

La rigidité du bâtiment (le radier et la dalle du premier étage) bloque partiellement la dilatation du pieu et engendre une force supplémentaire de compression.

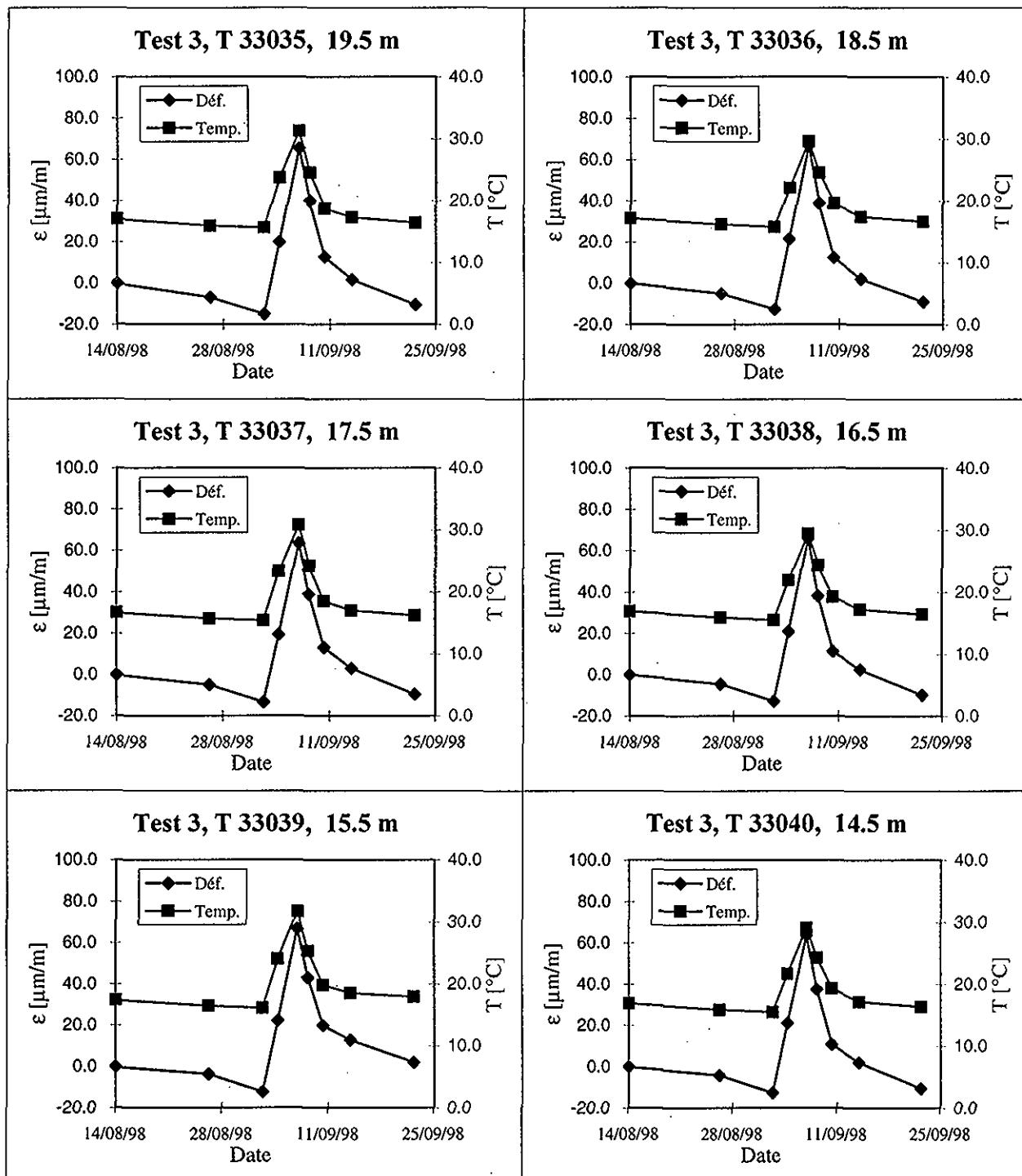
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



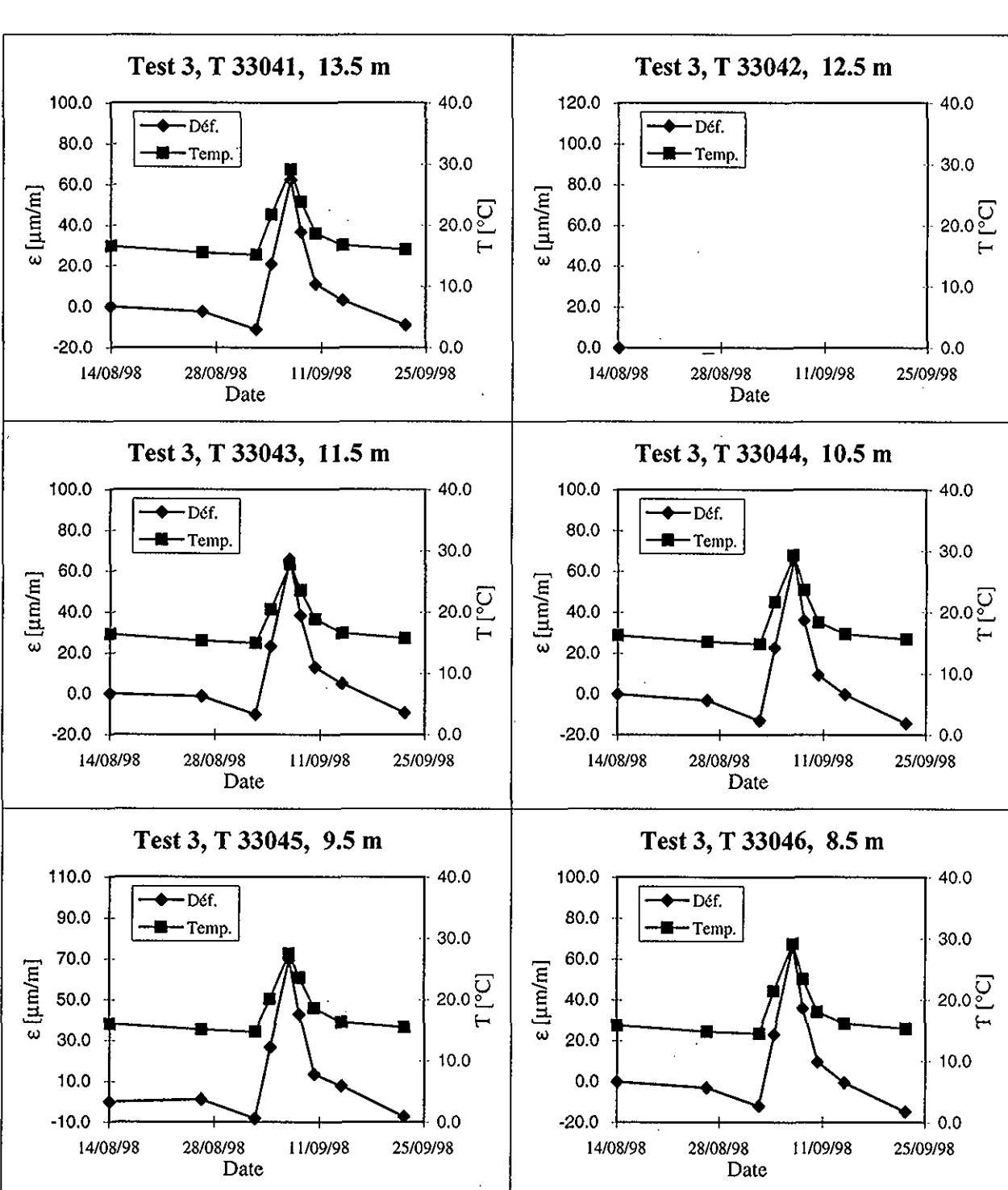
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



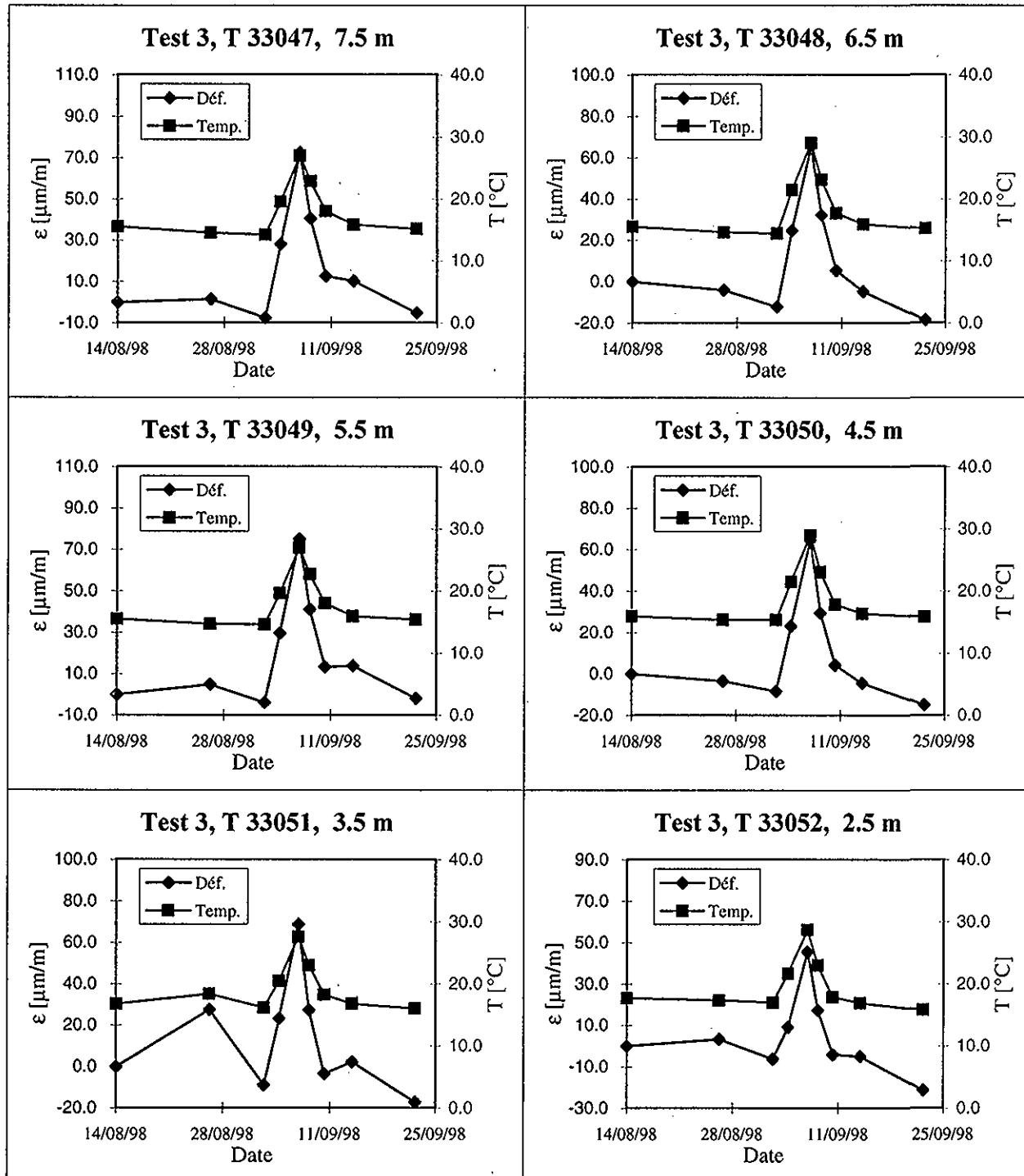
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



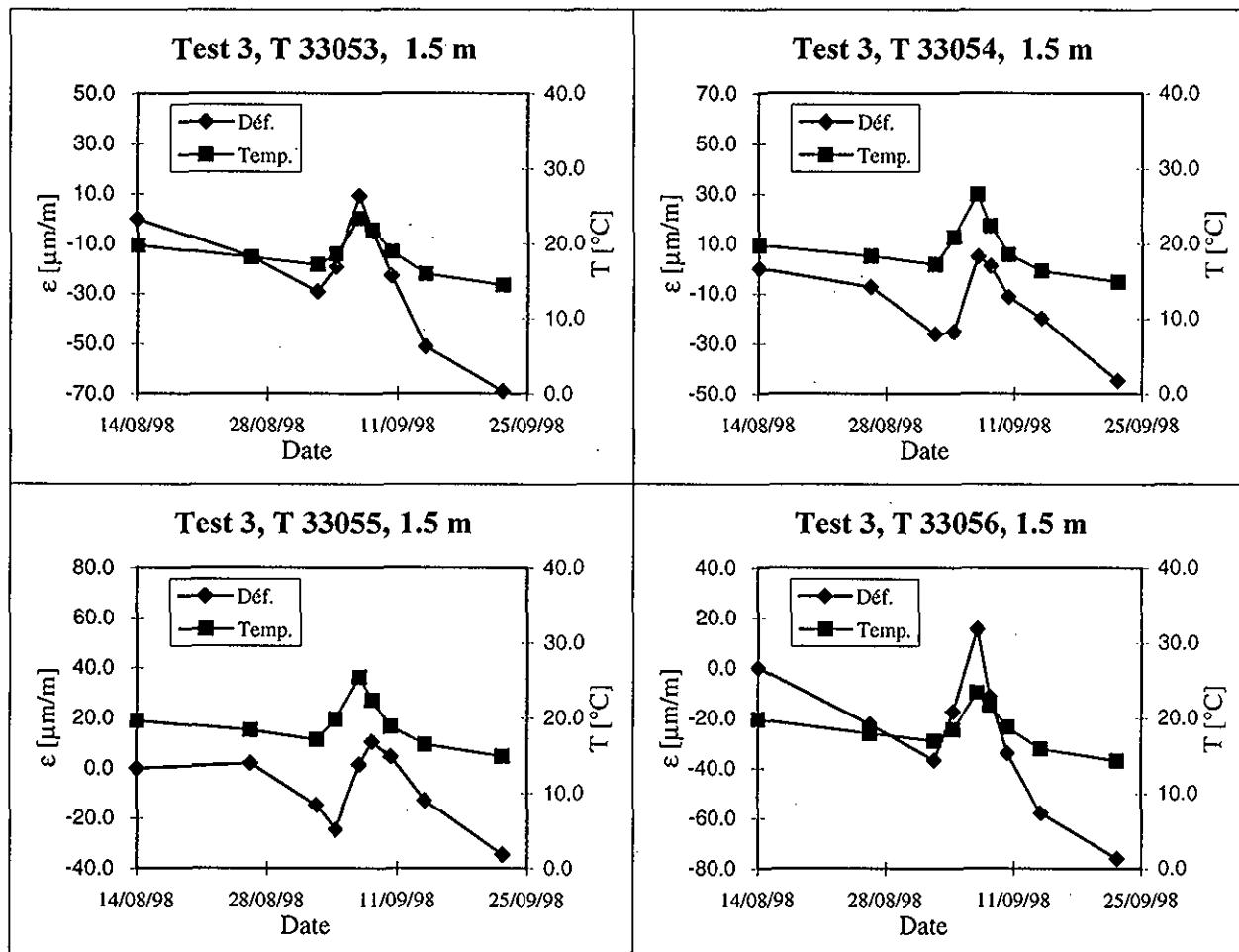
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

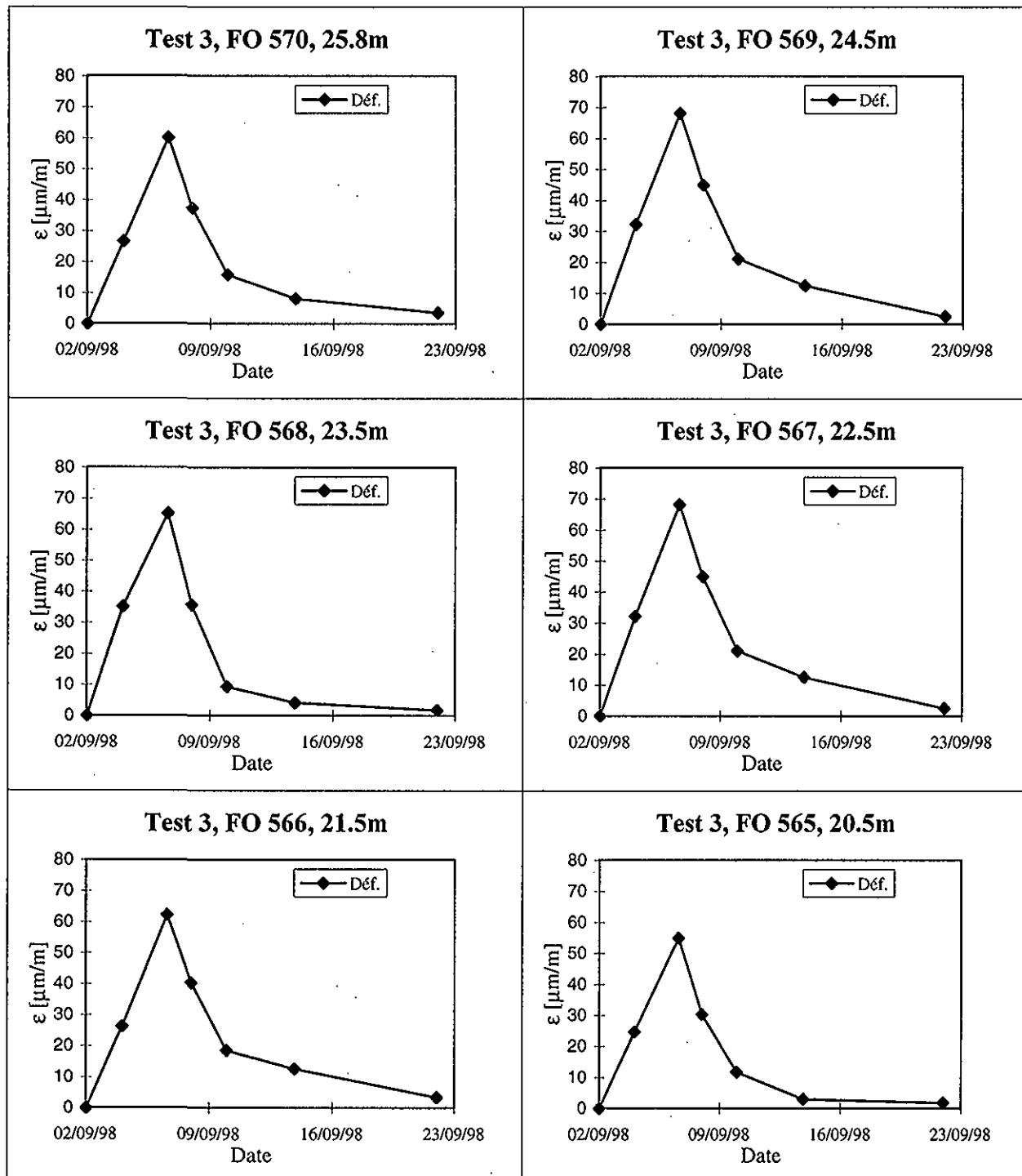


Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

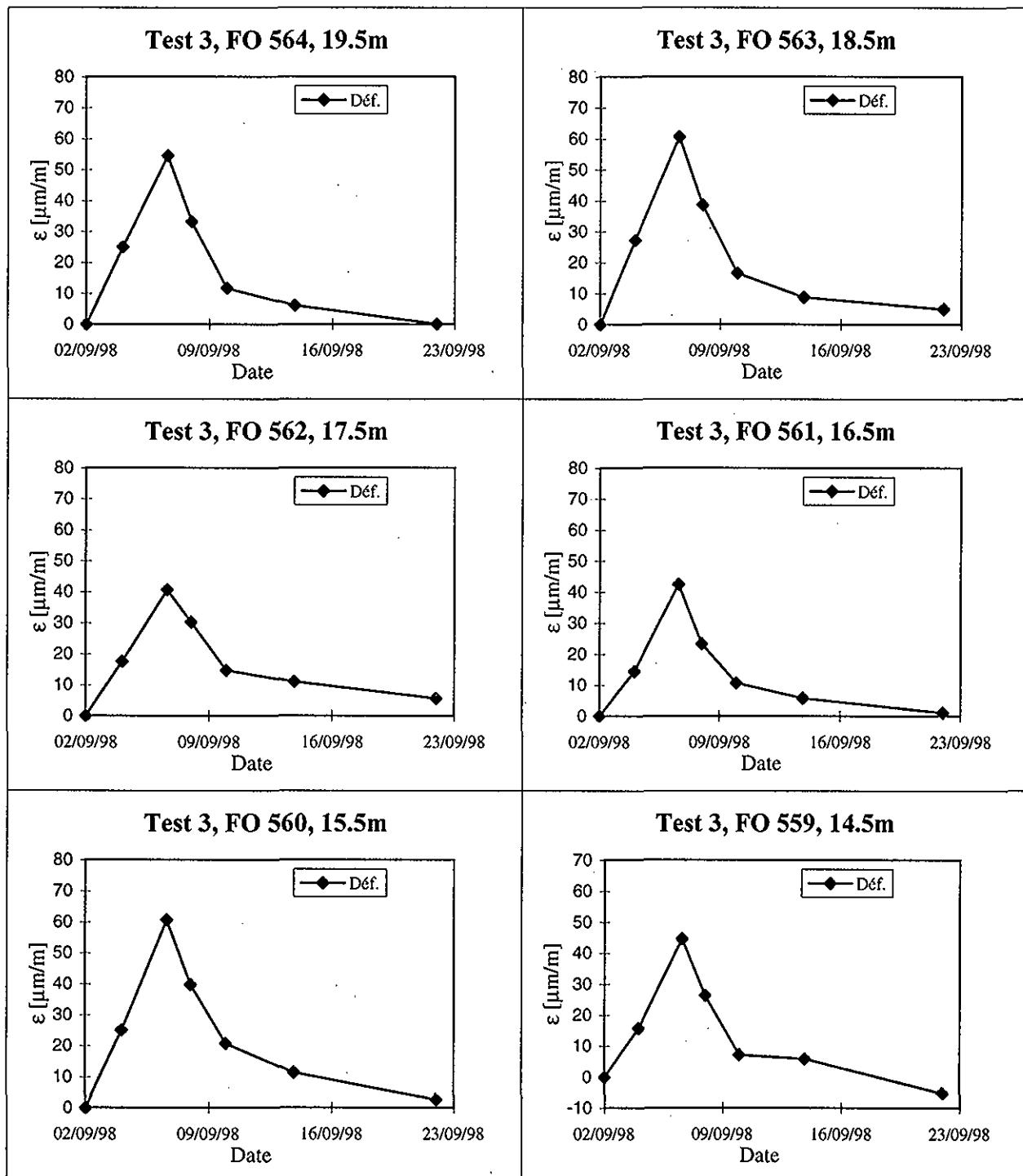


Pieu thermique - SY40      Capteurs à fibres optique  
 TEST3



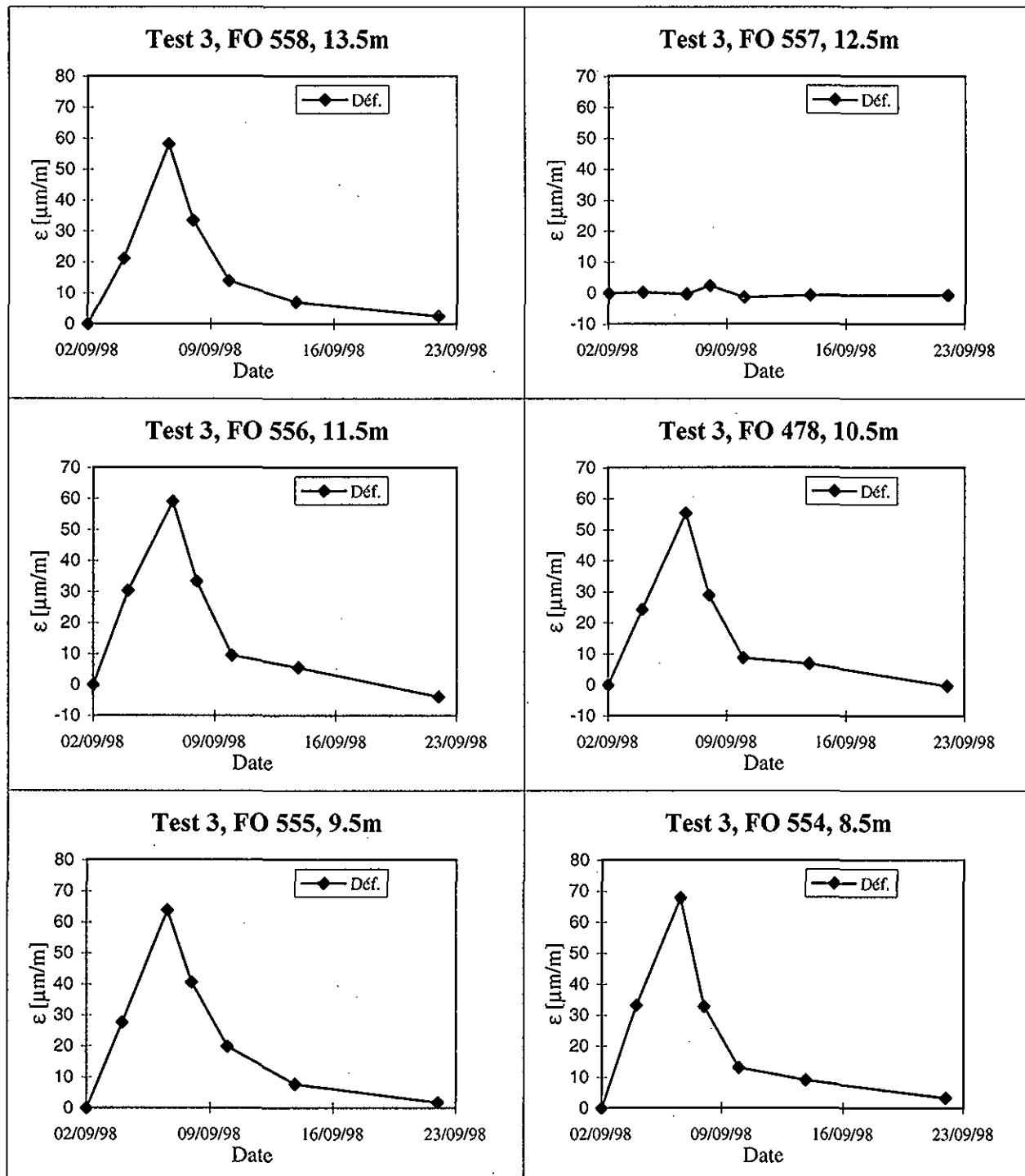
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs à fibres optique



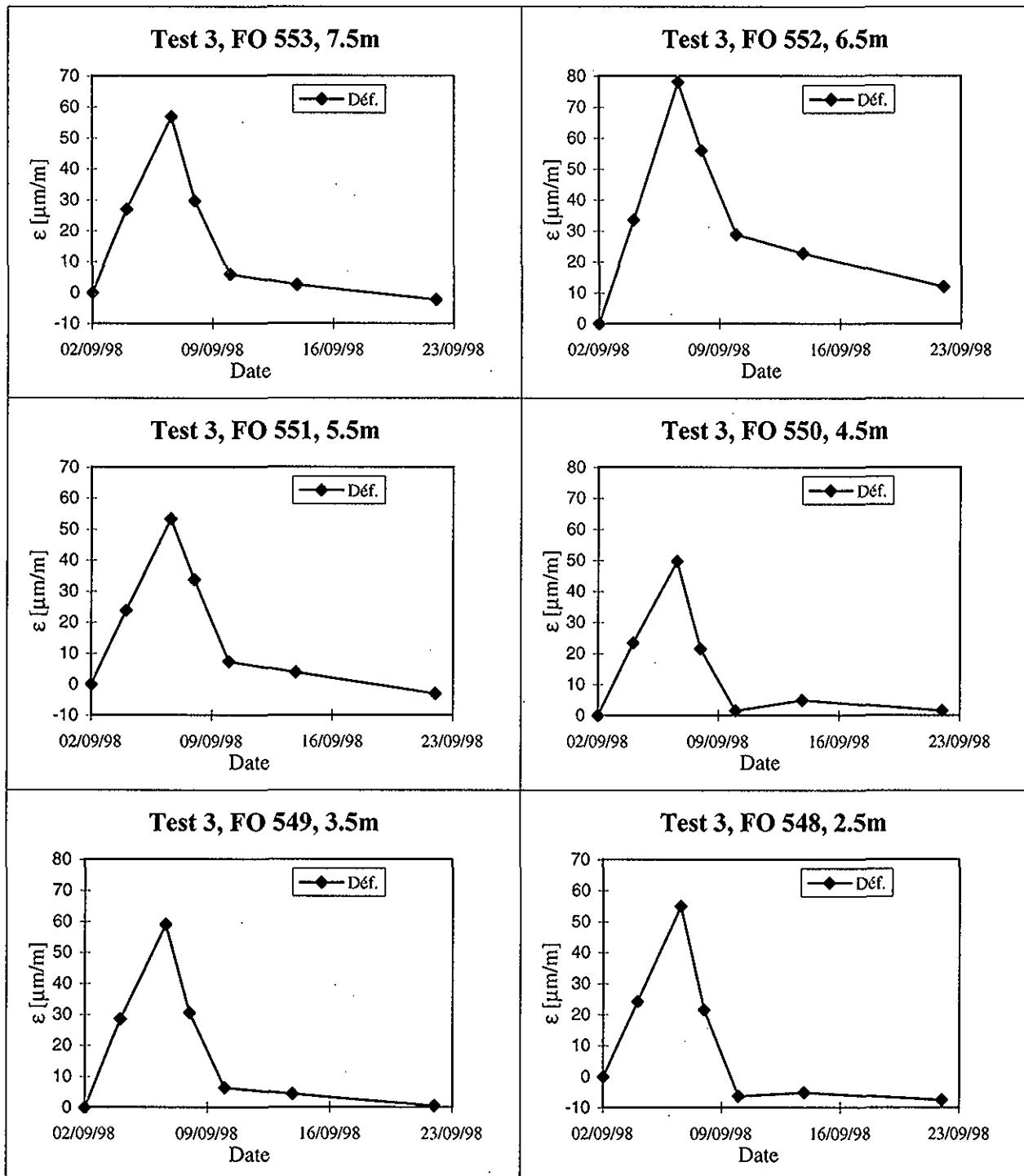
Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs à fibres optique



Pieu thermique - SY40  
 TEST3

Capteurs à fibres optique



## **ANNEXE 4**

## **TEST 4**

## ANNEXE 4, TEST 4

### TEST 4 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A4.1 Etape de construction lors du test 4

La dalle du deuxième étage du bâtiment polyvalent du Quartier Nord de l'EPFL est coulée (figure A4.1, zone grise) le premier octobre 1998 date où le test 4 commence.

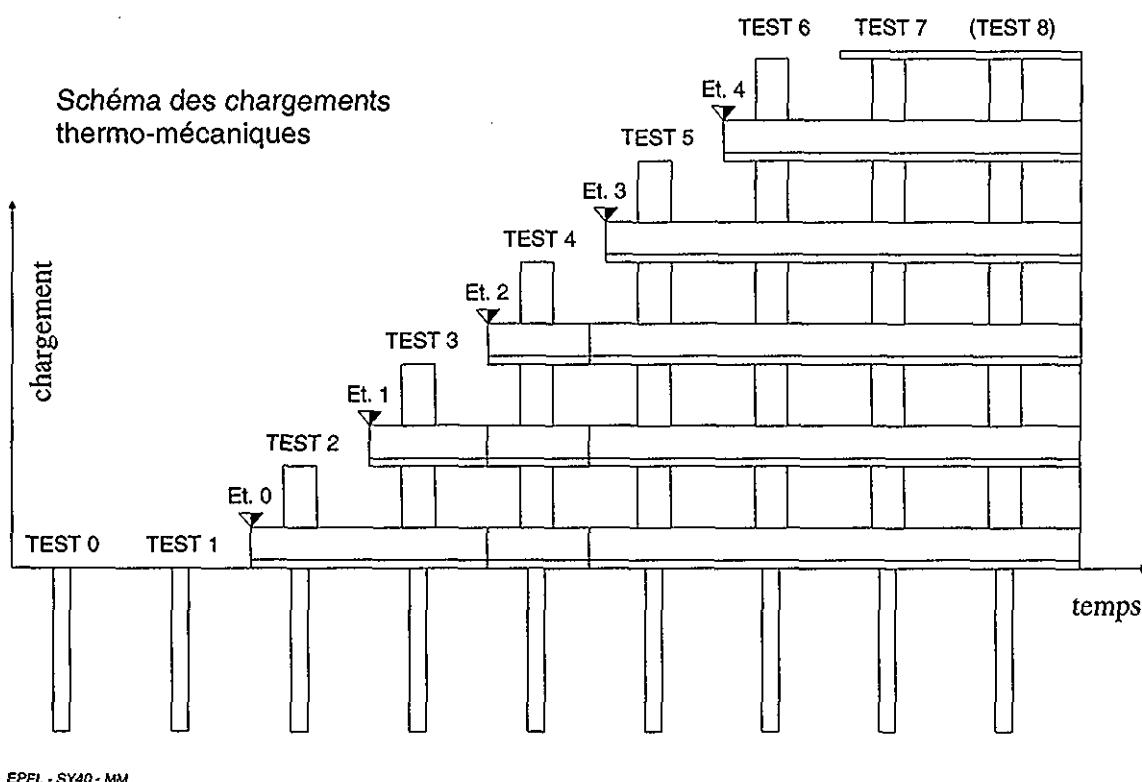


Figure A4.1 : Etape de construction lors du test 4.

#### A4.2 Déroulement chronologique du test 4

Le déroulement du test est résumé dans la table A4.1. 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 soit jusqu'au 8 octobre, en raison d'un oubli des mesures des capteurs du pieu le mardi 6 octobre en fin d'après midi.

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

#### ANNEXE 4, TEST 4

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
Mercre. 7 oct. 98	08:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 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
Mercre. 15 oct. 98	16:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 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 A4.1 Déroulement chronologique du test 4.

## ANNEXE 4, TEST 4

### A4.3 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 A4.2, 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 A4.3. 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 la table A4.2, 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 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 A4.4, 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.

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

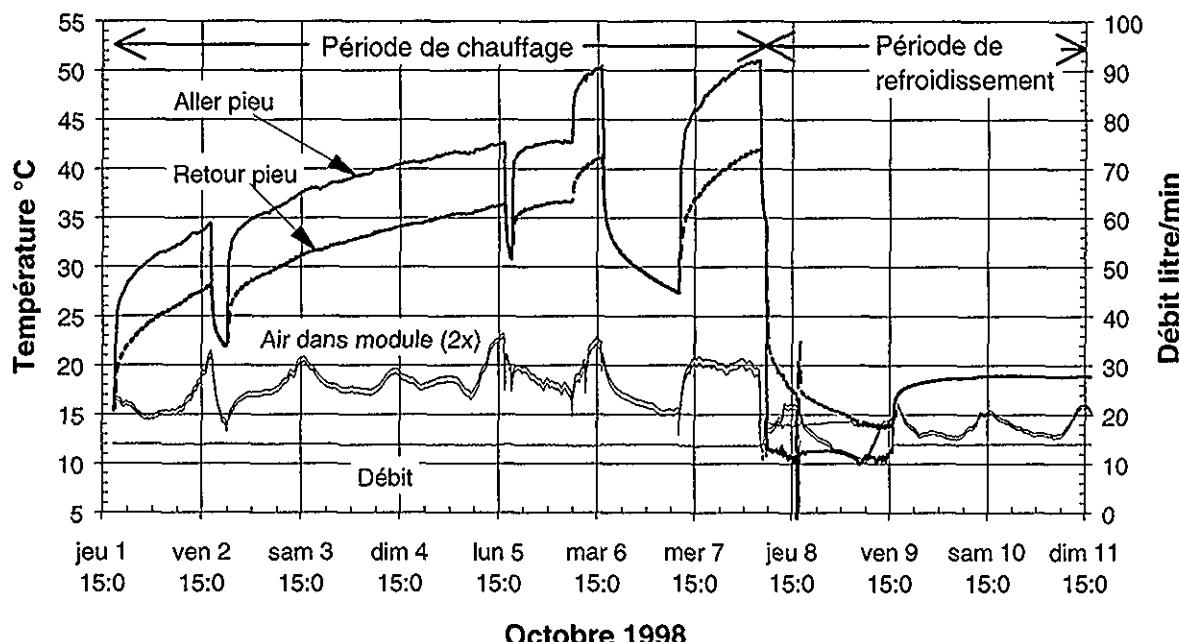


Figure A4.2 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du test n° 4.

## ANNEXE 4, TEST 4

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

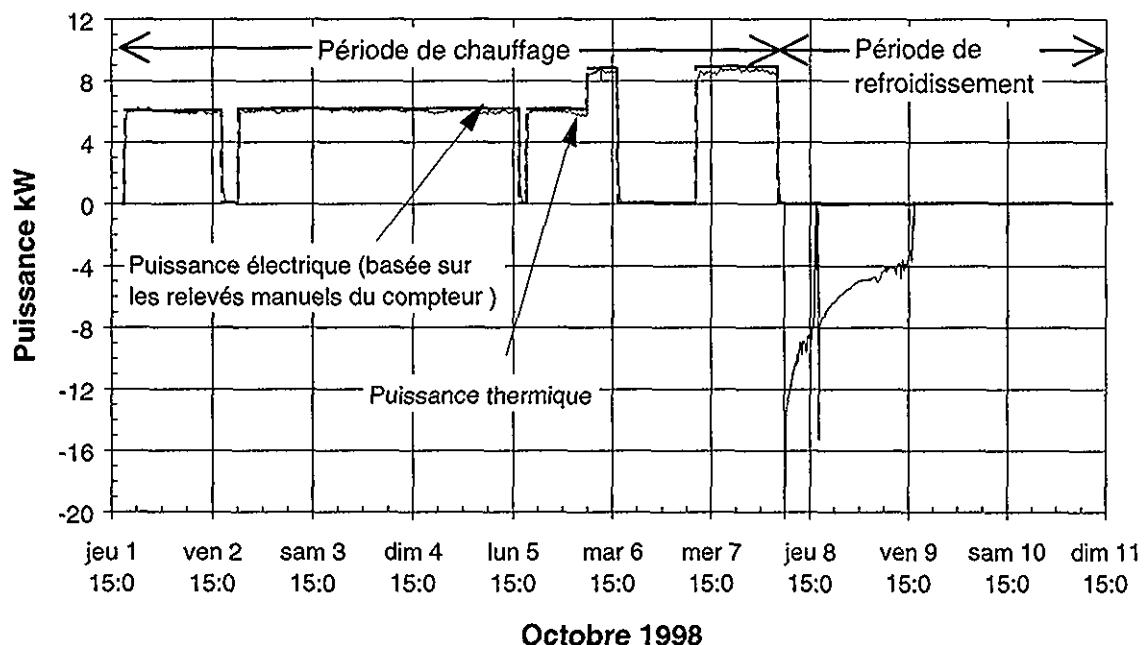


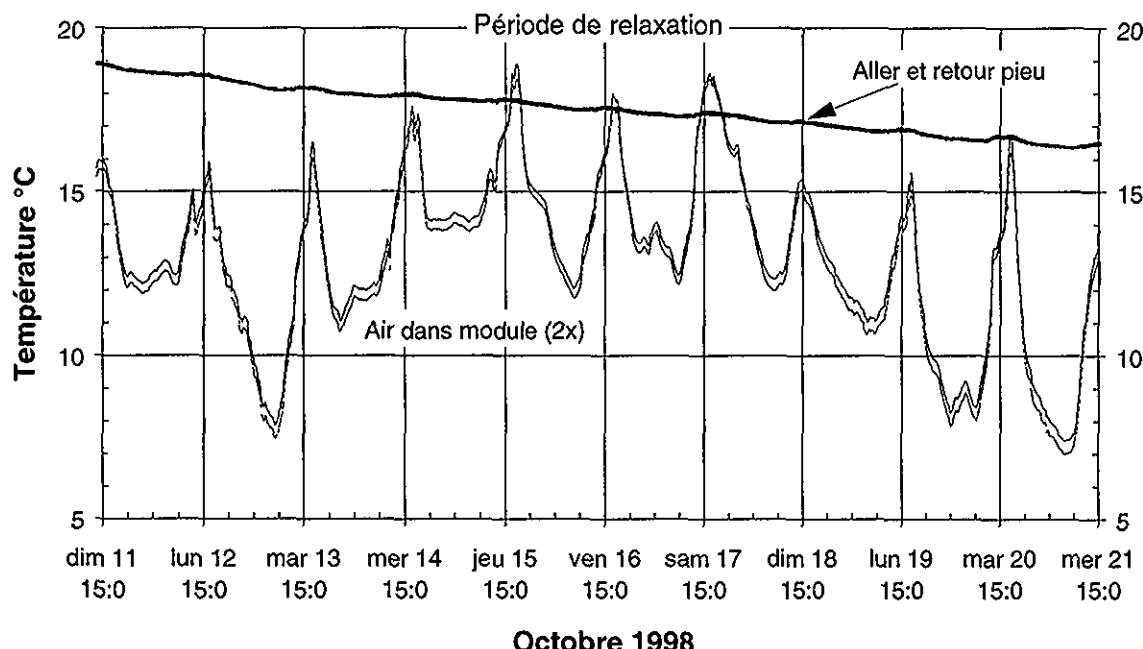
Figure A4.3 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du test n° 4.

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

Table A4.2 Bilan d'énergie relatif au test 4

## ANNEXE 4, TEST 4

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



Octobre 1998

Figure A4.4 : 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 n° 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. Test 4.

La température mesurée le premier octobre (avant de commencer le chauffage) dans le pieu par les capteurs TELEMAC (extensomètres à corde vibrante) 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 A4.5) 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 A4.5 et A4.6).

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.

## ANNEXE 4, TEST 4

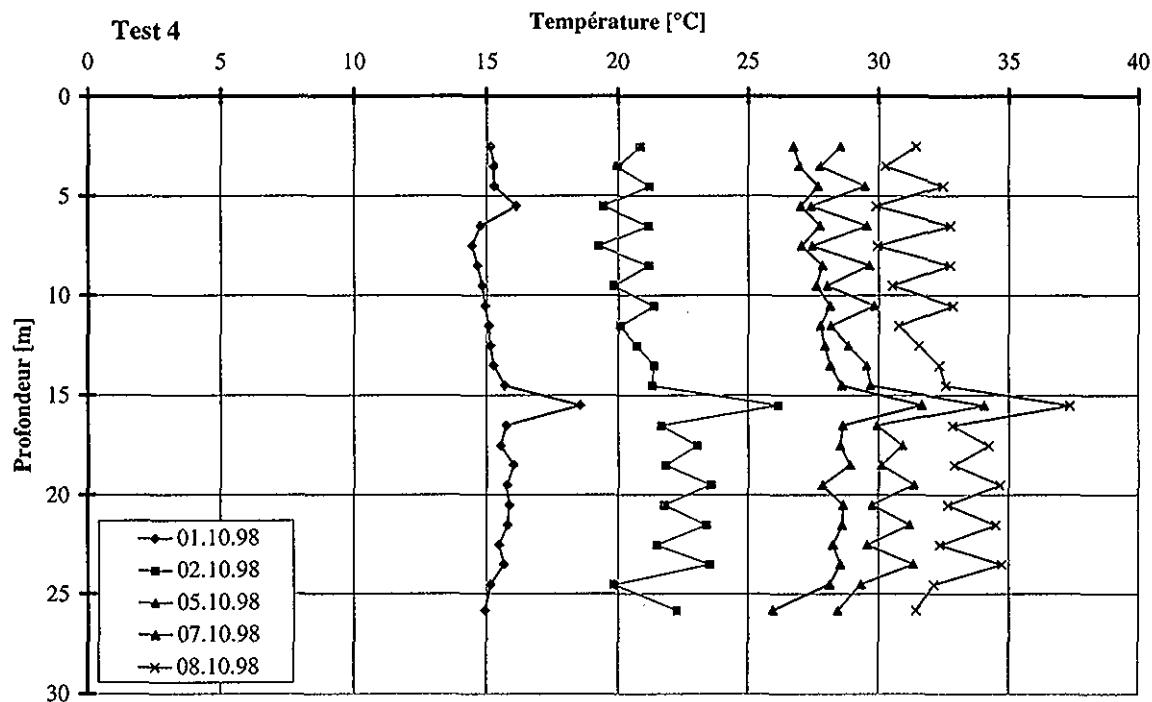


Figure A4.5 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage. Test 4.

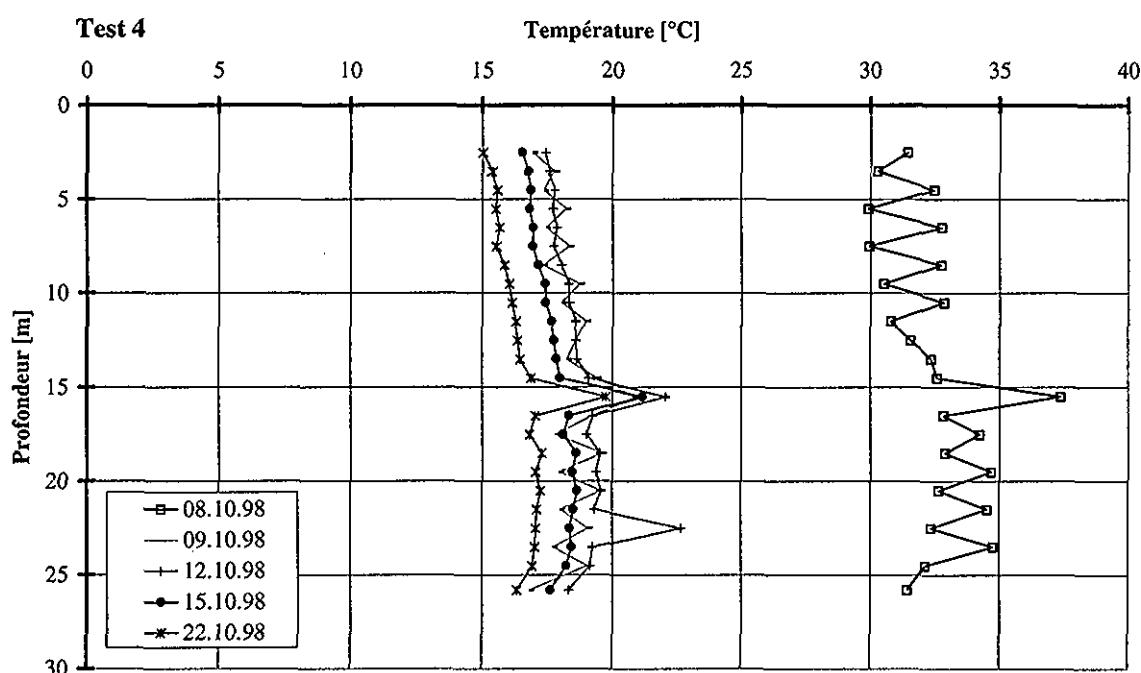


Figure A4.6 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 4.

## ANNEXE 4, TEST 4

### A4.4 Mesures mécaniques relatives au 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 exploitable pour le calcul des déformations radiales.

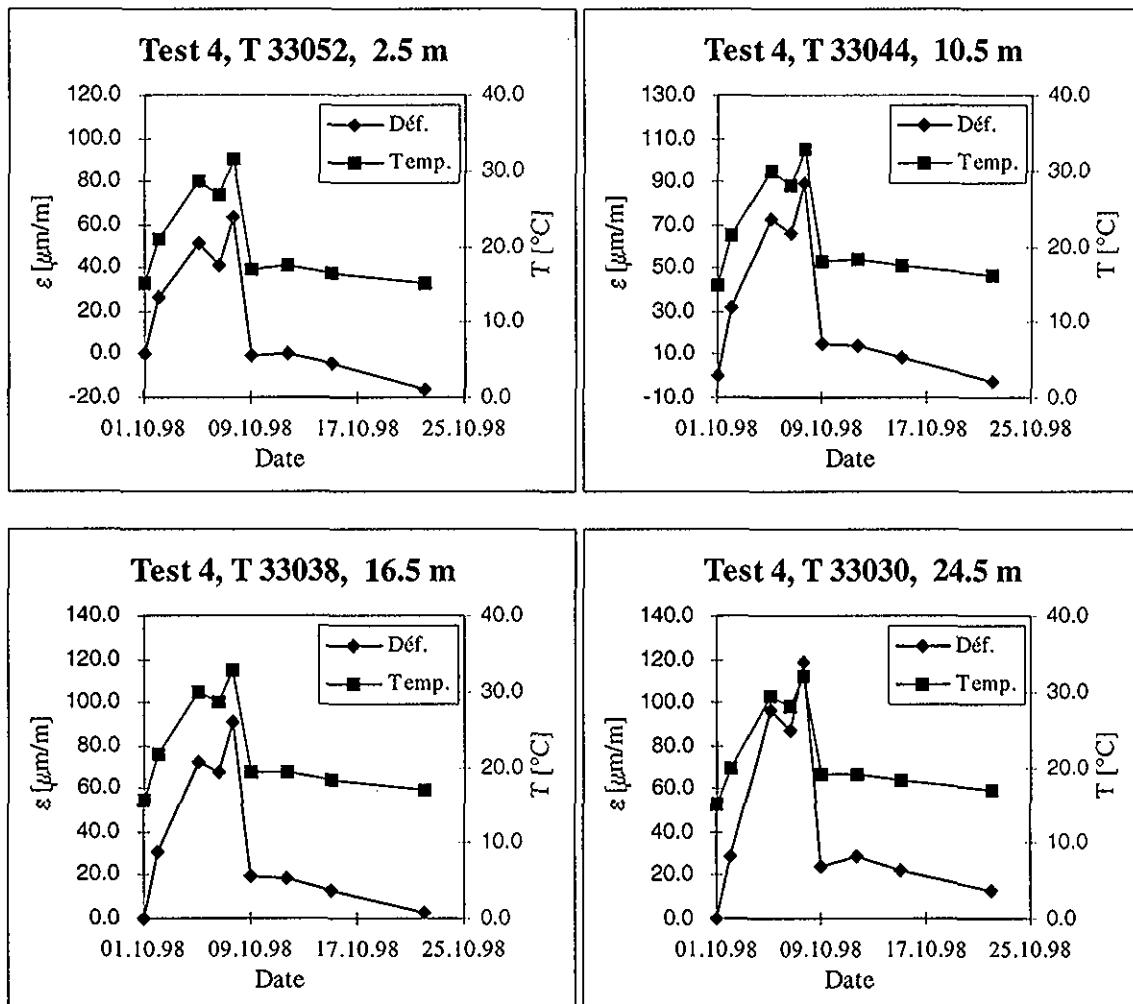


Figure A4.7 : Déplacement et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés au profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 4.

Sur les graphiques des figures A4.7 et A4.8 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 été effectuées, pour cette raison il a été décidé de réchauffer le pieu encore 1 jour pour permettre cette dernière mesure.

#### ANNEXE 4, TEST 4

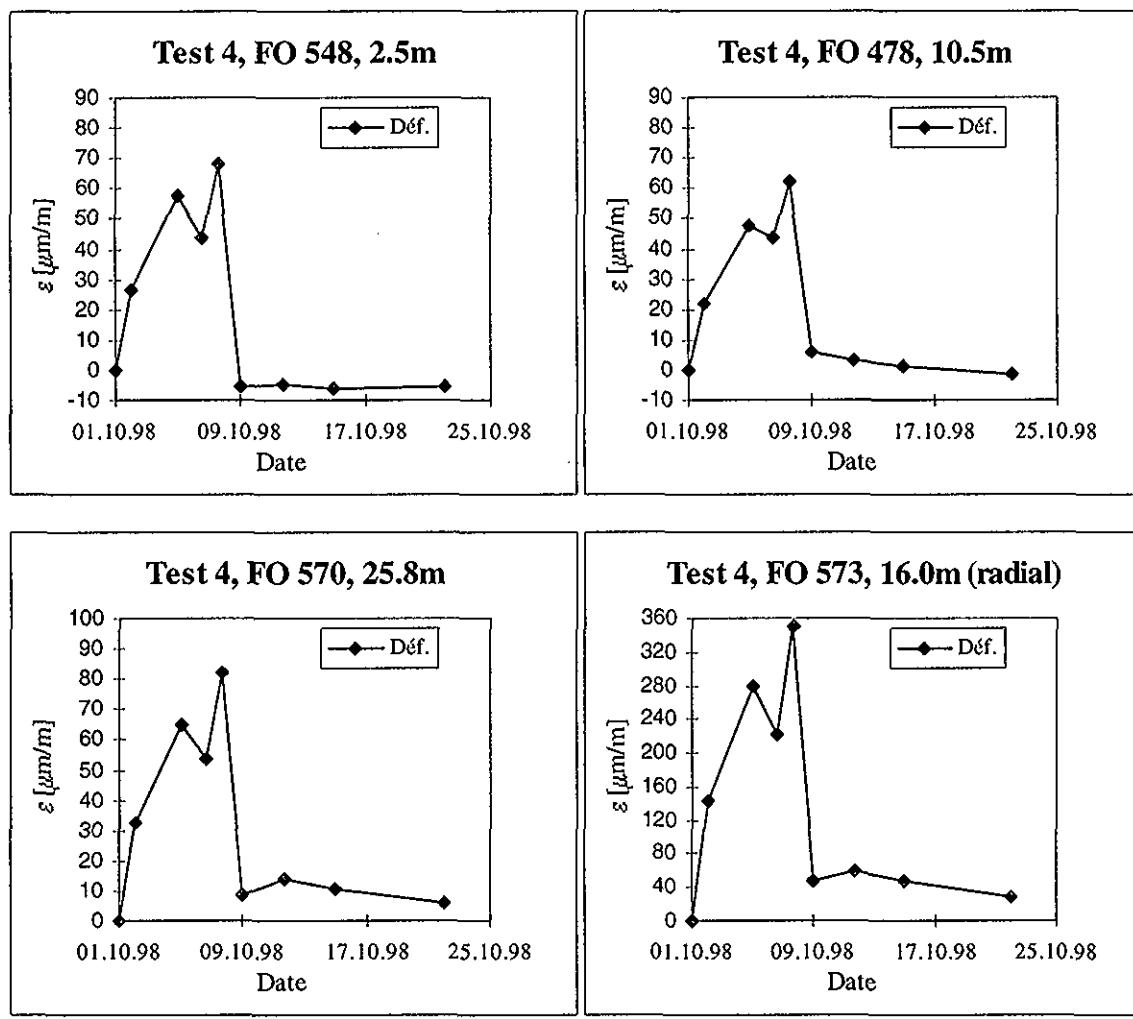


Figure A4.8 : Déplacements mesurés par fibres optiques (FO548, FO478, FO 570, FO573).  
Test 4.

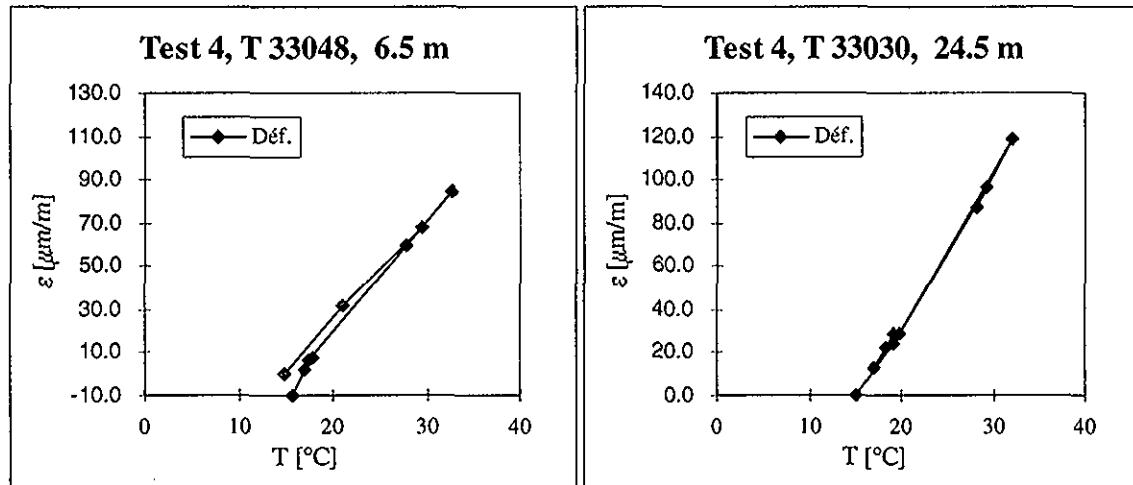


Figure A4.9 : Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 4.

Le comportement du pieu sous soumis à un cycle de chauffage-refroidissement est pratiquement réversible, comme le montre la figure A4.9 où la déformation est dessinée en

## ANNEXE 4, TEST 4

fonction de la température. Le coefficient  $n\beta$  (défini dans l'ANNEXE 1) 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.

Avec l'augmentation de la température dans le pieu et donc avec sa dilatation on constate une légère augmentation de la pression sur la pointe du pieu (cellule de pression TELEMAC type CVC) comme le montre la figure A4.10. Comme déjà expliqué dans le test 3 (ANNEXE 3) cette variation de pression est très faible.

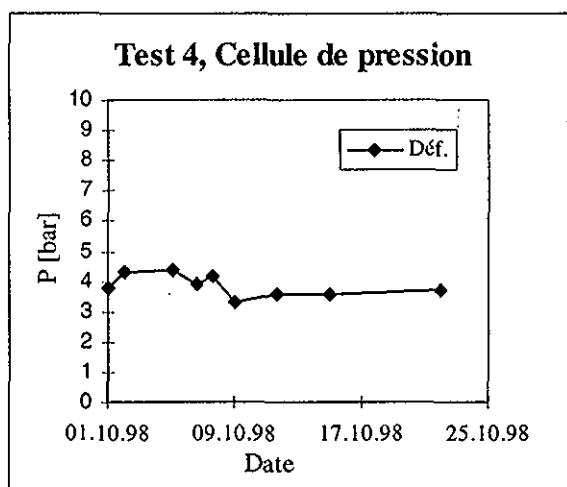


Figure A4.10 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test 4.

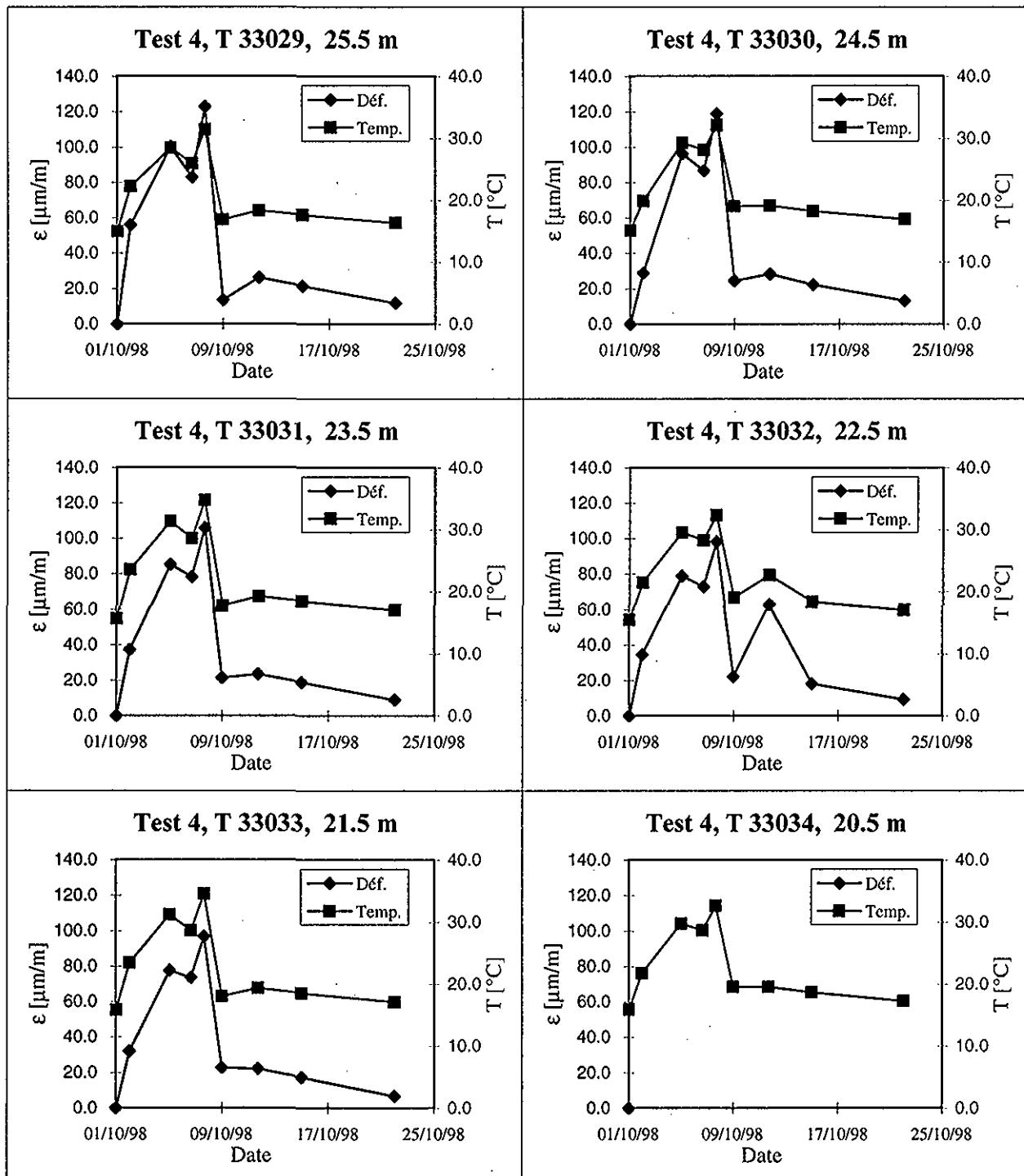
La totalité des mesures effectuées au cours du test 4 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

### A4.4 Conclusion

Pendant le quatrième test, 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 7 jours et le suivi de la phase de refroidissement 13 jours.

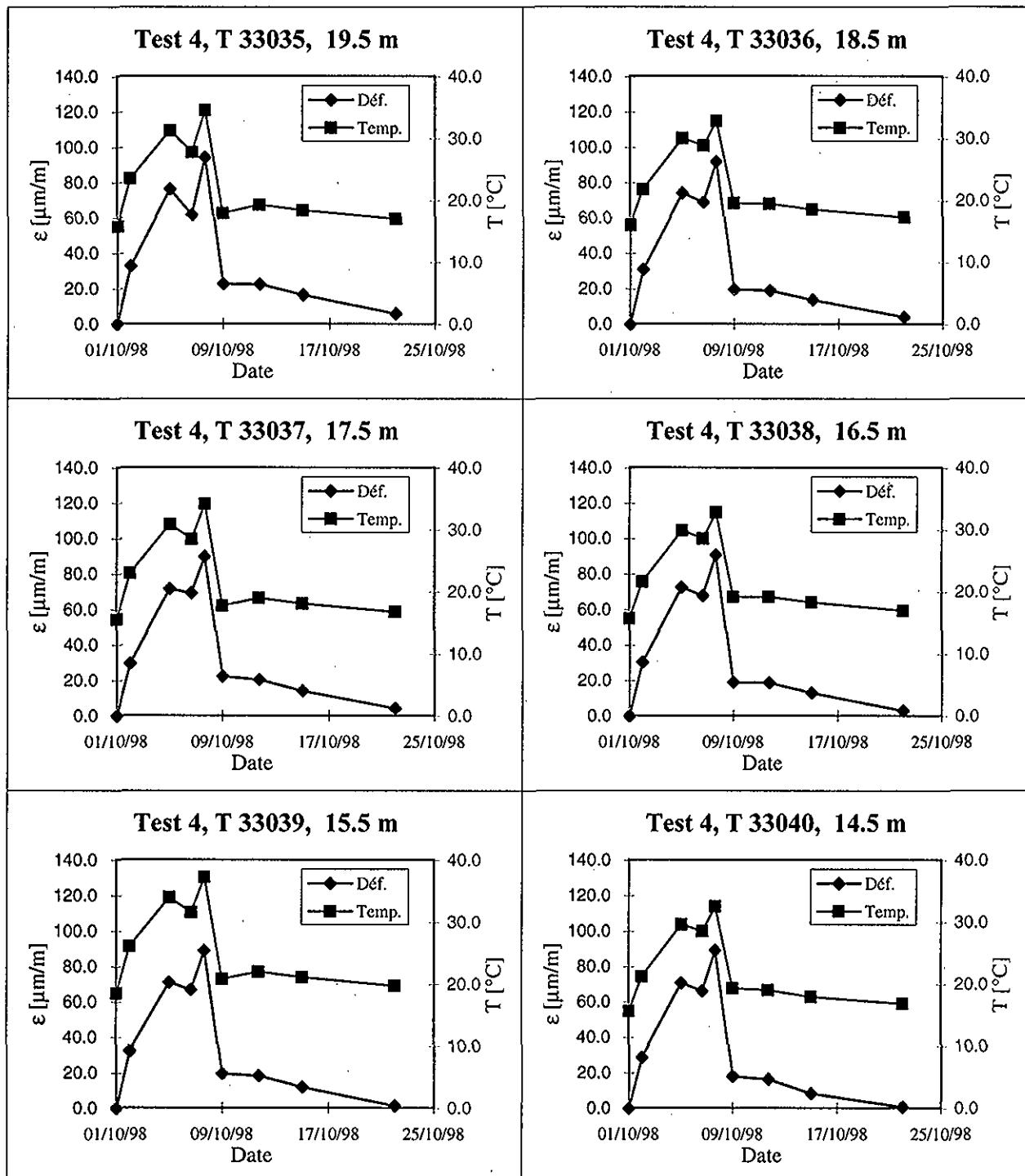
Les mesures relatives au module de chauffage sont prises comme dans le test 3.

Le comportement du pieu est réversible avec un coefficient  $n\beta$  de  $5.3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , donc le pieu est plus empêché de se déplacer vers le haut que dans les tests précédents, la force de compression supplémentaires sera donc plus significative pour une même sollicitation thermique ( $\Delta T=15^\circ\text{C}$ ).



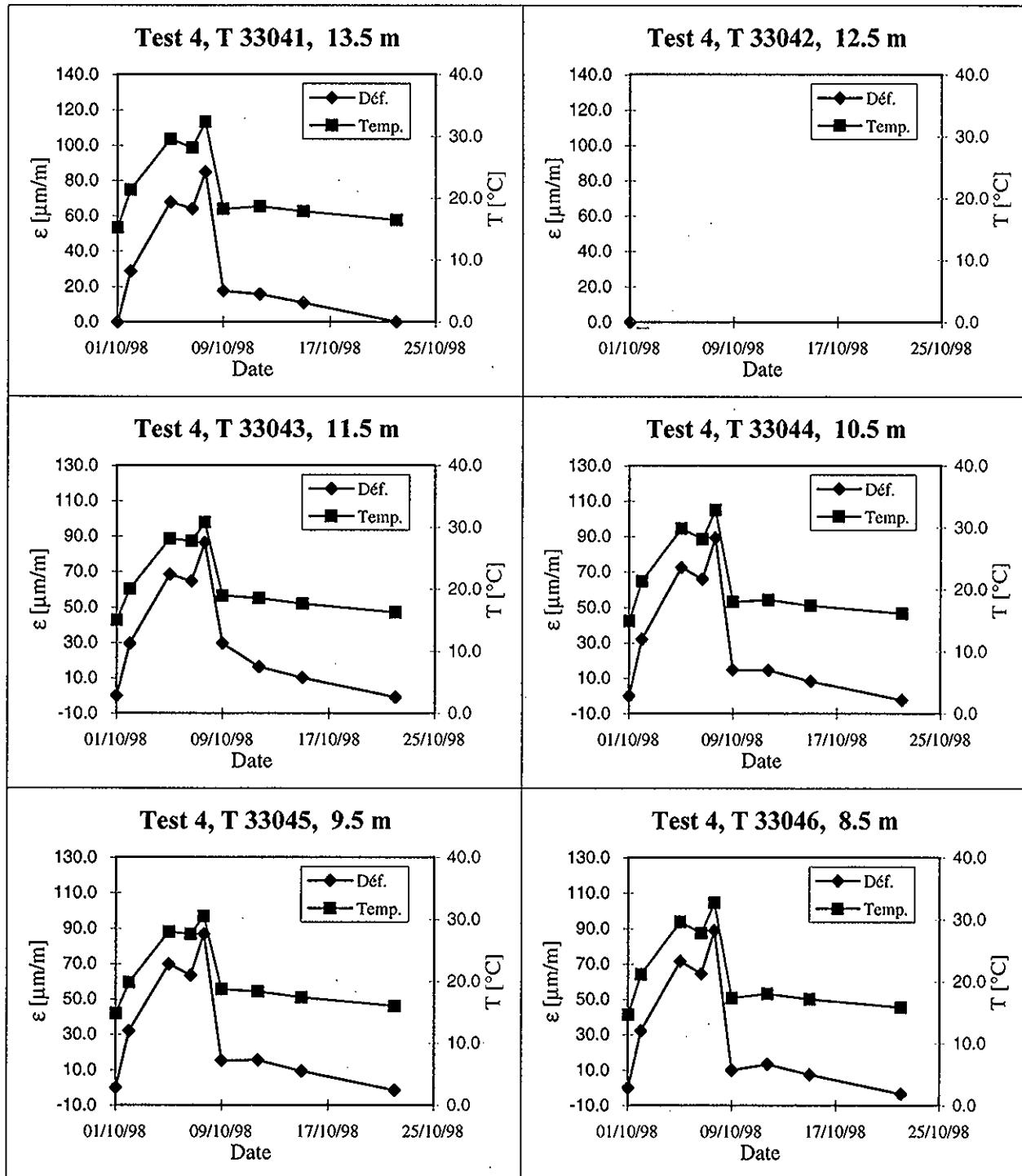
Pieu thermique - SY40  
 TEST4

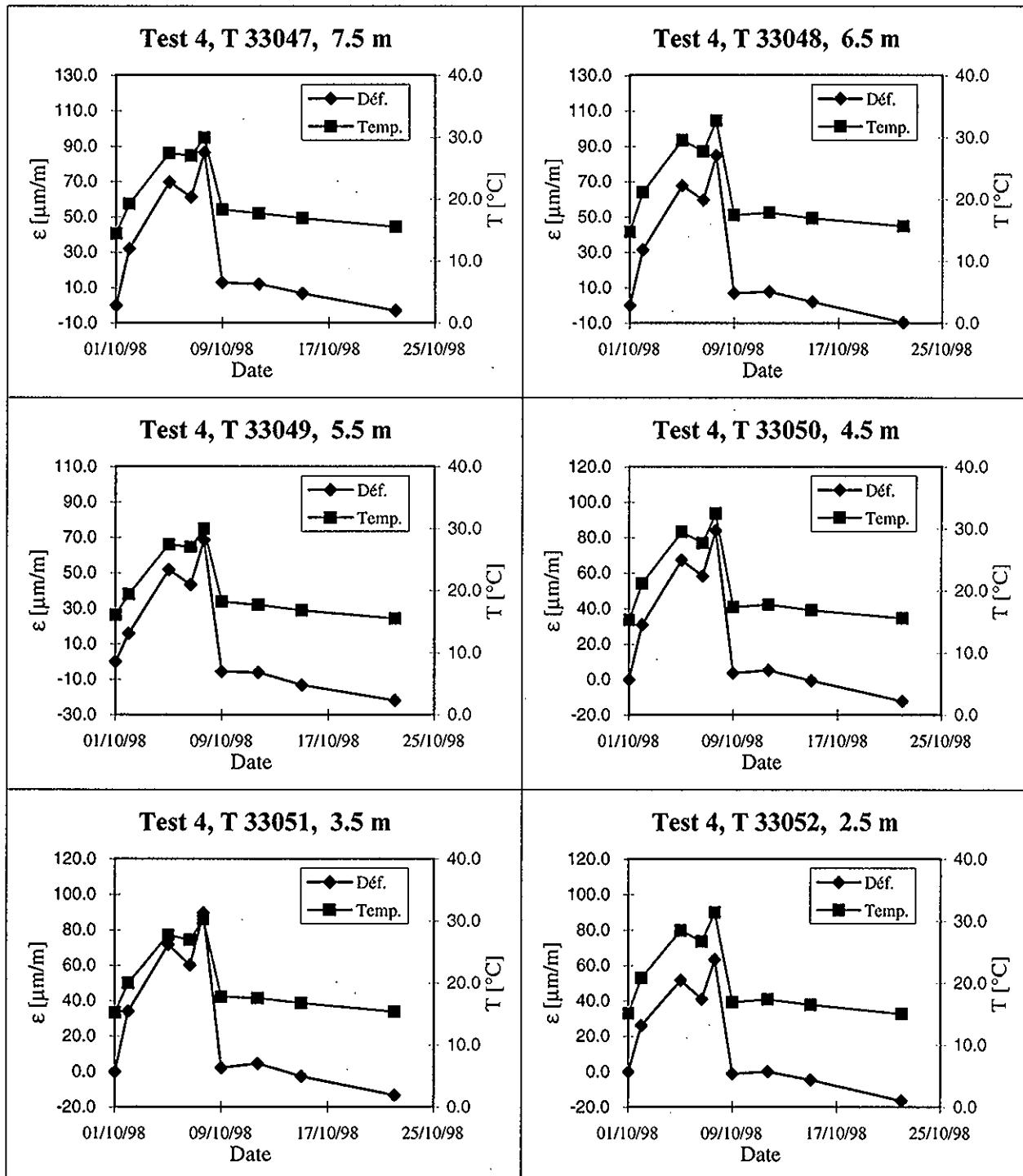
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



Pieu thermique - SY40  
 TEST4

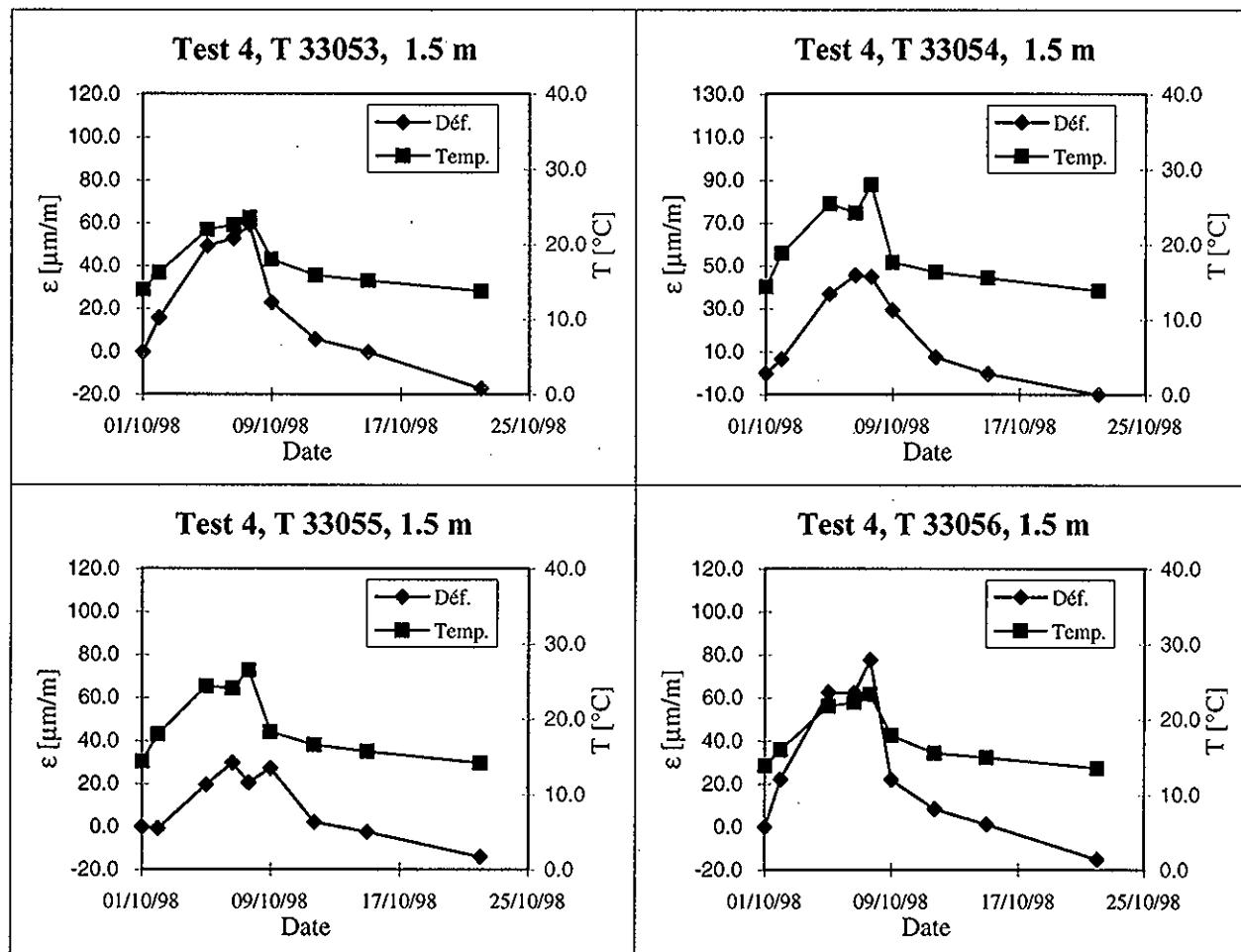
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

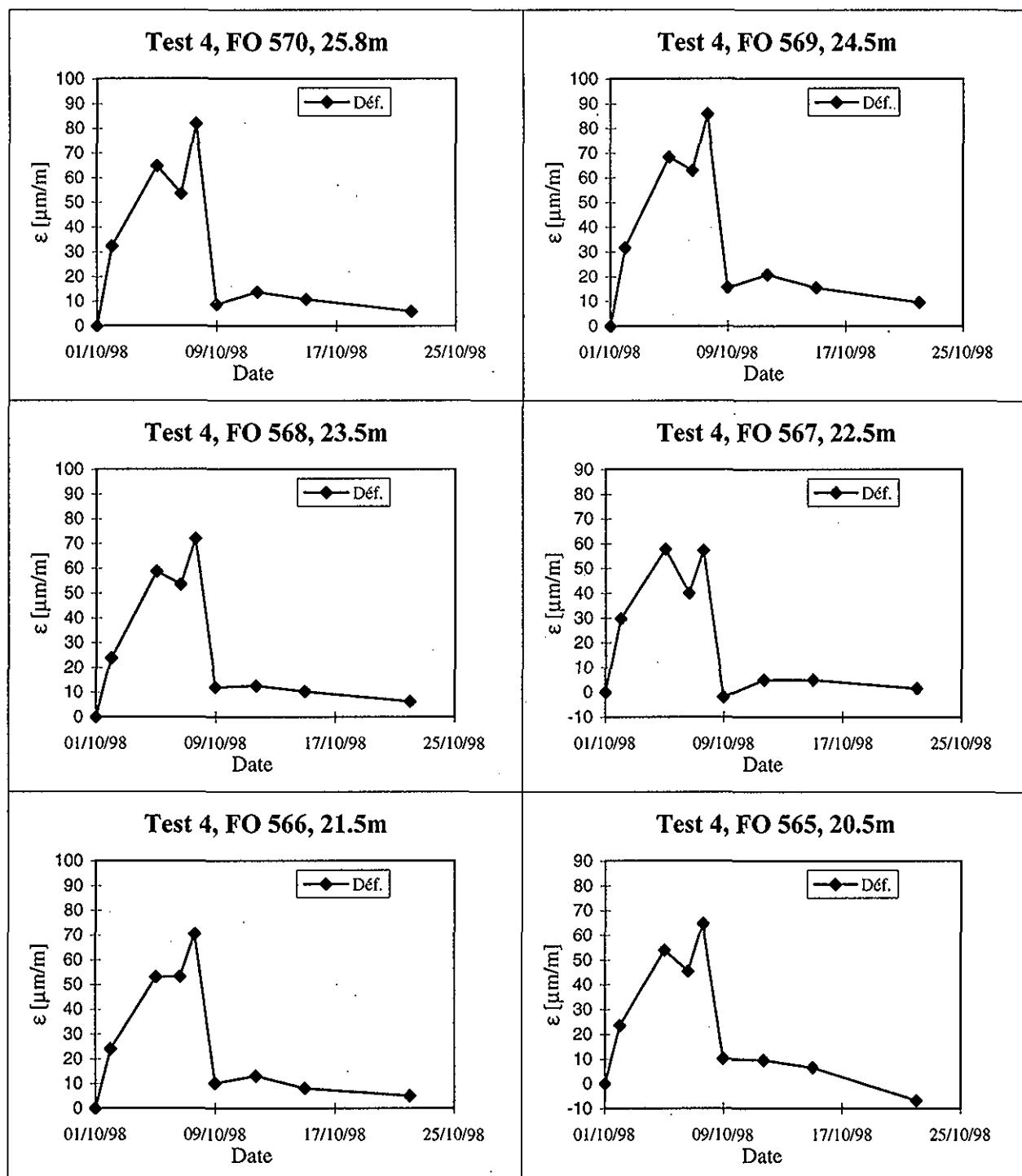


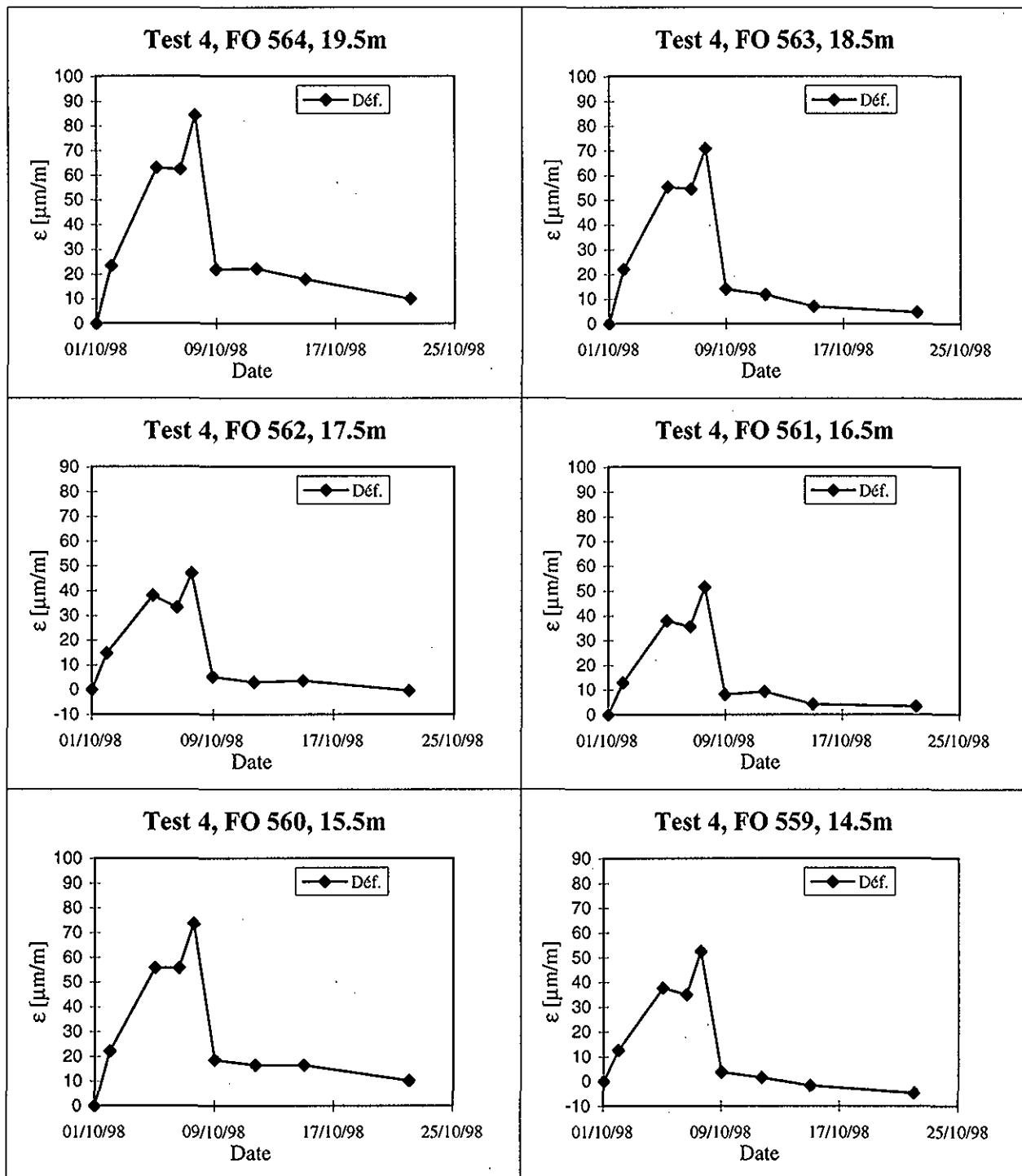


Pieu thermique - SY40  
 TEST4

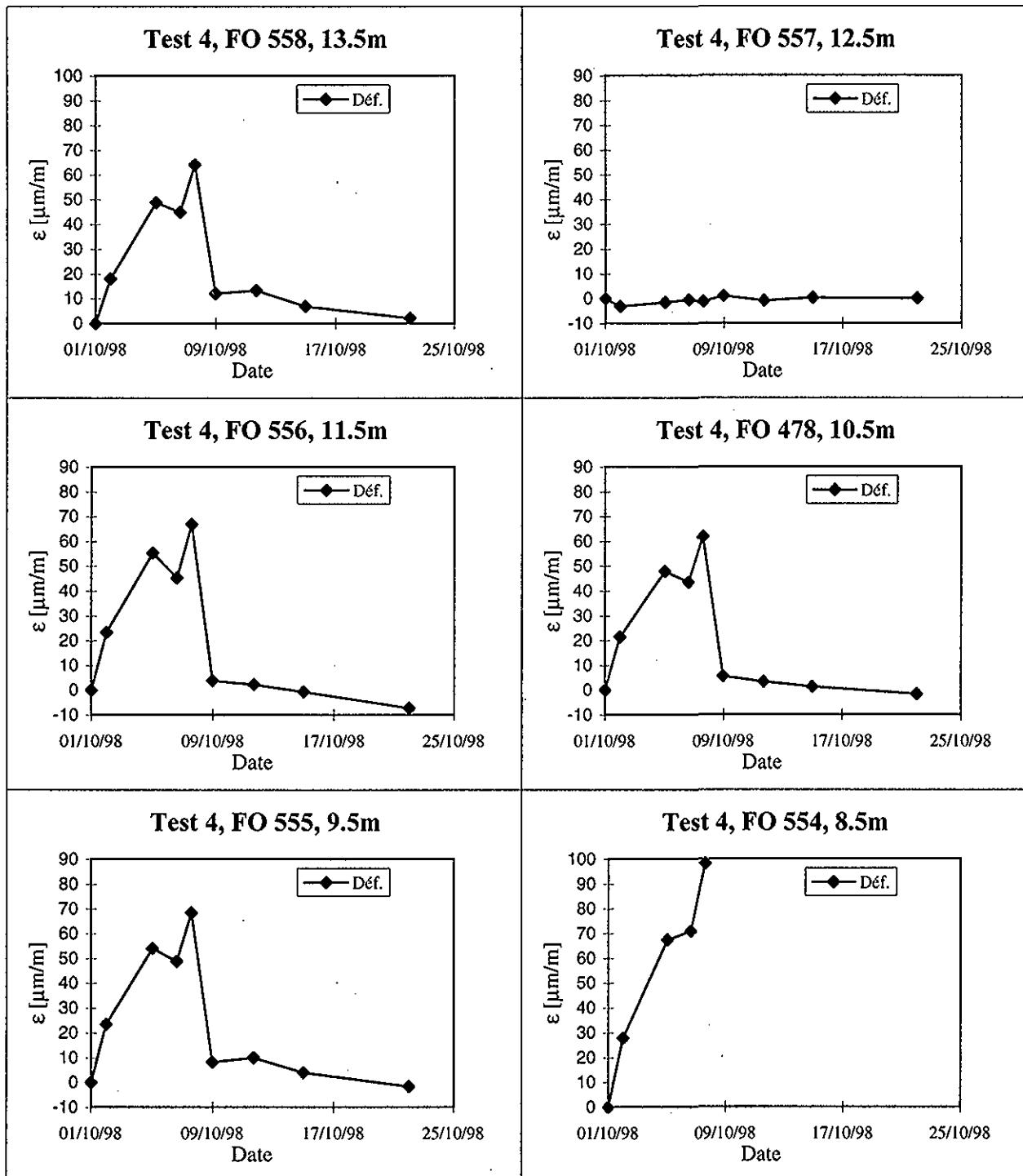
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)

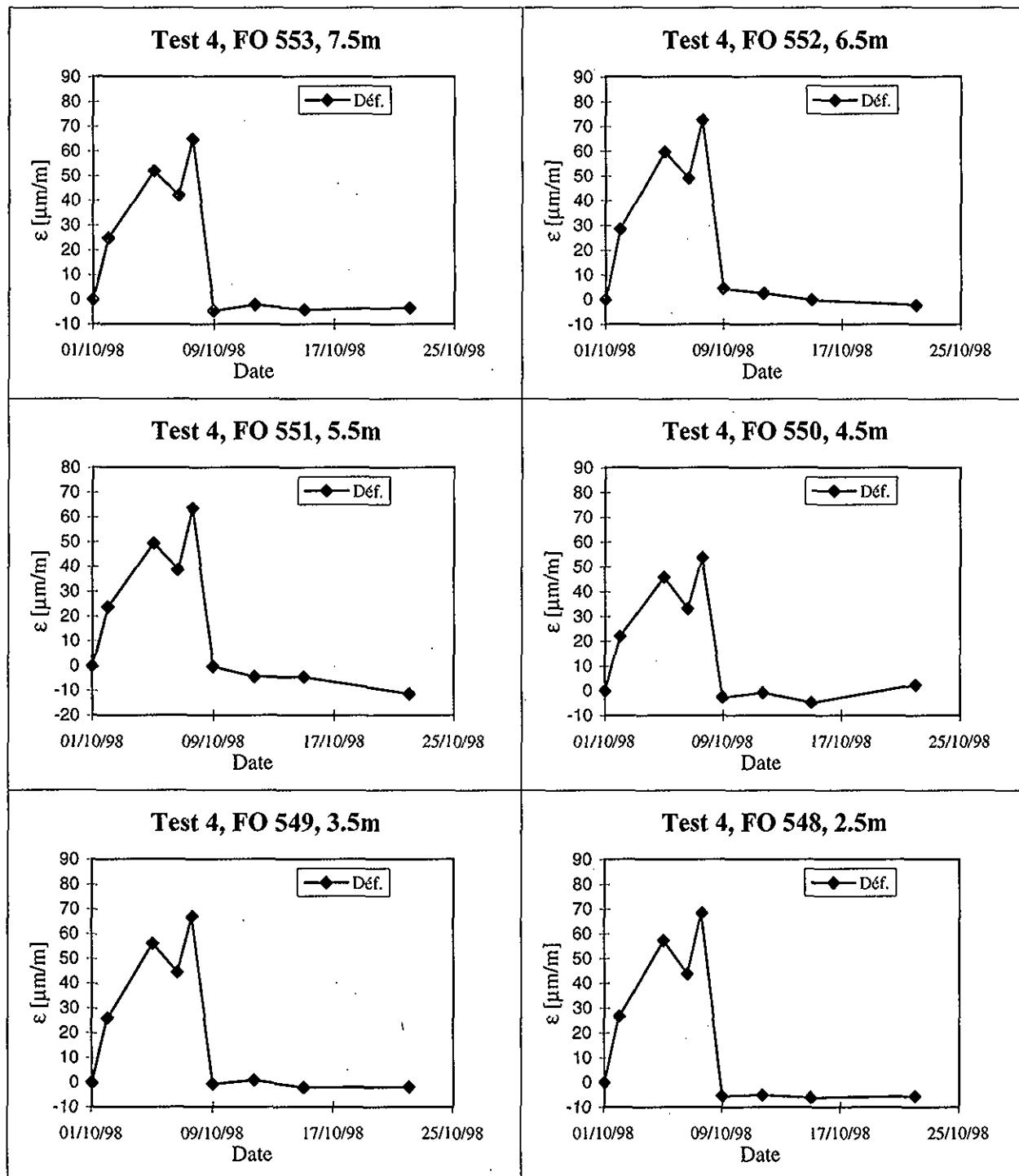






Pieu thermique - SY40      Capteurs à fibres optique  
 TEST4





# **ANNEXE 5**

## **TEST 5**

## ANNEXE 5, TEST 5

### TEST 5 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A5.1 Etape 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 A5.1, zone grise). Il reste encore un étage et le toit à construire.

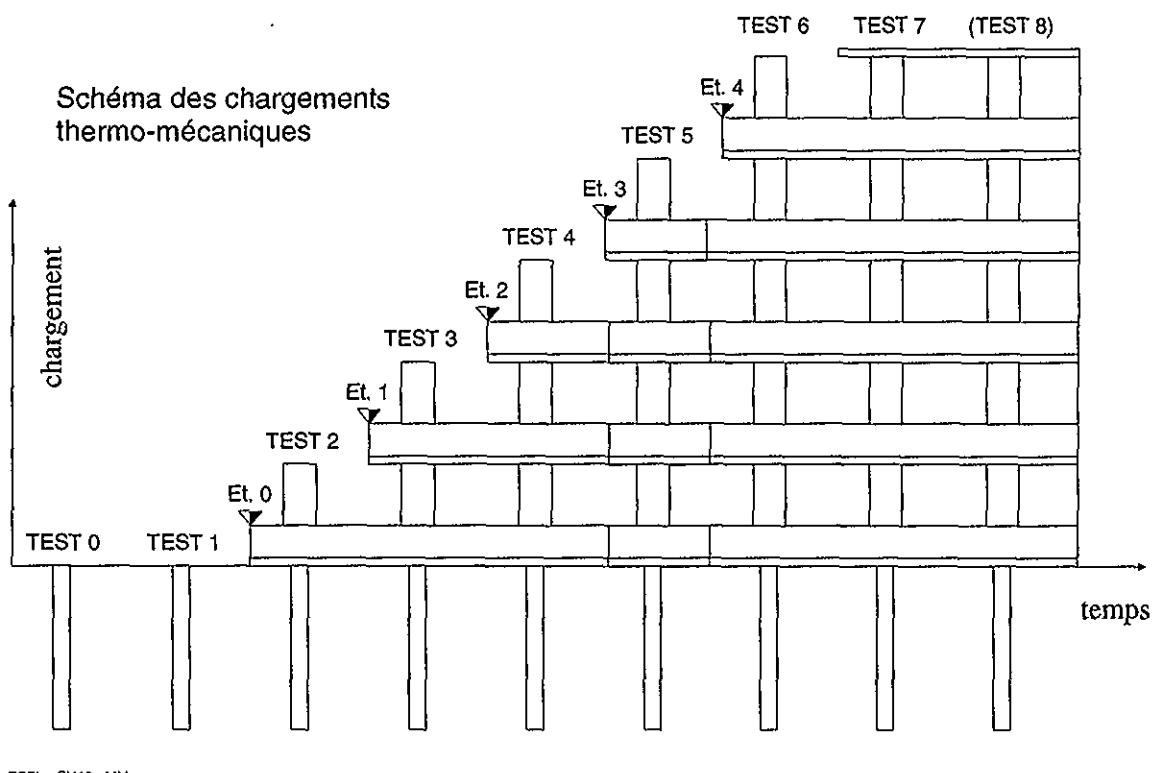


Figure A5.1 : Etape de construction lors du test 5.

#### A5.2 Déroulement chronologique du test 5

Le déroulement du test est résumé dans la table A5.1. 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.

## ANNEXE 5, TEST 5

Date		Evénement	Etat de fonctionnement
Jeudi 22 oct. 98	11:30	Enclenchement pompe de circulation	
Jeudi 22 oct. 98	17:20	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	
Jeudi 22 oct. 98	18:20	Enclenchement chauffage électrique, 6 kW	Chauffage
Vendr. 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 TELEMAC 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 TELEMAC 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 TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 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 TELEMAC 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 TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Jeudi 5 oct. 98	16:15	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Vendr. 6 nov. 98	9:40	Pompe arrêtée, fin des mesures relatives au module de chauffage	

Table A5.1 Déroulement chronologique du test 5.

### A5.3 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 A5.2, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour le test 5. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure A5.3. 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

## ANNEXE 5, TEST 5

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 la table A5.2, 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.

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

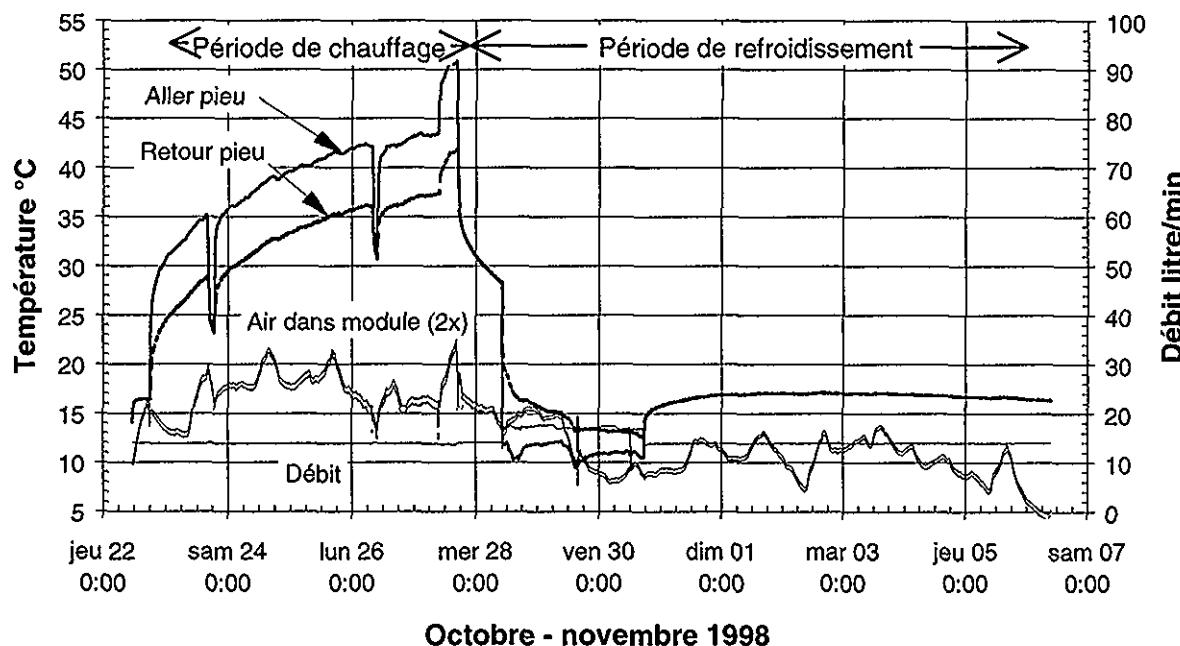


Figure A5.2 : Evolution des températures mesurées de l'eau circulant dans le pieu (aller et retour), de l'air dans le caisson du module de chauffage et du débit mesuré lors du test n° 5.

## ANNEXE 5, TEST' 5

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

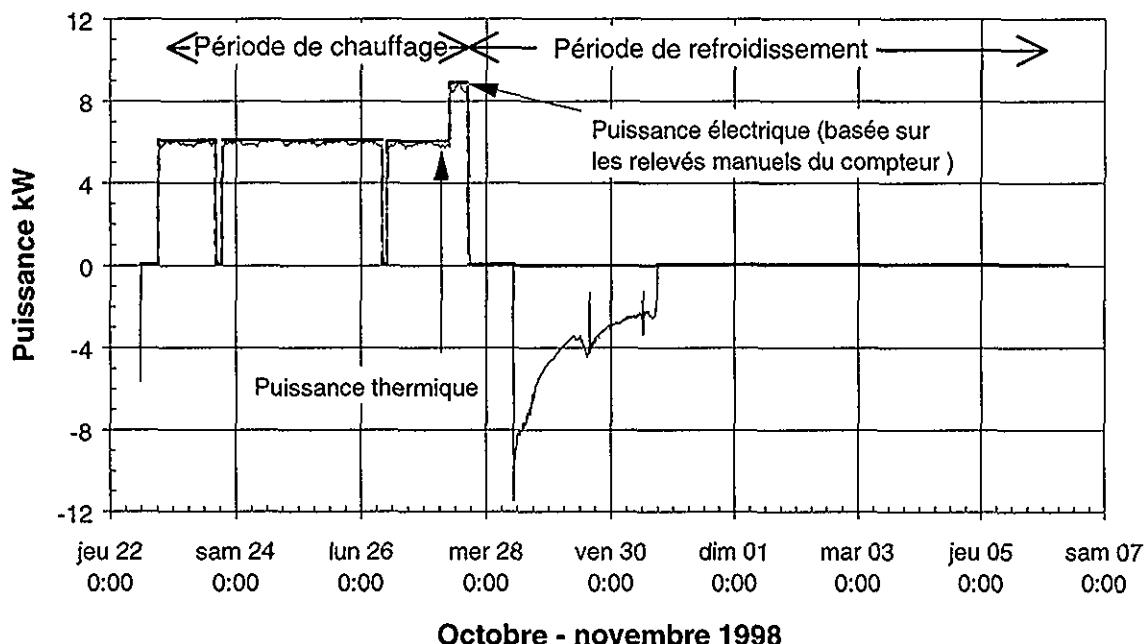


Figure A5.3 Evolution des puissances thermique et électrique lors du test n° 5.

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

Table A5.2 Bilan d'énergie relatif au test 5.

La température moyenne dans le pieu mesurée avec les capteurs TELEMAC est d'environ de 16°C-17°C avant de commencer à chauffer le pieu (le 22 octobre 1998). La température maximum est en moyenne de 32°C-33°C donc le  $\Delta T$  est de 15°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 TELEMAC 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 au tubes où passe le fluide caloporteur que d'autres (Figure A5.4).

Comme dans le test 4 le capteurs T33039 à 15.5 m mesure une température plus élevées que la moyenne dans le pieu (figures A5.4 et A5.5).

## ANNEXE 5, TEST 5

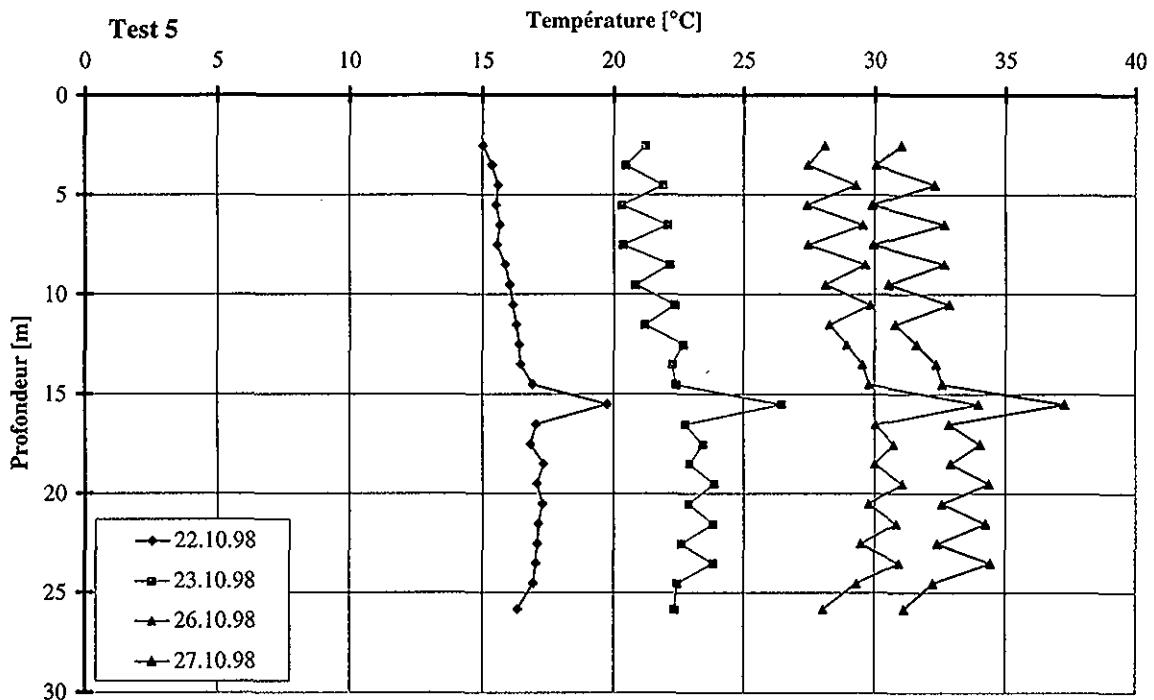


Figure A5.4 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de chauffage. Test 5.

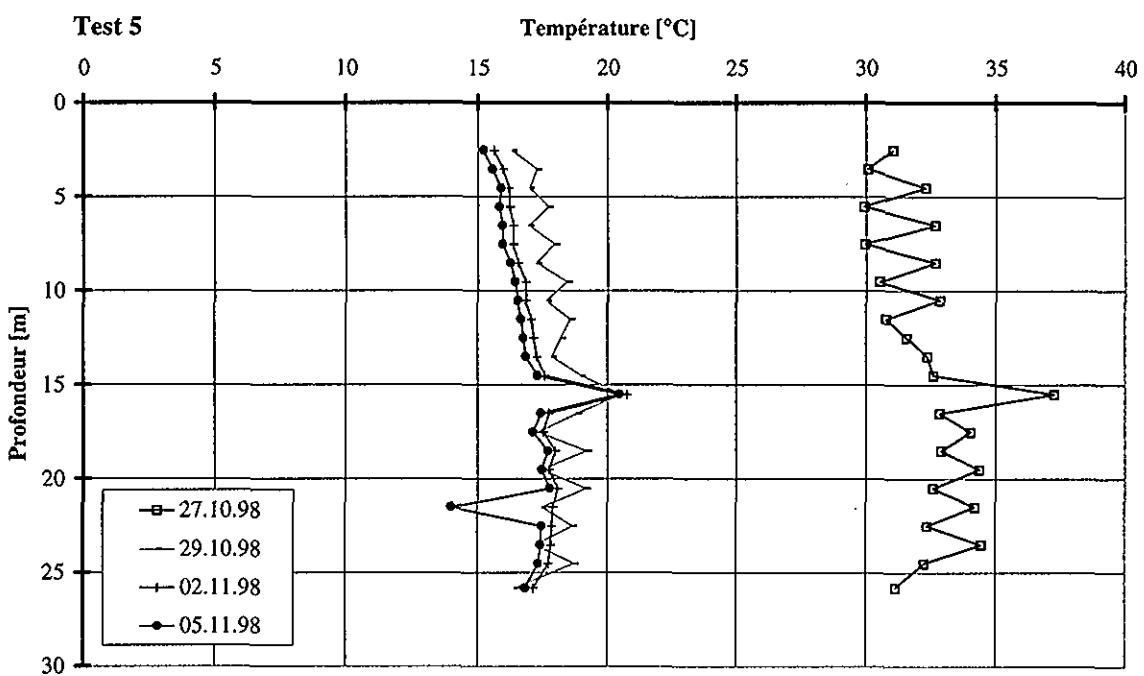


Figure A5.5 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 5.

## ANNEXE 5, TEST 5

### A5.4 Mesures mécaniques relatives au test 5

En plus des capteurs défectueux au test 4, le capteur FO 557 (à 12.5m) ne fonctionnent plus correctement.

Les figures A5.6 et A5.7 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

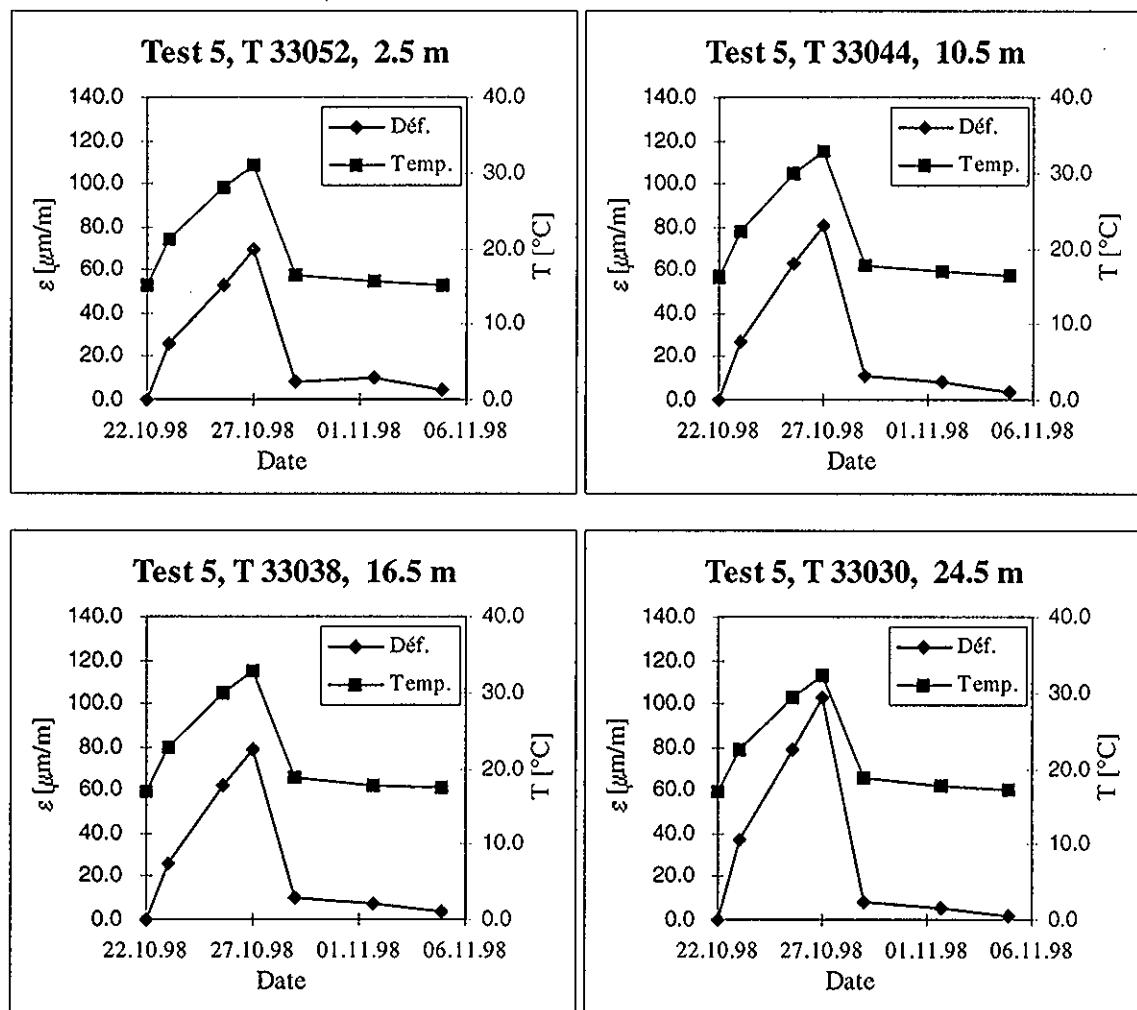


Figure A5.6 : Déplacement et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés au profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 5.

## ANNEXE 5, TEST 5

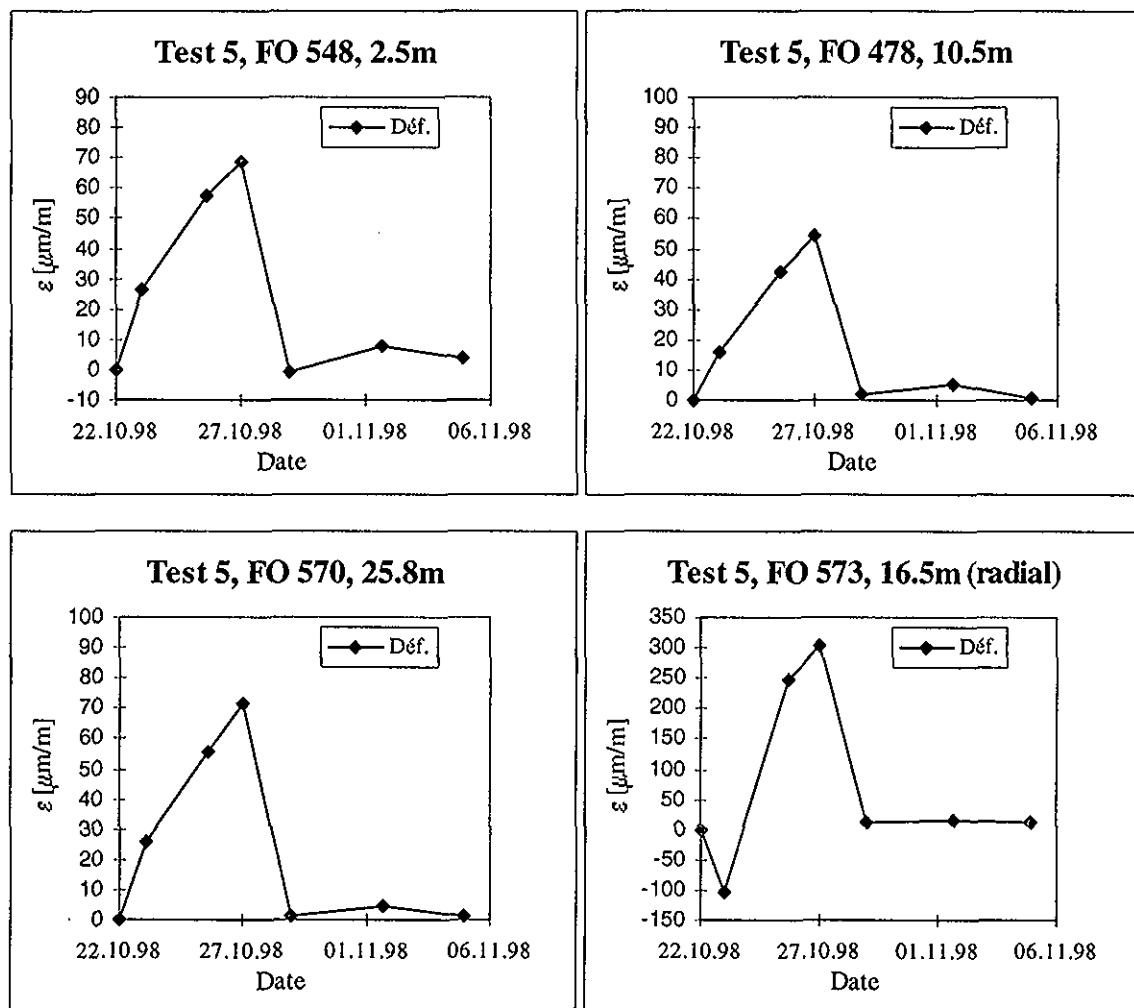


Figure A5.7 : Déplacements mesurés par fibres optiques (FO478, FO548, FO570, FO573).  
Test 5.

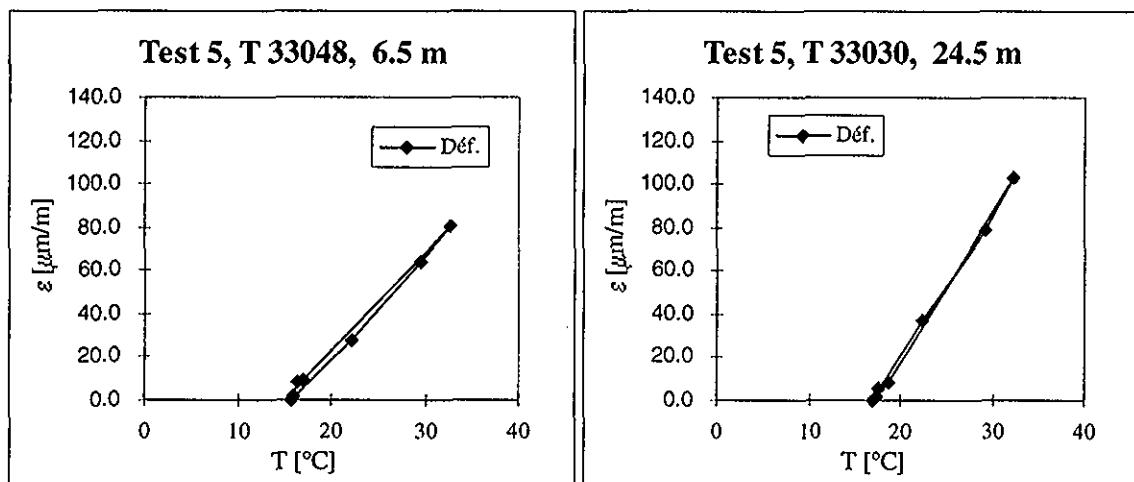


Figure A5.8 : Déformation en fonction de la température mesurée avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 6.5m ; 24.5m). Test 5.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement reste réversible, comme le montre la figure A5.8 où la déformation est dessinée en fonction de la température.

## ANNEXE 5, TEST 5

Le coefficient  $n\beta$  (défini dans l'ANNEXE 1) 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.

Avec l'augmentation de la température dans le pieu et donc avec sa dilatation on constate une légère augmentation de la pression sur la pointe du pieu (cellule de pression TELEMAC type CVC) comme le montre la figure A5.9. Comme déjà expliqué dans le test 3 (ANNEXE 3) cette variation de pression est très faible.

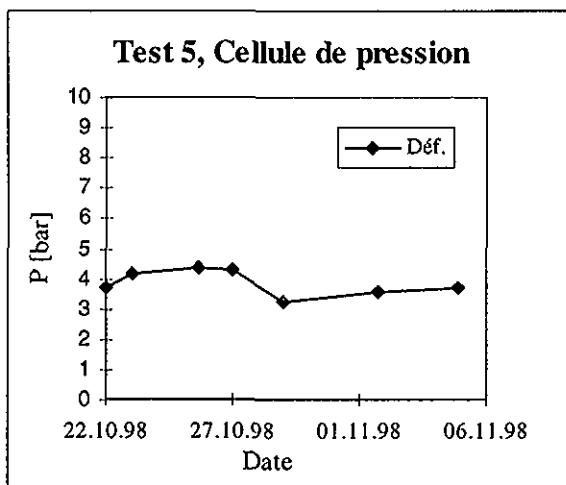


Figure A5.9 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test 5.

La totalité des mesures effectuées au cours du test 5 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

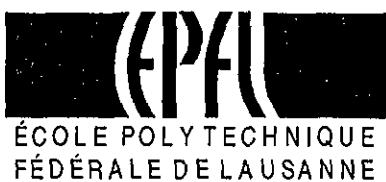
### A5.4 Conclusion

Le pieu, pendant le cinquième test, 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 10 jours.

La dalle, le parapet et les murs-colonne du troisième étage sont bétonnés lors de l'exécution du test 5. Il reste encore un étage et le toit à construire. Le coefficient  $n\beta$  par rapport au Test 1 est passé de  $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  à  $5.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , le pieu est de plus en plus hyperstatique ce qui conduit, en cas de chauffement du pieu, à une augmentation de la charge supplémentaire de compression due à l'effet thermique.

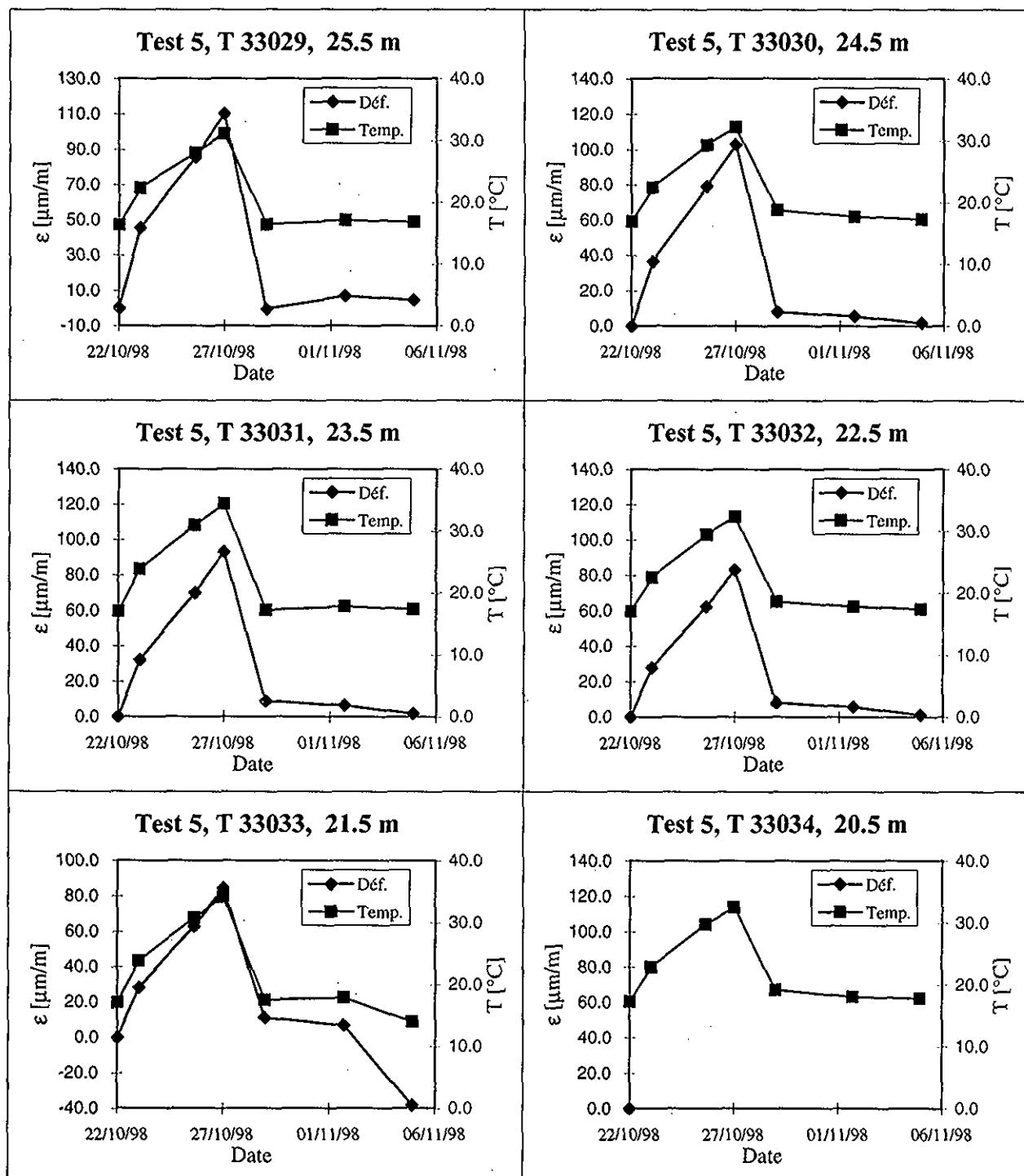
# TESTS

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



Pieu thermique - SY40  
 TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



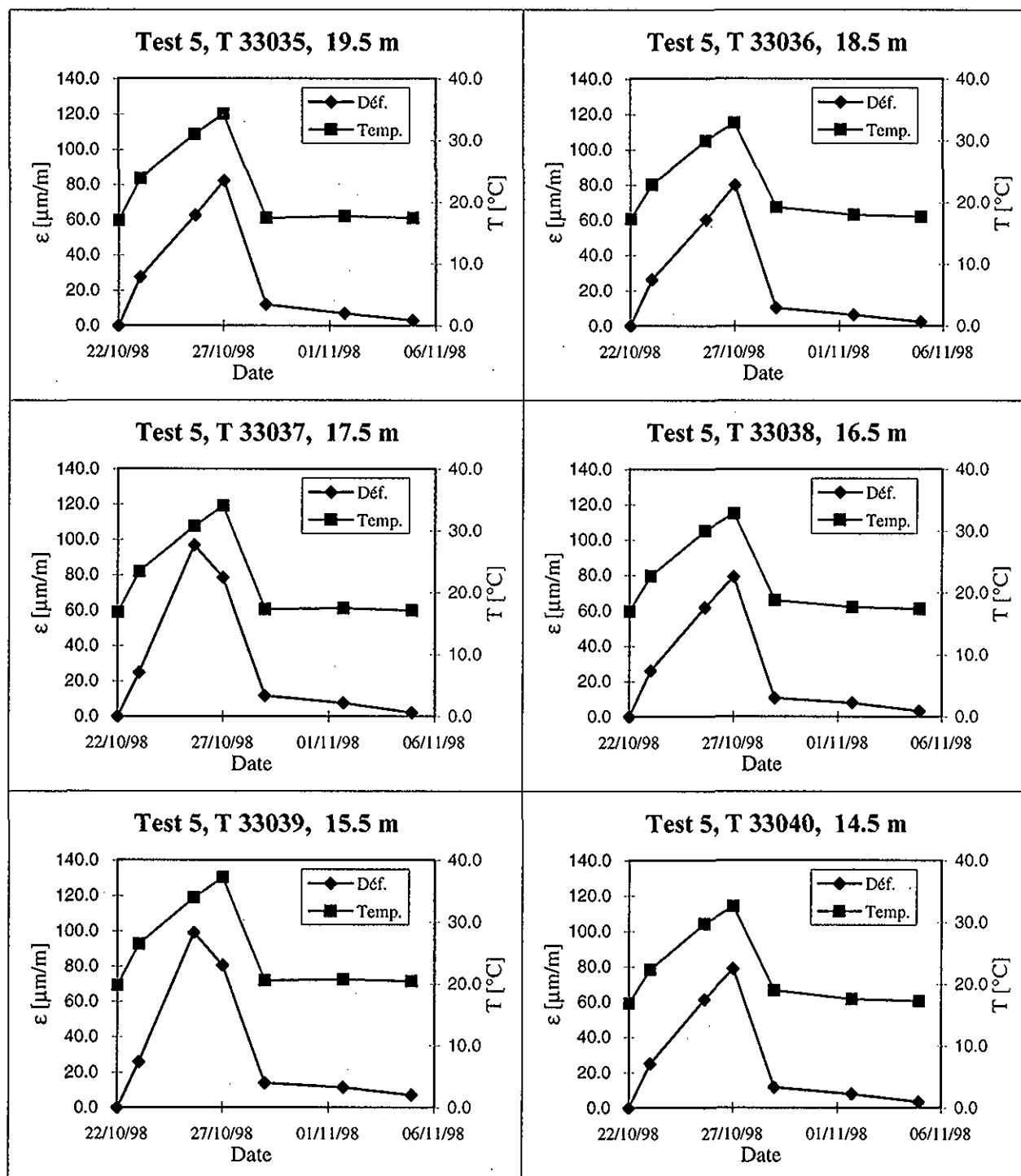
TESTS

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



Pieu thermique - SY40  
TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



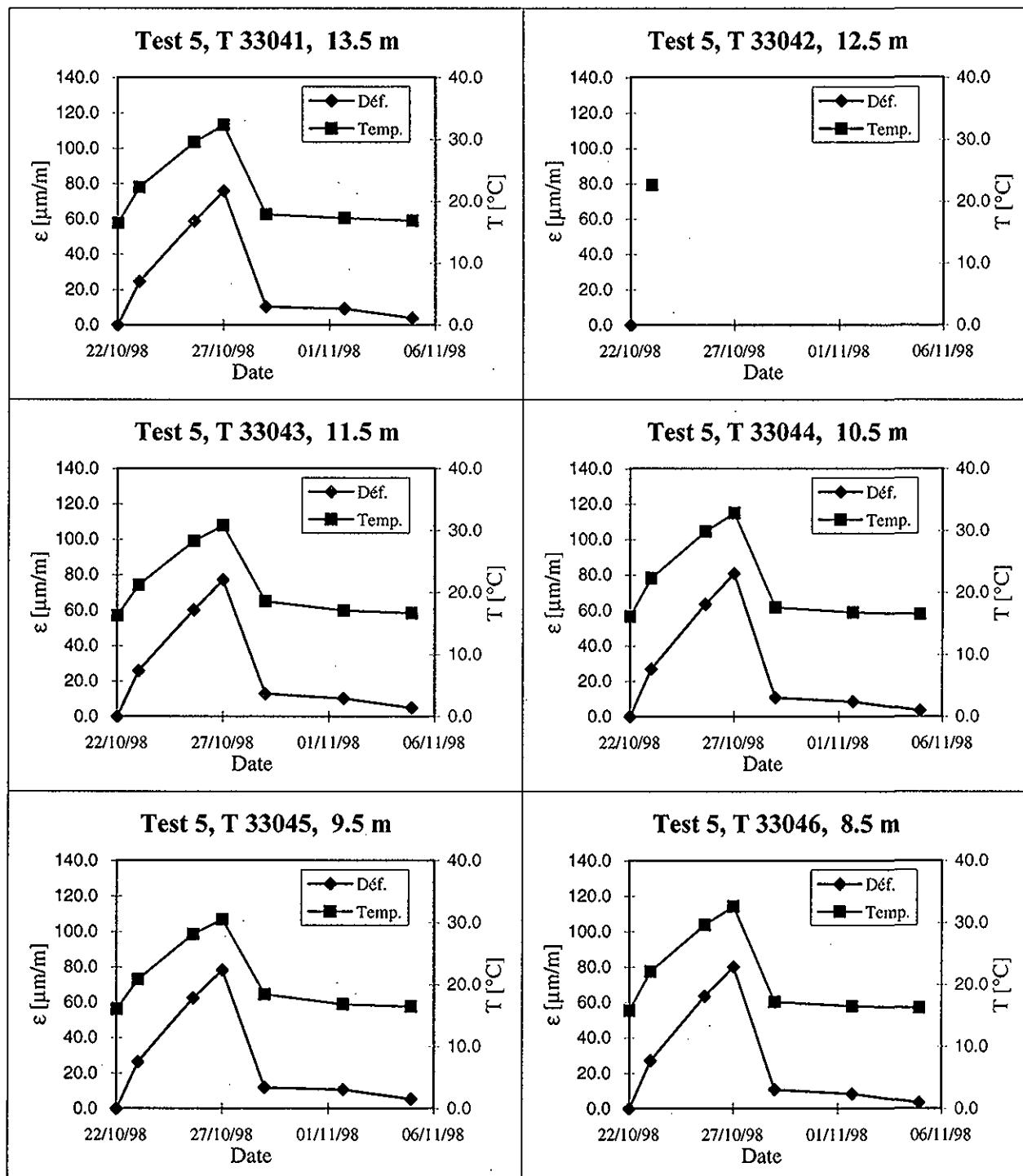
# TESTS

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



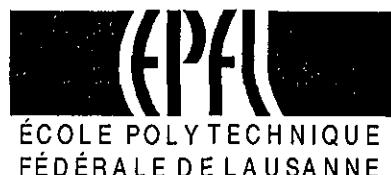
Pieu thermique - SY40  
TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



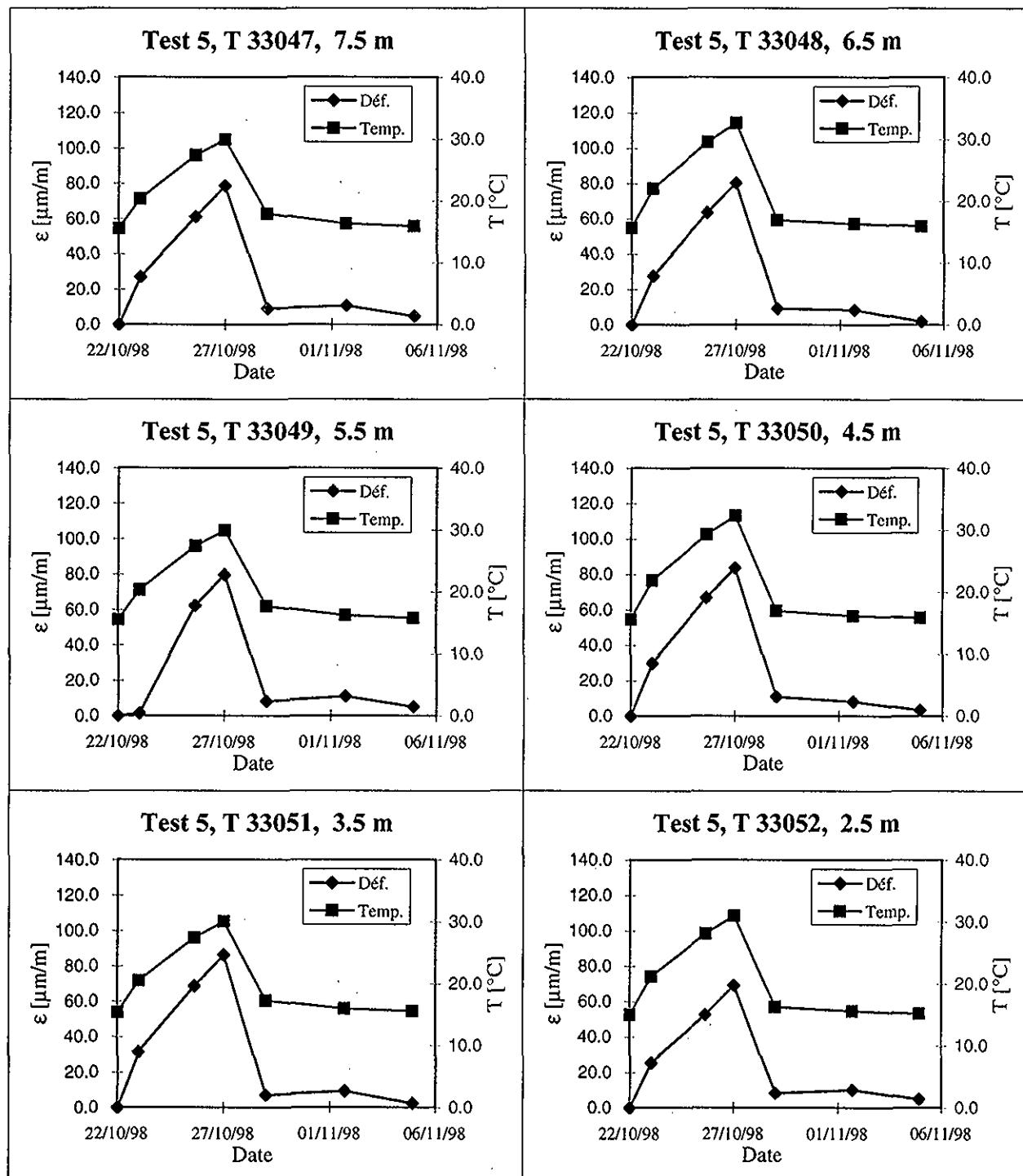
# TESTS

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



Pieu thermique - SY40  
TEST5

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



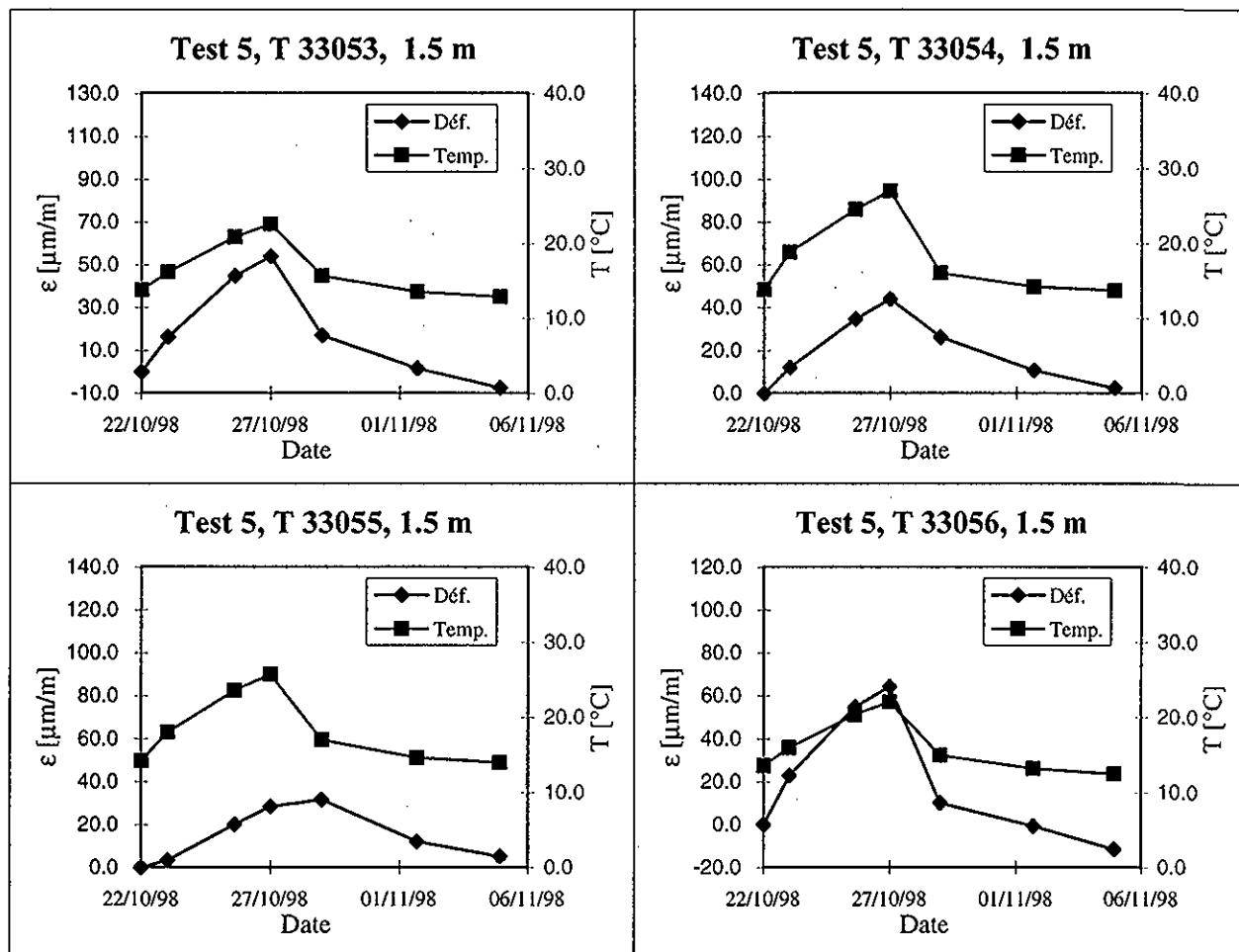
## TESTS

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



Pieu thermique - SY40  
 TESTS

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



# TESTS

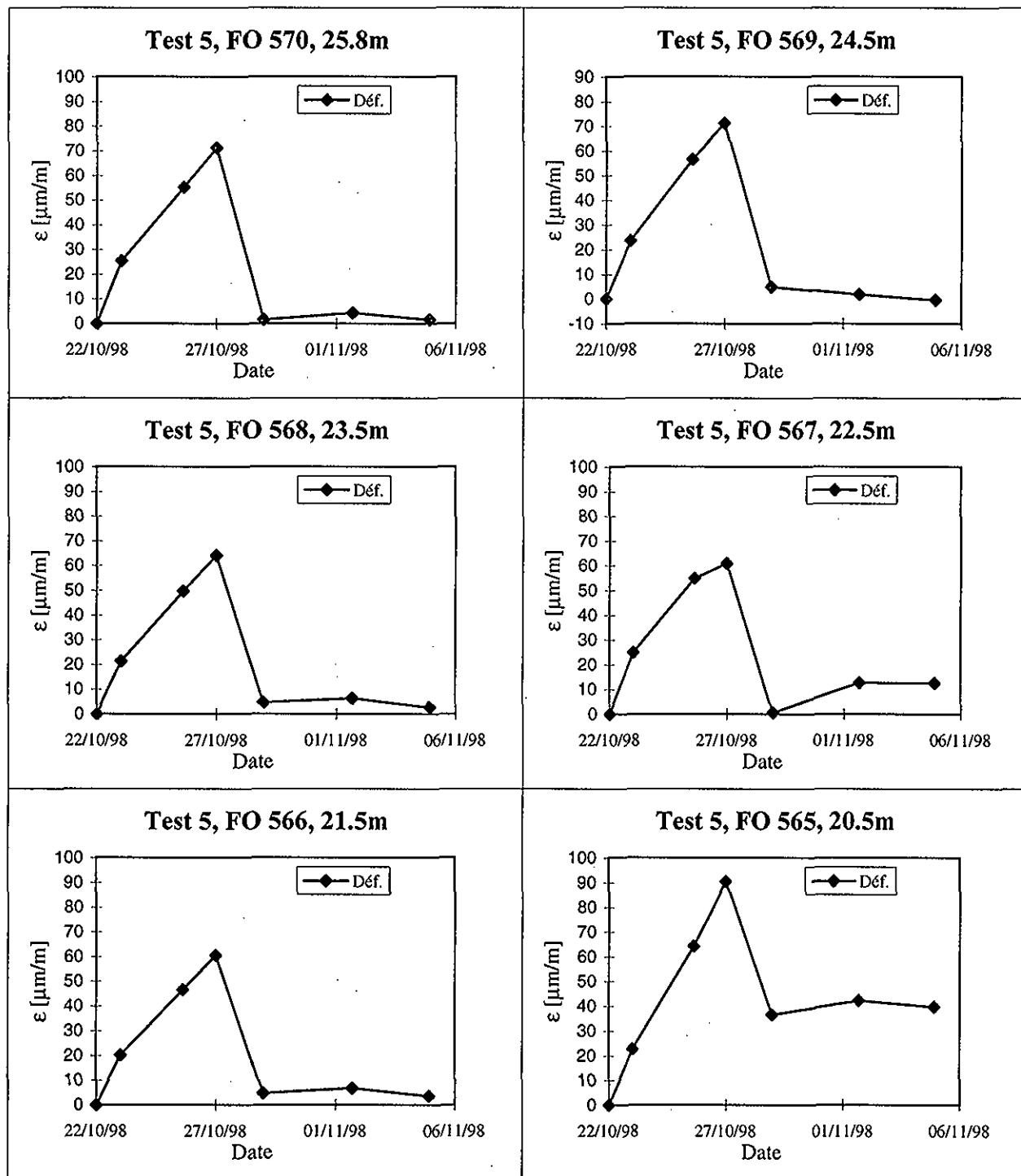
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS  
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



Pieu thermique - SY40  
TESTS

Capteurs à fibres optique

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE



# TESTS

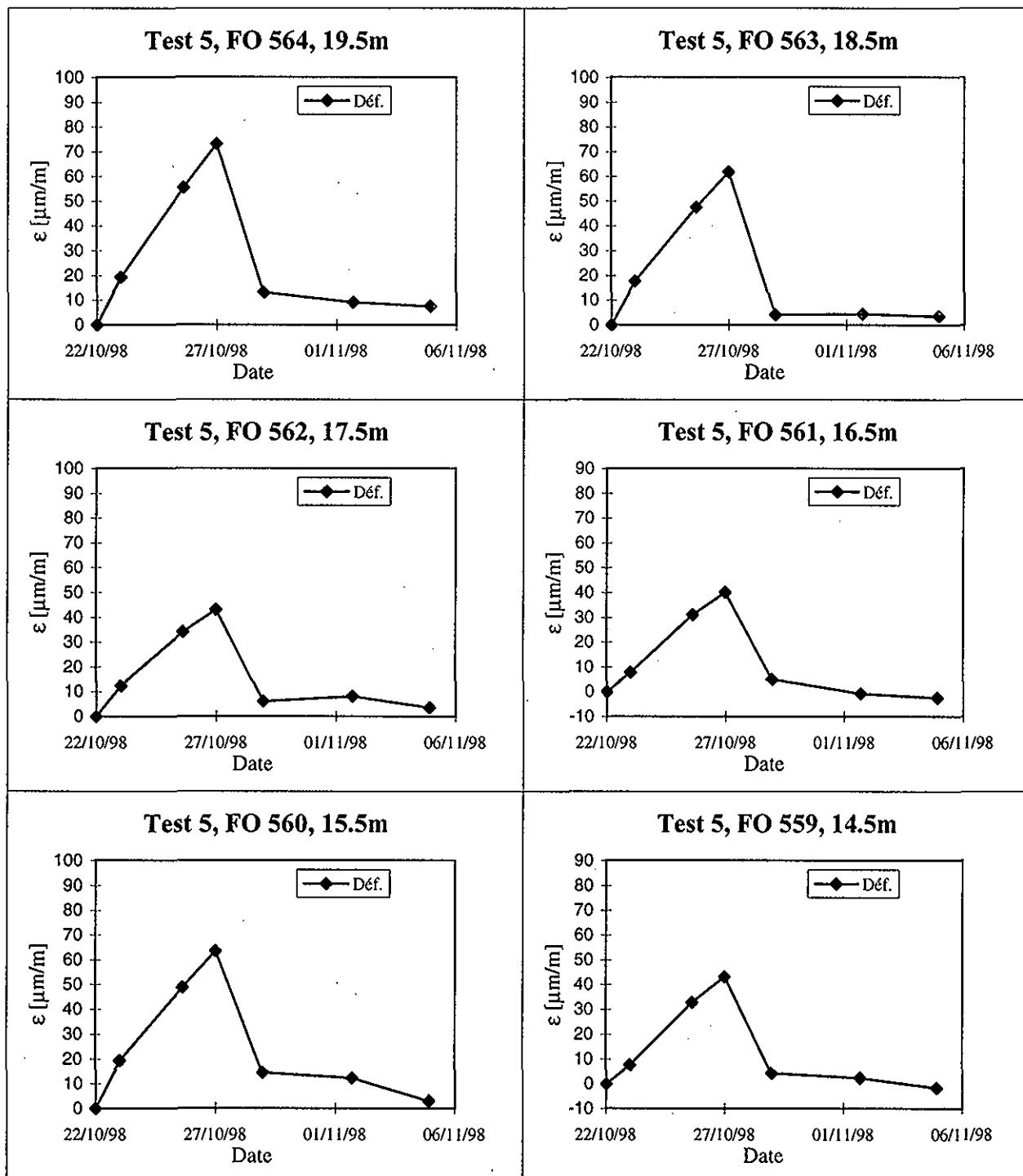
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL  
ISRF - INSTITUT DES SOLS, ROCHES ET FONDATIONS  
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40  
TEST5

Capteurs à fibres optique



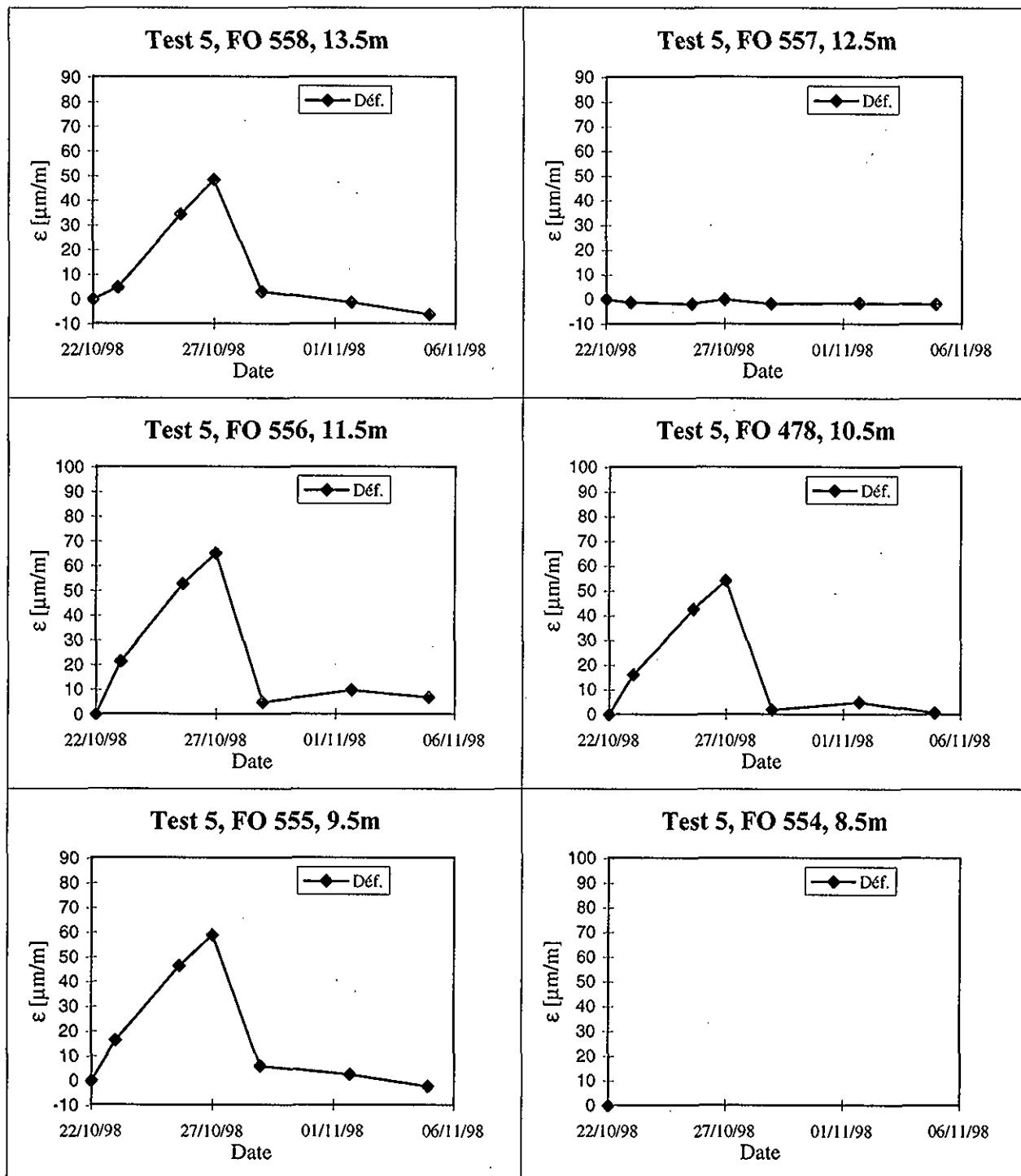
# TESTS

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



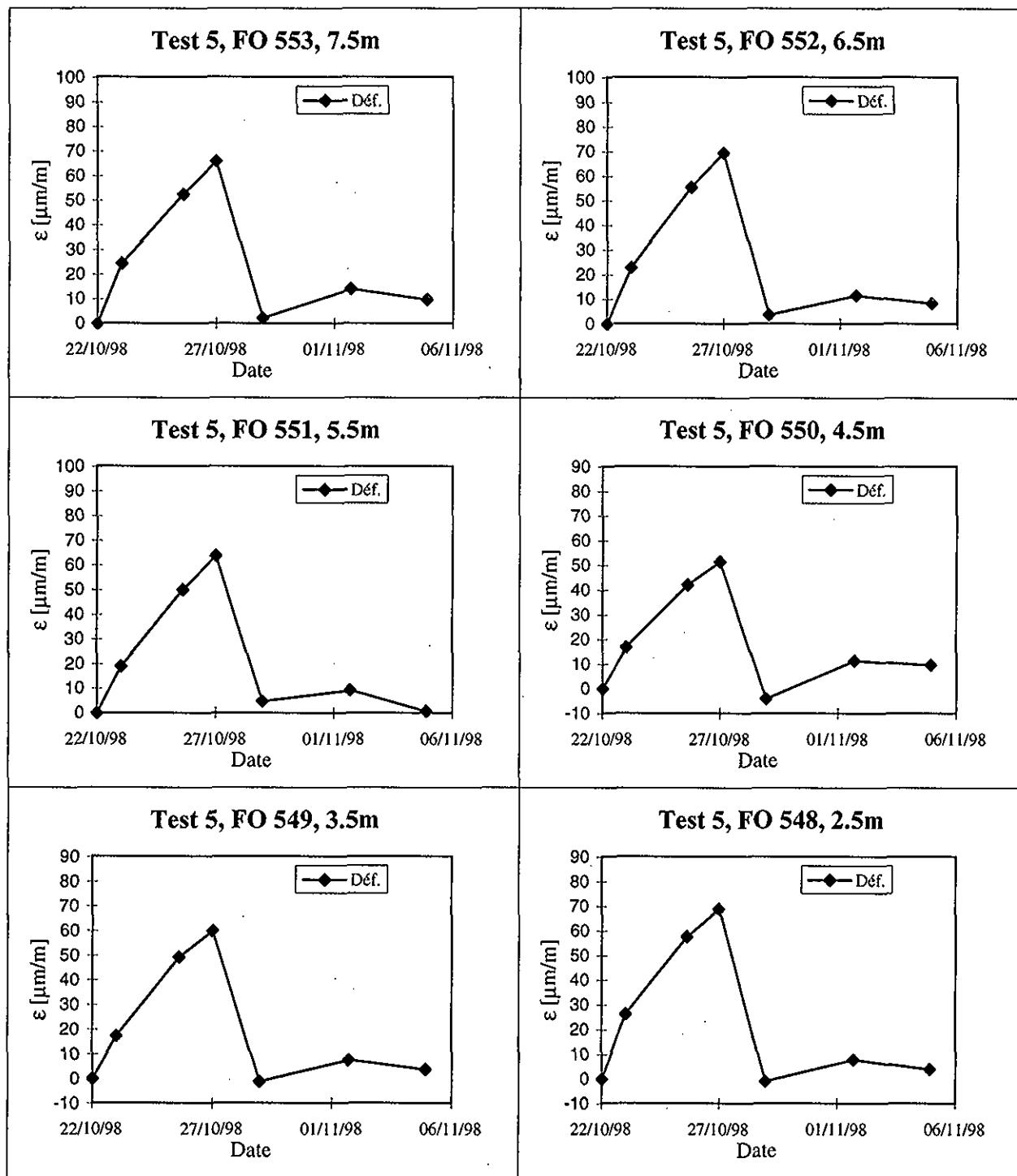
ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Pieu thermique - SY40      Capteurs à fibres optique  
TESTS



Pieu thermique - SY40  
 TEST5

Capteurs à fibres optique



# **ANNEXE 6**

## **TEST 6**

## ANNEXE 6, TEST 6

### TEST 6 SUR LE PIEU ECHANGEUR DU QUARTIER NORD DE L'EPFL

#### A6.1 Etape de construction lors du test 6

Le dernier étage est construit lors de l'exécution du test 6 (Figure A6.1, zone grise), seulement le toit doit être encore construit.

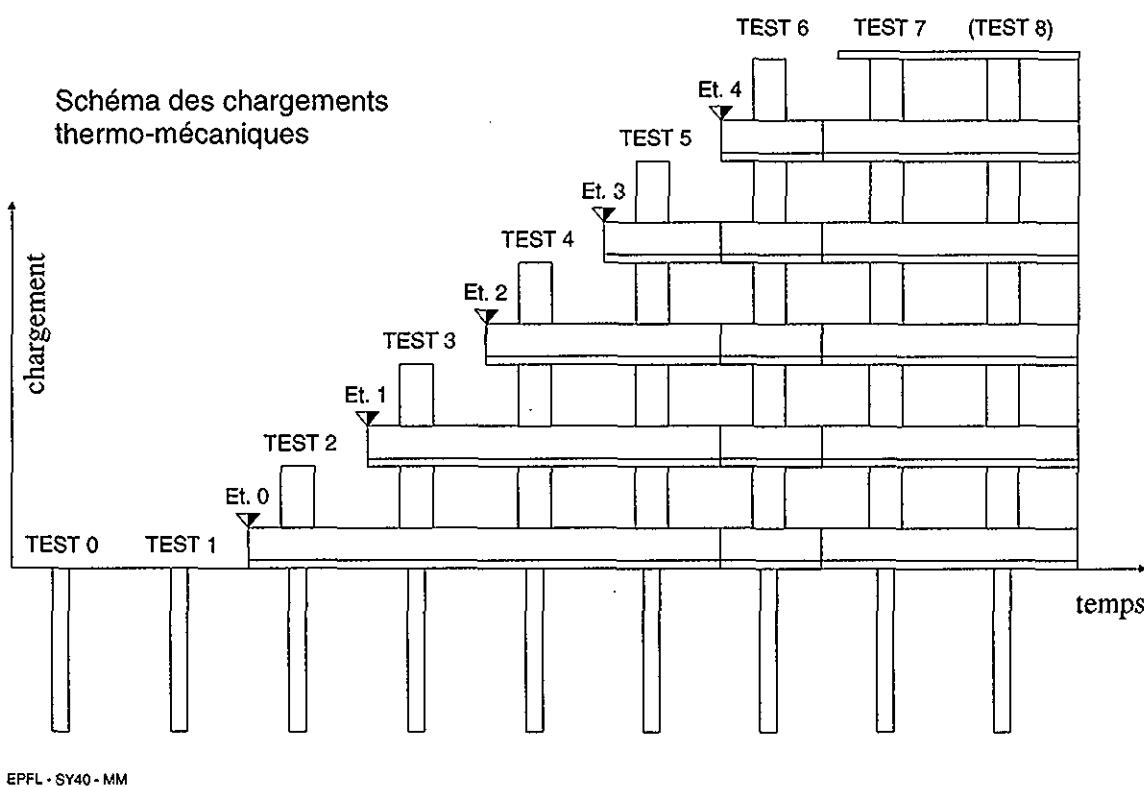


Figure A6.1 : Etape de construction lors du test 6.

#### A6.2 Déroulement chronologique du test 6

Le déroulement du test est résumé dans la table A6.1. 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.

## ANNEXE 6, 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	Encلنchemen pompe de circulation	
Mercre. 18 nov. 98 16:50	Encلنchemen 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
Lundi 23 nov. 98 08:30	Mesures capteurs TELEMAC 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 TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Mercre. 24 nov. 98 16:30	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 30 nov. 98 10:00	Mesures capteurs TELEMAC et fibres optiques	Refroidissement passif
Lundi 7 déc. 98 11:00	Fin des mesures relatives au module de chauffage. La pompe reste enclenchée.	

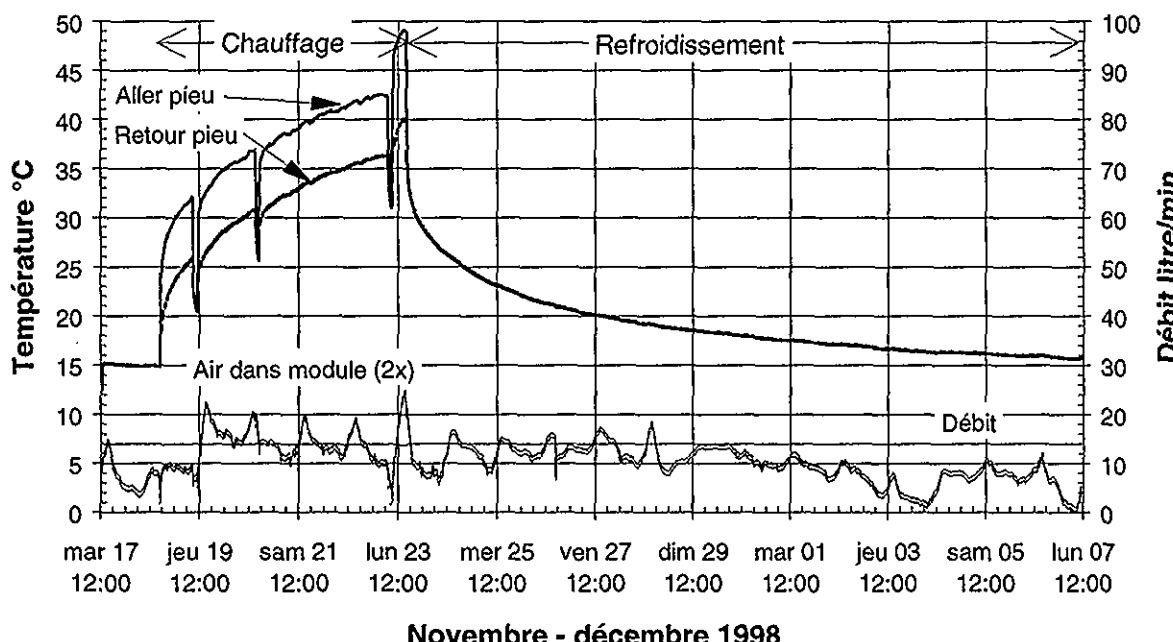
Table A6.1 Déroulement chronologique du test 6.

### A6.3 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 A6.2, les évolutions des températures et du débit sont montrées pour le test 6. Les puissances thermique et électrique correspondantes sont montrées dans la figure A6.3. La puissance électrique est consommée par les corps de chauffe et la pompe. Dans la table A6.2, les énergies électriques et thermiques sont indiquées pour les principales phases du test.

## ANNEXE 6, TEST 6

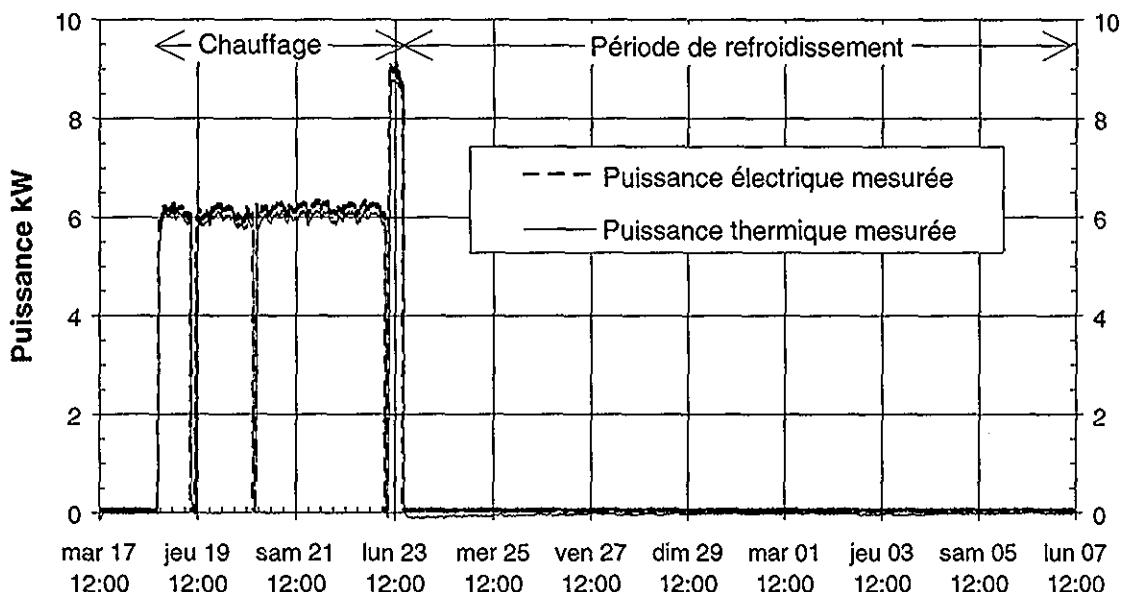
### TEST 6 Mesures thermiques sur le pieu échangeur du quartier nord de l'EPFL



Novembre - décembre 1998

Figure A6.2 : 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 n° 6.

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



Novembre - décembre 1998

Figure A6.3 : Evolution des puissances thermique et électrique lors du test n° 6.

Avant l'enclenchement du chauffage, la température moyenne de l'eau est mesurée à 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.

## ANNEXE 6, TEST 6

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

Table A6.2 : Bilan d'énergie relatif au test 6.

La différence de température imposée au pieu pendant le test 6 est d'environ 15°C (figure A6.4 et A6.5). Comme dans les tests précédents, on note toujours une différence de température entre les TELEMAC posés d'une côté du pieu par rapport à ceux posés de l'autre côté. Cette différence est due au fait que certains capteurs sont plus proches des tubes où passe le fluide caloporteur que d'autres (figure A6.4).

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

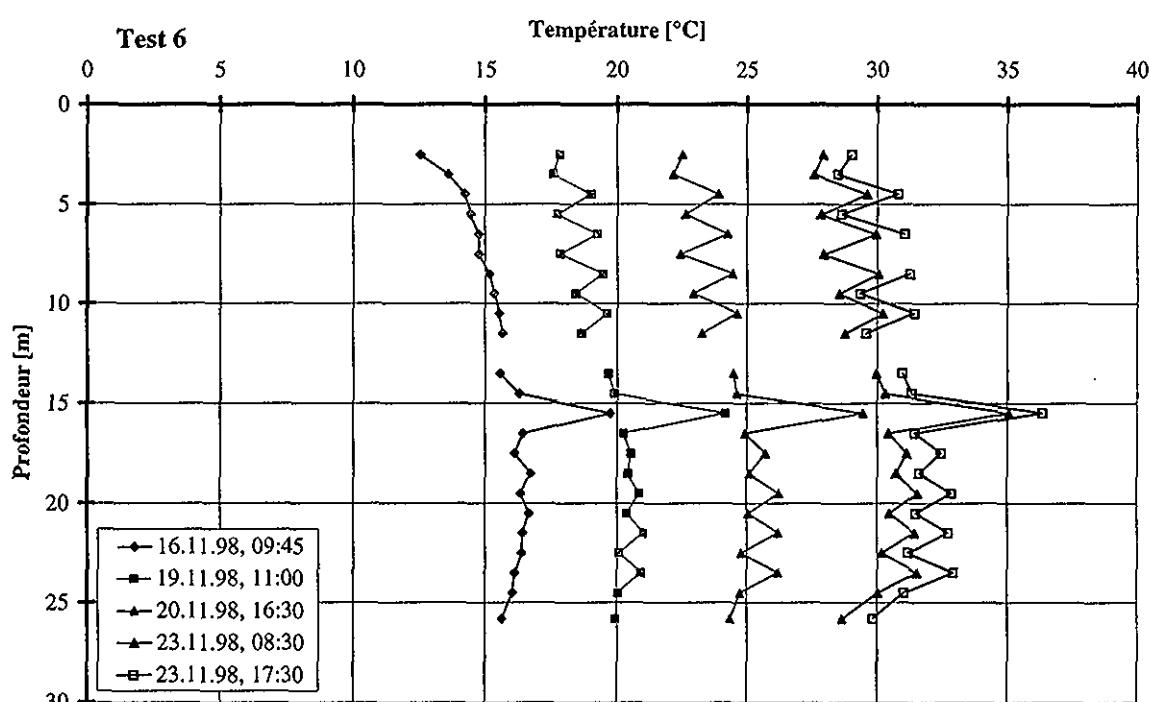


Figure A6.4 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps, en phase de chauffage. Test 6

## ANNEXE 6, TEST 6

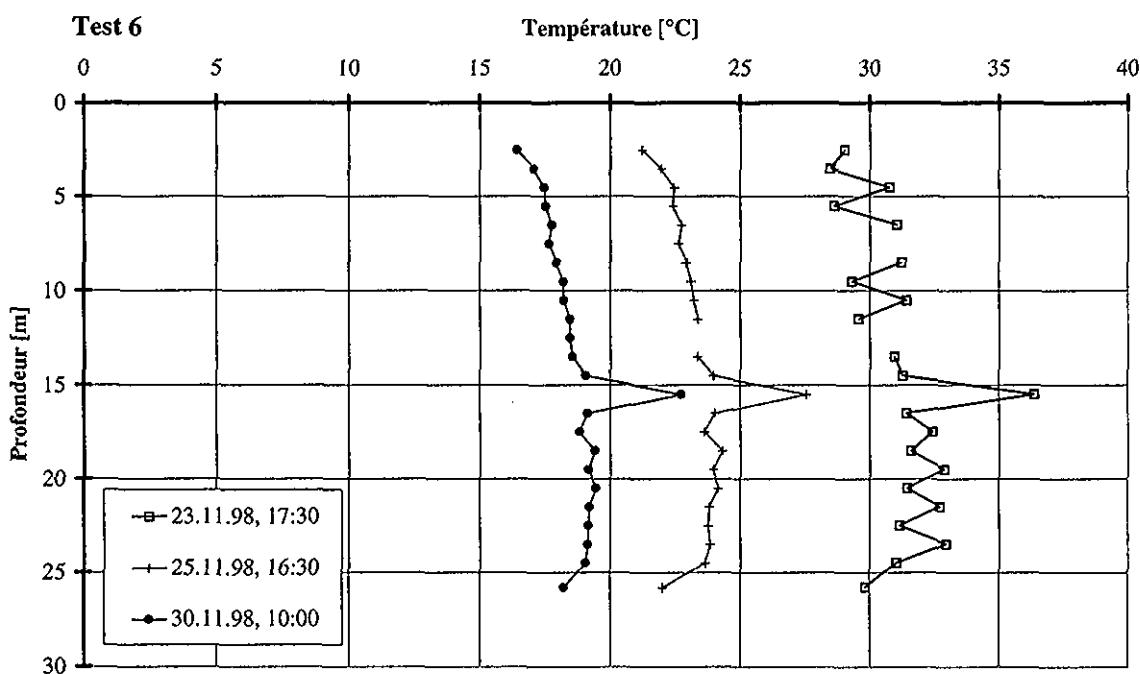


Figure A6.5 : Variation de la température le long du pieu en fonction du temps en phase de refroidissement. Test 6.

### A6.4 Mesures mécaniques relatives au test 6

Les capteurs qui ont des problèmes ou qui ne fonctionnent pas correctement sont les mêmes que ceux du test 5.

Les figures A6.6 et A6.7 montrent les valeurs des déformations et des températures à quatre profondeurs différentes, mesurées par les TELEMAC et les fibres optiques.

Les fibres optiques et les capteurs TELEMAC montrent un allongement du pieu sous la sollicitation thermique ( $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ).

## ANNEXE 6, TEST 6

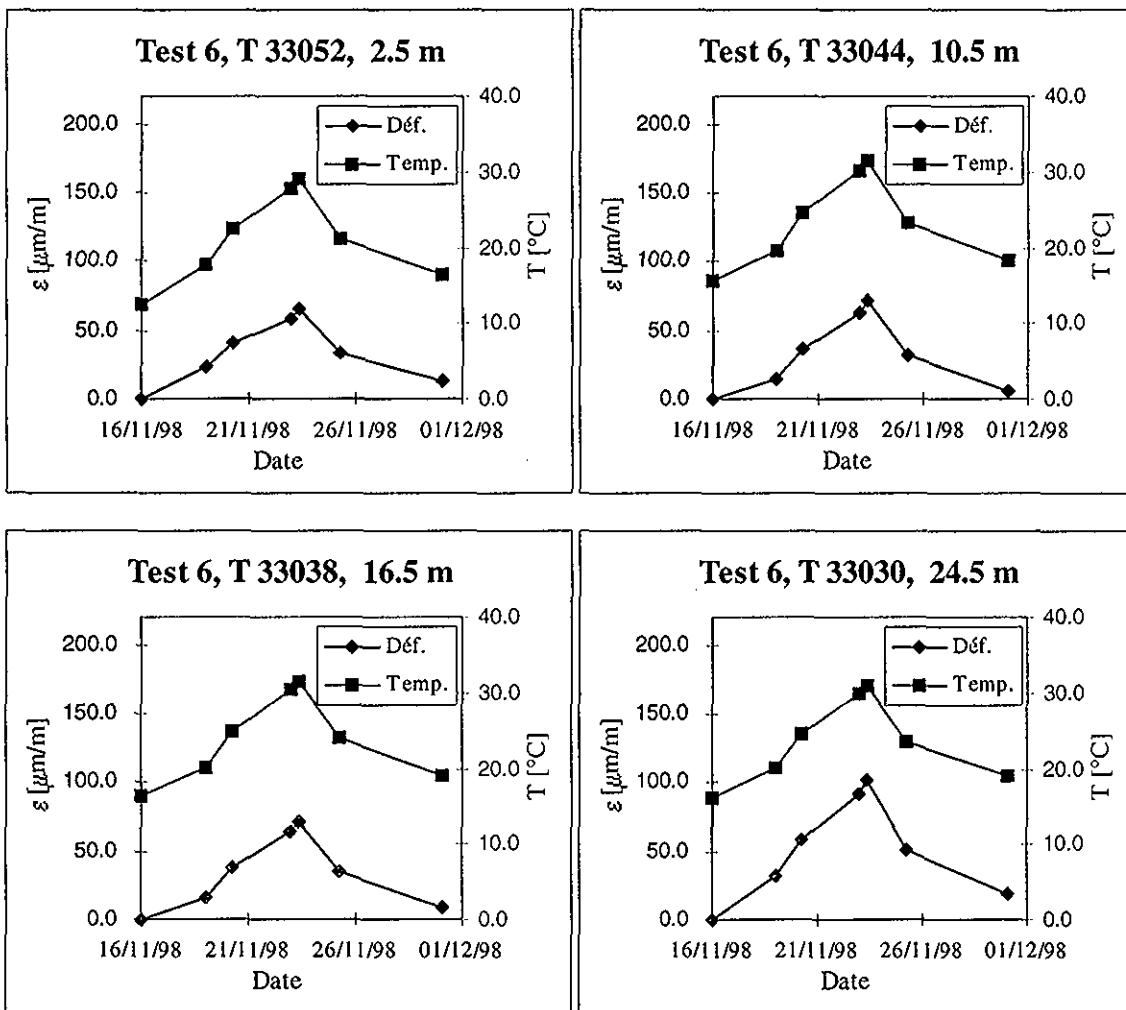


Figure A6.6 : Déplacement et température en fonction du temps mesurés avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés au profondeurs suivantes : 2.5m ; 10.5m ; 16.5m ; 24.5m). Test 6.

## ANNEXE 6, TEST 6

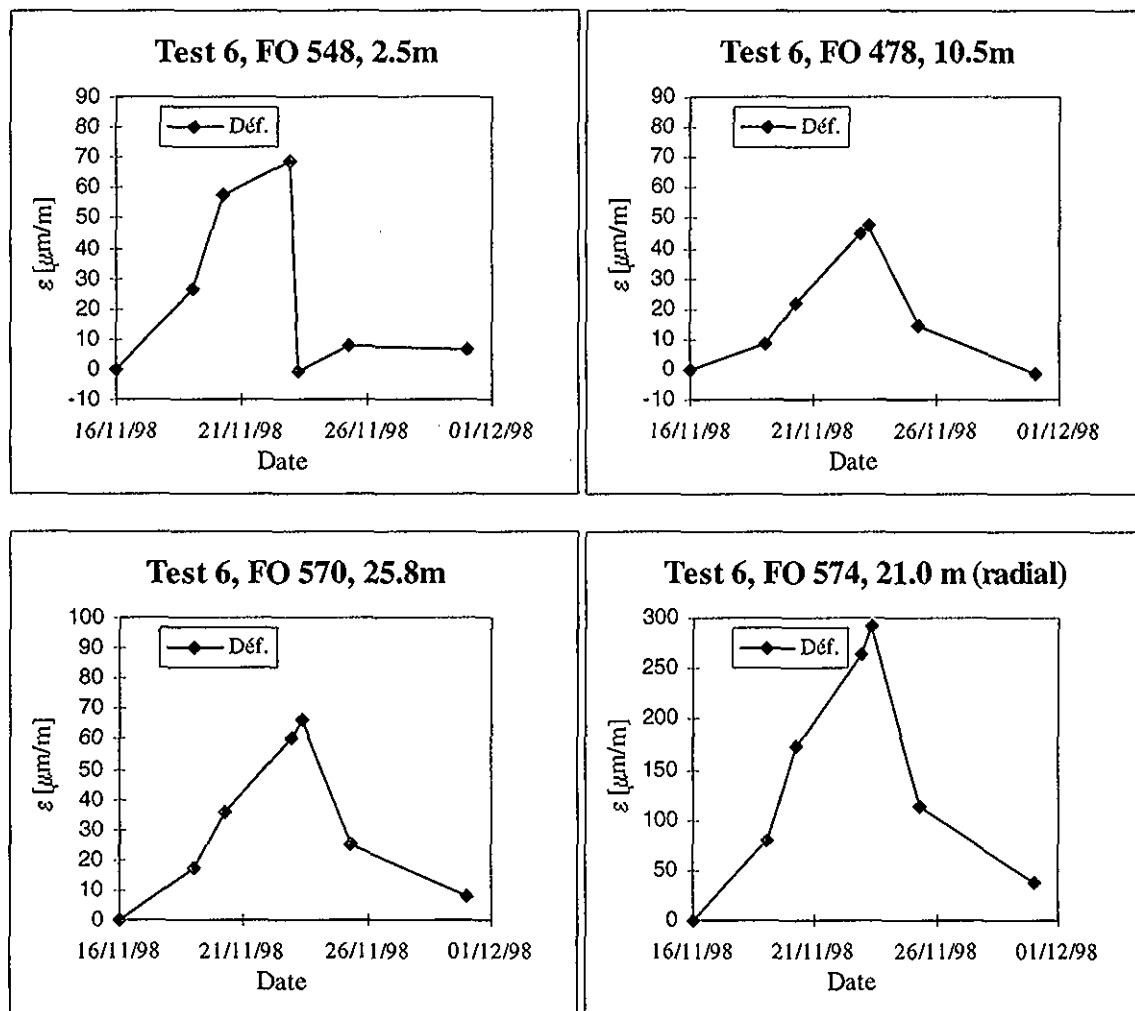


Figure A6.7 : Déplacements mesurés par fibres optiques (FO 548, FO 478, FO 570, FO574). Test 6.

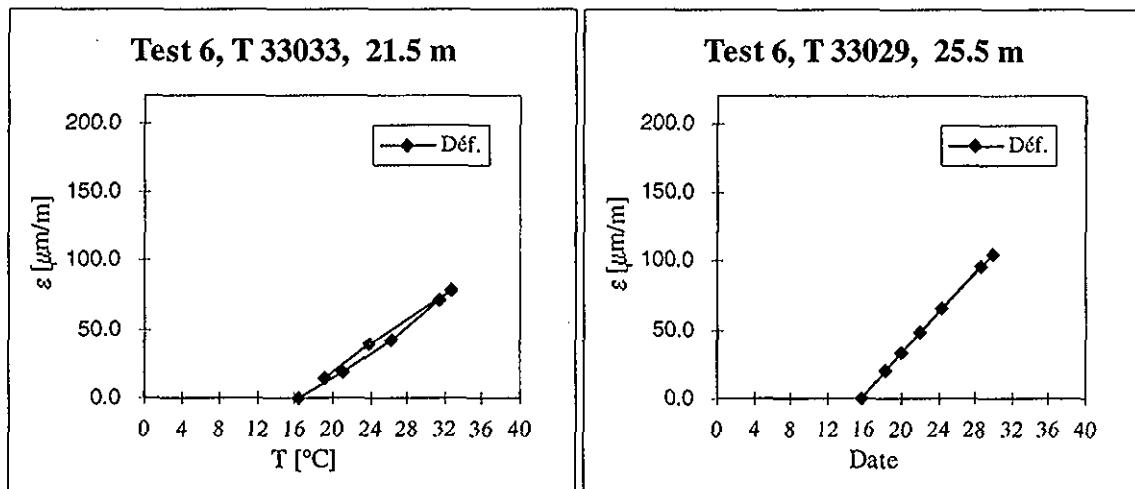


Figure A6.8 : Déformation en fonction de la température mesurées avec les extensomètres à corde vibrante TELEMAC (Capteurs posés aux profondeurs suivantes : 21.5m ; 25.5m). Test 6.

Le comportement du pieu soumis à un cycle de chauffage-refroidissement reste réversible, comme le montre la figure A6.8. Le coefficient  $n\beta$  (défini dans l'ANNEXE 1) est le même

## ANNEXE 6, TEST 6

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.

La cellule de pression TELEMAC, type CVC, sous la pointe du pieu ne mesure aucune variation de pression (figure A6.9).

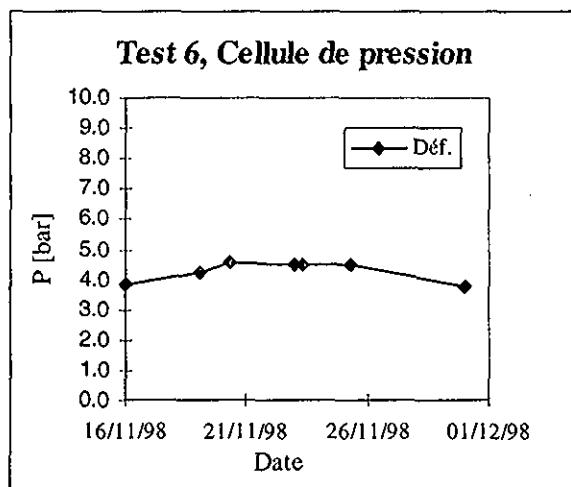


Figure A6.9 : Pression au fond du pieu , cellule de pression TELEMAC type CVC. Test 6.

La totalité des mesures effectuées au cours du test 6 sont présentées dans les figures qui suivent la conclusion (La numérotation des pages de ces figures est indépendante de celle de cette annexe).

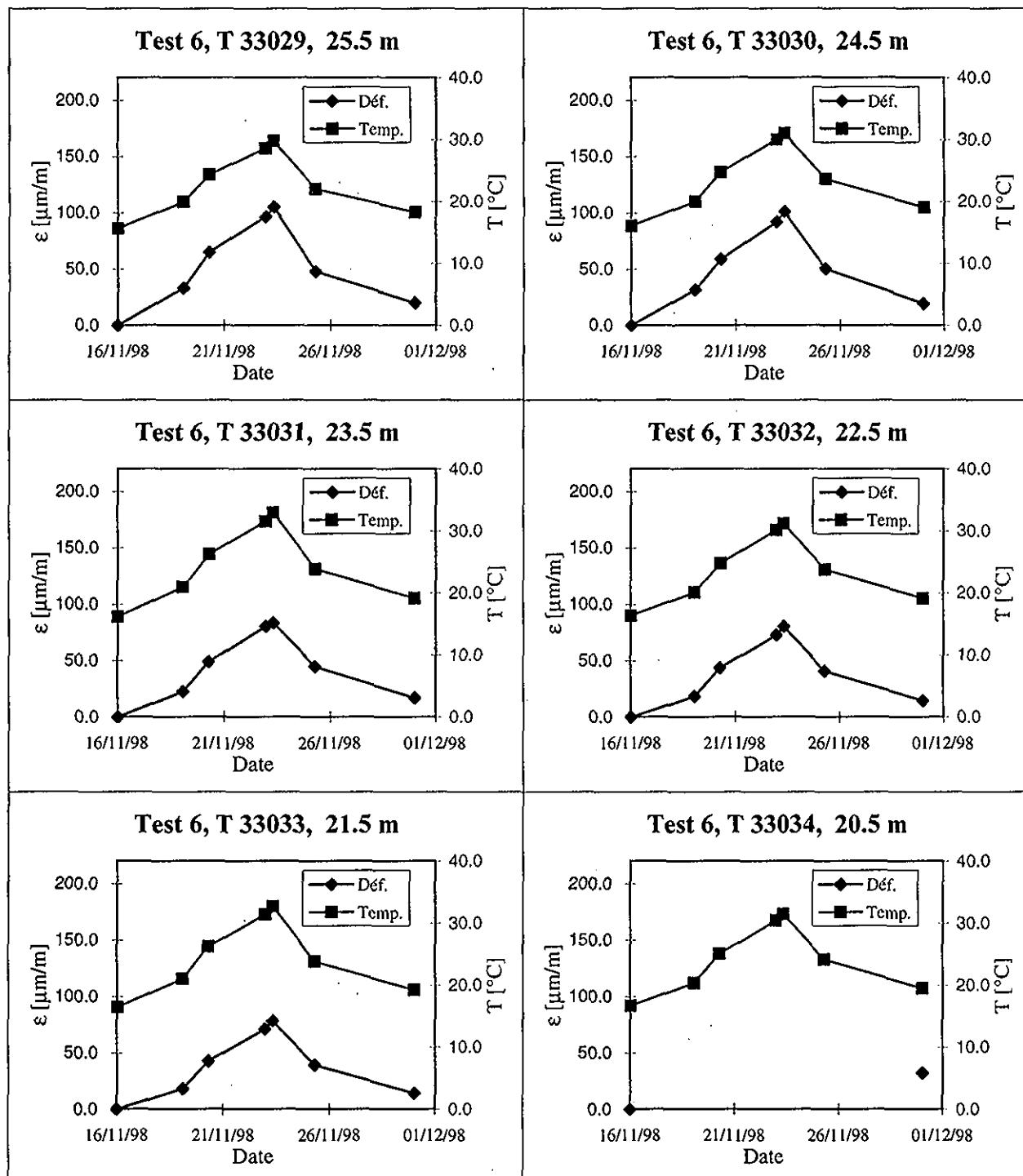
### A6.4 Conclusion

Le pieu, pendant le sixième test, 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.

Le coefficient  $n\beta$  s'est stabilisé à  $5.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (même valeur que pendant le test 5).

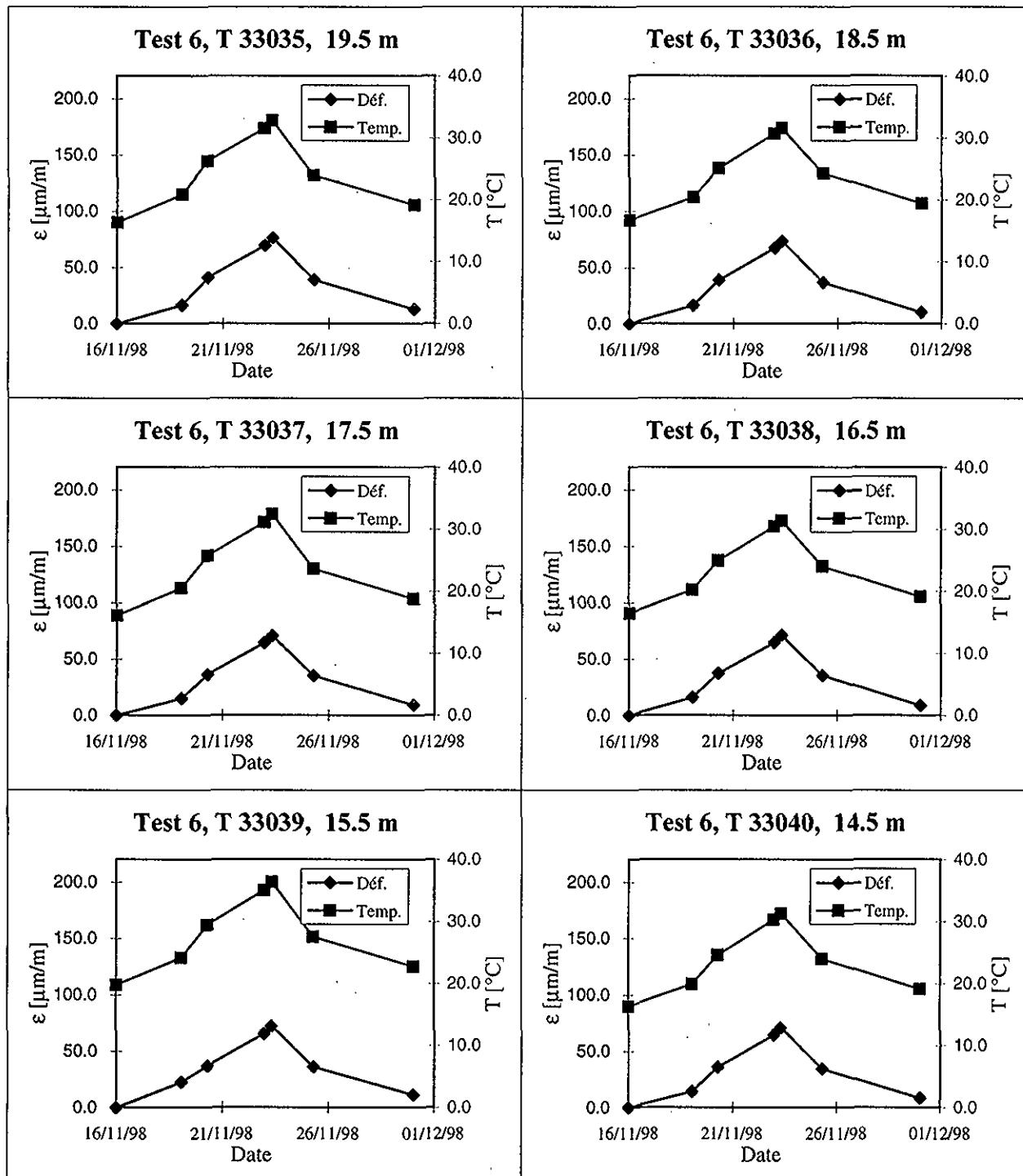
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



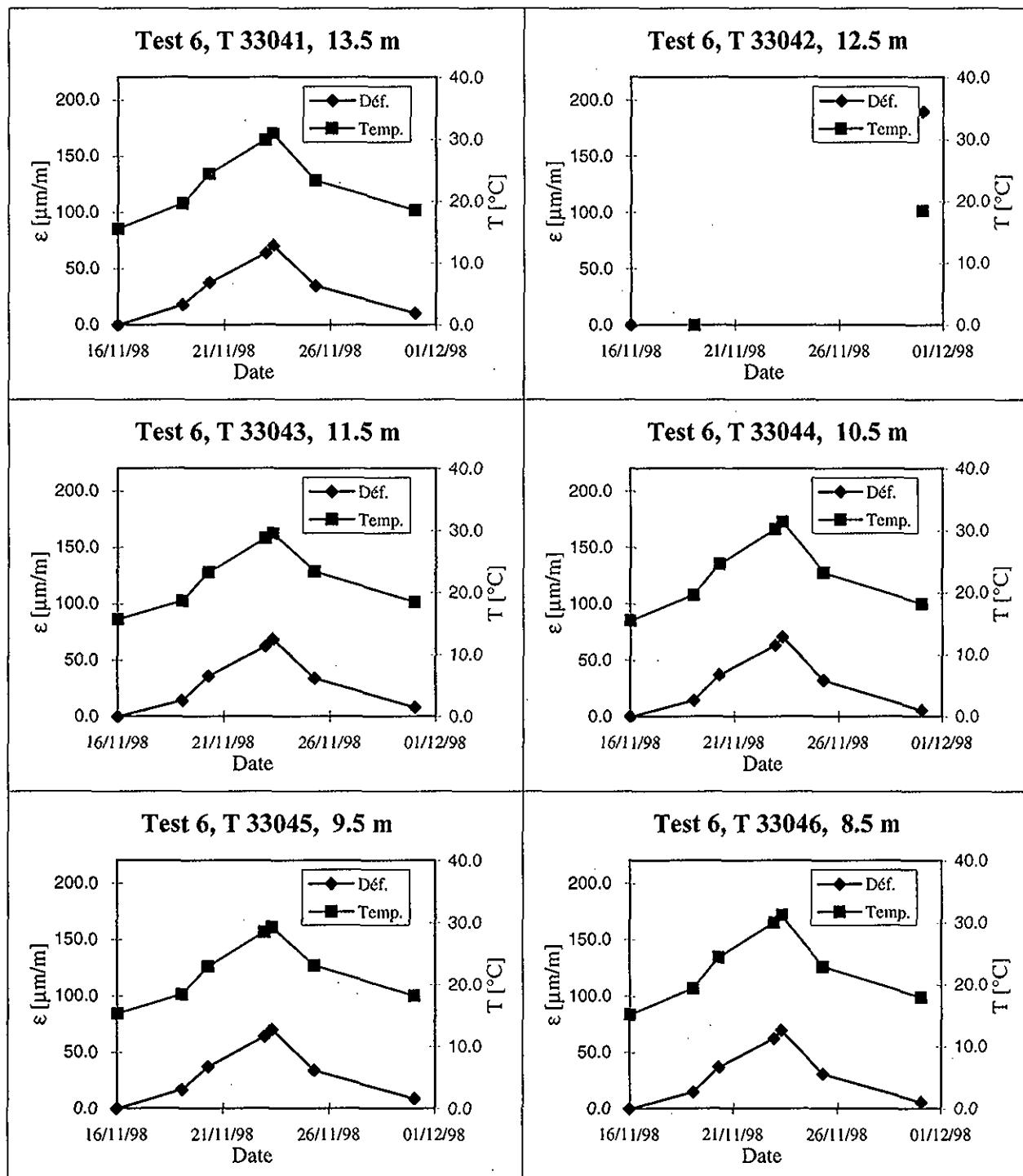
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



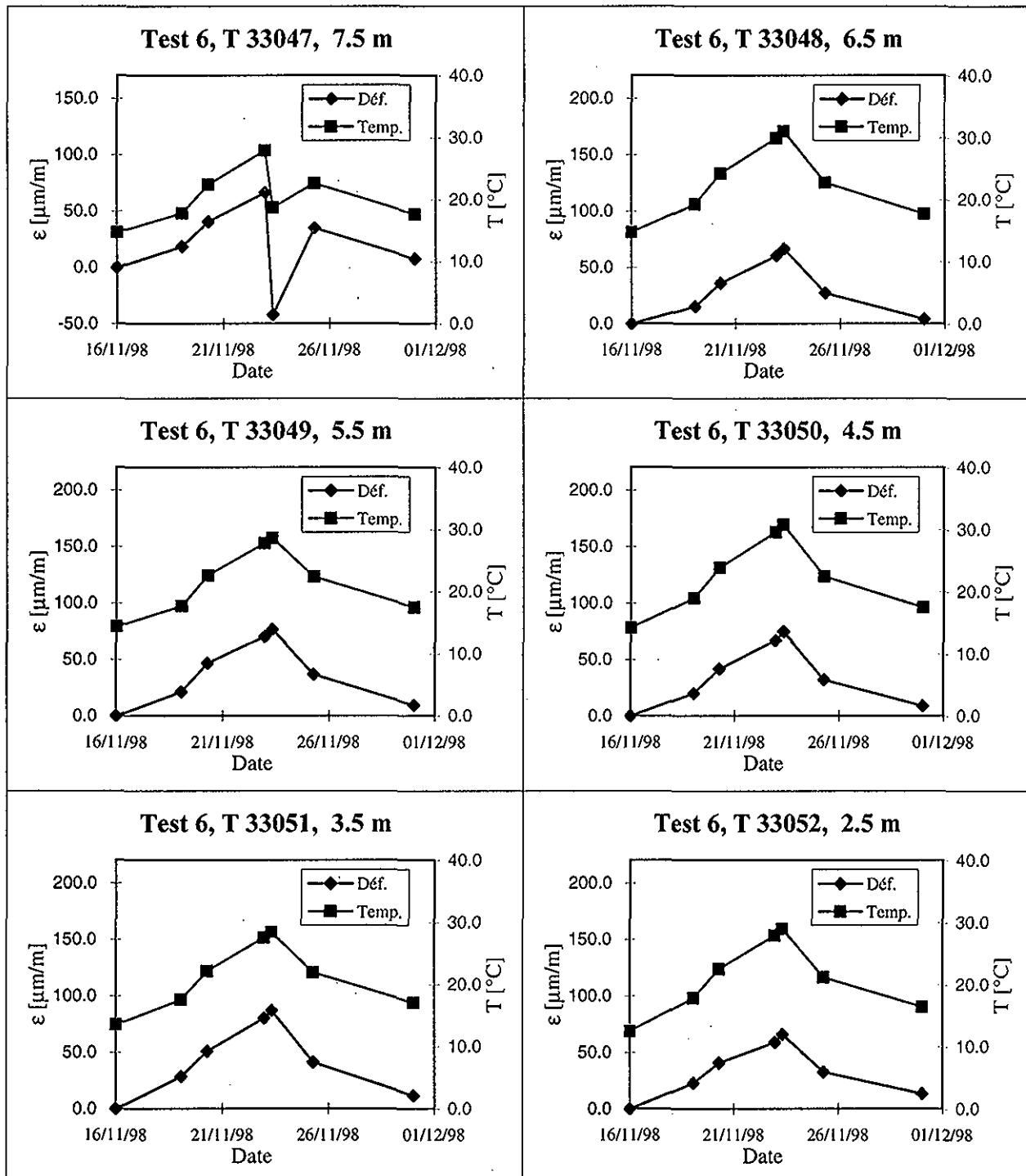
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



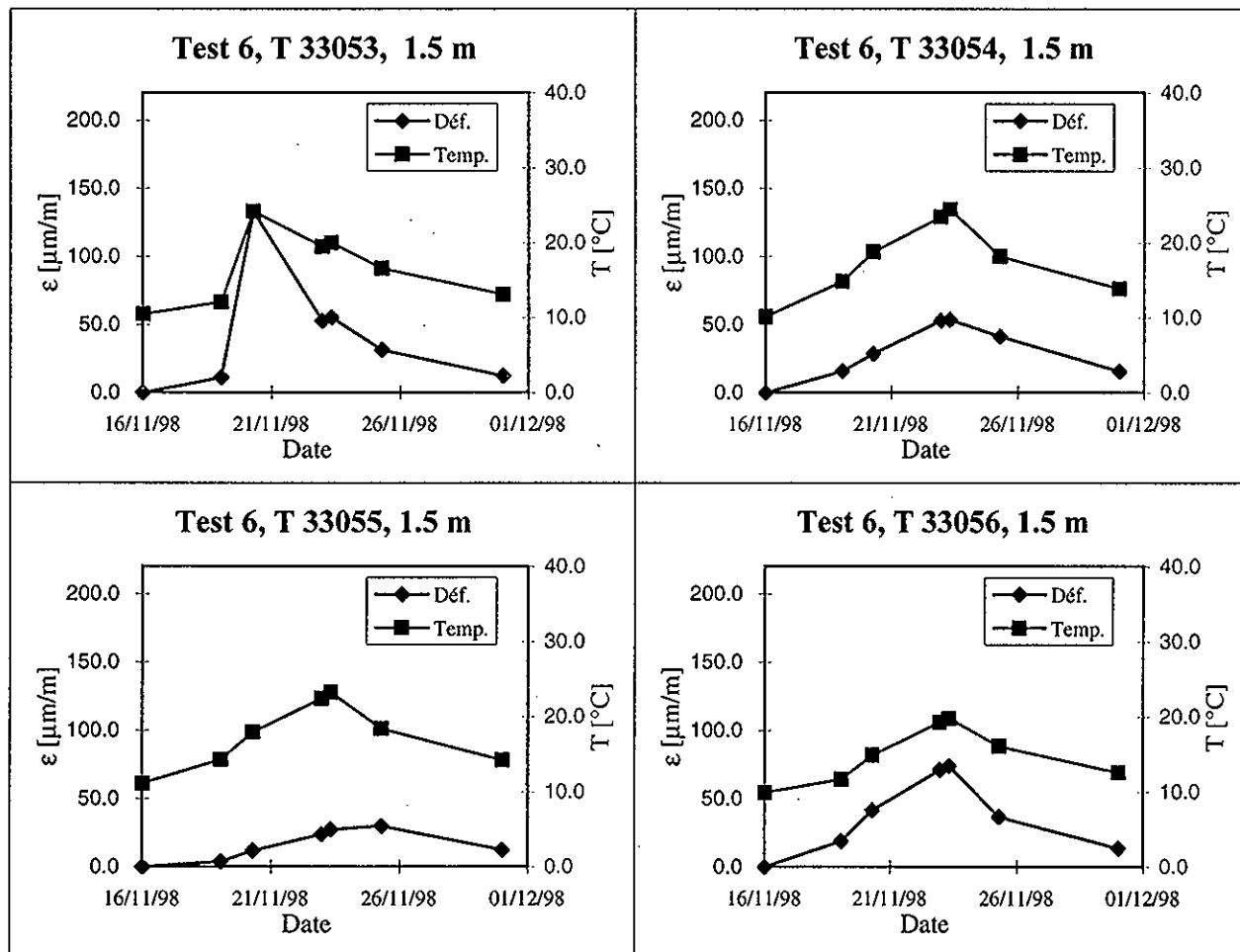
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

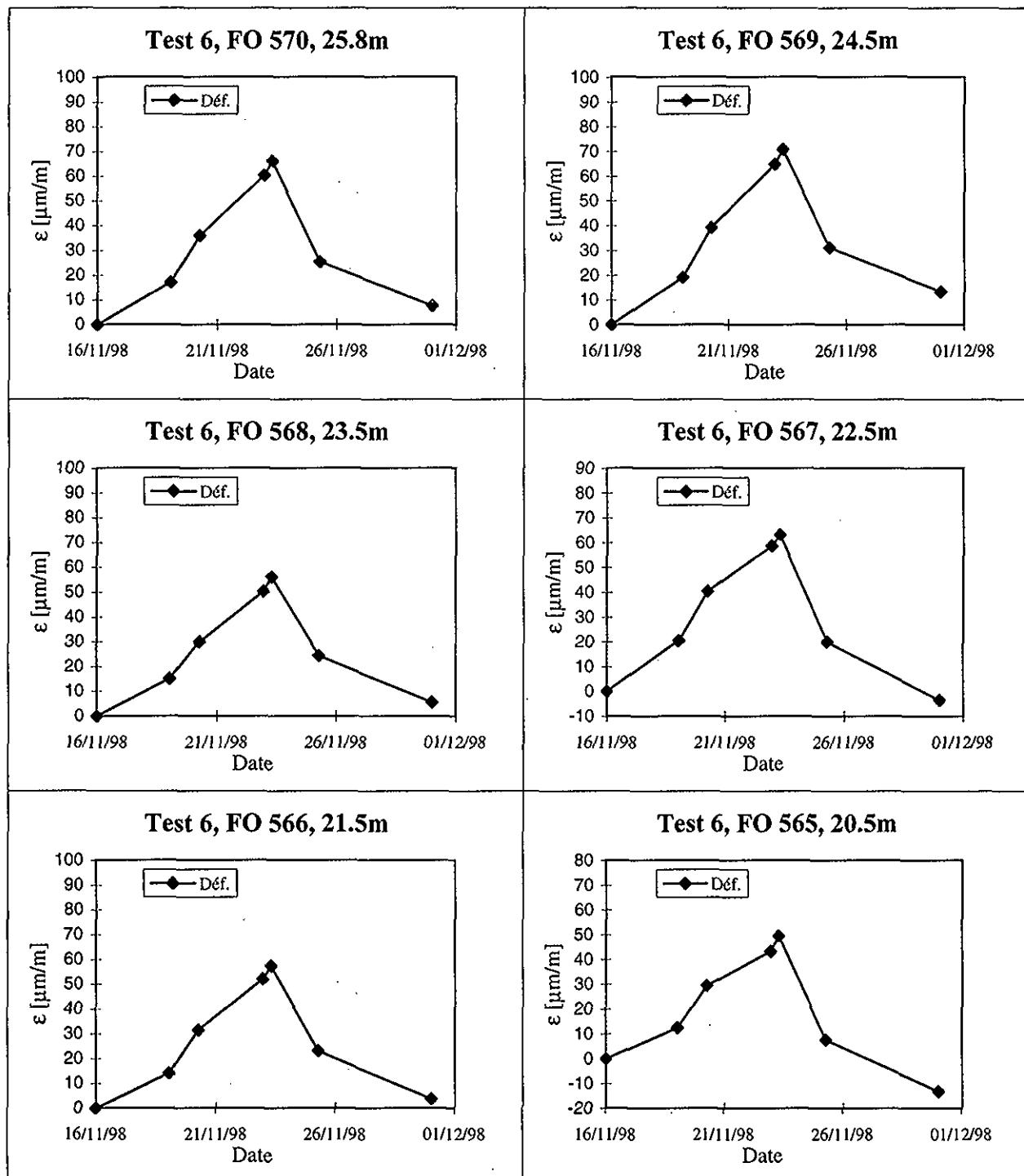
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)



Pieu thermique - SY40  
 TEST6

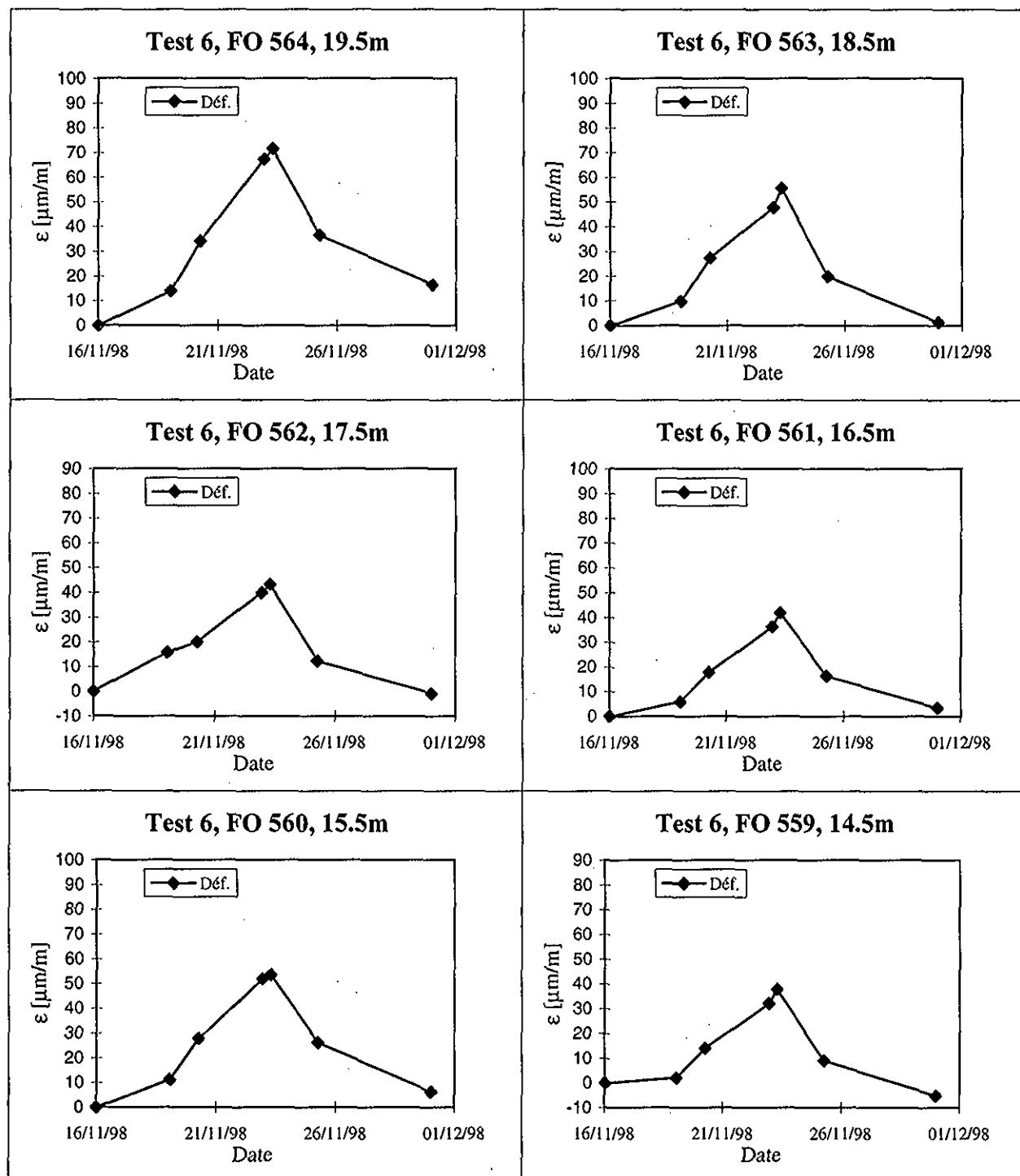
Capteurs Télémac à corde vibrante (C110)





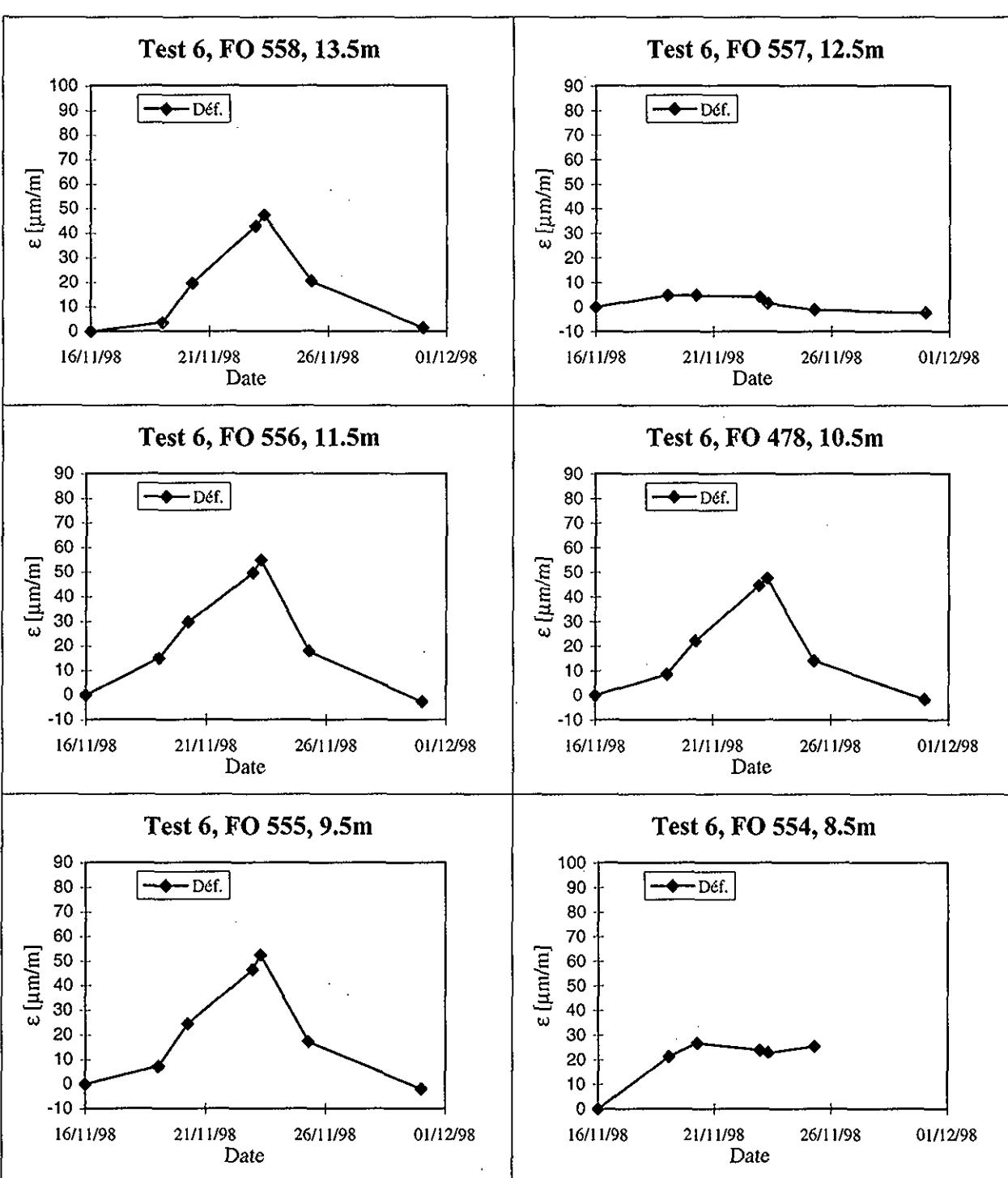
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs à fibres optique



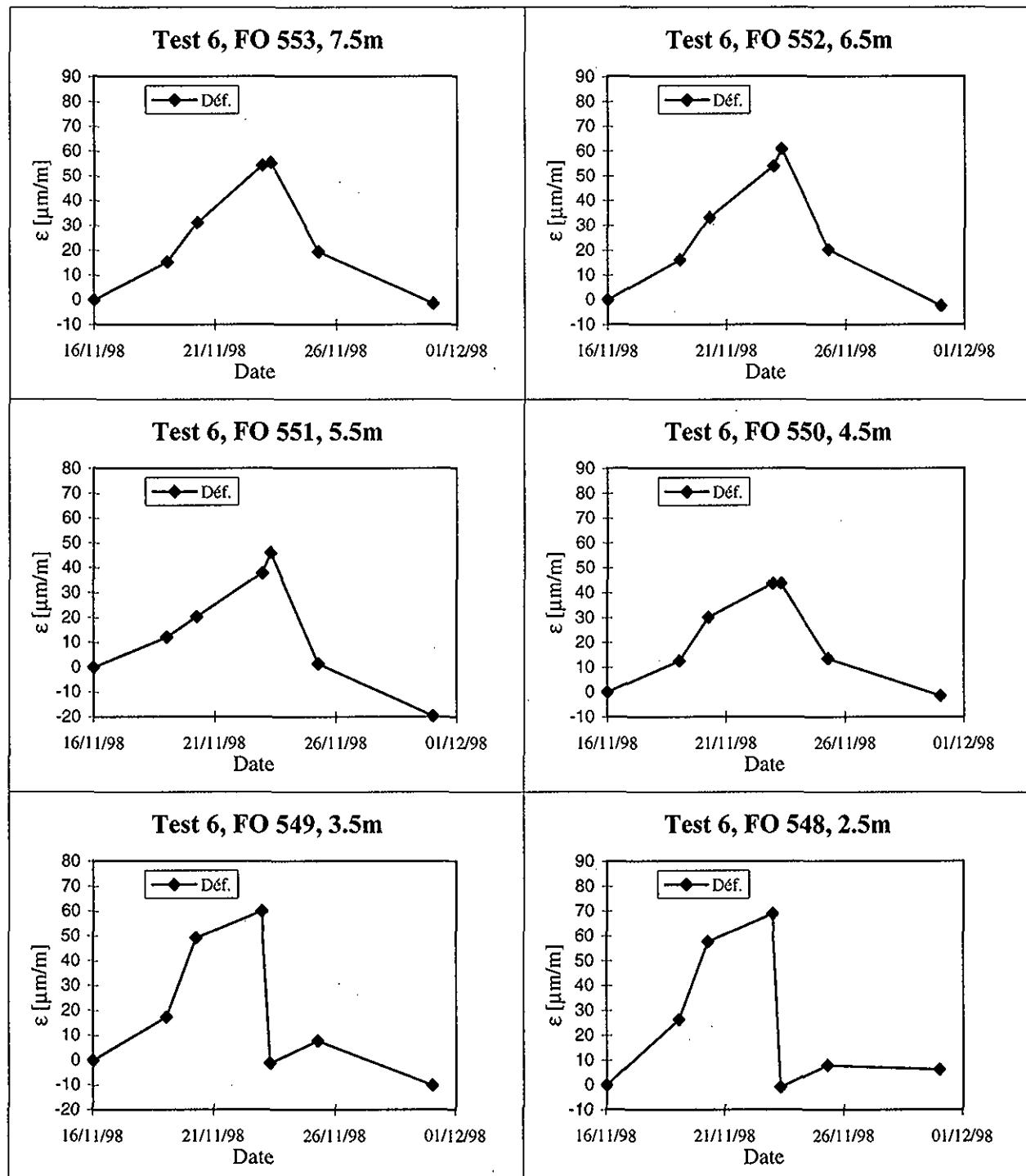
Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs à fibres optique



Pieu thermique - SY40  
 TEST6

Capteurs à fibres optique



## **ANNEXE 7**

## **ETALONNAGES**

## ANNEXE 7, ETALONNAGES

### ETALONNAGE DES CAPTEURS DE MESURE

#### A7.1 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 A7.1.

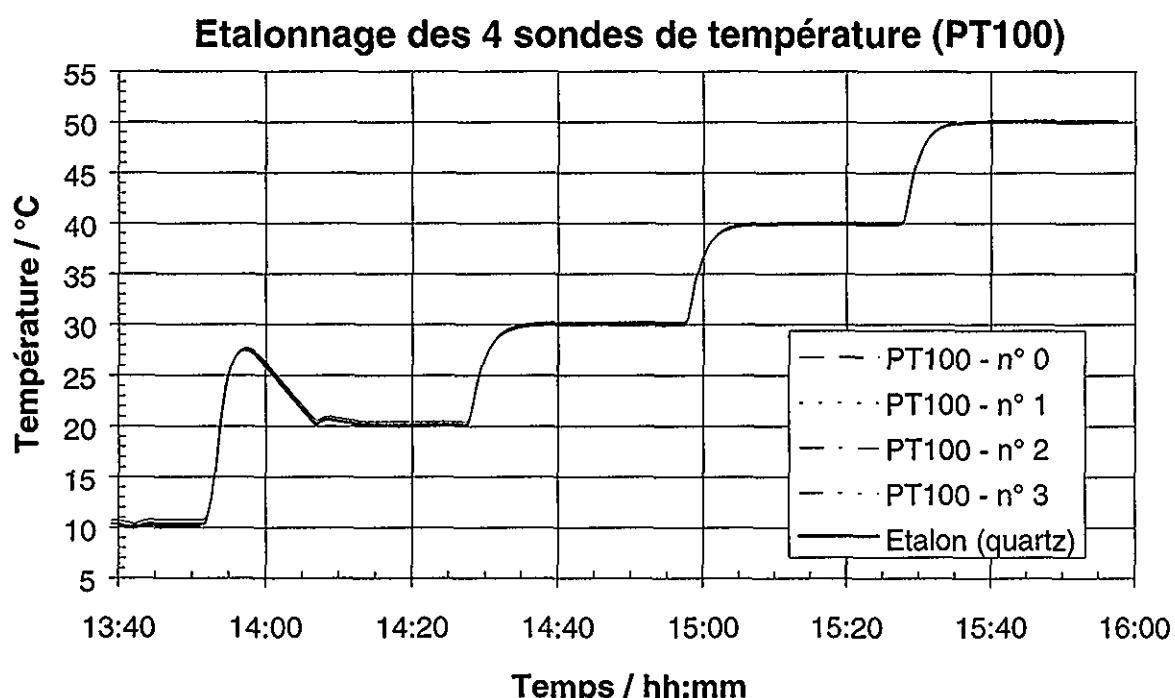


Fig. A7.1 Evolution des températures des 4 sondes de mesure PT100 lors de leur étalonnage.

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

## ANNEXE 7, ETALONNAGES

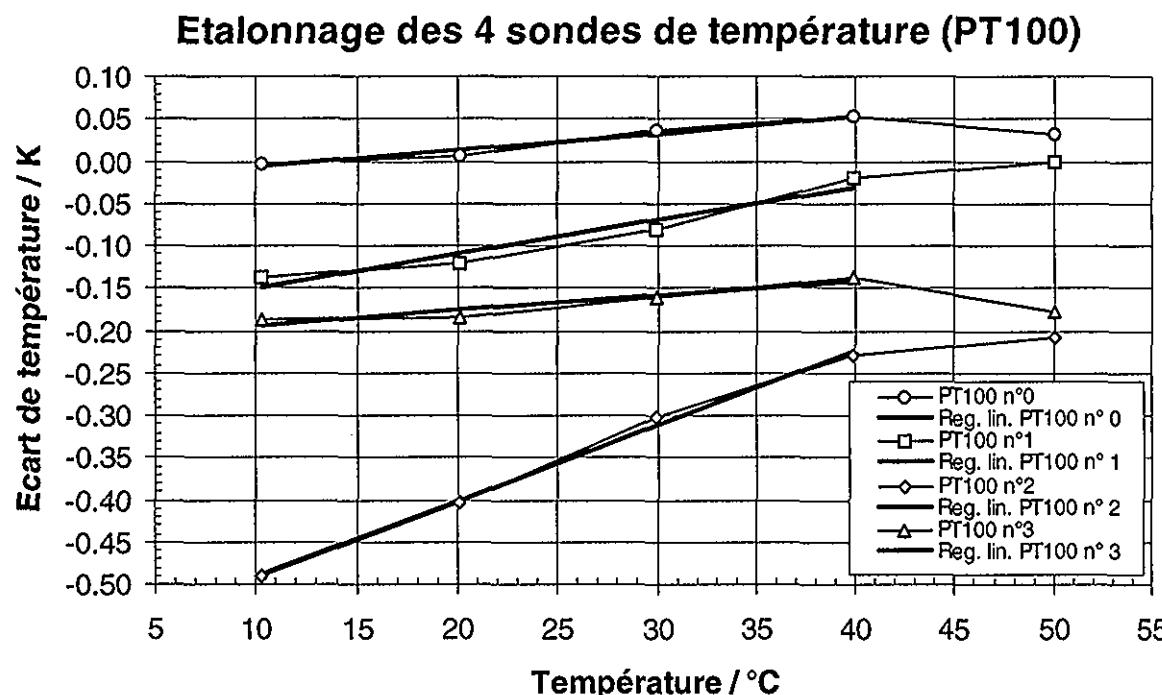


Fig. A7.2 . Ecart des mesures de température avec la température de référence. Les régressions linéaires sont établies et validés pour l'intervalle de température 10 - 40 °C.

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.

## ANNEXE 7, ETALONNAGES

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

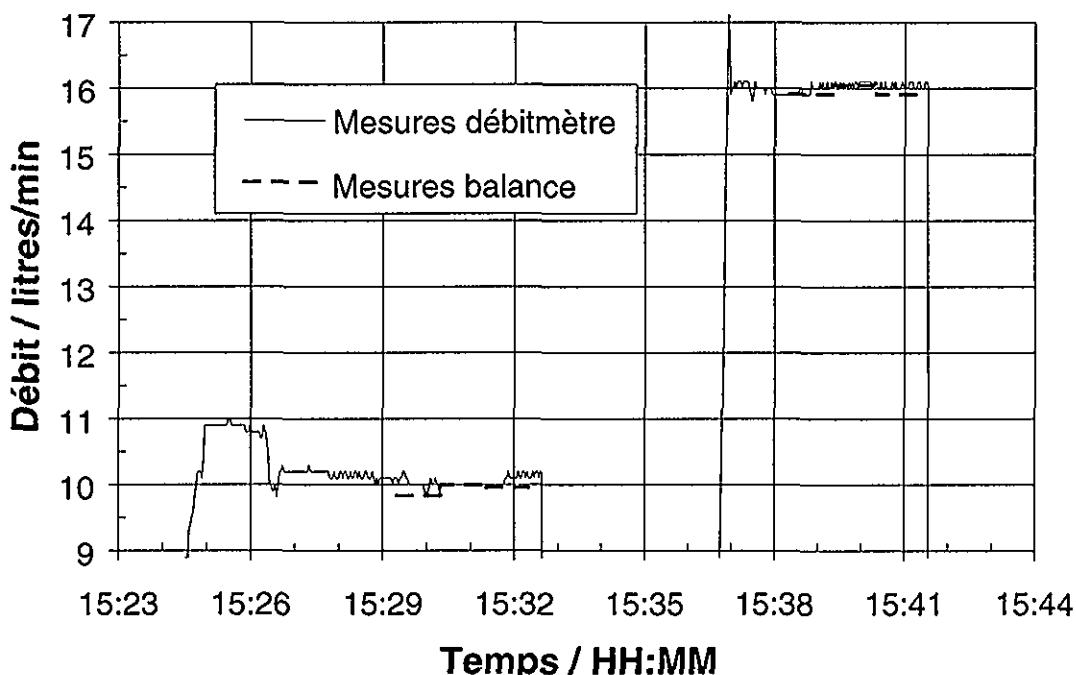


Fig. A7.3 Comparaison des mesures de débit avec le débitmètre et avec la balance.

La température de l'eau était de 14 °C pendant les mesures. Avec une masse volumique de 999.3 kg/m<sup>3</sup>, 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 ( $\pm 0.15$  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

## ANNEXE 7, ETALONNAGES

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.

### A7.2 Capteurs TELEMAC, mesures de température

Les extensomètres à corde vibrante TELEMAC 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 capteur TELEMAC, il y a en moyenne une différence de  $5.1^{\circ}\text{C}$  (table A7.3).

Dates mesures	Test	Température moyenne dans le pieu mesurée par les capteurs TELEMAC [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Température fluide [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Différence [ $^{\circ}\text{C}$ ]
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 TELEMAC.

En estimant la précision nettement meilleure pour la mesure de la température du fluide, les températures mesurées avec les capteurs TELEMAC seront corrigées de  $5.1^{\circ}\text{C}$ .

Cependant, nous n'arrivons pas à nous expliquer cette surestimation systématique des températures par les capteurs TELEMAC. 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, les corrections liées à la longueur des fils et du boîtier de connexion.

## **ANNEXE 8**

**CAROTTAGE  
SONIQUE**

**CONTRÔLE PAR  
REFLEXION**

## ANNEXE 8, Carottage sonique

### Carottage sonique

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 qui agit comme couplant. 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):

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

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

$\rho$  : densité du béton (25 t/m<sup>3</sup>)

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

$\nu$  : coefficient de Poisson [ - ]

Dans les résultats fournis par De Cérenville Géotechnique (à la suite de cette introduction) le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) est pris égal à 0, en réalité un coefficient de Poisson de 0.16 peut être admis pour le béton. La Table A8.1 montre les résultats du module d'élasticité calculé avec  $\nu = 0$  et  $\nu = 0.16$ .

Date	Température moyenne dans le pieu [°C]	Module d'élasticité [MPa] ( $\nu = 0$ )	Module d'élasticité corrigé [MPa] ( $\nu = 0.16$ )
24 février 1998	23	19965	18750
25 mai 1998	35	17115	16070
3 juin 1998	24	21556	20240

Table A8.1 : Résultats des carottages soniques.

Les températures indiquées par le bureau De Cérenville Géotechnique lors des carottages soniques ne sont pas exactes; les températures correctes sont indiquées ici dans la Table A8.1.

Le module d'élasticité du béton varie en fonction de la température. Il diminue de 14 % quand la température augmente de 12°C. Cette variation du module est faible et esr de même ordre de grandeur que celle liée à la valeur du coefficient de Poisson.. Les mesures du 24 février 98 et du 3 juin 98 ont été effectuées à des températures proches (23°C et 24°C respectivement) mais les modules d'élasticité du béton obtenus sont différents. La raison de cette différence vient du fait que le test réalisé le 24 février l'était sur un béton que n'avait pas encore complètement fait sa prise, pour cela le module est plus bas par rapport à celui trouvé le 3 juin.

Dans les calculs qui suivront (phase 2 du projet), le module d'élasticité du pieu sera calculé à partir du module du béton et de le pourcentage d'armature du pieu.

# DE CERENVILLE

GEOTECHNIQUE

Laboratoire de Mécanique des Sols  
 A l'att. de M. Steinmann  
 EPFL-Ecublens  
 1015 LAUSANNE

OD/FJ-M8611  
 O. Duba

Ecublens, le 23 juin 1998

**Concerne: EPFL -- Quartier Nord**  
**Contrôles d'intégrité du pieu "thermique" n° 68 par ultrason et réflexion**

Monsieur,

Donnant suite à votre demande du 13 janvier 1998, nous avons procédé à plusieurs contrôles d'intégrité par ultrason du pieu n° 68, à savoir:

- 1<sup>ère</sup> mesure: effectuée le 24/02/1998 (annexe 1)
- 2<sup>ème</sup> mesure effectuée le 25/05/1998 sur pieu chauffé à 40 °C (annexe 2)
- 3<sup>ème</sup> mesure effectuée le 3/06/1998 sur pieu chauffé à 21 °C (annexe 3)

En date du 27/05/1998, nous avons contrôlé le pieu avec la méthode de réflexion PIT. Une analyse plus poussée du signal (appelé PITSTOP) a ensuite été effectuée.

Les résultats des mesures peuvent être résumés comme suit:

- aucun défaut de qualité n'a été constaté
- suite à l'analyse PITSTOP (méthode de réflexion), une petite diminution de l'impédance a été constatée entre 2.5 et 6 m de profondeur  
 un élargissement se trouve vers 19 à 20 m de profondeur (voir annexes 4 et 5)

Un tableau comparatif avec les vitesses et modules d'élasticité mesurés à chaque contrôle est donné à l'annexe 6.

Nous restons à votre disposition pour toute information complémentaire dont vous pourriez avoir besoin et vous adressons, Monsieur, nos salutations les meilleures.



DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

# DE CERENVILLE

GEOTECHNIQUE

Rapport de mesures in siturapp.MIS.8611Client

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

Mandant

Raison sociale : EPFL - LMS  
 Nom, prénom: M.G.Steinman  
 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: 03/06/98

Opérateur: VHG

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

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

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

- Pieu d'essai chauffé à 21°C
- Différence entre le diamètre intérieur des tubes et le diamètre extérieur des sondes: 30mm
- De Cérenville Géotechnique SA n'est pas responsable de la pose et du fonctionnement des équipements que le SEM (Service d'Essais et Mesures) n'a pas installés.

Annexes

- Plan de situation des tubes et du pieu
- Légende des graphiques (1 page)
- Graphiques (2pages)

Ecublens, le 04.06.98

DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

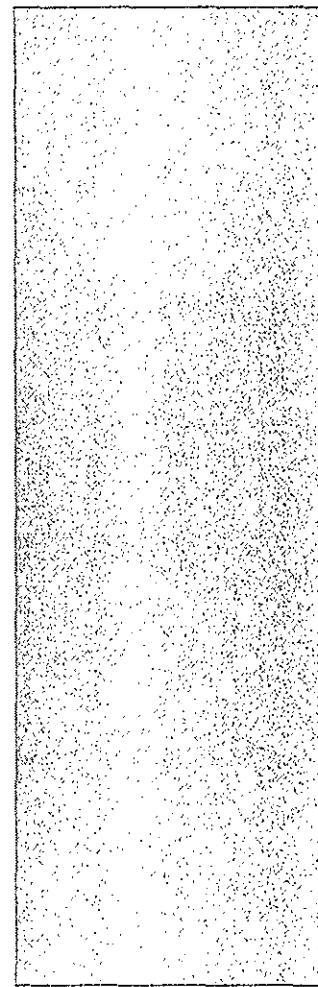
B h3

PP PTH Naguet

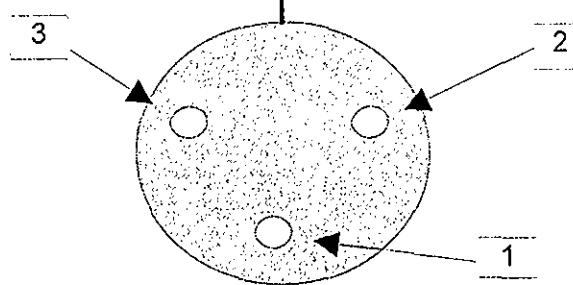
Ecublens



Pieu 68

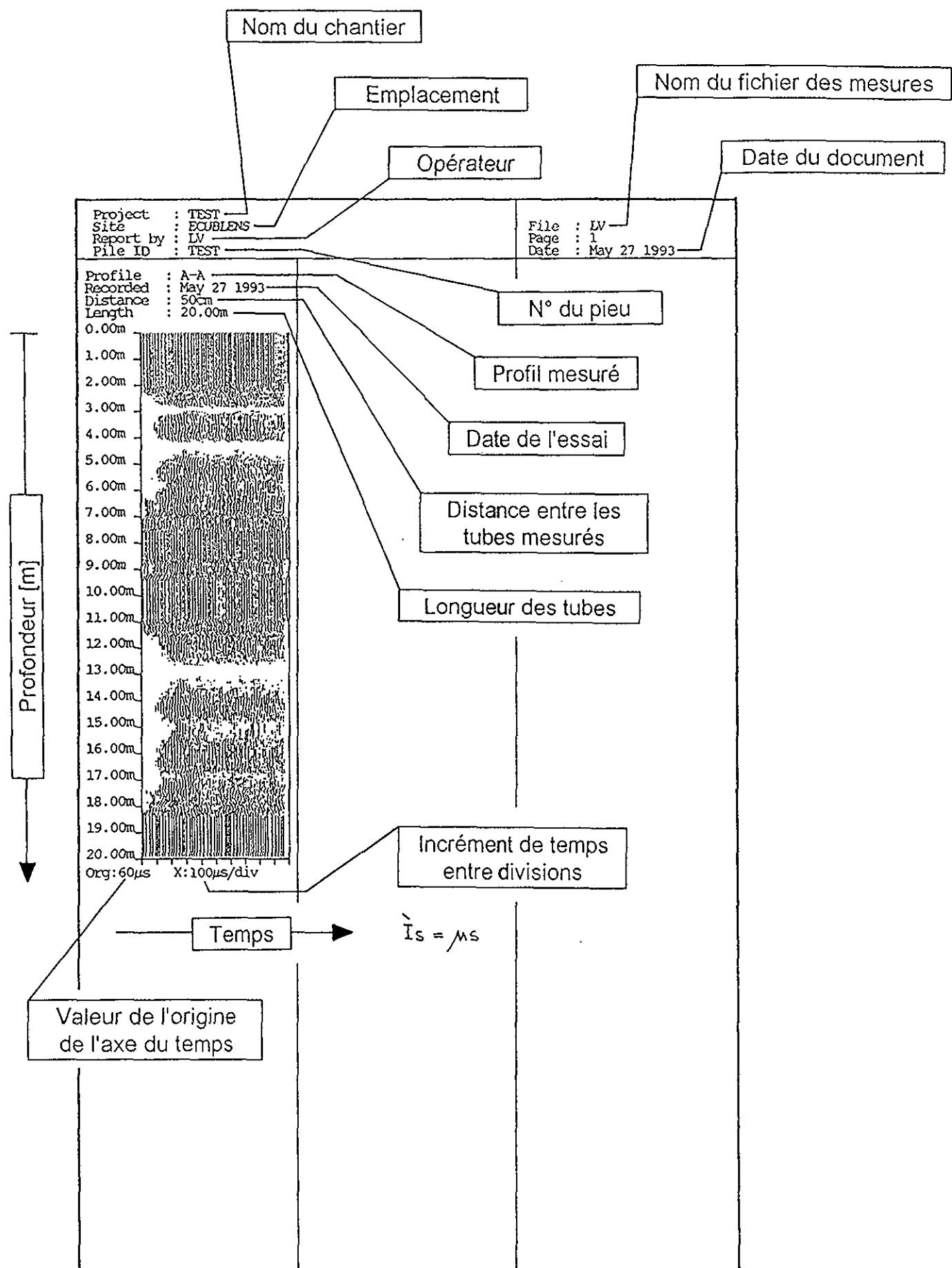


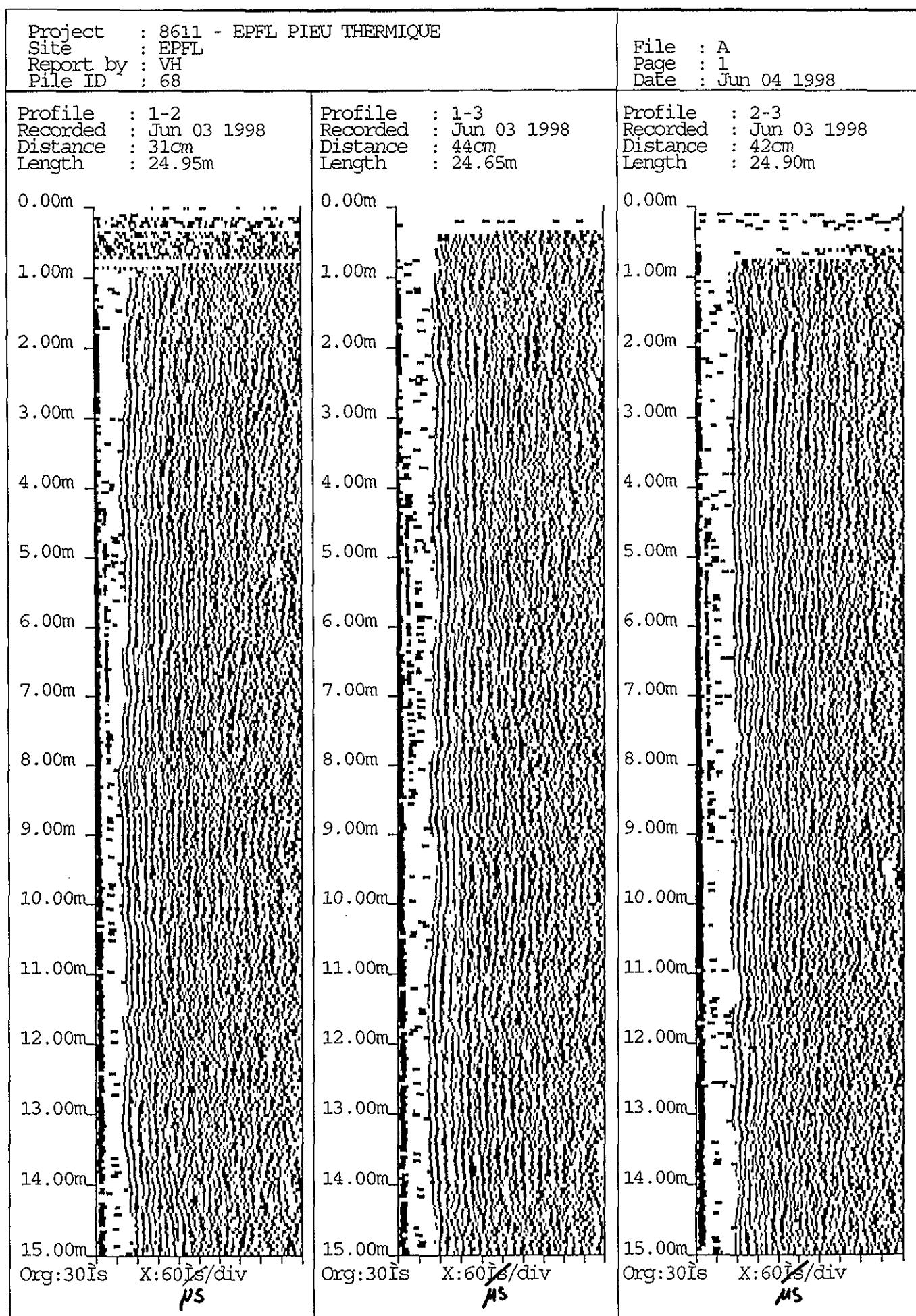
St-Sulpice



## CAROTTAGE SONIQUE

### Legende des protocoles de mesure





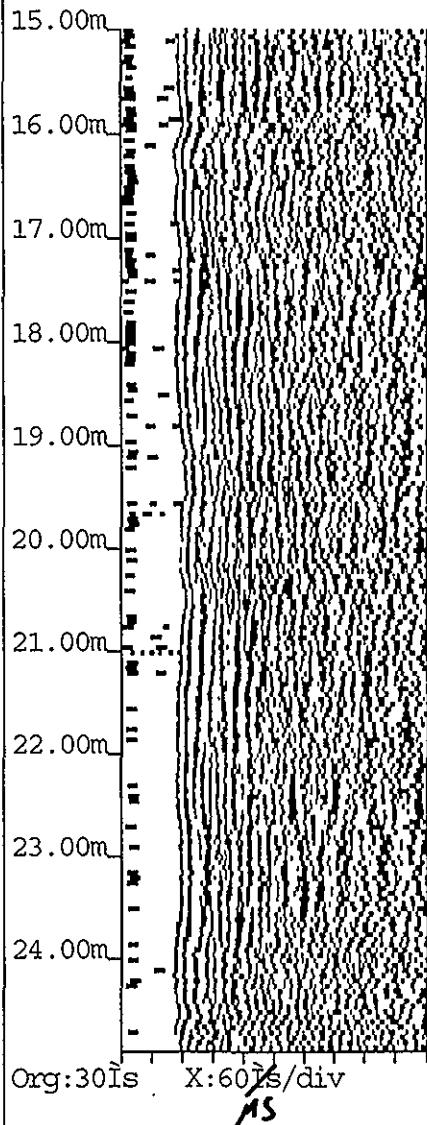
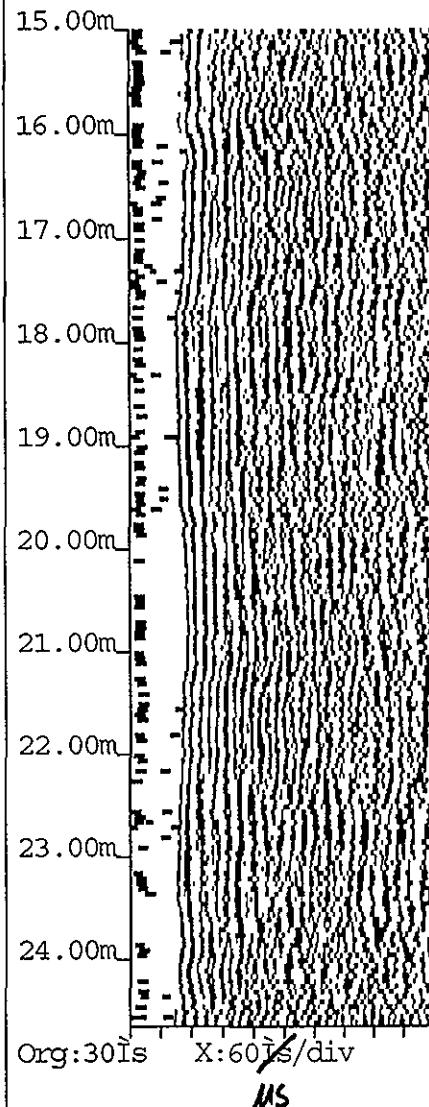
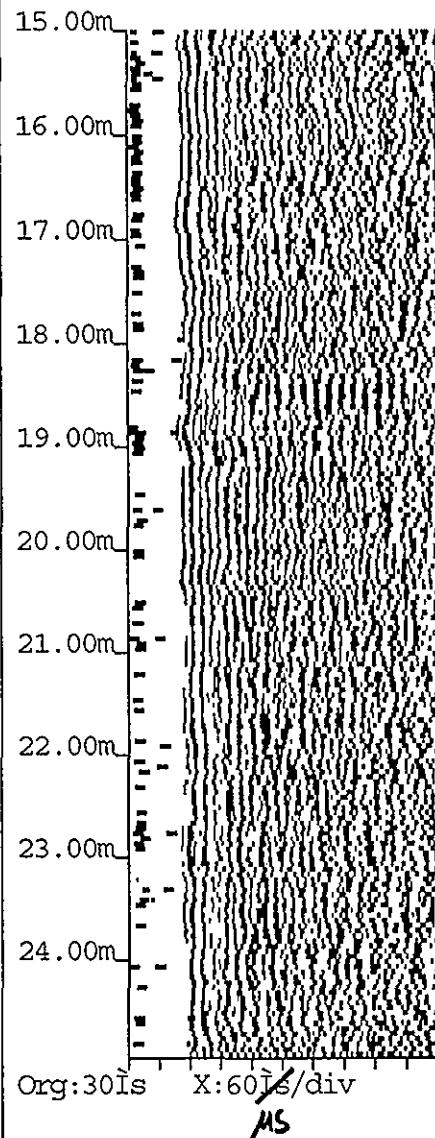
Project : 8611 - EPFL PIEU THERMIQUE  
Site : EPFL  
Report by : VH  
Pile ID : 68

File : A  
Page : 2  
Date : Jun 04 1998

Profile : 1-2  
Recorded : Jun 03 1998  
Distance : 31cm

Profile : 1-3  
Recorded : Jun 03 1998  
Distance : 44cm

Profile : 2-3  
Recorded : Jun 03 1998  
Distance : 42cm



Rapport de mesures in situ

rapp.MIS.8611

Client

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

Mandant

Raison sociale : EPFL - LMS  
 Nom, prénom: M.G.Steinman  
 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: 25/05/98

Opérateur: LPG

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

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

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

- Pieu d'essai chauffé à 40°C
- Différence entre le diamètre intérieur des tubes et le diamètre extérieur des sondes: 30mm
- De Cérenville Géotechnique SA n'est pas responsable de la pose et du fonctionnement des équipements que le SEM (Service d'Essais et Mesures) n'a pas installés.

Annexes

- Plan de situation des tubes et du pieu
- Légende des graphiques (1 page)
- Graphiques (2pages)

Ecublens, le 25/05/98

DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

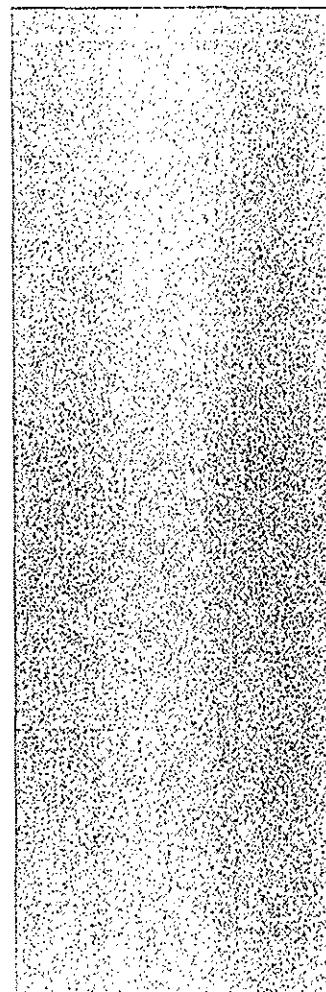
*B. h. 3*

*PP P. Marquet*

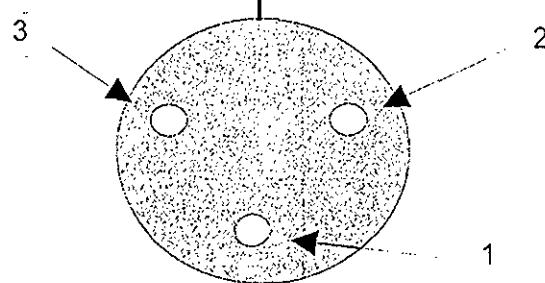
Ecublens



Pieu 68

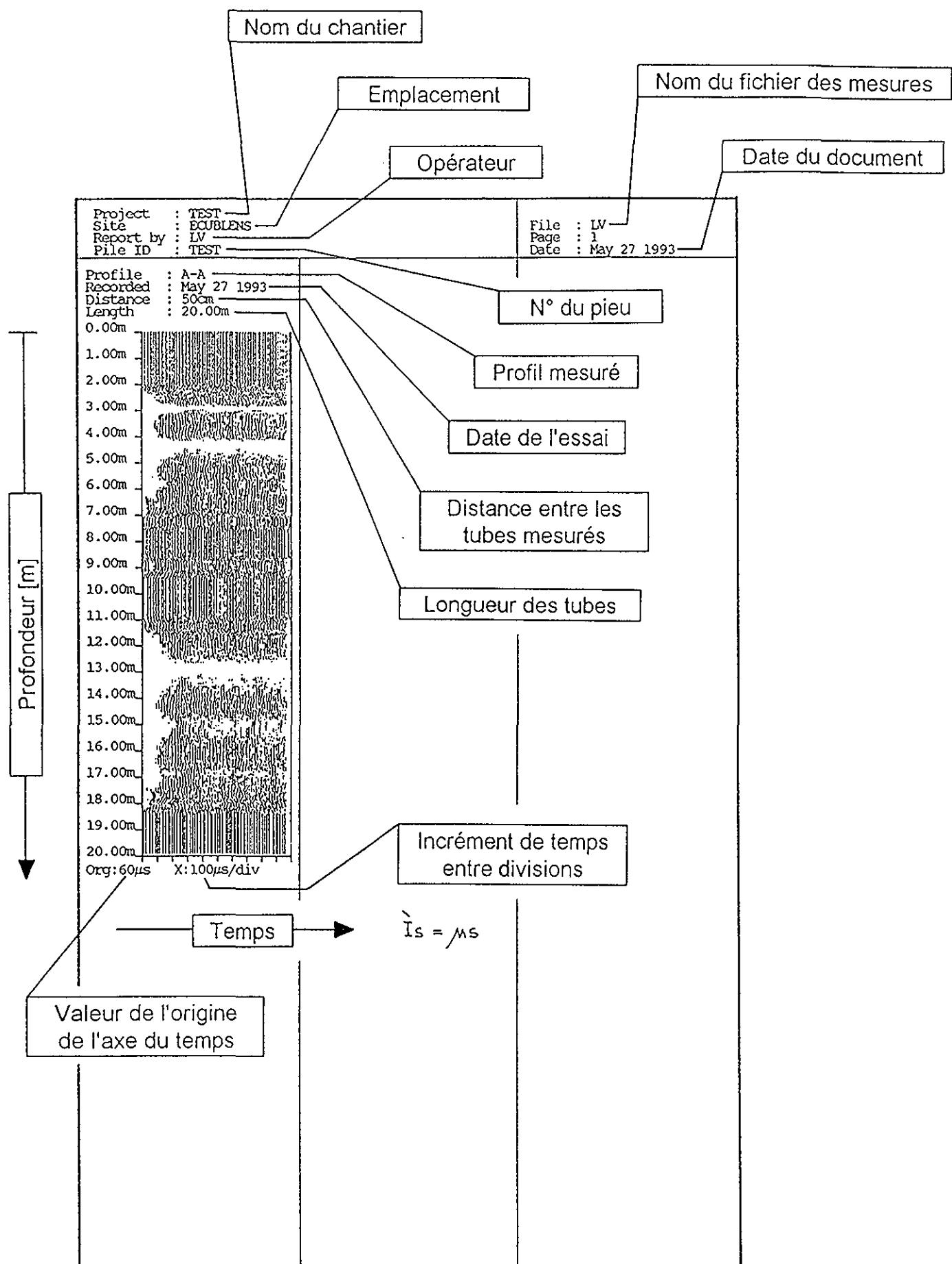


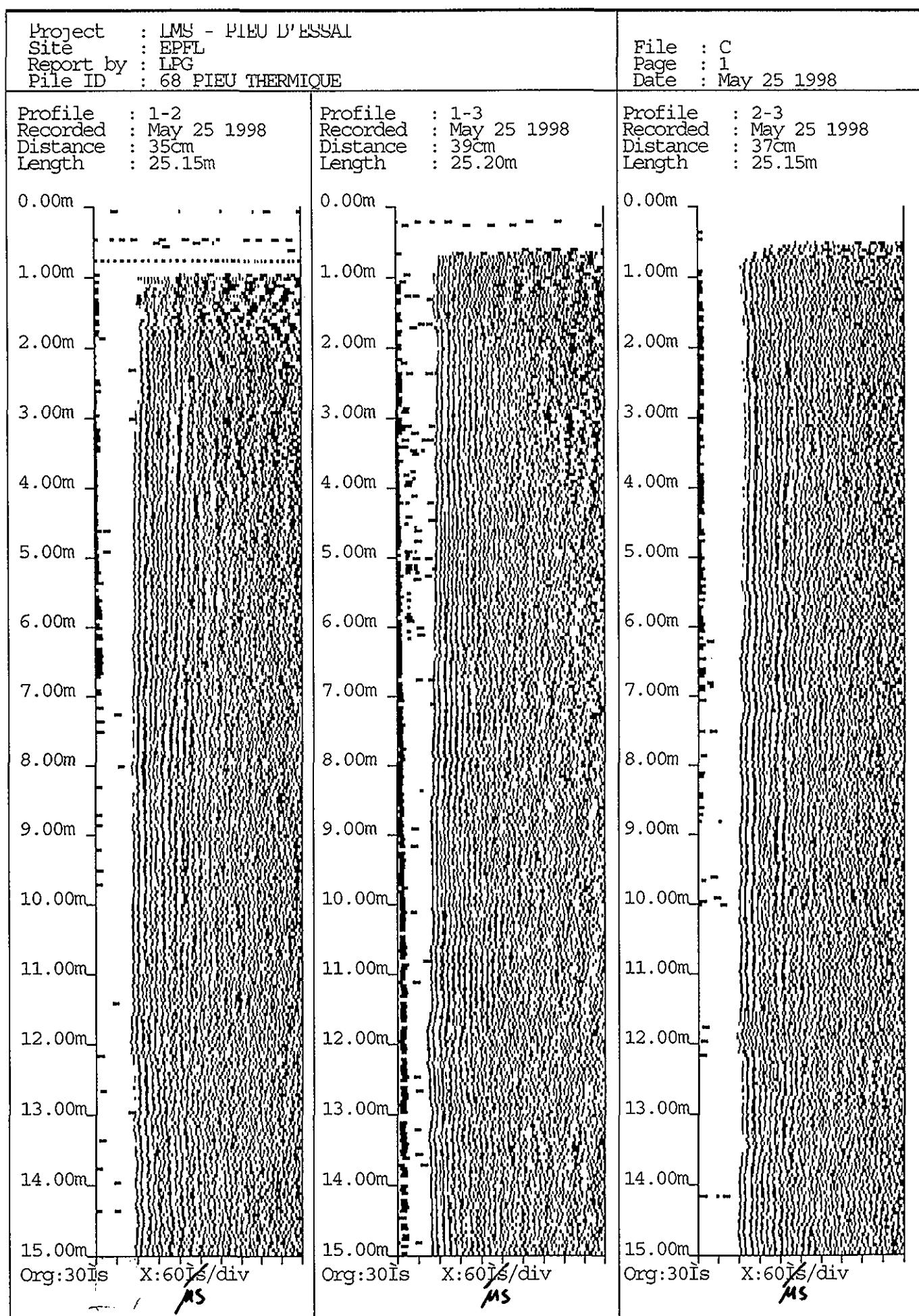
St-Sulpice



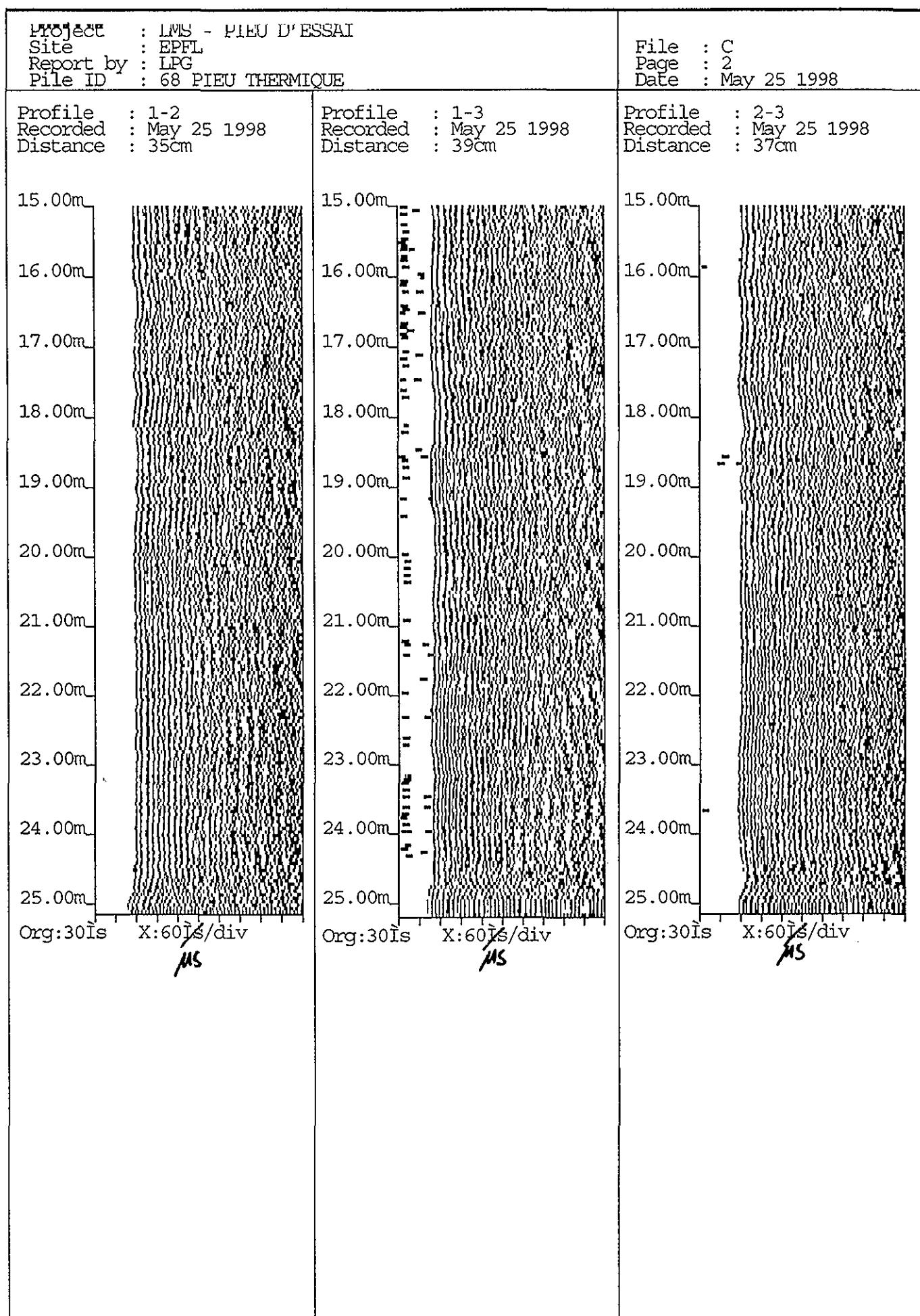
## CAROTTAGE SONIQUE

### Legende des protocoles de mesure





B.C. S



# DE CERENVILLE

GEOTECHNIQUE

## Rapport de mesures in situ

rapp.MIS.8611

### Client

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

### Mandant

Raison sociale : EPFL - LMS  
 Nom, prénom: M.G.Steinman  
 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: 24/02/98

Opérateur: LPG

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

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

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

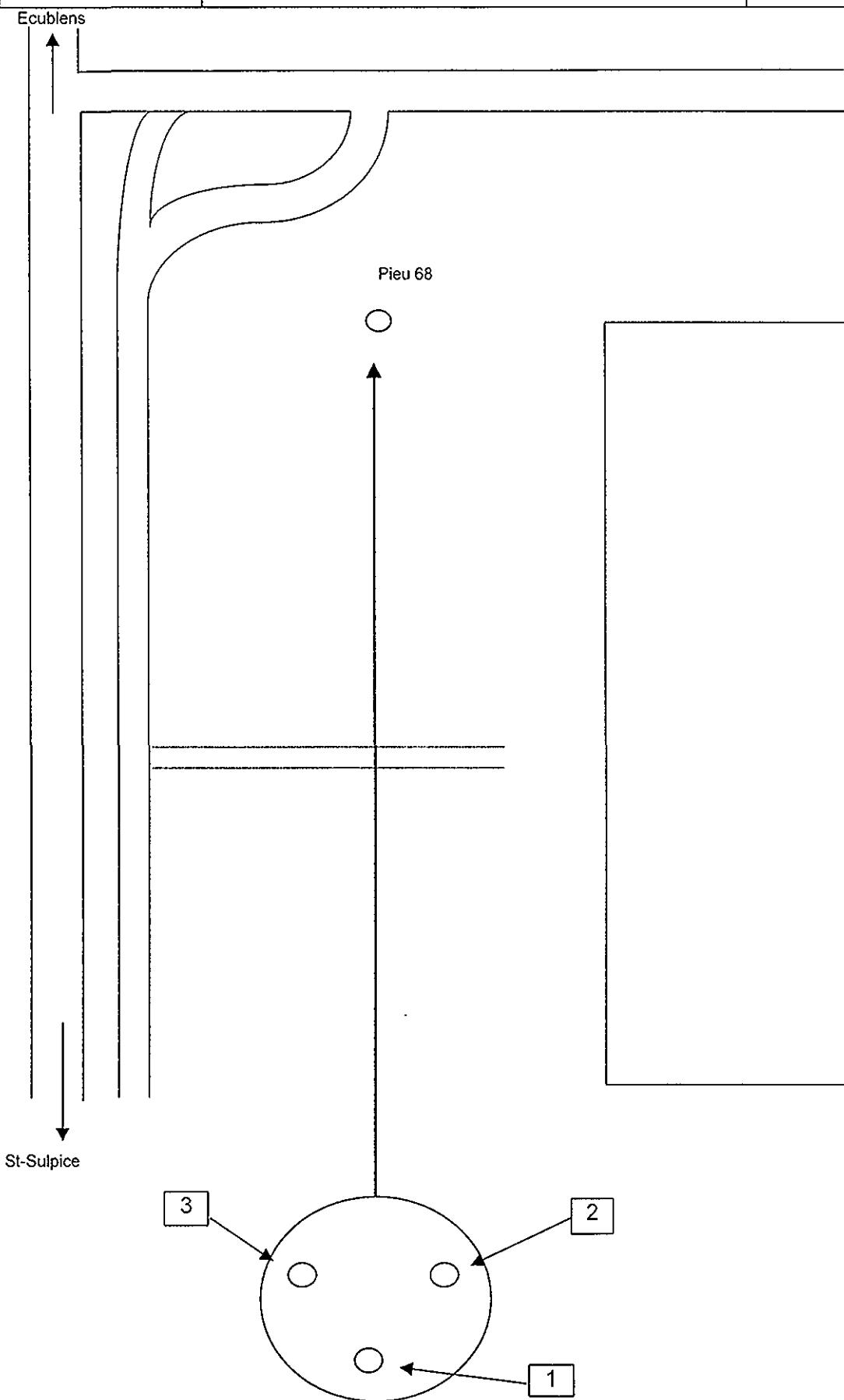
- Différence entre le diamètre intérieur des tubes et le diamètre extérieur des sondes: 30mm

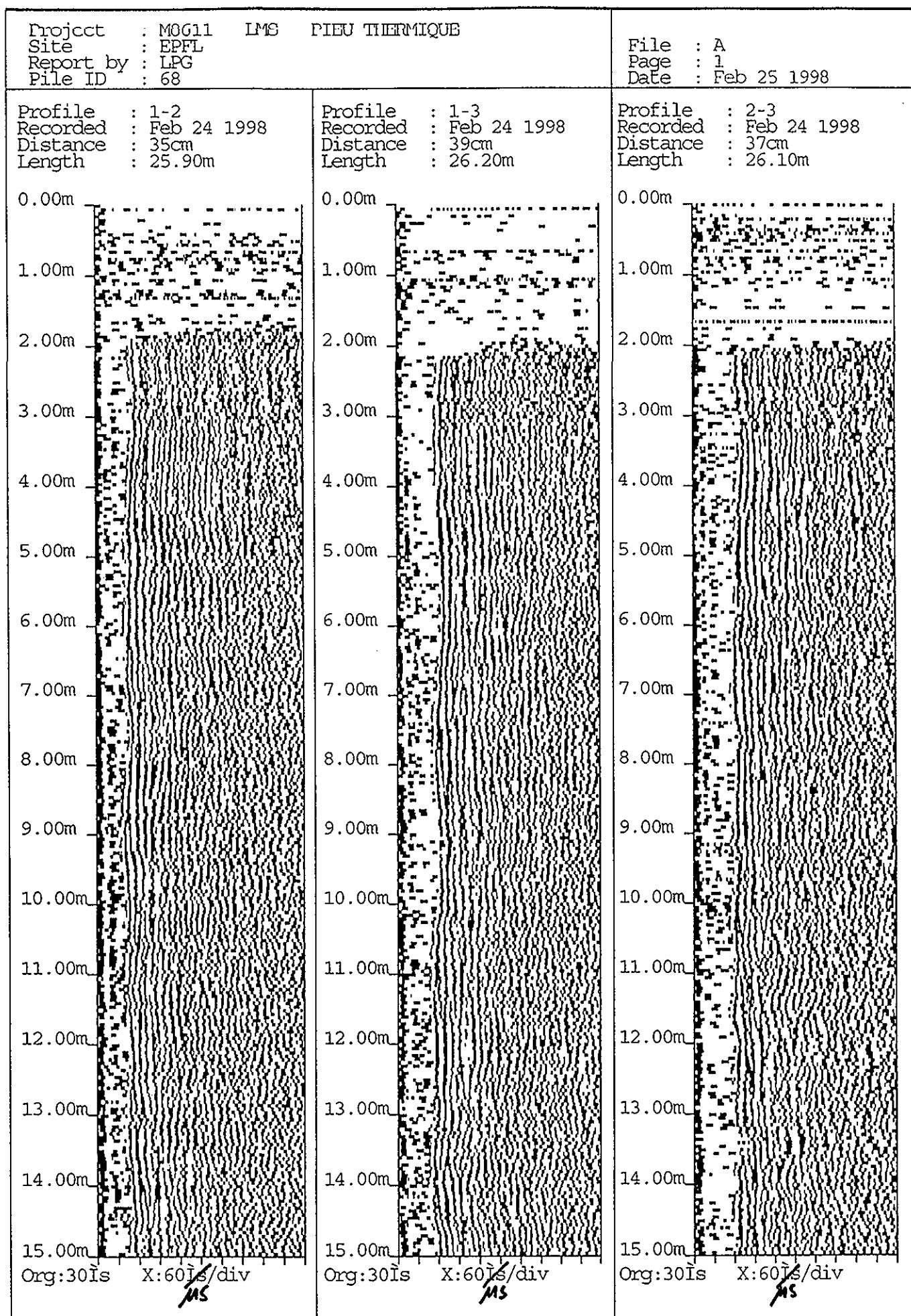
### Annexes

- Plan de situation des tubes et du pieu
- Graphiques (2pages)

Ecublens, le 25/02/98

DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

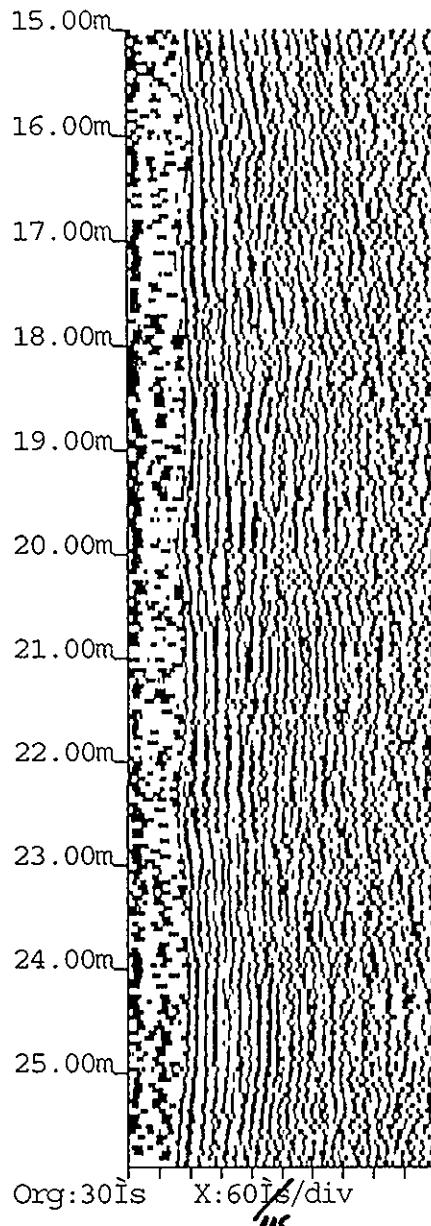




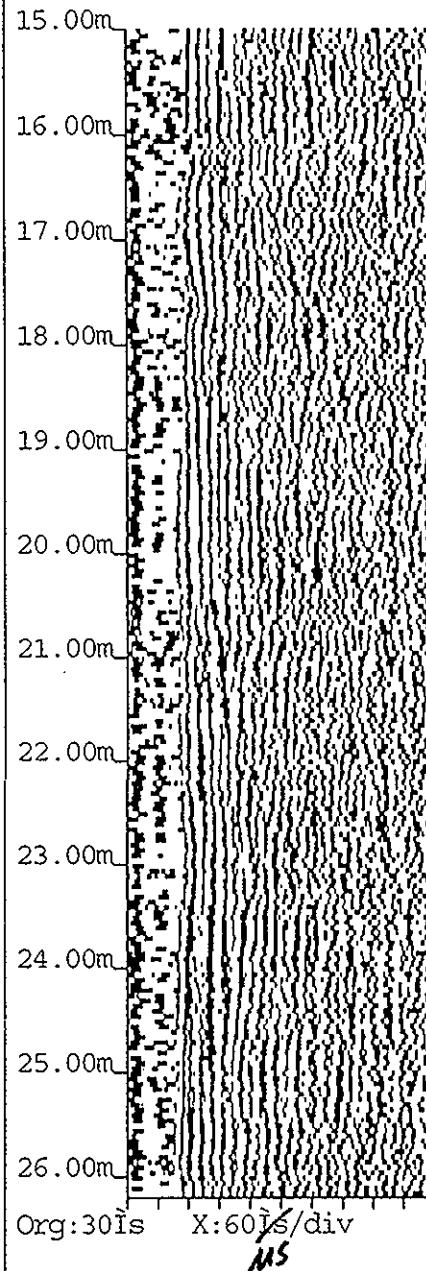
Project : M8611 - LMS - PIEU THERMIQUE  
Site : EPFL  
Report by : LPG  
Pile ID : 68

File : A  
Page : 2  
Date : Feb 25 1998

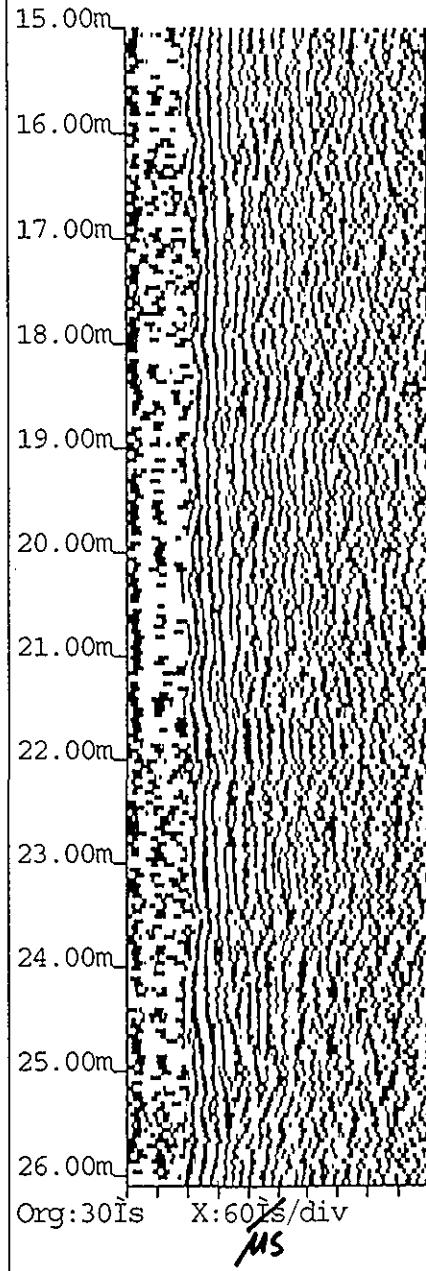
Profile : 1-2  
Recorded : Feb 24 1998  
Distance : 35cm



Profile : 1-3  
Recorded : Feb 24 1998  
Distance : 39cm



Profile : 2-3  
Recorded : Feb 24 1998  
Distance : 37cm



## **ANNEXE 8**

# **CONTRÔLE PAR REFLEXION**

DE CERENVILLE



Proj: EPFL  
Pile: 68  
Desc: D 1000 MM  
Info: 2.08 ms

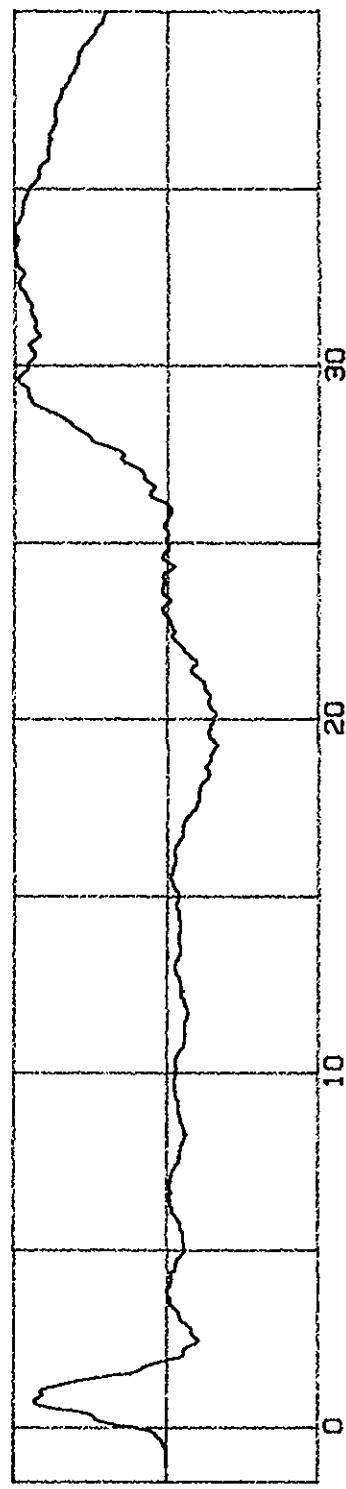
Date: 98/05/27

Time: 11:53:25

IDNO: 875 Avgd 5 Bis

V: 1.25mm/s

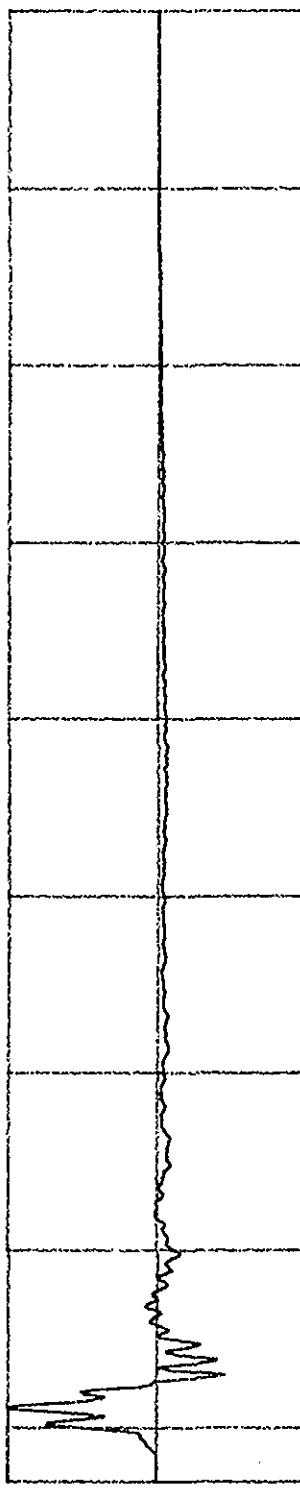
Velocity - Avg - Ampd



30.0 X MAGN

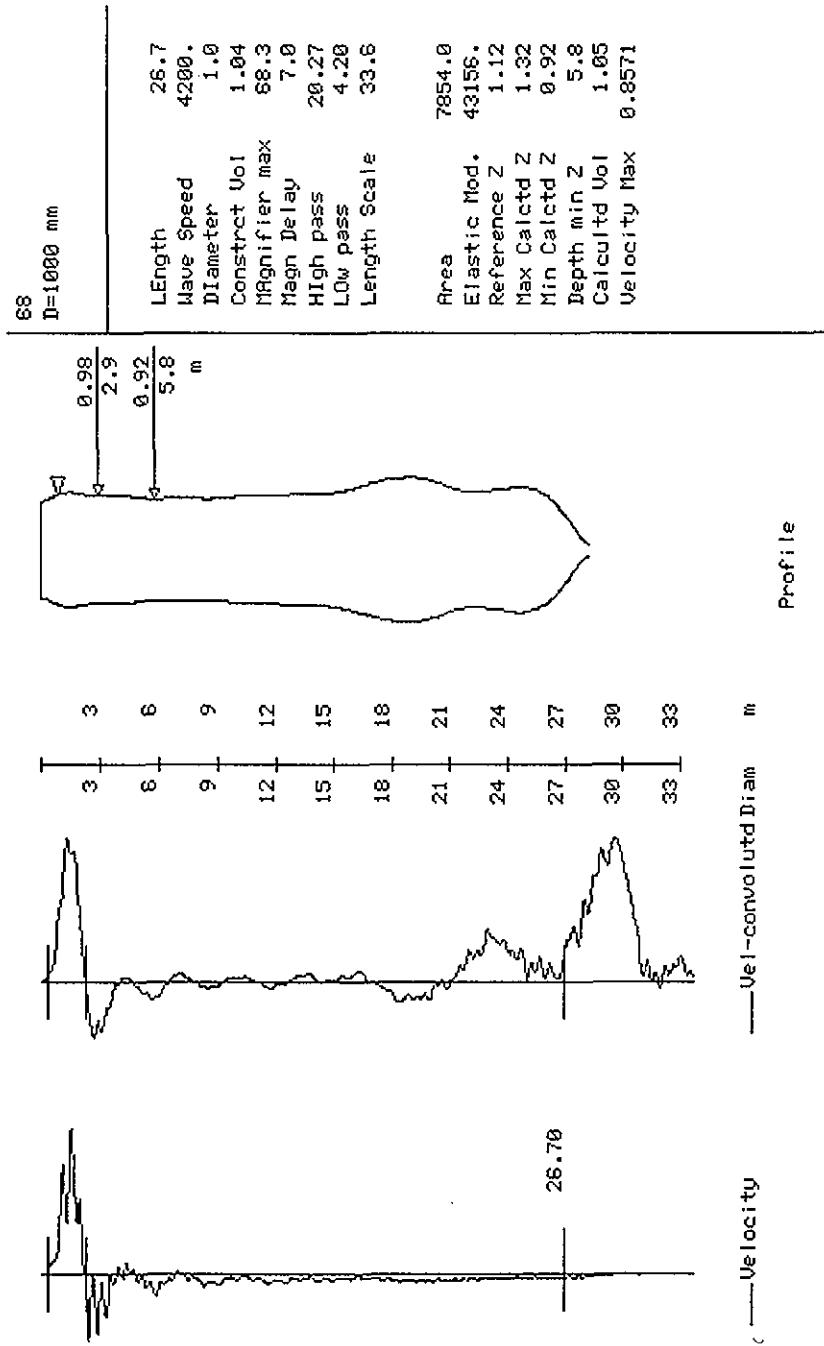
26.70 m  
TOE 4200 m/s

Velocity - Avg - Raw



EPFL  
DE CERENVILLE GEOTECHNIQUE SA

27-May-1998  
PISTOP(TM) Version 1997-1



R:\NPIEU68.R  
1

DE CERVELLE

GEOTECHNIQUE

## TABLEAU RECAPITULATIF DES MESURES CARROTAGE SONIQUE DANS LES PLEUX

Rapp.MIS07.8611

Reproduction partielle interdite sans l'accord de De Céenville Géotechnique SA

Le rapport ne concerne que l'objet soumis à l'essai

page 1 de 1