

VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES LOIS DE COMPORTEMENT DE MATÉRIAUX HYDROCARBONÉS ET DE SOLS

**EXPERIMENTELLE GÜLTIGKEITSBESTÄTIGUNG DER VERHALTENSGESETZE
VON BITUMINÖSEN MATERIALIEN UND BÖDEN**

**Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne**

**Prof. A.G. Dumont,
A. Salhi
Prof. E. Recordon,
I. Gueye**

**Mandat de recherche 28/91 sur proposition de:
Union des professionnels suisses de la route
Fonds national suisse de la recherche scientifique**

Septembre 1994

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	II
1. INTRODUCTION	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Mandat	1
2. DESCRIPTION DU MODELE	2
2.1 Installation et mise en place de la structure	2
2.1.1 Description de la halle fosse	2
2.1.2 Réalisation du modèle	4
2.2 Caractéristiques des matériaux	4
2.3 Instrumentation et acquisition des données	8
2.3.1 Mesure de la température	11
2.3.2 Mesure de la teneur en eau	11
2.3.3 Mesure de la succion	11
2.3.4 Mesure du niveau d'eau	12
2.3.5 Mesure des déformations dans le sol	12
2.3.6 Mesure des déformations dans le revêtement bitumineux	12
2.3.7 Mesure des contraintes	15
2.3.8 Mesure des déplacements à la surface et à l'interface AB 6-sable Greco	15
2.3.9 Systèmes d'acquisition	15
3. PROGRAMME ET RÉALISATION DE L'ESSAI	15
3.1 Phase d'essai I "Mise en température"	16
3.2 Phase d'essai II "Charges pseudo-statiques"	19
3.3 Phase d'essai III "Charges dynamiques"	21
4. RÉSULTATS DES ESSAIS	24
4.1 Phase I "Mise en température"	24
4.1.1 Evolution des températures	24
4.1.2 Déplacements dans le sol	28
4.1.3 Teneurs en eau et niveau de la nappe	28
4.1.4 Succions	30
4.1.5 Déformations dans le revêtement	31
4.2 Phase II "Charges pseudo-statiques"	37
4.3 Phase III "Charges dynamiques"	37
4.3.1 Simulateur de trafic lourd	37
4.3.2 Falling Weight Deflectometer	40
5. SIMULATIONS ET INTERPRETATION	41
5.1 Modèles numériques	41
5.1.1 Contraintes et déformations (modèle PLAXIS)	41
5.1.2 Diffusion des températures (modèle KEM1d)	41
5.1.3 Evolution de la succion (modèle Kdns1d)	42
5.2 Résultats des calculs numériques	45
5.2.1 Contraintes et déformations	45
5.2.2 Diffusion des températures	50
5.2.3 Evolution de la succion	50
6. CONCLUSIONS	53
6.1 Contraintes et déformation	53
6.2 Succions et teneurs en eau	53
Références	55
ANNEXES	56

RESUME

En 1991, les laboratoires des voies de circulation et de mécanique des sols de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ont engagé une recherche intitulée: "Validation expérimentale des lois de comportement de matériaux hydrocarbonés et de sols à l'aide d'un modèle physique".

L'objectif principal a été de vérifier sur une structure de chaussée la validation de modèles numériques et de lois de comportement de matériaux routiers et des sols.

Le modèle physique de chaussée a été réalisé dans une fosse de 5 m de longueur, 4.5 m de largeur et 2 m de profondeur (Halle Fosse de l'EPFL). Il comportait deux couches de sable; en fond de fosse un sable fin limoneux sur une épaisseur de 120 cm, puis un sable moyen, dit GRECO, sur 80 cm et en surface une couche d'enrobé bitumineux AB6 de 8 cm.

Cette structure a été largement instrumentée en y introduisant 123 capteurs destinés:

- à des mesures d'environnement: température, teneur en eau, pression interstitielle dans le sol,
- à des mesures mécaniques: déformations, contraintes, déplacements, déflexions.

L'essai s'est déroulé en trois phases:

Phase I, le modèle a été soumis à des variations de température de 23 °C, 5 °C, 23 °C, 41 °C et 23 °C en surface, sans aucune application de charge. Le modèle était couvert d'une enceinte isolée thermiquement et la température de la nappe phréatique de la base du modèle était maintenue constante à 10 °C.

Phase II, le revêtement a été soumis à des cycles de charge pseudostatique répétés quatre fois à une température de 23 °C, 5 °C, 41 °C et 23 °C.

Phase III, le revêtement a été soumis à des charges dynamiques par le biais de l'orniéreur lourd du LAVOC, la température était de 23 °C.

Les mesures menées sur la superstructure bitumineuse ne concordent que partiellement avec les résultats des simulations réalisées par le modèle "PLAXIS" de l'Université de Delft (Hollande). Les formes générales des courbes de déplacement et de déformation sont conformes au comportement visco-élastique des matériaux hydrocarbonés. Les valeurs quant à elles, diffèrent quelque peu.

Une comparaison basée sur d'autres modèles numériques (disposant en particulier d'un module adapté aux effets de la visco-plasticité, non disponible pour la présente étude) devrait permettre d'approcher le comportement réel des chaussées.

La propagation de la chaleur après chaque changement de la température (phase I) se produit essentiellement par diffusion. Les flux hydrauliques étant très lents, le transfert de chaleur par convection forcée ou naturelle est négligeable. L'influence de la température sur l'évolution de la teneur en eau et de la succion est trop faible pour être clairement mise en évidence par les mesures, mais elle existe.

La simulation numérique par le modèle "Kdms1d" des succions et des teneurs en eau reproduit bien qualitativement les résultats des mesures réalisées sur le modèle physique. En particulier l'évolution beaucoup plus lente dans la couche supérieure que dans la couche inférieure est bien décrite par le modèle. Cela est contraire à ce que l'on pourrait s'attendre en raisonnant sur les perméabilités du sol saturé.

ZUSAMMENFASSUNG

1991 haben die Laboratorien LAVOC (Laboratoire des Voies de Circulation) und LMS (Laboratoire de Mécanique des Sols) der EPF (Ecole Polytechnique Fédérale) Lausanne eine Forschungsarbeit unter dem Namen „Experimentelle Gültigkeitsbestätigung der Verhaltensgesetze von bituminösen Materialien und Böden“ begonnen.

Hauptziel der Untersuchung war, auf einem Strassenoberbau die Gültigkeit numerischer Modelle und die Verhaltensgesetze von Strassenbaustoffen und Böden zu überprüfen.

Das Strassenmodell wurde in einer Grube von 5m Länge, 4.5m Breite und 2m Tiefe in der Grubenhalle (Halle Fosse) der EPFL realisiert. Das Modell bestand aus drei Schichten: einer 120cm dicken Schicht schluffigen Feinsandes am Grubengrund, darauf folgten 80cm mittlerer Sand - sogenannter GRECO - und an der Oberfläche befand sich eine 8cm dicke Schicht bituminösen Mischgutes, AB6.

Das Strassenmodell war mit 123 Messonden reichlich bestückt. Es wurden gemessen:

- Umgebungsfaktoren: Temperatur, Wassergehalt, Porenwasserdruck
- mechanische Faktoren: Verformung, Spannung, Verschiebung, Durchbiegung

Der Versuch war in drei Phasen aufgeteilt:

Phase I: Die Oberfläche des Strassenmodells wurde einem Temperaturkreislauf (23°C, 5°C, 23°C, 41°C und wieder 23°C) unterzogen, ohne Krafteinwirkung auf das Modell. Dasselbe war thermisch isoliert. Die Grundwassertemperatur wurde konstant auf 10°C gehalten.

Phase II: Der Deckbelag wurde mit je vier pseudo-statischen Lastzyklen belastet, und zwar bei verschiedenen Temperaturen (23°C, 5°C, 41°C, 23°C).

Phase III: Der Deckbelag wurde mit einem Verkehrssimulator dynamisch belastet. Die Modelltemperatur wurde auf 23°C beibehalten.

Die Messungen, die am bituminösen Oberbau ausgeführt wurden, stimmen nur teilweise mit den Resultaten des Simulationsprogrammes „PLAXIS“ der Universität Delft (Holland) überein. Die Verschiebungs- und Verformungskurven entsprechen der Visco-Elastizität der bituminösen Materialien. Die Werte an sich variieren.

Ein auf anderen numerischen Modellen basierender Vergleich (der im besonderen über ein den Eigenschaften der Visco-Plastizität angepasstes Modul - für die vorliegende Studie nicht zugänglich - verfügt) würde eine Annäherung an das reelle Verhalten der Fahrbahn begünstigen.

Die Wärmeausbreitung nach jedem Temperaturwechsel (Phase I) erfolgt ausschliesslich durch Diffusion. Die Wärmeübertragung durch erzwungene oder natürliche Konvektionsströmung ist vernachlässigbar, da die Grundwasserströmung sehr gering ist. Der Einfluss der Temperatur auf die Entwicklung des Wassergehaltes im Boden und des Saugvermögens existiert zwar, ist aber zu gering, um durch Messungen klar aufgezeigt zu werden.

Die numerische Simulation des Saugvermögens und des Wassergehaltes durch das vom Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) der EPFL entwickelte Modell „Kdns1d“ zeigt qualitativ deutlich die Resultate der am Strassenmodell durchgeführten Messungen auf. Das numerische Modell wiederum beschreibt klar die deutlich langsamere Entwicklung des Saugvermögens und des Wassergehaltes in der oberen Sandschicht im Vergleich zur unteren. Dies widerspricht den Erwartungen, ausschliesslich basierend auf der Durchlässigkeit gesättigter Böden.

1. INTRODUCTION

1.1 Objectifs

En 1991, les laboratoires des voies de circulation et de mécanique des sols de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne ont engagé une recherche intitulée: "Validation expérimentale des lois de comportement de matériaux hydrocarbonés et de sols à l'aide d'un modèle physique".

L'objectif principal a été de vérifier sur une structure de chaussée la validité de modèles numériques et de lois de comportement de matériaux routiers.

Les deux laboratoires disposent en commun d'une importante installation expérimentale comprenant une fosse pour la construction de modèles de chaussée de grandes dimensions et permettant d'appliquer une large gamme de charges tout en contrôlant au sein même de la structure le niveau hydrique et les températures.

Le modèle de chaussée reconstitué a tout d'abord été soumis à des cycles de température. Ensuite, des charges quasi statiques ont été appliquées à l'aide de vérins et de plaques d'appui à différents niveaux de température. Au cours de ces sollicitations, les mesures des déplacements, des contraintes des suctions et des températures ont été enregistrées. Pour terminer des charges dynamiques à l'aide du simulateur d'essieu en vraie grandeur ont été menées.

La validation a consisté à comparer les valeurs mesurées sur le modèle de chaussée avec les valeurs fournies par le modèle mathématique de comportement.

1.2 Mandat

Plusieurs équipes de chercheurs dans le monde travaillent pour établir des codes de calcul représentatifs du comportement des superstructures routières. En particulier un groupe d'études coordonnées (EUROGRECO) regroupe les scientifiques qui s'attachent à établir les modèles de calcul représentatifs du comportement des sols et des structures routières. Une collaboration s'est établie dans ce cadre entre les deux laboratoires de l'EPFL, l'Université de Delft (Prof. Vermeer) et l'Ecole nationale des travaux publics de l'Etat à Lyon (Prof. di Benedetto).

Il a été convenu que l'EPFL fournirait la base expérimentale par la construction et l'expérimentation à l'intérieur de la Halle-fosse et que les deux autres centres de recherches reprendraient également les données pour valider d'autres modèles numériques qui leur sont propres.

Le mandat a été financé partiellement par l'Office fédéral des routes (25 %), par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (15 %). Le reste a été fourni par le budget interne des deux laboratoires de l'EPFL.

Les essais, mesures et simulations ont été réalisés par M. Abdelhak Salhi, ingénieur TP de l'Ecole des Ponts et Travaux publics de Paris, pour la partie superstructure routière et par M. le docteur Ismaila Gueye, ingénieur civil de l'Université de Thiès (Sénégal).

2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1 Installation et mise en place de la structure

2.1.1 Description de la halle fosse

La validation expérimentale des lois de comportement des revêtements hydrocarbonés et des sols non saturés est étudiée à l'aide d'un modèle tricouche, composé d'une couche bitumineuse de 8 cm et de deux couches de sables.

La fosse d'essai de 19 mètres de long, 5 mètres de large et 2 mètres de profondeur n'est utilisée pour cet essai que sur une partie de sa surface (20 m² soit 4 x 5 m). Le modèle est couvert d'une enceinte isolée thermiquement (figures 2.1 et 2.2).

Pour rester en concordance avec les expériences menées au laboratoire de l'ENTPE [ref 2.1] et ainsi avoir un support quant à l'appréciation des résultats fournis par la présente expérience, les champs de température appliqués à la surface sont: 5 °C, 23 °C, 41 °C.

Au fond du modèle, la température est par contre maintenue constamment à 10 °C, valeur moyenne en Suisse des températures à deux mètres de profondeur.

Quant aux sollicitations mécaniques, elles seront quasi statiques pour une première étape de l'expérience.

L'application de ces deux sollicitations est possible grâce à la fosse dont dispose l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Pour obtenir des basses températures dans le modèle, un groupe frigorifique d'une puissance de 100 kW alimente d'une part des échangeurs fréon-glycol pour le fond de la fosse, dont la température peut être maintenue constante dans une plage de -10 °C à +20 °C, et d'autre part des échangeurs fréon-air, permettant de faire varier la température de l'air dans l'enceinte, de - 20 °C à +20 °C, selon n'importe quel programme.

Afin d'obtenir de hautes températures, en l'occurrence une valeur de 41°C, des lampes infra-rouges seront installées avec un système de ventilation assurant son uniformité. Ces rampes sont liées à un thermostat permettant la régulation de la température à la valeur souhaitée.

Pour simuler la présence de nappes phréatiques, une couche de gravier de 10 cm assure l'alimentation dans le modèle par l'intermédiaire des tubes de mise en charge placés latéralement. Cette couche de gravier est protégée par un bidim (géotextile anticontaminant).

La nappe phréatique est située à la cote de -188 cm (figure 2.1), c'est-à-dire dans le sable limoneux, à 10 cm au-dessus du gravier. Les cotes de profondeur sont données à partir de la surface du revêtement.

Concernant la charge qui sera appliquée, la halle dispose d'un cadre de chargement, d'une capacité de 100 t, auquel un vérin hydraulique à double effet est solidaire. Celui-ci, qui permet d'obtenir une charge statique de 1000 kN et dynamique (fréquence maximale égale à 3 HZ) de 500 kN, sera appliqué en deux points choisis de manière à assurer la répétabilité des mesures, respectant ainsi les deux contraintes suivantes:

- éviter l'interaction des effets des deux charges,
- éviter l'interaction entre une charge et le mur.

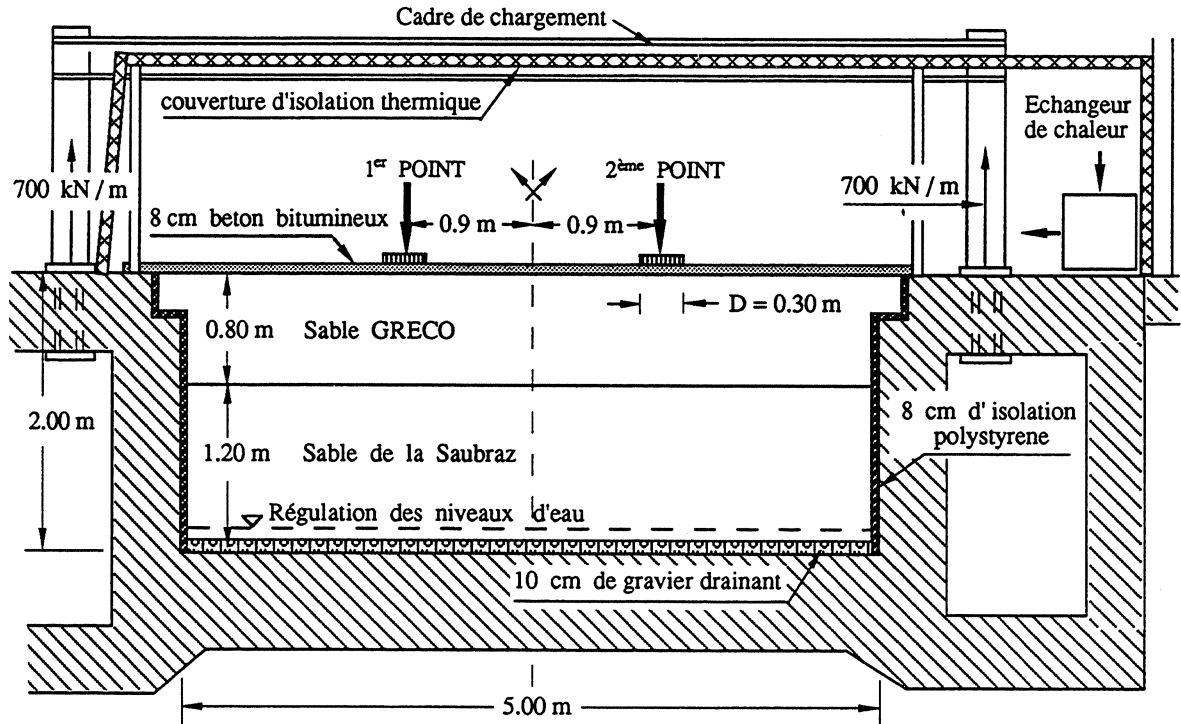


Figure 2.1 Coupe transversale du modèle physique

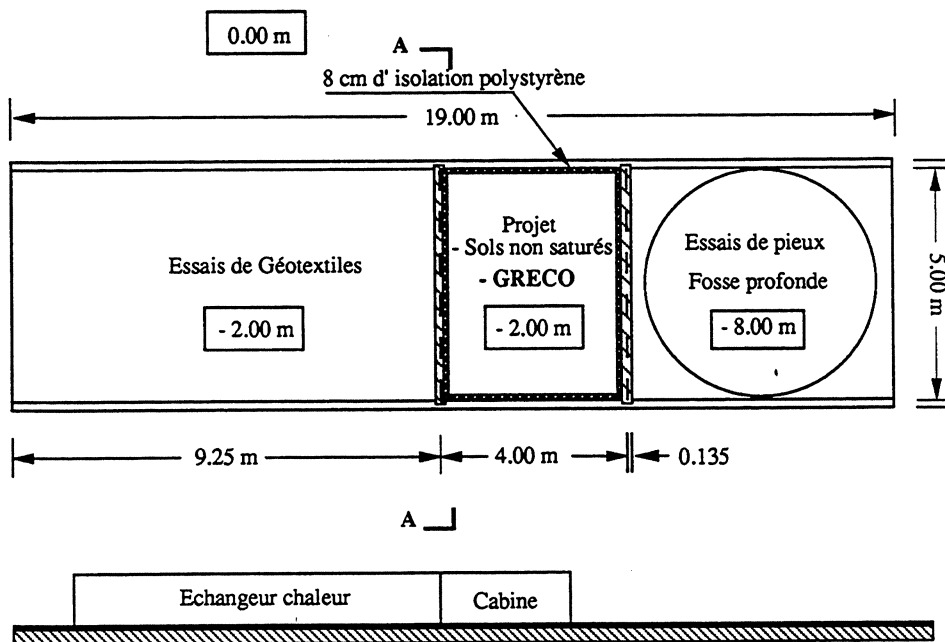


Figure 2.2 Vue en plan de la fosse et de l'emplacement du modèle physique

2.1.2 Réalisation du modèle (Annexes A1 + A2)

Deux types de sable ont été mis en place. Le premier en fond de fosse, sur une épaisseur de 1.20 m, est un sable fin, limoneux, particulièrement adapté pour l'étude des sols non saturés. Il provient de la gravière de Saubraz (canton de Vaud).

La partie supérieure (80 cm) est constituée d'un sable moyen, dit sable GRECO, parce qu'il est utilisé et testé de nombreuses fois dans le cadre d'essais précédents, notamment à l'ENTPE. Il provient de la région lyonnaise en France.

Ils ont été compactés pour avoir une densité voisine de l'optimum Proctor. Des contrôles de la teneur en eau et de la densité ont été faits après chaque étape de compactage à la plaque vibrante.

La couche bitumineuse a été mise en place et compactée le 3 mars 1991. A cet effet, et de par la disposition de la halle, il est possible d'utiliser un matériel de pose classique, soit finisseur et compacteur de chantier.

Là aussi le matériau retenu était le plus proche possible des bétons bitumineux testés en laboratoire à l'ENTPE. Pour reconstituer le mieux ce matériau, nous avons par exemple eu recours à un liant B 60/70 identique à celui utilisé à Vaulx-en-Velin et provenant directement de la raffinerie de Feyzin en France.

2.2 Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques granulométriques et de compactage des deux sables utilisés sont données aux figures 2.3 et 2.4.

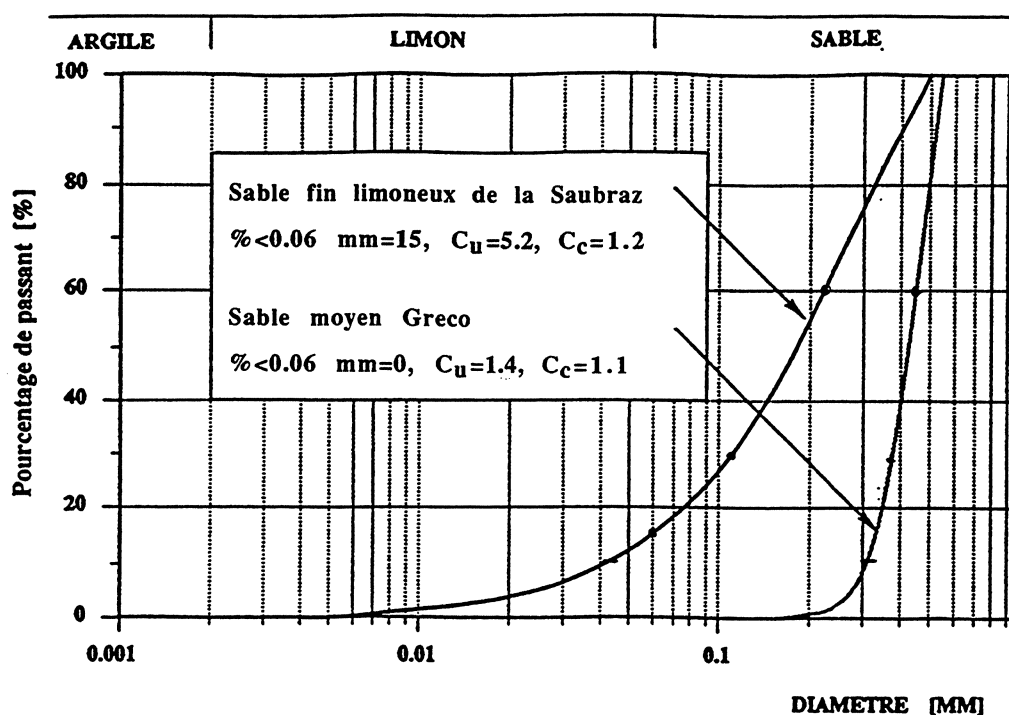


Figure 2.3 Courbes granulométriques des sables Saubraz et Greco

Ils ont été mis en place en respectant les spécifications de compactage, 97 à 98 % du poids volumique apparent sec maximal et une teneur en eau de ± 1 % de la teneur en eau optimale à savoir :

- sable Saubraz : $w_{\text{moy}} = 15.77$ % et $\gamma_{\text{dmoy}} = 15.91$ kN/m³,
- sable GRECO : $w_{\text{moy}} = 8.15$ % et $\gamma_{\text{dmoy}} = 14.34$ kN/m³.

Le compactage est effectué par une plaque vibrante dont les caractéristiques sont :

- poids du compacteur : 0.775 kN
- surface d'appui : 55 cm x 48 cm
- fréquence des vibrations : 2800 vib. / min
- vitesse de déplacement : 20 à 25 m. par min.

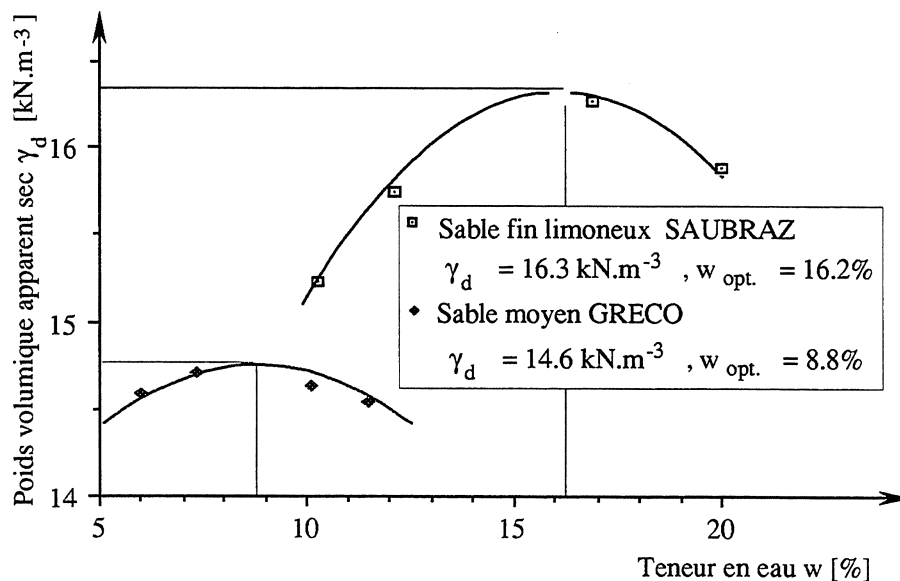


Figure 2.4 Résultats des essais de compactage au laboratoire sur les sables Saubraz et Greco

Le remplissage de la fosse est réalisé par couches de 10 cm d'épaisseur. Le contrôle de la teneur en eau est fait après chaque étape de compactage, et celui de la densité par des prélèvements de carottes de 8 cm de diamètre sur 15 cm de long, tous les 20 cm (2 couches) et à cinq endroits différents.

Pour le bitume, ses principales caractéristiques rhéologiques ont été déterminées à la livraison et après mise en place du béton bitumineux et récupération du liant (figure 2.5). Le béton bitumineux retenu, de grain maximal 6 mm (figure 2.6) comporte 7 % de liant B 60/70 pour une teneur en filler (éléments plus petits que 0.09 mm) de 12.5 %.

Les caractéristiques Marshall de ce matériau ont donné en laboratoire une teneur en vides de 3.1 %, une stabilité de 13.0 kN et un fluage de 4.0 mm. De par la faible rigidité du sol sous-jacent, l'enrobé mis en place n'a finalement qu'une compacité de 95 %, donc inférieure aux prévisions de l'essai Marshall.

De plus, des essais de module de fatigue sur le béton bitumineux ont été menés à 3 niveaux de compacité, soit 93 %, 95 % et 98 %. A la figure 2.7, sont donnés les modules pour la compacité de 95 %, ramenés à une température standard de 10 °C.

Tout au long de la mise en place des matériaux, les très nombreux capteurs, décrits dans le paragraphe 2.3, ont été insérés dans la structure.

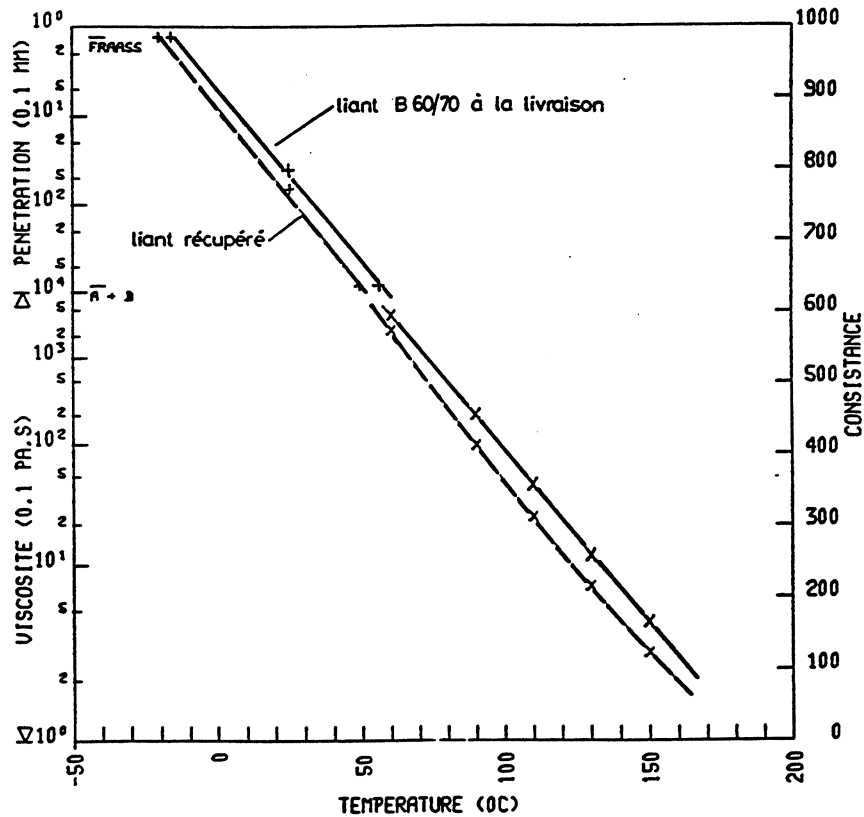


Figure 2.5 Courbe de consistance du liant B 60/70

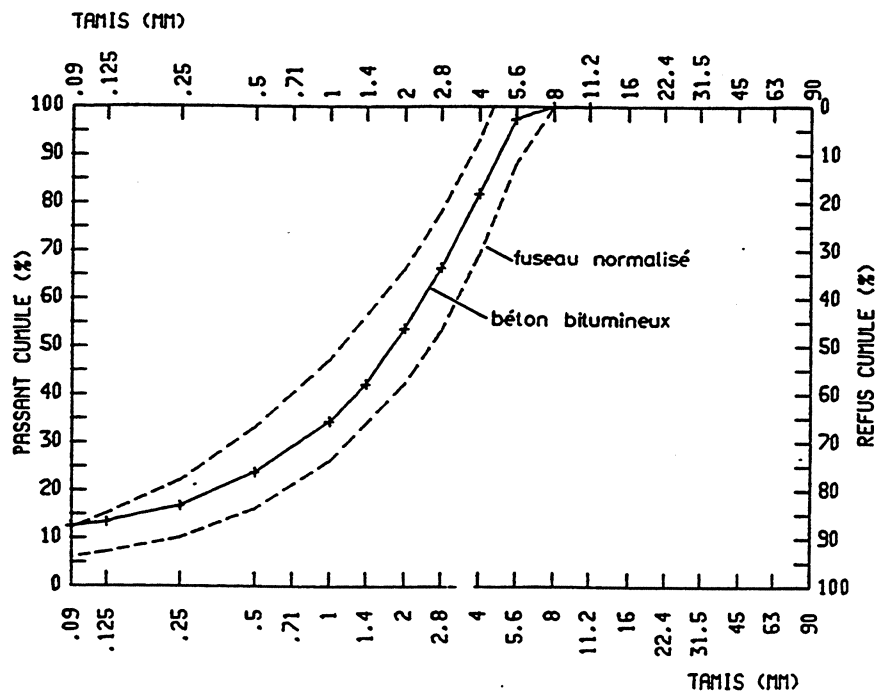


Figure 2.6 Courbe granulométrique du béton bitumineux

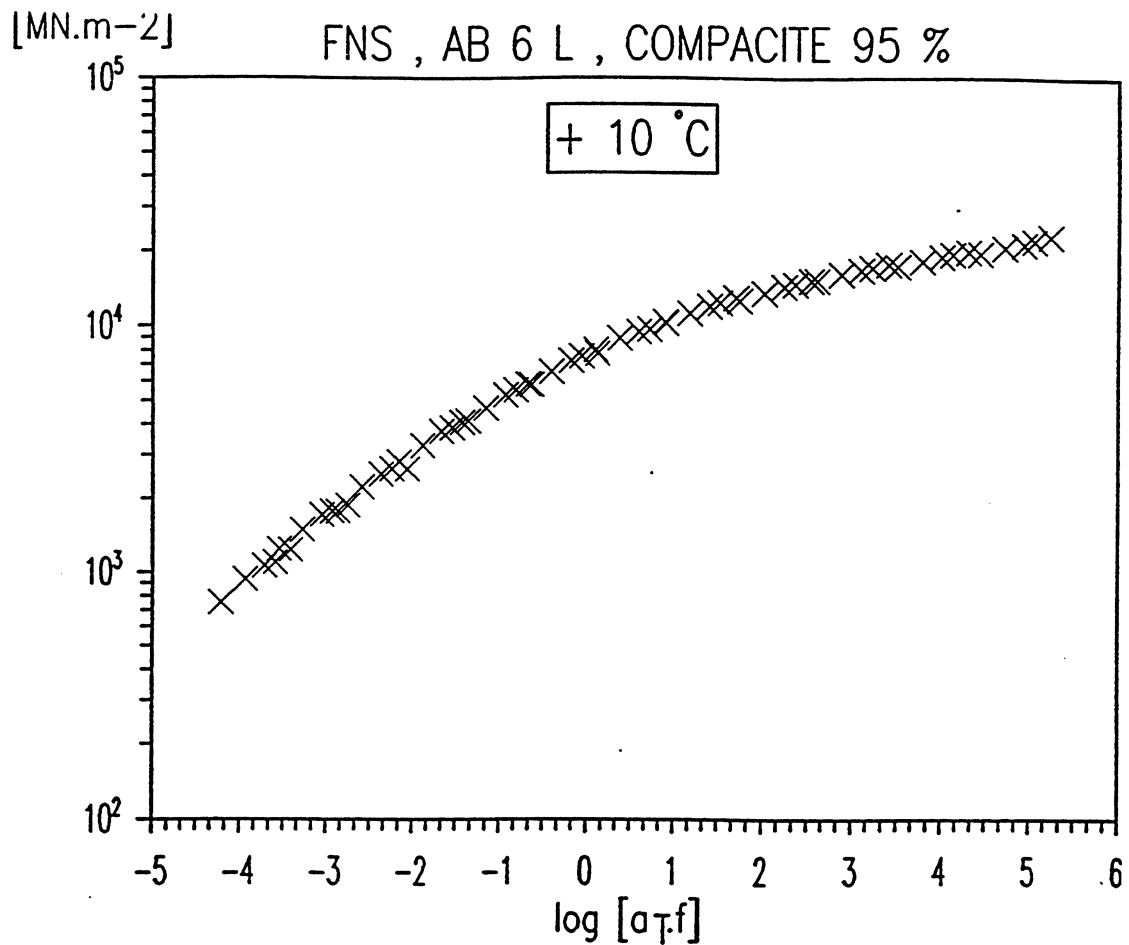


Figure 2.7 Courbe maîtresse du béton bitumineux rapportée à 10 °C

Les essais de quantification des matériaux bitumineux ont été réalisés sur des échantillons prélevés dans la structure. Une surprofondeur a été ménagée à la partie latérale de la structure.

2.3 Instrumentation et acquisition des données

Plusieurs capteurs de différents types ont été mis en place à différents niveaux de la structure (figures 2.8, 2.9 et 2.10). Leur position est décrite aux annexes B1 à B3.

Ils sont destinés:

- à des mesures d'environnement: température, teneur en eau, pression interstitielle dans le sol,
- à des mesures mécaniques : déformations, contraintes, déplacements, déflexions.

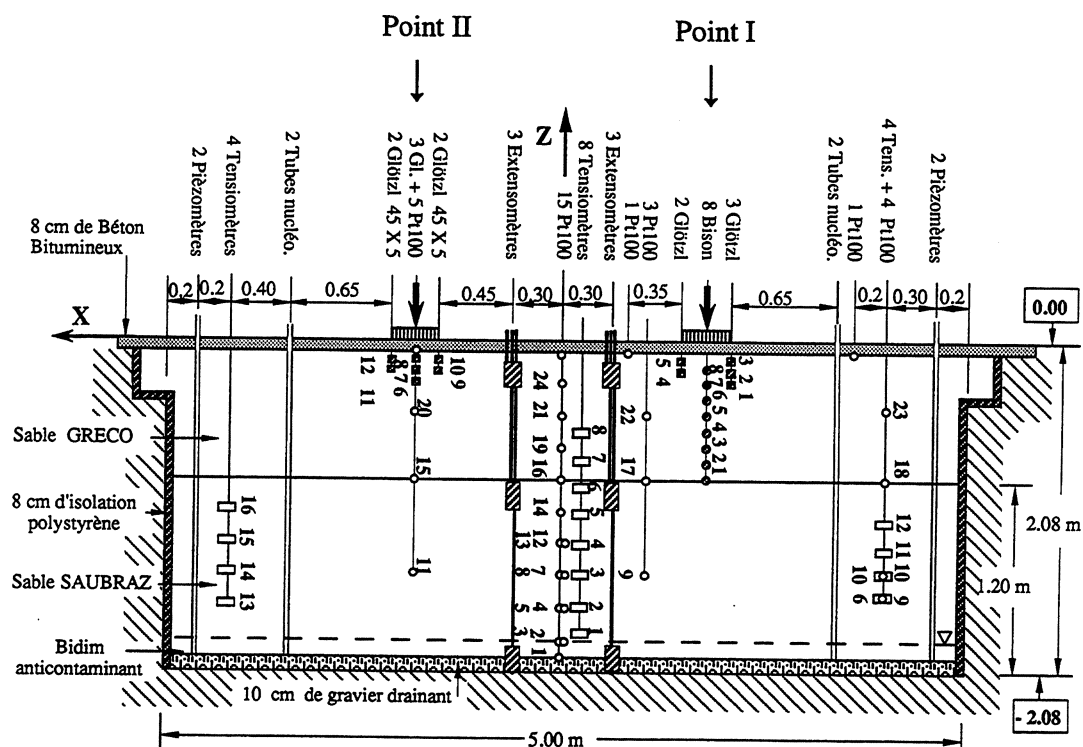


Figure 2.8 Coupe transversale et instrumentation des deux couches de sables Greco et Saubraz

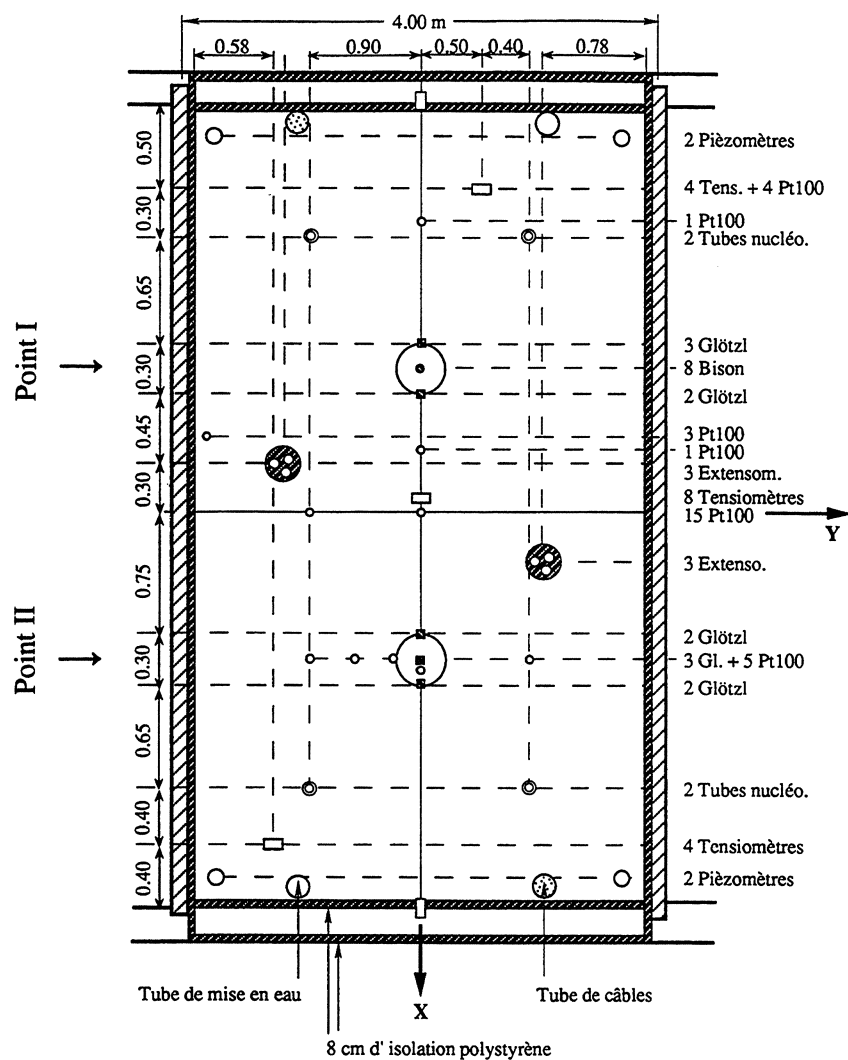


Figure 2.9 Vue en plan des appareils et des points de charge

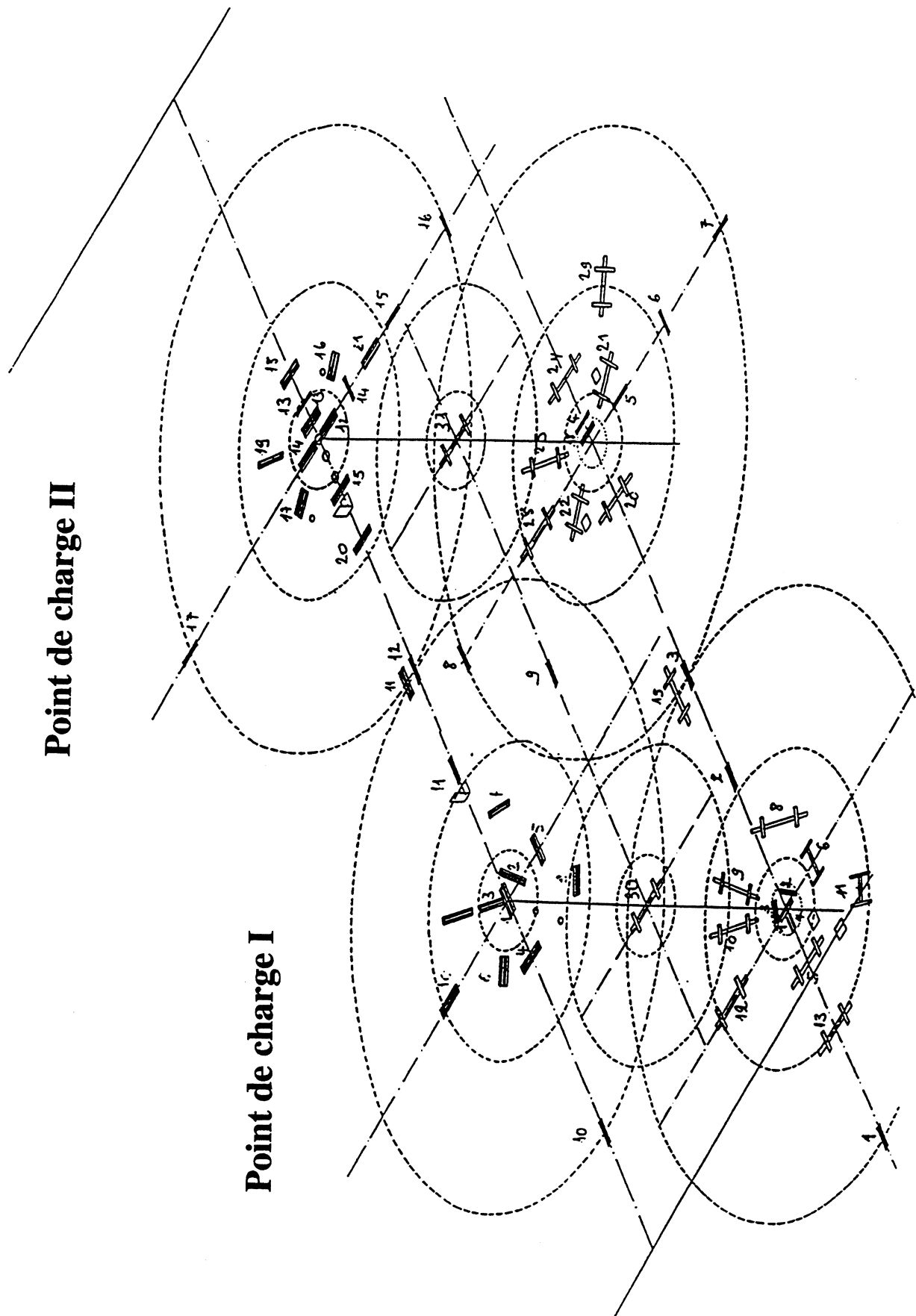


Figure 2.10 Disposition des capteurs de température et de déformations dans la couche bitumineuse

2.3.1 Mesure de la température

Les capteurs de température sont du type PT 100 (figure 2.11), dont la résolution est de 0.2 °C. Ces résistances, en platine, enrobées de céramique (type M-kN 2528), sont protégées par un tube en cuivre (diamètre = 4 mm) rempli de silicone.

39 capteurs ont été placés dans la structure:

- 17 dans le revêtement bitumineux,
- 22 dans le sol.

Quatre thermomètres à mercure permettent ailleurs de contrôler la température de l'air et de la surface de la superstructure.

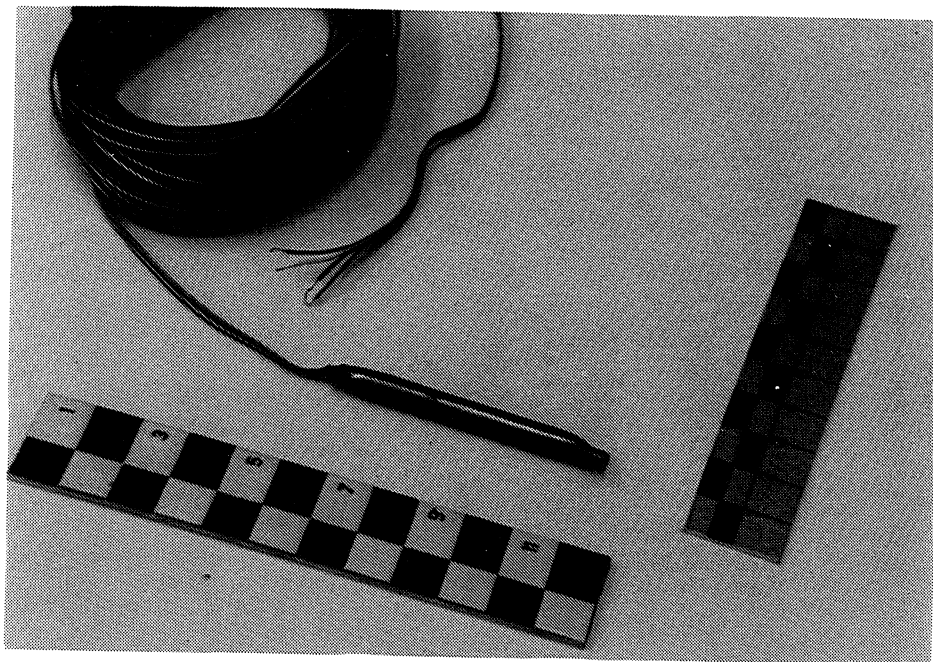


Figure 2.11 Sonde de température PT 100

2.3.2 Mesure de la teneur en eau

Quatre tubes en aluminium ont été mis en place pour permettre la mesure au nucléohumidimètre des variations de la teneur en eau et les transferts hydriques.

2.3.3 Mesure de la succion

Seize tensiomètres, chacun équipé d'une bougie poreuse mise à différentes altitudes, ont été placés à différents points de la structure au-dessus de la nappe.

Rappelons rapidement les composantes du tensiomètre ainsi que son principe de mesure:

- deux tubes tensiométriques adaptés à la profondeur de mesure du point considéré,
- une bougie poreuse spéciale, ne permettant pas le passage de l'eau dans le sol, créant ainsi une dépression; elle évite les entrées d'air pour des pressions courantes (5 bars). Le sol cherche à aspirer l'eau de la bougie qui ne peut pas passer; cet effet se traduit par une dépression qui est mesurée à l'aide du capteur situé à l'extrémité de l'un des tubes. Le deuxième tube est prévu pour saturer et purger l'ensemble du système tensiométrique,

- un capteur de pression Keller alimenté en tension (7.5 Volts) et étalonné au moyen d'un potentiomètre afin qu'il ait le même facteur de conversion. L'erreur de linéarité de ce capteur est inférieure à 0.5 PE (pleine échelle) pour des gammes de températures d'opération comprise entre -10 °C à +80 °C.

D'où le calcul de la pression interstitielle par :

$$P_{interstitielle} = (U_a - U_w) = \rho g z$$

avec: ρ = masse volumique de l'eau

z = altitude

Si on considère que $U_a = U_{atm} = 0$, on aura :

$$P_{interstitielle} = - U_w = \rho g z$$

Cette pression négative est appelée succion.

2.3.4 Mesure du niveau d'eau

Le contrôle du niveau est assuré par 4 piézomètres crépinés sur toute leur longueur et enveloppés d'un géotextile. Les niveaux d'eau sont mesurés au moyen d'une sonde qui envoie un signal sonore dès qu'elle touche la surface de l'eau.

2.3.5 Mesure des déformations dans le sol

Trois types de capteurs sont utilisés:

- des capteurs inductifs de type TRL (fig. 2.12); une distance minimale de 25 cm entre chaque axe doit être respectée entre deux capteurs afin d'éviter leur interaction mutuelle,
- des capteurs magnétiques de type BI-SON.
- des extensomètres qui mesurent les variations globales des épaisseurs des deux couches de sable. Deux séries de trois extensomètres ont été mis en place. Chaque extensomètre est constitué d'une tige métallique dont l'extrémité supérieure est libre, et l'extrémité inférieure est ancrée dans la couche sous-jacente à sa base.

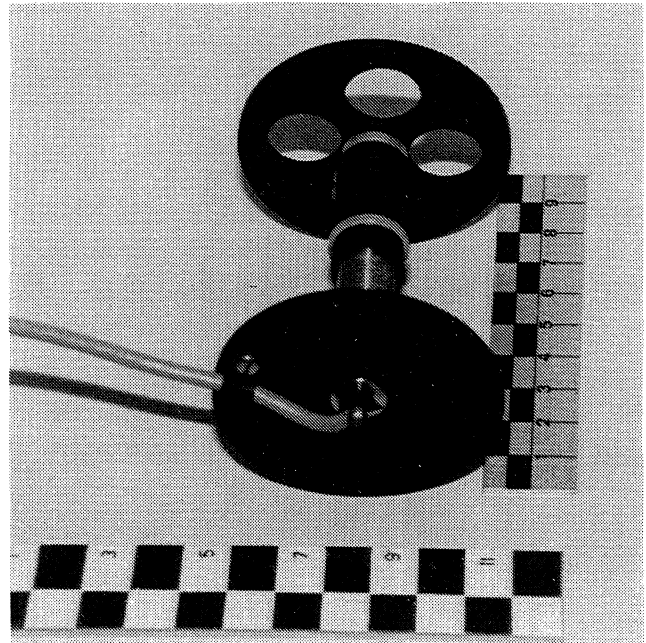


Figure 2.12 Capteur de déplacement TRL

2.3.6 Mesure des déformations dans le revêtement bitumineux

Pour le choix de ces jauges, nous avons essentiellement considéré les trois points suivants:

1. L'environnement : principalement la température.

- Les trois types de jauges sont utilisables dans un large intervalle de température (entre 20 °C et 160 °C).

2. La nature physique de la structure: c'est essentiellement le choix du module de la jauge, son allongement maximal ainsi que la résolution du problème de compensation qui se posent dans cette deuxième partie.

- Les jauges HBM (type DA3) (figure 2.13) sont spécialement conçues pour l'asphalte; quinze ont été mises à l'interface sol-BB et deux à l'interface BB-BB. En effet, la pose du revêtement s'est faite en deux couches de 4 cm chacune car se posait le problème de portance du sol sous-jacent qui avait un faible module de compressibilité 25'000 KN/m².

Les jauges KLOWA (type KM-120-H2-11L-100-3) (figure 2.14), dont la résistance est enrobée dans de l'acryl, ont été rajoutées à la fin uniquement pour comparaison avec les jauges HBM; six ont été mises à l'interface.

A ces deux types de jauges, ont été ajoutés deux barreaux en aluminium aux deux extrémités pour assurer un bon ancrage dans le matériau.

Pour estimer les valeurs maximales des champs de déformation (ou de la déflexion), l'hypothèse d'élasticité, largement utilisée dans les modèles de calcul, n'est pas justifiée. Ces valeurs sont en effet obtenues pour une forte valeur de la température, en l'occurrence 41 °C pour la présente expérience, valeurs où la loi de comportement des matériaux bitumineux sort largement du domaine élastique.

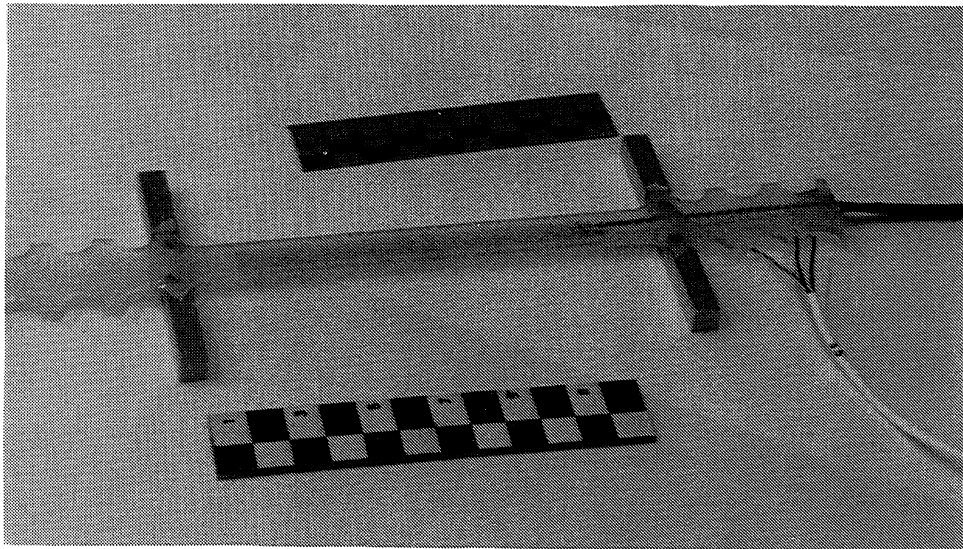


Figure 2.13 Jauge de déformation type HBM (DA3)

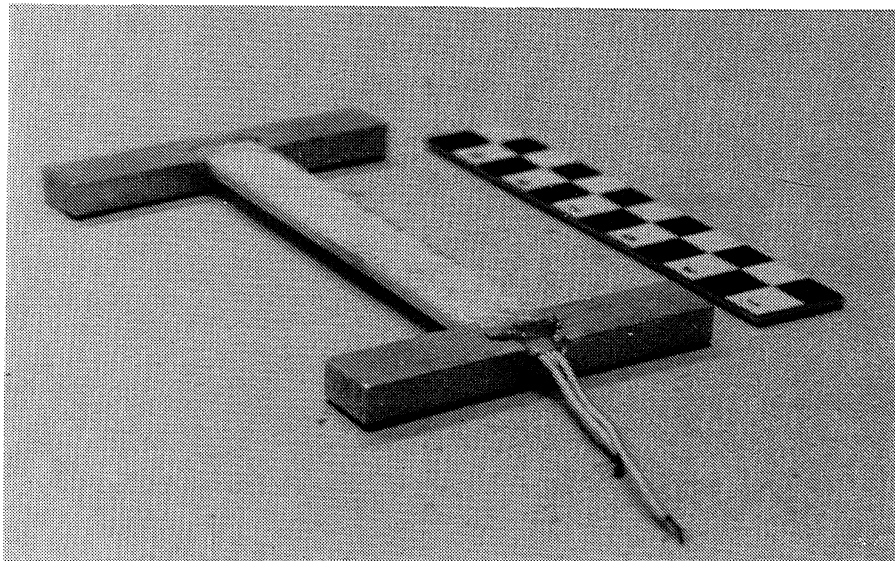


Figure 2.14 Jauge de déformation type KIOWA (KM-120-H2-11L-100-3)

Ces jauges possèdent cependant des valeurs de déformation maximales données par le constructeur et nettement supérieures à celles obtenues dans la pratique à travers les multiples expériences faites dans ce domaine.

Pour mesurer les déformations très près des deux axes de chargement, et pour ne pas avoir d'encombrement de jauges HBM ou KIOWA dans cette région, ce qui pourrait modifier les caractéristiques du matériau, des jauges M=M (type EA-09-20CBW-120) (figure 2.15) ont été collées au laboratoire sur des tranches d'éprouvettes PCG de hauteur 1 cm. Huit ont été mises à l'interface.

Après pose du revêtement, huit jauges sur 29 n'ont pas fonctionné dont 1 jauge HBM, 4 jauges KIOWA, 3 jauges M=M.

Enfin, on a mis à l'air libre trois jauges de ces trois types, mesurant ainsi les déformations liées uniquement à la jauge.

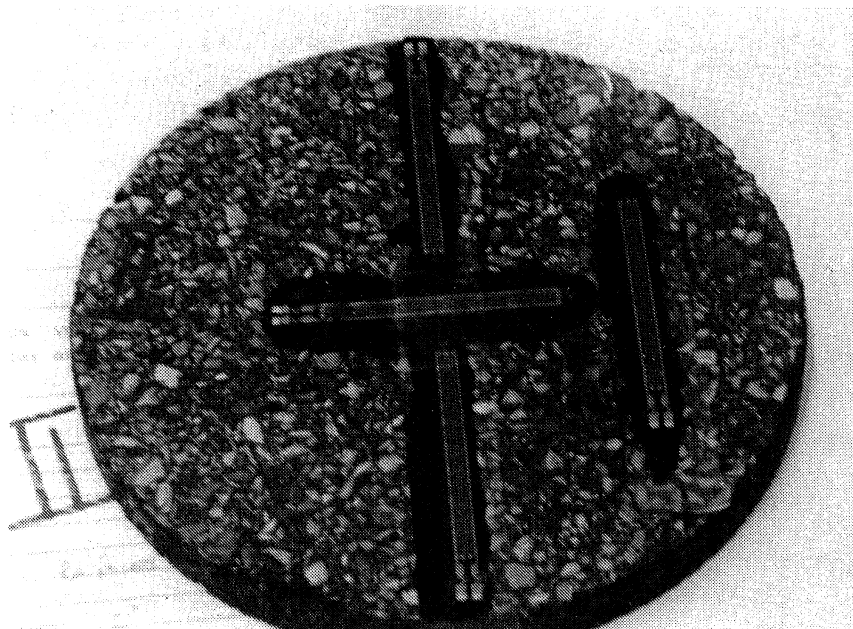


Figure 2.15 Jauge de déformation de surface type M=M (EA-09-20CBW-120)

3. La nature géométrique de la structure: on a choisi des jauges assez longues prenant en compte l'hétérogénéité du matériau bitumineux.

Enfin, la déformation verticale à l'interface sol-BB a été mesurée en quatre points de la structure à l'aide de capteurs inductifs (type W5K). Quatre trous ont été forés dans le revêtement pour les loger.

2.3.7 Mesure des contraintes

Trois capteurs de pression Kiowa sont logés dans la plaque sur laquelle s'applique le vérin, avec une partie sensible en contact avec la surface du revêtement.

Dans le sable Greco, 12 capteurs de type GLOEZTL (type EF 45 B5 mit 8 Stk) à pression d'air de 45 cm sont installés. Ils sont placés sous les points de chargement et au niveau le plus superficiel possible pour mesurer les contraintes normales dues à la charge et éventuellement aux sollicitations thermiques.

2.3.8 Mesure des déplacements à la surface et à l'interface AB 6-sable Greco

Onze capteurs inductifs (type W5K et W10K) mesurant déplacements horizontaux (H) et verticaux (V) sont mis à la surface du modèle et à l'interface AB6-sol Greco (tableau 1).

	POINT DE MESURE I						POINT DE MESURE II			
	R = 0	R = 15	R = 25	R = 30	R = 45	R = 90	R = 0	R = 20	R = 25	R = 45
z = 0	V		V		H	V	V		H	V
z = 8		V		V				V	V	

Tableau 2.1: Position des capteurs inductifs dans le modèle

2.3.9 Systèmes d'acquisition

Il est essentiellement conditionné par la vitesse de variation des grandeurs.

Pour les phénomènes quasi statiques (phases I et II), la fréquence maximale de sollicitation ne dépasse pas 1 Hz. Un système UPM 60 (matériel HBM), entièrement piloté par un ordinateur Compaq 386, convient à l'acquisition automatique des données.

Pour les chargements dynamiques (phase III), les mesures ont été menées sur un DEC 486 utilisant le logiciel LABVIEW et relié à des modules d'acquisition DMC 9012 de HBM.

Au total , 123 capteurs répartis comme suit ont été suivis grâce à ce système d'acquisition :

- 40 capteurs de température dont 17 dans la couche bitumineuse et 23 dans le sol,
- 44 capteurs de déformation dans la couche bitumineuse dont 25 radiaux et 19 orthoradiaux
- 11 capteurs de déplacement dont 7 à la surface du modèle et 4 à l'interface AB6-sol Greco,
- 16 tensiomètres dans le sol (sables Greco et Saubraz),
- 9 capteurs TRRL dans le sable Greco,
- 3 capteurs Kiowa sous la plaque de chargement.

Par ailleurs, les 8 capteurs Bison et les 12 capteurs Gloetzi placés dans le sable Greco ont été raccordés à un autre système d'acquisition spécifique à ces capteurs.

3. PROGRAMME ET RÉALISATION DE L'ESSAI

L'essai s'est déroulé en trois phases dont les programmes sont illustrés par les figures 3.1, 3.2 et 3.3:

Phase I, figure 3.1. Le modèle a été soumis à des variations de température en surface, sans aucune application de charge, la température de la nappe à la base du modèle étant constante à 10 °C.

Phase II, figures 3.1 et 3.2. Le revêtement a été soumis à des cycles de charge pseudostatique appliqués chaque fois de manière identique, mais successivement aux points I et II du modèle. Ces cycles de chargement ont été répétés quatre fois à une température de 23 °C, 5 °C, 41 °C et 23 °C, l'intensité des charges étant adaptée à la température.

Phase III, figure 3.3. Le revêtement a été soumis aux charges dynamiques de l'orniéreur lourd du LAVOC, la température étant constante et égale à 23 °C. Les grandes dimensions de l'orniéreur empêchent la mise en place de la couverture isolante au-dessus du modèle. L'essai ne peut donc être fait qu'à une température voisine de la température ambiante de la halle.

3.1 Phase d'essai I "Mise en température"

Cette phase a débuté le 2 juillet 1991 (figure 3.1) par la mise en température de la base du modèle afin d'obtenir les 10 °C prévus. Une semaine a été nécessaire pour que cette température se stabilise. L'obtention d'une température au palier de 23 °C à la surface s'est avérée délicate et finalement une valeur stable n'a pu être obtenue qu'autour de 21 °C. Le système d'échangeur fréon-air permet en effet d'obtenir des températures très basses, mais s'avère relativement instable lorsqu'il est proche de la température ambiante.

L'essai s'est poursuivi par un passage de la température de 23 °C à celle de 5 °C le 17 juillet. Il a fallu 12 jours pour atteindre la stabilité dans la couche bitumineuse et 3 semaines pour que le gradient dans le sol soit uniforme. Auparavant, deux critères avaient été fixés comme condition pour le passage d'une température à une autre :

- stabilité de la température dans le sol ≤ 0.2 °C pendant 48 heures,
- stabilité de la pression interstitielle ≤ 0.2 kPa pendant 48 heures.

A partir du 6 août, la consigne de température a été remplacée à 23 °C et en 9 jours, la stabilité était considérée comme atteinte dans la partie bitumineuse pour cette température proche de la température ambiante. Ici encore, 3 semaines ont été nécessaires pour que la température se stabilise à l'intérieur du massif.

Ce sont ensuite des chauffages par infrarouge reliés à un thermostat qui ont permis le 28 août de monter la température à 41 °C. Par précaution, les rampes ont été inclinées à 45 °C vers le haut afin d'éviter un chauffage par convection pouvant beaucoup influencer localement la température de surface.

A partir du 23 septembre, les rampes infrarouges ont été déconnectées et le système de refroidissement a été remis en activité pour redescendre à la température de 23 °C. On relèvera que lors du dernier cycle, pour le passage de 41 °C à 23 °C, une panne de régulation n'a été décelée que le matin, 20 heures après l'affichage de la consigne, amenant la température de l'air à 8 °C. Après la réparation, la stabilité n'a été retrouvée qu'après 2 jours.

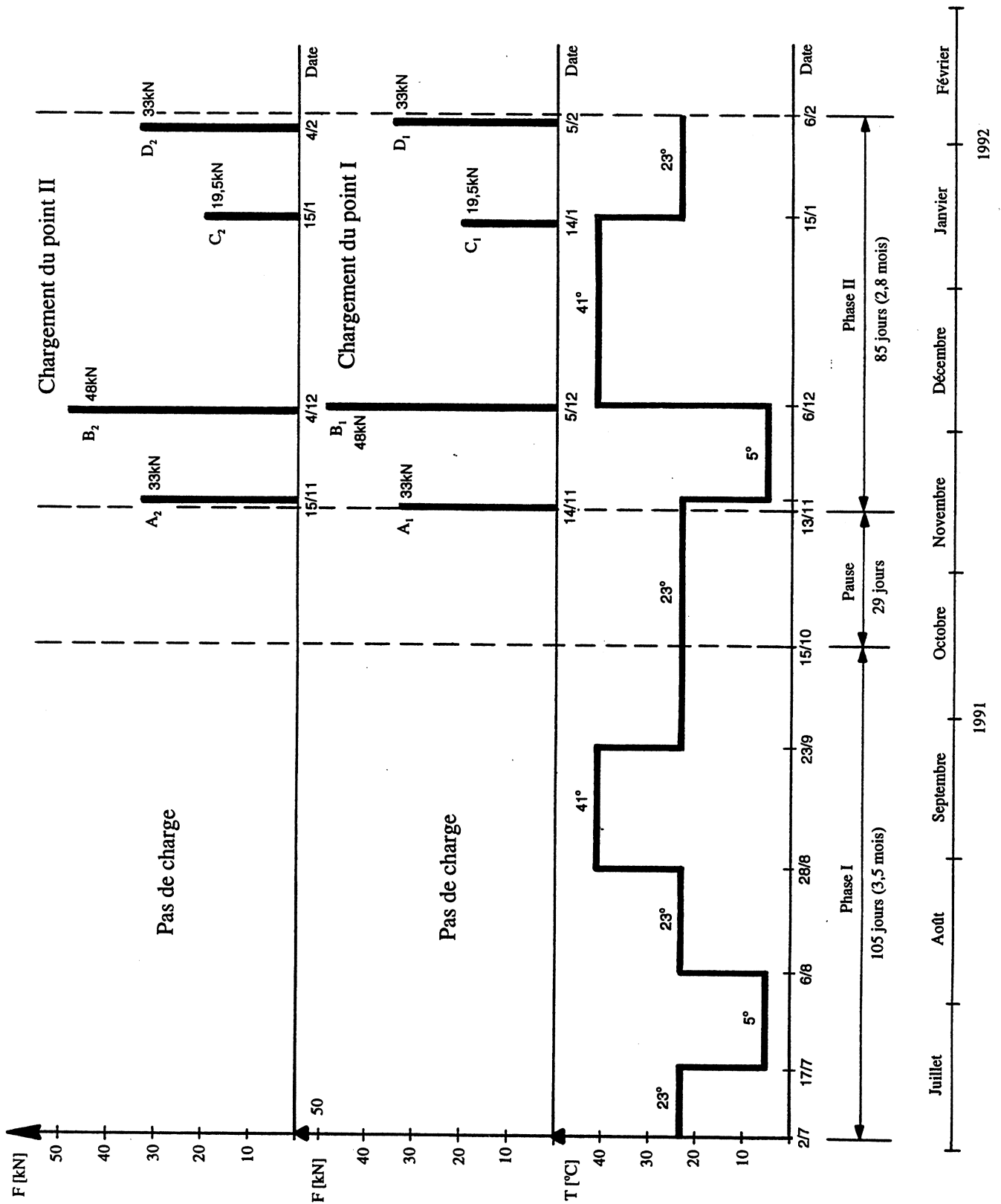


Figure 3.1 Programme d'essai pour les phases I et II

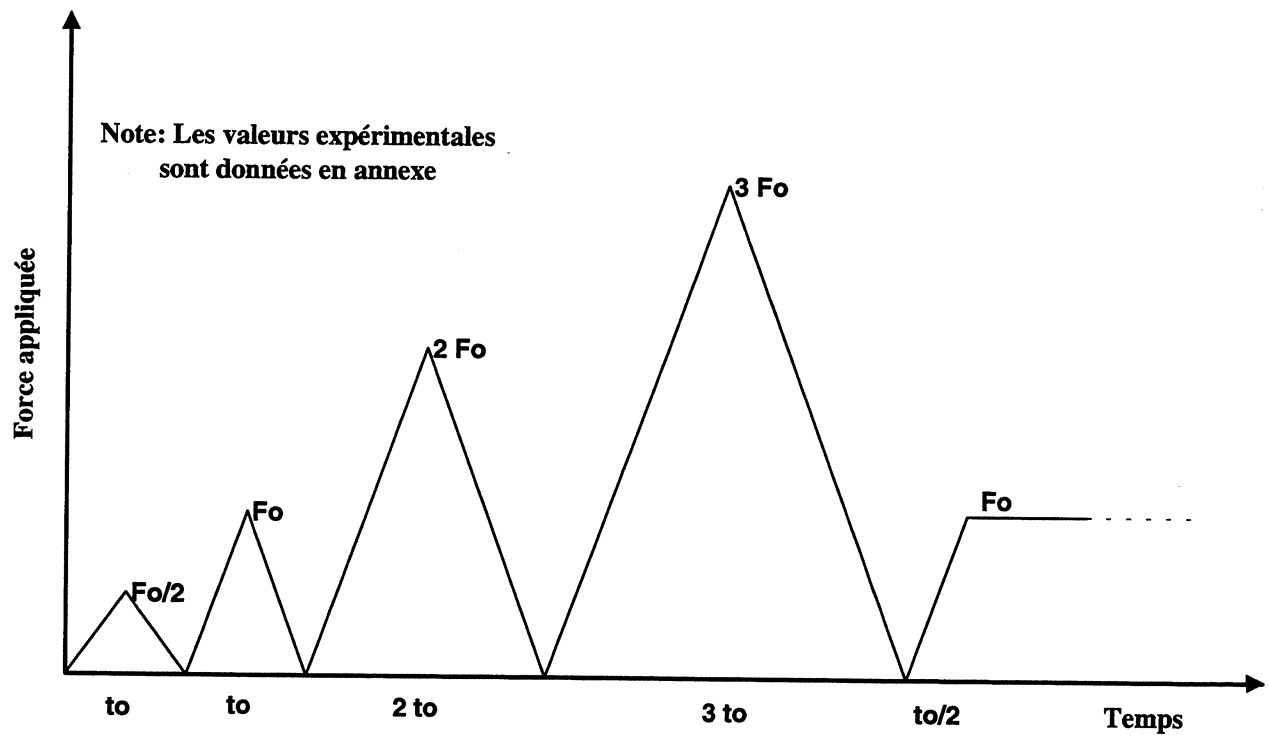


Figure 3.2 Programme des chargements de la phase II

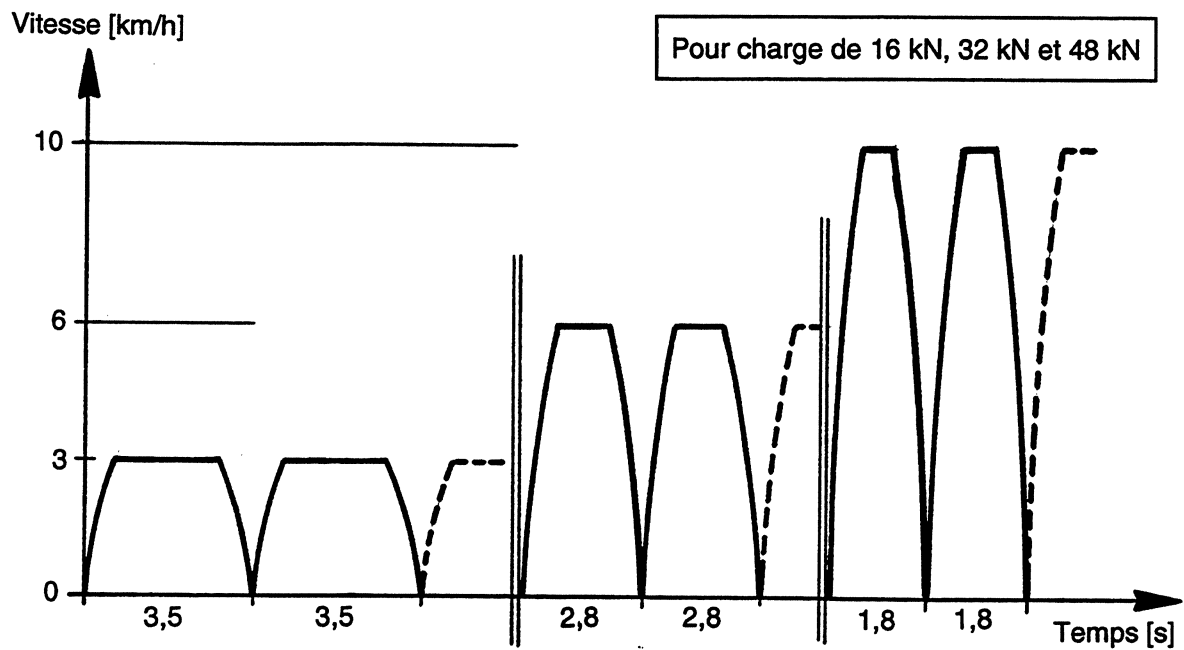


Figure 3.3 Programme d'essai pour la phase III

3.2 Phase d'essai II "Charges pseudo-statiques"

Les charges pseudo-statiques (figures 3.1 et 3.2) ont été appliquées sur une plaque circulaire rigide de 30 cm de diamètre, placée successivement aux points I et II (voir figures 2.8 et 2.9). Chaque essai A1, A2.....D1, D2 comprend 4 cycles de charge avec $F_0/2$, F_0 , $2F_0$ et $3F_0$. A l'annexe C est donné le programme de ces huit essais. La vitesse de chargement et de déchargement est comprise entre 0.15 et 0.90 kN/min.

Le choix des forces F_0 appliquées au vérin sur la surface de la structure a été fait sur la base d'une simulation à l'aide du logiciel PLAXIS de l'université de Delft. Les paramètres introduits dans le modèle sont, pour les matériaux des évaluations tirées des travaux de l'ENTPE, et pour les épaisseurs et la constitution de la structure, des valeurs théoriques. La figure 3.4 représente les résultats de cette simulation.

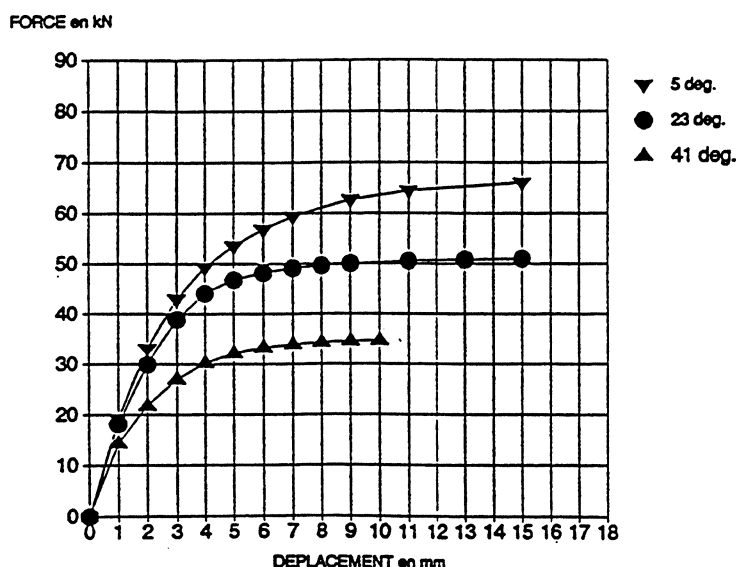


Figure 3.4 Comportement prévu par PLAXIS

Le tableau 3.1 indique les valeurs des charges de rupture données par la simulation.

T = 41 °C	$F_{lim} = 35 \text{ kN}$
T = 23 °C	$F_{lim} = 52 \text{ kN}$
T = 5 °C	$F_{lim} = 68 \text{ kN}$

Tableau 3.1 : Charges de rupture

Pour éviter la rupture lors des essais de chargement, les charges à appliquer lors des essais ont été calculées en appliquant les coefficients de sécurité suivants:

$$CS (41 \text{ °C}) = 0,8 \times 0,7 = 0,56$$

$$CS (23 \text{ °C}) = 0,8 \times 0,8 = 0,64$$

$$CS (5 \text{ °C}) = 0,8 \times 0,9 = 0,72$$

La charge à ne pas dépasser lors des essais est alors $3F_o = F_{lm} \times CS$.

L'augmentation de charge étant prévue en 3 paliers égaux, F_o représente l'augmentation de charge de chaque palier.

Température	Premier cycle F_o	Charge maximale $3F_o$
41 °C	6.5 kN	19.5 kN
23 °C	11 kN	33 kN
5 °C	16 kN	48 kN

Tableau 3.2: Valeurs des forces (F_o)_i

Température	Point de charge	Durée Jours et heures D: début - F: fin		Courbe de chargement
23 °C	I	D : 13.11.91 9:02 F : 14.11.91 7:46	22 h 44 min	11-22-33-11 kN
	II	D: 15.11.91 7:49 F: 15.11.91 19:00	11 h 11 min	11-22-33-11 kN
23 -5°C		D: 15.11.91 19:20 F: 04.12.91 9:00	18 j 13 h 40 min	
5 °C	II	D : 04.12.91 9:01 F: 05.12.91 7:32	22 h 31 min	16-32-48-16 kN
	I	D: 05.12.91 10:55 F: 06.12.91 12:14	25 h 19 min	16-32-48-16 kN
5 -41 °C		D: 06.12.91 12:44 F : 14.01.92 6:05	38 j 17 h 21 min	
41 °C	I	D : 14.01.92 8:06 F : 15.01.92 9:16	25 h 10 min	6.5-13-19.5-6.5 kN
	II	D: 15.01.92 10:10 F: 15.01.92 19:12	9 h 2 min	6.5-13-10.5-6.5 kN
41 -23 °C		D: 15.01.92 19:28 F: 04.02.92 5:21	19 j 9 h 53 min	
23 °C	II	D: 04.02.92 8:50 F: 05.02.92 7:48	23 h 58 min	11-22-33-11 kN
	I	D: 05.02.92 9:23 F: 06.02.92 13:18	27 h 55 min	11-23-33-11 kN
			85 j 4 h 16 min dont 36 h 32 min d'interruption	

Tableau 3.3 : Données résumées de la phase II

3.3 Phase d'essai III "Charges dynamiques"

Dans une phase finale (figure 3.3), le LAVOC a entrepris des essais dynamiques grâce à l'orniéreur lourd (figure 3.5) dont il dispose. Cette phase, non prévue au départ, n'a cependant été réalisée qu'en septembre 1992.

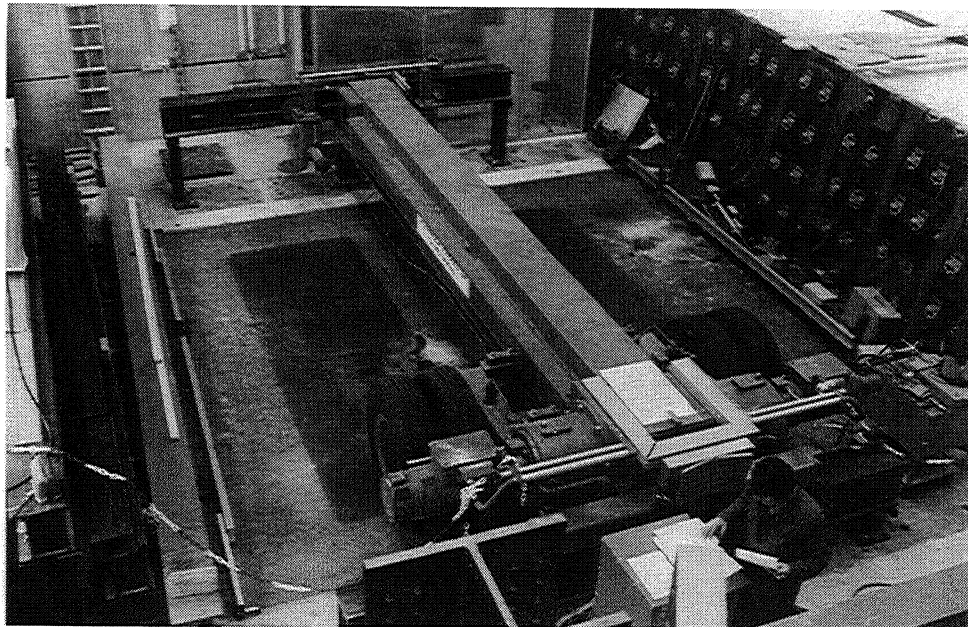


Figure 3.5 Vue générale de l'orniéreur lourd

A cause des dimensions de l'orniéreur lourd qui empêchent la couverture du modèle, le choix de la température s'est porté sur la valeur 23 °C. Cette valeur est facilement atteignable vu la moyenne de la température de la halle et sa faible variation durant la journée (± 1 °C toutes les deux heures).

Les paramètres mobiles peuvent être la vitesse de chargement, la charge appliquée, la pression de gonflage des pneumatiques ainsi que le temps de repos.

La vitesse peut être réglée grâce à un sélecteur à cinq positions (2-4-6-8-10 km/h). La figure 3.6 présente le schéma du mouvement longitudinal de l'orniéreur lourd.

La charge appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique et transmise au modèle par l'intermédiaire de deux jumelages de poids lourds peut varier de 10 à 100 kN. Cependant, lors de l'essai, à cause de la largeur de l'orniéreur lourd supérieure à la largeur du modèle, seule la charge d'un jumelage a été appliquée à ce dernier.

D'autre part, la majorité des jauges se trouvant dans l'axe du modèle a imposé le choix de cet axe pour avoir une représentation globale à différents emplacements des déformations dans la couche bitumineuse. On précise ici que les mesures ne concernent que la déflexion et les déformations dans la couche bitumineuse.

La pression de gonflage des pneumatiques peut être choisie dans la gamme 0.1 MPa à 0.7 MPa. Enfin, l'expérimentateur peut choisir n'importe quel temps de repos.

Lors de l'essai, les vitesses choisies sont 2, 6, 10 km/h, la charge du jumelage égale successivement à 16, 32, et 48 kN, la pression de gonflage des pneumatiques à 0.6 MPa. On n'a pas introduit de temps de repos.

Les valeurs de la charge ont été choisies plus grandes que celles de l'essai pseudo-statique, la rupture ne risquant pas d'être atteinte à cause de la rigidité beaucoup plus grande de la couche bitumineuse.

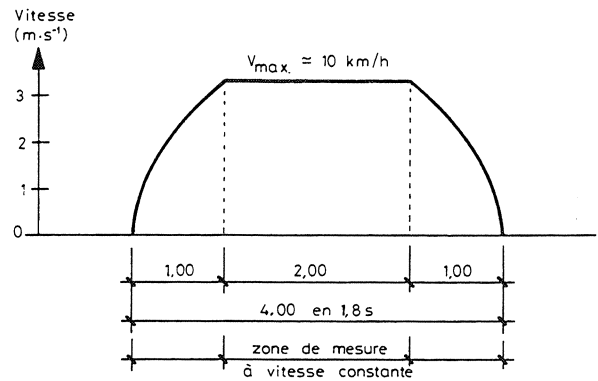


Figure 3.6 Schéma du mouvement longitudinal de l'ornièreur lourd

L'empreinte des pneus a été relevée pour une charge de 80 kN et une pression de 0.6 MPa dans les pneus. La surface réelle de l'empreinte (laissée par les sculptures d'un pneu) (figure 3.7) est de $S_{réelle} = 26200 \text{ mm}^2$ et la surface totale donnée par l'enveloppe de l'empreinte est de $37'800 \text{ mm}^2$.

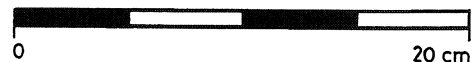
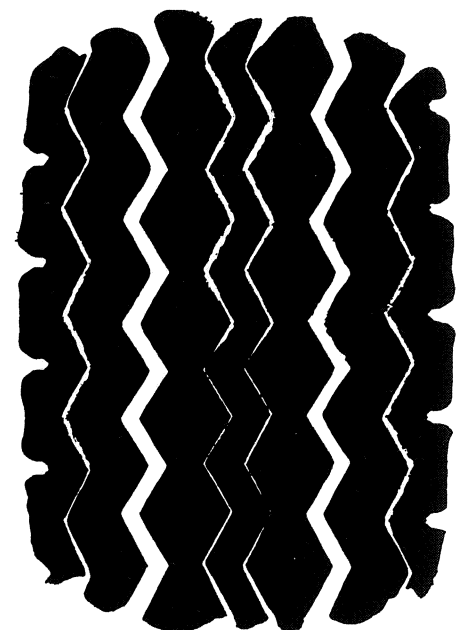
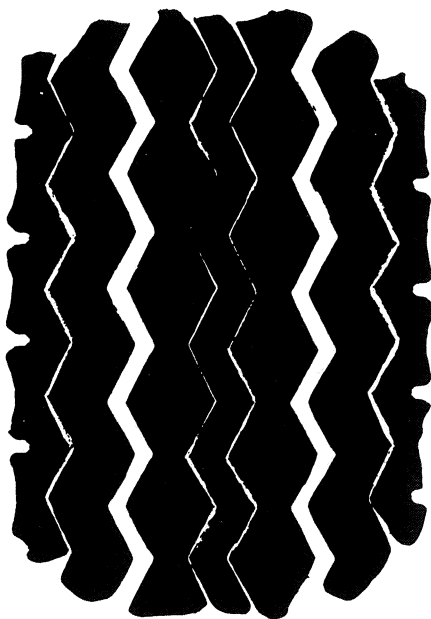


Figure 3.7 Empreinte d'un jumelage des pneus

Pour calculer le rayon de l'empreinte circulaire équivalente, on peut considérer plusieurs cas:

1. $S_{réelle}$,
2. S_{totale} ,
3. S_{moyen} : surface moyenne entre $S_{réelle}$ et S_{totale} ,
4. une pression à la surface du modèle égale à la pression du pneu,
5. une pression à la surface du modèle égale à 1.1 fois la pression dans le pneu.

On obtient alors le tableau 3.4 suivant :

Cas	Charge par roue	Pression du pneu	Surface de contact	Rayon de l'empreinte équivalente	Pression à la surface du modèle
	kN	MPa	mm ²	mm	MPa
1	20	0.55	26200	91	0.76
2	20	0.55	37800	110	0.53
3	20	0.55	32000	101	0.63
4	20	0.55	36400	108	0.55
5	20	0.55	33300	103	0.6

Tableau 3.4 : Résultats du calcul du rayon de l'empreinte circulaire équivalente

11 jauges de déformation ont été concernées par l'essai dynamique (tableau 3.5) ainsi que la déflexion à la surface à l'axe du jumelage. Indiquons ici que, vu les fréquences d'acquisition assez grandes (de l'ordre de 100 HZ), le système d'acquisition de l'essai quasi statique n'est plus adapté. Nous l'avons remplacé par deux DMC 9012 (matériel HBM) qui correspondent bien aux conditions de l'essai. Ils sont entièrement pilotés par le logiciel LABVIEW installé sur un DECpc 486 33 MHz.

n° sur la figure 2.10	1	30	15	11	5	8	7	10	8	12	10
z = 0*				0	20		25		25		37.5
z = 4		0									
z = 8	0**		0			25		25		37.5	

Tableau 3.5 : Jauges de déformation mesurées concernées par l'essai dynamique

* profondeur (en cm) à laquelle se trouve la jauge

** distance par rapport à l'axe du jumelage

4. RÉSULTATS DES ESSAIS

Lors du traitement des données (Annexe D), les points suivants ont été relevés :

- une très bonne uniformité en plan de la température à la surface du modèle,
- des profils de la température en fonction de la profondeur obéissant très bien à l'équation de la chaleur,
- une variation significative des déformations dans la couche bitumineuse induite par les quatre variations successives de la température et une irréversibilité de celles-ci par application d'un cycle fermé de température ($\varepsilon \neq 0$ pour $5\text{ °C} \rightarrow 23\text{ °C} \rightarrow 5\text{ °C}$),
- l'apparition de phénomène de viscoélasticité (lors d'une décharge mécanique) et de déformations permanentes (après chargement),
- l'influence du temps sur le comportement du matériau hydrocarboné, notamment lors des essais de fluage (charge $F_0(t)$ constante durant quatre heures),
- l'influence de l'histoire du matériau; cela est nettement mis en évidence pour les deux chargements mécaniques à 23 °C (premier et dernier chargement),
- une variation de la succion pour les trois températures appliquées,
- des déplacements dans le massif dus à une variation de la température,
- et enfin, des variations des profils de la teneur en eau durant l'essai.

Dans les paragraphes qui suivent, on propose de développer les résultats des trois phases en mettant l'accent sur les remarques précédentes.

4.1 Phase I "Mise en température"

4.1.1 Evolution des températures

Les figures 4.1 et 4.2 montrent l'évolution globale de la température dans la couche bitumineuse et le sol au cours de la phase I.

La figure 4.1 montre particulièrement la très bonne uniformité en (x,y) de la température à la surface du modèle, l'écart entre les températures minimale et maximale dans ce plan ne dépassant pas en effet 1 °C .

Les figures 4.3 à 4.6 représentent l'évolution du gradient de la température dans le profil central du modèle lors des passages successifs de 23 °C à 5 °C , de 5 °C à 23 °C , de 23 °C à 41 °C et enfin de 41 °C à 23 °C .

Les deux systèmes thermiques utilisés pour le chauffage et le refroidissement de la surface du modèle présentent des différences au niveau de la diffusion thermique dans le massif. Pour le réchauffement par lampes à rayonnement infrarouge, une cassure du profil des températures se produit à 20 cm en dessous de la surface du modèle. La propagation de la chaleur (voir figures 4.5 et 4.6) est beaucoup plus lente, la répartition linéaire des températures ne peut pas être obtenue, même après trois semaines, alors qu'elle est atteinte lors du refroidissement par circulation d'air froid.

Comme indiqué précédemment, lors du dernier cycle, une panne de régulation de la température à la surface et au fond du modèle a été observée pendant deux jours, amenant la température de la surface à 8 °C (figure 4.6).

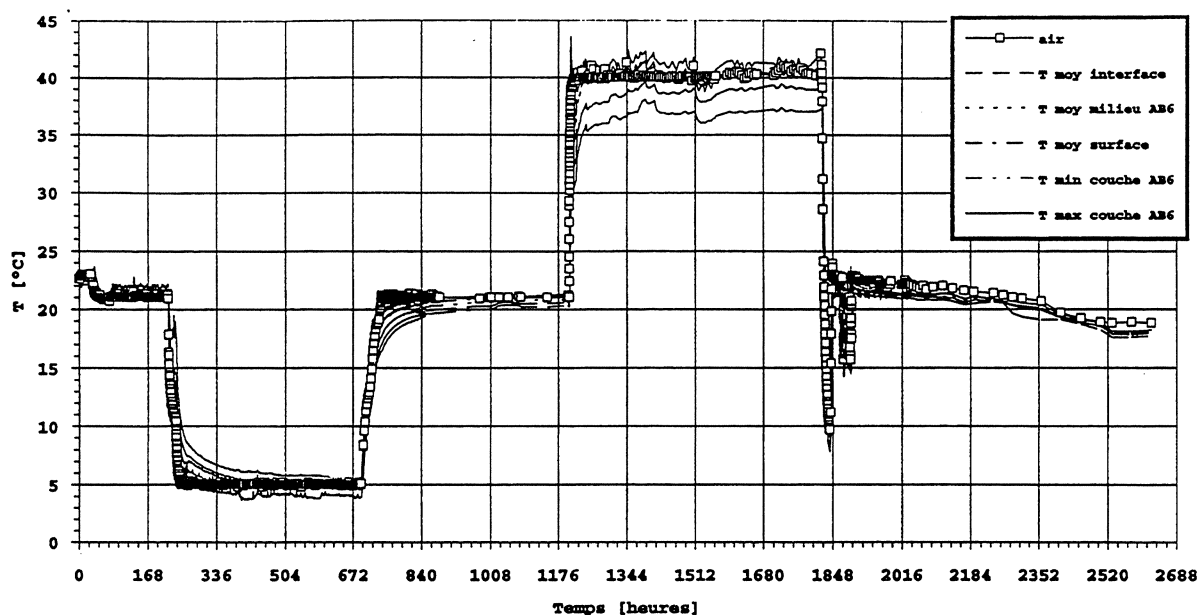


Figure 4.1 Valeurs des températures minimales, moyennes et maximales dans la couche bitumineuse durant la phase I

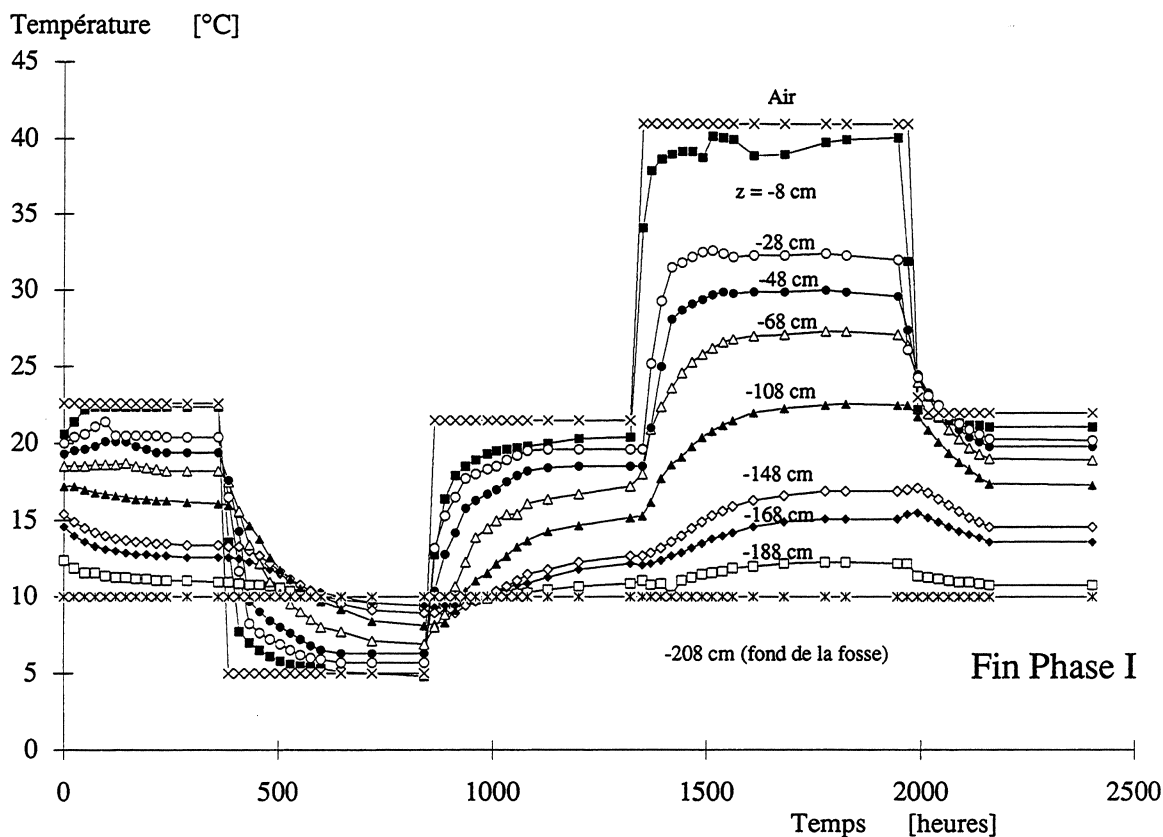


Figure 4.2 Evolution des températures dans le sol durant la phase I

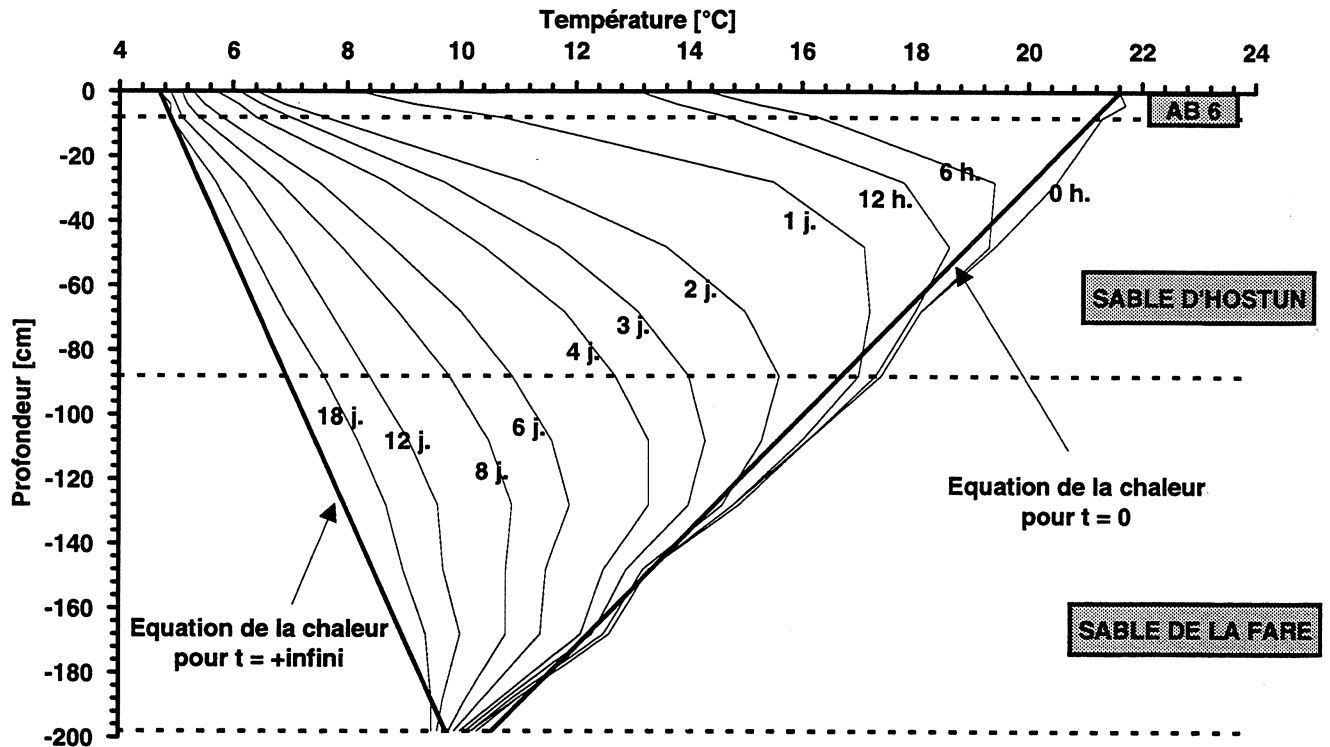


Figure 4.3 Evolution de la température en fonction de la profondeur à diverses époques lors du passage de 23 °C à 5 °C (températures de consigne)

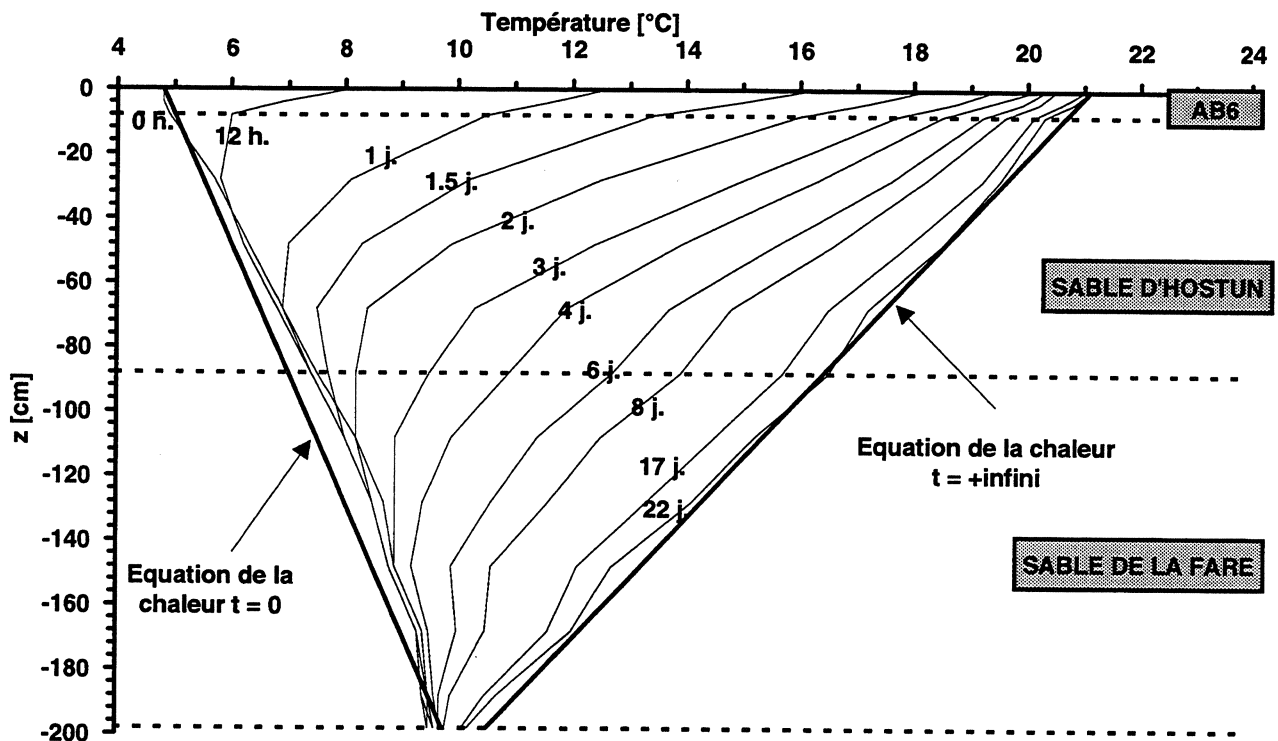


Figure 4.4 Evolution de la température en fonction de la profondeur à diverses époques après le passage de 5 °C à 23 °C (températures de consigne)

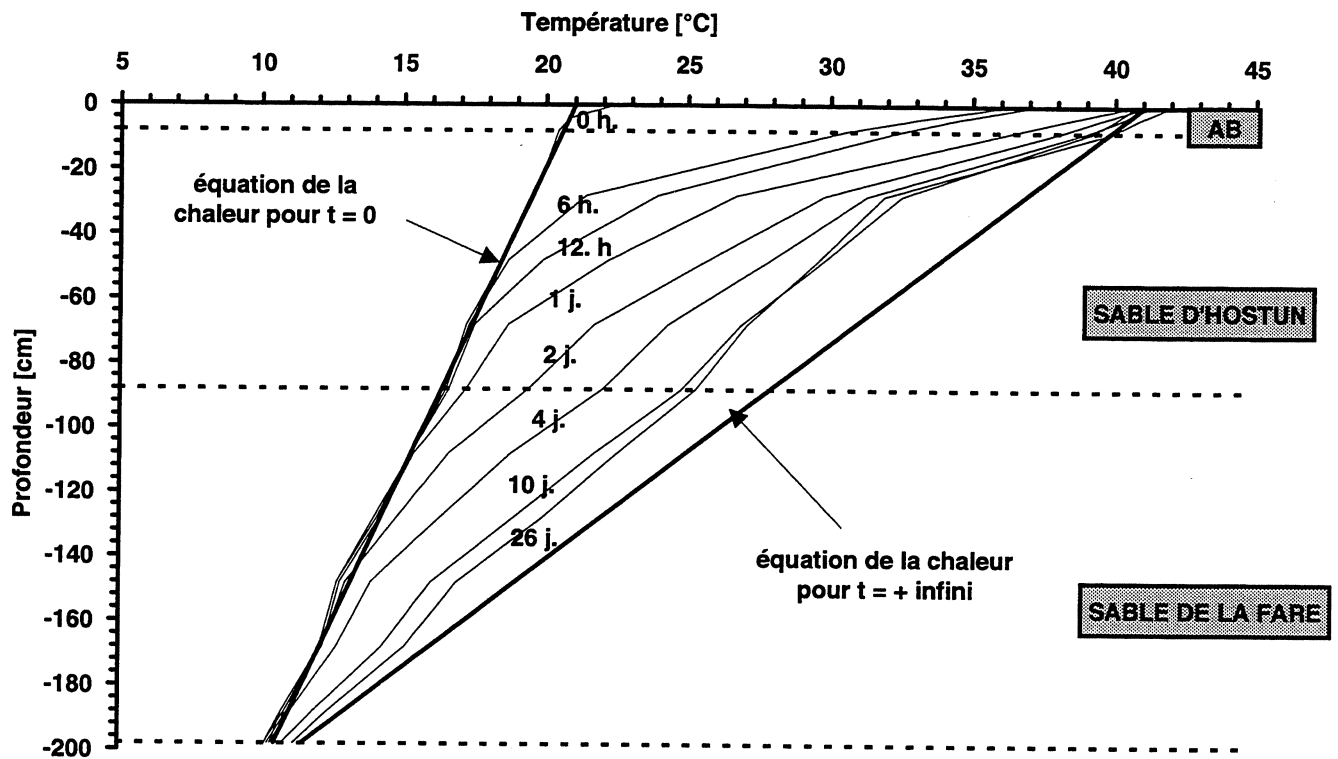


Figure 4.5 Evolution de la température en fonction de la profondeur à diverses époques après le passage de 23 °C à 41 °C (températures de consigne)

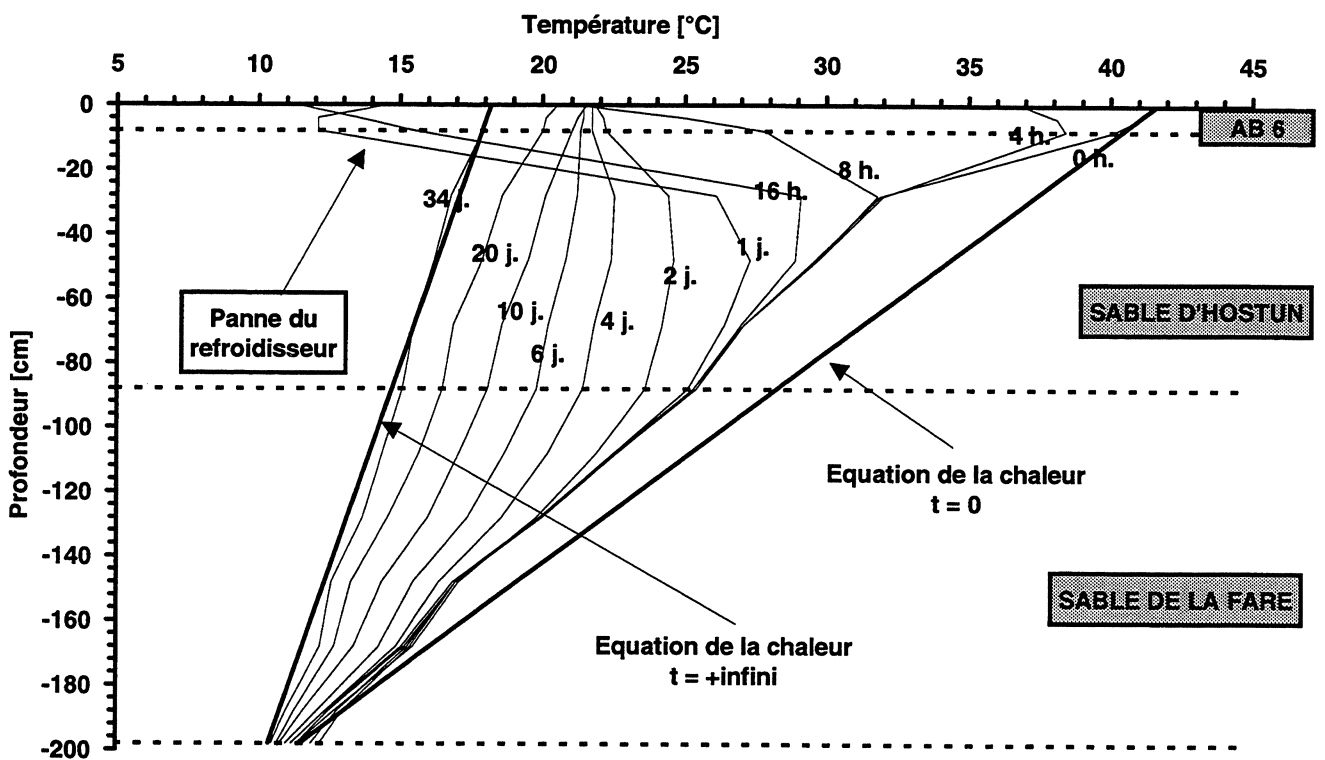


Figure 4.6 Evolution de la température en fonction de la profondeur à diverses époques après le passage de 41 °C à 23 °C (températures de consigne)

4.1.2 Déplacements dans le sol

Les variations d'épaisseur des couches du sol par rapport à l'état initial sont mesurées par deux paires d'extensomètres placées à deux endroits du massif. A chaque emplacement, l'un des extensomètres donne la variation d'épaisseur totale des deux couches, l'autre donne celle de la couche supérieure (sable GRECO). Les déplacements sont de l'ordre du millimètre. La différence des mesures entre les deux endroits est négligeable, elle est de l'ordre du centième de millimètre.

Le massif gonfle quand la température baisse et se tasse lorsque la température augmente. La figure 4.7 montre que pour une augmentation de la température de 5 °C à 41 °C le tassement total est de 1.26 mm. Il est réparti dans la couche de sable GRECO qui se tasse de 0.22 mm ou 0.03 % de son épaisseur (80 cm) et de la couche de sable SAUBRAZ qui se tasse de 1.04 mm ou 0.09 % de son épaisseur (110 cm).

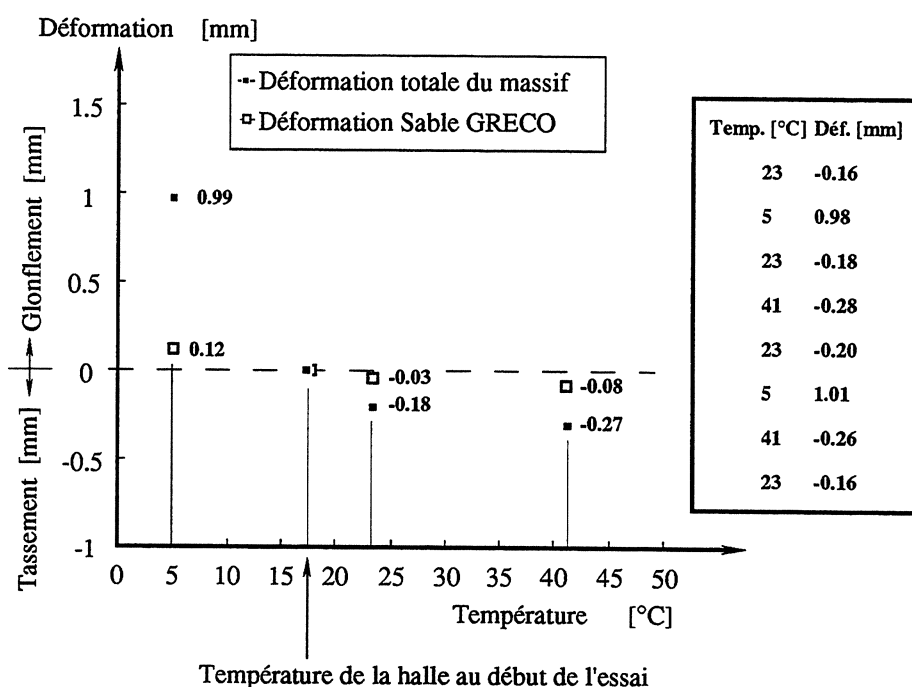


Figure 4.7 Déplacements globaux dans le sol durant la phase I

4.1.3 Teneurs en eau et niveau de la nappe

Le niveau de la nappe situé à la cote $z = -188$ cm à partir de la surface est contrôlé régulièrement par les piézomètres et maintenu à ce niveau.

Les teneurs en eau (figures 4.8 et 4.9) déterminées à la sonde à neutrons sont mesurées tous les 50 cm à partir du bas. Les profils de température (figure 4.8) montrent que les migrations d'eau se font dans la partie inférieure du modèle (sable de Saubraz):

- équilibre hydrique du massif au cours du premier palier de température (23 °C),
- migration très faible durant les paliers 2, 3, 4, et 5. Les diagrammes de teneur en eau sont pratiquement confondus. Les teneurs en eau varient au maximum de 0.7 % à la cote -176 cm, malgré les variations de température de 5 °C à 40 °C.
- dessèchement du massif, de l'ordre de 2 % dans les deux couches de sable, après la fin de l'essai (teneur en eau finale, une année après).

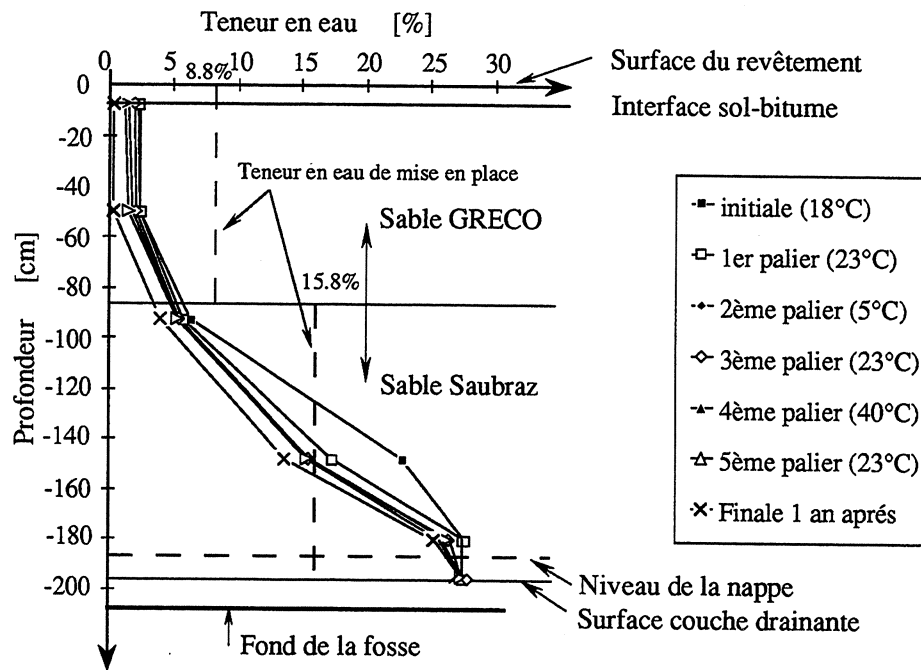


Figure 4.8 Evolution de la teneur en eau durant la phase I

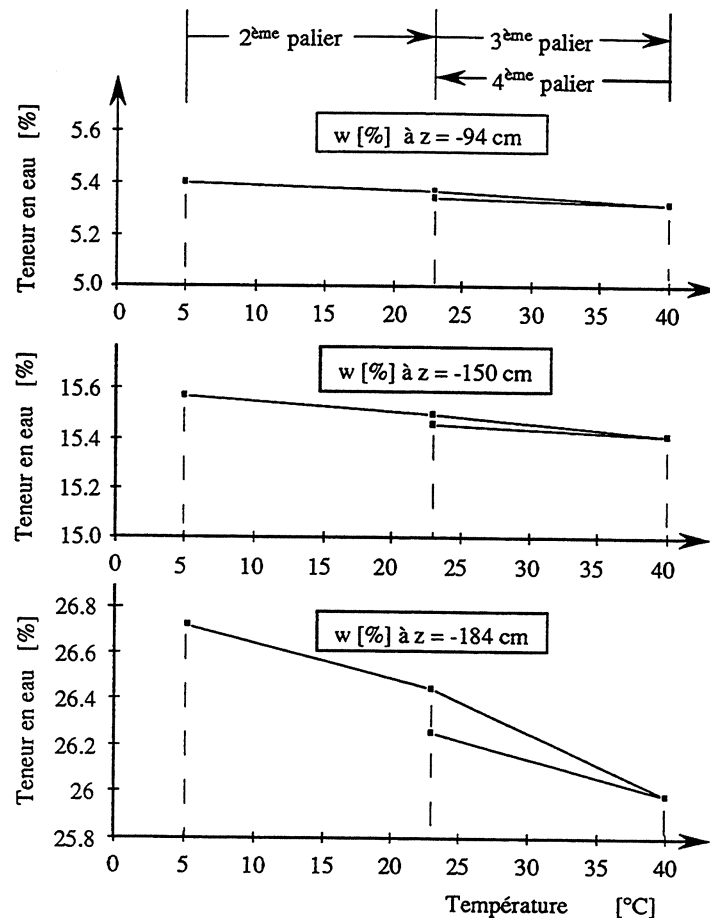


Figure 4.9 Evolution de la teneur en eau aux profondeurs -94 cm, -150 cm, -184 cm durant la phase I

4.1.4 Succions

La figure 4.10 représente le profil de succion sur l'axe central au cours de la phase I.

La figure 4.11 indique quelle est la variation de succion lorsque la température passe de 5 à 23 °C (fin du deuxième et du troisième paliers), pour l'ensemble des tensiomètres. Les valeurs de la température sont calculées par régression linéaire. Le profil de succion présente une discontinuité au niveau de l'interface des 2 couches de sable. L'équilibre des succions n'est pas encore atteint à la fin de la phase I (voir chapitre 5).

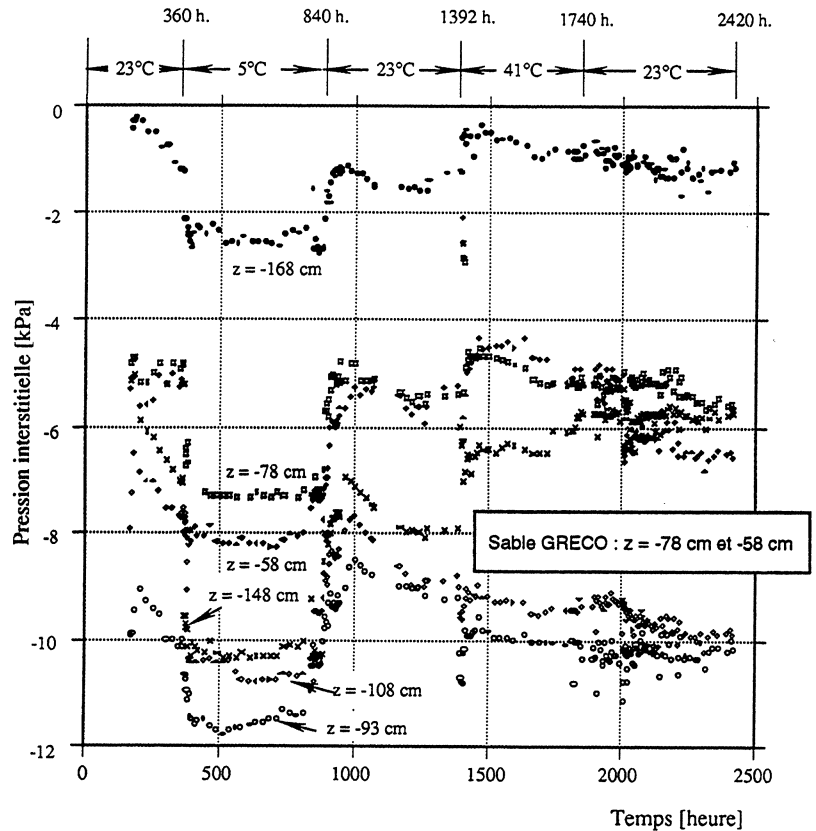


Figure 4.10 Variation de la pression interstitielle en fonction de la variation de la température, ensemble de la phase I

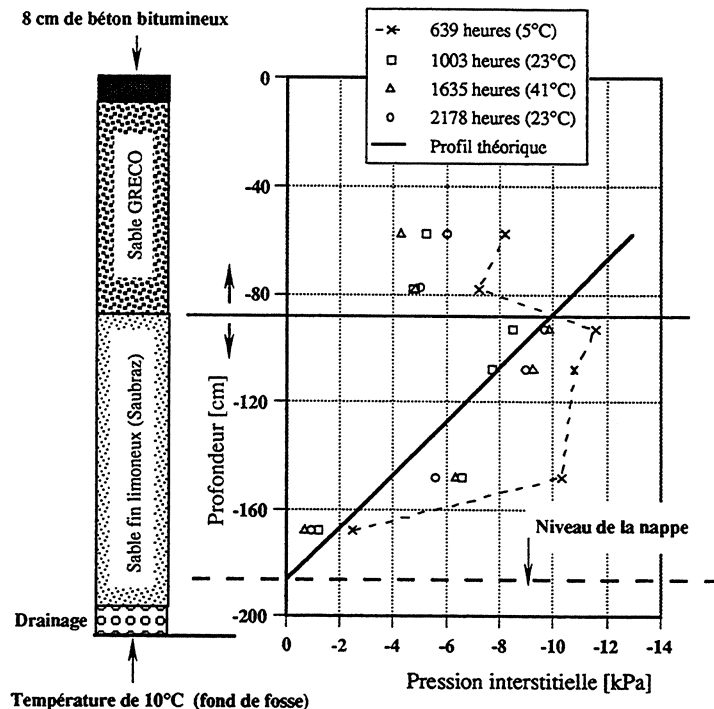


Figure 4.11 Profil de pression interstitielle à diverses températures

4.1.5 Déformations dans le revêtement

Lorsqu'une jauge est collée à la surface d'une structure exempte de contraintes, sous l'effet des variations de température, la résistance électrique varie. Si la jauge est munie d'un support (jauges KLOWA et HBM), la déformation résultante est la combinaison de deux facteurs. D'abord, comme tout conducteur électrique, la résistivité varie. Ensuite, le matériau de la structure, comme celui de la grille de la jauge et de son support, subissent chacun une dilatation thermique.

La grille de la jauge subit donc une variation de résistance unitaire égale à :

$$\frac{\Delta R}{R} = [\beta_G + (\alpha_M - (\alpha_S - \alpha_G)) K] \Delta T$$

où : - β_G est le coefficient thermique de résistivité de la grille,

- $\alpha_M, \alpha_S, \alpha_G$ sont respectivement les coefficients thermiques du matériau de la structure, du support et de la grille,
- K est le facteur de jauge
- ΔT est la variation de température.

Si la jauge est à l'air libre, elle subit une déformation égale à la différence de dilatation de son support et de la grille elle-même, d'où :

$$\frac{\Delta R}{R} = [\beta_G + (\alpha_S - \alpha_G) K] \Delta T$$

Ainsi, on a les deux équations suivantes :

$$\text{air libre} \implies \epsilon_a = \left(\frac{\beta_G}{K} + (\alpha_S - \alpha_G) \right) \Delta T$$

$$\text{matériau} \implies \epsilon_M = \left(\frac{\beta_G}{K} + (\alpha_M - (\alpha_S - \alpha_G)) \right) \Delta T$$

ϵ_a et ϵ_M sont respectivement les déformations mesurées à l'air libre et dans le matériau par la chaîne d'acquisition. Par addition, on peut, à condition de connaître le coefficient thermique de résistivité de la grille β_G , calculer la déformation thermique ϵ_{AB6} dans le matériau bitumineux :

$$\epsilon_{AB6} = \epsilon_a + \epsilon_M - 2 \frac{\beta_G}{K} \Delta T$$

Si la jauge n'est pas munie d'un support (jauge M=M), la grille subira une déformation égale à la différence des dilatations de la structure et de la grille elle-même. Si en plus, elle est autocompensée, ce qui est le cas des jauges M=M, les mesures des déformations effectuées par ces jauges dans le matériau bitumineux sont égales aux déformations thermiques du matériau bitumineux. Autrement dit, on a :

$$\epsilon_{AB6} = \epsilon_M$$

Au laboratoire, une jauge KLOWA mise dans une enceinte hermétiquement fermée et à laquelle on applique successivement une variation de température de 23 °C à 5 °C et de 5 °C à 23 °C donne la figure 4.12 :

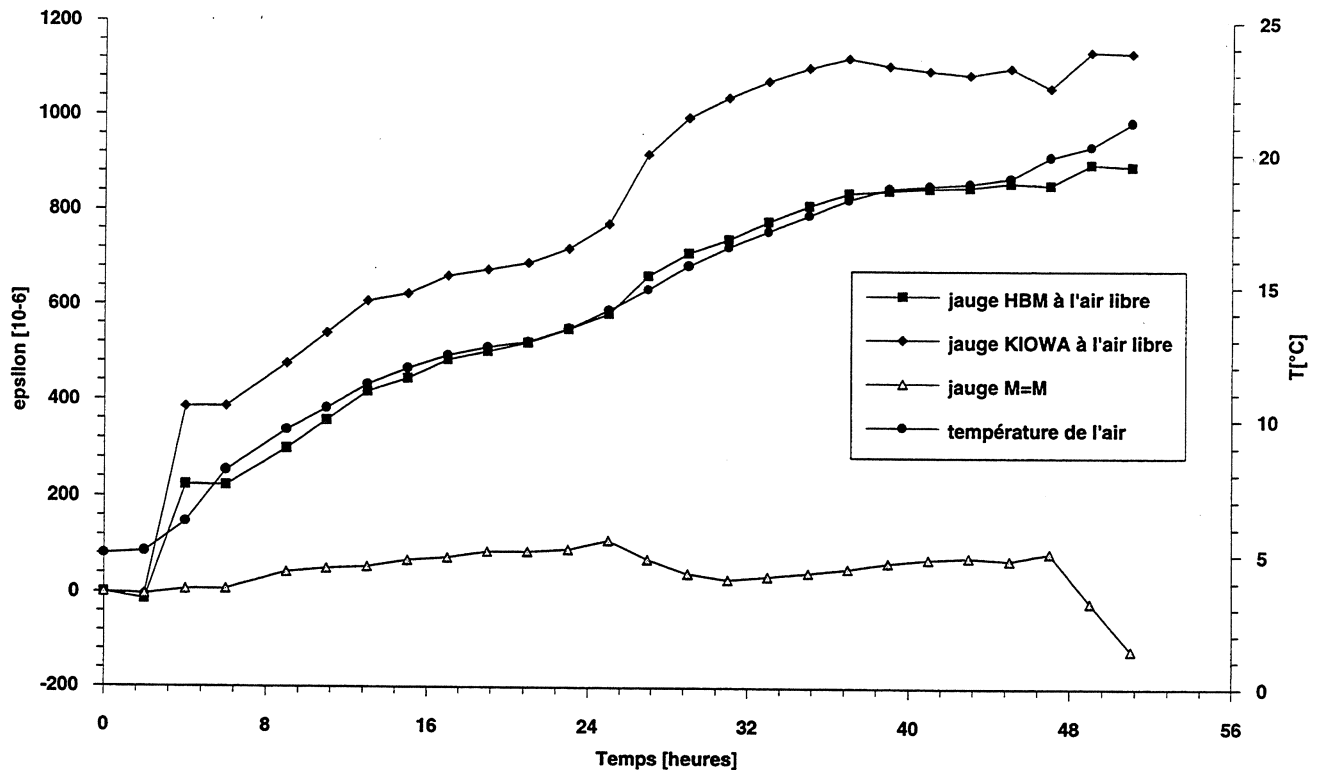


Figure 4.12 Résistance d'une jauge KLOWA en fonction de la température

Lors du passage de 23 °C à 5 °C, la résistance initialement égale à 119.92 Ω prend la valeur de 119.65 Ω ; la valeur de sa déformation est alors égale à :

$$\epsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = - 1125 \cdot 10^{-6} \text{ } \mu\text{m/m (pour } K=2 \text{)}$$

Cet essai au laboratoire conforte les valeurs numériques enregistrées sur le modèle.

Par deux graphiques (figures 4.13 et 4.14), nous voyons que le résultat prévu est confirmé, à savoir qu'on peut parler de déformations thermiques horizontales indépendamment du sens de l'axe horizontal où on mesure ces déformations. On a choisi pour cela des points considérés comme représentatifs des déformations de la couche bitumineuse. Ces deux graphes montrent par ailleurs la très bonne uniformité de la température dans un plan horizontal du modèle.

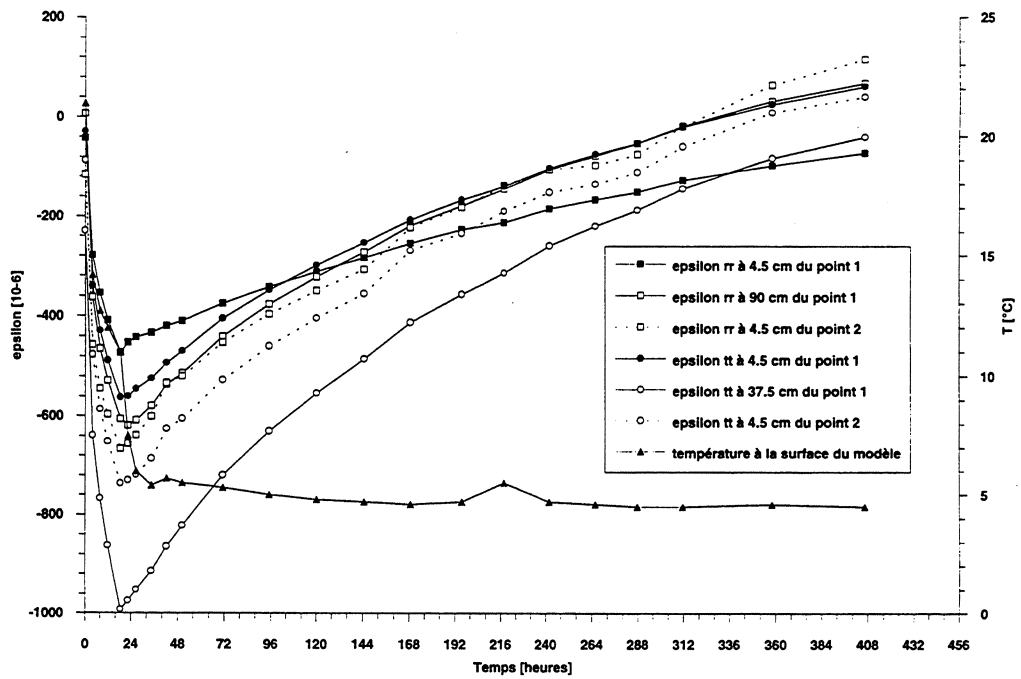


Figure 4.13 Déformations thermiques à la surface du modèle après le passage de 23 °C à 5 °C

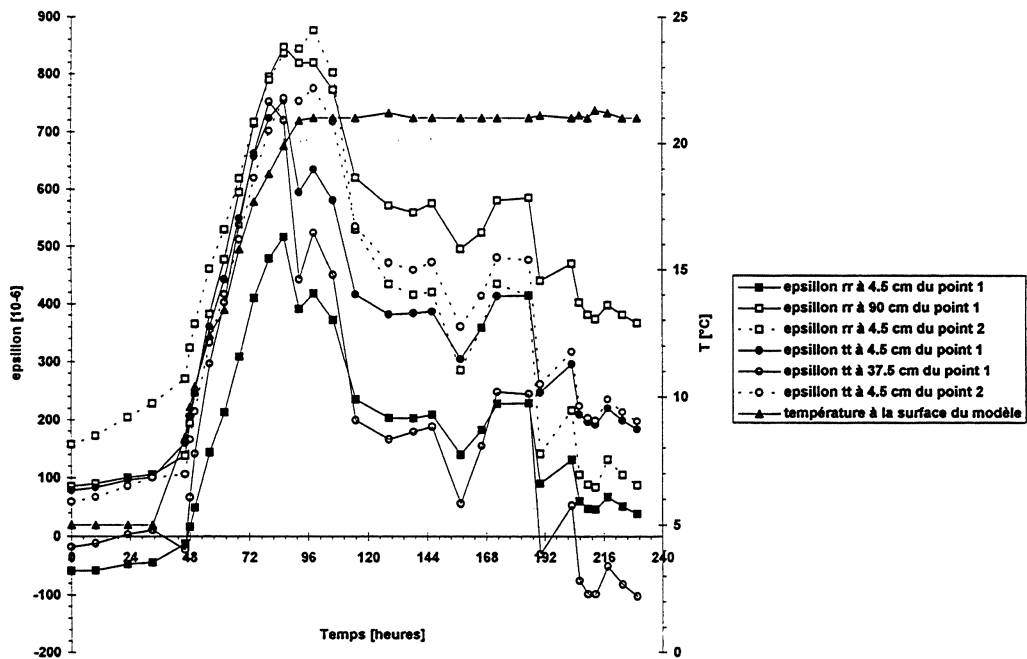


Figure 4.14 Déformations thermiques à la surface du modèle après le passage de 5 °C à 23 °C

Notons également les remarques suivantes :

- une cassure de la courbe de la température de l'air ainsi qu'à la surface et à la base de la couche bitumineuse lors du passage de 23 °C à 5 °C (figure 4.15). Cependant, ce phénomène n'apparaît pas lors des autres cycles de température. La figure 4.15 montre l'évolution de la température en fonction du temps dans le modèle lors du passage de 5 °C à 23 °C. Cette cassure apparaît également dans les courbes des déformations mesurées à l'air libre (figure 4.16) ou dans la couche bitumineuse.

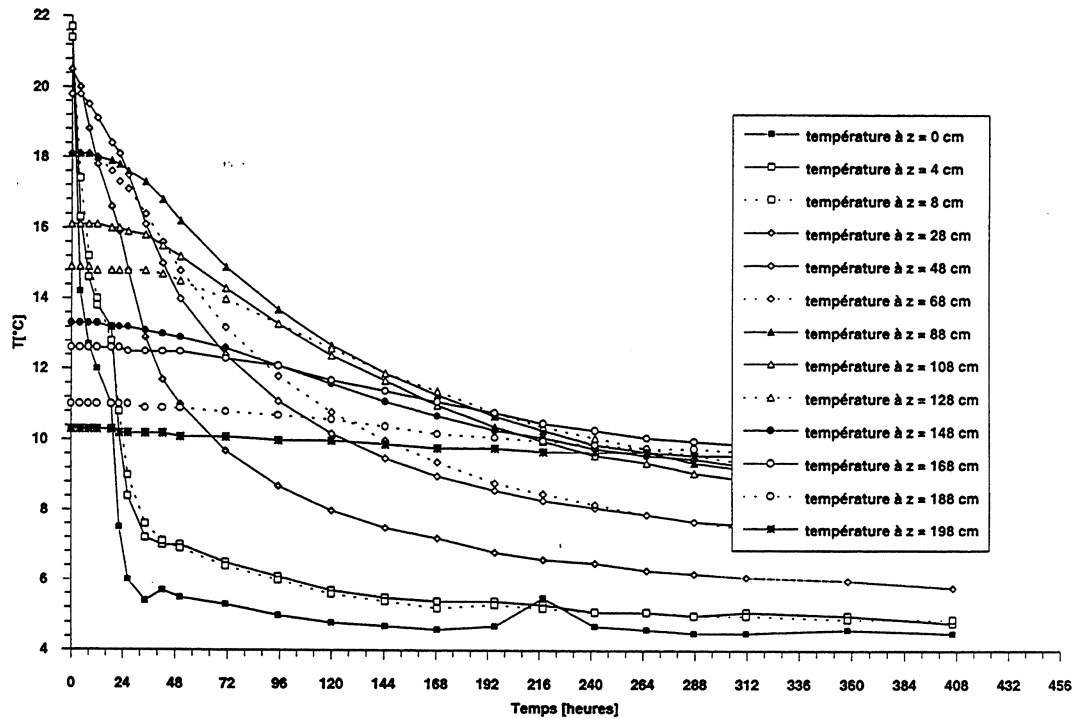


Figure 4.15 Evolution de la température en fonction du temps à l'axe du modèle après le passage de 23 °C à 5 °C (températures de consigne)

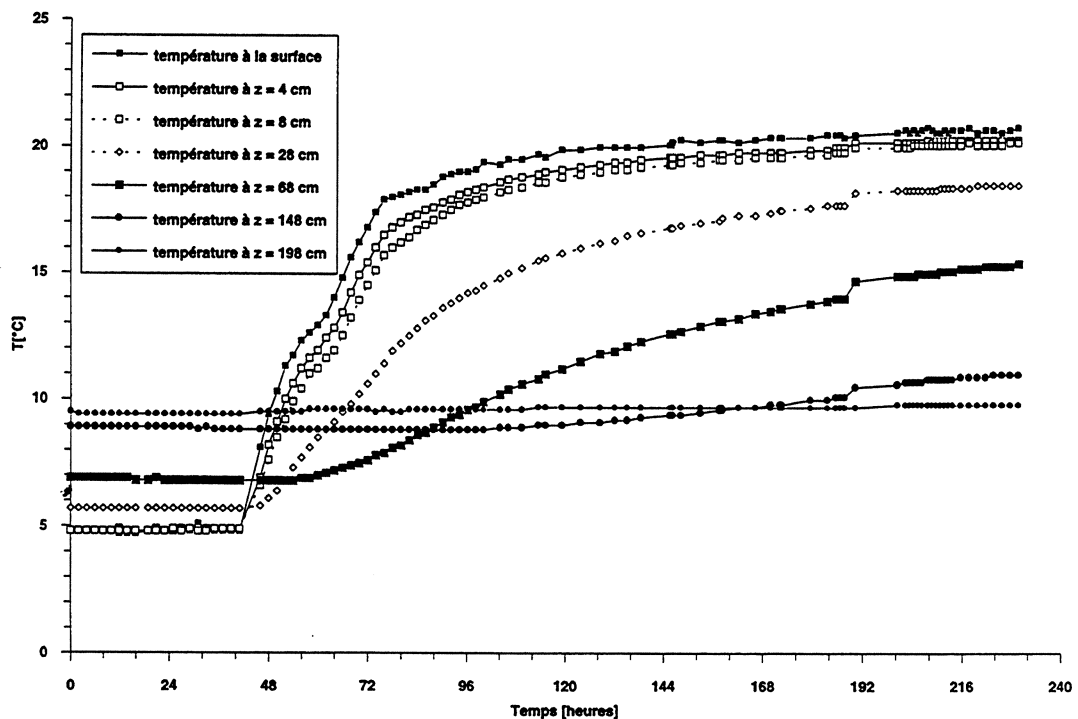


Figure 4.16 Evolution de la température en fonction du temps à l'axe du modèle après le passage de 5 °C à 23 °C (températures de consigne)

- lors du passage de 23 °C à 5 °C, il y a relaxation des déformations thermiques à la surface juste au moment où apparaît la cassure dans la courbe de température, c'est-à-dire après 19 heures après l'application de 5 °C dans l'enceinte du modèle. Les déformations thermiques au milieu et à la base de la couche bitumineuse ont par contre continué leur descente jusqu'à la stabilité de la température, c'est-à-dire environ une semaine après.

Lors du passage de 5 °C à 23 °C (températures de consigne), on enregistre des tractions à la surface du modèle, suivies d'une relaxation lorsque la température atteint 21 °C, environ 4 jours après l'application de 23 °C. Les jauges de déformation à l'interface et à la base de la couche bitumineuse subissent quant à elles d'abord des compressions, suivies d'une relaxation qui s'enclenche avant la stabilisation de la température à 20 °C.

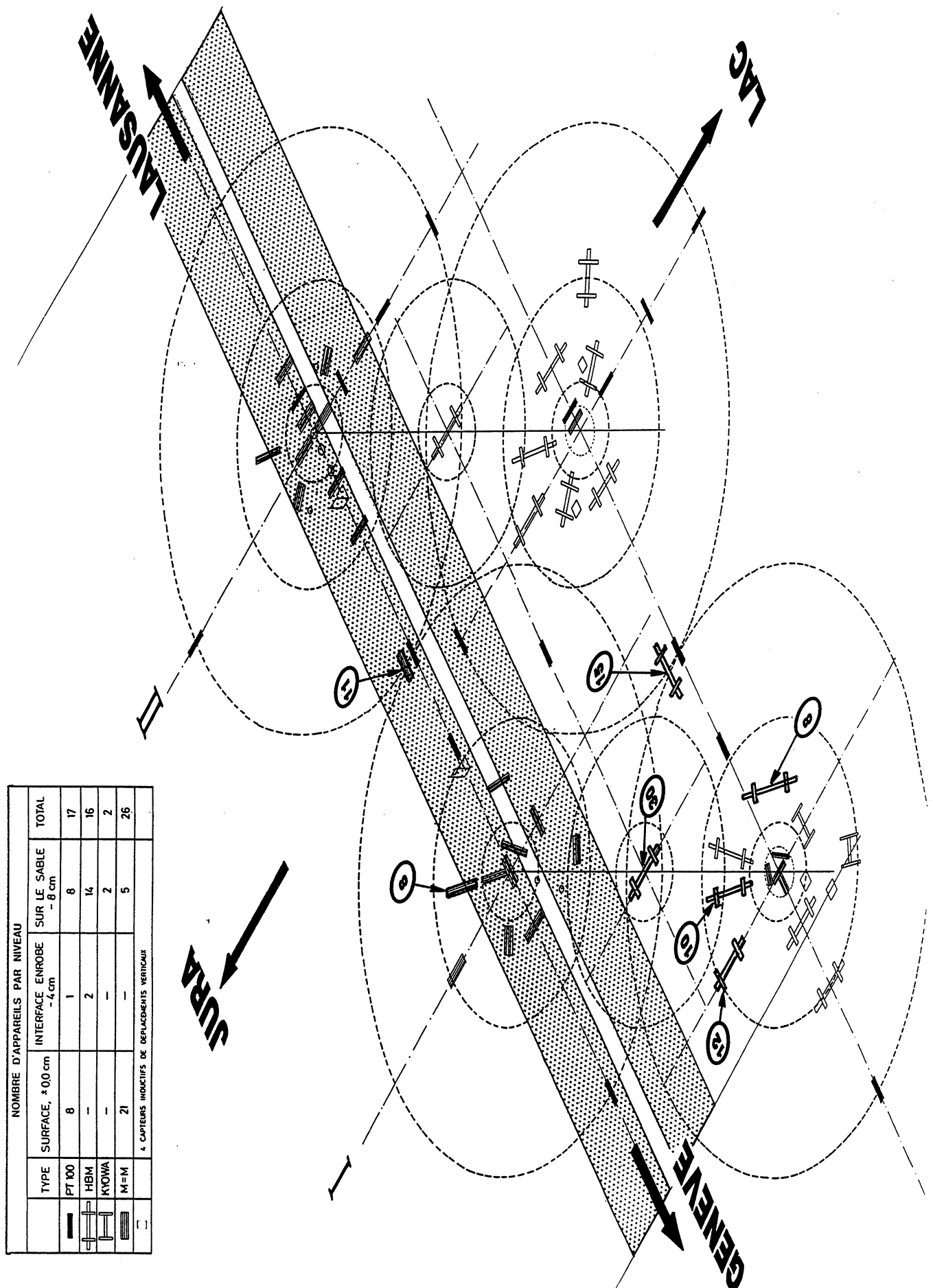


Figure 4.17 Position des jauges sélectionnées et zone de passage des roues

4.2 Phase II "Charges pseudo-statiques"

Les températures, les suctions et les teneurs en eau ont présenté sensiblement les mêmes comportement et évolution que celles mesurées au cours de la phase I. Ainsi, ce chapitre ne se rapporte qu'aux déplacements et déformations dans la couche bitumineuse. Les déformations au bas de la couche bitumineuse sont représentées à l'annexe E.

4.3 Phase III "Charges dynamiques"

La réalisation d'une phase dynamique a permis de vérifier la validité des mesures données par les jauges placées sous le passage des roues du simulateur de trafic (figure 4.17). En effet, les expériences d'essai en vraie grandeur menées au cours des années précédentes ont fourni une base de comparaison qui permet d'évaluer les résultats ci-après.

D'une part le simulateur de trafic lourd a été appliqué à différentes charges et vitesses. D'autre part le Falling Weight Deflectometer (FWD) de la société Infralab S.A. a réalisé une série de mesures.

4.3.1 Simulateur de trafic lourd

Le système d'application des charges est constitué d'un essieu de poids lourd comportant deux jumelages et permet d'appliquer une charge de 120 kN jusqu'à une vitesse de 10 km/h. Le système est décrit à l'annexe F.

Les jauges placées au bas de la couche bitumineuse donnent des valeurs réalistes et des signaux typiques d'une déformation au passage d'une charge roulante (figure 4.18). Deux positions de jauges sont examinées, soit longitudinale ou angulaire, c'est-à-dire faisant un angle de 60 degrés avec la direction du déplacement de la charge.

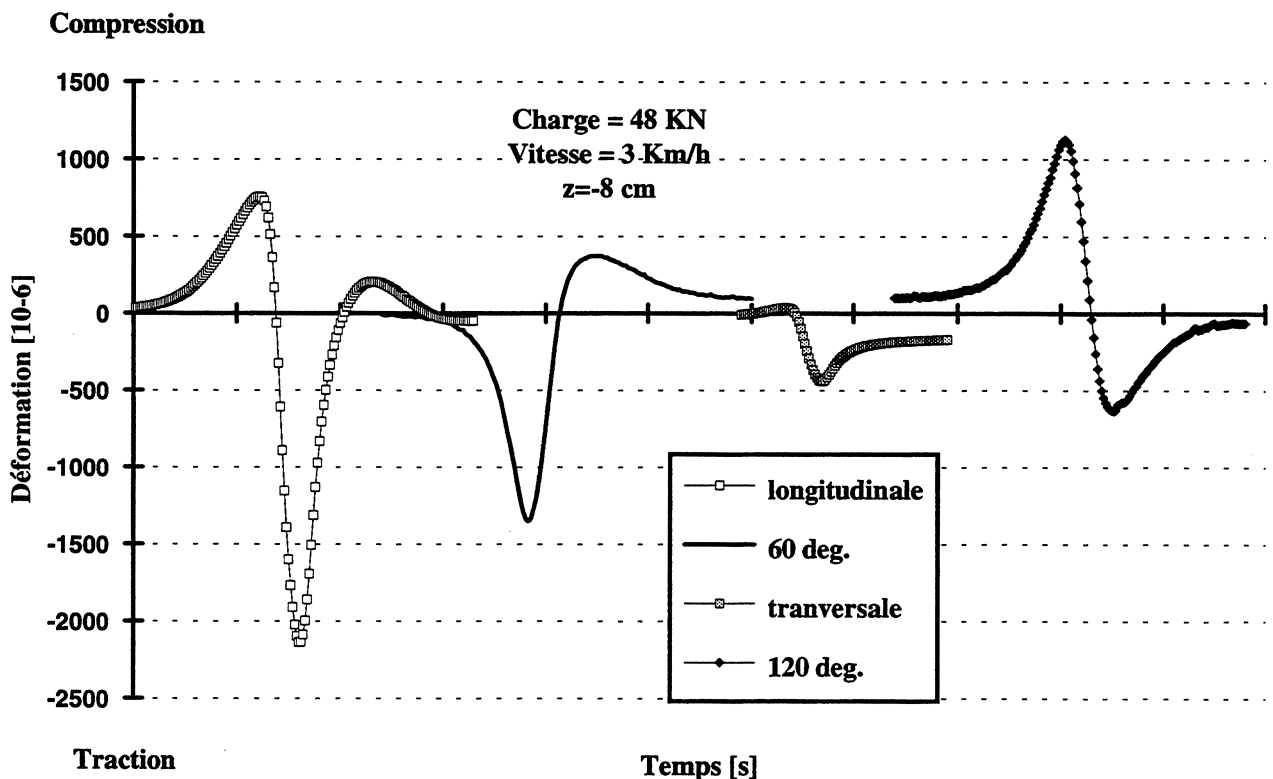


Figure 4.18 Exemples de signaux de jauge en bas de la couche bitumineuse

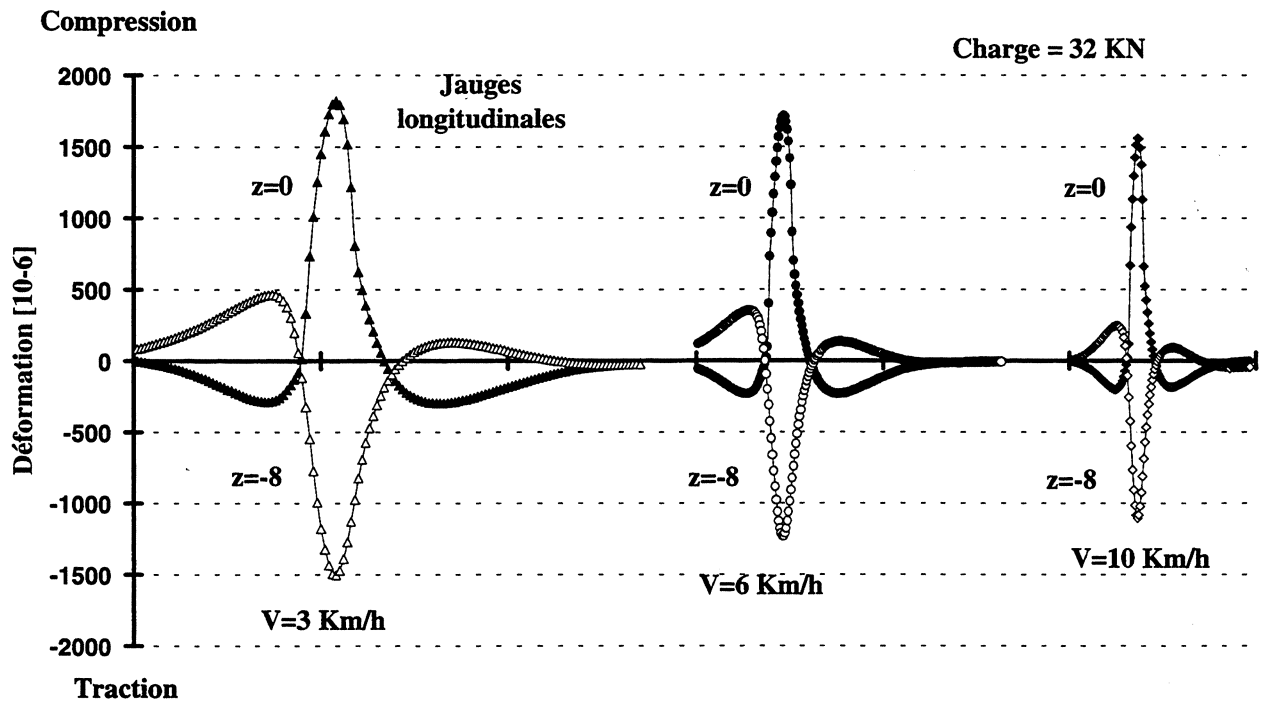


Figure 4.19 Effet de la vitesse sur les jauges longitudinales

Les mesures ont également vérifié les effets pour ces types de jauges de la vitesse (figures 4.19 et 4.20) et des charges (figures 4.21 et 4.22) sur les sollicitations du béton bitumineux.

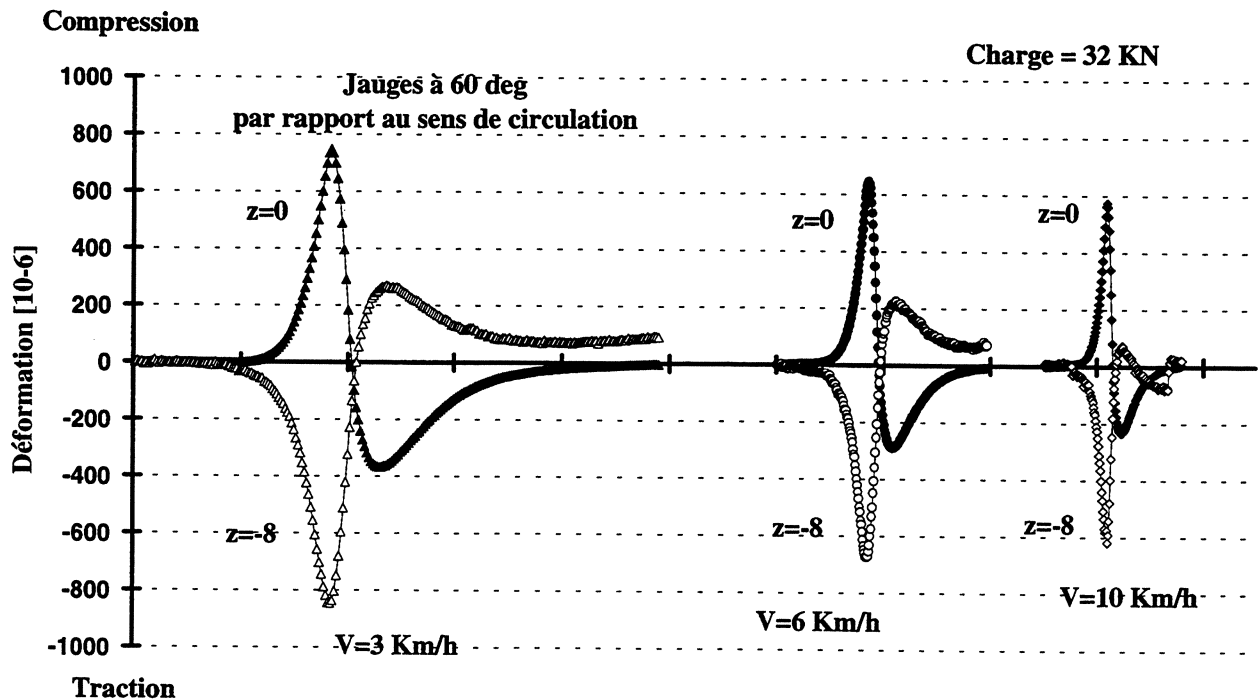


Figure 4.20 Effet des charges sur les jauges angulaires

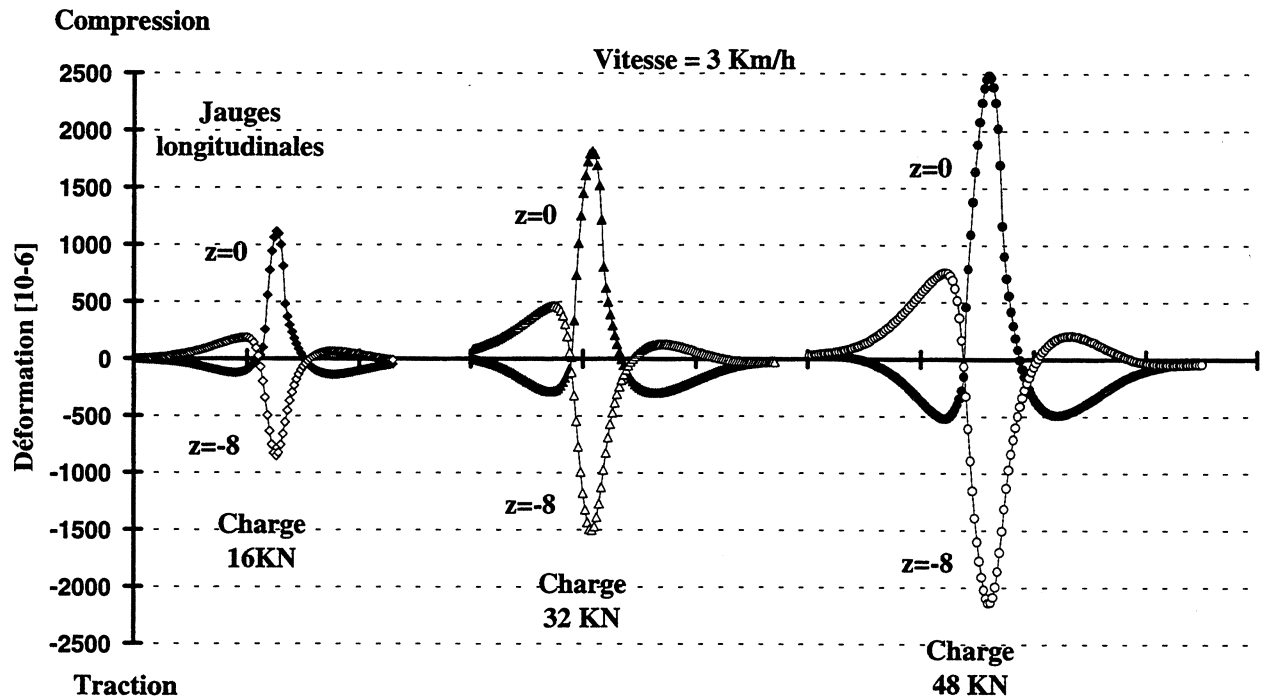


Figure 4.21 Effet des charges sur les jauges longitudinales

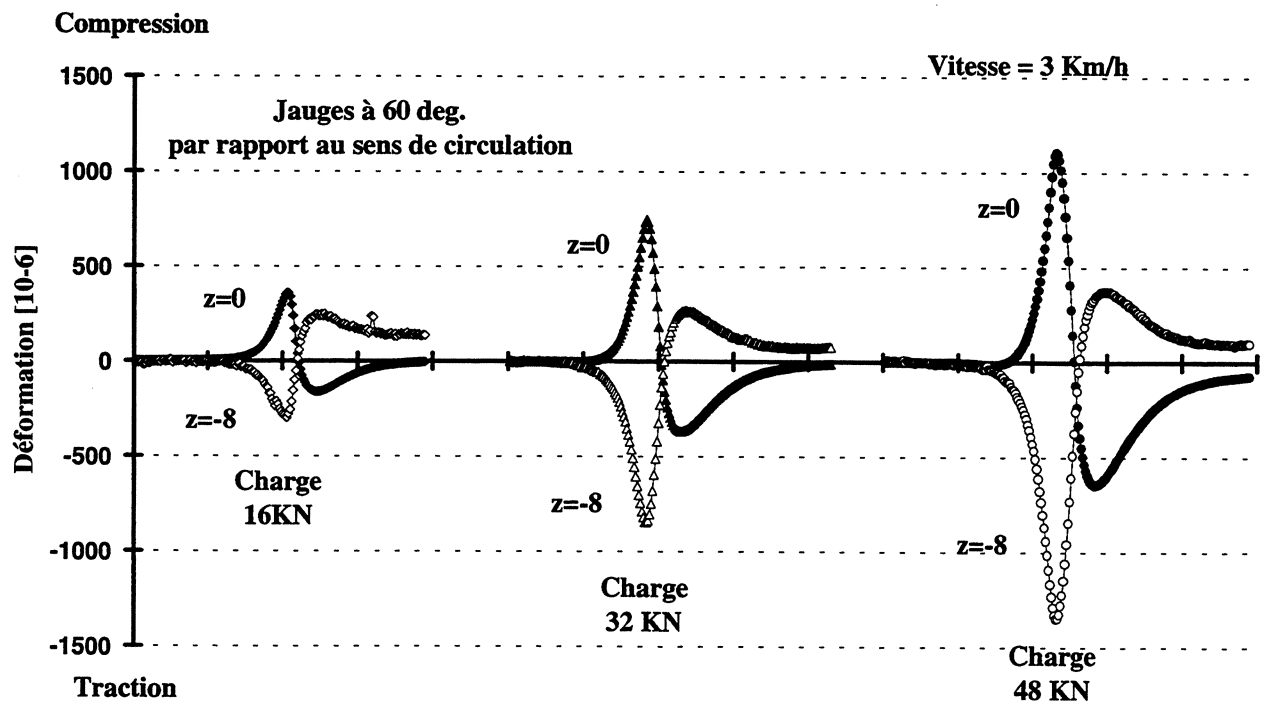


Figure 4.22 Effet des charges sur les jauges angulaires

Les valeurs des déformations en traction et en compression sont élevées (jusqu'à 2500 μ déf.), mais sont réalistes au vu de la faible portance du sable et de l'absence de couche de fondation. Les déformations longitudinales en bas de la couche sont prévues être caractérisées par une faible compression avant et après le pic de traction correspondant au passage de la charge.

L'accroissement de la vitesse a un effet linéaire sur le temps de mise en charge (voir tableau 4.1) Par contre, l'augmentation de la charge d'un facteur 2 (16 kN $\rightarrow$ 32 kN) ne donne une variation de la déformation que d'environ 1,6 voire pour un facteur 3 (16 kN $\rightarrow$ 48 kN), une variation de 2.2.

	Vitesse					
	3 km/h		6 km/h		10 km/h	
	Temps de charge [s]	Zone d'influence [m]	Temps de charge [s]	Zone d'influence [m]	Temps de charge [s]	Zone d'influence [m]
Jauges angulaires	3.2	2.6	1.5	2.4	0.91	2.6
Jauges longitudinales	2.45	2.0	1.3	2.0	0.81	2.3

Tableau 4.1: Effet de la vitesse sur le temps de charge et la zone d'influence

4.3.2 Falling Weight Deflectometer

Le Falling Weight Deflectometer (FWD) est un appareil conçu pour relever les déflexions de surface sous l'effet d'une masse tombante. Le bassin de déflexion peut être reconstitué par le relevé effectué en 7 points répartis entre 0 et 180 cm du point d'impact de la charge. Par calcul inverse, il est possible de revenir au module de chaque couche.

Sous la charge maximale de 30kN, la déflexion de surface moyenne aux point I et II est de 55.100° de mm et la déformation au bas de la couche de 300 μ déf. Les modules sont estimés à 7900 MPa pour la couche bitumineuse et 44 MPa pour le sol à la température de 25 °C.

5. SIMULATIONS ET INTERPRETATION

5.1 Modèles numériques

5.1.1 Contraintes et déformations (modèle PLAXIS)

PLAXIS est un modèle numérique bidimensionnel destiné en premier lieu à suivre le comportement des massifs géotechniques et plus particulièrement des digues. Il a été développé par l'Université de Delft qui l'a adapté aux superstructures routières. Il fait appel aux éléments finis et permet la modélisation soit en déformation plane, soit en axisymétrie. Plaxis permet d'intégrer plusieurs types d'éléments: géotextiles, poutres, pieux, tunnels, etc. Par ailleurs, il lui est possible de simuler les effets des opérations de construction et d'excavation par ajout ou suppression d'éléments. Plaxis distingue les couches de sol drainé et non drainé permettant de traiter aussi bien les sols sableux perméables que la plupart des sols imperméables de type argileux.

Pour un sol, le modèle de comportement de base est celui de Mohr-Coulomb, caractérisé par deux paramètres d'élasticité (ν, G), et trois paramètres de plasticité (C, ϕ, ψ). Les critères de Mohr-Coulomb avancé, ainsi que de "Cam-clay model" y sont également intégrés. Le maillage fait appel à des éléments triangulaires à 15 noeuds.

En l'état du développement, nous n'avons eu accès qu'au module élasto-plastique alors que nous savons que la part visqueuse de matériaux bitumineux est très importante aux températures élevées et pour des temps de charges longs. Le modèle rhéologique complet intégrera 5 éléments (figure 5.1): pour la modélisation d'un matériau visco-élasto-plastique:

- un ressort défini par un module de cisaillement G_e et un coefficient de Poisson ν_e . Ce ressort modélise la déformation élastique instantanée ϵ_e du squelette solide. Cette déformation est indépendante du temps,
- un ressort, défini par un module de cisaillement G_{ve} et un coefficient de Poisson ν_{ve} et un amortisseur linéaire défini par sa viscosité η_{ve} , tous les deux en parallèle. Ils modélisent la déformation viscoélastique du bitume définie par ϵ_{ve} ,
- un amortisseur linéaire défini par η_{vp} et un patin défini par la constante c^* (cohésion). Ils permettent de modéliser la déformation viscoplastique ϵ_{vp} , qui intervient lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement du matériau à long terme. Une partie du chargement est prise par le bitume, modélisée par l'amortisseur, l'autre partie est prise par le squelette solide, modélisée par le patin.

5.1.2 Diffusion des températures (modèle KEM1d)

Le massif étudié étant entouré de parois verticales thermiquement isolantes, et la température étant imposée uniformément sur chacune des deux faces horizontales, le système peut être considéré comme unidimensionnel selon la coordonnée verticale. L'évolution thermique a été modélisée au moyen d'un programme nommé KEM1d: ce programme, fondé sur la méthode du *complexe topologique* [Bovet, 1977], permettant de modéliser au cours du temps dans un espace à une dimension la diffusion de plusieurs substances (matière solide, eau, air et chaleur, par exemple) couplées par des relations linéaires; en réduisant à un le nombre des substances, soit la chaleur, on obtient la modélisation d'une évolution thermique: les deux paramètres physiques à introduire sont la *capacité thermique* C et la *conductivité thermique* K_F . On part de *conditions initiales*, et l'on impose des *conditions d'excitation*, en général variables au cours du temps.

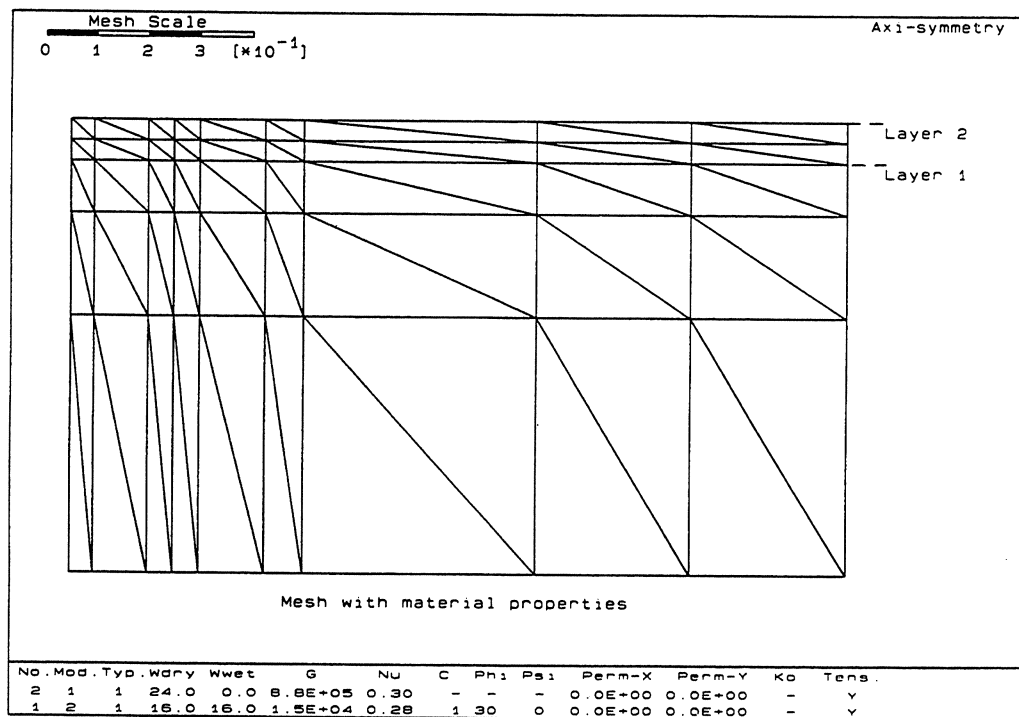


Figure 5.1 Modèle PLAXIS (Hollande, 1989)

Dans le cas de notre modèle, les conditions d'excitation étaient des *conditions de Dirichlet*, consistant en l'imposition d'une température donnée sur le fond et sur la face supérieure du massif. L'écoulement de l'eau étant pratiquement négligeable, les phénomènes de convection le sont aussi. La propagation de la chaleur est donc essentiellement diffuse [A. Burger et autres, 1985].

Les valeurs numériques des paramètres physiques à introduire dans les calculs sont:

Sable limoneux: $K_F = 2.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $C = 2,3.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ pour $\gamma_d = 16 \text{ kN.m}^{-3}$ $w = 16 \%$
 Sable Greco: $K_F = 1.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ $C = 1,5.10^6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$ pour $\gamma_d = 14 \text{ kN.m}^{-3}$ $w = 8 \%$

Ces valeurs sont tirées de [Recordon, 1986]

5.1.3 Evolution de la succion (modèle Kdns1d)

Le modèle Kdns1d est fondé, comme le précédent, sur la méthode du *complexe topologique*; mais la substance est l'eau et les relations matérielles non linéaires. On en trouvera une description, avec des exemples d'application dans [Bovet 1990]. En voici brièvement le principe: soit p la *pression interstitielle* de l'eau, ρ_o la *densité interstitielle* de l'eau (soit $1000 \text{ [kg.m}^{-3}\text{)]}$, $|g| = 9.81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$ l'*intensité de la pesanteur*, et g le vecteur vertical de bas en haut de module $|g|$; dans le champ de la pesanteur et à l'équilibre, la pression interstitielle de l'eau varie en fonction de l'altitude suivant la loi de l'hydrostatique ($\text{grad} p = - \rho_o g$) *même dans la zone non saturée*; ce qui rend cette affirmation paradoxale est le fait que dans la zone saturée cet équilibre, s'il est dérangé, se rétablit très rapidement, tandis que dans la zone non saturée un déséquilibre peut subsister des heures, des jours, et même (dans des argiles) des siècles. Si la zone non saturée est en contact avec l'atmosphère, ce qui est souvent le cas, on peut admettre que l'air est à la pression atmosphérique qui ne varie guère sur des différences d'altitude de l'ordre du décimètre: on peut donc se contenter de prendre en considération les variations de la pression interstitielle de l'eau. C'est aux parois capillaires qui séparent la phase liquide de la phase gazeuse à

endosser la *succion*, c'est-à-dire la différence de pression qui s'établit nécessairement entre ces deux phases, pour peu que l'altitude varie; plus l'eau est rare, plus la courbure des ménisques est grande, et plus la succion est grande et réciproquement; plus la succion est grande, plus la teneur en eau est petite.

Dans le cas de la diffusion thermique, deux constantes (C et K_F) étaient nécessaires; dans le cas de l'évolution de l'humidité dans un milieu poreux en contact avec l'atmosphère, c'est par deux *fonctions* que seront décrites les propriétés matérielles. La première de ces fonctions exprimera la *succion* en fonction de la *teneur en eau*; cette fonction aura deux asymptotes verticales: lorsque la teneur en eau est *nulle*, la succion est *infinie*. Lorsque la teneur en eau correspond à la *saturation*, la succion est *infinie négative*; cela revient à admettre que même en dessous du niveau piézométrique (où la succion est nulle), il reste toujours un petit peu d'air *occlus*, la saturation complète n'ayant lieu qu'à une profondeur infinie.

L'équation de la fonction $p = f(S_r)$ est la suivante:

$$p = \left(\frac{A}{S_r} + \frac{B}{1-S_r} + C \right) \rho_w$$

avec:

- p : succion, pression de l'eau interstitielle négative [Pa]
 ρ_w : masse volumique de l'eau [1000 kg.m^{-3}]
 A, B, C : constantes [J.kg^{-1}] ou [$\text{m}^2.\text{s}^{-2}$]

La courbe 1 correspond au sable limoneux SM du modèle. La courbe 2 caractérise le sable Greco SP.

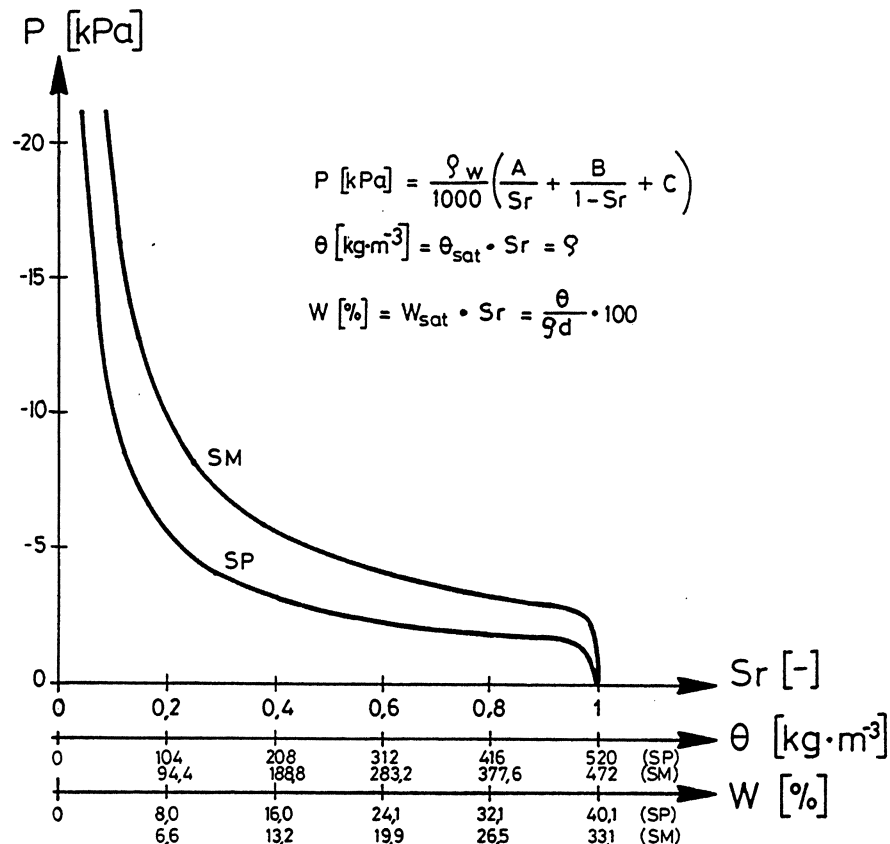


Figure 5.2 Pression interstitielle en fonction du degré de saturation

Les valeurs numériques des paramètres A, B, C sont les suivantes:

	SM	SP
A	-1.78	-1.00
B	0.01	0.01
C	-1.05	-0.50

La seconde fonction exprime que le *coefficient de Darcy* ou *perméabilité*, K_D , est une fonction croissante de la teneur en eau; si K_{Dsat} est la valeur de K_D à la saturation, on admet souvent que $K_D = K_{Dsat} S_r^5$, S_r étant le *degré de saturation*. On voit que la perméabilité décroît très vite en même temps que la saturation, et l'on s'explique pourquoi un état non hydrostatique peut se maintenir très longtemps dans la zone non saturée.

Si l'on désigne par $Kr_w = K_{Dns} / K_{Dsat} \times S_r^5$, la perméabilité relative du sol, la fonction $Kr_w = f(S_r)$ est la même, quel que soit le sol. Elle est représentée à la figure 5.3 ci-après. Pour le sable limoneux du modèle, on a $K_{Dsat} = 3.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ pour le sable limoneux SM saturé et $K_{Dsat} = 1.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ pour le sable Greco SP saturé.

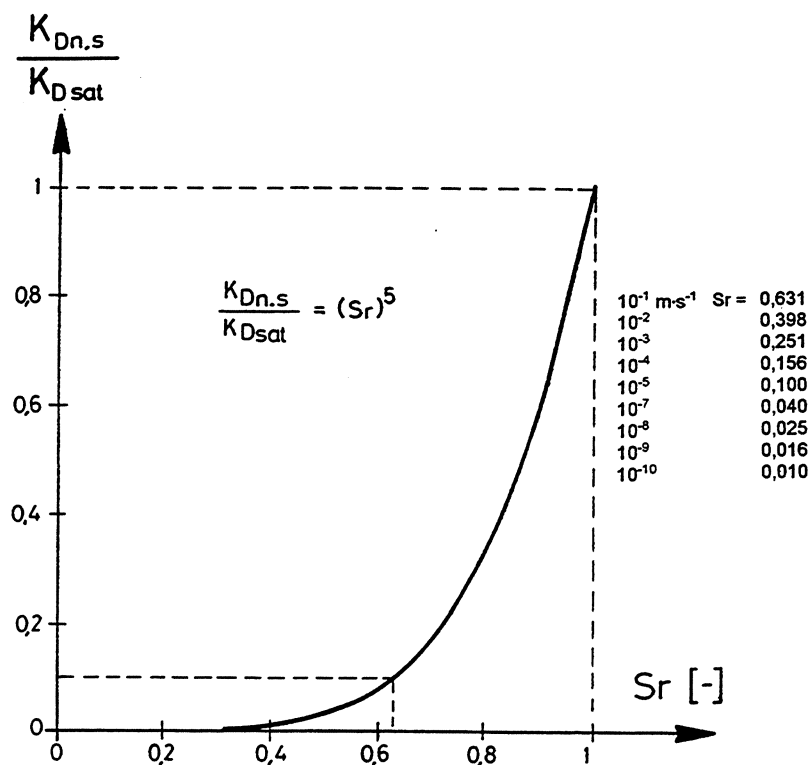


Figure 5.3 Perméabilité relative en fonction du degré de saturation

5.2 Résultats des calculs numériques

5.2.1 Contraintes et déformations

Le problème mécanique est celui d'un massif constitué d'une couche de sable semi-infinie et d'une couche bitumineuse de 8 cm d'épaisseur, avec un collage supposé parfait entre les deux couches. Les deux matériaux sont considérés comme homogènes et isotropes. Les paramètres quantifiant le comportement des matériaux ont été déterminés par les essais en laboratoire ou extraits de la littérature et sont donnés ci-après.

Propriétés des matériaux pour une simulation élasto-plastique

Température: 23°C

	Sable	Béton bitumineux
Module de cisaillement élastique G_e	15 MPa	88 MPa
Coefficient de Poisson ν_{ve}	0.28	0.3
Cohésion c	1 kPa	-
Angle de frottement ϕ	30 deg.	-
Angle de dilatance ψ	0 deg.	-

Température: 5°C

	Sable	Béton bitumineux
Module de cisaillement élastique G_e	15 MPa	365 MPa
Coefficient de Poisson ν_{ve}	0.28	0.3
Cohésion c	1 kPa	-
angle de frottement ϕ	30 deg.	-
Angle de dilatance ψ	0 deg.	-

Température: 41°C

	Sable	Béton bitumineux
Module de cisaillement élastique G_e	15 MPa	38 MPa
Coefficient de Poisson ν_{ve}	0.28	0.3
Cohésion c	1 kPa	-
angle de frottement ϕ	30 deg.	-
Angle de dilatance ψ	0 deg.	-

Caractéristiques de la charge

Rayon de la charge	15cm		
Charge F_0	23°C	5°C	41°C
	11 kN	16 kN	8 kN
Pression verticale uniforme p	157 kPa	228 kPa	114 kPa
sous l'axe de la charge	0 kPa	0 kPa	0 kPa
Cisaillement τ (linéaire) au bord de la plaque de fondation	125 kPa	182 kPa	91 kPa

Le calcul numérique par éléments finis a nécessité la définition d'un réseau maillé constitué de 90 éléments dont chacun comprend 15 points caractéristiques (figure 5.4). Un exemple complet de résultats est donné à l'annexe G.

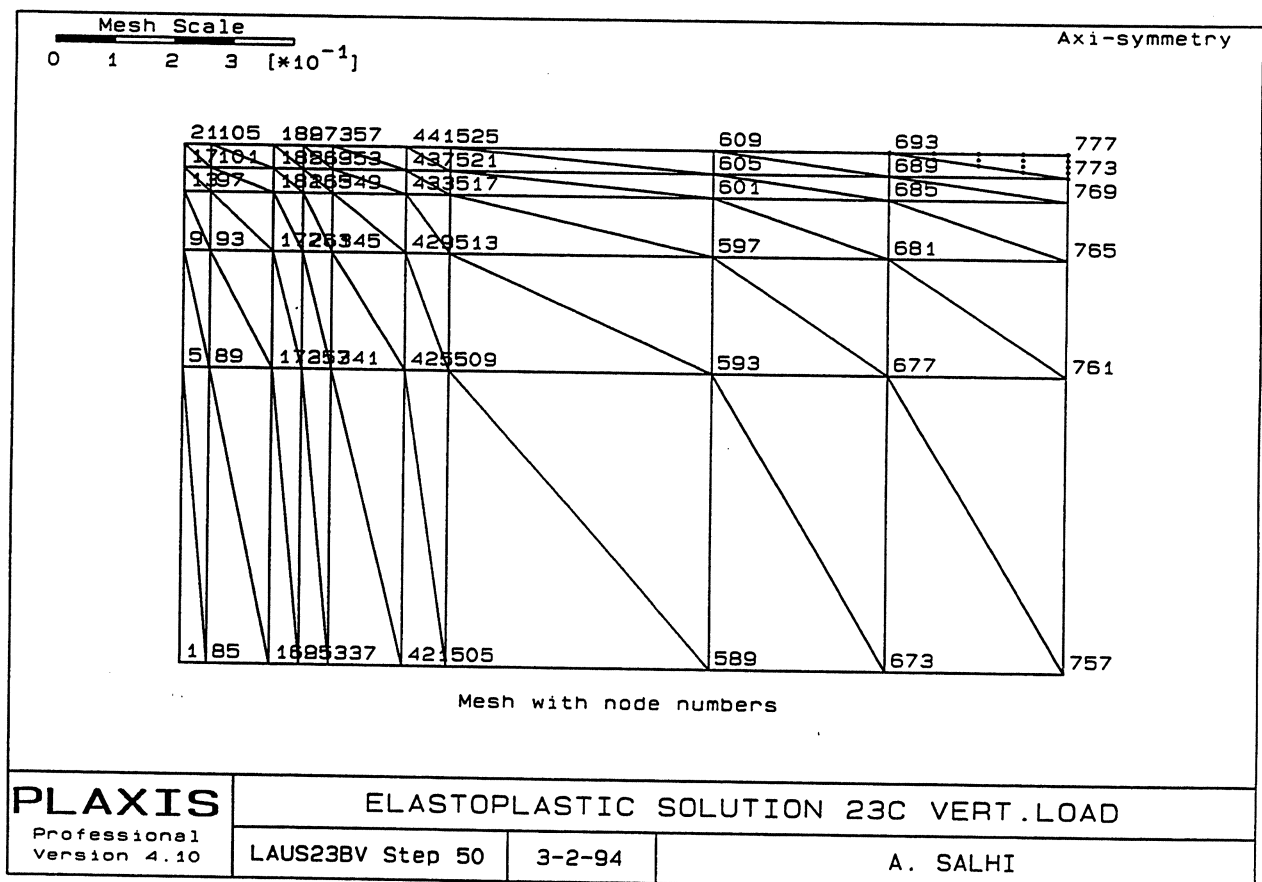


Figure 5.4 Définition du réseau

La simulation a été menée pour quatre hypothèses. Afin d'introduire les effets de l'application de la charge par un élément de caoutchouc, il a été introduit des efforts horizontaux à la surface selon la figure 5.5.

- calcul élastique avec une charge uniforme verticale
- calcul élastique avec une charge uniforme verticale et une charge triangulaire horizontale
- calcul élastoplastique avec une charge uniforme verticale
- calcul élastoplastique avec une charge uniforme verticale et une charge triangulaire horizontale

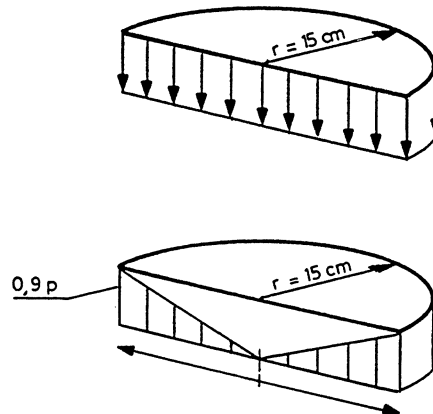


Figure 5.5 Schéma d'application des forces

La comparaison entre les mesures et la simulation a été menée en choisissant parmi 5 paramètres en 11 points de la structure, identifiés selon le schéma ci-après:

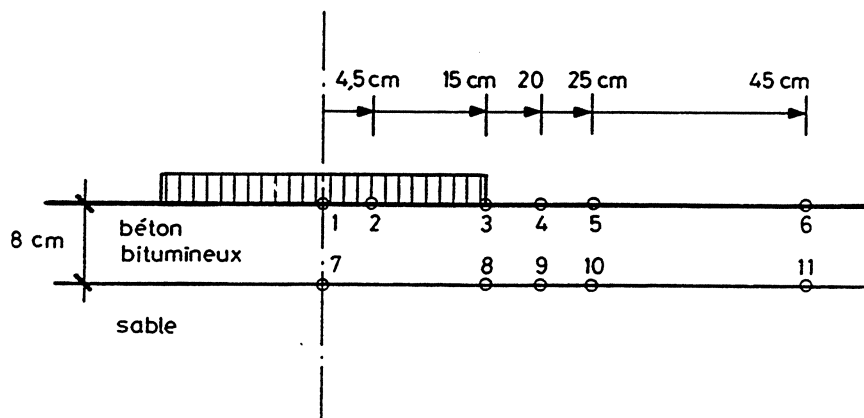


Figure 5.6 Position des points de comparaison

N° du point de mesure	Position horiz. [cm]	Niveau vert. [cm]	Paramètre	N° dans le maillage
1	0	0	w	21
2	4,5	0	ε_{π} , $\varepsilon_{\sigma\sigma}$	105
3	15	0	w	189
4	20	0	ε_{π} , $\varepsilon_{\sigma\sigma}$	273
5	25	0	w	357
6	45	0	w, H	525
7	0	-8	ε_{π}	13
8	15	-8	w	181
9	20	-8	w, $\varepsilon_{\sigma\sigma}$	265
10	25	-8	w, ε_{π} , $\varepsilon_{\sigma\sigma}$	349
11	45	-8	ε_{π} - $\varepsilon_{\sigma\sigma}$	517

Tableau 5.1: Localisation des points et des paramètres de comparaison

La comparaison des courbes de simulation avec les mesures montre de bonnes concordances de forme. Le phénomène est donc modélisé de façon satisfaisante. L'effet de la température sur l'état de déformation ressort des 3 figures 5.7, 5.8 et 5.9 qui donnent (à des échelles différentes) le déplacement vertical du point situé à l'axe de la charge et à l'interface AB6-sol pour les températures de 5, 23 et 41 °C.

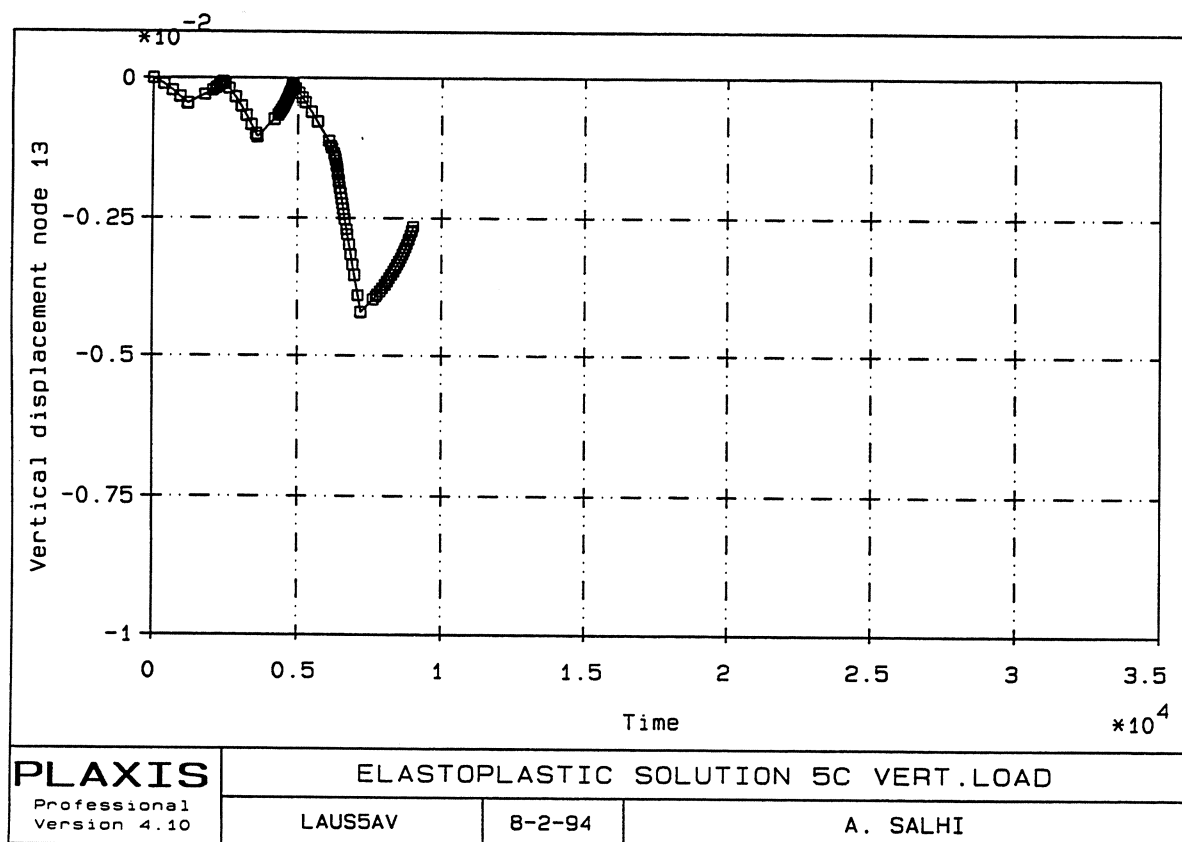


Figure 5.7 Déplacement vertical sous la charge, 5 °C

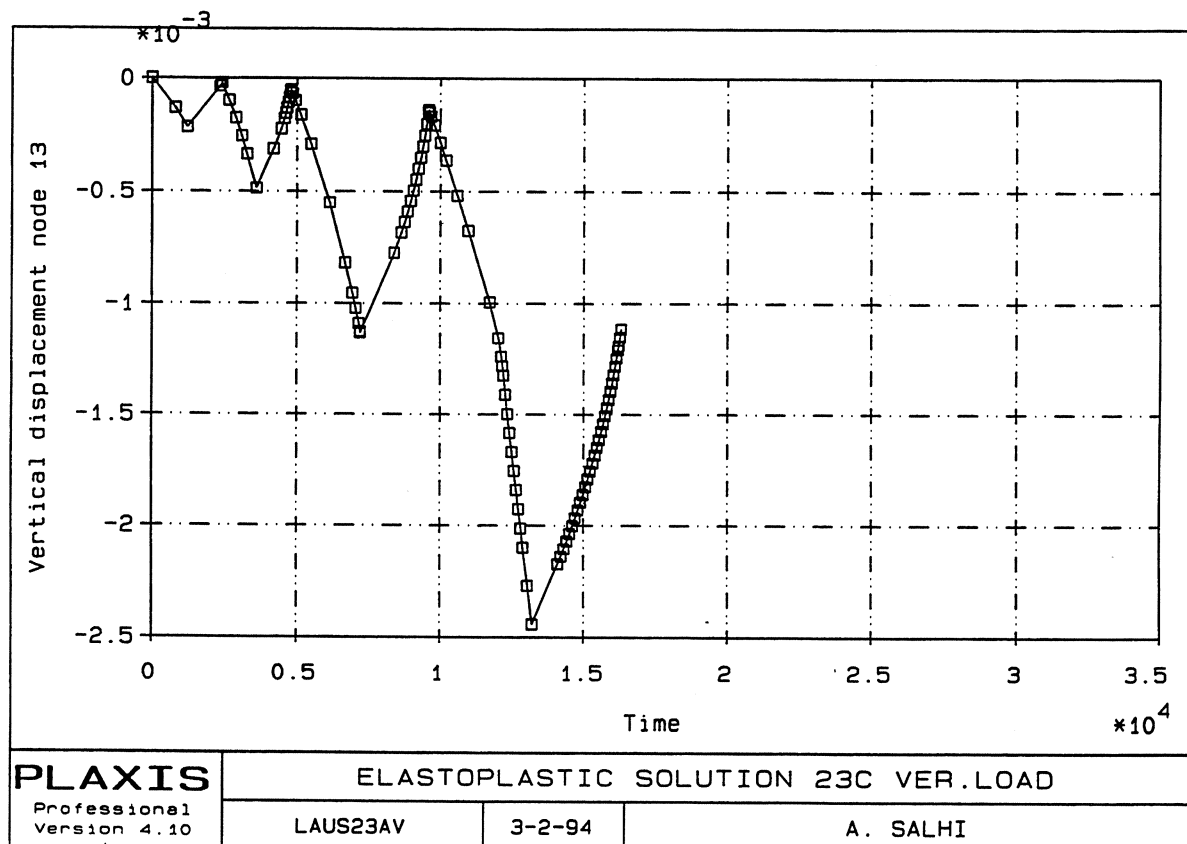


Figure 5.8 Déplacement vertical sous la charge, 23 °C

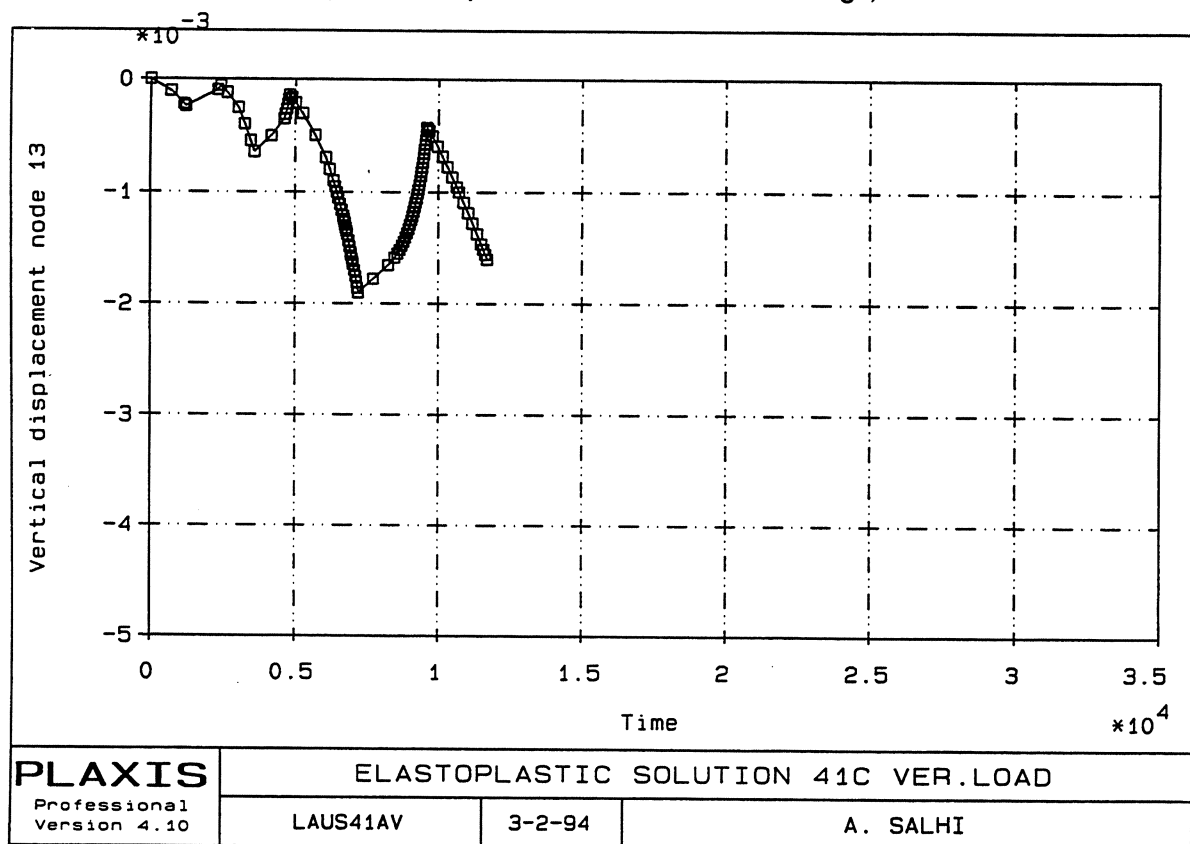


Figure 5.9 Déplacement vertical sous la charge, 41 °C

5.2.2 Diffusion des températures

Le modèle KEM1d permet de simuler l'évolution des températures dans le massif de sol de manière excellente. Il permet en particulier de reproduire les courbes des figures 4.2 à 4.6 pour les valeurs numériques de la conductivité et la capacité thermiques indiquées sous 5.1.2.

5.2.3 Evolution de la succion

Le modèle numérique permet de calculer les courbes de pression et de teneur en eau pour différentes époques, figures 5.10 et 5.11, en fonction de la profondeur Z (les cotes Z des figures 5.10 à 5.11 augmentent vers le haut alors que sur les figures des chapitres précédents, le zéro est à la surface du revêtement et Z augmente avec la profondeur. Par exemple, la cote $Z = 210$ cm du modèle numérique, chapitre 5 correspond à $Z = -8$ cm des chapitres précédents). Elles sont à comparer avec les figures 4.11 pour les pressions et 4.8 pour les teneurs en eau. L'allure générale des courbes est la même. Toutefois, le choix des valeurs numériques des paramètres A , B , C et K_{Dsat} pourrait encore être améliorée. Les courbes calculées des figures 5.10 et 5.11 montrent bien quelle est l'évolution qualitative des phénomènes. Notons qu'en ce qui concerne les pressions mesurées, la figure 4.11 donne des valeurs de fin de palier de température. Chaque série de points correspond à une température différente, alors que la simulation a été faite sans tenir compte de la température. L'étude de son influence reste à faire. Elle paraît être relativement faible. Les points expérimentaux de la figure 4.8 correspondent à un régime hydraulique transitoire. L'équilibre n'est pas encore atteint; il y a encore un flux hydraulique. La durée des essais à chaque palier de température n'a pas été suffisante pour atteindre l'équilibre des pressions représenté par la droite oblique.

La figure 4.8 montre que les teneurs en eau ne varient que faiblement à partir de la fin du 1er palier de température. La simulation (figure 5.4) montre bien que le passage d'une teneur en eau initiale uniforme sur l'épaisseur de chaque couche se fait rapidement au début, au cours du premier jour. Deux phénomènes se produisent: d'une part l'eau descend dans la partie supérieure du modèle sous l'effet de la gravité. D'autre part l'eau monte à partir de la nappe dans la partie inférieure sous l'effet de la succion. La courbe $t = 22.5$ min de la figure 5.12 montre que, durant la première demi-heure, le gradient hydraulique H est négatif et que l'eau remonte par succion à partir de la nappe. Cette figure montre aussi que les gradients sont beaucoup plus forts dans la couche supérieure SP que dans la couche inférieure SM au cours des huit premiers jours. Ces deux phénomènes contribuent à la diminution de la teneur en eau dans le haut du modèle et à une augmentation dans le bas. Cela explique l'augmentation des succions, ou pressions négatives, en haut et leur diminution au voisinage de la nappe.

La zone supérieure du modèle, sur laquelle agissent les surcharges routières, est donc en état de succion maximale, à long terme.

Les phénomènes observés et simulés sont ceux qui se produisent dans tout remblai, construit par mise en place de terres à une teneur en eau uniforme sur l'épaisseur, souvent voisine de la teneur en eau optimale de compactage, mais supérieure à la teneur en eau d'équilibre.

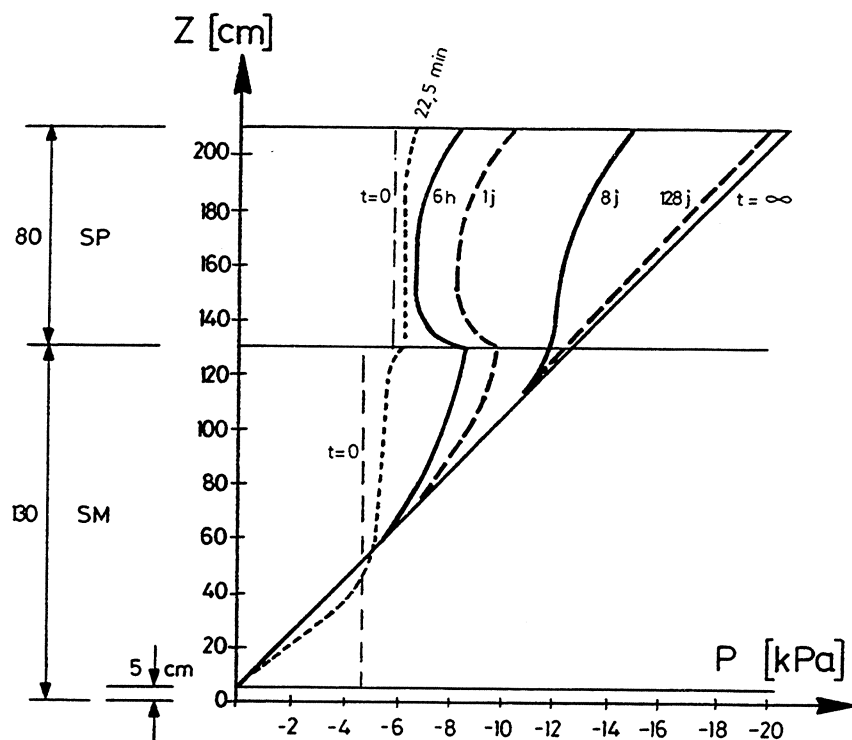
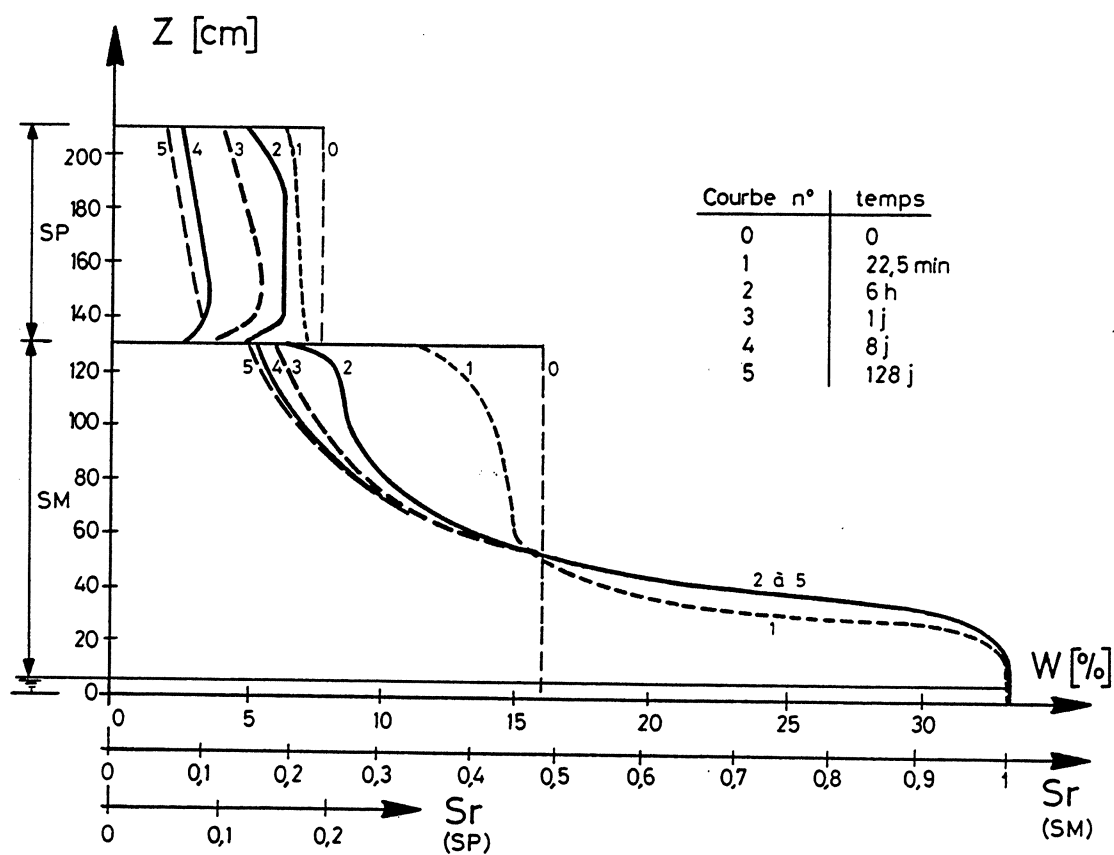


Figure 5.10 Succions calculées en fonction de la profondeur


 Figure 5.11 Teneurs en eau w [%] calculées en fonction de la profondeur

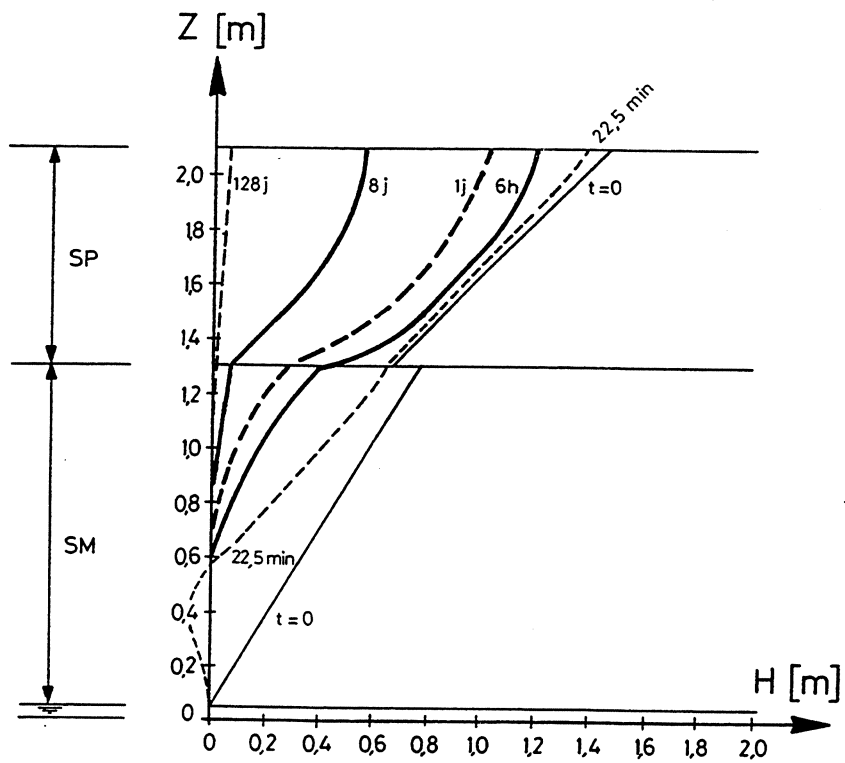


Figure 5.12 Charges hydrauliques $H = Z + P/\gamma_w - 0.05$ [m] calculées

6. CONCLUSIONS

La réalisation d'un essai en vraie grandeur sur une superstructure routière a été menée pour contribuer à valider les lois de comportement des matériaux hydrocarbonés et des sols.

La recherche devait initialement se limiter à mettre à disposition du Groupement de Recherches Coordonnées en Géomatériaux les valeurs mesurées. La présente contribution n'est qu'un prolongement volontaire vers la mise en application des résultats.

Les incertitudes liées à l'utilisation de ces modèles, en particulier sur la détermination des valeurs des paramètres des matériaux, incitent à poursuivre les études pour assurer une bonne fiabilité.

6.1 Contraintes et déformation

Les mesures menées sur la superstructure hydrocarbonée ne coïncident que partiellement avec les résultats des simulations. Les formes générales des courbes de déplacement et de déformation sont conformes au comportement visco-élastique des matériaux hydrocarbonés. Les valeurs quant à elles, diffèrent.

A l'avenir, on insistera sur une méthodologie de mesure adaptée aux phénomènes quasi-statiques. On apportera une plus grande attention aux températures sur les jauges qui ont été ici sous-estimées. D'autre part, la fréquence de mesure élevée a produit une grande masse de données qu'il est malaisé de manipuler et d'analyser.

Le comportement des couches hydrocarbonées, en ayant recours aux éléments finis, reste difficile à aborder. Les modèles développés pour la géotechnique, puis adaptés au comportement des chaussées, se heurtent à des obstacles tels que la dispersion des paramètres des matériaux, les effets de la plasticité et de la viscosité et la définition des interfaces.

Une comparaison basée sur d'autres modèles numériques (disposant en particulier d'un module adapté aux effets de la viscosité, non disponible pour la présente étude) devrait permettre d'approcher le comportement réel des chaussées.

6.2 Succions et teneurs en eau

La simulation numérique du chapitre 5.2.3 reproduit bien qualitativement les résultats des mesures de succion et de teneur en eau donnés par les figures du chapitre 4.

Du point de vue du comportement des deux couches de sol, les phénomènes principaux sont les suivants:

- La propagation de la chaleur, après chaque changement de température, se produit essentiellement par diffusion. Les flux hydrauliques étant très lents, le transport de chaleur par convection forcée ou naturelle est négligeable, ce que nous avons déjà observé dans de précédents modèles. L'influence de la température sur l'évolution de la teneur en eau et de la succion est trop faible pour être clairement mise en évidence par les mesures, mais elle existe.

- L'évolution de la succion et de la teneur en eau dans les deux couches du modèle, sans tenir compte de l'effet de la température a été clairement décrite par les mesures et par la simulation numérique. Ce qui frappe, c'est que cette évolution est beaucoup plus lente dans la couche supérieure SP, la plus grossière, que dans la couche inférieure SM. Cela est contraire à ce que l'on pourrait attendre si l'on raisonnait à partir des perméabilités du sol saturé, qui sont:

$$\text{pour SP } K_{\text{Dsat}} = 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}; \text{ pour SM } K_{\text{Dsat}} = 3.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$$

L'intuition première est donc fausse. La raison de cette erreur est que la perméabilité d'un sol non saturé est beaucoup plus faible que celle d'un sol saturé. Dans notre cas, les degrés de saturation initiaux sont:

$$\text{pour SP, } S_{r_0} = 0.192 \text{ et pour SM, } S_{r_0} = 0.483$$

Selon la loi donnée à la figure 5.3, les perméabilités dans le domaine des teneurs en eau comprises entre S_{r_0} et $S_{r_0}/2$ sont les suivantes:

	S_{r_0}	$S_{r_0}/2$
SP	$K_{\text{Dns}} = 2.6.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$	$K_{\text{Dns}} = 8.2.10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$
SM	$K_{\text{Dns}} = 7.9.10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$	$K_{\text{Dns}} = 2.5.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$

Le sol le plus grossier SP est donc 30 fois moins perméable que le sol fin SM (couche inférieure).

Le modèle numérique donne des résultats parfaitement logiques (fig. 5.10, 5.11 et 5.12). On remarque que la frange capillaire se forme très rapidement puisque l'eau ne remonte de la nappe que pendant la première demi-heure (fig. 5.12) et, qu'à partir de ce moment, les gradients sont nuls dans cette zone inférieure. Au-dessus, l'eau ne cesse de descendre et les teneurs en eau de diminuer.

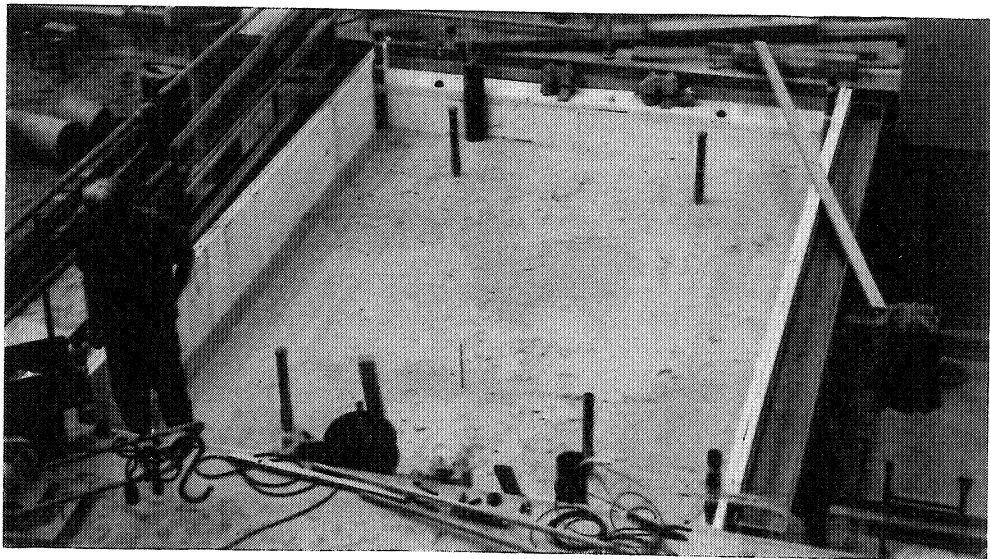
Références

1. D. Bovet, 1977: *La discrétisation des problèmes de la physique mathématique au moyen de complexes topologiques*. Z. angew. Math. Phys. 28, 371-374.
2. A. Burger, E. Recordon, D. Bovet, L. Cotton, B. Saugy, 1985: *Thermique des nappes souterraines*. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.
3. E. Recordon, 1986: *Contamination thermique des eaux souterraines*. Publication de la Société suisse de mécanique des sols et des roches n° 114, Zürich.
4. D. Bovet, 1990: *Modélisation du comportement hydraulique d'un sol non saturé dans un champ de pesanteur constant ou variable*. Colloque sur les sols non saturés, 22 et 23 novembre 1990 à Lausanne; Textes des communications; Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, Lausanne 1991.
5. W. Knobel, I. Scazziga, A.-G. Dumont, J.-J. Hefti, 1985: *Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées*. Rapport du groupe d'experts scientifiques I2 de l'OCDE, rapport n° 104.
6. M. Pigois, P. Ullidtz, A.-G. Dumont, J.-J. Hefti, 1989: *Comportement des superstructures avec couche de fondation en grave stabilisée au ciment*. Mandat de recherche OFR 28/82, rapport n°181.
7. M. Pigois, A.-G. Dumont, J.-J. Hefti, 1983: *Superstructures routières dans des conditions climatiques extrêmes*. Mandat de recherche OFR 30/80, rapport n° 77.
8. I. Gueye, 1993: *Résistance au cisaillement des sols non saturés et stabilité des pentes*. Thèse n° 1186, EPF-Lausanne.
9. Rapports annuels des activités et recherches du Greco

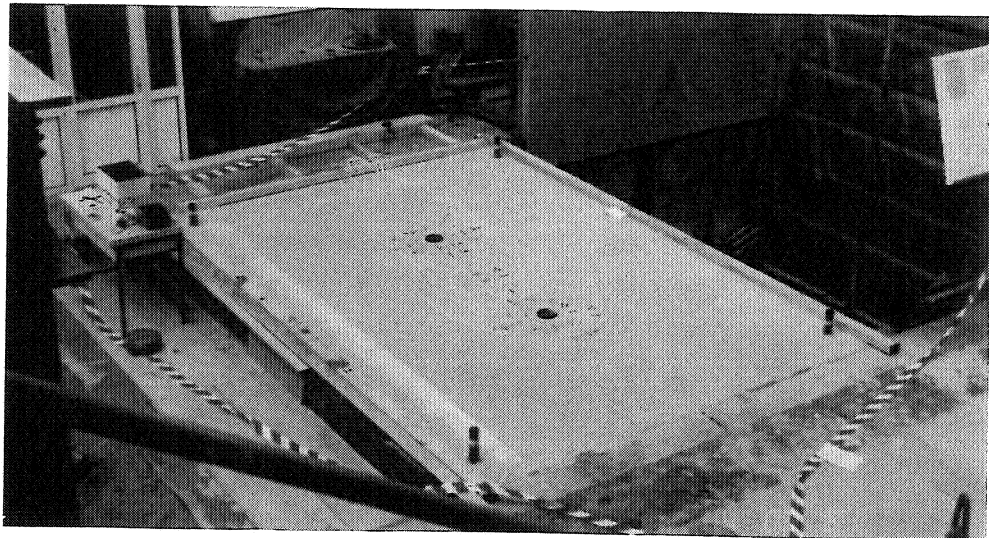
A N N E X E S

- A. CONSTRUCTION DU MODELE PHYSIQUE
- B. LISTE DES CAPTEURS
- C. PROGRAMME DES ESSAIS
- D. STOCKAGE DES DONNEES
- E. CHARGES, TEMPERATURES ET DEFORMATIONS DANS LA PHASE D'ESSAI II
- F. SIMULATEUR DE TRAFIC LOURD
- G. EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION

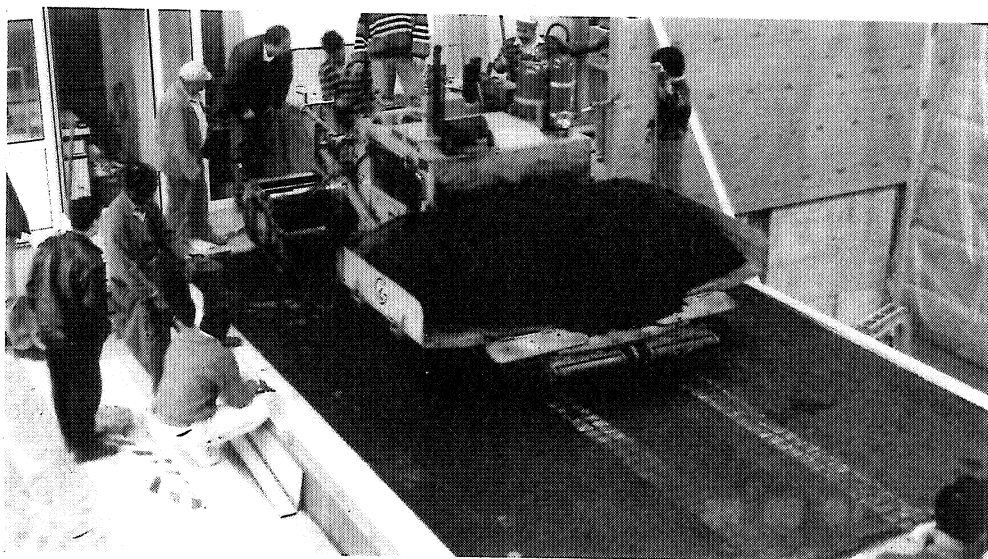
ANNEXE A1. CONSTRUCTION DU MODELE PHYSIQUE



Remplissage de la fosse et vue des tubes pour la mesure de la teneur en eau

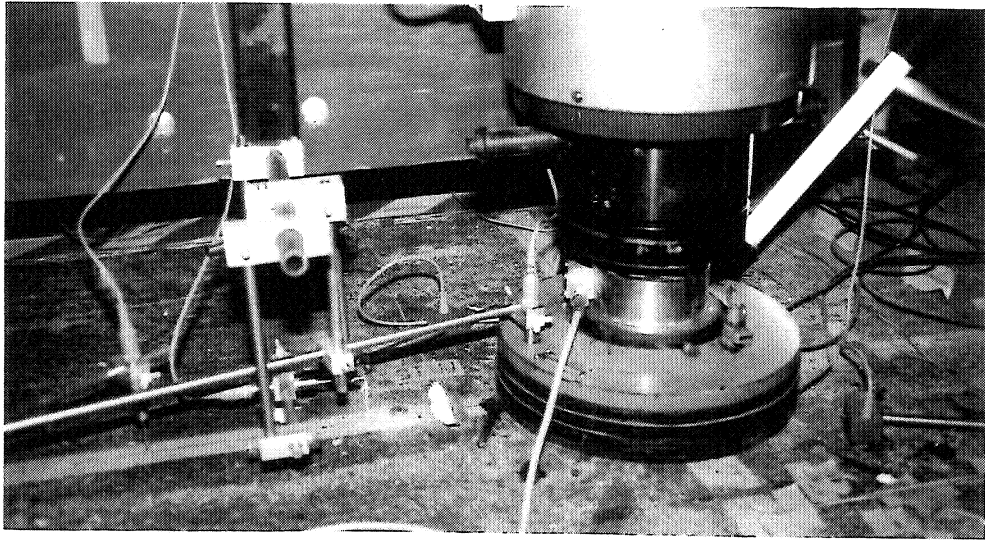


Vue générale avant la pose du revêtement

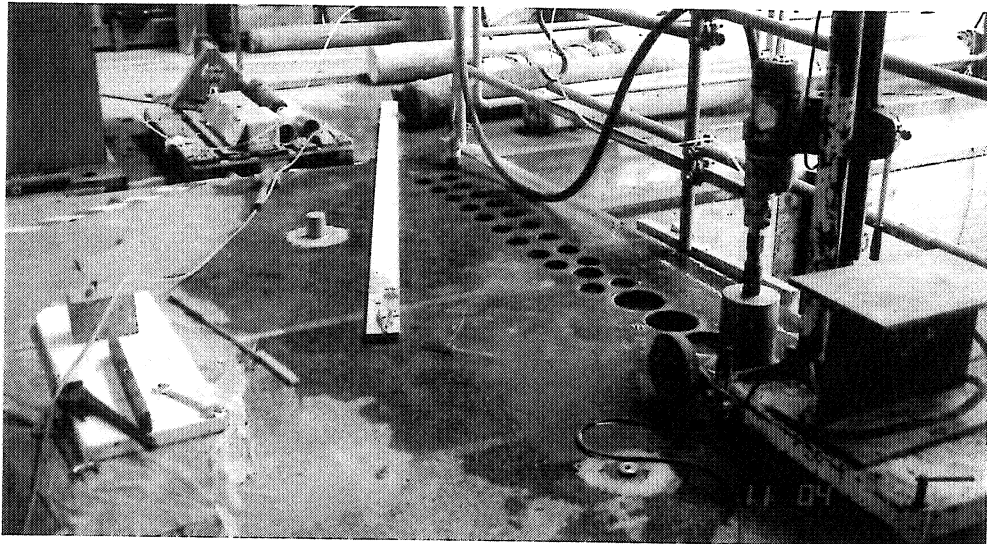


Pose du béton bitumineux

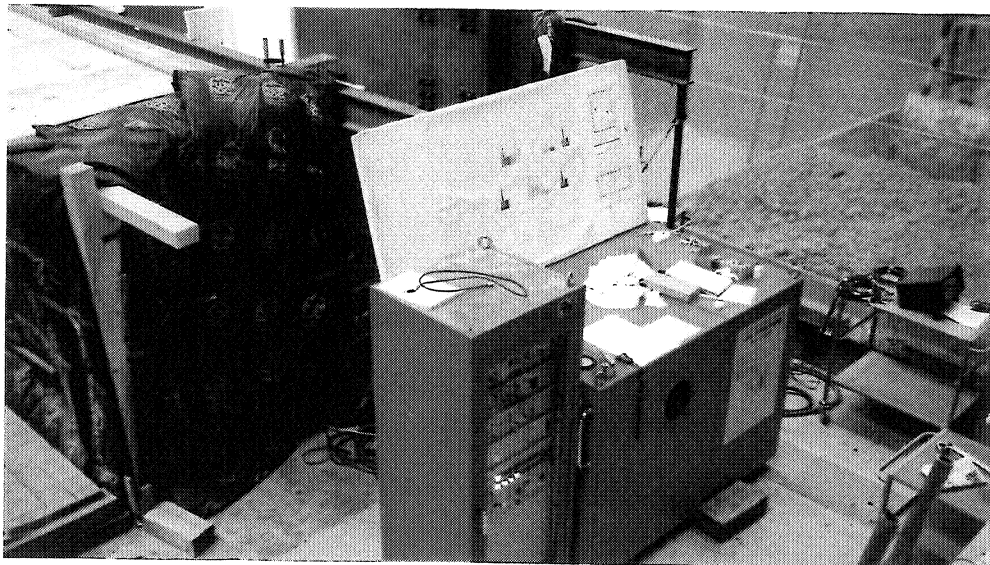
ANNEXE A2. CONSTRUCTION DU MODELE PHYSIQUE



Vérin de charge



Prélèvement d'échantillon



Enceinte thermique, cadre de chargement du vérin

ANNEXE B1 LISTE DES CAPTEURS (PT 100)

**POSITION DES CAPTEURS DANS LES DEUX COUCHES DE SOL
(ETUDE EUROGRECO)**

1 - Sondes de température PT100

N° des PT100	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
1	0	0	-198
2	0	0	-188
3	0	-90	-188
4	0	0	-168
5	0	-90	-168
6	-200	0	-168
7	0	0	-148
8	0	-90	-148
9	-50	-240	-148
10	-200	0	-148
11	90	90	-148
12	0	0	-128
13	0	-90	-128
14	0	0	-108
15	90	90	-88
16	0	0	-88
17	-50	-240	-88
18	-200	0	-88
19	0	0	-68
20	90	90	-48
21	0	0	-48
22	-50	-240	-48
23	-200	0	-48
24	0	0	-88
25	-200	0	-8
26	-90	0	-8
27	-40	0	-8
28	0	0	-8
29	90	90	-8
30	90	0	-8
31	90	-20	-8
32	90	-50	-8
33	90	-90	-8

ANNEXE B2 LISTE DES CAPTEURS (TENSIOMETRES)**POSITION DES CAPTEURS DANS LES DEUX COUCHES DE SOL
(ETUDE EUROGRECO)****2 - Tensiomètres pour mesures de succion**

N° des Tensiom.	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
1	-5	0	-188
2	-5	0	-168
3	-5	0	-148
4	-5	0	-128
5	-5	0	-108
6	-5	0	-93
7	-5	0	-78
8	-5	0	-58
9	-200	50	-168
10	-200	50	-148
11	-200	50	-128
12	-200	50	-108
13	210	-120	-168
14	210	-120	-148
15	210	-120	-128
16	210	-120	-108

ANNEXE B3 LISTE DES CAPTEURS (GLOTZL ET BISONS)

**POSITION DES CAPTEURS DANS LES DEUX COUCHES DE SOL
(ETUDE EUROGRECO)**

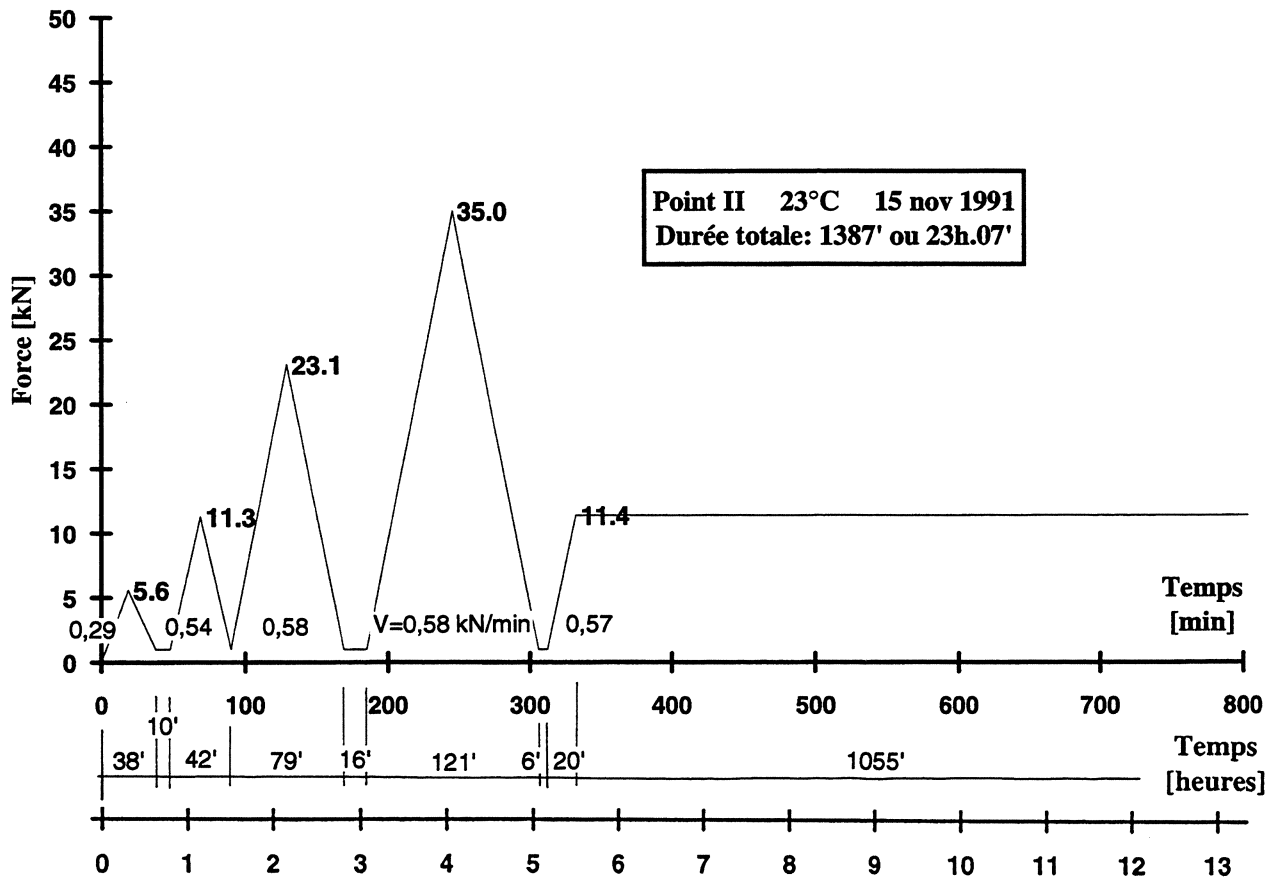
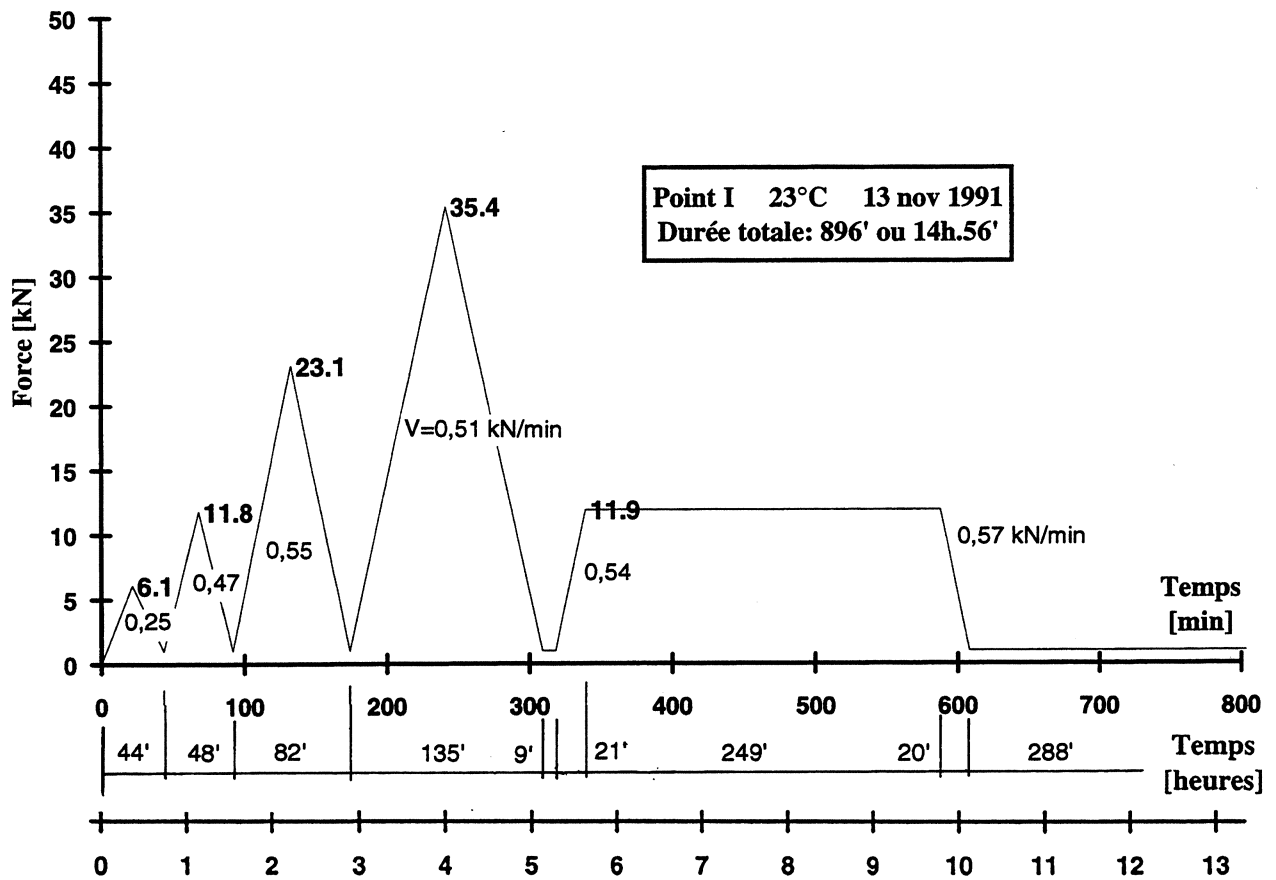
3 - Glötzl pour les mesures de pression

N° des Glötzl	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
1	-105	0	-23
2	-105	0	-18
3	-105	0	-13
4	-75	0	-18
5	-75	0	-13
6	-90	0	-23
7	-90	0	-18
8	-90	0	-13
9	75	0	-18
10	75	0	-13
11	105	0	-18
12	105	0	-13

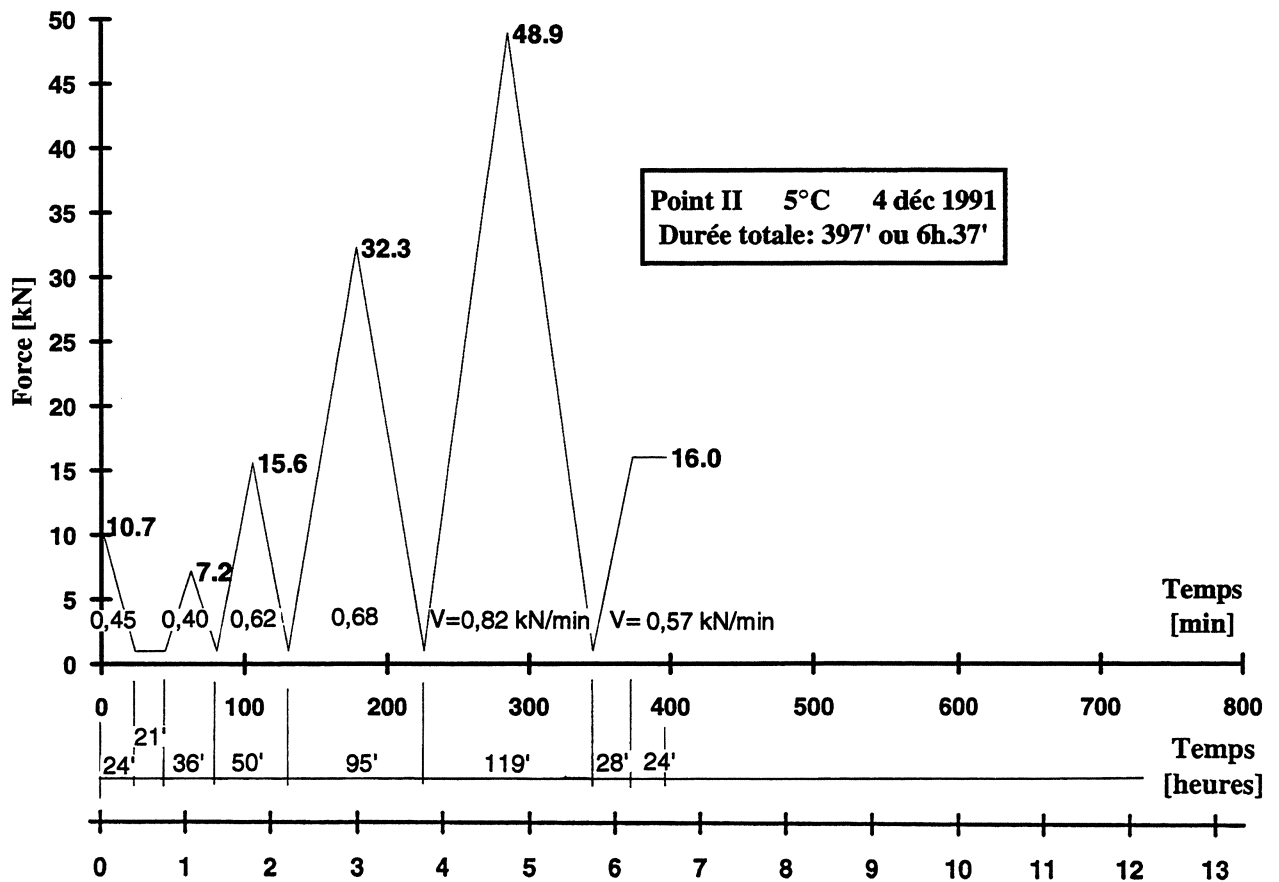
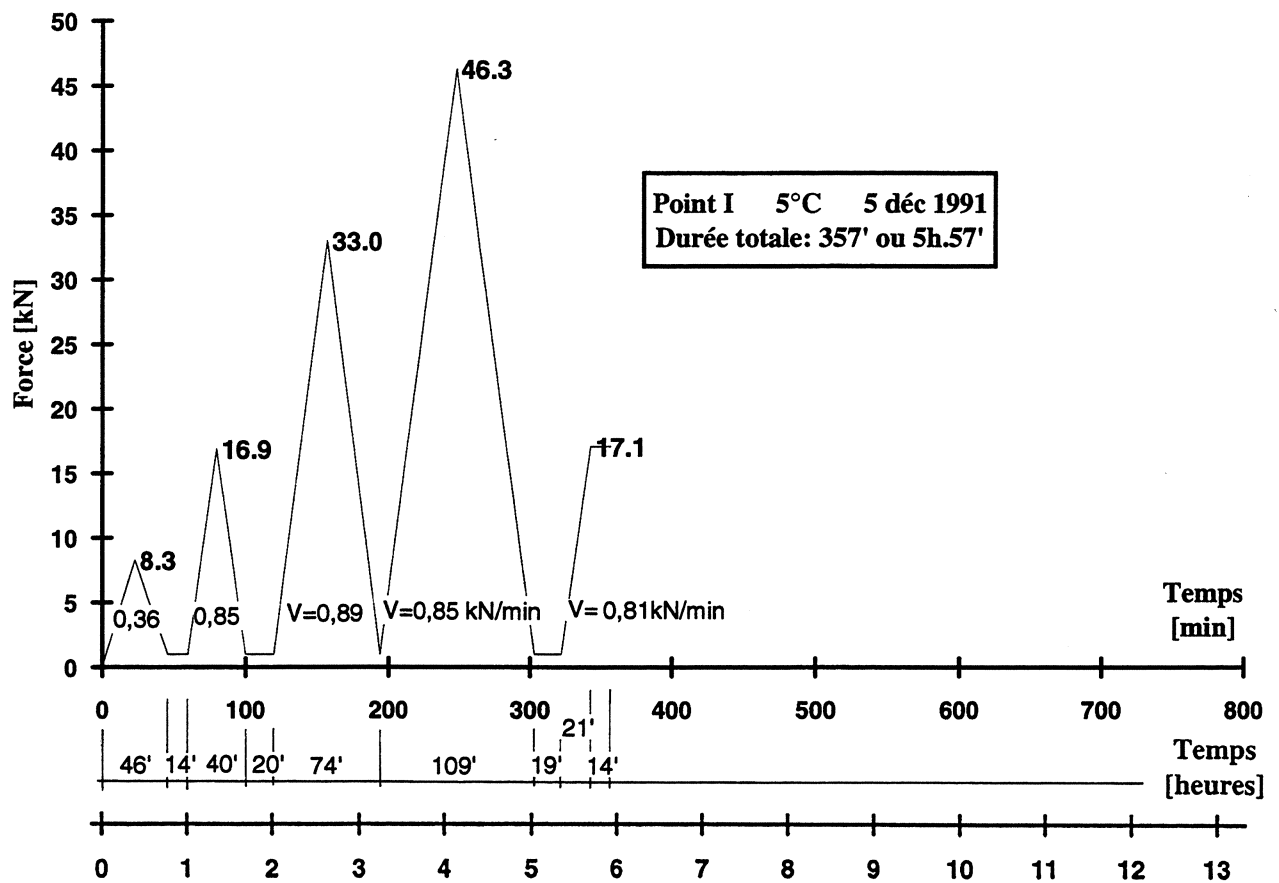
4- Bisons pour les mesures de déplacement

N° des Bisons	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
1	-90	0	-88
2	-90	0	-78
3	-90	0	-68
4	-90	0	-58
5	-90	0	-48
6	-90	0	-38
7	-90	0	-28
8	-90	0	-18

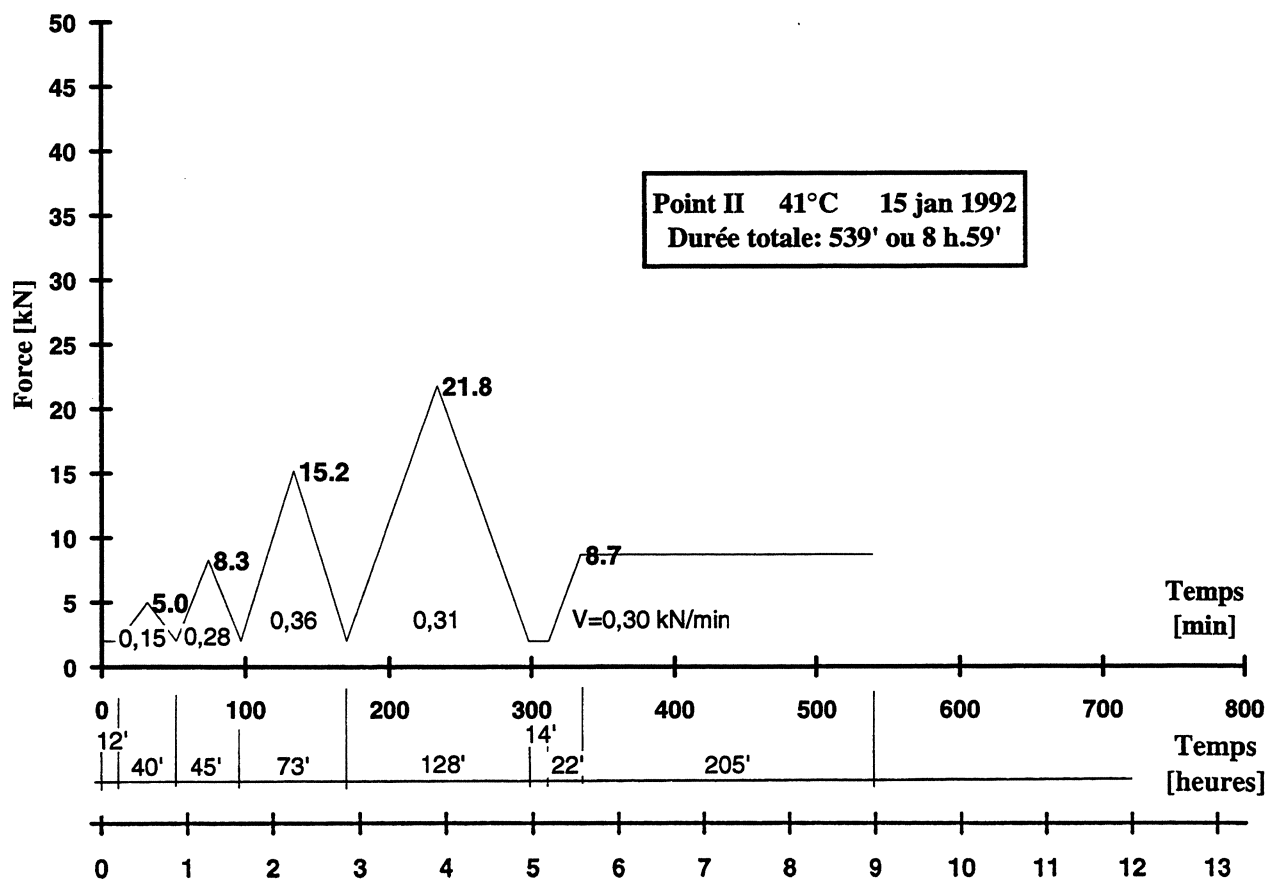
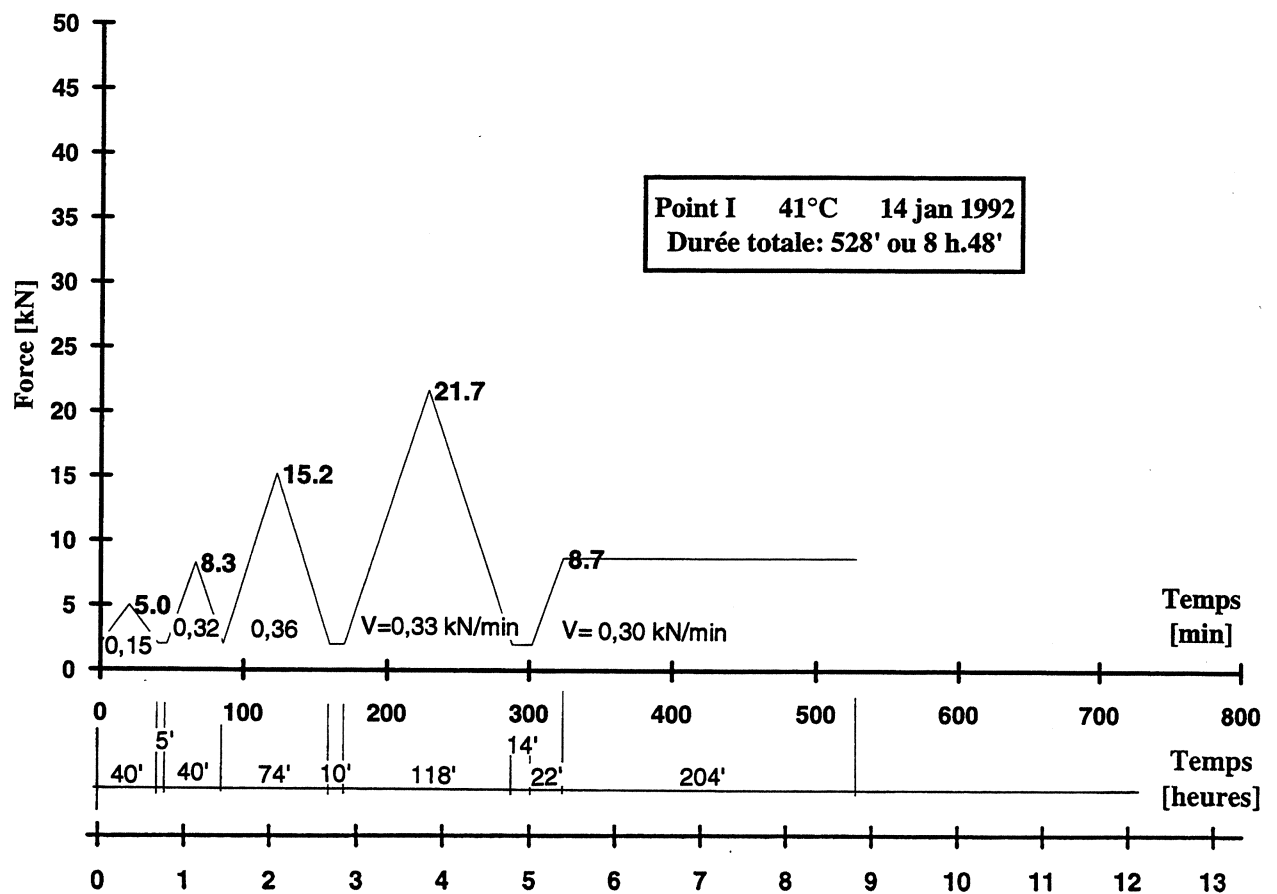
ANNEXE C1-C2 PROGRAMME DES ESSAIS (Phase d'essai II, 23°C)

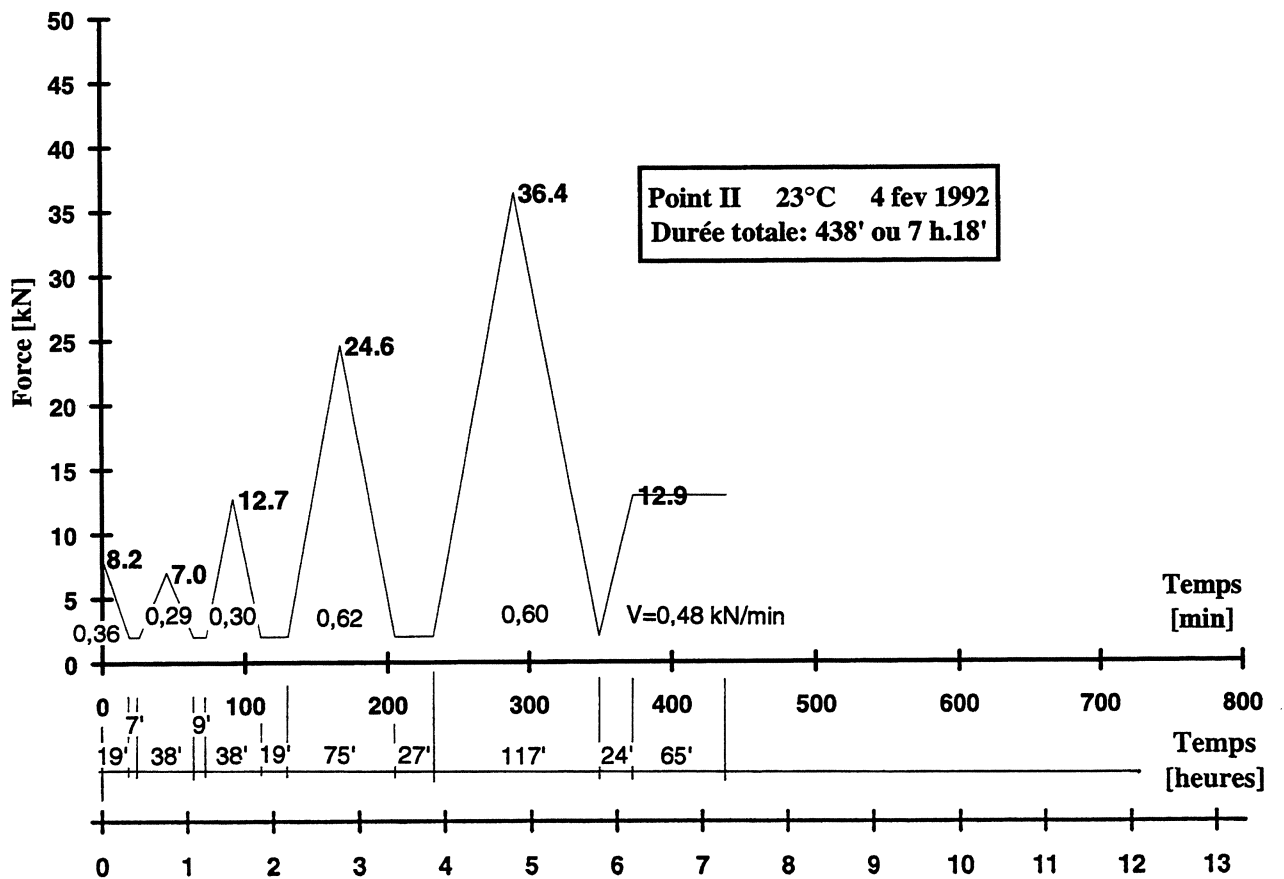
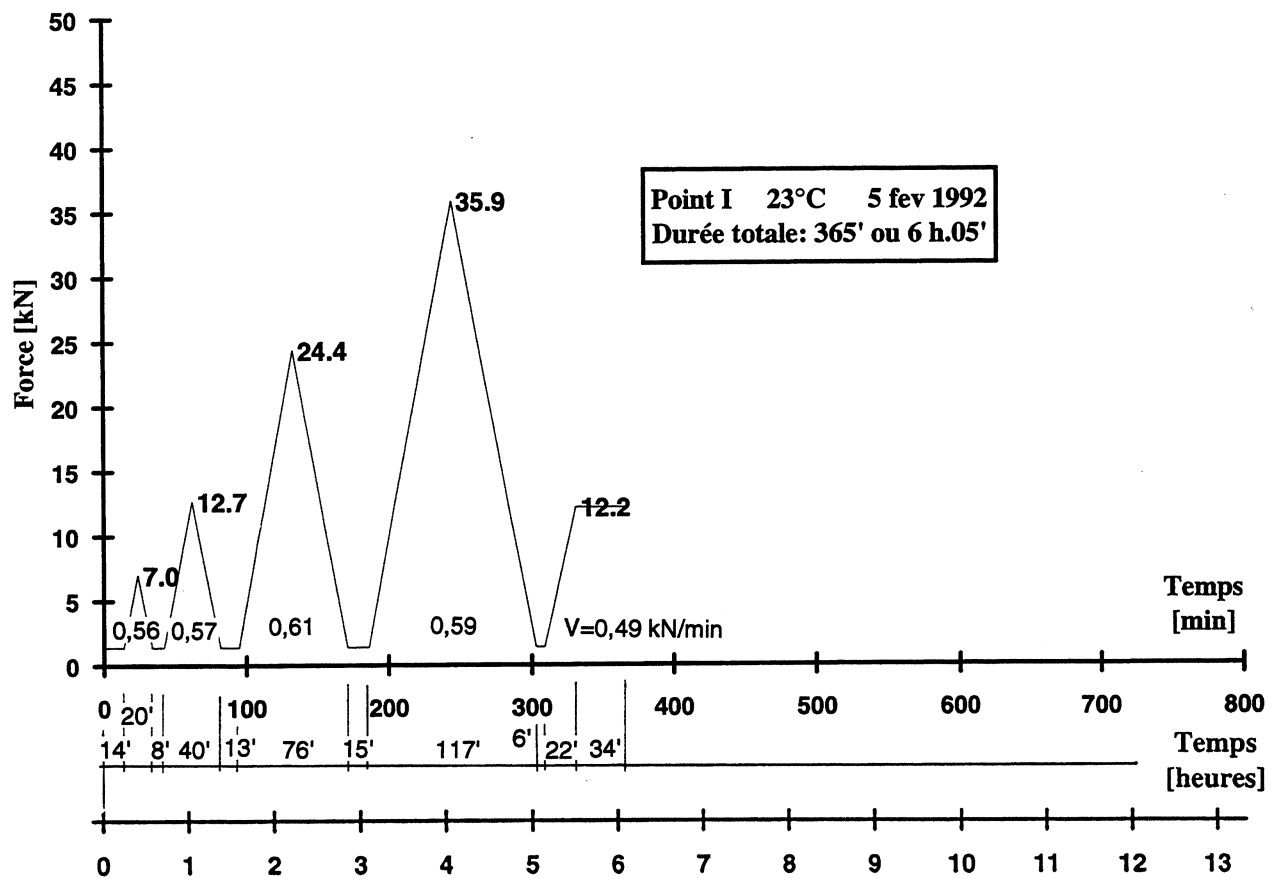


ANNEXE C3-C4 PROGRAMME DES ESSAIS (Phase d'essai II, 5°C)



ANNEXE C5-C6 PROGRAMME DES ESSAIS (Phase d'essai II, 41°C)



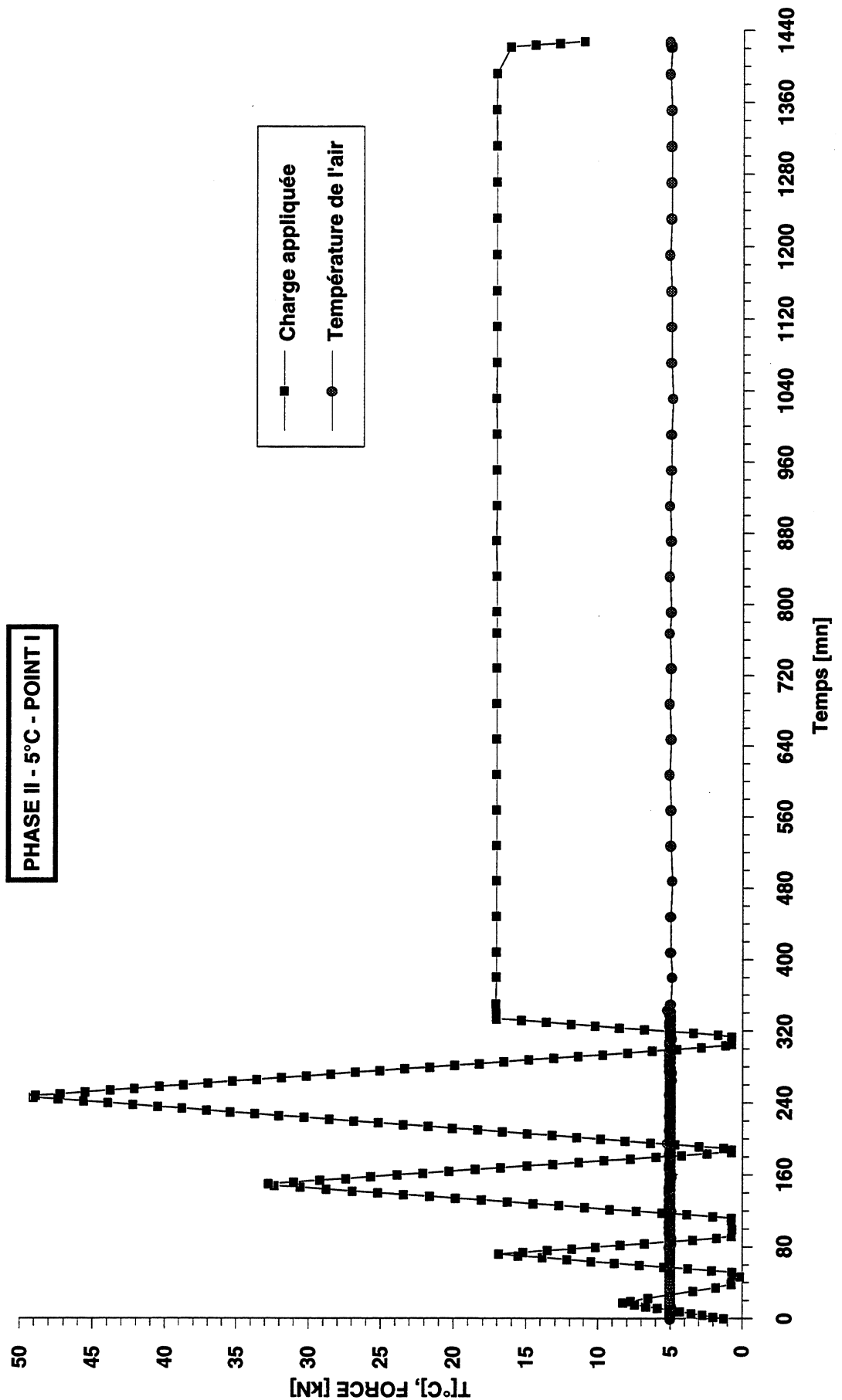
ANNEXE C7-C8 PROGRAMME DES ESSAIS (Phase d'essai II, 23°C, 2^{ème} passage)

ANNEXE D. STOCKAGE DES DONNEES

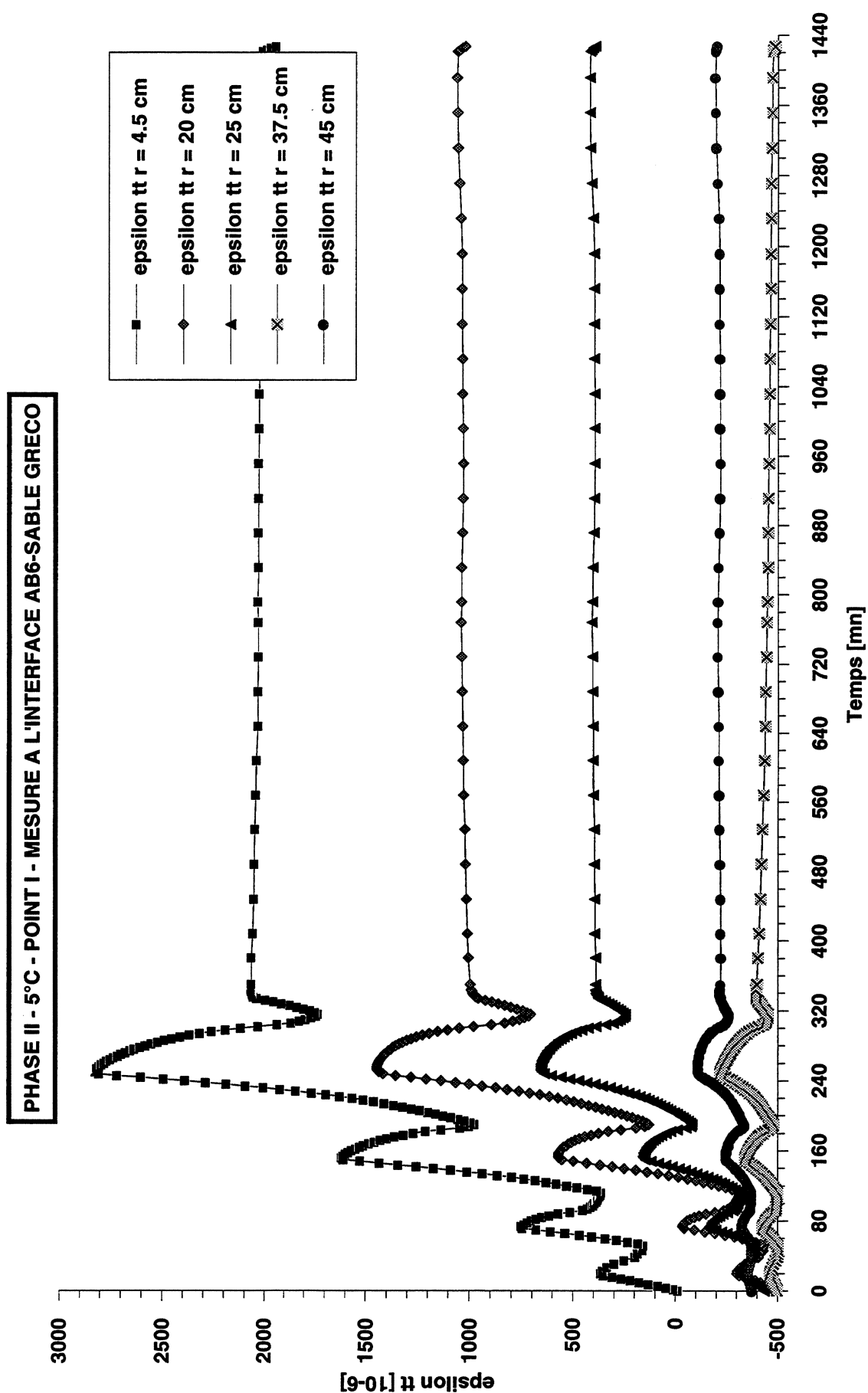
Les fichiers résultats sont sauves sous format DIF (Data Interchange Format) normalement lisible par tout tableur. Au total, 5 fichiers sont prêts à être utilisés pour la phase I, 8 fichiers pour la phase II et 9 fichiers pour la phase III :

PHASE I	Nom de fichier	Description
	TAMB-T23	Passage de la température ambiante à 23°C
	T23-T5	Passage de 5 °C à 23 °C
	T5-T23	Passage de 23 °C à 5 °C
	T23-T41	Passage de 23 °C à 41 °C
	T41-T23	Passage de 41 °C à 23 °C
PHASE II	P1-23-1	Chargement du point I à 23 °C
	P2-23-1	Chargement du point II à 23 °C et passage de 23 °C à 5 °C
	P2-5	Chargement du point II à 5 °C
	P1-5	Chargement du point I à 5 °C et passage de 5 °C à 41 °C
	P1-41	Chargement du point I à 41°C
	P2-41	Chargement du point II à 41 °C et passage de 41 °C à 23°C
	P2-23-2	Chargement du point II à 23 °C
	P1-23-2	Chargement du point I à 23 °C
PHASE III	C16V2F5	Fréquence de mesure : 50 Hz, chargement à 16 kN et une vitesse de 2 km/h
	C16V6F5	50 Hz/16 kN/6 km/h
	C16V1F15	150 Hz/16 kN/10 km/h
	C32V2F5	50 Hz/32 kN/2 km/h
	C32V6F15	150 Hz/32 kN/6 km/h
	C32V1F15	150 Hz/32 kN/10 km/h
	C48V2F5	50 Hz/48 kN/2 km/h
	C48V6F5	100 Hz/48 kN/6 km/h
	C48V1F15	150 Hz/48 kN/10 km/h

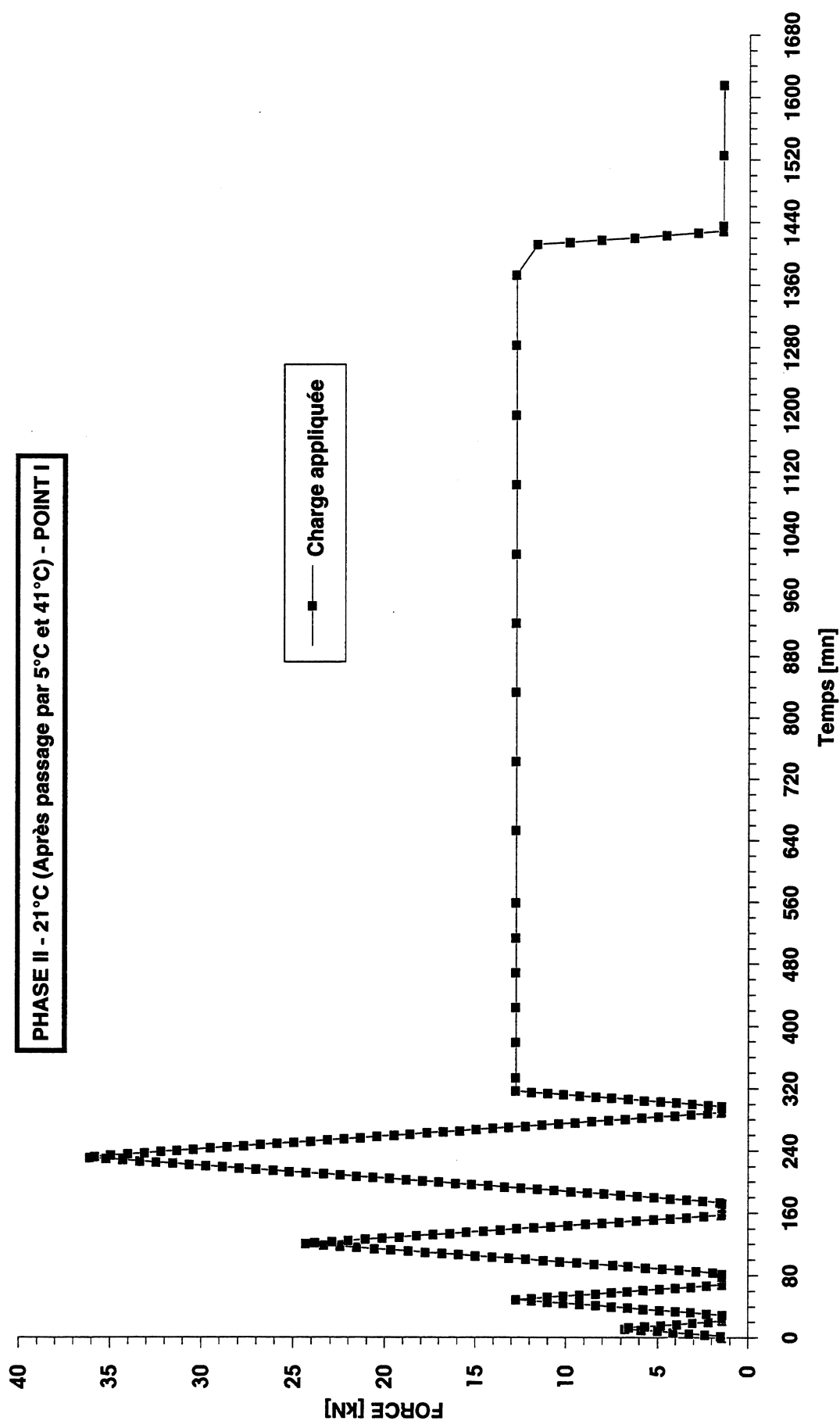
ANNEXE E1 CHARGE ET TEMPERATURE AU POINT I, phase d'essai II, 5°C



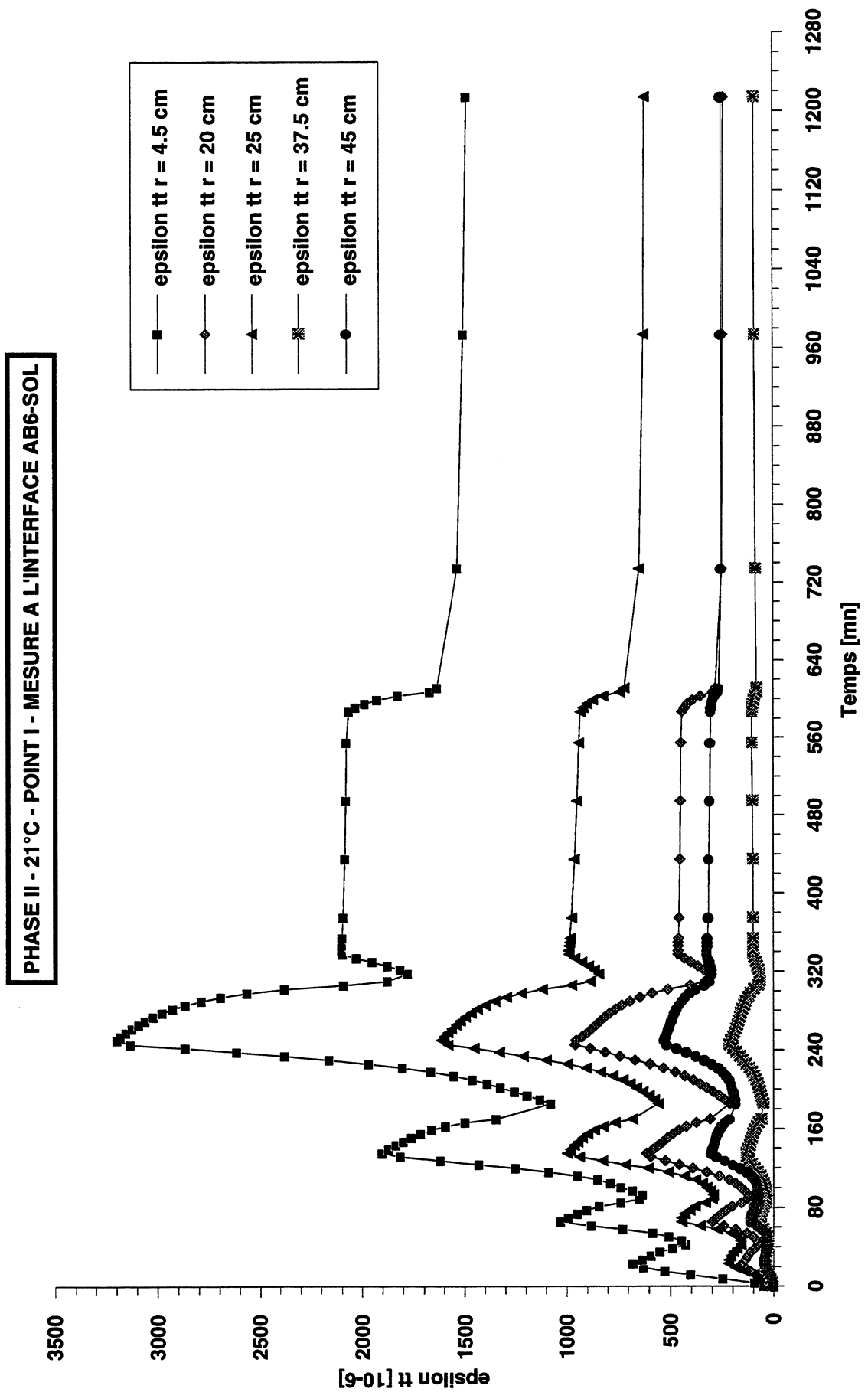
ANNEXE E2 DEFORMATION A L'INTERFACE, AU POINT I, phase d'essai II, 5°C



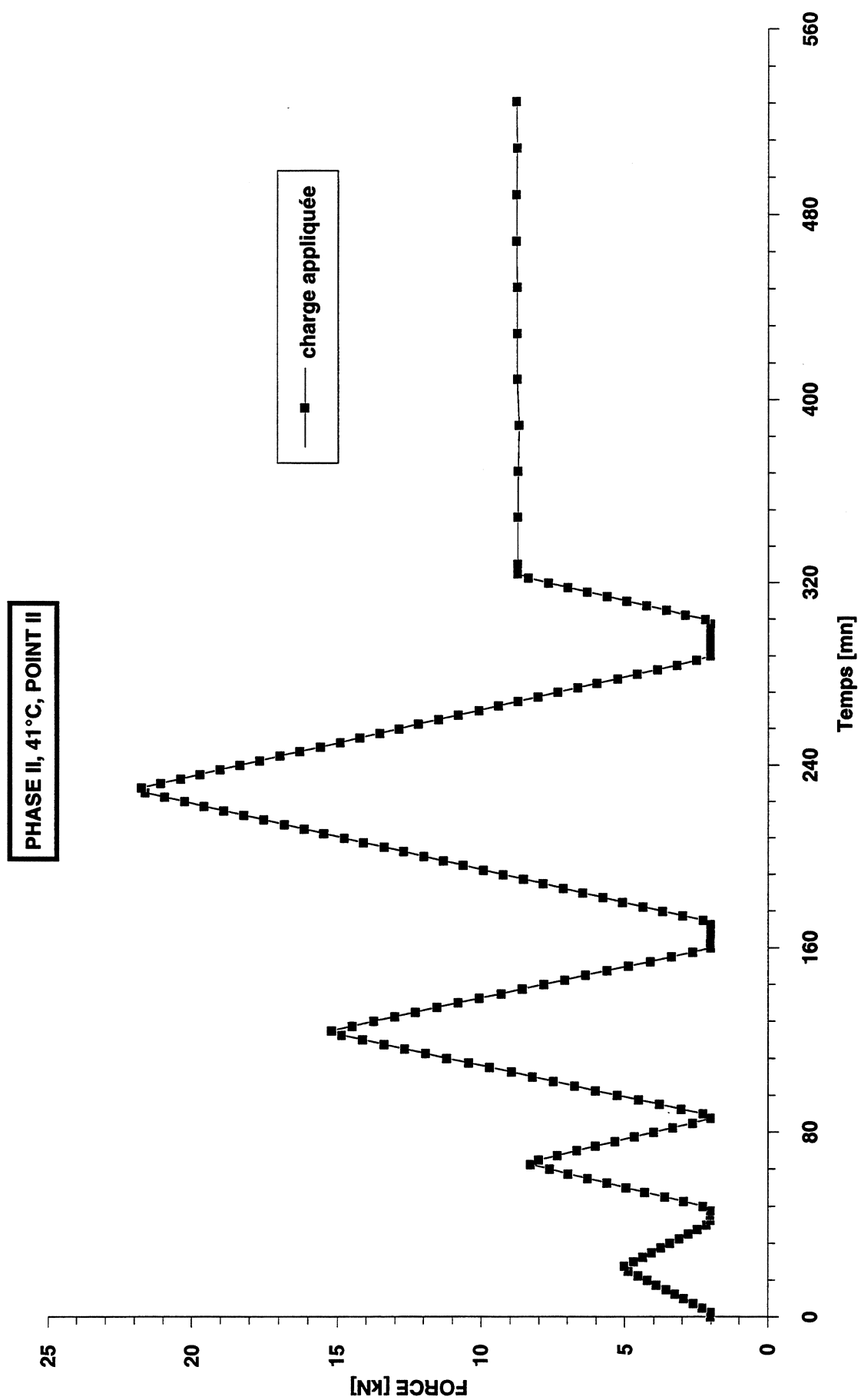
ANNEXE E3 DEFORMATION ET TEMPERATURE AU POINT II, phase d'essai II, 41°C



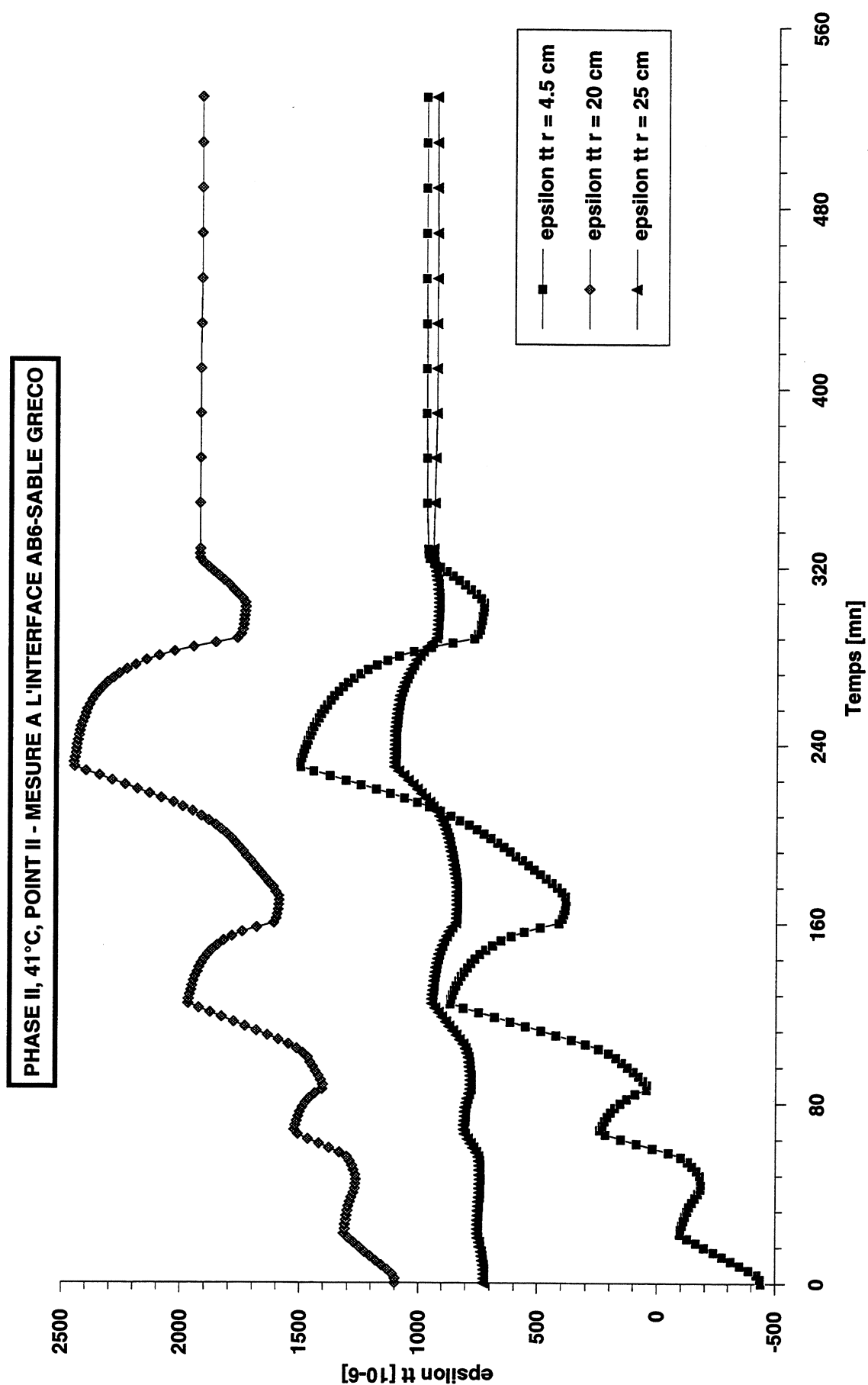
ANNEXE E4 DEFORMATION A L'INTERFACE AU POINT li, phase d'essai II, 41°C



ANNEXE E5 DEFORMATION ET TEMPERATURE AU POINT I, phase d'essai II, 5°C



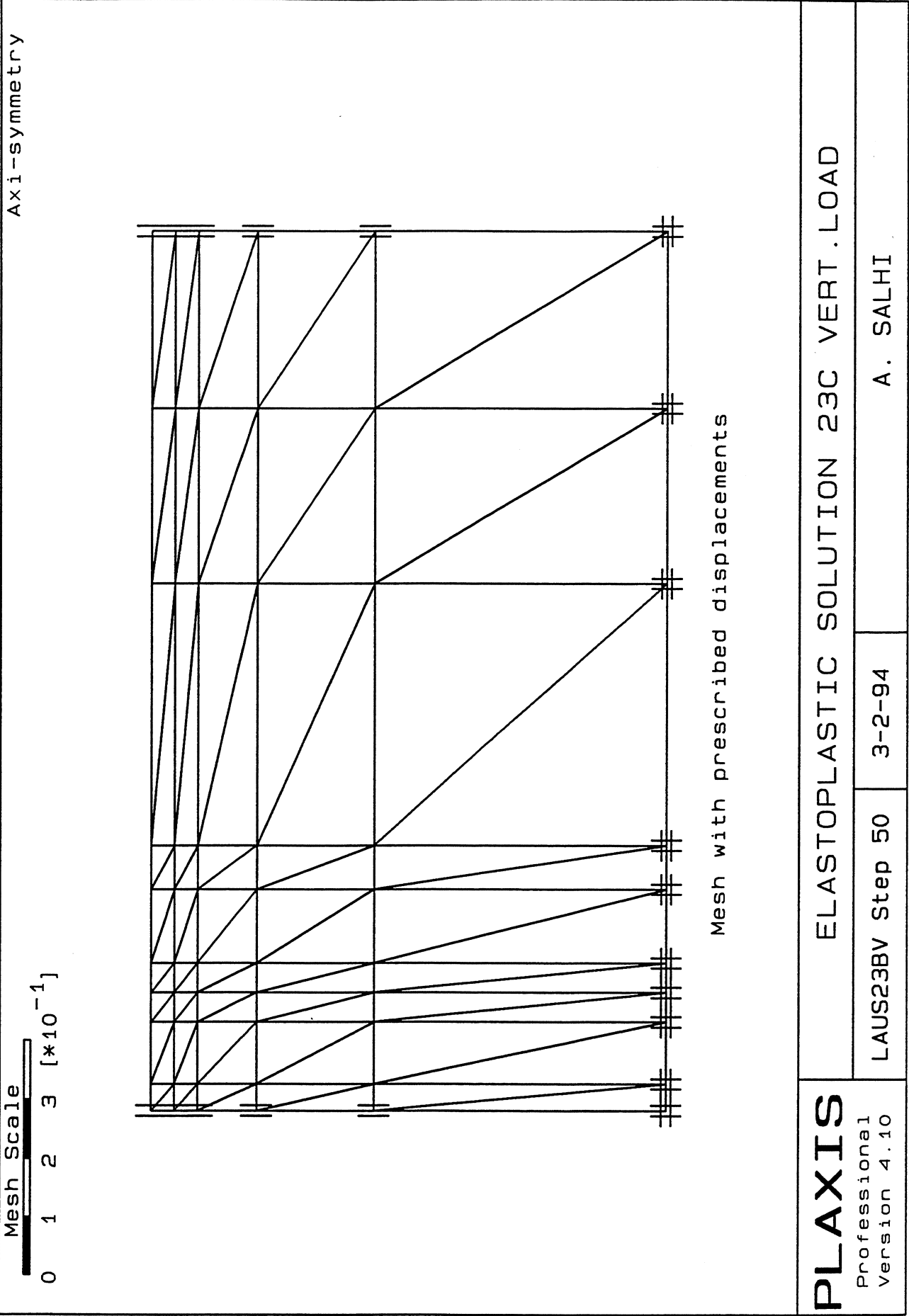
ANNEXE E6 DEFORMATION A L'INTERFACE AU POINT I, phase d'essai II, 5°C



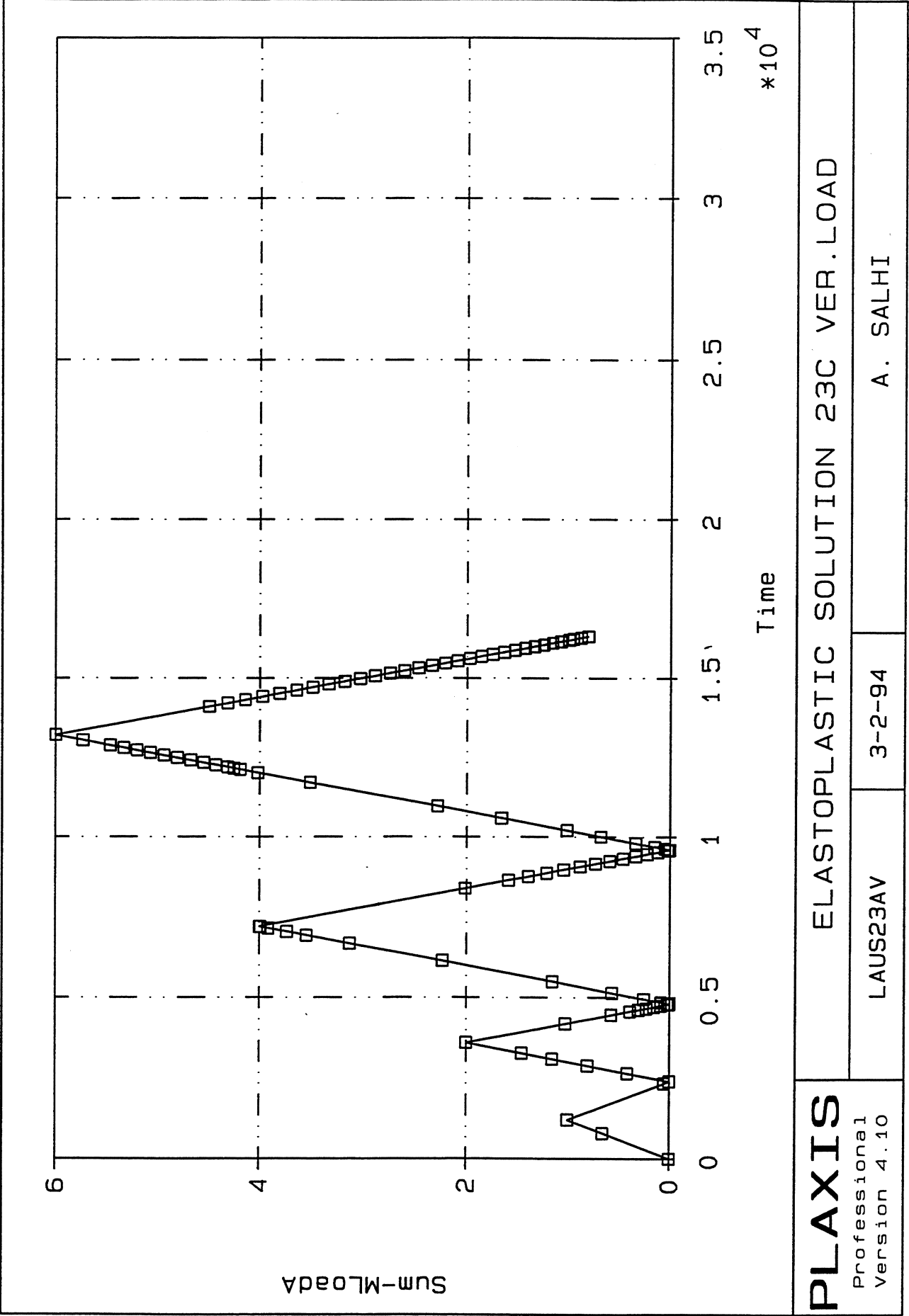
ANNEXE F. SIMULATEUR DE TRAFIC LOURD



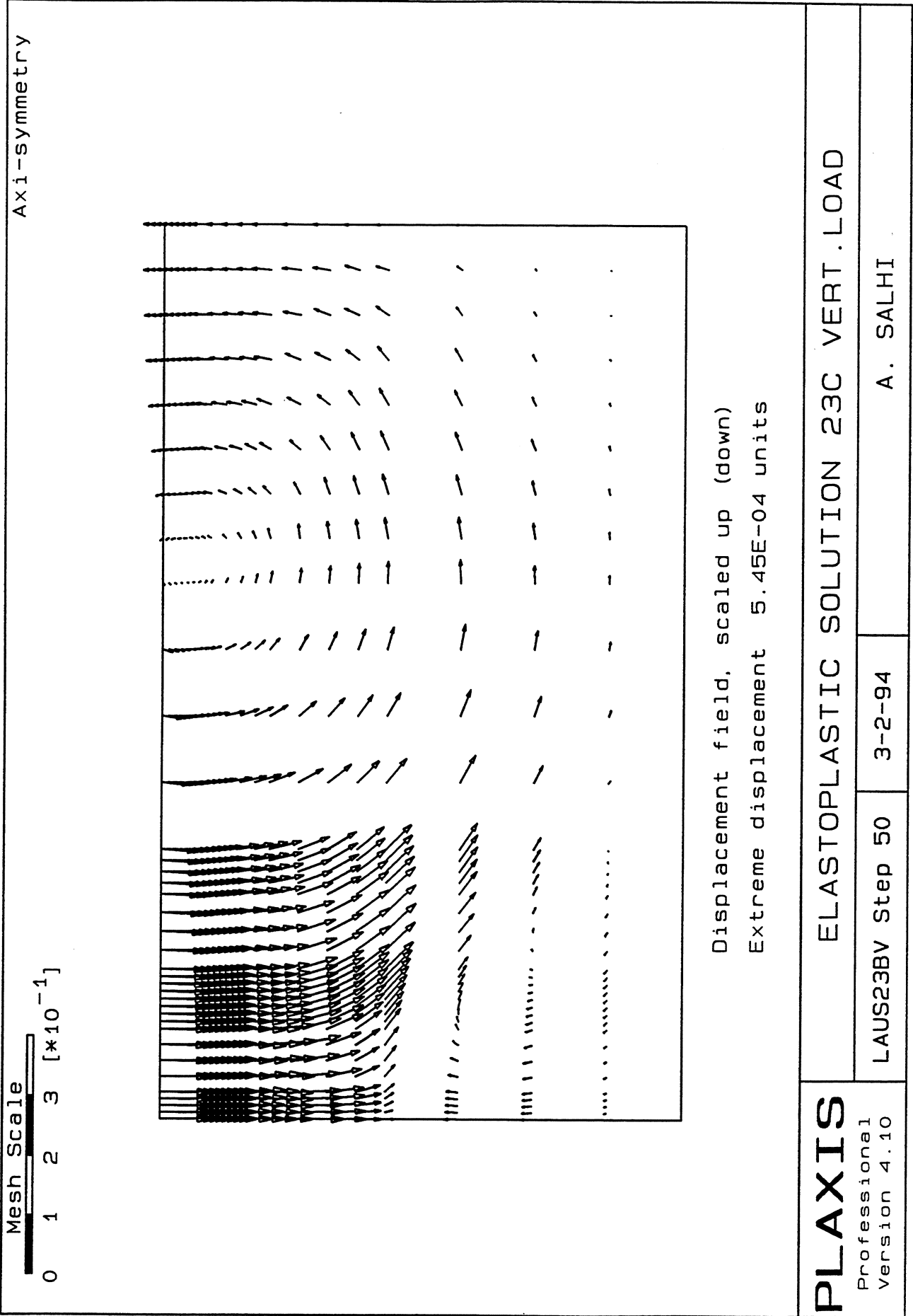
ANNEXE G1 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION (conditions de bords)



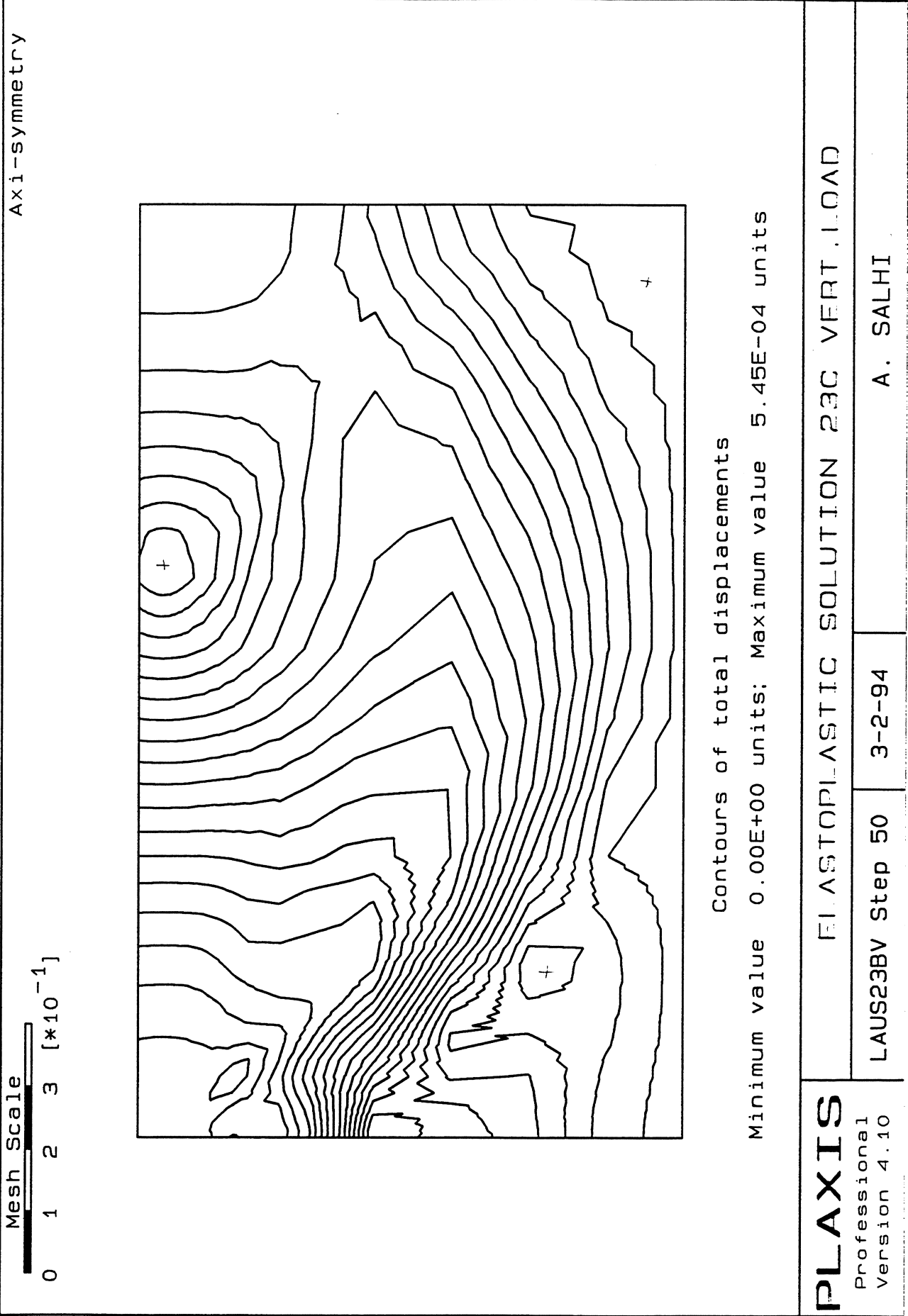
ANNEXE G2 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION (phase II, 23°C)



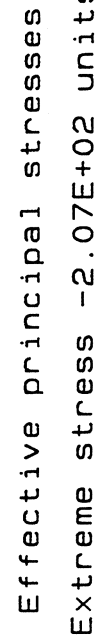
ANNEXE G3 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION (charge verticale)



ANNEXE G4 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION



Axi-symmetry



ELASTOPLASTIC SOLUTION 23C VERT. LOAD

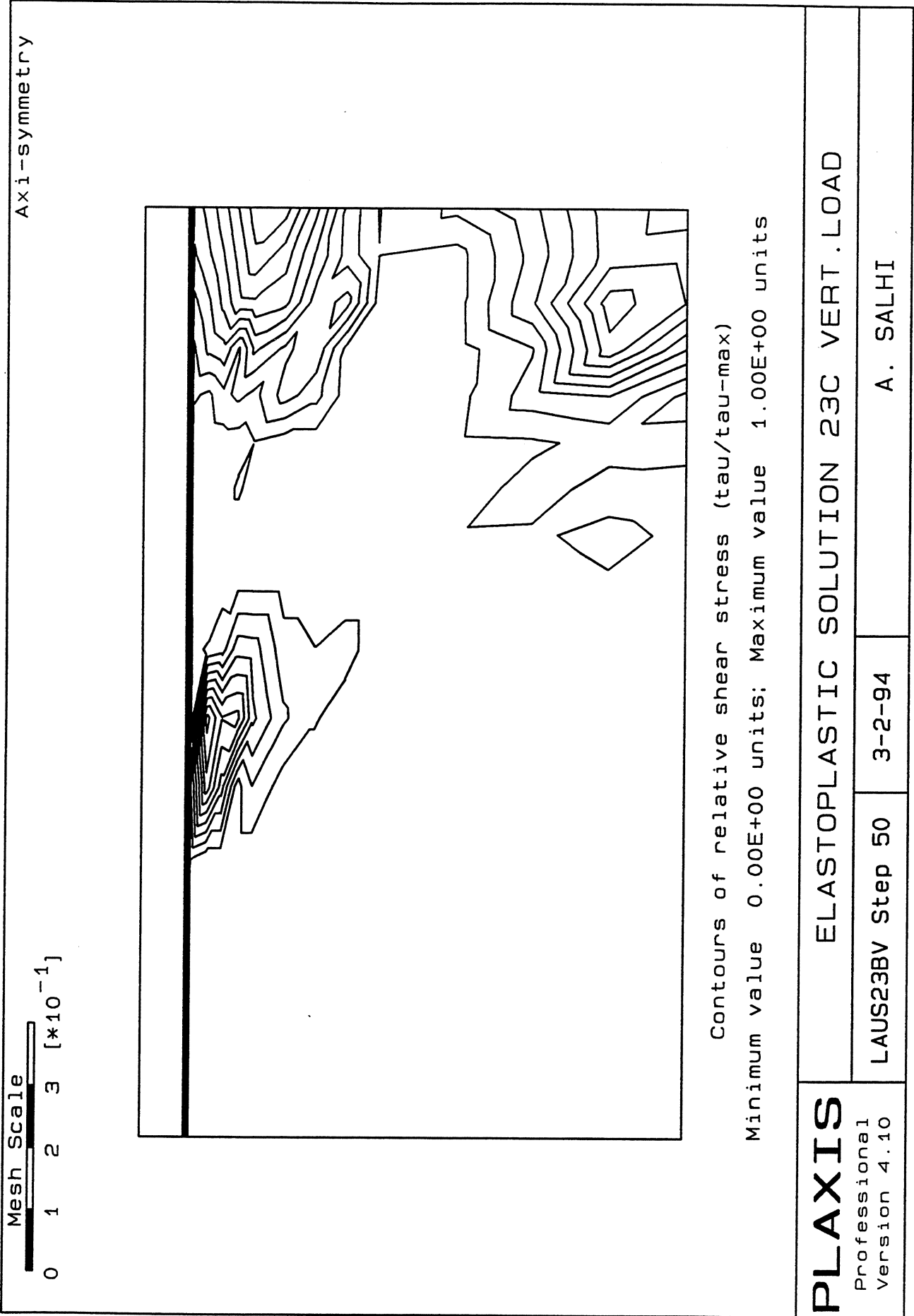
PLAXIS

Professional
Version 4.10

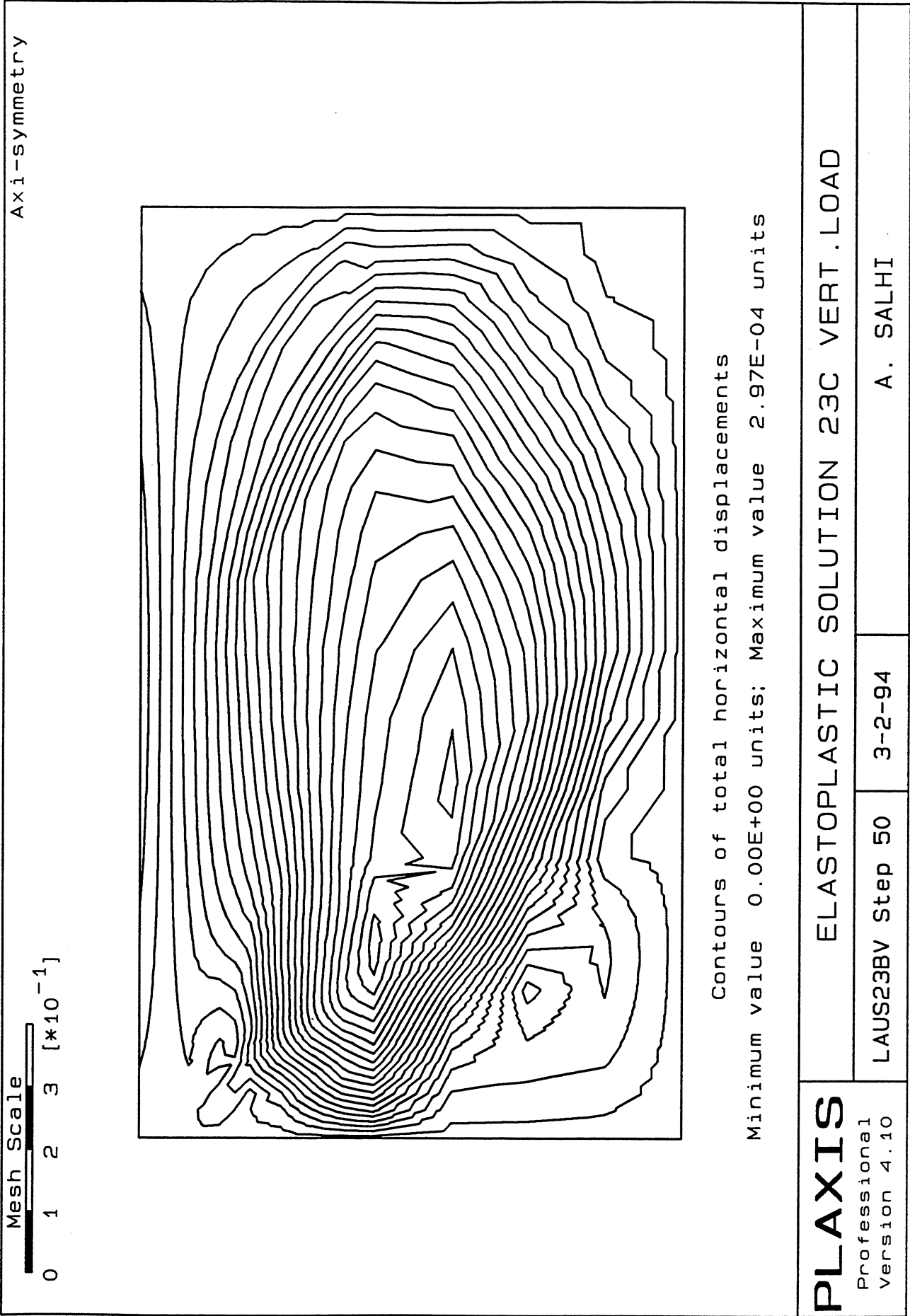
LAUS23DV Step 50 3-2-94

A. SALHI

ANNEXE G6 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION



ANNEXE G7 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION



ANNEXE G8 EXEMPLE DE RESULTATS DE LA MODELISATION

