



HAL
open science

Etude expérimentale des composantes normales des contraintes totales en laboratoire et in situ

Valentin Duca

► **To cite this version:**

Valentin Duca. Etude expérimentale des composantes normales des contraintes totales en laboratoire et in situ. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2001. Français. NNT : . tel-00005668

HAL Id: tel-00005668

<https://pastel.hal.science/tel-00005668>

Submitted on 5 Apr 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTEUR

de

L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

Spécialité : Géotechnique

par

Valentin DUCA

Sujet de thèse :

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES COMPOSANTES NORMALES
DES CONTRAINTES TOTALES EN LABORATOIRE ET IN SITU**

soutenue à Champs-sur-Marne le 19 décembre 2001

devant le jury composé de :

J.P. Magnan	Président
R. Kastner	Rapporteur
C. Plumelle	Rapporteur
D. Gouvenot	Examineur
D. Precupanu	Examineur
L. Delattre	Examineur

« La mécanique des sols fera un bond en avant
considérable à partir du moment où l'on saura
mesurer les composantes du tenseur des
contraintes au sein d'un massif »

A. Caquot et J. Kerisel (1966)

REMERCIEMENTS

Cette recherche doctorale a été réalisée au sein de la Division de Mécanique des sols et des roches et de géologie de l'ingénieur (MSRGI), Section du Comportement des Sols et Ouvrages Géotechniques (CSOG), du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Elle a bénéficié de l'apport de plusieurs unités du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) associées dans le cadre du thème de recherche Geo 35, «La mesure des efforts appliqués par les sols aux ouvrages » :

- ♦ *le Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES) de Marne-la-Vallée (LCPC-ENPC),*

la Section de Mécanique des Sols et Centrifugeuse (SMSC) du centre de Nantes du LCPC,

- ♦ *le Centre d'Expérimentation Routière (CER) de Rouen,*
- ♦ *le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Rouen.*

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, Jean-Pierre MAGNAN, pour sa confiance dans mes capacités d'achever ce travail, pour l'orientation qu'il a donnée à ma recherche, pour ses encouragements et pour l'aide qu'il y a apportée.

Mes remerciements vont aussi mon conseiller d'étude, Luc DELATTRE, responsable du thème de recherche GEO 35, qui a orienté et a suivi de près le travail effectué dans le stage doctoral.

Je remercie les rapporteurs de ce mémoire de thèse, Richard KASTNER, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Claude PLUMELLE, professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers, pour la qualification de mon travail.

Mes remerciements s'étendent aussi aux examinateurs, Daniel GOUVENOT, professeur à l'École Centrale de Paris et Dan PRECUPANU, professeur à l'Université Technique de IASI, pour l'évaluation de ma soutenance de thèse.

Je n'oublierai pas que ce travail n'aurait pas été possible sans la collaboration et l'aide de nombreuses personnes. Qu'ils comptent sur ma reconnaissance.

Résumé

La pertinence de la mesure des composantes normales des contraintes totales dans les sols a été étudiée en approfondissant deux volets :

- ♦ l'évaluation en laboratoire de plusieurs types de capteurs de pressions totales soumis à des sollicitations contrôlées en milieu hydrostatique et en milieu pulvérulent de granularité et de densité uniformes ;
- ♦ l'analyse des résultats de l'expérimentation du comportement mécanique d'une paroi moulée en vraie grandeur.

Le premier volet est axé sur l'analyse de la réponse des capteurs ayant une surface active de raideur très élevée pour deux situations de mesure (à l'intérieur et à l'interface d'un sable de Fontainebleau) reproduites dans deux moyens d'expérimentation sur modèle géotechnique réduit : centrifugeuse et chambre triaxiale de grandes dimensions. Les résultats expérimentaux obtenus en centrifugeuse se sont révélés pertinents tandis que ceux obtenus en chambre triaxiale n'ont pas pu être évalués de façon concluante.

Le deuxième volet s'intéresse à l'expérimentation d'un soutènement en paroi moulée (mesures de pressions totales, mesures inclinométriques, déformations des butons, etc.) pour trois étapes significatives de sa vie (1 - bétonnage ; 2 - durcissement du béton ; 3 - mise en flexion de la paroi lors des phases d'excavation et pour l'ouvrage en service). Les mesures des pressions totales ont été cohérentes par rapport aux résultats expérimentaux fournis par les autres moyens d'instrumentation, considérés en général comme plus fiables.

Abstract

The relevance of the measurements of normal stresses in soils was studied from two stand-points :

- ♦ by testing several earth pressure cells subjected to controlled actions in hydrostatic and in granular media ;
- ♦ by analysing the experimental behaviour of a cast in place wall.

The first subject is focused on the analysis of the response of very stiff earth pressure cells for two cell locations (inside a Fontainebleau sand sample and on the contact surface of the sand and a steel wall), which were reproduced in two geotechnical facilities for physical modelling : a centrifuge and a large triaxial chamber. The experimental results obtained in the centrifuge were pertinent while those obtained in the triaxial chamber could not be evaluated in a conclusive way.

The second part of this work deals with the experimentation of a retaining wall (total earth pressure measurements, inclination measurements, strain in the struts, etc.) for three significant stages of its life (1 – concreting ; 2 – hardening of the concrete ; 3 - bending of the wall for excavation stages and in service). The total earth pressure measurements were found to be consistent with regard to the experimental results supplied by the other means of instrumentation, generally considered as more reliable.

Introduction générale

L'analyse expérimentale des champs de contraintes dans les sols présente une grande importance pour les recherches actuelles sur le fonctionnement mécanique des ouvrages géotechniques. Les résultats expérimentaux permettent d'alimenter les bases de données nécessaires pour le développement des méthodes de prévision théorique du comportement mécanique des ouvrages ; par ailleurs, ils permettent la validation et le développement des analyses expérimentales sur modèles réduits.

L'analyse théorique des champs de contraintes dans les sols fait appel aux méthodes de la mécanique des milieux déformables. Pour sa part, l'analyse expérimentale des contraintes dans les sols fait appel à deux catégories d'instruments de mesure adaptés aux besoins d'une mesure au sein des massifs de sols :

- ♦ les capteurs de pression interstitielle (piézomètres) ;
- ♦ les capteurs des contraintes totales.

En associant ces deux types de capteurs pour une même situation de mesure, on a accès aux contraintes effectives. À l'heure actuelle, la mesure de la pression interstitielle dispose de moyens capables de fournir des données précises tandis que « la mesure des pressions totales est en général considérée comme peu fiable »¹.

Cette thèse a été préparée dans le cadre d'un programme de recherche thématique du réseau des laboratoires des ponts et chaussées (LPC) qui vise à améliorer les performances de la mesure des contraintes totales pour différentes situations au sein d'un massif de sol ainsi qu'à l'interface sol - structure. Ce programme de recherche comportait trois axes principaux :

- ♦ le développement de moyens de mesure performants ;

¹ Magnan, 97-98, p. 2.14.

- ◆ le perfectionnement des procédures de mesure, notamment pour l'étalonnage des capteurs et leur mise en place ;
- ◆ l'amélioration de l'interprétation des résultats pour différentes situations de mesure.

Dans ce contexte général, notre recherche approfondit les volets suivants :

- ◆ évaluation en laboratoire de plusieurs types de capteurs de contraintes totales normales, soumis à des sollicitations contrôlées ;
 - ◆ étude de la pertinence des mesures de pressions totales à l'interface du sol et d'une paroi moulée en vraie grandeur.
- Le premier chapitre de ce mémoire rassemble les résultats des études consacrées à la pertinence des mesures de contraintes totales normales. On s'intéresse en particulier aux types de capteurs, à leurs caractéristiques spécifiques, à leurs conditions d'installation et à la qualification des résultats expérimentaux. Une attention particulière est apportée à la mise en évidence des facteurs qui affectent la fiabilité de la mesure et aux recommandations issues des recherches antérieures visant l'amélioration des performances de la mesure des contraintes totales normales.

Ce premier chapitre s'intéresse aussi aux principaux types de capteurs disponibles sur le marché et à la comparaison des caractéristiques données par les fabricants avec les recommandations issues de la recherche dans le domaine de la mesure des pressions totales.

- Un deuxième chapitre à caractère bibliographique (chapitre 2) est consacré à la mesure des contraintes totales dans les expérimentations de parois moulées. Il est basé sur l'analyse des résultats fournis par un ensemble de huit expérimentations antérieures, décrites dans la littérature.

On insiste sur les caractéristiques des dispositifs de mesure des pressions totales (y compris les technologies de mise en place), sur les mesures d'accompagnement les mieux adaptées pour l'analyse de leurs performances ainsi que sur l'interprétation des résultats obtenus lors des trois étapes principales des expérimentations (bétonnage de

la paroi, durcissement du béton dans la paroi et application à l'ouvrage de sollicitations de flexion). Cette étude vise à assimiler l'expérience antérieure en vue d'une nouvelle instrumentation similaire et propose, par ailleurs, une méthode de sélection des dispositifs de mesure des pressions totales potentiellement utilisables pour les mesures aux interfaces du sol et d'une paroi moulée.

Dans son ensemble, ce deuxième chapitre bibliographique se propose de fournir une image représentative de l'état des connaissances dans un domaine de recherche particulièrement étroit, la mesure des pressions totales appliquées par les sols sur les parois moulées.

- Le troisième chapitre de cette thèse concerne la qualification de la réponse de plusieurs types de capteurs de pressions totales en laboratoire : capteurs prototypes développés au Centre d'Étude et de Construction de Prototypes d'Angers (CECP), capteurs sélectionnés sur le marché pour l'instrumentation d'une paroi moulée (« Kyowa » et « Slope Indicator ») et capteurs de référence disponibles dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC, capteurs « Kyowa » et capteurs de l'Université de Brunel, Royaume Uni).

Les capteurs prototypes du CECP d'Angers ont été conçus compte tenu du potentiel des technologies de fabrication actuelles, pour respecter les prescriptions d'un cahier des charges prédéfini. Ce dernier, présenté en préambule au chapitre 3, regroupe des exigences issues des anciennes études consacrées à la mesure des pressions totales, qui ont été rappelées dans le chapitre 1 de ce mémoire.

La qualification des capteurs a concerné, dans un premier temps, l'analyse de leur réponse en milieu fluide dans des conditions de pression et température contrôlées.

Elle a été poursuivie par l'évaluation de la réponse des capteurs pour des situations de mesure simples et privilégiées créées à l'intérieur ou à l'interface d'échantillons de sable de Fontainebleau. Les situations de mesure ont été obtenues en utilisant deux moyens d'étude expérimentale sur modèle réduit (chambre triaxiale géante et centrifugeuse). En fabricant pour l'ensemble des essais effectués dans les deux

enceintes des échantillons d'un même sable à granularité uniforme présentant toujours la même densité et en utilisant les mêmes capteurs et les mêmes méthodes de mise en place, on a pu étudier la reproductibilité des résultats expérimentaux dans les conditions de maîtrise des contraintes offertes par les deux chambres d'essais.

Le chapitre 3 synthétise les résultats de l'ensemble des expérimentations effectués en laboratoire en insistant sur les aspects suivants :

- ◆ les performances de mesure des capteurs de pressions totales en milieu fluide ;
 - ◆ la sensibilité thermique des capteurs ;
 - ◆ la discrétion des capteurs en milieu granulaire (sable de Fontainebleau) ;
 - ◆ les capacités offertes par les deux enceintes d'essai utilisées pour créer des champs de contraintes contrôlables au sein des échantillons de sable ;
 - ◆ la pertinence de la mesure des composantes normales des contraintes totales agissant à l'interface et à l'intérieur d'un échantillon de sable avec des capteurs ayant une surface active de raideur très élevée ;
 - ◆ le potentiel des technologies de fabrication actuelles pour contribuer à l'amélioration des caractéristiques des capteurs de pressions totales.
- Le dernier volet de cette recherche vise à confirmer la pertinence de la mesure des contraintes totales appliquées par les sols sur une paroi moulée en vraie grandeur.

C'est le chantier de la « Trémie Pasteur », destiné à la construction d'une nouvelle artère de circulation dans la ville de Rouen, qui a été sélectionné pour l'expérimentation. Un profil de cet ouvrage a été équipé de six capteurs de contraintes totales normales aux interfaces de son soutènement en paroi moulée avec les sols.

L'instrumentation de cet ouvrage comporte, par ailleurs, des équipements complémentaires, reconnus comme fiables, qui sont disposés pour vérifier la pertinence des mesures de pressions totales. Il s'agit de tubes inclinométriques installés dans les parois, de plots de mesure de la convergence des parois situées en vis-à-vis et

de jauges de déformations installées sur les boutons provisoires.

Ces équipements ont été installés de façon redondante, dans plusieurs profils de l'ouvrage autour de la section équipée des capteurs de pressions totales.

Le chapitre 4 décrit cette expérimentation en insistant sur la présentation des équipements de mesure, sur les techniques de mise en place, sur le phasage d'exécution de l'ouvrage et le phasage de mesure.

Il présente ensuite les résultats expérimentaux et l'analyse de leur pertinence pour trois étapes significatives de la vie de l'ouvrage : (1) bétonnage du panneau expérimental, (2) durcissement du béton et (3) mise en flexion de la paroi lors des phases des travaux de terrassement, butonnage, exécution du radier et pour l'ouvrage en service.

Les mesures de pressions totales effectuées durant le bétonnage du panneau expérimental de la paroi moulée ont été comparées à une estimation théorique des contraintes exercées par le béton sur le bord vertical de la tranchée basée sur l'utilisation d'un modèle semi-empirique bilinéaire (présenté dans le chapitre2).

Les mesures de pressions totales effectuées durant le durcissement du béton ont été comparées aux résultats des expérimentations antérieures sur les pressions totales exercées aux interfaces des parois moulées (présentées dans le chapitre2).

Quant aux mesures de pressions totales réalisées durant les différentes phases des travaux et pour l'ouvrage en service, leur pertinence a été analysée par le biais d'une étude de corrélation entre les différents paramètres de mesure enregistrés simultanément, mais aussi par rapport à une estimation théorique du comportement mécanique de l'ouvrage dans le profil instrumenté pour les situations de mesure observées réalisée à l'aide de la méthode des coefficients de réaction.

Chapitre 1 **Aperçu des techniques de mesure des pressions totales dans les sols**

1.1 Introduction

Les spécialistes de la Mécanique des sols s'intéressent aux champs de contraintes régnant dans les massifs de sols, à proximité ouvrages ou à l'interface des sols avec les structures, dans les différentes situations qu'est appelé à connaître l'ouvrage : fonctionnement en service mais également situations plus proches des états limites ultimes.

En chaque point d'un massif de sol, les contraintes sont engendrées par l'action conjointe des pressions exercées par les phases gazeuse et liquide (pression interstitielle) et des forces d'interaction intergranulaires.

Il est généralement admis d'exprimer les champs des contraintes dans les sols par rapport à la pression atmosphérique normale. Dans le cas des sols saturés, on admet aussi, qu'en point d'un massif de sol, le tenseur des contraintes totales $[\sigma]$ résulte de la superposition du tenseur isotrope de la pression interstitielle $[u]$ au tenseur des contraintes effectives $[\sigma']$. Ce dernier gouverne, pour l'essentiel, le comportement mécanique des massifs de sol.

L'apparition de l'ordinateur, en permettant la résolution automatique d'algorithmes de calcul, a permis l'application pratique des méthodes analytiques pour la prévision de l'état des contraintes dans les massifs des sols.

Ce développement a été possible grâce à l'intégration, dans des logiciels spécialisés, de méthodes numériques permettant la résolution algébrique des systèmes d'équations différentielles associant conditions d'équilibre et lois comportement (méthode des éléments finis, méthodes des éléments de frontière, méthode des éléments distincts,

etc.). On peut ainsi déterminer les champs des contraintes correspondant aux différentes situations avec un coût réduit.

Cependant, la pertinence des résultats obtenus par l'application des méthodes numériques dépend (en dehors des facteurs propres au modèle physique ou mathématique adopté) d'une description adéquate des lois de comportement du sol (milieu triphasique, hétérogène, module de déformation dépendant de l'histoire du sol). L'analyse expérimentale des champs de contraintes dans les massifs de sol reste donc une voie obligée pour l'évaluation des résultats des calculs numériques et pour l'amélioration des lois de comportement.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de dispositifs de mesure capables de mesurer directement les contraintes effectives. On utilise donc, de façon couplée, des capteurs¹ de contraintes totales et des capteurs de pression interstitielle (piézomètres). Le principe de Terzaghi permet alors la détermination des contraintes effectives.

La mesure des pressions interstitielles est facilitée par le fait que le tenseur associé est isotrope. Il suffit donc d'un seul paramètre pour décrire l'état des contraintes en un point. Par ailleurs, le piézomètre est considéré comme un instrument discret². Son inclusion à l'endroit de la mesure ne modifie pas d'une façon significative la pression à mesurer.

On dispose donc de différents types de piézomètres, ouverts pour les sols perméables ou fermés, pour les sols à faible perméabilité, qui permettent de faire des mesures fiables de la pression interstitielle.

Par opposition à la mesure des pressions interstitielles, la mesure des contraintes totales présente des difficultés majeures :

- ♦ d'une part, le tenseur représentant les contraintes totales en un point contient, en

¹ Capteur : « élément d'un appareil de mesure ou d'une chaîne de mesure qui est soumis à l'action du mesurande » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

² Discrétion : « aptitude d'un instrument de mesure à ne pas modifier le mesurande » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994) ; dans le vocabulaire courant, on utilise aussi le terme « finesse de mesure ».

général, 6 paramètres indépendants ; dans la pratique, on se contente le plus souvent de déterminer une seule composante du tenseur, une composante normale, mais il existe aussi des instruments capables de mesurer plusieurs composantes ;

- ♦ d'autre part, l'inclusion d'un capteur dans un milieu pseudo-solide ayant des caractéristiques de déformabilité différentes peut se traduire par une perturbation importante des contraintes régnant à l'endroit de mesure ; par leur principe de mesure, les capteurs de contraintes totales ne sont pas des instruments discrets.

Considérant l'intérêt que présente la connaissance des contraintes dans les sols, mais aussi les difficultés de principe d'un tel approche, l'intérêt de perfectionner les mesures des contraintes totales apparaît donc comme évident.

Cette étude bibliographique est consacrée à la mesure des composantes normales des contraintes totales³ dans les sols. Elle a pour but de fournir une image représentative de l'état de connaissance actuelle dans ce domaine. On s'intéresse aux différents types de capteurs, aux facteurs qui affectent l'exactitude de mesure⁴ et aux recommandations permettant son amélioration.

1.2 Principe de la mesure des pressions totales

1.2.1 Généralités

Les méthodes expérimentales d'analyse des contraintes propres à la mécanique des milieux déformables ne sont pas adaptées pour l'analyse des contraintes dans les sols pour différentes raisons :

- ♦ les méthodes extensométriques sont techniquement incompatibles pour une utilisation dans un milieu discontinu (les sols) et, de plus, l'accès aux contraintes

³ Ou, compte tenu du type de capteur utilisé et par abus de langage, la mesure des pressions totales.

⁴ Exactitude de mesure : « étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

est conditionné par la connaissance précise des lois des comportement des sols ;

- ♦ les méthodes analogiques ou la photoélasticité, permettant l'accès à une image globale du champ des contraintes sur le domaine étudié, ne sont pas applicables car le respect des conditions de similitude est difficile.

L'hétérogénéité intrinsèque des propriétés physiques et mécaniques des sols, à l'échelle des particules, même pour les situations où l'on procède à leur homogénéisation, conduit au développement de champs de contraintes hétérogènes dans les massifs des sols, y compris dans les situations les plus simples où l'on attend, théoriquement, des distributions régulières (uniforme, linéaire, etc.).

La mécanique des sols s'intéresse en fait à la valeur moyenne des contraintes caractérisant les interactions entre un nombre important de grains qui se trouvent dans une même situation. On admet que cette valeur moyenne $\sigma_m(s)$ devient représentative pour la situation considérée quand elle est obtenue sur une surface $S(D)$ dont le diamètre équivalent D est suffisamment grand par rapport à la taille caractéristique des particules (d_{60} sur la courbe granulométrique) :

$$\sigma_m(s) = \frac{\int \sigma_i^{réel}(s) dS_i}{S(D)} \rightarrow \sigma^{réel}(s) \quad , \quad \text{quand} \quad D \gg d_{60} \quad (1.1)$$

Cette question est illustrée par la figure 1-1/a qui présente le problème de la mesure de la contrainte verticale totale $\sigma_z^{réel}(z)$ régnant à la profondeur z .

En référence aux modèles dont on dispose pour l'estimation des contraintes géostatiques, la mesure vise à estimer la valeur moyenne des contraintes verticales agissant à la profondeur considérée sur une surface suffisamment importante par rapport à la taille des grains.

Pour cette raison, dans l'analyse expérimentale des contraintes normales dans les sols, le mesurand⁵ est représenté par la valeur moyenne des contraintes totales normales

⁵Mesurande : « grandeur particulière soumise au mesurage » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

agissant sur une surface grande par rapport à la taille des particules et non par la valeur de la contrainte totale agissant en un point ou sur une surface du même ordre de grandeur que la taille des particules.

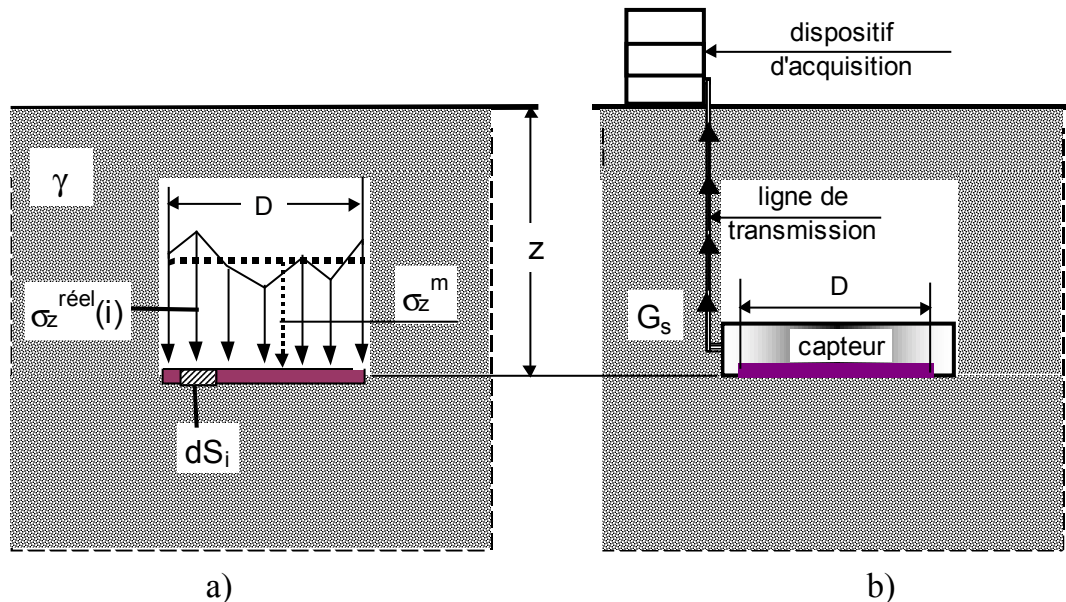


Fig. 1-1 : Exemple de mesure des pressions totales : contraintes géostatiques.

a) Mesurande ; b) Schéma d'une chaîne de mesure des contraintes totales.

1.2.2 Description d'une chaîne de mesure des pressions totales

En général, la mesure des pressions totales fait appel à une chaîne (Fig. 1-1b) comportant un capteur⁶ de pressions totales, une ligne de transmission et un dispositif d'acquisition.

Le capteur est installé à l'endroit de la mesure avec sa ou ses surfaces sensibles dans un plan perpendiculaire à la direction du mesurande. Il délivre une grandeur de sortie G_s , qui se trouve en relation biunivoque et simple avec le mesurande et qui est transmise à distance vers le dispositif d'acquisition par la ligne de transmission.

⁶ Capteur : « élément d'une chaîne de mesure qui est directement soumis à l'action du mesurande » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

1.2.2.1 Capteur de pressions totales

Les capteurs de pressions totales sont des capteurs de pression de fluide adaptés pour la mesure dans les sols. Ils sont constitués en général par un boîtier métallique en forme de disque ou de parallélépipède plat dont la (les) base(s) est la (sont les) surface(s) sensible(s). La dimension caractéristique (diamètre, côté) de leur surface sensible doit être suffisamment importante par rapport au diamètre représentatif des particules (Fig. 1-1/b) et varie donc de quelques centimètres à quelques décimètres. Leurs composantes principales sont le corps d'épreuve et le transducteur.

a) Corps d'épreuve

Il n'existe pas de capteur capable de mesurer directement les contraintes à l'aide d'un simple transducteur⁷.

En pratique, on détermine l'effet causé par l'action des contraintes sur la face active (ou les faces actives) d'un capteur. Cet effet peut être soit la déformation, ou le déplacement d'un corps d'épreuve, soit la contre-pression qu'on doit lui appliquer pour le remettre en position non déformée.

Le corps d'épreuve transforme la pression transmise par le sol à la surface sensible du capteur (mesurande primaire) en une grandeur physique «mesurable» (déformation, déplacement, variation de pression d'un fluide incompressible, etc.) qui constitue le mesurande secondaire.

Le dimensionnement du corps d'épreuve est tel qu'il lui assure, au moins pour l'entière étendue de mesure⁸ du capteur, une loi de variation linéaire-réversible entre le mesurande primaire et la grandeur physique mesurable.

⁷ Transducteur : « dispositif qui fait correspondre à une grandeur d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994)

⁸ Étendue de mesure : « ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée comprise entre des limites données » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994)

b) Transducteurs

Le transducteur (détecteur) est installé solidairement au corps d'épreuve. Il transforme la grandeur mesurable du corps d'épreuve (déformation, déplacement, pression du liquide incompressible), qui se trouve en relation linéaire avec la pression agissant sur la surface active du capteur, en une autre grandeur physique (grandeur de sortie, G_s) qui est transmise en surface vers le dispositif d'acquisition. La loi de transformation est bijective et, si possible, linéaire.

Pour son fonctionnement, le transducteur peut avoir besoin d'un conditionneur, qui assure l'alimentation nécessaire en énergie (systèmes de mesure passifs).

1.2.2.2 Ligne de transmission et dispositif d'acquisition

La ligne de transmission et le dispositif d'acquisition sont choisis en fonction des caractéristiques de la grandeur de sortie du capteur afin de permettre sa transmission, sa lecture et, éventuellement, son enregistrement à distance de l'endroit de mesure.

Parfois, il est nécessaire d'intercaler dans la chaîne de mesure d'autres dispositifs destinés à optimiser le traitement et l'acquisition du signal délivré par le transducteur (amplificateurs, circuits de linéarisation, filtres, convertisseurs).

L'ensemble des composantes influencent d'une façon plus ou moins importante l'exactitude de la mesure. C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque valeur de la grandeur de sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée et d'estimer la sensibilité⁹ de l'appareillage.

A l'heure actuelle, on dispose de triplets transducteur-ligne de transmission-dispositif d'acquisition utilisables pour différentes applications (y compris dans des chaînes de mesure des pressions totales) qui assurent des performances très satisfaisantes pour l'estimation du mesurande secondaire (grandeur physique mesurable) engendré sur le

⁹ Sensibilité : « quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994) ; on vise à obtenir une sensibilité définie par une loi simple (constante, si possible).

corps d'épreuve d'un capteur quelconque.

Par conséquent, cette recherche ne traite que la partie de la chaîne de mesure qui concerne le fonctionnement du capteur et, notamment les aspects liés à la transformation de la pression totale agissant à l'endroit de mesure en l'absence du capteur (mesurande primaire) en un mesurande secondaire.

1.2.3 Vice de principe de la mesure des pressions totales

Les capteurs de pressions totales sont conçus pour accéder à la valeur exacte de la pression agissant sur leur ou leurs faces actives dans l'hypothèse où l'on respecte les conditions de mesure spécifiques aux milieux fluides :

- ♦ distribution uniforme de la composante normale des contraintes appliquées sur la surface active des capteurs ;
- ♦ absence de composante tangentielle des contraintes appliquées sur la surface active des capteurs ;
- ♦ absence de perturbation du champ de contraintes autour du capteur, du fait de son installation ou même de sa présence à l'endroit de mesure.

Dans une telle situation, l'incertitude globale de mesure ne dépasse pas un seuil garanti par les fabricants comme pour tout capteur de pression de fluide ordinaire.

Lors de la conception des capteurs de pressions totales, on prend également en compte des critères et des recommandations spécifiques aux mesures dans les sols :

- ♦ forme de disque ou de parallélépipède (très) plat, tout en assurant une surface active de dimension relativement importante mais très peu déformable et une raideur élevée du capteur sous l'action des sollicitations latérales ;
- ♦ capteur de pression absolue (la mesure de la pression relative dans un massif de sol nécessite de raccorder une prise d'air au capteur, ce qui est difficile à entretenir à long terme) dont le zéro est calé à la pression atmosphérique normale (courante) ;
- ♦ insensibilité du capteur à l'action des contraintes tangentielles sur la (les) surface(s)

active(s).

Les fabricants ne garantissent cependant aucune limite pour l'incertitude de mesure des pressions dans les sols. Ce sont les laboratoires de recherche en mécanique des sols, disposant de moyens d'essai capables de transmettre à des échantillons de sol des champs de contraintes contrôlables, qui se préoccupent de la qualification des performances de mesure de tels capteurs.

Cette conception des capteurs présente un vice de principe : la présence du capteur à l'endroit de mesure conduit à une perturbation du mesurande. Le capteur de pressions totales est ainsi un instrument indiscret.

Ce phénomène de perturbation de l'état de contraintes est spécifique à l'interaction d'un corps solide installé dans un milieu présentant des caractéristiques de déformabilité différentes.

L'interaction entre le sol et un capteur à membrane déformable qui concourt à la perturbation du mesurande est plus complexe que celle qui intervient dans le cas d'une inclusion solide dans un milieu élastique.

L'analyse expérimentale des contraintes dans les milieux solides caractérisés par des lois de comportement connues est fondée dans la plupart des cas sur l'utilisation des méthodes extensométriques, qui donnent accès aux contraintes d'une façon indirecte.

Dans le cas des sols, l'utilisation de capteurs de pression de fluide à membrane dans l'analyse expérimentale des contraintes totales constitue un choix obligé, mais aussi un choix judicieux :

- ♦ les mesures extensométriques ne sont pas applicables aux milieux discontinus ; elles sont insuffisantes lorsque la loi de comportement du milieu est insuffisamment bien connue ;
- ♦ on ne dispose pas d'autres dispositifs plus performants pour la mesure des pressions totales dans les sols ;
- ♦ la perturbation de l'état des contraintes par la présence du capteur est supposée

moins significative dans les massifs des sols que dans les milieux continus ; l'aspect discontinu de la structure des sols favorise les déformations différentielles libres et permet de limiter l'ampleur de cette perturbation ;

- ♦ pour obtenir des résultats quantitativement représentatifs, l'analyse expérimentale des contraintes dans les sols nécessite une base de mesure de l'élément sensible suffisamment importante par rapport à la taille des particules.

L'hétérogénéité des caractéristiques des sols, associée aux conditions particulières de l'interaction sol-capteur (respiration sous chargement du capteur à surface sensible déformable, conditions de contact et de frottement sol-capteur), rendent très difficile la dissociation des différents phénomènes qui déterminent la perturbation des contraintes autour du capteur. On propose toutefois de distinguer deux causes majeures qui y interviennent :

- ♦ effet de l'inclusion du capteur dans un milieu ayant des propriétés de déformabilité différentes ;
- ♦ effet de l'interaction entre le sol et la membrane déformable du capteur.

Ces phénomènes, qui parasitent d'une façon systématique toute mesure de pressions totales avec un capteur à membrane déformable installé dans un massif de sol, sont décrits dans le chapitre 1.4.1.

Les études antérieures sur les performances de la mesure des pressions totales s'efforcent d'identifier les paramètres qui influencent l'ampleur de la manifestation de ces phénomènes (présentés dans le chapitre 1.4.2) et de proposer des recommandations et des critères de conception des capteurs destinés à limiter leur effet.

1.3 Classification des capteurs de pressions totales

Cette section présente plusieurs critères de classification de capteurs des pressions totales. Ces critères concernent les objectifs de la mesure mais aussi les caractéristiques physiques spécifiques des capteurs.

1.3.1 Classification par rapport aux objectifs de la mesure

1.3.1.1 Position du capteur par rapport au massif de sol

Une première classification concerne la position du capteur par rapport au massif. On distingue :

- ♦ les capteurs de mesure au sein d'un massif de sol (dans le corps des remblais, par exemple) ;
- ♦ les capteurs de mesure à l'interface d'un massif de sol avec une structure (murs de soutènement, structures enterrées, fondations superficielles ou profondes, etc.).

Même si souvent un même type de capteur pour être utilisé tant pour les mesures au sein d'un sol que pour les mesures à l'interface sol - structure, les deux catégories de mesure nécessitent a priori des capteurs spécialisés ainsi que des procédures particulières de mise en place et d'interprétation des résultats de mesure.

1.3.1.2 Composantes mesurées du tenseur des contraintes

Une autre classification peut être faite en fonction des composantes des contraintes agissant sur la face active du capteur qui font l'objet de mesures :

- ♦ capteurs de contraintes totales normales (Taylor, 1948 ; Plantema, 1953 ; Thomas et Ward, 1969 ; Levillain, 1973 ; Prager, 1974 ; Brown, 1974 ; Memier, 1980 ; etc.), pour lesquels seules les composantes normales sont mesurées ;
- ♦ capteurs de contraintes totales normales et tangentiels (Arthur et Roscoe, 1961 ; Agarwal et Venkatesan, 1965 ; Erdemgil, 1979 ; Bauer et al. 1979 ; Johnson et al. 1983 ; etc.) pour lesquels les composantes normales et tangentiels sont mesurées.

La mesure des composantes tangentiels seules n'a, pour sa part, semble-t-il pas fait l'objet de développement particulier.

1.3.1.3 Fréquence de mesure

Les actions qui déterminent l'état de contrainte à mesurer peuvent aussi bien être

statiques (poids propre, poussée de terre, etc.) que dynamiques (effets des séismes, charges de circulation sur les routes, forces transmises au moment du décollage ou de l'atterrissage sur les pistes des aéroports, vibrations transmises par des fondations d'engins, forces d'impact des missiles dans les massifs protégeant les structures souterraines, etc).

À ces deux types d'actions correspondent des capteurs spécifiques (Fig. 1-3 à 1-7 et Fig. 1-9 pour la mesure des contraintes engendrées par les actions statiques ; Fig. 1-10 pour la mesure des contraintes engendrées par les actions dynamiques).

Certains capteurs sont cependant adaptés à des conditions mixtes statiques et dynamiques (Fig. 1-8, Fig. 1-11).

1.3.1.4 Technologie d'instrumentation

La technologie d'instrumentation peut être, elle-même, un critère de classification :

- ♦ capteurs posés durant la construction de l'ouvrage, au moment où l'avancement des travaux le permet ;
- ♦ capteurs installés après la construction complète de l'ouvrage, au moment où l'on veut effectuer les mesures.

Cette dernière technique, qui nécessite la réalisation d'un forage et fait appel à un équipement porteur spécial permettant l'installation du capteur après qu'il ait été descendu dans le forage¹⁰, présente l'avantage d'une indépendance totale par rapport à la technologie de mise en œuvre de l'ouvrage. Elle conduit toutefois à un sur-enregistrement systématique de la pression mesurée du fait de la mise en butée du sol par le capteur lors de sa mise en place et, par conséquent, elle est peu répandue.

On préfère la mise en place des capteurs durant la construction de l'ouvrage pour s'assurer d'une installation convenable.

¹⁰ Watts et Charles (1988)

1.3.2 Classification des capteurs par rapport à leurs caractéristiques propres

1.3.2.1 Source d'énergie

Les capteurs sont répartis en deux classes en fonction de la source d'énergie à laquelle il est fait appel pour leur fonctionnement :

- ♦ capteurs actifs (capteurs fonctionnant comme générateurs d'énergie) ; ils transforment l'énergie mécanique propre au mesurande (le travail élastique effectué par les pressions appliquées sur la surface active du capteur) en une énergie électrique ;
- ♦ capteurs passifs (capteurs fonctionnant comme impédance dans un circuit alimenté en énergie) ; ils utilisent une source d'énergie propre à chaque capteur pour déterminer un paramètre de l'impédance (résistivité, perméabilité magnétique) qui est sensible au mesurande.

En général, les capteurs de pressions totales font partie de la deuxième catégorie. Ils nécessitent donc une alimentation convenable en énergie pour leur fonctionnement.

Les capteurs à effet piézo-électrique sont les seuls capteurs de pressions actifs. De tels capteurs peuvent trouver leur application pour des mesures de courte durée en régime dynamique (l'intensité de l'effet piézo-électrique est affectée à long terme sous l'action des pressions en régime statique).

1.3.2.2 Mode d'action du mesurande sur le corps d'épreuve

Le corps d'épreuve peut soit constituer lui-même la surface active du capteur, soit recevoir l'action du mesurande par un système de transmission intermédiaire.

Ainsi, une classification des capteurs peut se faire en fonction du mode d'action du mesurande sur le corps d'épreuve :

- ♦ capteurs à action directe (la face active constitue en même temps le corps d'épreuve) ;

- ♦ capteurs à action indirecte (le corps d'épreuve est séparé de la face active par un volume de liquide incompressible).

La figure 1-2 présente la composition de principe des capteurs de pressions totales à membrane pour les cas d'une action directe et d'une action indirecte du mesurande sur le corps d'épreuve.

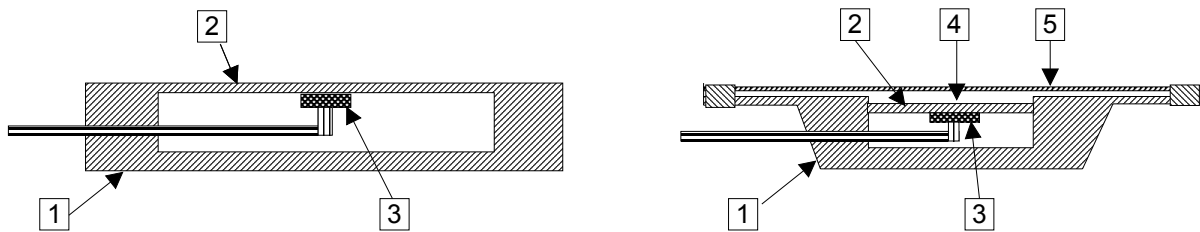


Fig. 1-2 : Schémas de principe des capteurs de pressions totales à membrane.

a) Capteur à action directe ; b) Capteur à action indirecte.

Légende : 1) Boîtier ; 2) Corps d'épreuve ; 3) Transducteur ; 4) Espace rempli de liquide incompressible ; 5) Membrane de transmission de la pression de sol.

1.3.2.3 Nature de la surface sensible (active) du capteur

La nature de la surface sensible des capteurs de pressions totales constitue un autre critère de classification. On distingue ainsi trois types de capteurs :

- ♦ capteurs à membrane (diaphragme) ;
- ♦ capteurs à piston ;
- ♦ capteurs à ruban de friction.

Les trois types de capteurs font appel à des corps d'épreuve spécifiques ; ils sont décrits sommairement ci-après.

a) Capteurs à membrane

Les capteurs à membrane déformable sont les plus couramment utilisés pour la mesure des pressions totales. Ils sont constitués par un boîtier en forme de disque plat et ils peuvent avoir une ou deux surfaces sensibles qui viennent en contact avec le sol.

La surface sensible peut soit constituer elle-même le corps d'épreuve du capteur soit transmettre la pression appliquée par le sol vers un corps d'épreuve situé à l'intérieur ou à l'extérieur du boîtier. Le corps d'épreuve est un diaphragme déformable, encastré sur son pourtour, sollicité en flexion par l'action du sol sur la surface active du capteur.

On fait appel à un transducteur adéquat pour instrumenter la face du corps d'épreuve opposée à celle sur laquelle s'applique la pression transmise par le sol. Ce transducteur permet de transformer les déformations ou les déplacements du corps d'épreuve, proportionnels à la pression appliquée sur la surface sensible du capteur, en une grandeur de sortie transmissible à distance vers un dispositif d'acquisition.

b) Capteurs à piston

Ces capteurs présentent comme élément sensible un piston rigide. Celui-ci transmet la résultante des pressions appliquées par les sols à un corps d'épreuve intérieur (capteurs à action indirecte) instrumenté. En général, le corps d'épreuve est constitué par des ressorts ou des tiges déformables soumis à une sollicitation de compression.

Un transducteur adéquat permet la transformation des déformations ou des déplacements du corps d'épreuve en une grandeur physique transmissible à distance vers un dispositif d'acquisition.

Les capteurs à piston rigide présentent certains inconvénients spécifiques :

- ◆ le volume des capteurs est important et la perturbation du champ de contraintes à mesurer, du fait de l'inclusion du capteur au sein du massif, est grande ;
- ◆ le champ des déplacements du sol au voisinage du piston présente une discontinuité sur la circonférence de celui-ci, ce qui entraîne une perturbation du mesurande plus importante que pour un capteur à membrane de même déflexion moyenne de la surface active (report des contraintes sur le corps rigide du capteur accompagné d'une diminution des contraintes agissant sur sa surface sensible) ;

Du fait de ces inconvénients, les capteurs à piston rigide ne sont plus guère utilisés pour des mesures au sein d'un massif et de moins en moins utilisés comme capteurs à

l'interface des ouvrages. Par conséquent, ils ne font pas l'objet d'une attention particulière dans cette étude.

c) Capteurs à rubans de friction

Les capteurs à rubans de friction (Fig. 1-3) utilisent comme éléments sensibles deux lames en acier qui transmettent la pression appliquée par le sol à une lame en acier intermédiaire constituant le corps d'épreuve (capteurs à action indirecte). Un dynamomètre est utilisé comme transducteur de la force nécessaire à appliquer activement pour faire glisser la lame intermédiaire.

1.3.2.4 Nature de l'équilibre du corps d'épreuve au moment de la mesure

La nature de l'équilibre du corps d'épreuve au moment de la mesure constitue un critère de classification des capteurs. On distingue :

- ♦ les capteurs à corps d'épreuve déformable (élastique) : on mesure dans une position d'équilibre stable les déformations ou les déplacements élastiques du corps d'épreuve engendrés par l'action du mesurande (Fig. 1-6 à 1-12) ;
- ♦ les capteurs à corps d'épreuve « commutateur » on mesure la contre-force ou la contre-pression que l'on applique pour amener le corps d'épreuve dans une position d'équilibre instable (Fig. 1-3 à 1-5).

Les capteurs de la première catégorie ont comme corps d'épreuve une membrane encastrée dans le boîtier du capteur. Pour les capteurs de la deuxième catégorie, la membrane joue le rôle d'un commutateur permettant d'annoncer par différentes voies (électrique, hydraulique, etc.) le moment où la contre-pression appliquée devient égale à la pression hydraulique transmise à l'intérieur du capteur par le mesurande. La valeur mesurée de cette contre-pression permet alors d'accéder au mesurande.

1.3.2.5 Position du corps d'épreuve et du transducteur par rapport au boîtier

On distingue deux types de capteurs en fonction de la position du transducteur par rapport au boîtier :

- ♦ les capteurs à corps d'épreuve et transducteurs intérieurs (disposition constructive courante qui assure la meilleure protection des composantes de mesure et un encombrement total réduit) ;
- ♦ les capteurs à corps d'épreuve intérieur et transducteur extérieur (disposition constructive utilisable pour les mesures d'interface dans le cas de transducteurs encombrants) ;
- ♦ les capteurs à corps d'épreuve et transducteur extérieurs (disposition constructive permettant de diminuer au maximum l'épaisseur du boîtier).

1.3.2.6 Type du transducteur

Un dernier critère de classification retenu dans cette étude est constitué par la nature de la grandeur physique de sortie délivrée par le transducteur. On présente ci-après les principaux types de transducteurs décrits dans la littérature.

a) *Transducteur mécanique à ruban de friction*

Les capteurs sont basés sur le principe des dynamomètres (rubans) à friction : on détermine la force de traction qu'il est nécessaire d'appliquer pour faire glisser la lame intermédiaire d'un empilage de trois lames soumis à la pression du sol (Fig. 1-3).

Cette force de traction, égale à la force de frottement entre les lames, est mesurée avec un dynamomètre. Si le frottement entre les lames obéit au frottement de Coulomb, elle est proportionnelle à la force normale transmise par le sol sur la surface sensible de l'empilage (Fig. 1-3).

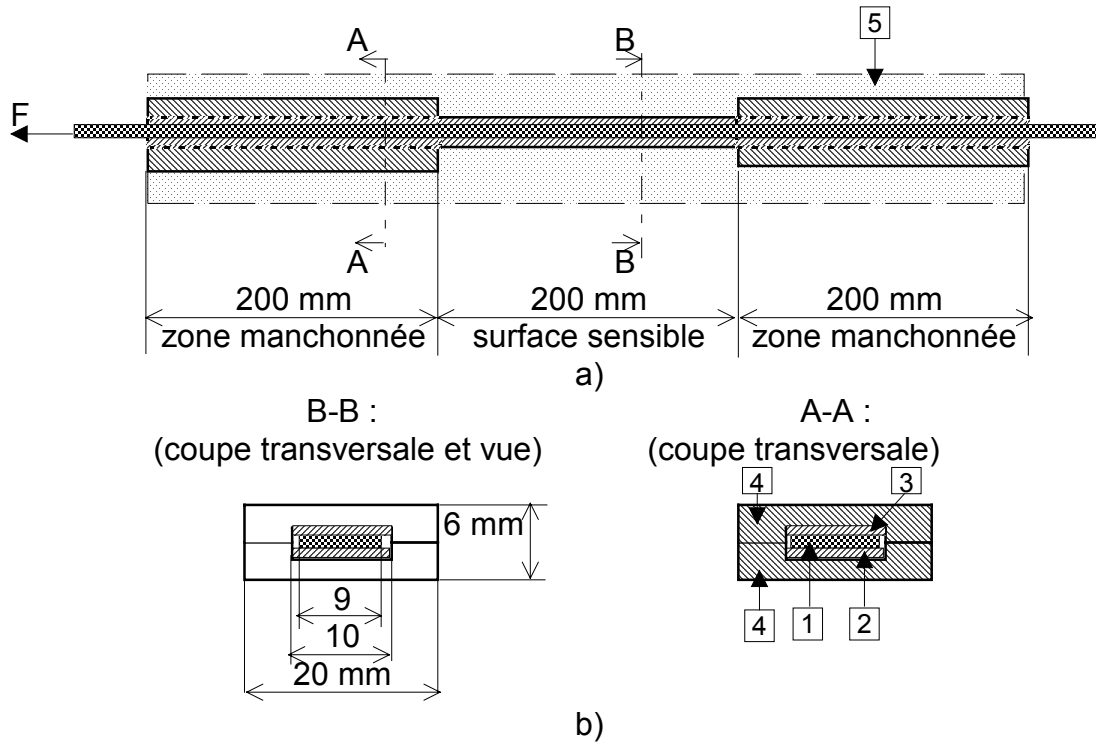


Fig. 1-3 : Dynamomètre à friction. a) Coupe longitudinale ; b) Coupes transversales ;
(Pakdaman, 1960).

Légende : 1) Lame intermédiaire (épaisseur de 0,5 mm) ; 2) Lame inférieure (ép. de 0,3 mm) ; 3) Lame supérieure (ép. de 0,3 mm) ; 4) Manchon ; 5) Massif de sol.

Deux manchons de protection qui couvrent les trois lames et empêchent la transmission de la pression du sol sont utilisés pour délimiter la surface sensible en fonction de la zone où réside l'intérêt de mesure.

Pour des raisons technologiques, l'utilisation des dynamomètres à friction est limitée à des essais en laboratoire sur des modèles réduits.

b) Transducteur hydraulique

Ce type de capteurs utilise comme élément sensible un coussin de pression composé de deux membranes (en acier) soudées sur leur pourtour. Le coussin est rempli d'un liquide incompressible (huile, mercure, etc.), qui transmet la pression exercée sur le coussin vers une chambre à parois rigides dotée d'une soupape (clapet).

On mesure la contre-pression (hydraulique) qu'il faut à appliquer au clapet par un circuit hydraulique extérieur pour l'amener dans une position d'équilibre instable et

permettre son ouverture (Fig. 1-4). Il s'agit donc d'un système à action indirecte.

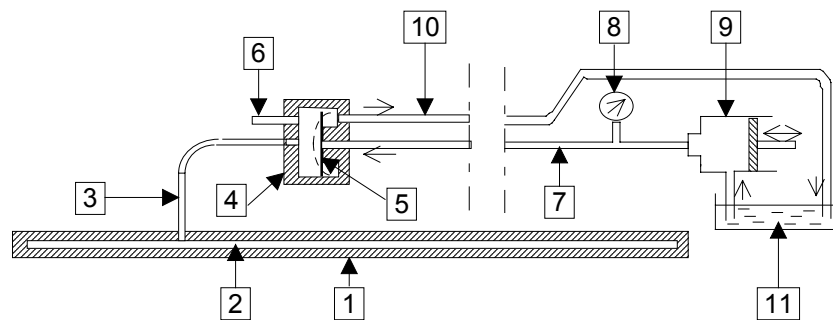


Fig. 1-4 : Schéma de la chaîne de mesure de la cellule hydraulique Glötzl (d'après Prager, 1974) ;

Légende : 1) Coussin de pression ; 2) Film d'huile ; 3) Tuyau de liaison ; 4) Soupape ; 5) Membrane (corps d'épreuve) ; 6) Tuyau de remplissage ; 7) Tuyau de mesure ; 8) Manomètre ; 9) Pompe hydraulique ; 10) Tuyau de décharge ; 11) Réservoir d'huile.

Ces capteurs, développés par la firme Glötzl, fournissent des résultats facilement exploitables et présentent une durée de vie importante pour un prix relativement faible.

Ils sont fréquemment utilisés pour des mesures à long terme sur les ouvrages en vraie grandeur qui nécessitent un suivi discontinu.

c) Transducteur pneumatique

Les cellules à système de mesures pneumatiques sont basées sur le même principe que les capteurs hydrauliques, à la différence toutefois que la contre-pression appliquée est de nature pneumatique.

Pour les deux mini-capteurs Glötzl présentés sur la figure 1-5, la membrane constituant le corps d'épreuve joue aussi le rôle de soupape. Elle empêche la sortie de gaz par le tuyau retour tant que la pression de l'air reste inférieure à la pression du sol sur la membrane. Au moment où l'on dépasse cette pression, la membrane se décolle et permet la fuite de l'air par le tuyau retour.

Pour diminuer les mouvements de la membrane en contact avec le sol, le mini-capteur Glötzl à action indirecte (Fig. 1-5b) présente une pression de précontrainte initiale dans

le liquide incompressible de 50 kPa.

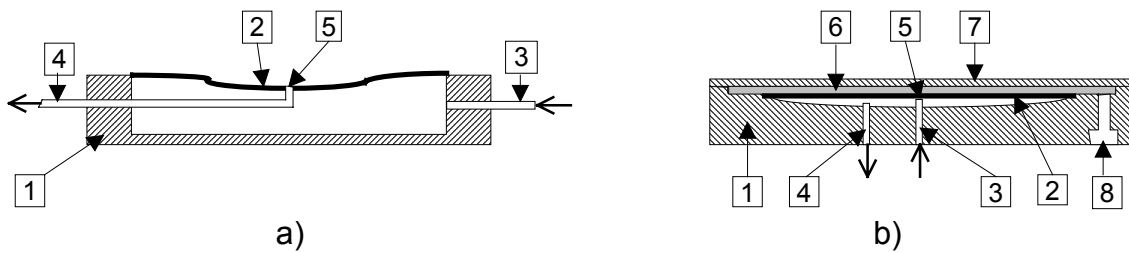


Fig. 1-5 : Coupe axiale des mini-capturs Glötzl à contre-pression pneumatique.

a) à action directe ; b) à action indirecte (Memier, 1980) ;

Légende : 1) Boîtier ; 2) Membrane (corps d'épreuve) ; 3) Tuyau aller (de mesure) ; 4) Tuyau retour ; 5) Soupape ; 6) Film de liquide incompressible ; 7) Surface sensible ; 8) Vis de remplissage.

Le pompage de l'air peut être assisté par un débitmètre automatique de type Glötzl permettant la connexion successive à plusieurs capteurs ainsi que la mesure et l'enregistrement de la contre-pression appliquée.

Ces capteurs satisfont les critères de miniaturisation et sont fréquemment utilisés dans des essais en semi-grandeur ou sur modèle réduit.

d) **Transducteur à corde vibrante**

Ces capteurs sont basés sur l'utilisation d'un transducteur à cordes vibrantes permettant la mesure des déformations ou des déplacements de flexion d'une membrane corps d'épreuve.

La figure 1-6 présente le schéma de principe d'un capteur à action directe et deux faces actives. Chaque corde vibrante est fixée entre deux supports rigides solidaires du corps d'épreuve.

Les deux supports pivotent lorsque la membrane se déforme et ils déterminent ainsi un allongement de la corde. La mise en vibration de la corde à l'aide de l'électro-aimant permet alors d'accéder à l'effort auquel elle est soumise, puisque le carré de sa fréquence de vibration est proportionnel à la contrainte normale dans la corde et donc à la pression appliquée par le sol à la membrane.

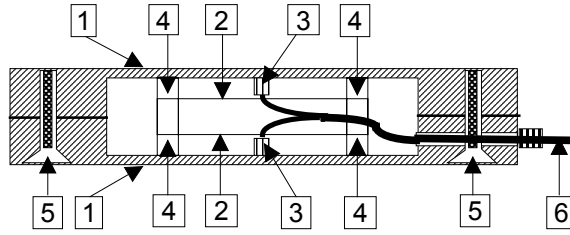


Fig. 1-6 : Coupe axiale d'un capteur à action directe à deux cordes vibrantes et deux faces actives (Thomas et Ward, 1969) ;

Légende : 1) Membrane (corps d'épreuve) ; 2) Corde vibrante ; 3) Système d'excitation (électro-aimant et poutre support) ; 4) Supports de fixation de la corde vibrante ; 5) Vis d'assemblage ; 6) Ligne d'alimentation et d'acquisition.

Les capteurs à corde vibrante sont assez encombrants et, par conséquent, ils sont utilisés seulement pour des mesures sur des ouvrages réels. Ils présentent l'avantage d'une bonne transmission d'un signal électrique en fréquence jusqu'à des distances importantes.

Un compteur de la fréquence de vibration est nécessaire pour réaliser les mesures.

e) Transducteur électrique résistif

Les capteurs à système de mesure résistif sont basés sur la mesure, à l'aide de jauges électriques résistives (à fil résistif, à trame pelliculaire,...) des déformations d'un corps d'épreuve de type diaphragme sollicité en flexion (Fig. 1-7).

Les jauges sont collées au corps d'épreuve sur toute la longueur de leur base de mesure et permettent le suivi de sa déformation en enregistrant une variation de la résistance électrique, qui lui est proportionnelle. Pour augmenter la sensibilité du système de mesure et éliminer en même temps l'effet de la variation de température sur les résistances électriques, on utilise un montage en pont Wheatstone complet à quatre jauges actives ordinaires (Fig. 1-7a), ou spécialement conçu pour des capteurs à membrane (Fig. 1-7b).

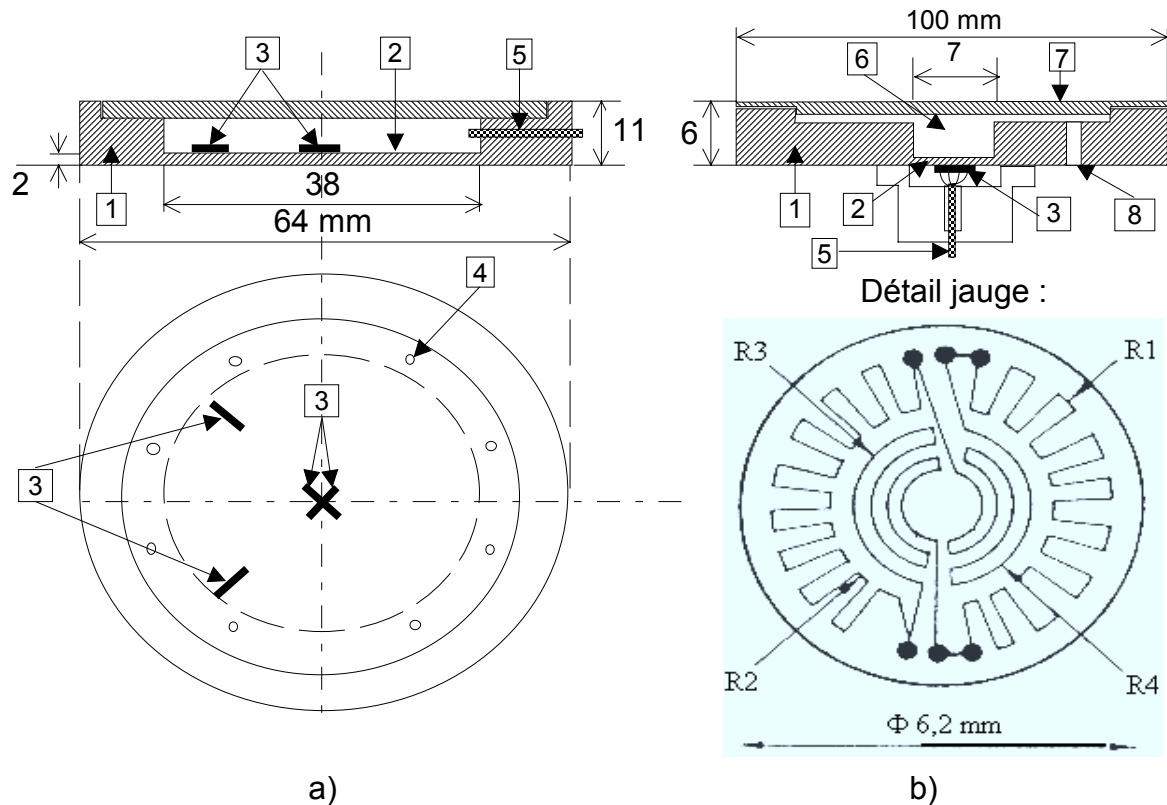


Fig. 1-7 : Capteur de pressions totales à système de mesure électrique résistif

a) action directe (capteur de Nottingham, Brown, 1977) ; b) action indirecte (capteur de l'INSA, Memier, 1980).

Légende : 1) Boîtier ; 2) Membrane corps d'épreuve ; 3) Jauges résistives ; 4) Vis d'assemblage ; 5) Ligne de transmission électrique ; 6) Film de liquide incompressible ; 7) Surface sensible ; 8) Vis de remplissage ; R_1 et R_2 - jauges pour les déformations radiales ; R_3 et R_4 jauges pour les déformations ortho-radiales.

Les quatre jauges sont installées sur la surface intérieure de la membrane corps d'épreuve avec leur base de mesure orientée en direction radiale (Fig 1-7a) ou radiale et ortho-radiale (Fig 1-7b) en des points qui enregistrent des déformations linéaires égales mais de signes contraires sous l'action d'une pression uniformément distribuée appliquée de l'autre côté de la membrane.

Ces capteurs peuvent satisfaire des critères assez exigeants d'encombrement réduit et sont couramment utilisés pour des mesures in situ ou en laboratoire.

f) **Transducteur électrique capacitif**

Pour ce type de capteur, le corps d'épreuve s'identifie avec le transducteur. Les deux faces de ces capteurs, actives toutes deux, constituent par ailleurs les deux plaques d'un condensateur.

L'action de la pression du sol sur les deux faces du capteur fait varier la distance entre les deux plaques et par conséquent la capacité électrique du condensateur.

Cette variation se fait suivant une loi hyperbolique en fonction de la distance entre les plaques, ce qui rend nécessaire d'identifier des intervalles de variation quasi-linéaires pour l'étalonnage des capteurs.

Ces capteurs sont peu utilisés, surtout du fait de la linéarisation que nécessite leur courbe d'étalonnage hyperbolique (une seule référence trouvée, Khan, 1983).

g) **Transducteur électrique inductif**

Les capteurs à système de mesure électrique inductif utilisent des bobines électriques pour mesurer la flèche au centre du corps d'épreuve sollicité en flexion (Fig. 1-8).

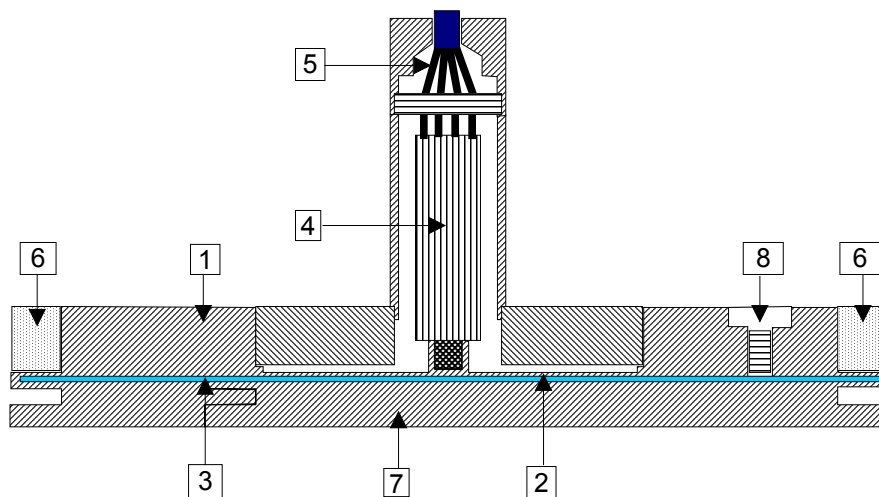


Fig. 1-8 : Capteur de pressions totales de Carlson à système de mesure électrique inductif (Kruse, 1965).

Légende : 1) Boîtier ; 2) Corps d'épreuve ; 3) Film de mercure ; 4) Transducteur de déplacement à 2 bobines avec entrefer ; 5) Ligne de transmission électrique à 4 fils ; 6) Anneau en liège ; 7) Surface sensible ; 8) Vis de remplissage.

Le principe de mesure est basé sur la variation linéaire de l'inductance des bobines en fonction de la position de leur entrefer. L'entrefer est lié au corps d'épreuve et suit sa déformation. La variation d'inductance résultant du déplacement de cet entrefer est mesurée à l'aide d'un circuit électrique en courant alternatif.

Ces capteurs sont bien adaptés pour des mesures d'interface en régime statique de courte durée ou dynamique.

h) Transducteur électromagnétique à effet Hall

Pour les capteurs à système de mesure électromagnétique à effet Hall, le transducteur est composé d'un aimant permanent solidaire du corps d'épreuve et d'une plaque, en matériau semi-conducteur, parcourue par un courant électrique continu, solidaire du corps rigide du boîtier (Fig. 1-9).

Le déplacement de l'aimant, du fait de la déformation du corps d'épreuve, génère une variation du champ magnétique autour du détecteur, accompagnée d'une variation proportionnelle de la différence de potentiel électrique. Cette variation de différence de potentiel électrique est mesurée avec un voltmètre.

De tels capteurs à effet Hall ont été développés à l'Université de Surrey (Grande-Bretagne).

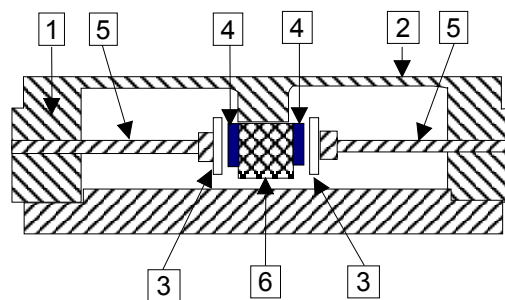


Fig. 1-9 : Capteur de pressions totales à action directe et système de mesure à effet Hall (Clayon et Bica, 1993).

Légende : 1) Boîtier ; 2) Membrane (corps d'épreuve) ; 3) Détecteur à effet Hall ; 4) Aimant permanent ; 5) Supports de fixation des transducteurs ; 6) Support en acier pour fixer les aimants.

i) Transducteur piézo-électrique

Les capteurs à système de mesure piézo-électrique sont basés sur la mesure de la force de réaction transmise par la membrane à une pile de cristaux de quartz (Fig. 1-10).

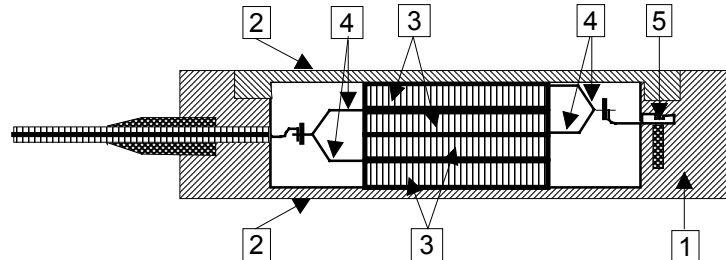


Fig. 1-10 : Capteur de pressions totales piézo-électrique à action directe, avec deux faces actives (Whiffin, 1964).

Légende : 1) Boîtier ; 2) Membrane (corps d'épreuve) ; 3) Transducteur (pile de quatre cristaux de quartz) ; 4) Feuille en cuivre ; 5) Vis.

L'effet piézo-électrique consiste en l'apparition d'une charge électrostatique aux deux extrémités d'un cristal de quartz sollicité en compression. Cette charge électrostatique est proportionnelle à la force de compression appliquée et donc à la réaction transmise par le diaphragme sur la pile de disques de quartz.

Ces capteurs à effet piézo-électrique sont utilisés pour les mesures en régime dynamique. Ils ne peuvent être utilisés en régime statique du fait de la baisse de la charge électrostatique dans le temps.

j) Transducteur piézo-résistif

Les capteurs à système de mesure piézo-résistif sont basés sur la mesure, à l'aide des jauges de déformation piézo-résistives, des déformations d'un corps d'épreuve de type diaphragme qui se trouve sollicité en flexion par l'action directe ou indirecte transmise par le sol à la surface sensible (Fig. 1-11).

L'effet piézo-résistif consiste dans la variation de la résistance électrique de certains matériaux comme la silice et le germanium en fonction de leurs déformations. Il s'agit d'un effet qui présente, par ailleurs, une anisotropie par rapport aux directions des

contraintes et par rapport à la direction du courant électrique.

L'avantage de telles jauges de déformation à effet piézo-résistif réside dans une sensibilité qui peut être 60 fois plus importante que celle des jauges de déformation conventionnelles (jauges électriques résistives). Ceci permet d'utiliser un corps d'épreuve ayant une raideur en flexion importante.

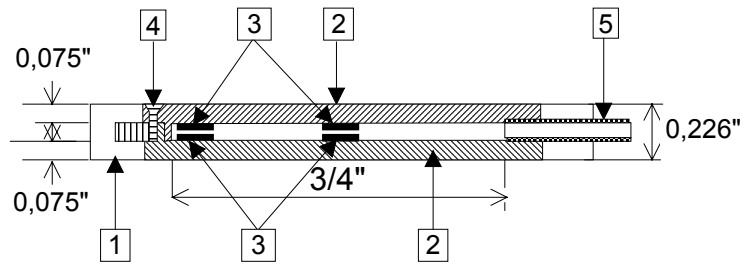


Fig. 1-11 : Capteur de pressions totales piézo-résistif à action directe et à deux faces actives (Ingram, 1965).

Légende : 1) Boîtier ; 2) Membrane (corps d'épreuve) ; 3) Transducteur à quatre jauges piézo-résistives liées en pont de Wheatstone complet ; 4) Vis ; 5) Ligne de transmission électrique vers un galvanomètre.

Les transducteurs à jauges piézo-résistives ont, par contre, comme désavantage la non linéarité de la loi de transformation des déformations enregistrées par le corps d'épreuve.

Cependant, les capteurs à effet piézo-résistif ont connu un développement particulièrement soutenu au cours des dernières années grâce à l'application des techniques de la micro-électronique qui permettent de regrouper sur un substratum en silicium le corps d'épreuve, les jauges et mêmes les circuits électroniques de conditionnement du signal (y compris la linéarisation du signal de sortie). Ils peuvent être utilisés tant pour des mesures statiques que pour des mesures dynamiques.

k) Autres types de transducteurs

Cette classification n'est pas exhaustive. Au cours des dernières années, on a pu assister à une diversification remarquable des transducteurs utilisables en différentes combinaisons.

On peut donner comme exemple le capteur présenté par Paikowsky et al. (1997), qui utilise comme transducteur une encre semi-conductrice ayant la propriété de changer de résistance électrique en fonction de la pression appliquée (Fig. 1-12).

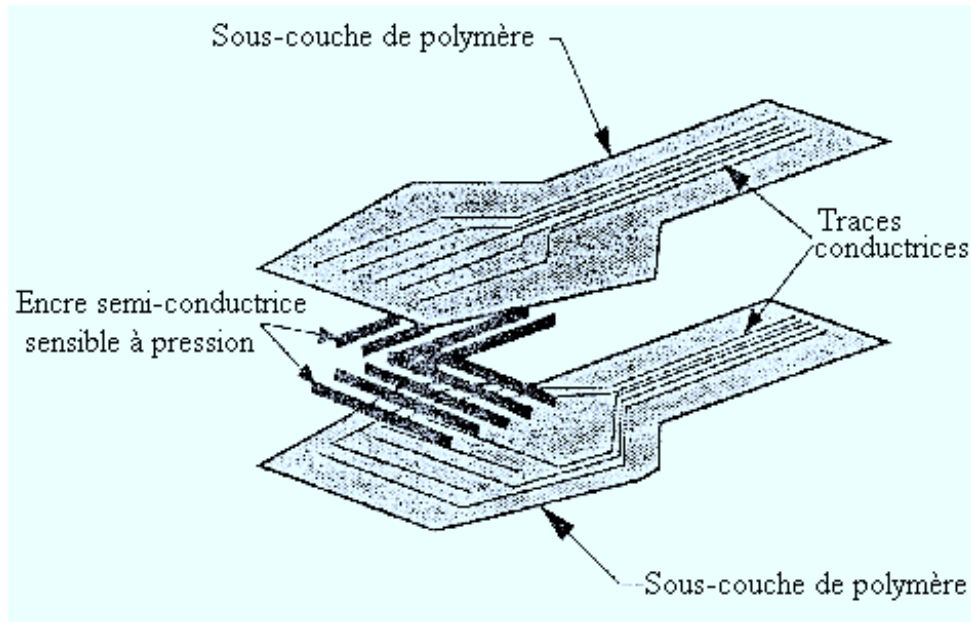


Fig. 1-12 : Capteur de pression à réseau tactile (d'après Paikowsky et al., 1997).

Cette encre est appliquée en bandes le long des traces conductrices qui sont disposées sur chaque face du capteur, en formant un réseau de lignes perpendiculaires. Le capteur est conçu pour déterminer, en chaque nœud du réseau de traces conductrices perpendiculaires, la variation de résistance électrique de l'encre et donc la pression appliquée localement. La valeur moyenne de la pression appliquée sur la surface active du capteur est alors déterminée à l'aide d'un ordinateur lié au système de mesure.

Un deuxième exemple est constitué par les capteurs à fibre optique basés sur la modification des propriétés optiques de la fibre sous l'action du mesurande. Ces capteurs ont connu un développement soutenu au cours des dernières années, y compris dans le domaine du génie civil.

1.4 La mesure des pressions totales à travers la littérature

Cette section présente les résultats d'une étude bibliographique consacrée à la qualification des performances de mesure des pressions totales.

On s'intéresse notamment aux mesures faisant appel à des capteurs de pression de fluide à membrane et on insiste sur la compréhension des phénomènes qui perturbent l'exactitude de la mesure et sur la mise en évidence des facteurs d'influence dont le contrôle permettrait l'amélioration des performances de mesure.

Cette étude, réalisée dans la perspective de la conception d'un capteur prototype, vise à rassembler des recommandations sur l'ensemble des facteurs d'influence qui affectent les résultats des mesures, y compris les caractéristiques des sols, les conditions de mise en place des capteurs et l'interprétation des mesures.

1.4.1 Phénomènes physiques affectant la discrétion de la mesure des pressions totales

1.4.1.1 Effet d'inclusion

L'effet d'inclusion d'un corps solide dans un milieu solide élastique présentant des caractéristiques de déformabilité (module de déformation, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation thermique) différentes est bien connu en mécanique des milieux déformables : l'état des contraintes engendré au voisinage de l'inclusion par une action mécanique ou thermique quelconque diffère de l'état qui existerait dans le milieu solide en l'absence de l'inclusion. Il s'explique par les déformations différentielles gênées (empêchées) entre les deux milieux.

La perturbation engendrée par l'effet d'inclusion dépend, en dehors des caractéristiques de déformabilité mentionnées ci-avant, de la nature de la sollicitation. En particulier, la perturbation des contraintes autour d'une inclusion dans un milieu élastique soumis à une sollicitation uniaxiale est différente de celle engendrée dans le même milieu soumis à une sollicitation biaxiale d'intensité égale.

Plusieurs approches théoriques ont cherché à quantifier la perturbation des contraintes causée par ce phénomène d'inclusion (Coutinho, 1949 ; Monfore, 1950 ; Peattie et Sparrow, 1954 ; Kalstenius et Bergau, 1956 ; Askegaard, 1963 ; Hvorslev, 1976 ; etc.).

On présente ci-après quelques résultats concernant le cas d'une inclusion cylindrique

placée dans un milieu élastique soumis à des sollicitations de compression respectivement uniaxiale et triaxiale.

a) Inclusion dans un milieu élastique soumis à une sollicitation uniaxiale

Monfore (1950, cité par Thomas et Ward, 1969 et par Weiler et Kulhawy, 1982) a procédé à une analyse par la théorie de l'élasticité de la redistribution des contraintes qui s'opère autour d'une inclusion cylindrique dans un milieu élastique soumis à une sollicitation uniaxiale. Cette analyse visait à formuler des exigences sur la géométrie nécessaire d'un capteur de pressions totales.

La distribution obtenue par Monfore des contraintes normales autour de l'inclusion cylindrique suivant sa direction diamétrale est représentée par Weiler et Kulhawy en fonction de l'intensité du champ des contraintes uniaxial uniforme appliqué dans le milieu élastique infini (Fig. 1-13).

Sur le même graphique, ils ont présenté les résultats expérimentaux obtenus par Peattie et Sparrow (1954) et la distribution proposée par Terzaghi (1943) pour l'état des contraintes à la rupture dans un sable.

Les principales hypothèses de Monfore pour le calcul de l'ampleur de la redistribution des contraintes autour de l'inclusion sont les suivantes :

- ♦ l'inclusion et le milieu élastique sont comme des milieux continus, homogènes, isotropes, ayant un comportement linéaire-élastique mais des caractéristiques de déformabilité différentes ($E_{\text{inclusion}} = 10 E_{\text{milieu}}$) ;
- ♦ l'inclusion a la forme d'un disque plat ($D=5e$), tandis que le milieu qui l'entoure est supposé infini ;
- ♦ le champ de contraintes appliqué dans le milieu infini est uniaxial et orienté normalement aux deux bases circulaires de l'inclusion ;
- ♦ le coefficient de Poisson de l'inclusion est identique à celui du milieu ;
- ♦ le milieu élastique infini adhère pleinement au capteur sur toute sa surface.

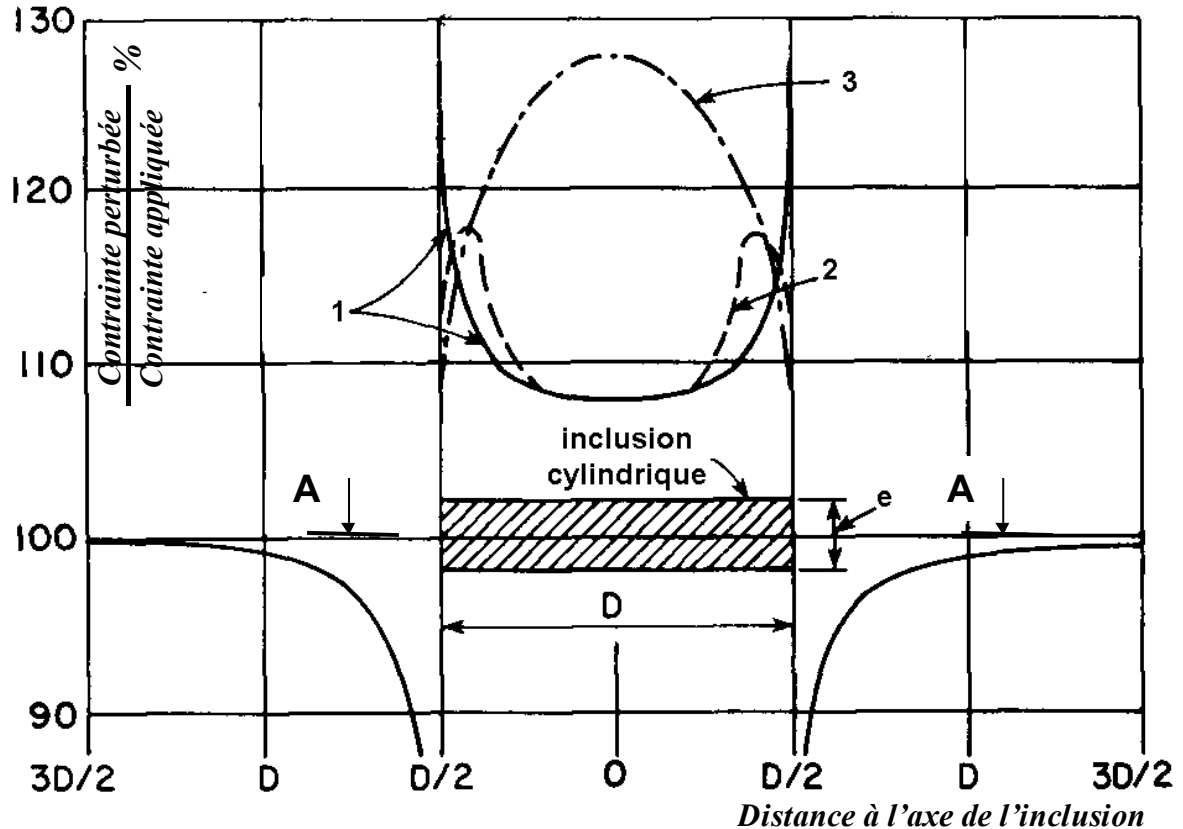


Fig. 1-13 : Distribution des contraintes normales verticales autour d'une inclusion cylindrique (sur le plan A-A) dans un milieu élastique soumis à champ de contrainte uniaxial uniforme (d'après Weiler et Kulhawy, 1982).

Légende : 1) Calcul théorique (Monfore, 1950) ; 2) Analyse expérimentale (Peattie et Sparrow, 1954) ; 3) Etat des contraintes avant rupture dans un sable (Terzaghi, 1943).

On remarque la bonne cohérence entre les résultats du calcul théorique et ceux obtenus expérimentalement. La seule exception concerne les concentrations de contraintes au bord de l'inclusion et s'explique par le fait que ces dernières n'ont pas été limitées dans l'analyse théorique. En pratique, de telles concentrations de contraintes ne peuvent pas se produire à cause de la résistance mécanique limitée du matériau : en fonction de sa loi de comportement, on constate soit une rupture locale soit une redistribution des contraintes dans une zone plastique qui se développe autour des points singuliers.

Quant à la distribution des contraintes proposée par Terzaghi (Fig. 1-13- courbe 3), elle a été considérée comme représentative de l'état des contraintes autour de l'inclusion

avant la rupture du sol. L'intensité élevée des contraintes normales agissant sur la surface de l'inclusion (jusqu'à 28% plus élevée que l'intensité du champ des contraintes uniaxial appliqué) est expliquée par la perte de raideur du sol au fur et à mesure que les contraintes de cisaillement augmentent et, par conséquent, par le transfert de contraintes vers le capteur, dont la raideur est relativement importante.

Hvorslev (1976, in Memier, 1980) procède à une analyse théorique pour estimer l'état de contrainte développé autour d'un capteur en forme de disque plat (diamètre D ; épaisseur e) dans un sol élastique soumis à une sollicitation uniaxiale.

En considérant que la raideur radiale de l'inclusion est infinie et que le champ de contraintes uniaxial, agissant dans la direction normale aux deux bases circulaires de l'inclusion, n'est pas influencé par les déformations radiales dans le milieu élastique infini (supposées libres), Hvorslev caractérise la perturbation des contraintes engendrée par la présence de l'inclusion par la formule :

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{1 + \frac{eK_s}{2D}}{1 + \frac{eK_s E_s}{2D E_c}} \quad (1.2)$$

où :

σ_c/σ_s - rapport d'enregistrement du capteur¹¹ (rapport entre la contrainte perturbée agissant normalement aux deux bases circulaires de l'inclusion σ_c et l'intensité du champ des contraintes agissant dans le milieu élastique infini σ_a) ;

E_s, E_c – modules d'élasticité du milieu infini (sol) et de l'inclusion (capteur), respectivement ;

K_s – paramètre adimensionnel dépendant du coefficient de Poisson du sol ν_s ; ce paramètre a été estimé par Timoshenko et Goodier (1951) dans le cas d'une inclusion cylindrique en appliquant la théorie de Boussinesq :

¹¹ On peut rencontrer dans la littérature ce terme exprimé sous la forme de « facteur d'action du capteur »

$$K_s = \frac{4}{\pi(1-\nu_s^2)} \quad (1.3)$$

L'erreur d'enregistrement du capteur $\sigma_c - \sigma_s$ devient égale à zéro pour un capteur présentant un module d'élasticité égal à celui du sol ; elle tend vers zéro pour un capteur présentant un module d'élasticité plus élevé que celui du sol quand son épaisseur e devient sensiblement plus petite que son diamètre D .

Loh (1954, cité par Triandafilidis, 1974) a étudié le principe du transfert des contraintes à l'interface d'une inclusion élastique cylindrique dans un milieu élastique semi-infini soumis à l'action d'une pression uniformément distribuée.

Il a considéré dans son analyse différents rapports entre le module d'élasticité de l'inclusion cylindrique E_c et le module d'élasticité du milieu E_m (entre 1/5 et 8/1) ainsi que différents rapports entre l'épaisseur e de l'inclusion cylindrique et son diamètre D . Pour les besoins d'un calcul simplifié, les coefficients de Poisson des deux matériaux ont été pris égaux du fait que leur influence dans la solution analytique, donnée par l'expression $(\nu_c - \nu_m)^2$, est négligeable pour les cas pratiques.

Triandafilidis exprime ces résultats en définissant un facteur de réponse du capteur égal au rapport entre la pression perturbée agissant sur les faces circulaires de l'inclusion et la pression appliquée dans le milieu semi-infini (Fig. 1-14).

Ce facteur de réponse donne accès directement à l'erreur d'enregistrement due à l'effet d'inclusion d'un capteur cylindrique dans un milieu élastique semi-infini soumis à l'action d'une pression uniformément distribuée. Il dépend du rapport entre le module d'élasticité de l'inclusion et celui du milieu E_c/E_m , ainsi que du rapport de forme de l'inclusion e/D ; il est égal à l'unité si l'inclusion présente un module d'élasticité identique à celui du milieu ($E_c = E_m$).

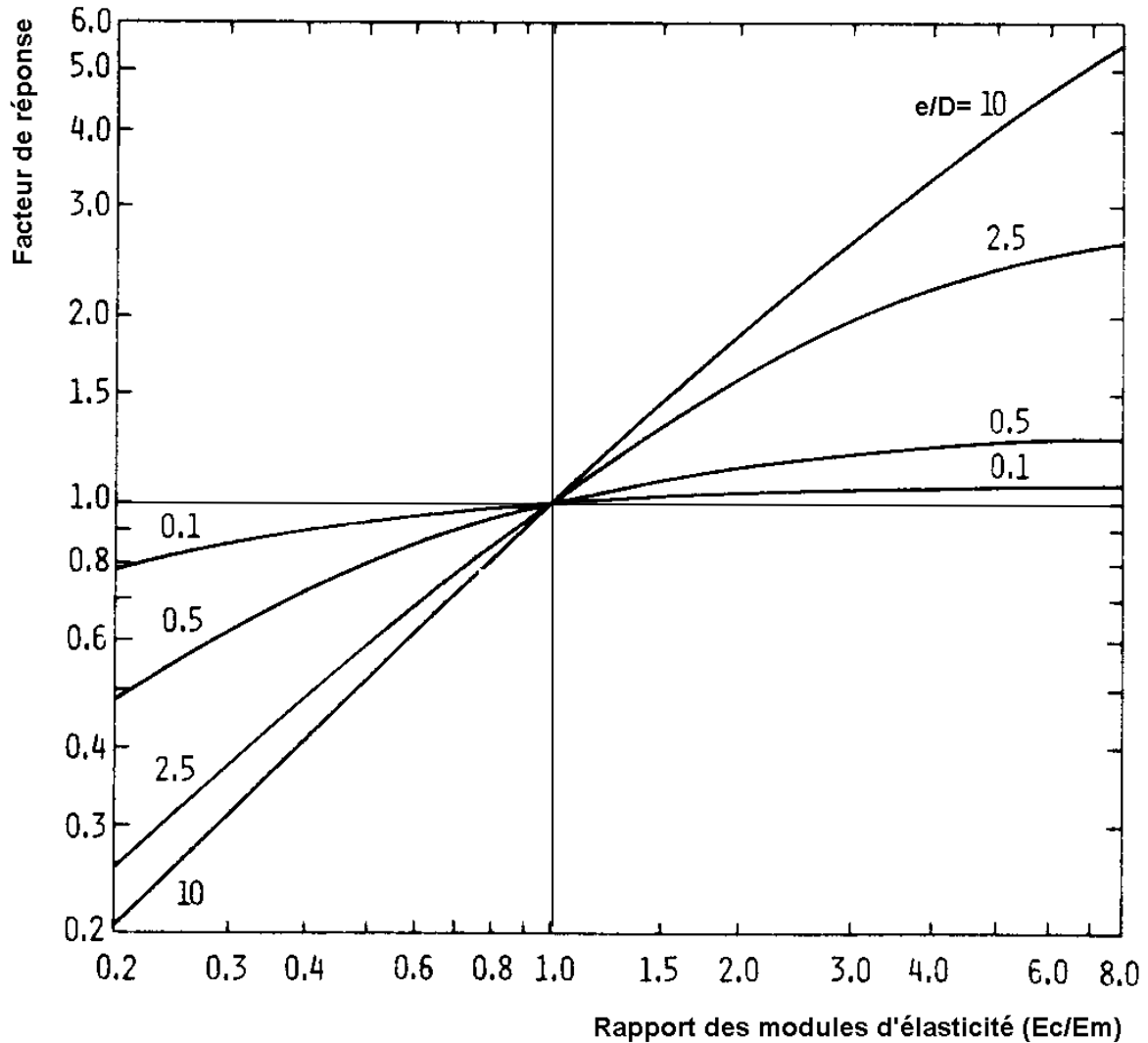


Fig. 1-14 : Facteur de réponse théorique du capteur (FAC) en fonction du rapport des modules d'élasticité du capteur et du milieu pour divers rapports de forme e/D (Loh, d'après Triandafilidis, 1974).

b) Inclusion dans un milieu élastique soumis à une sollicitation triaxiale

Hvorslev (1976, in Memier, 1980) étend l'étude théorique du problème de l'interaction sol - capteur au cas d'une inclusion en forme de disque plat dans un massif élastique soumis à un champ de contraintes triaxial d'intensités, σ_x , σ_y et σ_z .

Si la direction du mesurande correspond, par exemple, à la direction z , Hvorslev obtient un rapport d'enregistrement donné par la relation (on utilise les mêmes notations que dans la relation 1.2) :

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_s} = \frac{\sigma_c}{\sigma_z} = \frac{1 + \frac{e}{2D} \left(1 - \nu \frac{\sigma_x + \sigma_y}{\sigma_z} \right) K_s}{1 + \frac{e}{2D} \frac{E_s}{E_c} K_s} \quad (1.4)$$

Cette relation, appliquée au cas d'un champ triaxial isotrope ou au cas où les intensités dans les directions radiales au capteur σ_x et σ_y sont inférieures à l'intensité du mesurande σ_z , conduit à une erreur d'enregistrement plus réduite que celle correspondant à un champ de contraintes uniaxial.

À partir des travaux d'Eshelby (1957) concernant la distribution des contraintes autour d'une inclusion ellipsoïdale infiniment rigide dans un milieu élastique soumis à une sollicitation spatiale, Askegaard (1963, cité par Weiler et Kulhawy, 1982) met en évidence une autre manifestation de l'effet d'inclusion d'un capteur dans le sol. Il constate qu'une partie des contraintes agissant normalement à la surface latérale du capteur change de direction au voisinage du capteur pour arriver à agir dans la direction perpendiculaire à la surface active du capteur. Ce phénomène est nommé «rotation des contraintes latérales».

Pour le cas d'un capteur soumis à l'action d'un champ de contraintes isotrope, Askegaard donne la contrainte agissant sur la surface active du capteur par rapport à celle qui serait enregistrée dans l'hypothèse où le capteur ne serait soumis qu'à l'action d'un champ des contraintes uniaxial de même intensité (Fig. 1-15).

Il indique également une formule approximative permettant de déterminer la partie μ des contraintes latérales qui est affectée par ce phénomène de rotation de direction à cause de l'effet d'inclusion du capteur :

$$\mu = 0,7 - \left(1,4 + 1,9 \frac{e}{D} \right) \nu_s \quad (1.5)$$

où

ν_s désigne le coefficient de Poisson du sol ($\nu_s < 0,5$) ;

e/D désigne le rapport de forme du capteur.

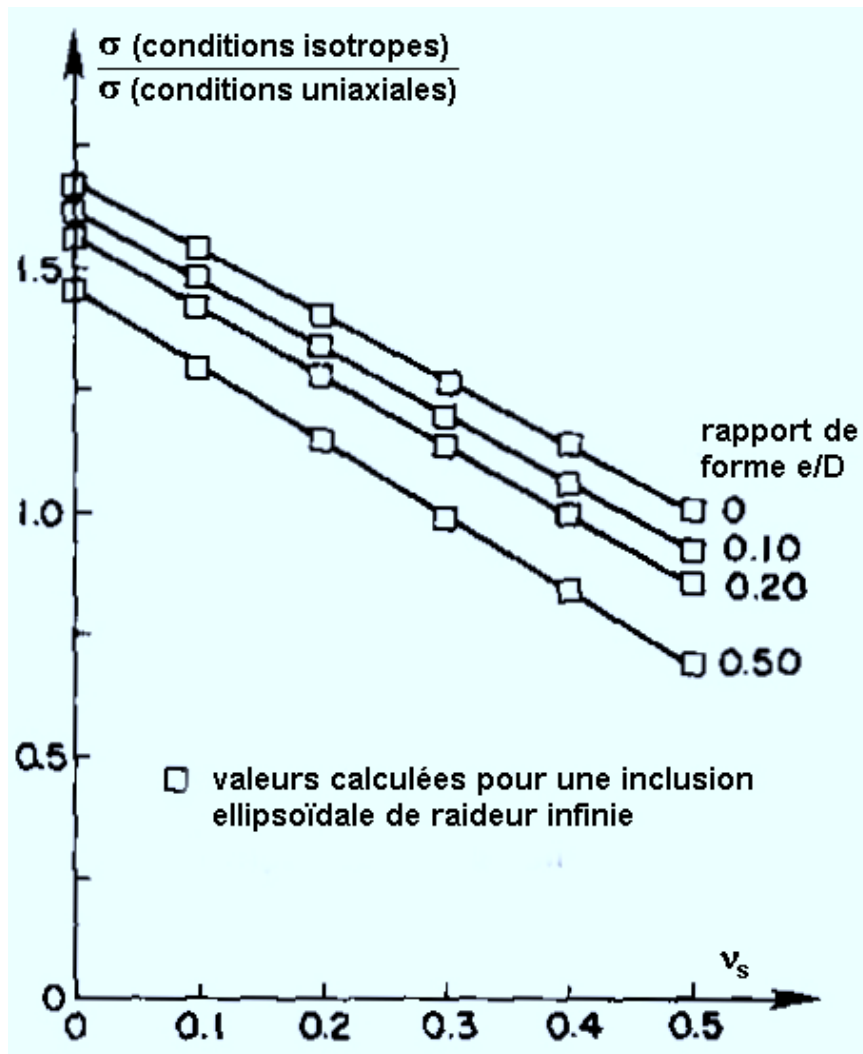


Fig. 1-15 : Effet des contraintes normales latérales sur les contraintes normales frontales autour d'une inclusion ellipsoïdale soumise à une sollicitation isotrope (valeurs relatives à celles agissant dans un champ uniaxial de même intensité).

Cette relation a été établie dans l'hypothèse d'un comportement linéaire-élastique du sol. En réalité, le coefficient de Poisson dépend du niveau de contrainte et, par conséquent, ne peut pas être défini simplement par une constante.

Les études théoriques de l'effet d'inclusion conduisent à différentes formules permettant de calculer le rapport entre la valeur moyenne du champ de contraintes perturbé par la présence du capteur σ_c et le champ de contraintes réel σ_s , existant avant d'introduire l'instrument de mesure. Les hypothèses de calcul sont cependant trop restrictives pour que les résultats obtenus puissent être utilisés pour quantifier l'effet

d'inclusion d'un capteur dans un massif de sol.

Les formules proposées ont toutefois une importance qualitative évidente dans la mesure où elles mettent en évidence les deux familles de paramètres qui interviennent :

- ♦ le volume et la forme de l'inclusion (épaisseur e et diamètre D) ;
- ♦ les caractéristiques de déformabilité du sol et du capteur (modules de déformation, coefficients de Poisson et, éventuellement, les coefficients de dilatation thermique).

La perturbation des contraintes autour d'un capteur causée par le phénomène d'inclusion intervient seulement dans le cas des mesures réalisées au sein d'un massif de sol. Dans le cas où le capteur est intégré dans un ouvrage géotechnique pour effectuer des mesures à son interface avec le sol, le phénomène d'inclusion ne perturbe plus l'état de contrainte agissant sur la surface sensible du capteur à condition que cette dernière soit incluse dans le plan d'interface et que la surface latérale du capteur soit insensible aux efforts transmis par la structure.

1.4.1.2 Effet de l'interaction sol – membrane du capteur

L'effet d'une inclusion rigide dans un milieu élastique ne permet pas, à lui seul, d'expliquer complètement la perturbation du champ des contraintes constatée au voisinage d'un capteur de pression totale à membrane déformable.

L'interaction entre la membrane déformable et le sol avoisinant entraîne également une perturbation du champ de contraintes agissant autour du capteur. L'ampleur de cette perturbation peut être plus importante que celle attribuée à l'effet d'inclusion.

Ainsi, Trollope et Lee (1961) ont montré que « le mouvement de la surface sensible représente la cause majeure de la redistribution des contraintes » autour d'un capteur de pressions totales à membrane. Ils considèrent que l'effet d'inclusion « causé par la déformation du corps du capteur » est négligeable et que les résultats de la qualification des capteurs d'interface à membrane peuvent être extrapolés aux capteurs noyés dans les massifs des sols.

Caquot et Kerisel (1966) considèrent que « la déflection Δ au centre du diaphragme, si

petite soit-elle, provoque un effet de voûte avec report de contraintes sur l'anneau ».

Ce phénomène de perturbation de l'état des contraintes autour d'un capteur par l'interaction entre le sol et sa surface sensible déformable peut être mis en évidence par l'analyse qualitative du comportement d'un capteur en présence d'un sol au cours d'un cycle de chargement - déchargement.

a) Interaction sol-membrane durant le chargement

Au fur et à mesure que la pression transmise par le sol sur la surface sensible du capteur croît, cette dernière se déforme proportionnellement, permettant au transducteur de transformer les déformations ou les déplacements ainsi induits dans le corps d'épreuve en une grandeur physique transmissible à distance. Ces déformations doivent être suffisamment importantes par rapport à la résolution du transducteur pour qu'elles puissent être perçues par ce dernier.

La surface sensible d'un capteur à membrane est, en général, un diaphragme circulaire encastré sur son pourtour et sollicitée en flexion (dans les limites d'un comportement linéaire-élastique du matériau) par la pression transmise par le sol. Si l'on considère le cas d'une pression uniformément appliquée, la déflection maximale du diaphragme, enregistrée en son centre, est reliée à l'intensité de la pression appliquée, p , par la relation :

$$\delta_{\max}(p) = \frac{3(1-\nu^2)d^4}{256Et^3} p \quad (1.6)$$

où

E et ν représentent les caractéristiques élastiques du matériau de la membrane,

d désigne le diamètre de la surface sensible et

t l'épaisseur de la surface sensible.

Par conséquent, l'interaction sol-capteur est caractérisée par une variation de la raideur du capteur suivant son diamètre (la raideur la plus faible est située au centre de la membrane), ce qui provoque lors de l'application de la sollicitation, une variation de la

densité locale du sol avoisinant. Ainsi, dans la zone en contact avec la surface active du capteur, la densité du sol diminue tandis que, dans la zone voisine du corps rigide du capteur, la densité du sol augmente.

Il apparaît une redistribution des contraintes, par effet de voûte, au voisinage du capteur avec un report des contraintes dans la zone du sol la plus dense (et donc la plus rigide) et aussi sur les bords rigides du capteur (Fig. 1-16).

L'interaction entre le sol et la membrane déformable lors de l'augmentation de la pression appliquée se manifeste donc par une tendance du capteur à sous-enregistrer la pression appliquée.

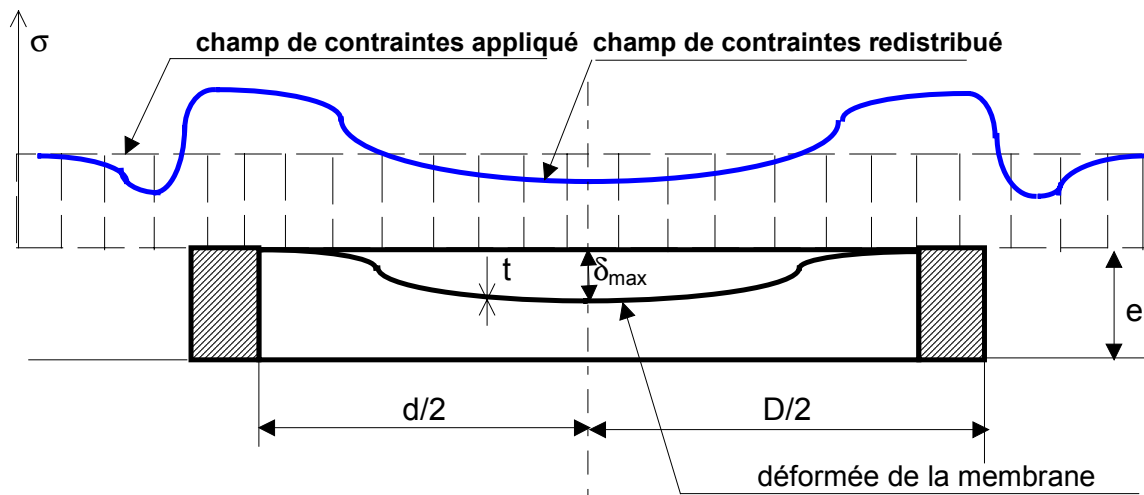


Fig. 1-16 : Redistribution des contraintes autour d'un capteur à membrane déformable

Légende : D - diamètre du capteur ; e - épaisseur du capteur ; d - diamètre de la surface sensible ; t - épaisseur de la membrane ; δ - flèche de la membrane.

b) Interaction sol-membrane durant le déchargement

Lors de la baisse de la pression appliquée sur la surface sensible du capteur, la couche de sol qui avait suivi la déformation de la surface active du capteur s'oppose à son retour élastique dans la position initiale. Par conséquent, durant le déchargement, le capteur présente une tendance à sur-enregistrer. Cette tendance se traduit par l'apparition d'une hystérésis sur les courbes de réponse des capteurs obtenues pour un cycle de chargement-déchargement en présence du sol.

La flexibilité de la face active du capteur, le rapport entre le diamètre représentatif des particules et le diamètre de la face active du capteur, et la raideur du sol sont les principaux paramètres qui déterminent l'ampleur de l'interaction entre le sol et la membrane déformable et la perturbation des contraintes engendrée autour du capteur. Leur influence a été mise en évidence en laboratoire lors de la qualification des mesures de pressions totales en conditions d'essai contrôlées.

Sur le plan théorique, l'effet de l'interaction entre la membrane déformable du capteur et le sol avoisinant reste difficile à quantifier.

1.4.2 Facteurs affectant la pertinence des mesures

La recherche bibliographique effectuée a permis de distinguer quatre catégories de facteurs qui affectent la pertinence de la mesure des pressions totales avec un capteur de pression à membrane :

- ◆ les caractéristiques physiques des capteurs et du sol ;
- ◆ les conditions de mise en place des capteurs et les conditions de mesure ;
- ◆ les conditions de qualification des mesures de pressions totales ;
- ◆ les conditions d'environnement.

Ces facteurs conditionnent l'importance de l'effet de l'inclusion du capteur et de l'interaction entre sa membrane déformable et le sol. Ils rendent nécessaire la mise en œuvre d'une qualification spécifique des capteurs, qui permet seule d'établir leurs performances de mesure.

On présente ci-après les résultats des principales études qui ont traité de ces sujets, ainsi que les principales recommandations qui en ont été tirées pour améliorer la mesure des pressions totales.

1.4.2.1 Caractéristiques des capteurs et des sols

a) Diamètre de la face active du capteur (d)

Le diamètre de la surface active du capteur doit être suffisamment grand par rapport à la dimension caractéristique des particules du sol pour deux raisons :

- ♦ d'une part, pour réduire l'effet des charges ponctuelles ;
- ♦ d'autre part, pour diminuer l'influence de l'hétérogénéité locale des propriétés du sol sur les résultats de mesure.

Plantema (1953) considère qu'un capteur de pressions totales doit présenter un grand diamètre combiné à une faible épaisseur. Il souligne que le grand diamètre de la face active permet de moyenniser les variations locales des contraintes transmises par le sol sur la totalité de la surface de la face active.

Kallstennius et Bergau (1956, cités par Memier, 1980) ont fait un calcul simplifié qui permet d'exprimer l'erreur due au nombre de particules sphériques N , dans le cas d'un capteur à piston rigide, sous la forme :

$$e_g = \pm \frac{100\pi}{\sqrt{2N}} \quad (1.7)$$

Pour obtenir une erreur e_g inférieure à 3%, cette formule conduit à imposer une surface du capteur en contact avec un nombre de particules supérieur à 3000.

Ils proposent, par ailleurs, une formule empirique pour déterminer le diamètre minimal d_{\min} de la face active d'un capteur en fonction du diamètre représentatif des particules d_{50} extrait de la courbe granulométrique du sol :

$$d_{\min} > 50d_{50} \quad (1.8)$$

Weiler et Kulhawy (1982) ont étudié l'influence sur les résultats de la mesure du rapport entre le diamètre d'un capteur à membrane et la dimension représentative des particules. En imposant une série de charges locales sur une plaque à bord fixe et en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus pour un chargement d'intensité uniforme, ils arrivent à la conclusion que, pour un capteur à membrane, il suffit de

respecter la condition moins restrictive :

$$d_{\min} > 10d_{50} \quad (1.9)$$

Krizek, Farzin, Wissa et Martin (1974) considèrent, pour leur part, que pour obtenir une valeur représentative de la pression mesurée il faut que le diamètre de la face active du capteur respecte la condition :

$$d \approx 50d_{\max} \quad (1.10)$$

où d_{\max} désigne le diamètre maximum des grains de sol.

Lazebnik et Chernysheva (1968, cités par Boulebnane, 1996) ont fait une série d'essais d'étalonnage pour 6 capteurs de même type mais de diamètres différents (5 cm, 10 cm, 12 cm, 16 cm, 20 cm et 24 cm), le sol restant le même.

Ils ont conclu que, pour les capteurs ayant un diamètre d'au moins 12 cm, la dispersion des résultats obtenus pour la même situation de mesure est satisfaisante (<15 %). La plus faible dispersion des résultats est obtenue pour les capteurs ayant le plus grand diamètre ($d=24$ cm).

Dunnicliff (1988) indique que, pour les mesures des pressions totales in situ, le diamètre (total) des capteurs doit être compris entre 23 et 30 cm.

Il considère que les capteurs de petit diamètre présentent des difficultés de mise en place et que les mesures sont affectées par un effet d'échelle tandis que les capteurs de très grand diamètre sont difficiles à installer car on risque de ne pas pouvoir assurer un lit support de rigidité uniforme.

b) Epaisseur du capteur (e)

L'effet de l'inclusion du capteur dans le sol est en relation directe avec son volume. Pour un diamètre du capteur imposé, il faut donc minimiser son épaisseur pour minimiser la perturbation des contraintes autour du capteur.

D'autre part, une réduction de l'épaisseur du capteur permet de diminuer sa sensibilité à l'action des contraintes latérales par la réduction des efforts latéraux qui s'y appliquent.

En effet, sous l'action des efforts latéraux, le boîtier rigide du capteur (disque ou anneau sollicité en compression) peut transmettre des déformations dans le corps d'épreuve (diaphragme encastré sur son pourtour). Ces déformations se superposent à celles qui sont transmises à la surface sensible par la pression du sol et induisent une composante parasite dans le signal de sortie délivré par le transducteur.

Il est ainsi recommandé dans toutes les études de minimiser ce paramètre jusqu'aux limites permises par les technologies de fabrication des capteurs.

Cette condition est moins restrictive pour les mesures des pressions totales à l'interface des ouvrages, sous réserve que les capteurs soient intégrés dans l'ouvrage de telle façon que seulement leurs surfaces sensibles viennent en contact avec le massif de sol, dans le plan d'interface sol-structure, et que, lors de la conception des capteurs, on leur ait assuré une sensibilité négligeable à l'action des efforts latéraux (anneau extérieur très rigide).

c) Rapport de forme du capteur (e/D)

La condition imposée sur l'épaisseur des capteurs est retrouvée le plus souvent sous la forme d'une restriction appliquée au rapport entre l'épaisseur e et le diamètre D du capteur, le « rapport de forme » du capteur.

Taylor (1948) a proposé la formule suivante pour exprimer la relation entre le rapport de forme et l'erreur d'enregistrement d'un capteur cylindrique :

$$p_e = \frac{C}{2} \frac{e}{D} p \quad (1.11)$$

où,

p_e - désigne l'erreur d'enregistrement causée par la présence du capteur dans le sol ;

p - désigne la pression qui aurait existé à l'endroit de mesure si le capteur n'était pas présent ;

C - est un coefficient dépendant des caractéristiques du sol :

- ♦ pour les sols sans cohésion ou ayant une faible cohésion, C prend une valeur comprise entre 0,9 et 2,0 ;
- ♦ pour les sols cohérents, C prend des valeurs plus petites à cause du comportement plastique du sol.

Les résultats d'essais effectués au Waterways Experiment Station (WES) dans les années 1940 ont conduit Taylor à imposer une condition destinée à limiter l'erreur d'enregistrement :

$$\frac{e}{D} < 0,2 \quad (1.12)$$

Monfore (1950, cité par Thomas et Ward, 1969) a démontré théoriquement à l'aide d'une analyse élastique du problème de l'interaction sol-capteur que l'erreur d'enregistrement est directement proportionnelle au rapport e/D pour toute valeur de ce rapport inférieure à 0,8. Peattie et Sparrow (1954, cités par Thomas et Ward, 1969) ont confirmé expérimentalement ce résultat.

Caquot et Kerisel (1966) ont considéré que la discontinuité dans le sol introduite par le capteur est la première cause de différence entre les résultats de mesure dans un fluide et dans un sol. Pour diminuer son influence sur les résultats de mesure, il est nécessaire à réduire au maximum le rapport e/D .

Triandafilidis (1974) a présenté les résultats théoriques obtenus par Loh (Fig. 1-14) pour caractériser la perturbation apportée aux contraintes par une inclusion cylindrique dans un milieu élastique semi-infini. Il a remarqué, que pour un rapport de forme inférieur à 0,5 et un rapport entre les modules d'élasticité du capteur et du sol supérieur à 1, l'erreur d'enregistrement reste inférieure à 30 %.

Weiler et Kulhawy (1982) ont estimé que la recommandation du Waterways Experiment Station (1.12) reste encore valable pour la conception des capteurs de pressions totales.

Par ailleurs, ils ont attiré l'attention sur le fait que, dans le cas d'un capteur noyé dans un massif de sol soumis à l'action d'une sollicitation spatiale, on avait mis en évidence

un phénomène de rotation des contraintes agissant sur la surface latérale du capteur.

Weiler et Kulhawy ont estimé que les études analytiques effectuées par Askegaard concernant la perturbation des contraintes autour d'une inclusion ellipsoïdale dans un milieu élastique soumis à une sollicitation isotrope avaient démontré que l'effet d'inclusion se manifeste par la diminution des contraintes normales agissant sur la surface latérale, inerte, du capteur et l'augmentation des contraintes agissant sur sa surface sensible (rotation des contraintes latérales).

Le pourcentage des contraintes latérales qui subit ce phénomène de rotation dépend de la valeur du coefficient de Poisson du sol, mais aussi du rapport de forme du capteur. Pour diminuer l'ampleur de ce phénomène, il ne faut pas trop réduire le rapport de forme du capteur.

Ainsi, dans le cas d'une inclusion ayant un rapport de forme $e/D = 0,1$ soumise à un état de contrainte isotrope dans un milieu ayant un coefficient de Poisson $\nu=0,3$, Askegaard démontre que la contrainte mesurée augmente de 20% par rapport au cas d'une inclusion soumise à un champ de contrainte uniaxial d'intensité égale à celle du champ isotrope.

Dunnicliff (1988) considère que les capteurs doivent présenter un rapport de forme inférieur à 0,1 pour obtenir de bonnes performances de mesure.

Pour souligner la nécessité d'utiliser des capteurs présentant un rapport de forme réduit, il représente parallèlement l'allure de la perturbation des contraintes générée autour d'une cellule de mesure de pressions totales de faible épaisseur et autour d'une autre de grande épaisseur. Cette représentation est donnée dans les cas d'une cellule de mesure respectivement plus rigide et moins rigide que le milieu (Fig. 1-17).

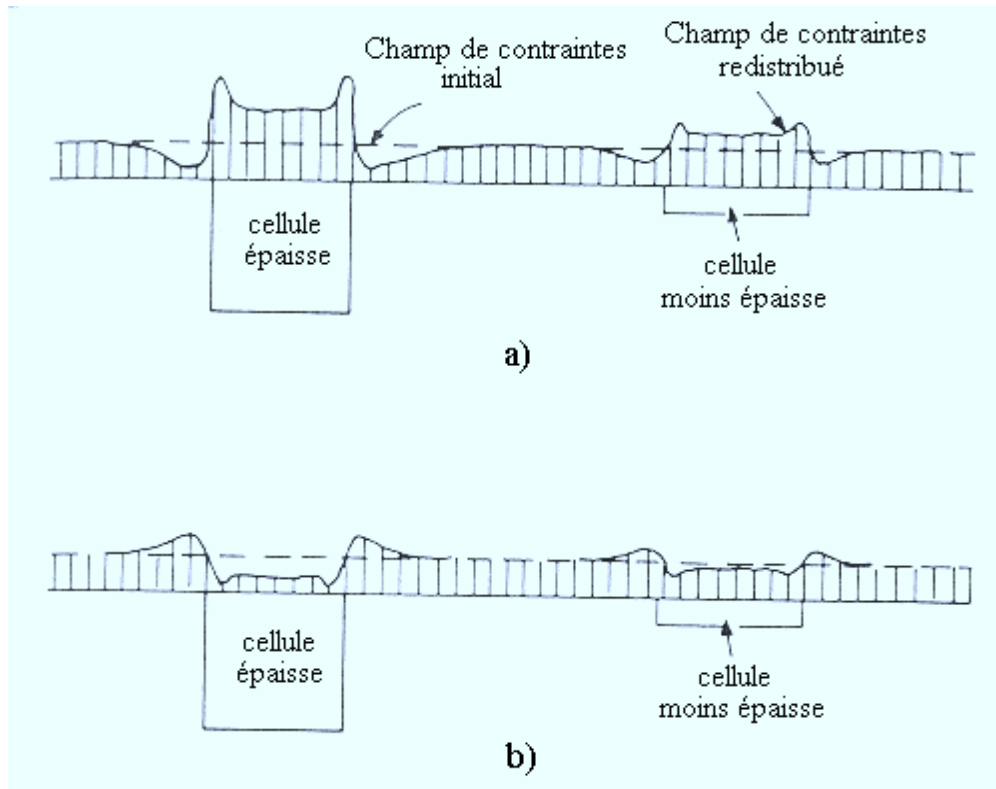


Fig. 1-17 : Influence de l'épaisseur de la cellule sur la redistribution des contraintes.
 a) Cellule plus rigide que le sol : sur-enregistrement ; b) Cellule moins rigide que le sol : sous-enregistrement (Dunnicliff, d'après Selig, 1964).

d) Rapport entre la déflexion maximale de la surface sensible et son diamètre (δ_{max}/d)

Les déformations de la surface sensible des capteurs sous l'action transmise par le sol (la « respiration » des capteurs) entraînent la redistribution des contraintes autour des capteurs et affectent donc leur discrétion (1.4.1.2). Ce phénomène accompagne aussi bien les mesures de pressions totales au sein d'un massif que les mesures de pressions totales à l'interface sol-structure.

Plusieurs auteurs ont constaté ce phénomène et proposent de limiter la flèche au centre du diaphragme pour améliorer l'exactitude de la mesure des pressions totales. Mais les conditions imposées sont assez différentes les unes des autres :

L'US Army Engineer Waterways Experiment Station (1944, cité par Clayton et Bica, 1993) propose d'imposer lors du dimensionnement des capteurs la condition suivante (voir Fig. 1-16) :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{1000} \quad (1.13)$$

L'étalonnage en présence du sable lâche d'Ottawa d'un capteur respectant cette condition a permis d'obtenir un facteur d'action du capteur systématiquement supérieur à 0,88, qui a été jugé satisfaisant.

Kallstenius et Bergau (1956, cités par Clayton et Bica, 1993) proposent une condition beaucoup plus restrictive basée sur les résultats d'étalonnage des capteurs en présence d'un gravier :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{10000} \quad (1.14)$$

Trollope et Lee (1961) soulignent que le déplacement de la membrane constitue la cause majeure de redistribution des contraintes tandis que la différence de raideur entre le capteur et le sol exerce, à leurs avis, une influence négligeable sur la redistribution des contraintes.

Ils ont montré que, si l'on respecte la condition :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{2000} \quad (1.15)$$

on obtient une courbe d'étalonnage linéaire en présence du sol.

Si la face active du capteur présente une flexibilité supérieure au seuil indiqué ci-avant, la courbe d'étalonnage prend une forme convexe à cause des effets de voûte développés dans le sol.

Hanna (1973) propose de limiter la flexibilité de la surface sensible des capteurs de pressions totales à une valeur intermédiaire entre les deux seuils fixés par les relations (1.9) et (1.10) :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{5000} \quad (1.16)$$

Memier (1980) considère que « la flèche de la membrane doit tendre vers zéro pour

que l'erreur d'enregistrement soit constante ».

Il analyse les résultats de l'essai d'étalonnage de plusieurs types des capteurs : mini-Glötzl, INSA-Glötzl, nouveau capteur Glötzl, LRPC d'Angers, Schaevitz, INSA-électrique. Parmi ces capteurs, on remarque les deux capteurs prototypes développés par l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA). Des dispositions particulières ont été prises lors de la conception de ces deux capteurs pour limiter la flexibilité de leur surface active.

Ainsi, la cellule de mesure de pressions totales INSA-Glötzl « n'est, en fait, qu'une boîte remplie de liquide et contenant un mini-capteur Glötzl ». Ce système de mesure à action indirecte permet de diminuer la déformation de la surface sensible de la cellule de mesure par rapport à celle du capteur mini-Glötzl qui est disposé à l'intérieur. Pour un niveau quelconque de la pression appliquée par le sol, la flèche centrale de la surface sensible extérieure reste ainsi égale à environ un quart de la flèche centrale de la membrane du capteur mini-Glötzl.

Le capteur INSA-électrique a été quant à lui conçu en imposant une condition très restrictive pour le mouvement de la membrane en contact avec le sol. Pour une pression maximale de service de 200 kPa, la flexibilité théorique de la surface sensible du capteur respecte la condition :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{200000} \quad . \quad (1.17)$$

Ce capteur prototype permet donc de satisfaire largement les recommandations les plus exigeantes présentées ci-avant.

e) Raideur relative sol-capteur (R)

Plusieurs études ont montré que la perturbation du mesurande générée par la présence du capteur dépend non seulement de ses caractéristiques de déformabilité, mais aussi des caractéristiques de déformabilité du sol qui l'entoure.

Les capteurs sont donc conçus en limitant la raideur relative sol-capteur qui est définie, dans la plupart des cas, par le rapport :

$$R = \frac{E_s d^3}{E_c t^3} \quad (1.18)$$

où :

E_s désigne le module d'élasticité du sol ;

E_c désigne le module d'élasticité du capteur calculé au centre de sa surface sensible suivant la direction du mesurande;

d désigne le diamètre de la membrane sensible ;

t désigne l'épaisseur de la membrane.

Torry et Sparrow (1967, cités par Brown, 1977 et Hanna, 1985) ont étudié théoriquement l'influence de la raideur relative sol-capteur et du rapport de forme du capteur sur la réponse des capteurs de pressions totales à membrane soumis à un champ des contraintes uniaxial.

Les résultats obtenus sont caractérisés par un facteur d'enregistrement du capteur C , défini comme le rapport entre la pression mesurée par le capteur et l'intensité de la pression appliquée dans le champ de contraintes uniaxial (Fig. 1-18).

A cette représentation graphique, on peut faire correspondre une estimation analytique approximative de l'erreur d'enregistrement, $C-1$, d'un capteur à diaphragme. Pour un capteur caractérisé par un rapport $d/D=0,6$, on a obtenu :

$$C - 1 = 0,55 \frac{e}{D} - 0,022 \frac{E_s}{E_c} \left(\frac{d}{t} \right)^3 \Leftrightarrow C = 1 + 0,55 \frac{e}{D} - 0,022 R \quad (1.19)$$

Sparrow et Torry (1966) ont appliqué cette relation pour corriger les résultats de mesure des pressions totales dans le cas d'une raideur relative sol-capteur respectant la condition $R < 1$.

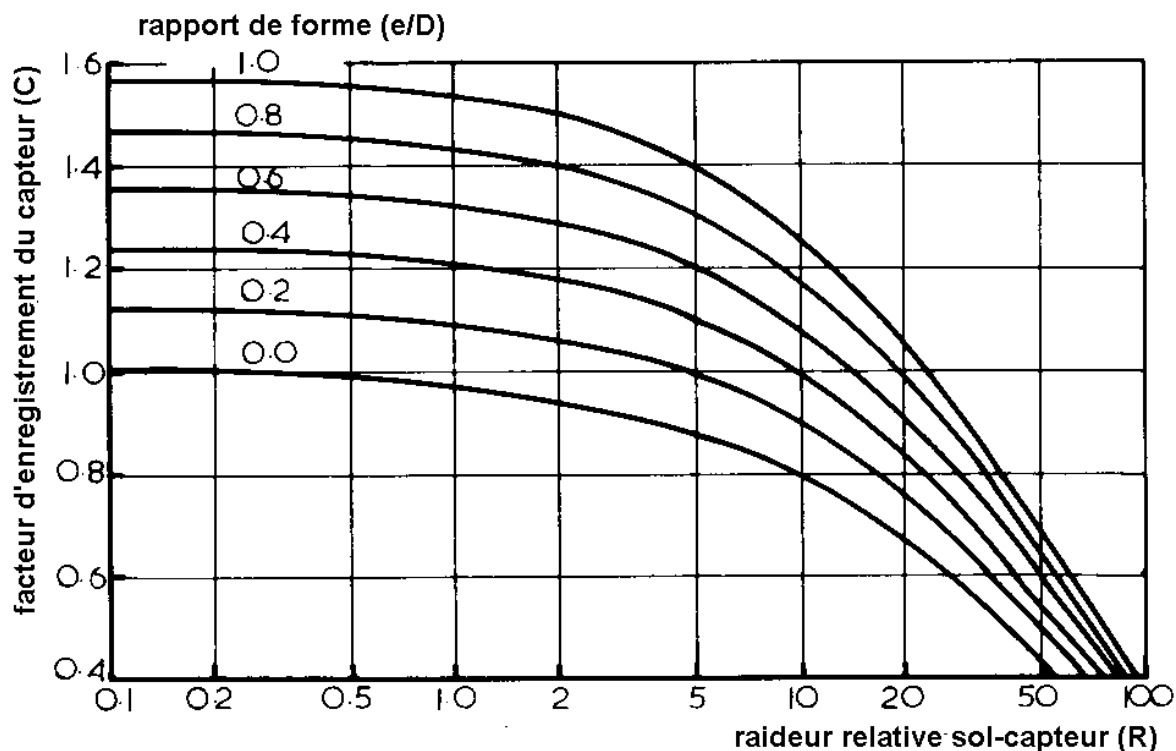


Fig. 1-18 : Effet sur la mesure des pressions totales de la raideur relative sol - capteur (d'après Torry et Sparrow, 1967, cités par Brown, 1977, et Hanna, 1985).

Ils ont utilisé un capteur à action directe et transducteur électrique résistif (quatre jauges montées en pont de Wheatstone complet) présentant un diamètre de la surface totale d'environ 6,4 cm, un rapport $d/D=0,6$ et un rapport de forme $e/D=0,17$, pour lequel ils ont estimé un sur-enregistrement de $5\% \pm 5\%$ pour un sol de module d'élasticité inférieur à 90 MPa.

Ils ont conclu que les capteurs à forme très plate et à surface sensible de raideur très importante présentent les meilleures performances de mesure.

Triandafilidis (1974), sur la base des résultats théoriques obtenus par Loh (Fig. 1-14), considère que les capteurs doivent présenter une raideur plus élevée que celle du sol ($E_c > E_m$) afin d'obtenir une erreur d'enregistrement peu sensible aux faibles variations de la raideur du sol.

Brown (1977), en s'appuyant sur les résultats obtenus par Torry et Sparrow pour caractériser l'effet de l'inclusion d'un capteur à membrane déformable dans un milieu élastique soumis à une sollicitation uniaxiale (Fig. 1-18), considère que la raideur

relative sol-capteur doit être inférieure à l'unité ($R < 1$) si l'on veut obtenir un facteur de réponse du capteur approximativement constant.

Par ailleurs, il présente les résultats obtenus par Fossberg (1970) sur la perturbation des contraintes autour d'un capteur à membrane soumis à une sollicitation biaxiale. Il remarque que le facteur de réponse du capteur baisse avec l'augmentation des contraintes latérales.

Weiler et Kulhawy (1982) remarquent que les études théoriques effectuées par Monfore (1950) et par Torry et Sparrow (1967) sur l'effet d'inclusion permettent de tirer des conclusions qualitatives importantes :

- ♦ un capteur de raideur plus importante que celle du sol présente une tendance à sur-enregistrer ;
- ♦ un capteur de raideur plus faible que celle du sol présente une tendance à sous-enregistrer.

Ils soulignent l'intérêt d'utiliser des capteurs de raideur plus importante que le sol afin d'obtenir une réponse peu sensible aux variations de la raideur du sol. Dans le cas contraire, la réponse des capteurs devient très sensible aux petites variations de la raideur du sol (partie droite du diagramme présenté sur la figure 1-18). Pour cette raison, il n'y a pas d'intérêt pratique à concevoir un capteur de raideur égale à celle du sol. Cette hypothèse a été confirmée par des essais en laboratoire.

Weiler et Kulhawy (1982) concluent qu'il faut concevoir des capteurs à membrane présentant une raideur relative sol-capteur inférieure à 0,5 ($R < 0,5$) pour obtenir des résultats de mesure satisfaisants.

Clayton et Bica (1993) critiquent les études indiquant comme critère de dimensionnement des capteurs seulement des relations de type (1.13) à (1.15), sans prendre en compte l'influence de la raideur du sol.

Ils rappellent l'étude d'Askegaard (1961), qui a mis en évidence que l'erreur d'enregistrement d'un capteur croît avec l'augmentation de la raideur du sol.

Pour mieux quantifier l'influence de la raideur du sol sur les performances de la mesure des pressions totales, Clayton et Bica ont procédé à une campagne d'étalonnage d'un capteur miniature ($d=24$ mm ; Fig. 1-9) installé à l'interface d'échantillons de sable de densité et donc aussi de raideurs variables.

Deux catégories de sable de Leighton Buzzard (sable fin et sable grossier) ont été testées à ce propos dans deux enceintes d'essai :

- ♦ chambre à parois rigides de type Rowe : les douze essais réalisés comportent un premier cycle de chargement – déchargement dans l'intervalle 0-50 kPa suivi d'un deuxième cycle dans l'intervalle 0-250 kPa ;
- ♦ chambre triaxiale : les 15 essais réalisés comportent un cycle de chargement – déchargement pour un chemin de variation des contraintes de type K_0 (la pression horizontale appliquée sur la surface latérale de l'échantillon est ajustée pour limiter les déplacements radiaux de l'échantillons à des valeurs inférieures à 10 μm) jusqu'à une pression verticale de 250 kPa.

On obtient, en effet, des écarts importants dans la réponse du capteur par rapport à une même pression appliquée dans la chambre en fonction du type et de la densité de l'échantillon de sable utilisé :

- ♦ dans la chambre de type Rowe, le facteur d'action du capteur (le rapport entre la pression mesurée par le capteur et la pression appliquée dans la chambre) varie dans le premier cycle entre 0,95 pour un sable fin lâche ($\gamma_d = 13,77$ kN/m³ ; $e= 0,928$) et 0,73 pour un sable grossier dense ($\gamma_d = 17,12$ kN/m³ ; $e= 0,548$) tandis que, dans le deuxième cycle, il varie entre 0,92 pour le sable fin lâche et 0,58 pour le sable grossier dense ;
- ♦ dans la chambre triaxiale, le facteur d'action du capteur varie en fonction du niveau de la charge verticale dans des limites encore plus larges, respectivement entre :
 - 0,98 pour un sable fin lâche ($\gamma_d = 13,53$ kN/m³ ; $e= 0,98$) et une pression appliquée comprise entre 44 et 109 kPa ;

et

- 0,19 pour un sable grossier dense ($\gamma_d = 17,51 \text{ kN/m}^3$; $e = 0,51$) et une pression appliquée comprise entre 203 et 250 kPa.

f) Rapport entre la surface active et la surface totale du capteur (A_a/A_t ou d^2/D^2)

Une conséquence de l'effet d'inclusion d'un capteur sur la mesure des pressions totales au sein d'un massif est l'apparition de concentrations des contraintes sur sa circonférence (points singuliers).

Plusieurs recherches orientées vers l'optimisation des caractéristiques des capteurs proposent de limiter leur surface active par rapport à leur surface totale en disposant un anneau rigide à l'extérieur. De cette manière l'erreur d'enregistrement est plus réduite parce que les concentrations de contraintes sont distribuées sur l'anneau et ne sont plus transmises au corps d'épreuve.

Monfore (1950, cité par Weiler et Kulhawy, 1982), suite à son analyse théorique, propose d'utiliser un anneau extérieur inactif pour réduire la surface active des capteurs à moins de 45 % de leur surface totale, ce qui correspond à la condition :

$$d/D < 0,67 \quad . \quad (1.20)$$

Peattie et Sparrow (1954, cités par Weiler et Kulhawy, 1982) ont vérifié expérimentalement ce phénomène, mais ils recommandent de réduire la surface active des capteurs à moins de 25 % de leur surface totale, ce qui correspond à la condition :

$$d/D < 0,50 \quad . \quad (1.21)$$

Triandafilidis (1974) souligne que l'utilisation d'un anneau rigide extérieur est souhaitable pour plusieurs raisons :

- ♦ l'anneau est de toute façon nécessaire à la fermeture latérale du boîtier que constitue le capteur ;
- ♦ l'anneau, par sa raideur transversale importante due à son épaisseur, $(D-d)/2$, prend

en charge les contraintes distribuées sur la face latérale de la cellule de mesure et ne transmet que des déformations très réduites au corps d'épreuve ; il limite ainsi la sensibilité aux charges latérales du capteur ;

- ♦ enfin l'anneau constitue la zone de répartition des concentrations de contraintes agissant au bord de l'inclusion et permet de limiter leur transmission à la surface active du capteur.

Il présente un tableau avec les caractéristiques physiques de cinq types de capteurs de pressions totales, parmi lesquels trois sont à membrane flexible et deux à piston rigide. En dehors d'un capteur à piston rigide dont la surface active est égale à la surface totale du capteur ($d/D=1$), les quatre autres satisfont le critère de Monfore (1.20), deux d'entre eux satisfaisant par ailleurs le critère de Peattie et Sparrow (1.21).

Whiffin et Morris (1962, cités par Memier, 1980) considèrent, d'une manière plus générale, qu'il faut limiter le rapport entre la surface active et la surface totale A_a/A_t non seulement par valeurs supérieures, mais aussi par valeurs inférieures. Cette condition est justifiée par la nécessité de réduire le report des contraintes qui s'effectue par effet de voûte sur l'anneau rigide.

Ils proposent de respecter, dans la conception des capteurs, la relation suivante :

$$\frac{1}{3} < \frac{A_a}{A_t} < \frac{1}{2} \quad (1.22)$$

qui correspond à :

$$0,57 < \frac{d}{D} < 0,71 \quad (1.22')$$

Cette relation est en contradiction avec la relation (1.16) proposée par Peattie et Sparrow.

g) Mode d'action du mesurande sur le corps d'épreuve du capteur

Le mode d'action du mesurande sur le corps d'épreuve, direct ou indirect, a des effets importants sur les performances des capteurs à membrane.

Les capteurs à action indirecte ont connu un développement important dans les trente dernières années en relation avec les recommandations de limiter au maximum la respiration des capteurs sous l'action du mesurande, mais aussi en relation avec le développement des technologies d'exécution des capteurs.

Memier (1980) présente les résultats d'une campagne d'essais de qualification de cinq types de capteurs de pressions totales, parmi lesquels trois capteurs prototype à action indirecte (deux développés par l'INSA de Lyon et un par la société Glötzl) conçus pour mieux répondre aux recommandations de limiter le mouvement relatif de leur surface sensible par rapport au sol.

Le capteur électrique de l'INSA de Lyon est à ce titre remarquable, puisque la raideur de sa surface sensible satisfait largement aux recommandations les plus exigeantes. Cette raideur élevée a été obtenue grâce à l'utilisation d'un système d'action indirecte sur un corps d'épreuve intérieur de type diaphragme (Fig. 1-7 b) présentant un diamètre d'environ 10 fois inférieur à celui de la surface sensible du capteur.

Memier précise que la raideur indiquée par la relation (1.12) a été évaluée théoriquement dans l'hypothèse d'une huile hydraulique incompressible en considérant que le volume de respiration de la surface sensible du capteur sous l'action d'une pression donnée est égale au volume de respiration du diaphragme constituant le corps d'épreuve intérieur.

Le remplissage du capteur INSA électrique a été réalisé avec une installation spéciale en prenant des précautions particulières pour éliminer complètement la présence des bulles d'air dans l'huile intérieure.

L'étalonnage en présence du sol de l'ensemble des capteurs disponibles a permis de constater des performances de mesure supérieures pour les capteurs à action indirecte par rapport aux capteurs à action directe.

Ainsi, les courbes d'étalonnages en présence du sol des capteurs à action indirecte et, en particulier, celles du capteur INSA- électrique, s'approchent d'une manière plus significative de leurs courbes d'étalonnage hydrostatique que celles des capteurs à

action directe. Elles indiquent, en particulier :

- ♦ une hystérésis d'une ampleur plus réduite ;
- ♦ une allure quasi-linéaire.

Enfin, Memier attire l'attention sur le fait que les capteurs à action indirecte sont susceptibles de présenter un comportement moins satisfaisant sous l'action des variations de température du fait de caractéristiques de déformabilité thermique du liquide hydraulique différentes de celles du boîtier.

Boulebnane (1996) présente les résultats d'une campagne d'essai de plusieurs types de capteurs dans trois types d'enceintes d'étalonnage en présence du sol (chambre à paroi rigide, appareillage triaxial et centrifugeuse). Son analyse met en évidence l'influence importante du mode d'action sur la réponse des capteurs (Fig. 1-19).

Il caractérise de la manière suivante la réponse des capteurs à action directe :

- ♦ comportement non linéaire ;
- ♦ forte hystérésis ;
- ♦ écart très important par rapport à la courbe d'étalonnage hydrostatique ;
- ♦ contrainte résiduelle importante mesurée en fin de déchargement.

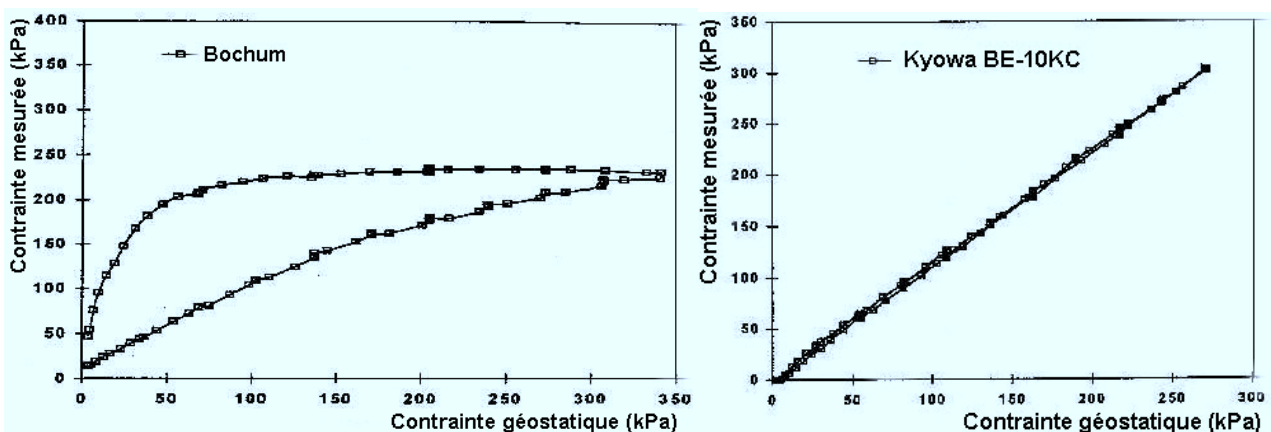


Fig. 1-19 : Courbes d'étalonnage des capteurs enfouis dans le sol en centrifugeuse.

a) capteur à action directe (Bochum) ; b) capteur à action indirecte (Kyowa).

Les capteurs à action indirecte présentent un comportement nettement amélioré par

rapport aux capteurs à action directe. Les courbes d'étalonnage en présence du sol pour ce type de capteurs (Fig. 1-19 b) sont caractérisées de la manière suivante :

- ♦ allure quasi-linéaire ;
- ♦ hystérésis négligeable ;
- ♦ contraintes résiduelles très faibles.

Boulebnane explique le comportement très différent des deux types de capteurs par l'influence du mouvement de la membrane extérieure sur la perturbation du mesurande : la flexibilité de la membrane est plus importante pour les capteurs à mode d'action direct que pour les capteurs à action indirecte.

h) Sensibilité aux contraintes agissant sur la surface latérale du capteur

Les contraintes normales agissant dans la direction perpendiculaire à la direction de mesure des pressions totales peuvent perturber la mesurande suite à la mise en place des capteurs. Deux phénomènes physiques concourent à cette perturbation :

- ♦ la rotation des contraintes latérales ;
- ♦ la sensibilité transversale des capteurs.

1. Rotation des contraintes latérales

Askegaard (1981) utilise les résultats de l'analyse théorique de l'effet d'inclusion (établie dans l'hypothèse d'une inclusion ellipsoïdale de raideur infinie) dans l'interprétation des mesures de contraintes totales dans les sols.

Il caractérise le champ de contraintes homogène agissant dans le milieu élastique infini à distance de l'inclusion par le tenseur $[\sigma_{ij}^A]$ et le champ de contraintes perturbées agissant aux interfaces de l'inclusion par le tenseur $[\sigma_{ij}]$. En supposant que le capteur permet la mesure des composantes du tenseur σ_{33} , σ_{31} et σ_{32} (capteur de contraintes normales et tangentielle), il exprime les composantes du mesurande sous la forme :

$$\begin{aligned}\sigma_{33} &= A\sigma_{33}^A + B(\sigma_{22}^A + \sigma_{11}^A) \\ \sigma_{23} &= C\sigma_{23}^A\end{aligned}\tag{1.23}$$

où :

A, B et C sont des paramètres précisés par le calcul théorique ; ils dépendent du coefficient de Poisson, du rapport de forme de l'ellipsoïde et du rapport entre les modules d'élasticité de l'inclusion et du milieu l'entourant.

Askegaard utilise ces relations pour la conception de capteurs de pressions totales et de contraintes tangentielles utilisables dans les milieux granulaires.

Pour ce qui concerne le capteur de pressions totales, les valeurs théoriques des deux paramètres A et B (A=0,93 et B=0) sont vérifiées lors de l'étalonnage en présence de sable (A=0,96 avec un écart type de 0,02 ; B=0,01 avec un écart type de 0,01).

Weiler et Kulhawy (1982) confirment par une étude indépendante l'existence du phénomène de rotation des contraintes latérales mis en évidence par Askegaard. Ils présentent la technique proposée par Bates pour déterminer l'effet des contraintes latérales dans les mesures de pressions totales.

En disposant deux capteurs l'un à côté de l'autre, avec leurs faces de mesure orientées à angle droit, ils proposent une méthode permettant de corriger l'effet de la rotation des contraintes latérales.

Ainsi, pour déterminer les contraintes normales σ_x et σ_y agissant à l'endroit de mesure avant d'introduire les capteurs, on doit résoudre le système :

$$\begin{aligned}\sigma_x^m &= R_u \sigma_x + \mu \sigma_y \\ \sigma_y^m &= R_u \sigma_y + \mu \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\end{aligned}\tag{1.24}$$

où :

σ_x^m et σ_y^m représentent les valeurs des contraintes mesurées par les deux capteurs,

R_u représente le rapport d'enregistrement uniaxial équivalent déterminé en laboratoire pour le type de sol et

μ représente la fraction des contraintes latérales affectée par le phénomène de rotation, donnée par la relation (1.5).

2. Sensibilité transversale des capteurs

Les contraintes agissant sur la surface latérale des capteurs peuvent perturber la mesure des contraintes agissant sur la surface sensible du capteur en provoquant la sollicitation de son corps d'épreuve en compression radiale.

Les déformations ainsi engendrées se superposent à celles provenant de la sollicitation en flexion du corps d'épreuve (générée par l'action du mesurande) et se retrouvent non filtrées dans le signal de sortie du capteur.

Pour diminuer (voir annuler) la sensibilité aux contraintes latérales, les capteurs sont protégés en disposant un anneau extérieur de raideur importante et en prenant des dispositions constructives afin de ne pas transmettre au corps d'épreuve des déformations significatives par rapport aux déformations dues au mesurande.

Brown et Pell (1967) présentent un capteur à action directe et transducteur à quatre jauges de déformation montées en pont de Wheatstone complet (à 4 branches actives) pour lequel les jauges sont collées dans deux directions radiales perpendiculaires (Fig. 1-7/a).

Les jauges sont implantées de telle sorte que les déformations de traction enregistrées par les deux jauges centrales sont égales aux déformations de compression enregistrées par les deux autres jauges. On obtient de cette façon une grandeur physique de sortie (différence de potentiel électrique) maximale ainsi qu'une diminution de la sensibilité aux contraintes latérales de la cellule.

Weiler et Kulhawy (1982) remarquent la sensibilité aux contraintes transversales des nouvelles jauges circulaires (Fig. 1-8b). Ils ont développé un système comportant deux anneaux extérieurs pour isoler le corps d'épreuve de l'action des contraintes latérales. L'anneau extérieur est très rigide et l'espace entre les deux anneaux est rempli d'un matériau très flexible. De cette manière, les auteurs considèrent qu'ils ont éliminé entièrement la sensibilité transversale de leur capteur.

1.4.2.2 Techniques de mise en place des capteurs

Lors de mise en place des capteurs de pressions totales, il faut s'assurer de ne pas modifier d'une façon significative les caractéristiques du sol et notamment celles qui sont en relation avec sa rigidité (indice de vides, densité, etc.).

Ainsi, si la rigidité locale du sol autour du capteur est différente de celle qui existerait en l'absence du capteur, la distribution des contraintes transmises dans cette zone change de la manière suivante :

- ♦ si la rigidité locale autour du capteur est plus importante, on constate une augmentation des contraintes transmises dans cette zone (effet de point dur) ;
- ♦ si la rigidité locale autour du capteur est moins importante, on constate une diminution des contraintes transmises dans cette zone (effet de point faible).

Par ailleurs, les techniques de mise en place des capteurs peuvent également entraîner une perturbation des contraintes autour de la cellule.

Plusieurs études ont été consacrées à l'influence des conditions d'installation des capteurs au sein d'un massif ou à l'interface sol-structure.

a) Capteurs enfouis dans les sols

Taylor (1948) considère que l'écart entre les pressions mesurées et les pressions attendues est causé, essentiellement, par quatre facteurs majeurs :

- ♦ l'hétérogénéité des propriétés des sols (« dispersion inhérente ») et, en particulier, celle de la densité et de la raideur locale, qui se traduit, pour une situation donnée, par une différence entre la pression transmise localement et la pression moyenne ;
- ♦ l'effet d'inclusion du capteur, qui présente une raideur différente de celle du massif de sol qui l'entoure ;
- ♦ la précision insuffisante des instruments de mesure du fait des limites techniques des capteurs disponibles ;
- ♦ les caractéristiques locales de la densité et de la raideur du sol autour du capteur,

qui peuvent différer de celles du massif du fait de procédures de compactage modifiées pour protéger les capteurs.

Ce dernier facteur a été dénommé par Taylor « effet de poche » (« pocket action »). Il souligne l'importance d'obtenir pour le sol environnant le capteur des caractéristiques de densité et de compressibilité les plus proches possible des valeurs moyennes du massif.

Hadala (1967, cité par Memier, 1980) analyse et évalue certaines méthodes de mise en place des capteurs en fonction de leur réponse dans une cuve d'étalonnage à paroi rigide.

Il considère que le choix de la méthode d'installation doit s'adapter au type de sol.

Pour les mesures au sein d'un massif sableux, il analyse trois méthodes :

- ♦ «capteur foncé» : le capteur est posé et enfoncé pour que sa surface sensible arrive au niveau du sol ; ensuite le capteur est recouvert d'une couche que l'on compacte ;
- ♦ «capteur posé en creux» : on réalise une réservation pour le capteur ; après sa mise en place, il est recouvert d'une couche qui est ensuite compactée ;
- ♦ «capteur posé » : le capteur est simplement posé sur le sable et puis recouvert d'une couche non compactée.

Pour les mesures de pressions totales dans les argiles, il analyse l'influence des méthodes suivantes :

- ♦ «capteur posé en creux sans couverture» : on réalise une réservation de la taille du capteur et on continue l'empilement des couches après sa pose ;
- ♦ «capteur posé en creux avec couverture» : on réalise une réservation de la taille du capteur et le capteur est ensuite recouvert par de l'argile compactée ;
- ♦ «capteur posé dans un puits avec remblaiement» : le capteur est déposé au fond d'un trou profond puis le trou est comblé par de l'argile compactée.

Pour chaque méthode de mise en place, Hadala reprend plusieurs fois l'essai

d'étalonnage d'un même capteur de façon à diminuer l'influence de l'hétérogénéité du sol dans les résultats obtenus. Il caractérise les différentes méthodes d'installation utilisées en fonction du facteur d'action du capteur F , défini comme le rapport entre la contrainte moyenne mesurée par le capteur pour chaque méthode de mise en place et l'estimation de la contrainte appliquée à son niveau dans la chambre d'étalonnage.

Pour les capteurs enfouis dans le sable, la méthode «capteur posé» conduit à une réponse caractérisée par un facteur d'action du capteur égal à 1,08, considérée comme satisfaisante. Les deux autres méthodes d'installation conduisent à une réponse ($F=1,37$ - «capteur foncé» et $F=1,50$ - «capteur posé en creux») très éloignée de celle correspondant à la pression appliquée dans l'enceinte d'étalonnage ($F=1,00$).

Les mesures des contraintes dans les argiles paraissent moins sensibles à la méthode d'installation choisie. Les valeurs du facteur d'action du capteur obtenues pour les trois méthodes sont satisfaisants ($F=0,90$ - «capteur posé en creux sans couverture», $F=1,10$ - «capteur posé en creux avec couverture» et $FAC=0,97$ - «capteur posé dans un puits avec remblaiement»).

D'une manière générale, on remarque que les méthodes d'installation les plus simples sont celles qui influencent le moins les résultats de mesure.

Boulebnane, Lareal, Garnier et Cottineau (1994) analysent l'influence sur la mesure des contraintes au sein d'un échantillon de sable centrifugé des deux modes de pose des capteurs «posé simplement» et «capteur foncé». Cette analyse est basée sur l'interprétation des essais d'étalonnage en centrifugeuse des deux types de capteurs à action indirecte Kyowa BE-C et Geokon.

L'erreur de mesure, calculée comme la différence entre la pression (calculée) transmise au niveau du capteur dans l'échantillon de sable centrifugé et la pression mesurée par le capteur, permet d'apprécier la meilleure méthode de pose.

Les résultats des essais d'étalonnage montrent que l'erreur de mesure est bien plus faible pour les capteurs posés en surface (-10 à +25 %) que pour les capteurs installés par la méthode du fonçage (+40 à +70%).

Dunnicliff (1988) présente les recommandations proposées dans un rapport de la Société Internationale de Mécanique des Roches (1981) sur l'installation des capteurs de pressions totales au sein d'un massif de sol.

Pour les capteurs installés au fond d'une excavation, les capteurs doivent être installés dans des cavités ayant des dimensions environ 2 fois plus grandes que celles des capteurs. Les cavités doivent être exécutées manuellement en prêtant une attention particulière à ce qu'elles restent bien lisses, au fond d'une excavation dont la pente des talus est inférieure à 1/5 ; le fond de l'excavation doit être bien compacté et horizontal. Les capteurs doivent être séparés par un intervalle minimal de 1m.

Après leur installation, il faut vérifier l'alignement, l'horizontalité ainsi que le bon fonctionnement de chaque capteur. Le remplissage de chaque cavité doit se faire, si possible, avec un sol provenant de l'excavation et dont la teneur en eau et la densité en place sont similaires à celles du terrain avoisinant. De plus, il est recommandé que les particules de sol les plus grosses soient enlevées.

Ensuite, le sol doit être remblayé et compacté manuellement, en trois couches successives d'épaisseur 10 à 20 cm. Après ce premier remblaiement, il est possible d'utiliser un équipement mécanique souple, les compacteurs vibrants lourds pouvant être utilisés seulement après que l'épaisseur du remblai au-dessus des cellules ait atteint 2 m.

Quand les capteurs sont installés dans un massif rocheux, les cavités doivent être plus grandes. On doit alors prendre soin de reconstituer minutieusement le massif rocheux de telle sorte que les particules les plus fines soient en contact avec la surface active de la cellule et les plus grosses se situent sur la partie supérieure de la poche.

Garnier, Ternet, Cottineau, Brown (1999) ont étudié l'influence sur la mesure des pressions totales de l'opérateur intervenant à la mise en place des capteurs. Cette étude a été réalisée lors d'une campagne d'essais de qualification de la réponse de huit capteurs de même type soumis à une action contrôlée transmise par la centrifugation d'échantillons de sable de Fontainebleau ($\varphi \approx 37$ degrés) de densité très homogène ($\gamma_d =$

15,5 ±0,1 kN/m³ ;

Dans un premier essai, on a fait appel à quatre opérateurs différents (un opérateur expérimenté et trois opérateurs non expérimentés) pour installer les huit capteurs dans une même situation de mesure. Chaque opérateur a eu pour mission la mise en place de deux capteurs en les plaçant tout simplement sur la surface de sable (méthode de pose).

L'essai a comporté quatre cycles de chargement-déchargement dans un domaine de variation de l'accélération centrifuge de 0 à 30g, ce qui correspond à un domaine des pressions appliquées au niveau des capteurs de 0 à 93 kPa. On a pu ainsi calculer le facteur de réponse de chaque capteur, égal au rapport entre la pression mesurée et la pression appliquée par le sol centrifugé à leur niveau.

Les résultats de cet essai ont mis en évidence une influence considérable du facteur « opérateur » sur la réponse des capteurs :

- ♦ dans le cas des trois opérateurs non expérimentés, le facteur de réponse des capteurs diffère d'un opérateur à l'autre d'une façon importante et reste assez éloigné de la valeur unitaire recherchée (pour exemple, dans le premier cycle, on obtient les valeurs 1,15 ; 1,20 ; 1,28 ; 1,12 ; 0,87 et 0,98) ;
- ♦ la réponse des deux capteurs mis en place par l'opérateur expérimenté correspond à un facteur de réponse presque parfait (il varie entre 0,98 et 1,01 pour les deux capteurs et les quatre cycles).

Dans un deuxième essai, la mise en place des huit capteurs a été réalisée en utilisant seulement deux opérateurs, dont celui expérimenté et un deuxième opérateur non expérimenté qui a été entraîné en préalable. Cette fois-ci seulement six capteurs ont été mis en place avec leur surface active en position horizontale ; les deux autres capteurs ont été installés avec leur surface sensible en position verticale, afin de mesurer les pressions horizontales et d'avoir ainsi accès à la valeur expérimentale du coefficient de pression de terres au repos.

Les résultats de ce deuxième essai ont permis de constater une amélioration du facteur de réponse des capteurs mis en place par l'opérateur entraîné et de confirmer les

aptitudes de l'opérateur expérimenté aussi bien pour la pose des capteurs avec leur surface active horizontale que pour leur pose avec leur surface active verticale.

Pour minimiser l'influence du facteur opérateur, les auteurs ont conçu un dispositif de mise en place des capteurs permettant d'appliquer un mode opératoire prédéfini et répétable, en cohérence avec celui appliqué manuellement par l'opérateur expérimenté. Ce mode opératoire est applicable seulement pour la mise en place des capteurs avec leur surface active horizontale :

- ♦ les capteurs sont d'abord posés manuellement sur la surface de sable (ajustée en préalable de façon qu'elle soit plane et horizontale), en prenant la précaution de n'induire aucun effort supplémentaire sur la surface support en dehors de celui transmis par le poids du capteur ;
- ♦ le dispositif de mise en place, qui présente une forme adaptée à celle des capteurs et un poids ajustable par l'utilisation de masses additionnelles, est ensuite posé sur les capteurs ;
- ♦ enfin, on procède tout doucement à une rotation du disque supérieur du dispositif de mise en place du capteur en entraînant en rotation en même temps le capteur, sans appliquer aucune pression verticale additionnelle.

Deux autres essais de qualification des résultats de mesure avec quatre capteurs installés avec le dispositif spécial de mise en place et quatre capteurs installés par l'opérateur expérimenté ont été menés en testant par ailleurs l'influence des poids additionnels (masses variant entre 0,240kg et 0,688 kg) et des différentes techniques de rotation (rotation incomplète de ± 15 degrés ou ± 25 degrés ou deux ou trois rotations complètes excentriques).

Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant un poids additionnel de 0,240 kg ou de 0,326 kg, avec deux ou trois rotations excentriques. Il a été ainsi possible de prouver l'influence importante de la technique de mise en place des capteurs sur les mesures de pressions des sols et de mettre en évidence la nécessité de normaliser les procédures de mise en place des capteurs.

b) Capteurs installés à l'interface sol-structure

Boulebnane, Lareal, Garnier et Cottineau (1994) considèrent que les capteurs de pressions totales installés à l'interface d'un mur ou d'un plancher donnent des mesures correctes « si les encastremements sont parfaits, si la surface sensible du capteur affleure parfaitement à la surface du massif d'encastrement, si la rigidité du mur ou du plancher est inchangée et si la déflexion de la surface sensible du capteur est limitée ».

Pour mettre en évidence l'influence de la raideur de la structure support sur la réponse des capteurs, ils procèdent à la qualification en centrifugeuse de la réponse de deux capteurs Kyowa BE-10KC encastrés respectivement dans une plaque en acier et dans une plaque en bois.

La réponse du capteur encastré dans la plaque métallique suit fidèlement la pression transmise au niveau de la surface active du capteur par la centrifugation de l'échantillon de sable. Par contre, dans le cas du capteur encastré dans la plaque en bois, le capteur indique un fort sous-enregistrement des contraintes appliquées, qui a été jugé dû à la raideur insuffisante de la plaque support.

Filz et Duncan (1992) présentent les résultats de mesures de pressions totales à l'interface d'un mur de soutènement en semi-grandeur (Fig. 1-20).

Deux types de capteurs de pressions totales à action indirecte (11 capteurs Glötzl à transducteur électrique utilisant comme agent hydraulique une huile et quatre capteurs Carlson remplis de mercure) ont été installés dans les deux panneaux centraux de la paroi instrumentée (Fig. 1-20b).

Une attention particulière a été accordée à l'usinage des niches et à la mise en place des capteurs, de telle sorte que leurs faces actives soient situées dans le plan d'interface du mur avec le sol.

L'étalonnage des capteurs a été réalisé en présence d'un fluide après leur installation dans la paroi instrumentée, en appliquant une pression d'air à l'intérieur d'une membrane de caoutchouc fixée à l'extérieur des capteurs.

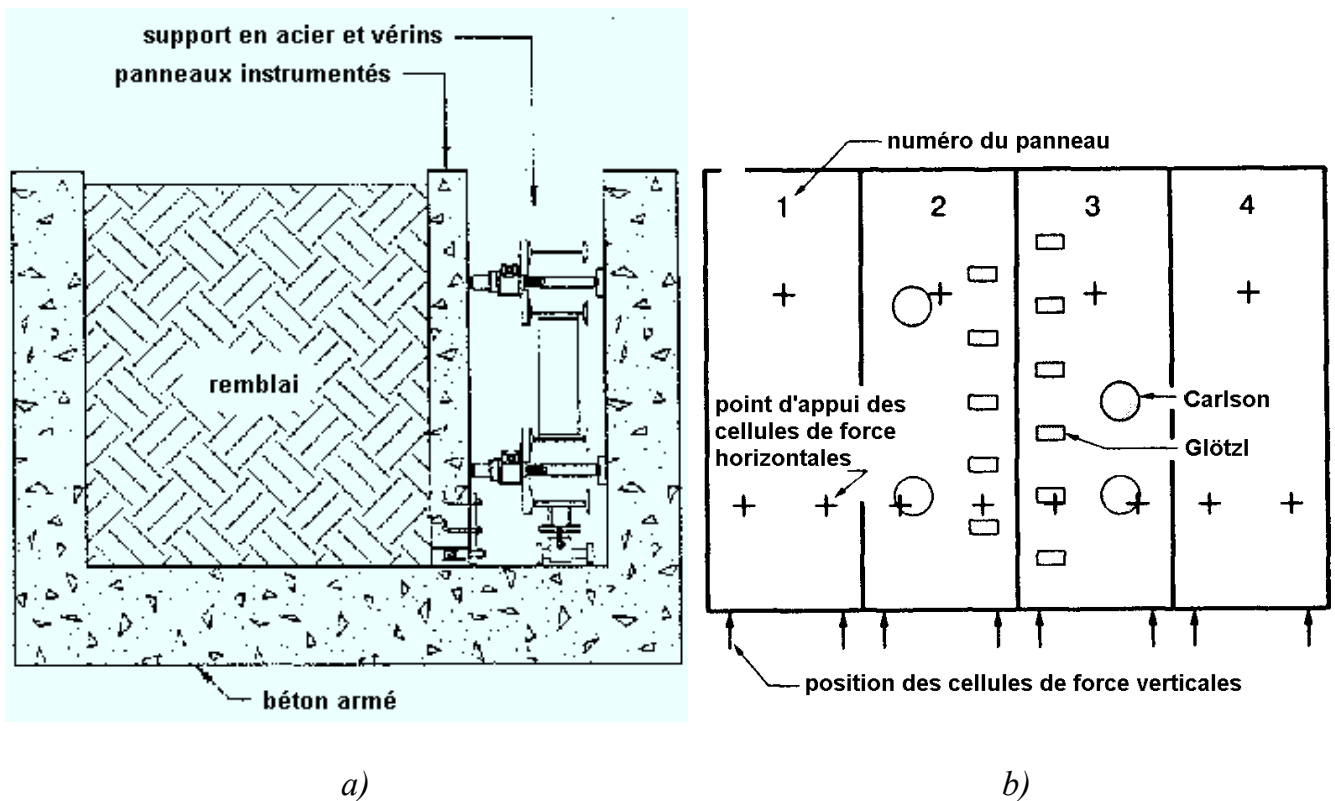


Fig. 1-20 : Structure de mur de soutènement en semi-grandeur (Virginia Tech Instrumented Retaining Wall Test Facility - d'après Filz et Duncan, 1992). a) Section transversale contenant la paroi instrumentée ; b) Disposition des capteurs de pression de sol et des cellules de force dans le plan de la paroi instrumentée.

Chaque panneau instrumenté est soutenu horizontalement par l'intermédiaire de trois cellules de force et verticalement par l'intermédiaire de deux cellules de force (cales dynamométriques) dont les réactions d'appui sont reprises par un cadre rigide en béton armé (Fig. 1-20 b).

Cette disposition permet de procéder directement sur l'ouvrage en semi-grandeur à un étalonnage en présence du sol.

Seize essais de cet ouvrage en semi-grandeur ont été réalisés avec pour objectif principal d'étudier l'influence du compactage sur les pressions horizontales transmises à l'ouvrage. Pour les quatorze premiers essais, le matériau de remblai utilisé était un sable limoneux de Yatesville tandis que, pour les deux derniers essais, le matériau utilisé était un sable de Light Castle.

Le sol, conditionné au préalable à une teneur en eau uniforme (comprise entre 9 et 14 %, à l'exception de deux derniers essais pour lesquels le sable était sec), a été répandu manuellement par couches successives. Le compactage de chaque couche a été effectué soit par une plaque vibrante (essais de 1 à 12), soit par une pilonneuse accompagnée d'une plaque vibrante (essais 13 et 14) soit par une pilonneuse (séries d'essai 15 et 16). L'épaisseur des couches après compactage était d'environ 15 cm.

Pour l'essai 10, la paroi instrumentée a subi en préalable un traitement de lubrification (afin d'étudier son effet sur les efforts de cisaillement transmis à la paroi) tandis que, pour les essais 13 à 16, l'interface de la paroi avec le sol a été étanché afin d'empêcher le transfert de l'eau du sol dans le béton.

Pour diminuer l'effet de la variation de la température sur les résultats de mesure, le sol et le mur ont été stockés dans la même chambre avant chaque essai. La température a été surveillée dans les niches dans lesquelles ont été logés les capteurs, ce qui a permis de constater des variations dans les limites de $\pm 1^\circ\text{C}$ sur la durée de chaque essai.

Après la mise en œuvre du remblai, celui-ci a été conservé sur la paroi pendant environ sept jours avant que le sol ne soit excavé pour passer à l'essai suivant.

Pour chaque essai une bonne cohérence a été observée durant la phase de mise en œuvre du remblai entre les résultats des mesures de pressions totales et les résultats des mesures de force. La différence entre les résultantes des mesures effectuées des deux côtés de la paroi instrumentée est restée dans les limites de $\pm 15\%$.

Pour les essais 5 à 16, qui ont fait l'objet d'une étude particulière des résultats de la mesure des pressions totales, l'étalonnage in situ des capteurs réalisé à la fin de la mise en œuvre du remblai a permis d'obtenir un facteur d'enregistrement variable d'un essai à l'autre entre 0,86 et 1,15.

Les deux auteurs considèrent que la réponse des capteurs n'est pas influencée d'une façon importante par les caractéristiques du sol en soulignant que les capteurs présentent une raideur importante de leur surface active. Ils considèrent que la dispersion des résultats est inhérente à la mesure des pressions totales et nécessite

l'utilisation d'un nombre important de capteurs pour obtenir des résultats représentatifs.

Dans les jours suivant l'exécution complète du remblai, une dérive des mesures de pressions totales a été observée pour les essais réalisés en présence d'un sol humide.

Cette dérive des pressions mesurées n'était pas accompagnée par une dérive similaire des mesures dynamométriques. Elle se manifeste toujours dans le même sens, en indiquant une réduction systématique des pressions mesurées par les capteurs.

L'ampleur de cette dérive est en relation avec la teneur en eau du sol et le traitement appliqué à l'interface sol-paroi. Elle est plus petite pour une teneur en eau plus réduite et pour une interface lubrifiée ou étanche.

Filz et Duncan considèrent que cette dérive est causée par la migration de l'eau du sol dans la structure d'essai en béton armé, qui provoque un gonflement du béton. L'action de ce gonflement génère une sollicitation du corps des capteurs qui se traduit par une réduction de la pression agissant dans leur agent hydraulique (huile ou mercure).

Les auteurs remarquent que le traitement appliqué à l'interface sol-paroi pour certains essais ne fait que limiter l'ampleur et la vitesse de migration de l'eau dans le béton, qui continue par vaporisation et condensation dans les pores du béton.

De plus, après l'excavation du sol, les auteurs ont constaté une dérive résiduelle des mesures de pression tandis que les cellules de force indiquent l'annulation de la force horizontale.

Filz et Duncan mettent ainsi en évidence un nouveau phénomène capable d'influencer la mesure des pressions à l'interface sol – béton : la migration de l'eau du sol dans le béton et son effet sur la sollicitation transmise sur le corps du capteur.

1.4.2.3 Conditions d'étalonnage en présence de sol

Plantema (1953) considère que l'étalonnage hydrostatique d'un capteur des pressions totales n'est pas suffisant. Il faut également prévoir son étalonnage en présence du sol, afin de mettre en évidence la perturbation des contraintes causée autour du capteur par

sa compressibilité différente.

Plantema fait appel à une chambre triaxiale dont les dimensions (diamètre de 0,95 m et hauteur de 1m) sont de 3 à 4 fois supérieures au diamètre du capteur et qui permet d'appliquer des chemins de chargement correspondant à différents rapports entre la pression verticale et la pression latérale.

La pression verticale est appliquée en haut de la chambre par un coussin en caoutchouc rempli d'eau, qui est chargé par un vérin par l'intermédiaire d'une plaque. Le sol est placé dans un cylindre de caoutchouc supporté latéralement par de l'eau et reposant en bas sur un deuxième coussin d'eau.

La chambre a été conçue de cette manière pour éliminer tout frottement latéral du sol avec l'enceinte. Elle permet de vérifier cette hypothèse par l'analyse de l'équilibre de l'échantillon : la différence entre la résultante des pressions mesurées dans les deux coussins haut et bas doit être égale au produit du poids volumique moyen de l'échantillon par sa hauteur. Cette relation est bien vérifiée dans la chambre, mais Plantema considère que l'élimination des frottements est le problème le plus difficile à résoudre pour l'étalonnage en présence de sol.

La mise en place du sol est réalisée par une technique de pluviation pour obtenir une densité homogène à travers le volume de l'échantillon. On utilise une répandeuse spéciale qui permet de conserver une hauteur de chute du sol constante durant la fabrication de l'échantillon. La pluviation est interrompue pour la mise en place du capteur au centre de l'échantillon.

Pour mettre en évidence l'influence de la densité du sol sur la réponse d'un capteur, Plantema étalonne le capteur en présence d'un sable lâche, en présence d'un sable dense et à l'interface d'une plaque en béton avec un sable dense. Il constate une tendance au sous-enregistrement du capteur en présence du sable dense et à l'interface de la plaque en béton. Les différences constatées entre les courbes d'étalonnage du capteur ainsi obtenues et sa courbe d'étalonnage en présence d'un fluide sont attribuées à la compressibilité différente du capteur par rapport au sable.

Trollope et Lee (1961) présentent les résultats de l'étalonnage en présence de sol de quatre types de capteurs de contraintes totales à membrane.

Ils soulignent la nécessité de disposer d'une chambre suffisamment large pour diminuer l'influence des effets de bord dans la distribution de contraintes transmises. Comme Plantema, ils considèrent que le frottement entre les parois et le sol constitue la source principale d'erreur lors de l'étalonnage des capteurs en présence de sol.

Trollope et Lee ont utilisé une chambre d'essai cylindrique de diamètre voisin de 0,90 m, avec un dispositif indépendant pour la mesure des pressions transmises au niveau de l'embase inférieure.

Ainsi, ils ont pu déterminer la résultante des efforts de frottement mobilisés à l'interface verticale de l'échantillon avec l'enceinte d'étalonnage en fonction de la pression transmise à la partie supérieure de la chambre. Ils considèrent que leur système d'étalonnage permet d'estimer la pression moyenne transmise dans le sol au niveau du capteur avec une erreur limitée à $\pm 2\%$.

Par ailleurs, ils définissent une zone d'influence des phénomènes d'interaction entre le sol et la membrane déformable du capteur qui correspond à un cône ayant une base égale à la surface active du capteur et une surface latérale inclinée à 60 degrés par rapport à sa base, ce qui nécessite de réaliser l'étalonnage dans un échantillon présentant une hauteur de l'ordre de deux fois le diamètre du capteur.

Pour mieux qualifier les mesures de pressions totales, Trollope et Lee ont répété l'essai d'étalonnage des deux capteurs 50 fois en présence d'un sable et 16 fois en présence d'une argile.

Ils ont obtenu un facteur de réponse moyen égal respectivement à 93,1% (écart type de 6,1%) et 99,2% (écart type de 8,6%) pour les deux capteurs installés dans un sable (le meilleur facteur correspond au capteur présentant une flexibilité plus réduite de la surface active) et à 103,5% (écart type de 7,4%) et 98,2% (écart type de 5,6%) pour les capteurs installés dans l'argile.

Par conséquent, ils considèrent que la courbe d'étalonnage d'un capteur de pressions

totales en présence d'un sol doit être obtenue par le dépouillement des résultats d'un nombre important d'essais. Cette courbe dépend alors seulement de la flexibilité de la membrane (définie comme le rapport entre la flèche centrale de la membrane et la pression moyenne appliquée).

Par ailleurs, Trollope et Lee mettent en évidence un comportement différent du capteur au déchargement par rapport au chargement. Cette différence se manifeste par la présence d'une hystérésis dans la courbe d'étalonnage. Ils considèrent que le mouvement de retour élastique de la membrane sous l'effet de la baisse de la pression appliquée est à l'origine des surpressions enregistrées durant le déchargement. Ils démontrent que l'ampleur de l'hystérésis augmente à peu près linéairement avec la flexibilité de la membrane et qu'elle est environ deux fois plus importante pour les mesures dans les sables que pour les mesures dans les argiles.

Ils analysent, enfin, le comportement des capteurs sous 10 cycles de chargement et déchargement et concluent que les capteurs ayant un comportement satisfaisant pour le premier cycle présentent également un comportement satisfaisant pour les cycles suivants.

Levillain (1973) présente les résultats de qualification de la réponse des capteurs Glötzl en présence d'un sable de dune.

Il étudie d'abord la réponse de trois capteurs différents (surface sensible rectangulaire, 10 x 20 cm, ou circulaire, D=5 cm, et système de mesure à contre-pression hydraulique ou pneumatique) dans une buse de béton armé (diamètre de 0,80 m et profondeur de 0,90m).

Levillain réalise trois essais (un essai pour chaque capteur) comportant plusieurs (quatre ou cinq) cycles de chargement – déchargement dans le domaine de variation de la pression appliquée 0-200 kPa. Pour chaque essai, le sable a été mis en place dans des conditions similaires par couches de faible épaisseur compactées manuellement par une dame en obtenant un poids spécifique relativement constant (17 kN/m^3). Les capteurs ont été installés à la même profondeur de 15 cm par rapport à l'arase des échantillons.

On constate pour les trois essais la tendance générale des capteurs à sous-enregistrer la pression appliquée avec des différences importantes dans leur réponse d'un cycle à l'autre.

Levillain conclut que « l'essai de chargement dans une enceinte rigide n'est pas fidèle » et procède alors à l'étalonnage d'un capteur Glötzl en présence du même sable de dune dans une grande enceinte triaxiale (diamètre de 0,75 m et profondeur de 0,65 m). La pression verticale est transmise par deux coussins en caoutchouc remplis d'eau tandis que la pression horizontale est transmise par un coussin déformable rempli d'air, permettant ainsi de limiter « les effets de paroi ».

Deux essais ont été réalisés dans l'enceinte triaxiale avec le même capteur (à contre-pression hydraulique et surface sensible rectangulaire 10 x 20 cm) :

- ♦ un premier essai comportant quatre cycles de chargement et déchargement dans le domaine 0-400 kPa, pour mesurer la pression verticale transmise dans le sol à une profondeur de 16 cm ;
- ♦ un deuxième essai comportant trois cycles de chargement et déchargement dans le domaine 0-100 kPa, pour mesurer la pression horizontale transmise au centre de l'échantillon.

Levillain constate un sur-enregistrement d'environ 20 % par rapport à la pression appliquée verticalement (surface active horizontale) dans les quatre cycles et de l'ordre de 6% par rapport à la pression horizontale appliquée dans l'enceinte (surface active verticale). Levillain n'étudie pas la répétabilité de cet essai.

Triandafilidis (1974) considère que les performances de mesure des capteurs de pressions totales doivent être évaluées par un essai d'étalonnage en présence du sol.

Il considère que les dimensions et la forme de l'enceinte d'étalonnage utilisée à cet effet présentent une importance majeure par opposition au cas d'un étalonnage hydrostatique, du fait que les milieux pulvérulents présentent la caractéristique de supporter et de transmettre des contraintes de cisaillement. Ainsi, pour permettre la mobilisation complète des contraintes de cisaillement par les phénomènes de voûte qui

s'y développent, les dimensions de la chambre d'étalonnage doivent être au moins six fois le diamètre du capteur.

Il présente la coupe axiale verticale de la chambre d'étalonnage à paroi rigide utilisée par Abbott (1967), de diamètre et de hauteur égales à 30,5 cm, ce qui permet l'étalonnage de capteurs de diamètre inférieur ou égal à 5 cm (Fig. 1-21 a), ainsi qu'une courbe d'étalonnage type d'un capteur (à transducteur électrique) pour un cycle de chargement – déchargement.

Triandafilidis caractérise la réponse du capteur en présence du sol par les caractéristiques de la courbe d'étalonnage :

- ♦ non linéarité (L_s/E_h) ;
- ♦ hystérésis (H_s/E_h) ;
- ♦ sur-enregistrement ou sous-enregistrement du capteur en présence du sol ($\pm E_0/E_h$) ;
- ♦ facteur de réponse du capteur en présence du sol ($1 \pm E_0/E_h$).

où L_s , L_s , E_h , E_0 , et H_s sont définis sur la figure 1-21.

Cette courbe d'étalonnage en présence du sol se trouve au-dessus de la courbe d'étalonnage hydrostatique pour un capteur présentant une raideur supérieure à celle du sol et au-dessous de la courbe d'étalonnage hydrostatique dans le cas contraire.

L'auteur énumère les paramètres qui influencent la transmission de la pression appliquée dans l'enceinte jusqu'au niveau de la surface sensible du capteur :

- ♦ la géométrie de la chambre d'étalonnage ;
- ♦ les caractéristiques de frottement entre le sol et les parois de la chambre ;
- ♦ la profondeur d'installation du capteur.

Triandafilidis cite les études d'Abbott (1967) et Hadala (1967), qui présentent différentes solutions pour le traitement de l'interface entre l'échantillon de sol et les parois de l'enceinte afin de diminuer les effets du frottement sur la transmission de la pression appliquée.

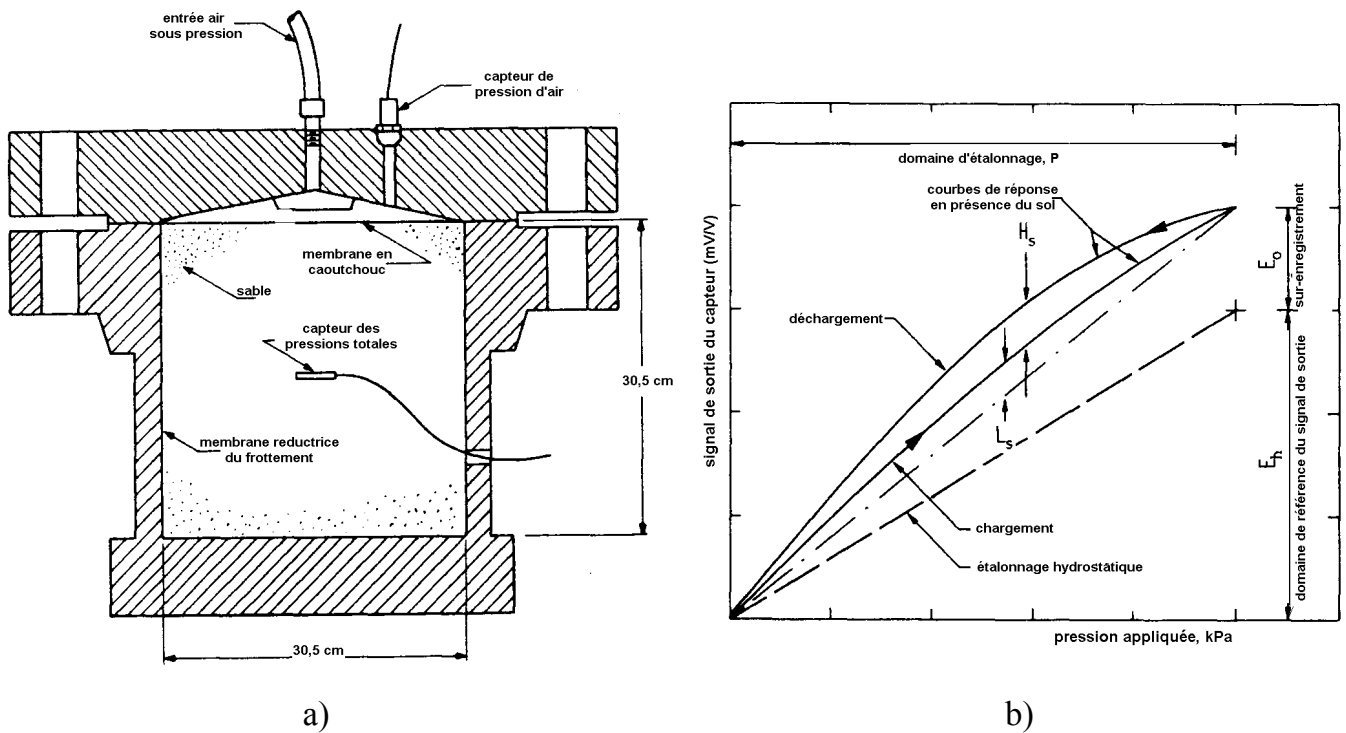


Fig. 1-21 : Essai de qualification d'un capteur de pressions totales en présence du sol
 a) Chambre d'étalonnage à paroi rigide ; b) Courbes de réponse en présence de sol

Il note les conditions d'étalonnage de la chambre d'Abbott, qui permet de transmettre dans le sol, au niveau du capteur, une pression au moins égale à 95 % de la pression appliquée au-dessus de l'échantillon en respectant les conditions suivantes :

- ♦ la chambre doit présenter des embases et des parois latérales rigides et un rapport hauteur sur diamètre inférieur à 2 ;
- ♦ l'échantillon doit être isolé des parois latérales de la chambre par une membrane de caoutchouc graissée.

Une telle chambre permet d'obtenir un champ de déformations uniaxial dans l'échantillon et, par conséquent, les contraintes verticales transmises dans l'échantillon peuvent être obtenues en fonction de la pression de l'air appliquée en haut de la chambre par une relation simple.

Il souligne que la réponse d'un capteur de pressions totales dépend non seulement de ses caractéristiques physiques mais aussi de celles du milieu et des caractéristiques du champ des contraintes à l'endroit de la mesure. Par conséquent, un tel capteur doit être

étalonné pour chaque application.

Brown (1977) considère que l'étalonnage des capteurs en laboratoire est absolument nécessaire avant leur utilisation in situ. Il faut s'assurer lors de l'étalonnage en présence du sol de reproduire le plus fidèlement possible la situation de mesure réelle et, en particulier, de reproduire :

- ♦ la teneur en eau et les caractéristiques de compactage du sol ;
- ♦ la technique de mise en place des capteurs ;
- ♦ les caractéristiques du champ de contraintes appliqué.

Il remarque dans la littérature l'utilisation de deux types d'enceintes d'étalonnage pour qualifier les performances des capteurs au sein d'un massif de sol :

- ♦ chambre à paroi rigide (permettant de reproduire des conditions d'essai de type K_0) ;
- ♦ chambre triaxiale (permettant d'imposer différents rapports entre la pression verticale et la pression horizontale appliquées sur les faces de l'échantillon).

Ces enceintes présentent en général un grand diamètre (allant de 225 mm à 950 mm pour huit chambres) et les capteurs sont installés au centre de l'échantillon. Cette disposition est nécessaire pour diminuer l'influence des effets de bord dans la transmission des pressions appliquée.

Brown considère qu'il faut répéter l'essai au minimum 6 fois pour la même situation de mesure afin de permettre d'estimer la dispersion de la réponse du capteur et de pouvoir obtenir une courbe d'étalonnage représentative.

Memier (1980) présente les résultats des essais d'étalonnage de plusieurs types des capteurs en présence d'un sable fin (0,2 mm).

Il analyse d'abord l'influence de la profondeur d'installation d'un capteur électrique Schaevitz sur sa courbe d'étalonnage, obtenue dans la cuve d'étalonnage à parois rigides de l'INSA de Lyon (Fig. 1-22).

Le sable a été « déversé d'une hauteur constante (50 cm) et n'est pas compacté », le poids volumique moyen obtenu étant de l'ordre de 14 kN/m^3 . Pour dix profondeurs de mise en place des capteurs dans l'axe vertical de la cuve variant entre 0 et 60 cm, on constate des écarts importants entre les courbes obtenues et une réponse des capteurs en déchargement caractérisée par une hystérésis d'ampleur importante.

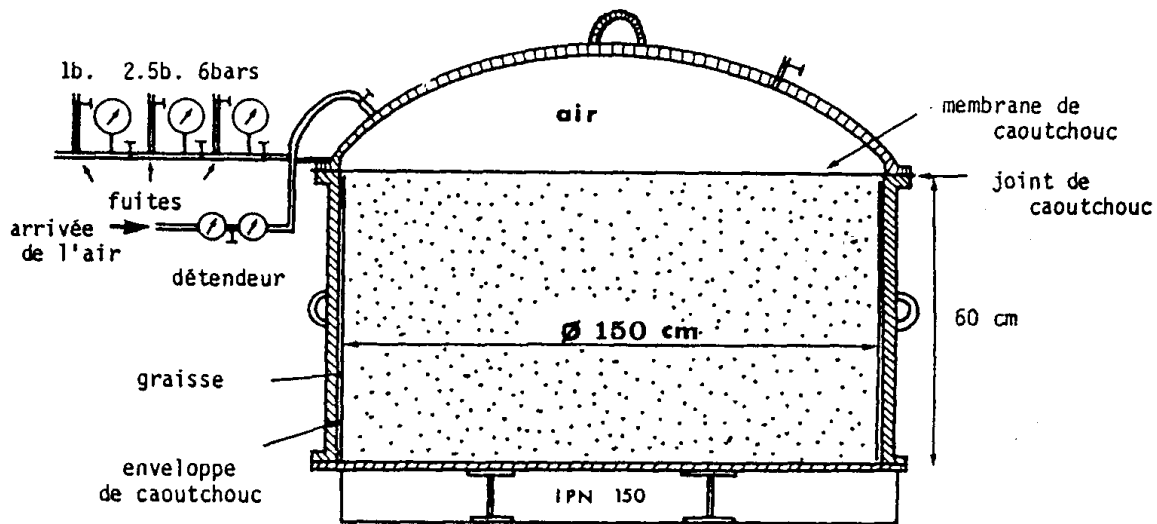


Fig. 1-22 : Cuve d'étalonnage de l'INSA de Lyon (d'après Memier, 1980)

Memier considère que le capteur et la cuve d'étalonnage contribuent à ces écarts mais qu'il est « délicat de dissocier les causes ». Il faut noter qu'un seul essai d'étalonnage a été réalisé pour chaque position du capteur.

Dans un deuxième temps, Memier a étudié l'influence de la position d'installation des capteurs dans un même plan horizontal de la cuve à parois rigides en présence d'un même sable.

Il a posé vingt capteurs à une profondeur de 30 cm dans la cuve (parmi lesquels 12 capteurs mini-Glötzl à contre-pression pneumatique installés suivant trois rayons de la cuve).

L'essai a consisté en trois cycles de chargement et déchargement pour un domaine de variation de la pression appliquée 0-180 kPa. Pour les trois cycles, une dispersion importante des réponses des capteurs a été constatée, y compris pour les capteurs disposés à une même distance de l'axe (le facteur de réponse des capteurs par rapport à

la pression appliquée estimée dans l'hypothèse d'une distribution uniforme varie entre 0,52 et 1,22) mais les courbes d'étalonnage obtenues présentent une meilleure linéarité que celles des capteurs Schaevitz.

Memier explique les écarts importants constatés dans la réponse des capteurs par l'influence de leur position dans la cuve mais aussi par l'interaction entre le sol et la membrane du capteur, qui est soulevée par la contre-pression appliquée pour effectuer les mesures.

Quant à l'influence de la position du capteur, Memier considère que « quelle que soit la sophistication d'une enceinte d'étalonnage, on ne peut pas prétendre connaître a priori la distribution des contraintes au sein du milieu ». Il constate que la réponse des capteurs est affectée par leur position sur le rayon de la cuve en dépit des difficultés de l'analyse causée par la dispersion importante des résultats de mesure :

- ♦ au bord de la cuve, à cause des frottements qui ne sont pas totalement éliminés, on constate une diminution de la pression transmise ;
- ♦ à mi-rayon de la cuve, on constate une augmentation de la pression transmise par rapport à la pression appliquée ;

Memier compare pour le deuxième et le troisième cycle d'essai la résultante des pressions mesurées par les 20 capteurs avec la pression appliquée dans l'enceinte et constate un écart réduit pour le chargement (inférieur à 4,2 %) et un écart de plus en plus élevé pour le déchargement (10% pour une pression appliquée de 70 kPa jusqu'à 43 % pour une pression appliquée de 30 kPa).

En conclusion, il apparaît qu'une cuve assise sur un coussin d'eau pourrait améliorer la distribution des pressions transmises dans la chambre (l'adoption du modèle de la chambre de Plantema est ainsi proposée).

Memier présente aussi les résultats de l'étalonnage des trois capteurs prototype INSA-Glötzl pneumatiques à action indirecte (Fig. 1-5 b), pour lesquels la « contre pression qui s'applique à la membrane en contact avec le sol est (...) constante (...) contrairement à ce qui se passe pour un mini-Glötzl ». Il met en évidence une

amélioration de la réponse des capteurs prototype par rapport aux capteurs Schaevitz et mini-Glötzl, caractérisée par une « meilleure estimation des pressions appliquées et une hystérésis moins forte.

Ensuite, Memier se penche sur la qualification de la réponse des nouveaux capteurs Glötzl à action indirecte, qui ont été conçus en tenant compte des résultats de la qualification des capteurs prototype INSA-Glötzl. Pour les nouveaux capteurs, le fabricant a prévu, en complément par rapport aux capteurs prototype, une précontrainte de 0,5 bars dans le coussin de pression, ce qui ne permet l'ouverture de la soupape qu'uniquement au moment de la mesure. On constate une réponse excellente du capteur disposé dans l'axe de la cuve à une profondeur de 15 cm à condition que la contre-pression de l'air soit appliquée en réglant le débit de l'air à des valeurs précises.

Pour vérifier ses résultats, Memier refait l'étalonnage du nouveau capteur Glötzl dans la mini-cuve de l'INSA de Lyon (diamètre de 30 cm et hauteur de 30 cm), qui est équipée de deux coussins d'eau, en partie supérieure et en partie inférieure de l'échantillon, permettant de contrôler la pression appliquée.

Cette chambre d'étalonnage est toujours une enceinte à paroi rigide qui présente l'avantage d'une meilleure uniformisation de la réaction verticale transmise à l'échantillon de sol. Ce dernier est isolé des parois latérales de l'enceinte par une gaine en caoutchouc dont la surface extérieure est graissée. Les courbes d'étalonnage du nouveau capteur Glötzl dans la mini-cuve varient toujours en fonction du réglage du débit d'air dans le circuit de mesure du capteur.

Memier présente également les courbes d'étalonnage des trois capteurs prototype du LRPC d'Angers (contre-pression pneumatique), obtenues dans la chambre triaxiale d'Angers (diamètre de 75 cm et hauteur de 64 cm) en présence d'un sable (diamètre moyen des particules de 0,5 mm et $\gamma=17 \text{ kN/m}^3$).

Ces résultats sont présentés parallèlement aux courbes d'étalonnage obtenues pour les trois capteurs dans la cuve de l'INSA en présence d'un autre sable, plus fin et moins dense (diamètre moyen des particules de 0,1 mm et $\gamma=14 \text{ kN/m}^3$). Il constate une

réponse nettement supérieure des capteurs prototype de LRPC d'Angers dans la chambre triaxiale (« bonne linéarité, très faible hystérésis et légère sur-enregistrement »). La différence importante ainsi constatée est difficile à expliquer, mais on considère que le débit d'air utilisé dans les circuits de mesure des capteurs à contre-pression est susceptible d'influencer notablement les résultats de la mesure (pour les essais dans la cuve de l'INSA, on a utilisé un débitmètre Glötzl avec un débit d'air de 10,5 l/h et pour les essais dans la chambre triaxiale on a utilisé un débitmètre manuel avec un débit d'air de 5 l/h).

Dans un dernier temps, Memier présente les courbes d'étalonnage des capteurs électrique prototype de l'INSA (Fig. 1-7 b) obtenues dans la mini-cuve de l'INSA en présence d'un sable fin. Il remarque la très bonne linéarité et notamment la répétabilité des résultats obtenus pour ce type de capteur « d'un cycle à l'autre, d'un essai à l'autre et d'un capteur à l'autre ».

Dunnicliff (1988) considère que l'étalonnage hydrostatique des capteurs est suffisant pour des mesures effectuées dans une argile molle. En dehors de ce cas, il estime nécessaire d'étalonner chaque capteur dans une grande chambre en présence d'un échantillon de sol en respectant le plus fidèlement possible les procédures de mise en place des capteurs et les caractéristiques du sol en place. Il considère que le diamètre de la chambre doit être, au moins, égal à trois fois et, de préférence, à cinq fois le diamètre du capteur.

Dunnicliff souligne l'influence de la technique de mise en place des capteurs sur leur réponse en s'appuyant sur les résultats de l'étude effectuée par Hadala dans une chambre d'essai à parois rigides. Il apparaît que la méthode de mise en place des capteurs peut entraîner, à elle seule, une erreur d'enregistrement allant jusqu'au 40%. Il considère, par ailleurs, que la dispersion des résultats obtenus est moins grande pour les procédures d'installation les plus simples.

Filz et Duncan (1993) présentent une technique d'étalonnage des capteurs directement sur ouvrage, à l'interface d'un mur de soutènement en semi-grandeur avec le sol. Cette technique d'étalonnage est basée sur la mesure indépendante et exacte de l'effort

horizontal résultant appliqué par le sol à la paroi instrumentée à l'aide de cellules de force qui prennent appui sur une autre paroi très rigide située derrière. Cette méthode nécessite un nombre important de capteurs de pressions totales à étalonner en même temps et permet d'appliquer une correction unique pour l'ensemble des capteurs. Les valeurs individuelles indiquées par les capteurs des pressions totales sont ajustées par division par un facteur d'enregistrement défini comme étant égal au rapport entre la force horizontale résultant de l'intégration des pressions mesurées par les capteurs de contraintes totales et la résultante des efforts horizontaux mesurés par les cellules de force (à l'équilibre de la paroi instrumentée, les deux résultantes doivent être égales).

Cette méthode d'étalonnage in situ des capteurs repose sur la fiabilité des mesures dynamométriques, qui ne sont pas affectées par le sol. Elle présente l'avantage d'éviter la reconstitution de la situation de mesure en laboratoire, qui s'avère toujours un problème difficile à résoudre de façon satisfaisante.

Amrani (1993) analyse la distribution des contraintes appliquées à l'intérieur d'un échantillon de sable d'Hostun dans la cuve de l'INSA de Lyon (Fig. 1-22) par l'intermédiaire d'une fondation rigide en béton (disque de diamètre de 0,40 m et épaisseur de 0,12 m) chargée à l'aide d'un vérin.

Le remplissage de la cuve est effectué par l'intermédiaire d'un tube en déversant le sable avec une hauteur de chute nulle pour obtenir un état lâche (densité moyenne de $14,1 \text{ kN/m}^3$).

Il utilise 20 capteurs mini-Glötzl pour mesurer les contraintes transmises par la fondation dans l'échantillon de sable à différentes profondeurs et à différentes distances par rapport à l'axe verticale de la cuve. Sept capteurs sont disposés sous la fondation dans un même plan horizontal situé à une profondeur de 3 cm.

« Les capteurs sont simplement posés sur le sable, puis leurs faces sensibles sont recouvertes d'une pastille en géotextile non tissé ». La fondation a été coulée en place sur une feuille en plastique posée sur le sable. Des grains de sable sont collés sur la surface inférieure de cette feuille afin d'assurer un contact rugueux sol-fondation.

Amrani procède à trois essais de chargement de la fondation comportant chacun quatre cycles de chargement – déchargement et analyse la réponse des capteurs par rapport à la pression verticale moyenne transmise par la fondation.

Il constate que la réponse moyenne de sept capteurs installés à 3 cm sous la fondation suit très fidèlement la pression appliquée par la fondation sur le sol.

Amrani analyse la répétabilité globale de l'essai en comparant, pour chaque niveau de chargement appliqué, la résultante des contraintes mesurées sur la surface de la fondation pour les trois essais effectués. La différence des résultats obtenus pour les trois essais est inférieure à 30%, ce que lui permet d'apprécier que la répétabilité globale de l'essai est satisfaisante.

Ensuite, il analyse la répétabilité locale des mesures ponctuelles des contraintes effectuées pour les trois essais pour chaque niveau de chargement. Amrani conclut que « la répétabilité locale est bonne pour les capteurs proches du centre de la fondation ». L'écart maximal entre les pressions mesurées et les pressions appliquées obtenu reste inférieur à 30%.

Clayton et Bica (1993) analysent les résultats de l'étalonnage de capteurs miniatures (diamètre de la surface active de 2,4 cm ; action directe et transducteur à effet Hall ; Fig. 1-9). L'étalonnage a été réalisé en situation d'interface avec un sable au moyen de deux types d'enceintes :

- ♦ chambre d'étalonnage à parois rigides de type Rowe (échantillon de diamètre de 25,2 cm et hauteur de 4,2 cm) ;
- ♦ chambre triaxiale (échantillon de diamètre de 10 cm et hauteur de 21 cm).

Les auteurs remarquent que la chambre de Rowe assure un rapport entre la hauteur de l'échantillon et son diamètre de 1/6, ce qui permet d'éliminer l'influence du frottement du sol contre les parois latérales sur les pressions transmises sur l'embase inférieure de la chambre qui contient le capteur.

Par ailleurs, « le rapport entre le diamètre de la surface sensible du capteur et la

hauteur de l'échantillon est de 0,57 (...) permettant le développement des effets de voûte dans le sol au-dessus de la membrane ».

Quant à la chambre triaxiale, elle a été équipée de capteurs de déplacement à effet Hall permettant la surveillance des déplacements horizontaux radiaux de l'échantillon durant l'essai. Le rapport entre la pression horizontale et la pression verticale appliquées à l'échantillon a ainsi pu être ajusté pour permettre la réalisation des essais de type K_0 .

Les auteurs indiquent que l'utilisation de l'équipement triaxial pour appliquer d'autres chemins de variation de la pression transmise à l'échantillon que le chemin de type K_0 conduit à l'apparition de contraintes verticales non uniformes à l'interface entre l'échantillon et les embases de la chambre, du fait du développement de contraintes de cisaillement sur cette interface.

Les essais préliminaires d'étalonnage des capteurs effectués avec l'appareillage triaxial pour des chemins de chargement autre que K_0 (pour exemple, l'essai isotrope) avaient de ce fait conduit à des résultats aberrants.

Par conséquent, ils ont étudié l'influence de la raideur du sable et du niveau du chargement sur la réponse des capteurs installés à l'interface des échantillons de sable seulement pour des essais de chargement de type K_0 .

Pour obtenir de tels chemins dans la chambre triaxiale, les déplacements radiaux ont été contrôlés et limités à 10 μm durant la réalisation de chaque essai.

Clayton et Bica ont mis en évidence l'influence très importante de la densité du sol et du type du sol sur les courbes d'étalonnage obtenues et ils considèrent en conséquence que, pour la conception des capteurs à membrane déformable, il faut limiter la raideur relative sol-capteur.

Si l'on compare la réponse des capteurs obtenue dans les deux chambres, on obtient :

- ♦ pour un sable fin lâche, le facteur de réponse du capteur est de 0,92 dans la chambre à parois rigides ($\gamma_d = 13,77 \text{ kN/m}^3$ et $e=0,924$ pour un domaine de

variation de la pression appliquée 0-250 kPa) tandis que, dans la chambre triaxiale, le facteur de réponse du capteur est de 0,96 ($\gamma_d = 13,70 \text{ kN/m}^3$ et $e=0,93$ pour un domaine de variation de la pression appliquée 189-247 kPa) ;

- ♦ pour un sable grossier dense, le facteur de réponse du capteur est de 0,58 dans la chambre à parois rigides ($\gamma_d = 17,19 \text{ kN/m}^3$ et $e=0,541$ pour un domaine de variation de la pression appliquée 0-250 kPa) tandis que, dans la chambre triaxiale, le facteur de réponse du capteur est de 0,48 ($\gamma_d = 17,30 \text{ kN/m}^3$ et $e=0,53$ pour un domaine de variation de la pression appliquée 197-250 kPa) ;

Boulebnane (1996) présente les résultats de l'étalonnage de plusieurs types de capteurs à action directe et indirecte en présence de sable d'Hostun ou de Fontainebleau. Pour avoir une image plus complète de l'influence de l'enceinte d'étalonnage sur les résultats obtenus, il a utilisé trois types de chambres d'essai :

- ♦ une chambre à paroi rigide équipée de deux embases permettant la transmission de la pression appliquée à l'échantillon par des coussins d'air (échantillons cylindriques de diamètre de 0,21 m et de hauteur de 0,19 m) ;
- ♦ un appareillage triaxial (échantillons cylindriques de diamètre de 0,15 m et de hauteur de 0,30 m) ;
- ♦ un conteneur centrifugé à surface libre (échantillons de forme quasi-parallélépipédique de longueur de 1,20 m, de largeur de 0,80 m et de hauteur de 0,36 m).

Dans la chambre à paroi rigide, il étudie la réponse de quatre capteurs Kyowa BE-10KC (diamètre total de 3 cm) à action indirecte disposés symétriquement par rapport à l'axe de l'enceinte à une profondeur de 2 cm dans un échantillon de sable d'Hostun. Cinq essais ont été ainsi réalisés, comportant chacun cinq cycles de chargement – déchargement dans un domaine de pression appliquée 0-500 kPa pour évaluer l'influence de la densité de l'échantillon et des cycles sur la réponse des capteurs.

Boulebnane constate un sur-enregistrement systématique de la pression appliquée par tous les capteurs. La dispersion de la réponse des quatre capteurs pour chaque essai

reste inférieure à 10 %. La valeur moyenne du « facteur d'action du capteur » en présence du sol (rapport entre la pression mesurée par le capteur et la pression appliquée dans l'enceinte) pour l'ensemble des quatre capteurs et des cinq essais effectués est égale à 1,15.

Il obtient la meilleure réponse des capteurs pour une masse volumique du sable de $1,6 \text{ t/m}^2$, mais il remarque qu'« il aurait été nécessaire de multiplier le nombre d'essais pour le confirmer ». L'influence de la densité du sable n'est pas clairement mise en évidence du fait que les cinq densités testées étaient très proches (entre 1,55 et 1,70).

Quant à l'effet des cycles sur la réponse des capteurs, Boulebnane observe une réduction de très faible ampleur du facteur de réponse des capteurs d'un cycle à l'autre (entre 3% et 6% pour le dernier cycle par rapport au premier cycle).

Boulebnane a étudié ensuite l'influence du frottement entre le sol et les parois de l'enceinte dans la transmission de la pression appliquée dans l'échantillon de sable.

A cette fin, il a effectué deux essais, avec et sans frottement (en utilisant une membrane en caoutchouc sur la paroi lubrifiée de l'enceinte) en plaçant dans le sol un capteur à 2 cm du bord et un autre au centre de la chambre.

Il constate avec les deux capteurs un même sur-enregistrement systématique de la pression appliquée pour les deux essais effectués et il observe que le frottement sol-paroi influence la pression transmise dans le sol aussi bien au centre de l'échantillon que près de sa surface latérale. Il estime cette influence à environ 10 % de la pression appliquée au centre de l'échantillon et à environ 12 % à 2 cm du bord vertical.

Dans l'appareillage triaxial, Boulebnane a étudié la réponse des trois capteurs Kyowa BE-10KC en présence d'un échantillon de sable d'Hostun de masse volumique $1,6 \text{ t/m}^3$. Les capteurs sont installés dans l'axe de l'échantillon de la chambre à trois profondeurs, leur surface active étant orientée dans les directions horizontale, verticale, ou inclinée à 45 degrés afin d'évaluer l'influence de leur position et de l'inclinaison de leur surface active sur leur réponse. Quatre configurations de pose des capteurs ont été testées dans l'enceinte triaxiale :

- ♦ série 1 : les capteurs sont disposés avec leur surfaces active horizontale à des profondeurs de 2 cm, de 14 cm (au centre) et de 26 cm ;
- ♦ série 2 : les capteurs sont disposés avec leur surface active verticale à des profondeurs de 2 cm, de 14 cm (au centre) et de 26 cm ;
- ♦ série 3 : deux capteurs sont disposés au centre de l'échantillon avec leur surface active orientée dans les directions horizontale et verticale, respectivement, tandis qu'un troisième capteur est installé en bas de l'échantillon avec sa surface active orientée verticalement ;
- ♦ série 4 : les capteurs sont disposés avec leur surface active inclinées à 45 degrés par rapport à la direction horizontale, à des profondeurs respectives de 2 cm, 14 cm (au centre) et 26 cm ;

Chaque série de mesures a été refaite quatre fois, l'échantillon étant reconstitué en respectant le même mode opératoire. Le chemin de variation des contraintes appliquées dans l'enceinte a été isotrope jusqu'à une pression de 200 kPa et ensuite déviatorique jusqu'à une pression verticale appliquée à l'échantillon d'environ 750 kPa.

L'analyse de la répétabilité, tout en étant peu représentative (seulement 4 répétitions de chaque essai), met en évidence un écart maximal inférieur à 10 % de la pression mesurée par rapport à la valeur moyenne mesurée. Compte tenu de la dispersion réduite des résultats de mesure, Boulebnane considère que l'essai d'étalonnage satisfait le critère de répétabilité et l'influence des différents paramètres d'étude est en conséquence évaluée par rapport à la valeur moyenne de la pression mesurée.

Boulebnane conclut que la position optimale du capteur se trouve au centre de l'échantillon tant pour les capteurs orientés horizontalement que pour les capteurs orientés verticalement.

Pour les capteurs avec leur surface active inclinée à 45 degrés par rapport aux directions principales des contraintes, on constate un écart important des résultats en fonction de la position du capteur sur la hauteur de l'échantillon. La position optimale, jugée par rapport à la valeur du facteur d'action du capteur, reste toujours la position

centrale, pour laquelle on trouve une sur-estimation inférieure à 8%.

Sous la sollicitation déviatorique, on constate une réponse des capteurs fortement perturbée au début de son application et qui n'évolue plus linéairement.

L'auteur présente ensuite les résultats des essais de neuf types de capteurs dans la centrifugeuse du LCPC, essais réalisés dans le cadre du programme de recherche « Macrogravité 92/93 ». Cette étude devait permettre de sélectionner les capteurs les plus performants pour étudier le champ de contraintes au sein d'un massif centrifugé.

Huit essais ont été réalisés sur des échantillons de sable de Fontainebleau fabriqués par pluviation dans un conteneur rectangulaire (de longueur 1,20 m, de largeur 0,80 m et de hauteur 0,36 m) en suivant un mode opératoire strict afin d'obtenir une densité du sable homogène et répétable. De cette manière, la pression appliquée à une certaine profondeur dans l'échantillon peut être prise proportionnelle à l'accélération centrifuge appliquée mais aussi à la densité du matériau et à la profondeur.

Pour les sept premiers essais, les échantillons de sable ont été reconstitués pour obtenir un poids volumique homogène d'environ $16,15 \text{ kN/m}^3$ tandis que, pour le huitième essai, le poids volumique était de $15,15 \text{ kN/m}^3$.

Les essais de centrifugation des échantillons équipés des capteurs de pressions totales noyés dans l'échantillon ou encastrés dans des structures support, ont comporté plusieurs cycles de chargement-déchargement en montant et descendant l'accélération centrifuge par pas successifs de 10g ou 20g (g désigne l'accélération gravitationnelle) jusqu'à la valeur maximale de 100g.

Boulebnane constate une réponse très différente des capteurs à action directe par rapport aux capteurs à action indirecte, qui le conduit à présenter ses résultats séparément pour les deux types des capteurs.

La courbe d'étalonnage des capteurs à mode d'action directe enfouis dans le sable est caractérisée par une hystérésis (très) importante et un écart très important par rapport à la courbe d'étalonnage hydrostatique.

Par contre, la courbe d'étalonnage des capteurs à mode d'action indirect est presque superposée à la courbe d'étalonnage hydrostatique et présente une hystérésis très limitée et donc une variation quasi-linéaire.

1.4.2.4 Conditions d'environnement

La réponse des capteurs de pressions totales peut être influencée, indépendamment de l'action du mesurande sur leur surface active, par les conditions d'environnement existant à l'endroit de mesure.

Weiler et Kulhawy (1982) et Dunncliff (1988) ont mis en évidence plusieurs facteurs liés aux conditions d'environnement et affectant la mesure des pressions totales.

a) *Température à l'endroit de mesure*

Weiler et Kulhawy indiquent que l'effet de la température sur la réponse des capteurs peut être évalué par leur étalonnage en présence d'un fluide pour différentes températures d'essai.

On constate, en général, que la sensibilité des capteurs (la pente de la courbe d'étalonnage) n'est pas affectée par la variation de la température. Cette dernière détermine seulement, dans la plupart des cas, une dérive du zéro dans la réponse des capteurs. Weiler et Kulhawy présentent les résultats de l'étalonnage d'un capteur à membrane pour mettre en évidence l'effet de la variation de la température (Fig. 1-23).

Ils précisent que des erreurs allant jusqu'à 23 kPa/°C ont été constatées pour les différents types de capteurs testés.

Ils considèrent que, pour les applications in situ, la température doit être mesurée en parallèle aux pressions totales, afin de permettre la correction de l'erreur introduite par la variation de la température.

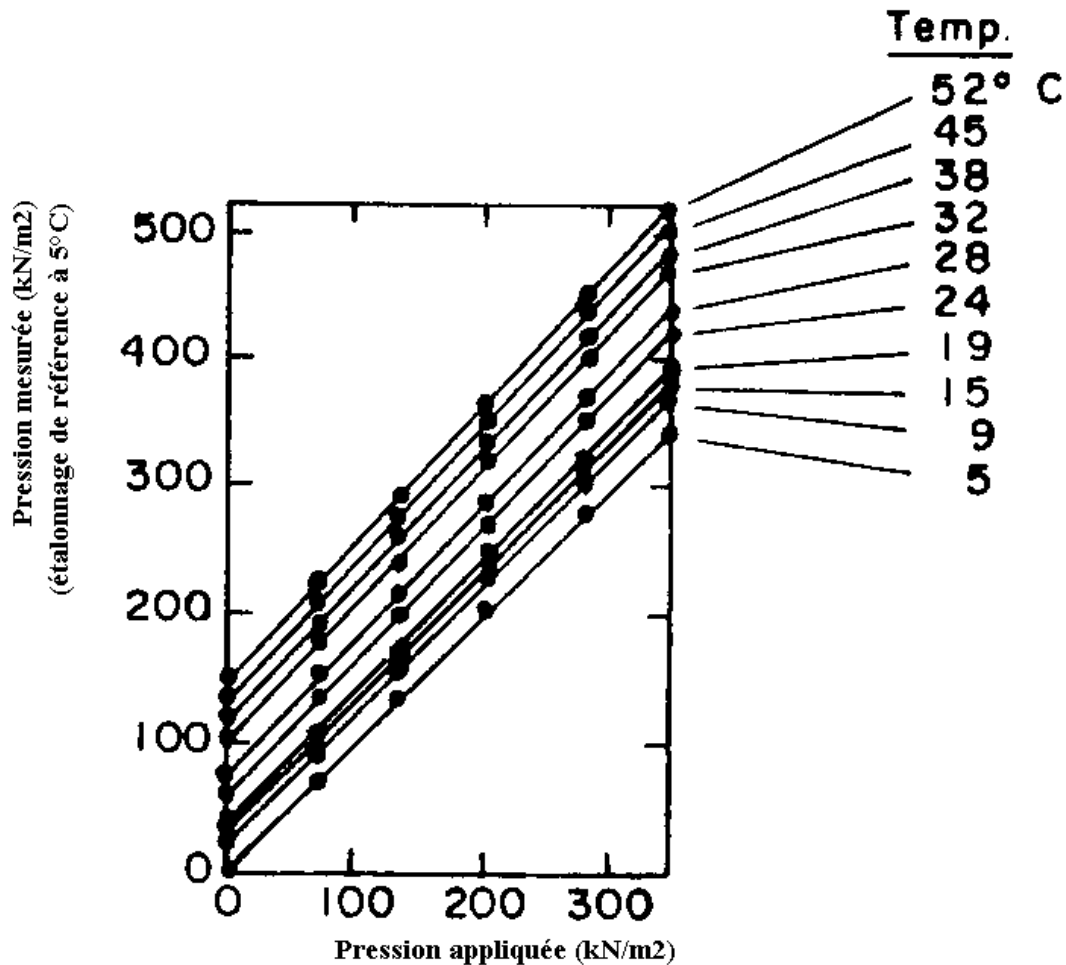


Fig. 1-23 : Influence de la température de l'essai sur la réponse d'un capteur à membrane soumis à l'étalonnage en présence d'un fluide (d'après Weiler et Kulhawy, 1982).

Dunnicliff (1982) considère que la conception des capteurs doit être telle que la dérive thermique de la réponse des capteurs soit minimisée. Dans le cas où la température varie d'une façon importante, c'est-à-dire notamment dans le cas des mesures des pressions totales à l'interface des ouvrages, il est nécessaire de corriger les résultats des mesures de l'erreur introduite par la variation de la température. Cette erreur peut être estimée lors de l'étalonnage des capteurs en présence d'un fluide.

Dunnicliff indique que, pour diminuer l'effet de la variation de la température sur la réponse des « capteurs hydrauliques » (à action indirecte), il faut minimiser l'épaisseur du film de liquide intérieur et il faut que la surface active des capteurs présente une épaisseur importante et une rainure sur le pourtour. Par contre, pour les capteurs à

membrane à action directe, du fait de la manque d'huile, l'influence de la variation de température sur leur réponse est moins importante.

Par conséquent, dans le cas de variations de températures importantes, Dunnycliff recommande l'utilisation de capteurs à action directe.

b) Détérioration du fonctionnement des capteurs par les technologies d'exécution des ouvrages

Après la mise en place des capteurs, les technologies d'exécution des ouvrages peuvent conduire à une variation artificielle du mesurande ou des grandeurs d'influence (température), même d'une façon occasionnelle, au-delà des conditions limites¹² de fonctionnement du capteur spécifiées par son fabricant.

Weiler et Kulhawy (1982) citent l'exemple de contraintes engendrées par le compactage qui ont dépassé la valeur de 300 kPa. Par conséquent, il est nécessaire de choisir les capteurs en tenant compte de ces surcontraintes, afin de ne jamais dépasser les conditions limites de leur fonctionnement.

c) Corrosion et présence de l'eau

Weiler et Kulhawy (1982) précisent que la corrosion des capteurs peut affecter les mesures de pressions à cause de la modification des propriétés des capteurs (raideur, forme, rapport de forme) et que les capteurs en aluminium, sont aussi susceptibles d'être affectés par la corrosion.

Ils considèrent que le titane représente le meilleur compromis dans le choix du matériau d'un capteur de pressions totales grâce à une meilleure résistance à la corrosion que l'acier inoxydable, à sa densité environ deux fois plus réduite que celle de l'acier, à son domaine de comportement élastique élevé et à son usinage facile.

¹²Conditions limites : «conditions extrêmes qu'un instrument de mesure doit pouvoir supporter sans dommage et sans dégradation des caractéristiques métrologiques spécifiées lorsqu'il est ensuite utilisé dans ses conditions assignées de fonctionnement » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

1.5 Capteurs disponibles sur le marché

Une recherche sur le marché des capteurs de pressions totales a permis de rassembler des renseignements sur les caractéristiques des produits disponibles (type de transducteur, étendues de mesure, diamètre et épaisseur des capteurs, etc. ; Annexe 1-1). On remarque qu'il n'existe guère de capteurs à piston et que les capteurs à membrane sont, dans la plupart des cas, hydrauliques (à action indirecte).

Il a été ainsi possible de classer les capteurs disponibles en quatre catégories en fonction de leur principe de conception, qui favorise leur utilisation pour des destinations particulières (Fig. 1-24 et Annexe 1-1) :

- ♦ type a (action directe) : ces capteurs sont de moins en moins utilisés à cause des difficultés d'assurer une raideur de leur surface active suffisante ; ils sont adaptés pour des mesures de pressions totales à l'interface des ouvrages, dans des conditions de variation importante de la température et pour une variation limitée du mesurande ;
- ♦ type b (action indirecte, hydraulique, une face active et corps d'épreuve intérieur) : ces capteurs présentent un encombrement plus important que les capteurs de type a mais la raideur de leur surface active est nettement supérieure ; ils sont bien adaptés pour les mesures à l'interface sol-structure (sortie du signal par-dessous) ; ils sont utilisables aussi pour des mesures au sein d'un massif (sortie latérale du signal), mais leur rapport de forme est plus élevé que celui des capteurs de type c ;
- ♦ type c (action indirecte, hydraulique, deux faces actives et corps d'épreuve déporté) : ces capteurs présentent l'épaisseur la plus réduite grâce à la séparation du coussin hydraulique du capteur de son corps de mesure (corps d'épreuve et transducteur) par un tube rigide ; ils sont bien adaptés pour les mesures in situ au sein d'un massif ;
- ♦ type d (action indirecte, hydraulique, une face active et transducteur extérieur) : ces capteurs présentent leur sortie électrique par derrière et sont conçus pour une utilisation à l'interface sol-structure.

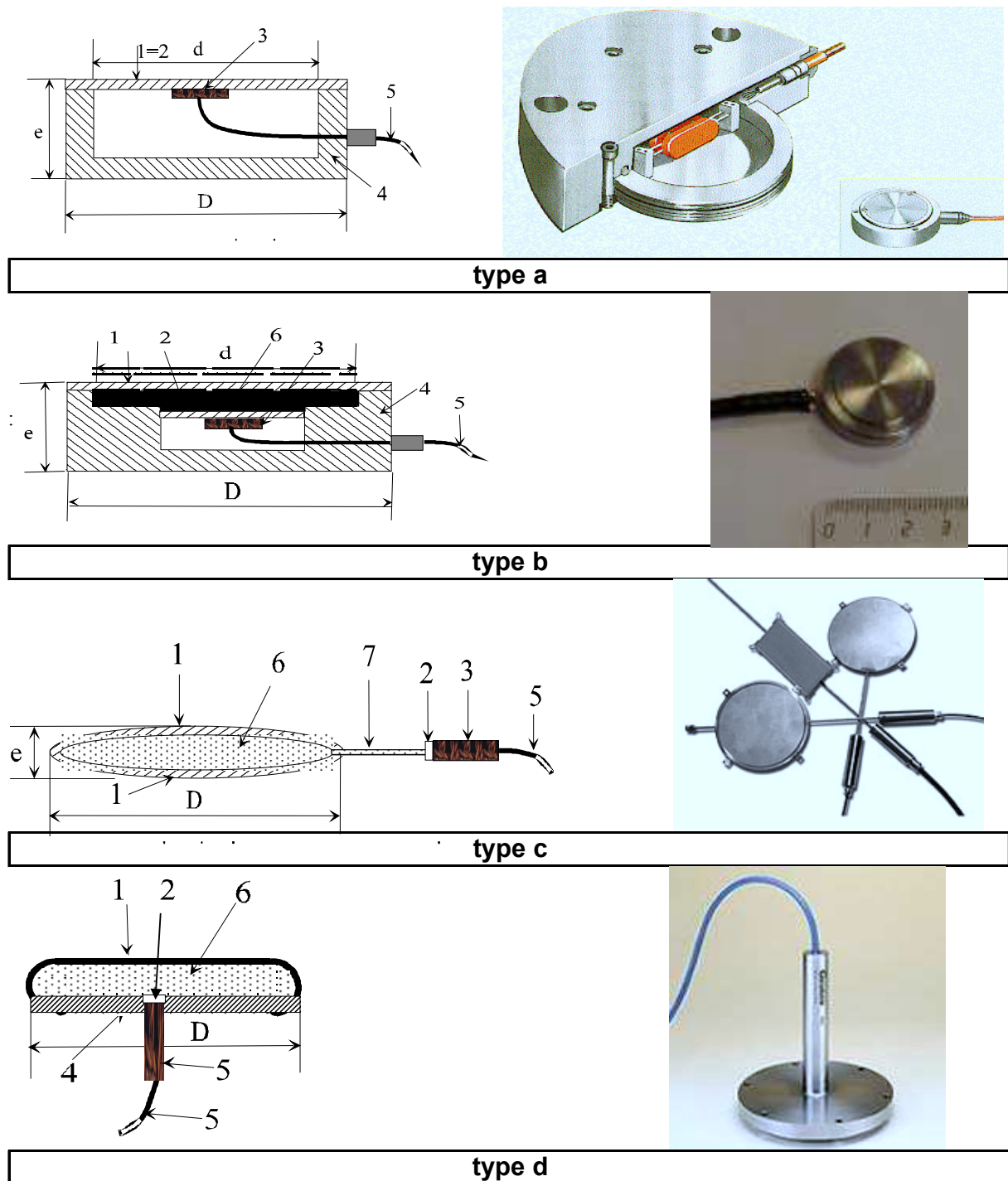


Fig. 1-24 : Schémas de principe et photos de quelques capteurs disponibles sur le marché a) Geonor P-105 (Catalogue en ligne) ; b) Kyowa BE-C (capteur utilisé dans le réseau des LPC) ; c) Roctest-Telemac FO-EPC (Catalogue en ligne) ; d) Geokon 4820 JPC (Catalogue en ligne).

Légende : 1 - surface active ; 2 - corps d'épreuve ; 3 - transducteur ; 4 - boîtier ; 5 - ligne de transmission ; 6 - liquide hydraulique ; 7 - tube de raccordement rigide.

1.6 Conclusion

La mesure des pressions (composantes normales des contraintes) totales fait appel à des capteurs de pression de fluide présentant des caractéristiques adaptées aux conditions de mesure spécifiques dans les sols.

Pour des raisons de représentativité des résultats expérimentaux, la surface active des capteurs doit présenter une taille suffisamment élevée par rapport à la taille des particules (de diamètre allant, en général, de quelques centimètres à quelques décimètres).

La mesure des pressions totales avec un tel capteur est affectée, de façon intrinsèque, par une erreur de discrétion due à la perturbation du mesurande par sa mise en place, par sa présence à l'endroit de mesure et par son interaction avec le sol durant les mesures.

Cette erreur de discrétion constitue la cause principale qui rendent les mesures des pressions totales comme peu fiables. Le manque de discrétion s'explique par un phénomène d'inclusion du capteur dans un milieu solide présentant des caractéristiques de déformabilité différentes et par un phénomène d'interaction entre le sol et la surface déformable du capteur favorisant l'apparition des effets de voûte. Il dépend, pour l'essentiel, du volume du capteur et de la flexibilité de sa surface active.

Le perfectionnement des mesures des pressions totales nécessite donc d'améliorer la discrétion des capteurs tout en gardant un diamètre de leur surface active de taille imposée.

Deux types de capteurs ont été largement utilisés pour la mesure des pressions totales :

- ♦ des capteurs à piston (surface active rigide) ;
- ♦ des capteurs à membrane (surface active déformable).

A l'heure actuelle, les capteurs à piston ne sont guère utilisés, notamment pour des raisons liées à la discontinuité induite dans le champ des déplacements et à leur encombrement, nécessairement plus élevé que celui des capteurs à membrane.

L'étude bibliographique effectuée a permis de mettre la mise en évidence une multitude de facteurs qui peuvent affecter les performances des mesures de pressions totales. Ces facteurs tiennent aux caractéristiques physiques des capteurs et des sols, aux conditions de mise en place des capteurs ainsi qu'aux conditions d'environnement.

Elle a également permis de noter les performances supérieures des capteurs présentant une raideur très importante de leur surface active et un rapport de forme réduit au minimum.

Le perfectionnement des technologies de fabrication a permis d'améliorer continuellement les caractéristiques physiques des capteurs. Les développements récents intéressent principalement les capteurs à action indirecte, ceci en dépit de leur sensibilité thermique plus élevée que celle des capteurs à action directe (due à la présence de l'agent hydraulique utilisé pour la transmission du mesurande au niveau du corps d'épreuve). Ces développements s'expliquent par la raideur très importante de la surface active, qui peut être obtenue pour de tels capteurs sans affecter leur résolution de mesure.

Etant donné l'ampleur que peut prendre l'erreur de discrétion, avant leur utilisation in situ, les capteurs de pressions totales doivent être qualifiés dans une situation de mesure simple créée à l'intérieur ou à l'interface d'un échantillon de sol avec le concours d'une enceinte d'essai spécialisée. Une telle enceinte doit être capable de transmettre un champ de contraintes contrôlé à travers l'échantillon de sol ou au moins dans une certaine zone où l'on place le capteur. Le volume de l'échantillon testé doit être suffisamment grand par rapport à la taille des capteurs pour éviter la transmission des effets de bord et permettre le développement des mécanismes d'interaction sol-capteur (effets de voûte dans le sol, notamment).

Un tel essai, en dépit de l'impossibilité de reconstituer la situation de mesure in situ sous tous les aspects qui peuvent affecter la mesure (la granulométrie et la raideur du sol, le champ de contraintes réel, etc.), peut fournir des renseignements importants sur les performances de mesure des capteurs potentiellement utilisables pour les différentes applications.

CHAPITRE 2 LA MESURE DES CONTRAINTES TOTALES DANS LES EXPÉRIMENTATIONS DE PAROIS MOULÉES2-1

2.1	INTRODUCTION	2-1
2.2	QUELLES MESURES SUR LES PAROIS MOULÉES ?.....	2-2
2.3	EXPÉRIMENTATIONS ANALYSÉES	2-5
2.3.1	<i>Quai de Seaforth à Liverpool</i>	2-7
2.3.2	<i>Canal Rhône – Rhin à Mulhouse</i>	2-8
2.3.3	<i>Immeuble Telefonhuset à Oslo</i>	2-9
2.3.4	<i>Immeuble de la SERETE à Paris</i>	2-10
2.3.5	<i>Quai de Bougainville au port du Havre</i>	2-12
2.3.6	<i>Quai en eau profonde du port de Calais</i>	2-13
2.3.7	<i>Parking souterrain à Cambridge</i>	2-13
2.3.8	<i>Quai O’Swalkai du port du Hambourg</i>	2-14
2.4	EQUIPEMENTS INSTALLÉS SUR LES OUVRAGES EXPÉRIMENTÉS.....	2-15
2.4.1	<i>Disposition générale de l’instrumentation</i>	2-15
2.4.2	<i>Dispositifs de mesure des contraintes totales</i>	2-18
2.4.2.1	Types de capteurs et schéma d’implantation	2-18
2.4.2.2	Dispositifs de mise en place des capteurs.....	2-21
2.5	QUALIFICATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	2-27
2.5.1	<i>Bétonnage des panneaux instrumentés</i>	2-27
2.5.1.1	<i>Quai de Seaforth à Liverpool [1]</i>	2-27
2.5.1.2	<i>Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2]</i>	2-28
2.5.1.3	<i>Immeuble Telefonhuset à Oslo [3]</i>	2-29
2.5.1.4	<i>Immeuble parisien de la SERETE [4]</i>	2-29
2.5.1.5	<i>Quai de Bougainville au port du Havre [5]</i>	2-30
2.5.1.6	<i>Parking souterrain à Cambridge [7]</i>	2-30
2.5.1.7	<i>O’Swalkai dans le port du Hambourg [8]</i>	2-35
2.5.2	<i>Béton jeune</i>	2-36
2.5.2.1	<i>Quai de Seaforth à Liverpool [1]</i>	2-36
2.5.2.2	<i>Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2]</i>	2-37
2.5.2.3	<i>Immeuble Telefonhuset à Oslo [3]</i>	2-37
2.5.2.4	<i>Immeuble parisien de la SERETE [4]</i>	2-37
2.5.2.5	<i>Quai de Bougainville au port du Havre [5]</i>	2-38
2.5.2.6	<i>Parking souterrain à Cambridge [7]</i>	2-39
2.5.2.7	<i>O’Swalkai dans le port de Hambourg [8]</i>	2-39

2.5.3	<i>Phases de construction ultérieures et ouvrage en service</i>	2-40
2.5.3.1	Quai de Seaforth à Liverpool [1].....	2-40
2.5.3.2	Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2].....	2-41
2.5.3.3	Immeuble Telefonhuset à Oslo [3].....	2-42
2.5.3.4	Immeuble parisien de la SERETE [4]	2-43
2.5.3.5	Quai de Bougainville au port du Havre [5]	2-46
2.5.3.6	Parking souterrain à Cambridge [7].....	2-50
2.5.3.7	O'Swaldkai dans le port du Hambourg [8].....	2-52
2.6	CONCLUSION DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2-53
2.7	RÉFLEXIONS EN VUE D'UNE NOUVELLE EXPÉRIMENTATION	2-55
2.7.1	<i>Choix des systèmes de mesure</i>	2-55
2.7.1.1	Dispositif de mise en place des capteurs	2-55
2.7.1.2	Choix du capteur	2-56
2.7.2	<i>Qualification préalable des capteurs en laboratoire</i>	2-59
2.7.3	<i>Principe de conception de l'instrumentation</i>	2-60

Chapitre 2 LA MESURE DES CONTRAINTES TOTALES DANS LES EXPÉRIMENTATIONS DE PAROIS MOULÉES

2.1 Introduction

La connaissance des efforts de contact entre les ouvrages de soutènement et les sols est une préoccupation déjà ancienne en géotechnique. Combinés à une description précise des déplacements et déformations de ces ouvrages, ces efforts constituent la référence essentielle pour l'amélioration des modèles de calcul et du dimensionnement des ouvrages de soutènement, que ce soit en termes de résistances ou de déformations.

Pourtant, la littérature spécialisée décrit peu d'expérimentations de parois moulées qui se soient intéressées à la mesure des contraintes totales appliquées par les sols. Les expérimentateurs évitent d'équiper les parois moulées pour la mesure des contraintes totales à cause de la fiabilité jugée réduite de ces mesures, de la complexité de leur mise en œuvre, de leur coût, des perturbations qu'elles imposent à l'état initial des contraintes mais aussi des difficultés de validation des résultats expérimentaux. On se contente donc le plus souvent d'observer la déformée expérimentale et d'évaluer le comportement mécanique des ouvrages en termes de déplacements.

Les progrès survenus dans la technologie des capteurs, mais aussi dans les méthodes de prévision du comportement mécanique des ouvrages et d'interprétation des résultats assistée par ordinateur, ont justifié de procéder à une nouvelle expérimentation de parois moulées qui permette de réévaluer le potentiel des mesures de pressions totales aux interfaces entre les sols et le béton des parois.

Ce chapitre est consacré aux expérimentations antérieures décrites dans la littérature spécialisée. L'analyse des mesures de contraintes totales réalisées dans le cadre de ces

expérimentations a guidé les choix faits pour notre propre étude.

2.2 Quelles mesures sur les parois moulées ?

Avant d'analyser les résultats des mesures directes de contraintes totales, il n'est pas inutile de réfléchir de façon plus générale aux mesures qu'il est possible de faire sur les parois moulées et qui peuvent permettre de recouper ou de valider les valeurs mesurées des contraintes totales.

En effet, pour les ouvrages de soutènement souples et donc déformables, comme le sont les parois moulées dans les sols, il est possible d'étudier la pertinence des résultats expérimentaux en se basant sur les relations théoriques qui lient les déformations de la structure aux pressions totales exercées par les sols sur les interfaces. Ces relations s'ajoutent aux relations d'équilibre (qui font intervenir les mêmes pressions appliquées par les sols) qui caractérisent le fonctionnement de tous les ouvrages de soutènement (souples ou rigides).

Pour la prévision du comportement mécanique d'un écran de soutènement, on admet qu'il est soumis à la somme de deux sollicitations :

- ♦ une sollicitation de flexion cylindrique, créée par l'action des pressions horizontales totales exercées par les sols, des efforts transmis par les appuis latéraux éventuels (ancrages ou butons), du frottement agissant sur ses surfaces de contact horizontales avec le sol et, éventuellement, des moments transmis par la superstructure, et
- ♦ une sollicitation de compression verticale, due au poids propre de l'ouvrage, au frottement exercé sur les interfaces verticales avec le sol, aux composantes verticales des efforts transmis par les appuis et, éventuellement, aux efforts verticaux transmis par la superstructure.

Cette hypothèse est généralement justifiée par la constance de la section transversale du rideau sur des longueurs importantes, dans la mesure où les pressions appliquées

par les sols et la raideur des éventuels appuis horizontaux le long de l'écran peuvent être considérées comme uniformes.

Pour le dimensionnement, on néglige souvent l'action du frottement sol-paroi et on considère la flexion comme seule sollicitation de calcul.

Pour vérifier ces hypothèses, il faut accompagner les mesures de contraintes totales à l'interface sol-écran par des mesures de déplacements horizontaux et/ou par des mesures de l'inclinaison de la déformée ou encore par des mesures des déformations verticales de la paroi. Il est alors possible d'étudier la corrélation expérimentale entre les efforts appliqués (résultante des contraintes totales horizontales sur le rideau, effort tranchant et moment de flexion) et la déformée de l'écran et de les comparer ensuite aux relations théoriques qui gouvernent le comportement mécanique d'un tel ouvrage.

Dans le cas d'un écran vertical soumis à une sollicitation de flexion cylindrique dans les limites du comportement élastique linéaire du matériau, l'intensité $p(z)$ de la contrainte totale horizontale résultante à la profondeur z est reliée au déplacement horizontal transversal $y(z)$ de l'écran à la même profondeur par l'équation différentielle (2.1) :

$$p(z) = \frac{d^4[D(z)y(z)]}{dz^4} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, qui est l'équation différentielle de la déformée, $D(z)$ désigne la raideur en flexion de la section de calcul (de largeur unité) de l'écran. Elle peut être exprimée en fonction de l'épaisseur $h(z)$ et des caractéristiques physiques du béton armé $E(z)$ et $\nu(z)$. Dans le cas d'un écran d'épaisseur constante et de caractéristiques physiques constantes, on obtient :

$$D = (EI)_{ech} = \frac{Eh^3}{12[1-\nu^2]} \quad (2.2)$$

Pour des raisons liées au comportement réel du béton armé, qui diffère de celui d'un matériau élastique linéaire, et par souci de simplicité, les études courantes de projet

utilisent un module d'élasticité de la section de béton armé égal au module de déformation du béton et un coefficient de Poisson égal à zéro. On procède alors à un « calcul de poutre » de section rectangulaire et de largeur unité ; la raideur en flexion de la section de l'écran s'exprime sous la forme :

$$D = (EI)_{ech} = E_b I = \frac{E_b h^3}{12} \quad (2.2')$$

L'équation différentielle (2.1) devient d'ordre 3 si l'on remplace le déplacement horizontal transversal $y(z)$ par la rotation (l'inclinaison) de la section par rapport à la verticale $\varphi_y(z)$. Pour une paroi verticale à raideur en flexion constante, elle s'écrit alors :

$$p(z) = D \frac{d^3 \varphi_y(z)}{dz^3} \quad (2.3)$$

Les équations (2.1), (2.2) ou (2.3) peuvent être utilisées pour étudier la pertinence des mesures de pressions totales à partir des mesures de déplacements et déformations de l'ouvrage ($y, \varphi, \varepsilon_z$), qui sont généralement considérées comme plus fiables. Ainsi, si l'on admet que les déformations de la paroi restent élastiques linéaires (par exemple, pour un niveau de sollicitation faible par rapport à celui retenu dans le calcul de dimensionnement), le moment de flexion peut être exprimé en fonction des déformations verticales $\varepsilon_z^1(z)$ et $\varepsilon_z^2(z)$ de deux fibres opposées par rapport à l'axe neutre et de distance horizontale connue $2e_y$:

$$M(z) = D \frac{\varepsilon_z^2(z) - \varepsilon_z^1(z)}{2e_y} \quad (2.4)$$

La pertinence des mesures des pressions totales à l'interface entre le sol et un rideau de soutènement peut aussi être appréciée par l'analyse des efforts qui assurent l'équilibre du rideau. Pour ce faire, on peut quantifier les composantes horizontales des efforts ou les moments des forces (exprimés par rapport à un même point) qui concourent à l'équilibre local (entre deux profondeurs z_1 et z_2) ou global du rideau.

Les relations entre les efforts agissants sur un écran en équilibre peuvent être exprimées sous des formes variées. L'expérimentateur doit choisir celles qui conviennent le mieux (notamment pour des raisons de simplicité) compte tenu des caractéristiques particulières de chaque ouvrage.

Ainsi, si l'on peut localiser, par le biais des mesures inclinométriques ou des mesures de déformations verticales dans la paroi, la profondeur z_2 où le moment de flexion est maximum et l'effort tranchant nul [$T(z_2) = 0$]¹, on peut contrôler la pertinence des mesures de pressions totales en vérifiant l'équilibre de l'écran au-dessus de la profondeur z_2 .

Pour un écran libre en tête [$T(z_1=0) = 0$], butonné ou ancré à un ou plusieurs niveaux où les appuis transmettent à la paroi des efforts horizontaux F_{hi} , les distributions des pressions des sols sur les interfaces côté terres $p^{CT}(z)$ et côté fouille $p^{CF}(z)$ doivent vérifier à l'équilibre la relation :

$$\int_0^{z_2} [p^{CT}(z) - p^{CF}(z)] dz = \sum_0^{z_2} \frac{F_h^i}{e_i} \quad (2.5)$$

où e_i est l'équidistance entre les appuis.

Evidemment, pour vérifier des relations de type (2.1), (2.2), (2.3) ou (2.5), il faut disposer d'un nombre élevé de points de mesure sur la profondeur de l'écran.

2.3 Expérimentations analysées

Nous avons retenu huit expérimentations de soutènements en paroi moulée qui comportaient des dispositifs de mesure des contraintes totales.

¹ La profondeur où l'effort tranchant est nul coïncide avec celle où le moment de flexion atteint son maximum si le gradient suivant la profondeur du moment engendré par l'effort de frottement sol-paroi peut être négligé par rapport à celui causé par les efforts horizontaux (voir Josseume et Stenne, 1979, p. 60).

Le Tableau 2-1 présente quelques caractéristiques géométriques significatives de chaque ouvrage (de [1] à [8]), et la structure des terrains dans la zone instrumentée.

No	Ouvrage Date	Géométrie de la paroi		Géologie du site (épaisseur couches)	Observations
		Hauteur (m)	Long. (m)		
		H. libre (m)	Épaiss. (m)		
1	quai de Seaforth (Liverpool) 1969	20	~15**	-sable (5,5m)	-paroi à section horizontale en voûtes (portée de 32m) renforcée par diaphragmes contreforts transversaux ancrés par tirants verticaux.
		15	0,45	-marne (4,5m)	
				-sable (2m)	
				-marne (7m) -grès	
2	quai du canal Rhône - Rhin (Mulhouse) 1970	16	2 x 95***	-limon (2,5 m)	- 1 nappe des tirants actifs, inclinée à 40 degrés.
		9,3	0,80	- sables et graviers argileux (7,5 m)	
3	Telefonhuset (Oslo) 1971	20	50	-remblai (2m)	-encastrement de la paroi dans la roche de base ; -4 appuis horizontaux rigides (3 planchers et 1 radier).
				-argile (3m) raide (croûte)	
		18,8	1,0	-argile molle (14m) -roche	
4	S.E.R.E.T.E (Paris) 1975	20,4	~50	-alluvions (7,5m)	-encastrement de la paroi dans la marne ; -4 nappes de tirants actifs.
		17,4	0,6	-sable (4,5m) -marnes et caillasses	
5	quai de Bougainville (Le Havre) 1977	24,5	750	-sables fins et limoneux (25m)	-encastrement de la paroi dans les sables ; -1 nappe de tirants actifs.
		16,5	1,2	-graves (4 m)	
6	quai en eau profonde (Calais) 1989	38,0	~1000	-remblai (13,5m)	-encastrement de la paroi dans l'argile raide ; -2 nappes de tirants passifs
		24,0	1,33	-sable des Flandres (18m)	
				-argile des Flandres	
7	parking (Cambridge) 1990	16,4	65	-gravier (3m)	-3 niveaux d'appui tempo- raire de la paroi ; -5 butons horizontaux à chaque niveau d'appui.
		9,6	0,6	-argile raide de Gault (37 m)	
				-sable	
8	quai O'Swaldkai (Hamburg) 1992	27	non précisé	-argile à inclusions*	-2 nappes de tirants actifs raccordées à la paroi au même niveau.
		19	1,2	-sable et graviers*	
				- argile et limon * - argile-mica raide	

* - épaisseur et composition très variables ;

** - seulement pour 1 tronçon prototype ;

***- tronçon expérimental de 95 m de longueur.

Tableau 2-1 : Caractéristiques générales des ouvrages expérimentaux

La hauteur des parois varie de 16 m (canal Rhin - Rhône) à 38 m (quai de Calais) et elles sont encastrees dans le substratum sur une profondeur allant de 1,2 m

(Telefonhuset) à 16,5 m (quai de Calais).

La conception de la structure diffère suivant la destination de l'ouvrage (dans les cas [1], [2], [5], [6] et [8] il s'agit d'une structure de quai tandis que, dans les autres, il s'agit d'un soutènement de fouille pour un chantier de construction urbain). Toutes les structures analysées étaient soutenues latéralement (pour un meilleur fonctionnement mécanique) par un à 4 niveaux d'appui fonctionnant en traction (tirants actifs ou passifs, horizontaux ou inclinés) ou en compression (planchers ou butons horizontaux).

Compte tenu de la configuration géométrique de chaque ouvrage, les structures de quai (à l'exception de [1]) sont plus proche d'un comportement mécanique bidimensionnel. Dans ces cas ([2], [5], [6] et [8]), la longueur du voile est importante par rapport à sa profondeur et la section transversale est constante sur une longueur importante autour de la zone instrumentée. On admet dans ces cas l'hypothèse d'un état plan de déformation et donc d'une sollicitation en flexion cylindrique des écrans.

Pour l'analyse du comportement des soutènements des fouilles (polygonales) exécutées en site urbain, l'utilisation d'une approche bidimensionnelle est possible si la longueur des côtés soutenus est nettement supérieure à la profondeur de l'écran. Cependant, l'existence d'appuis aux extrémités des côtés implique l'acceptation d'une erreur de principe et d'une description incomplète du comportement de la structure.

Les huit ouvrages sont décrits dans ce qui suit.

2.3.1 Quai de Seaforth à Liverpool

Uff (1970) a interprété les résultats de l'expérimentation d'un quai réalisé en 1969 lors de l'extension du port de Liverpool. Cet ouvrage présente une géométrie particulière, représentée sur la figure 2-1.

L'écran a été réalisé par juxtaposition de tronçons de paroi moulée en forme de voûte.

Les tronçons successifs ont été solidarités à leur raccordement par des poutres d'accostage (barrettes). Ils ont par ailleurs été renforcés par des diaphragmes transversaux se raccordant au niveau de la clé de voûte. Ces diaphragmes sont ancrés

par des tirants verticaux.

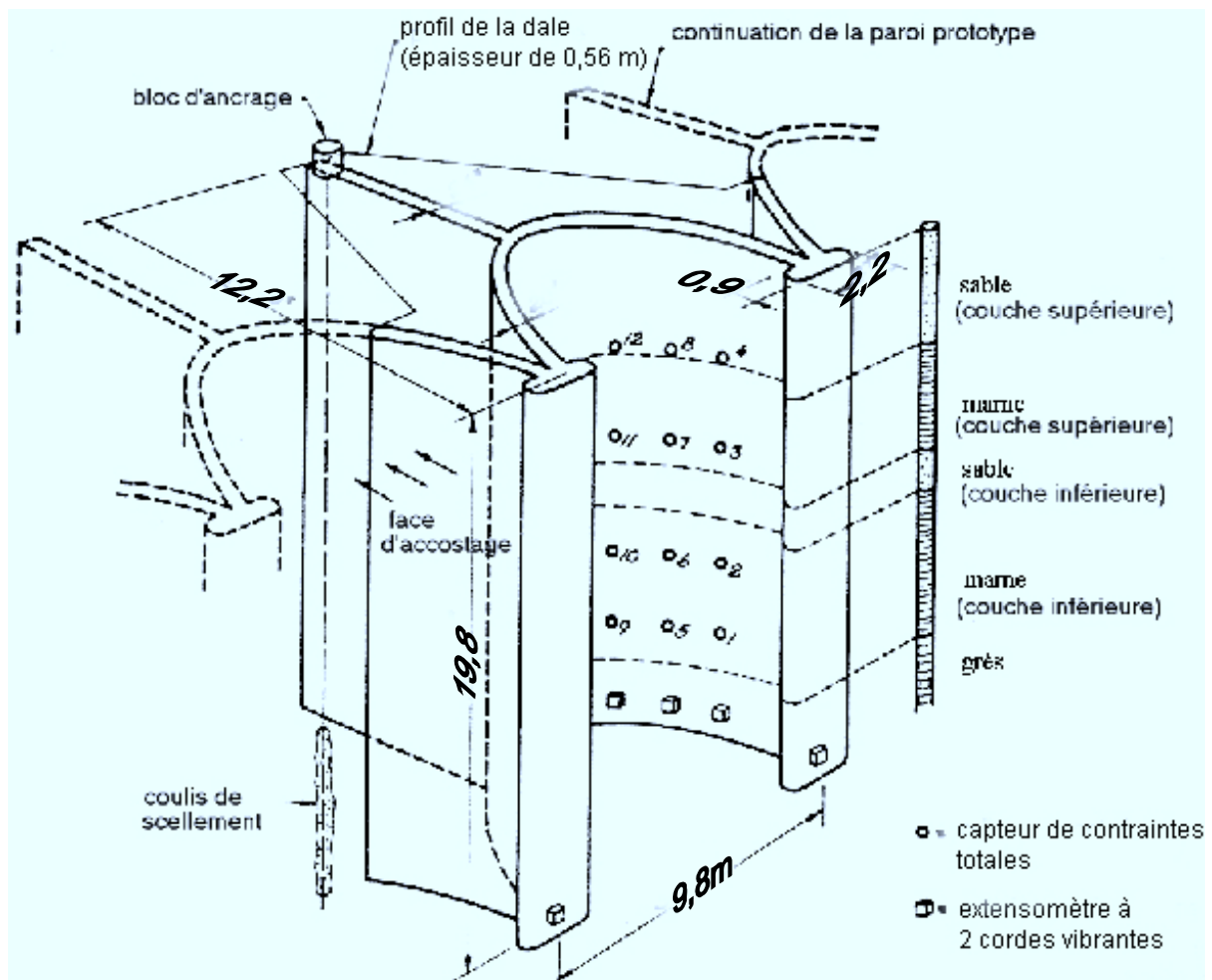


Fig. 2-1 : Disposition des moyens de mesure sur l'élévation du panneau instrumenté (d'après Uff, 1970).

Un tronçon à caractère expérimental a été réalisé avant l'exécution des travaux afin d'estimer les pressions exercées par les sols sur la paroi. Compte tenu de la raideur importante de cette structure, on a dimensionné l'écran sous l'action des pressions horizontales estimées au repos.

2.3.2 Canal Rhône – Rhin à Mulhouse

Ursat et al. (1974) ont analysé les résultats obtenus lors de l'instrumentation des quais en parois moulées du canal qui assure la liaison fluviale Rhône–Rhin à Mulhouse. Compte tenu de l'ampleur du projet (longueur totale de 4 km correspondant à la

traversée de Mulhouse), il avait paru opportun de construire au préalable, en 1970, un tronçon expérimental (de 95m de longueur), dont l'objectif principal était d'accéder, par la mesure, « aux sollicitations auxquelles la paroi moulée serait soumise ».

L'ouvrage est constitué de deux écrans correspondant à chaque rive du canal, ancrés à 2,70 m de profondeur par une nappe inclinée de tirants actifs (Fig. 2-2).

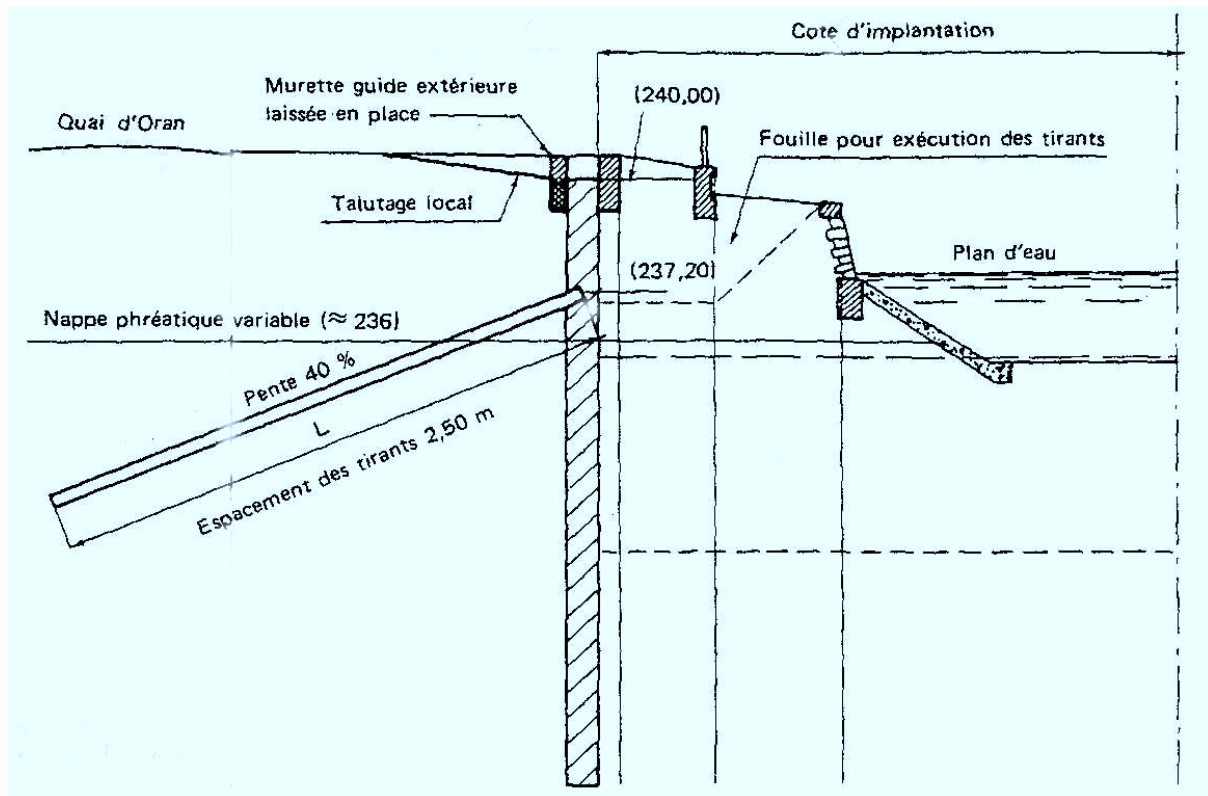


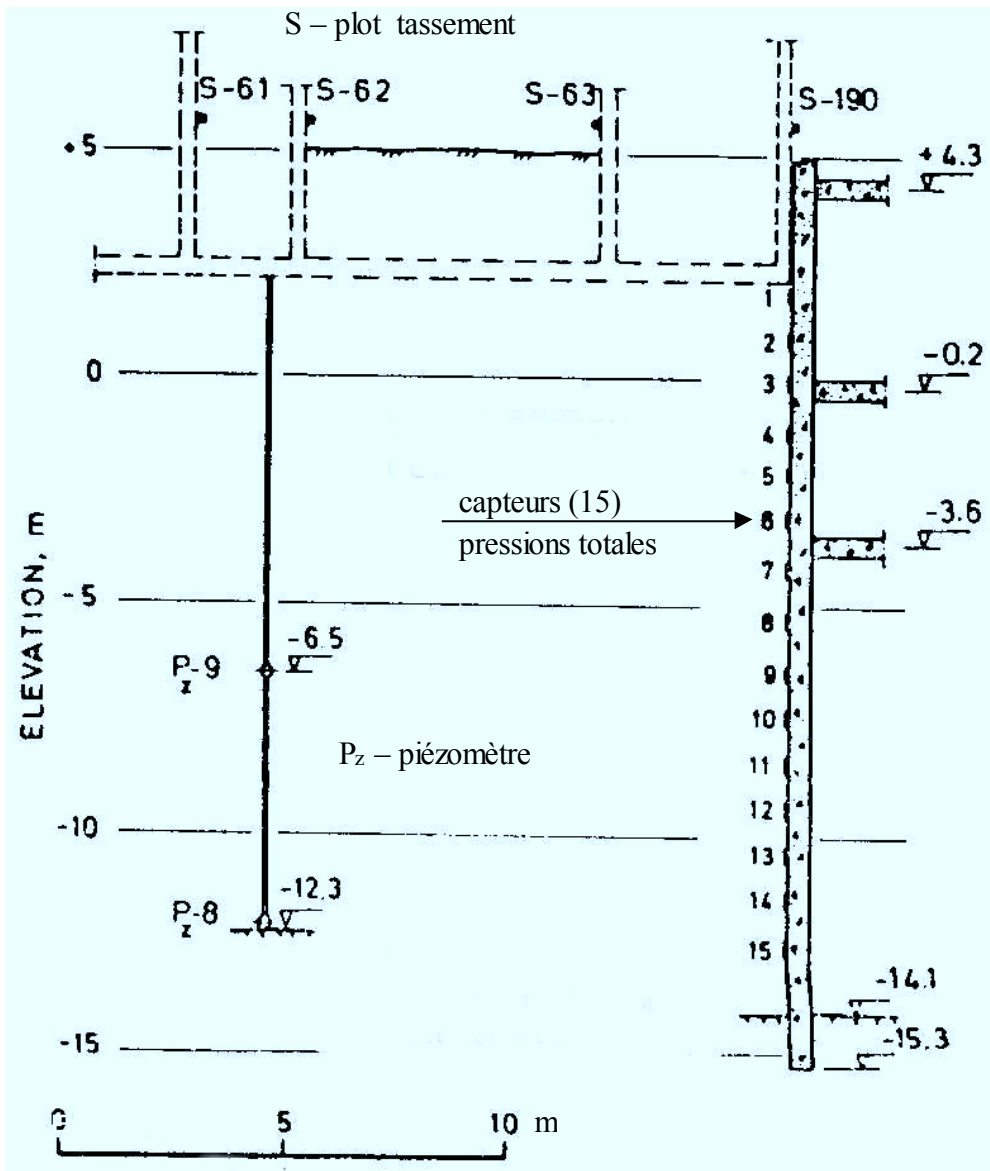
Fig. 2-2 : Demi - profil transversal caractéristique du canal (d'après Ursat et al., 1974).

2.3.3 Immeuble Telefonhuset à Oslo

DiBiagio et Roti (1972) ont analysé les résultats de l'instrumentation d'un panneau de paroi moulée sur le site de Kongensgate (construction d'un immeuble à Oslo ; Fig. 2-3). C'était la première expérience, en Norvège, comportant des mesures de pressions totales sur une paroi moulée construite dans une argile molle.

L'écran de soutènement a été appuyé à 3 niveaux par des planchers de 0,40 m

d'épaisseur qui ont été coulés au fur et à mesure que l'excavation à l'intérieur du périmètre soutenu le permettait. Dans la zone retenue pour l'instrumentation, on note la présence de la fondation superficielle d'un ouvrage démoli au préalable, qui a servi de



support pour la fixation des plots pour le suivi altimétrique.

Fig. 2-3 : Coupe transversale de l'ouvrage dans le profil instrumenté (d'après DiBiagio et Roti, 1972).

2.3.4 Immeuble de la SERETE à Paris

Josseume et Stenne (1979) ont présenté les résultats de l'instrumentation d'un

soutènement en paroi moulée (1975), réalisée lors de la construction de l'immeuble parisien de la SERETE (Fig. 2-4).

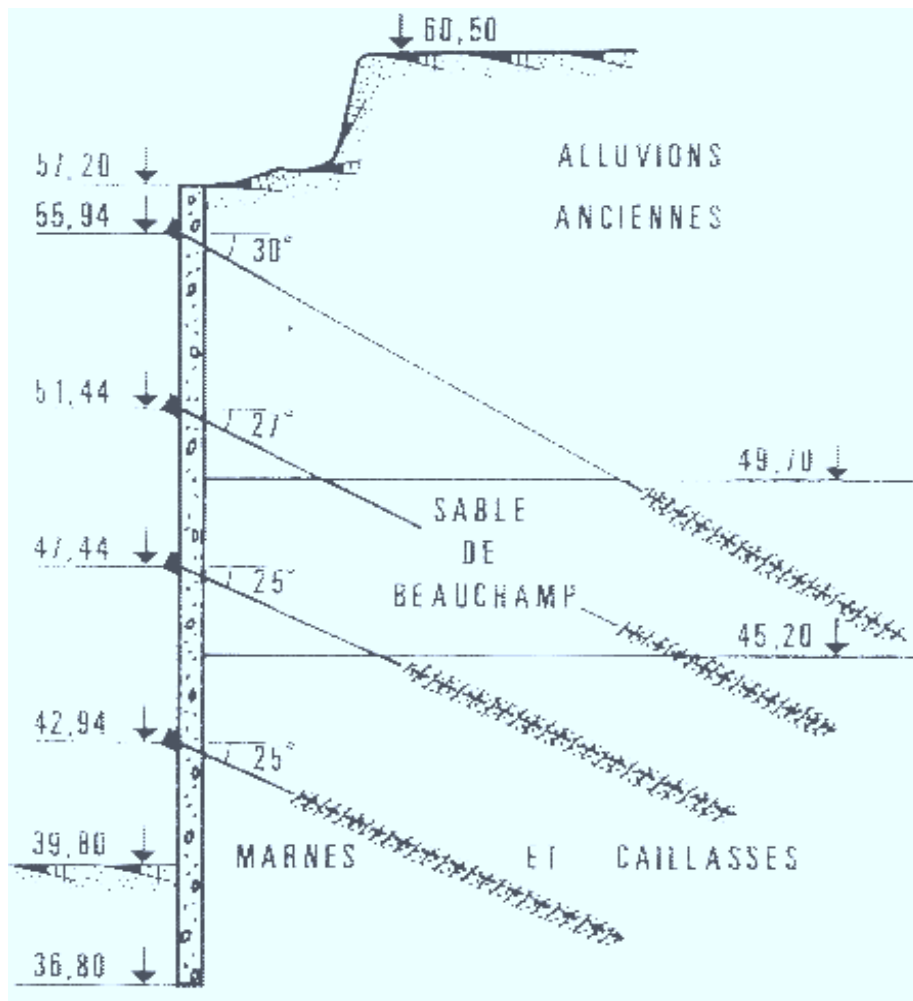


Fig. 2-4: Soutènement en paroi moulée ancrée par 4 nappes des tirants précontraints (coupe transversale - d'après Josseaume et Stenne, 1979).

L'expérimentation, qui a nécessité une période préparatoire importante, avait comme objectif une « meilleure connaissance du comportement des fouilles à l'air libre soutenues par des parois moulées ancrées ».

Le projet de cet ouvrage comportait la construction d'un sous-sol de plusieurs niveaux qui imposait une hauteur libre de l'écran d'environ 17,40 m. La paroi a été construite à partir d'une plate-forme établie à 3,30 m au-dessous du niveau du terrain naturel. Elle a été ancrée par 4 nappes inclinées de tirants actifs de type Bachy (4 tirants par panneau principal et 8 par panneau secondaire) forés et précontraints au fur et à mesure des

terrassements.

2.3.5 Quai de Bougainville au port du Havre

Blivet et al. (1981) se sont penchés sur l'analyse expérimentale et théorique du comportement d'un quai en parois moulées construit dans le port du Havre. Il s'agit du « premier quai français de grande hauteur exécuté en paroi moulée » (Fig. 2-5). L'expérimentation a été décidée pour approfondir la connaissance du comportement, dans la mesure où aucune des méthodes de calcul « n'est pleinement satisfaisante ».

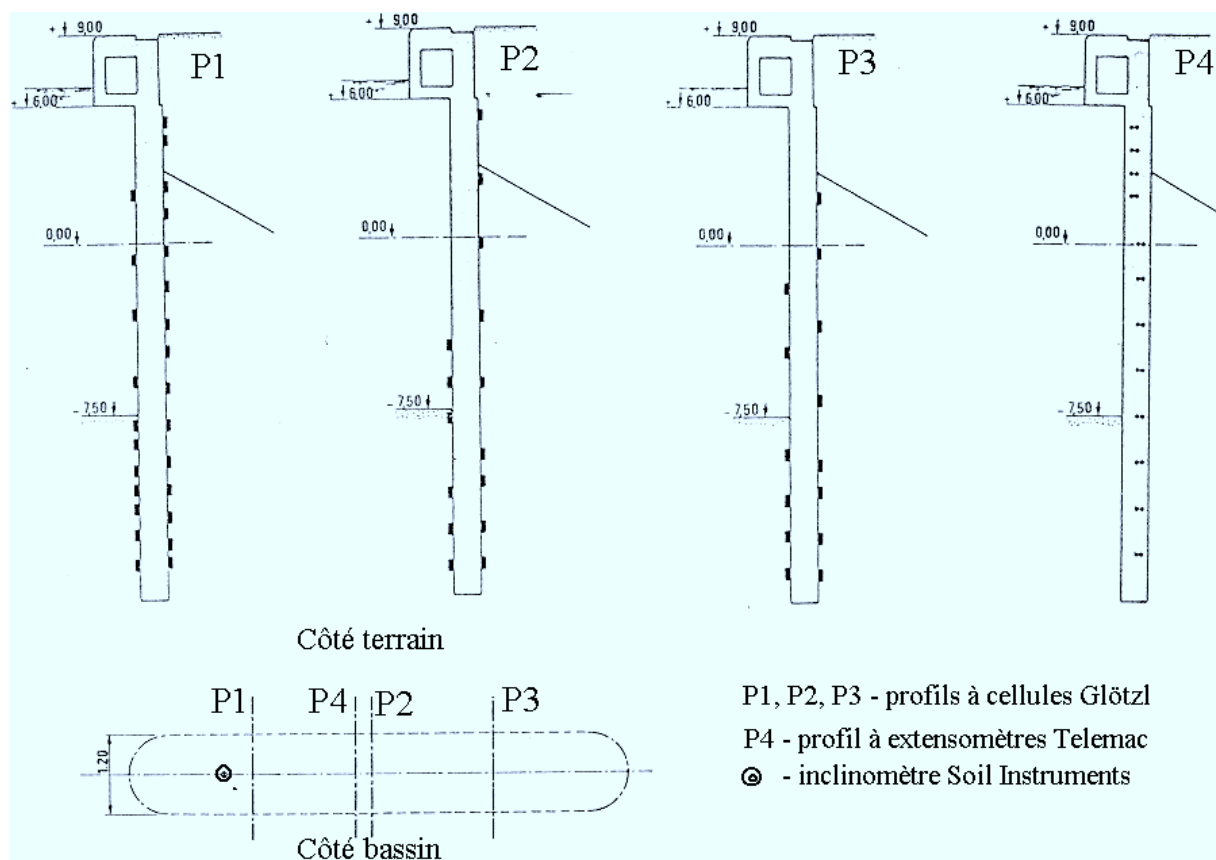


Fig. 2--5 : Disposition des moyens de mesure sur le panneau instrumenté (d'après Blivet et al., 1981).

Le quai, qui reçoit les grands navires porte-conteneurs, a été couronné en tête par une poutre d'accostage (coupe en forme de caisson). Il a été ancré par une nappe inclinée (environ 21 degrés) de tirants actifs de type Bachy-TMD de longueur totale 30 m, précontraints sous un effort de 750 kN (6 tirants forés pour chaque panneau de 7,2 m

en respectant une équidistance de 1,2 m).

2.3.6 Quai en eau profonde du port de Calais

Delattre et Mespoulhe (1995) ont procédé à l'étude expérimentale du comportement d'un quai en eau profonde dans le port de Calais.

La hauteur libre importante de l'écran (la plus grande parmi les expérimentations analysées dans cette étude) associée à des surcharges d'exploitation importantes ainsi que le phasage de construction de l'ouvrage, particulièrement intéressant sur le plan mécanique, ont justifié largement son expérimentation.

L'ouvrage est « un écran de soutènement réalisé en partie en paroi moulée dans le sol, en partie en béton coffré, ancré par un système passif comprenant deux nappes de tirants et un rideau de palplanches servant de massif d'ancrage ».

2.3.7 Parking souterrain à Cambridge

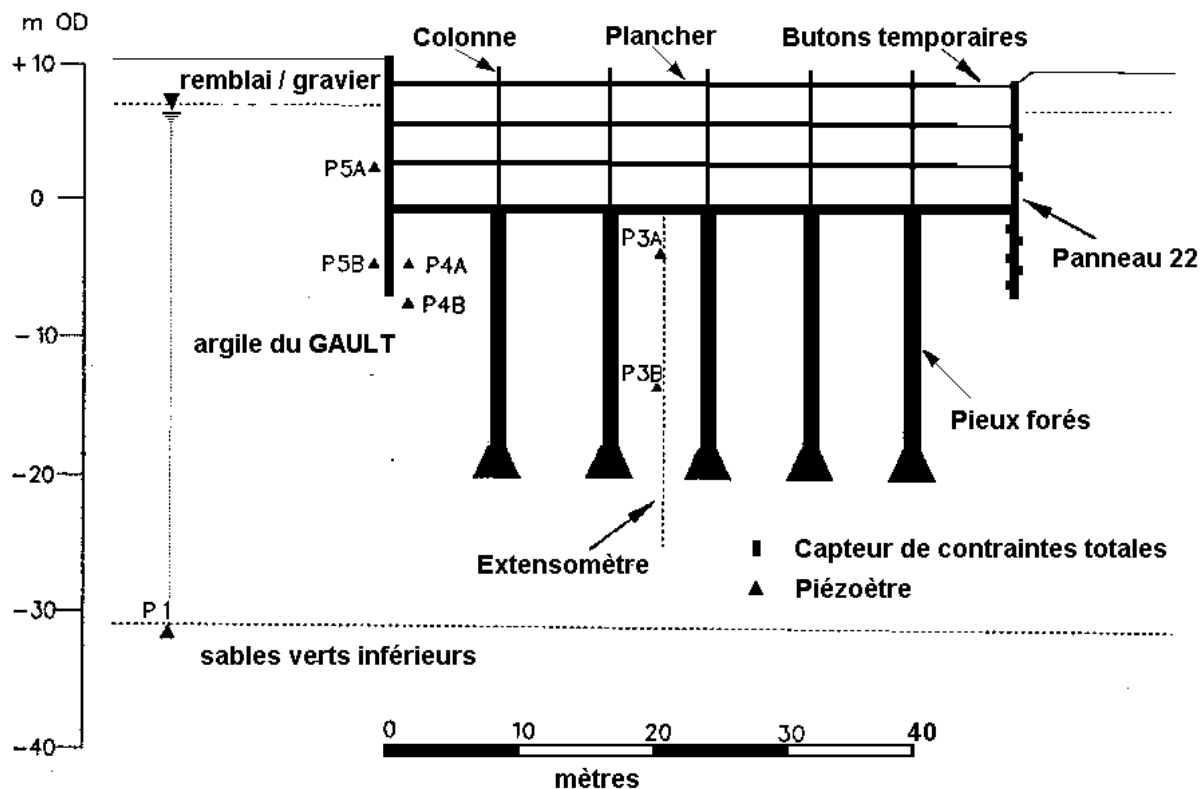
Lings et al. (1993) ont analysé les résultats de l'expérimentation des parois moulées exécutées lors de la construction d'un parking souterrain de 3 niveaux à Cambridge, UK (1989 – 1990).

L'ouvrage (Fig. 2-6) a été réalisé à l'abri d'une fouille rectangulaire (65 m x 45 m) limitée par un soutènement périphérique en parois moulées d'une profondeur totale d'environ 16,4 m, qui a été fondée dans une argile raide².

L'objectif de cette expérimentation était d'acquérir une meilleure connaissance du comportement des soutènements butonnés.

Le projet de l'ouvrage prévoyait deux panneaux particuliers, de 8,5 m de longueur, localisés aux environs d'une rampe d'accès dans le parking, qui étaient les seuls panneaux butonnés à trois niveaux en phase provisoire permettant d'accueillir

² On note que les deux côtés adjacents de l'excavation ont une longueur égale à respectivement 4 fois et 3 fois la profondeur de l'écran.



l'instrumentation souhaitée.

Fig. 2-6 : Coupe schématique de la structure du parking passant par le panneau instrumenté (d'après Lings et al., 1993).

Tous les autres panneaux ont été appuyés directement sur les planchers mis en œuvre à chaque niveau du parking au fur et à mesure que l'excavation le permettait.

2.3.8 Quai O'Swalkai du port du Hambourg

Rodatz et al. (1994) ont analysé les mesures effectuées lors de l'instrumentation d'un soutènement en parois moulées du quai O'Swalkai dans le port de Hambourg (1992). L'instrumentation a fait partie d'une campagne d'expérimentations réalisée dans la perspective d'une augmentation du tirant d'eau pour l'accès aux quais.

L'écran, d'une hauteur totale d'environ 27 m, a été retenu au niveau de la poutre d'accostage (à une profondeur de 2 m) par deux nappes inclinées de tirants actifs.

Les parois moulées ont été fondées dans un terrain très hétérogène comportant des

couches d'origine, de composition et d'épaisseur variables. Elles ont été encastrées dans le substratum en argile - mica. L'existence de grands blocs rocheux au contact des couches d'origine pléistocène et d'origine tertiaire (à une profondeur d'environ 17 m) a créé des difficultés importantes pour l'exécution des travaux.

2.4 Equipements installés sur les ouvrages expérimentés

2.4.1 Disposition générale de l'instrumentation

Le Tableau 2-2 indique les moyens prévus pour chaque expérimentation (nombre de profils instrumentés et nombre de capteurs, types de mesures réalisées).

Dans la plupart des cas analysés, la conception de l'instrumentation a été définie autour des mesures de contraintes totales (à l'exception de l'expérimentation [6]). Ces mesures ont été accompagnées, d'une façon générale, par des mesures inclinométriques et/ou extensométriques dans la paroi et/ou par un suivi topographique des déplacements en tête (horizontaux et/ou verticaux).

Les publications consacrées à l'expérimentation d'O'Swaldkai sont particulièrement claires sur ce point :

- ♦ le principe de l'instrumentation est défini dans un organigramme qui précise les différentes voies pour l'accès aux pressions exercées par les sols ;
- ♦ en soulignant les aptitudes des capteurs de pression utilisés³, les auteurs ont insisté sur l'importance d'avoir recours à plusieurs méthodes de mesure indépendantes pour accéder aux pressions exercées sur la paroi.

³ RODATZ et al., (1994) p. 2006 ; RODATZ et al., (1995) p. 292 : « le coussin de pression totale est le seul système de mesure capable de mesurer directement les contraintes normales dans les sols ».

No	Ouvrage	Capteurs de contraintes totales			Autres catégories de mesures (nombre total d'appareils)				
		Nombre de profils	Capteurs par profil	Type de capteurs*	Inclino-mètres	Extensomètres	Plots suivi topo	Piézo-mètres	Efforts sur appuis
1	quai de Seaforth (Liverpool)	3	4 CT	BRS à CV (Φ28)	-	5 CV	oui	9	-
2	quai du canal Rhône-Rhin (Mulhouse)	2	3 CT+3CF	hydraulique Glötzl (20x30)	-	28 CV Telemac	oui	-	2 cales à CV
			8 dans un forage CT	hydraulique Glötzl (10x20)					
3	Telefonhuset (Oslo)	1	15 CT	Oien à CV (Φ10)	1	4 CV série (rebar)	- **	2 (hydraulique)	-
						5 CV attachés			
4	S.E.R.E.T.E (Paris)	3	10CT + 2CF	hydraulique Glötzl (20 x 30)	1	20 CV Telemac	oui	-	8 cales annulaires Glötzl
			8 CT + 1CF						
			10CT + 2CF						
5	quai de Bougainville (Le Havre)	3	15CT+11CF	hydraulique Glötzl (20 x 30)	1	24 CV Telemac	oui	- 3 ouverts - 2 PAC CT	6 cales annulaires Glötzl
			9CT + 6CF			24 Aitech			
			8CT + 6CF						
6	quai en eau profonde (Calais)	2	1 CF	Simecsol (100 x 100)	4+1+2	30 CV (éprouvettes en béton)	oui	2	4 jauges/tir. 6 tir. n. inf. 8 tir. n.sup.
7	parking (Cambridge)	1	4 CT + 3 CF	hydraulique Glötzl (15 x 25)	1	2 CV (cellules de force rebar)	oui	7***	3 (cellules de force à CV)
8	quai O'Swaldkai (Hamburg)	2	10 CT	IGB TUBS (Φ80)	3+1	6 béton 2 rebar	non	-	3
			3 CT			2 jauges déf.			

* - dimensions en cm ;

** - y compris les tassements ;

*** - installés sur la plaque support de chaque capteur de pressions totales.

Notations :

CV - corde vibrante ;

CT - côté terrain ;

CF - côté fouille.

Tableau 2-2. Dispositifs de mesure installés sur les ouvrages

Cette redondance est nécessaire compte tenu de la défaillance (constatée occasionnellement) des appareillages, mais aussi pour améliorer l'exactitude de mesure et les modèles de calcul.

On a équipé, en général, plusieurs profils de moyens de mesure (6 parmi les 8 cas étudiés comportent au moins deux profils instrumentés).

Pour les expérimentations consacrées aux soutènements de fouilles en milieu urbain ([3], [4], [7]), l'instrumentation a été disposée dans les parois soutenant le côté le plus long de la fouille.

Une situation particulière a été identifiée pour l'instrumentation du quai de Calais, qui n'avait pas été focalisée sur l'estimation de la distribution des contraintes agissant sur l'écran. Sa conception visait en effet l'observation de la cinématique de l'écran.

Un seul capteur de contraintes totales (capteur prototype) a été implanté dans ce cas dans une position particulière pour tester son potentiel de mesure sur l'ouvrage réel.

Un deuxième cas particulier a été l'instrumentation du quai de Seaforth [1]. L'ouvrage n'a pas été équipé d'appareillages permettant d'accéder aux déformations de flexion de l'écran. Sa géométrie complexe, qui assure une raideur en flexion très importante, ne permet ni d'accepter l'hypothèse d'un état plan de déformation, ni de mesurer les déformations engendrées (qui sont très faibles et donc difficilement mesurables).

Les extensomètres à corde vibrante implantés en pied d'écran (noyés dans des éprouvettes préfabriquées en béton) ont été utilisés pour accéder aux pressions verticales transmises par la paroi au substratum (grès), tandis que le suivi topographique en tête a été interprété en termes de rotation rigide de l'écran.

Enfin, on a remarqué la disposition régulière des moyens de mesure de l'effort transmis par les appuis latéraux des panneaux instrumentés. Les exceptions sont les cas où l'appui a été réalisé à l'aide de diaphragmes [1] ou de planchers en béton [3].

Il a été ainsi possible d'obtenir des renseignements pour la conception de tels appuis mais aussi, pour l'étude de leur corrélation expérimentale avec les pressions

horizontales exercées par les sols.

2.4.2 Dispositifs de mesure des contraintes totales

2.4.2.1 Types de capteurs et schéma d'implantation

Les parois moulées ont été équipées généralement de capteurs de contraintes totales ordinaires ([1], [2], [3], [4], [5] et [7]), couramment utilisés pour tout ouvrage géotechnique (cellules Glötzl à système de mesure hydraulique, cellules British Research Station ou Øien à système de mesure acoustique).

Comme exceptions, on a remarqué l'instrumentation du quai de Calais [6] (où Simecsol avait conçu un capteur prototype bi-axial de grandes dimensions) et celle d'O'Swaldkai [8] (où l'on avait fait appel à des coussins hydrauliques spéciaux de large diamètre).

Les publications analysées ne donnent pas de renseignements sur les critères qui ont permis le choix des capteurs et, dans la plupart des cas, la description des capteurs est très sommaire tant sur leurs caractéristiques métrologiques, que sur leur qualification préalable.

Seule exception, l'étude consacrée à l'expérimentation [1] comporte une description assez détaillée des capteurs :

- ♦ disque plat en acier zingué (diamètre de 28 cm et épaisseur d'environ 4 cm) présentant 2 surfaces actives (diamètre d'environ 15,3 cm), chacune étant instrumentée par un transducteur à corde vibrante ;
- ♦ les capteurs ont été fixés à l'intérieur d'une boîte de protection en fonte (diamètre extérieur d'environ 33 cm et épaisseur d'environ 5,1 cm), un joint en caoutchouc assurant l'étanchéité ;

et des tests auxquels ils ont été soumis au préalable :

- ♦ après leur installation dans la boîte, les capteurs ont été soumis à un étalonnage hydraulique ;

- ♦ ensuite, on a étudié leur réponse à l'action d'une charge ponctuelle agissant perpendiculairement sur une surface active et se déplaçant suivant un rayon ; il a été possible de constater que la valeur enregistrée (de la pression uniforme apparente) par la corde vibrante attachée à la surface active chargée dépendait de la position de la force mobile :
 - i. quand la charge était déplacée au centre de la surface active, la pression uniforme apparente enregistrée était d'environ 10 fois supérieure à la pression uniforme équivalente transmis par la charge ponctuelle ;
 - ii. quand la charge mobile était placée sur la circonférence de la surface active, la pression uniforme apparente enregistrée par le capteur était nulle.
- ♦ ce phénomène n'a cependant pas été constaté par la corde vibrante attachée à l'autre surface active du capteur ; celle-ci n'avait pas été sensible à la position de la charge ponctuelle (la valeur enregistrée était légèrement inférieure à la pression uniforme équivalente).

Les expérimentations qui ont eu recours aux coussins hydrauliques de type Glötzl ([2], [4], [5], [7]) se sont contentées d'une description très sommaire des capteurs. Pour des détails sur la conception de ces capteurs (qui ont connu une utilisation extensive dans les années 1960 – 1990 pour des applications diverses, y compris pour des mesures à l'interface des parois moulées), ils ont renvoyé, par défaut parfois, le lecteur à des études consacrées à ce type de capteur⁴.

Une remarque sur l'utilisation des capteurs Glötzl a été trouvée dans une publication consacrée à l'expérimentation [7]⁵ (coussin de pression rempli de mercure et transducteur pneumatique à diaphragme). Ils nécessitent l'estimation préalable de la pression pneumatique nécessaire pour maintenir le coussin ouvert. Cette dernière permet, par soustraction de la valeur mesurée, de déterminer la valeur de la pression nette, exercée sur la surface du capteur (valeur à mesurer).

⁴ Prager (1974), p. 1-126 ;

⁵ Lings et al. (1994), p.167

Pour la description des capteurs utilisés pour l'expérimentation [3], on renvoie à une publication préalable, non disponible pour cette étude⁶.

Le capteur prototype bi-axial utilisé lors de l'instrumentation du quai de Calais [6] avait une surface active de grandes dimensions (d'un mètre de côté). Une plaque rigide a été utilisée à cet effet ; elle a assuré le transfert des résultantes normale et tangentielle des contraintes exercées par les sols (σ , τ) à des pesons instrumentés (corps d'épreuve). Les pesons pouvaient se déformer par rapport à un cadre support rigide noyé dans la paroi moulée. Ce capteur a permis l'accès direct à la contrainte normale effective dans la mesure où le joint entre la plaque et le cadre support n'était pas étanche. Etant donné la complexité de ce capteur, qui dépasse le cadre de notre étude (on s'intéresse, a priori, seulement à la mesure des contraintes normales) ainsi que les résultats des mesures enregistrées qui ont été jugés peu plausibles, on arrête à ce stade la description de cette expérimentation. Elle a fait l'objet d'une analyse exhaustive préalable⁷.

Enfin, l'expérimentation [8] a fait appel à deux types de capteurs de contraintes totales (5 capteurs de « petite taille » et 8 de « grande taille »). Seuls les capteurs de grande taille ont été décrits, d'une façon sommaire. Il s'agit des coussins de grand diamètre (0,80 m) conçus par « IGB TUBS ». Les auteurs précisent que l'espace entre les deux plaques du coussin (épaisseur de 2 mm) contenait des anneaux instrumentés⁸.

Quant au schéma d'implantation des capteurs, le nombre de profils instrumentés varie de 1 ([3], [7]) à 3 ([1], [4] et [5]), tandis que l'espacement vertical des capteurs dans un même profil varie de 1 m [3] à 5 m [8].

Ces capteurs ont été placés aussi bien à l'interface de l'écran avec le massif soutenu que sur le côté opposé.

⁶ Øien (1958), « An earth pressure cell for use on sheet piles, Oslo Subway », Bruxelles Conférence on Earth Pressure Problems, vol. 2, p. 118 – 126.

⁷ Delattre (1999), p. 285 – 326.

⁸ Aucune image ou schéma du principe de fonctionnement du capteur n'a pas été présenté dans les 2 publications disponibles.

2.4.2.2 Dispositifs de mise en place des capteurs

Les mesures des pressions totales ont été réalisées, en général, à l'aide des capteurs intégrés dans le béton de la paroi. Ils ont été implantés avec leur surface active au niveau de la surface de l'écran grâce à des dispositifs spéciaux montés sur la cage d'armature du panneau instrumentés.

Ces dispositifs peuvent être actionnés à distance pour réaliser la mise en contact des capteurs avec le sol après la pose de la cage dans la tranchée remplie de boue à l'aide d'un vérin hydraulique ([1], [3], [4], [5] et [7] ; Fig. 2-7 et Fig. 2-8), d'un vérin mécanique ([2] ; Fig. 2-9) ou d'un système de leviers ([8], Fig. 2-10).

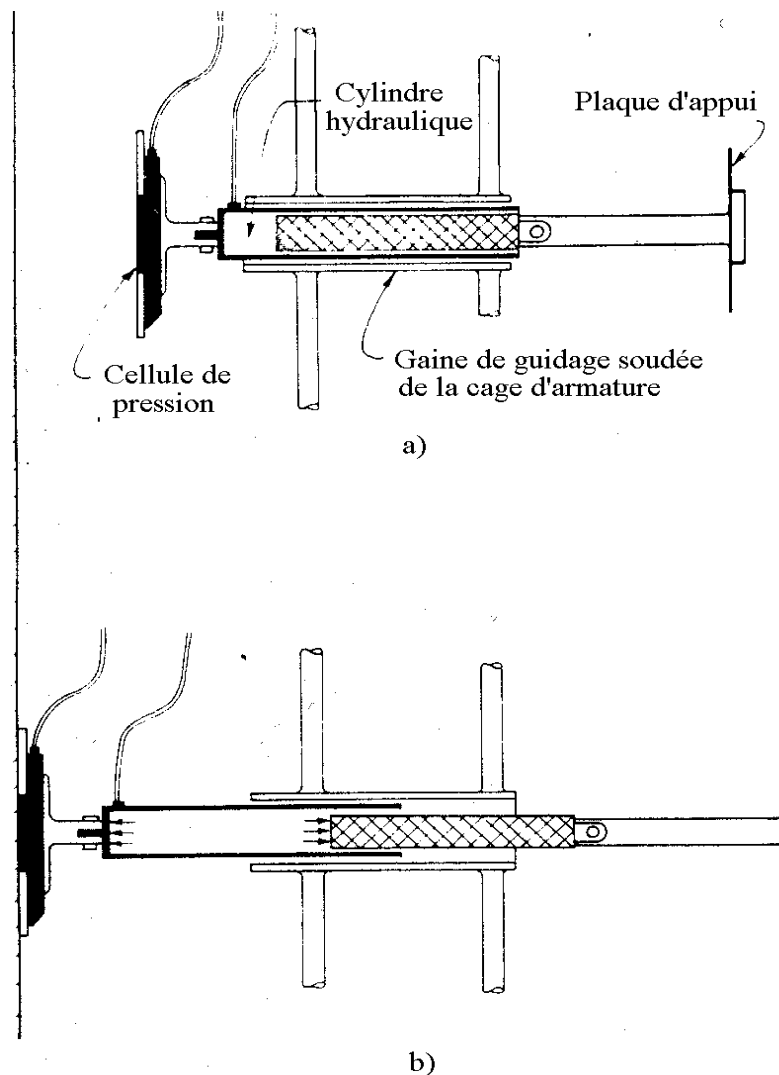


Fig. 2-7 : Installation d'un système de mesure des contraintes totales d'interface (DiBiagio et Roti, 1972). a) Système en cours de descente ; b) Installation terminée.

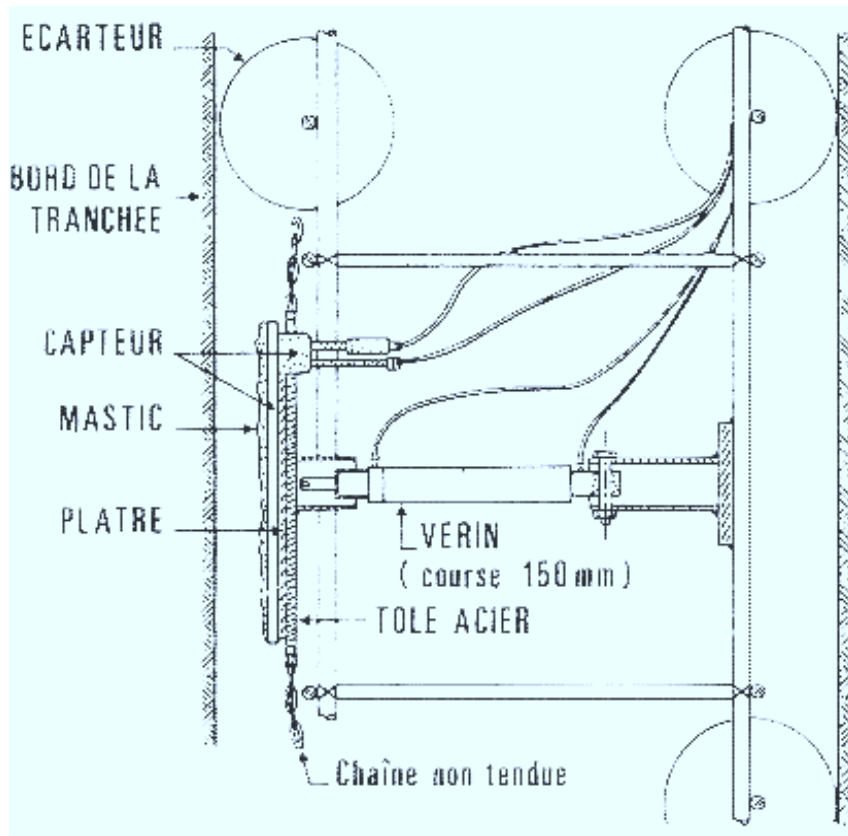


Fig. 2-8 : Dispositif de mesure des contraintes totales à cellule Glötzl en cours de descente dans la tranchée (d'après Josseaume et Stenne, 1979).

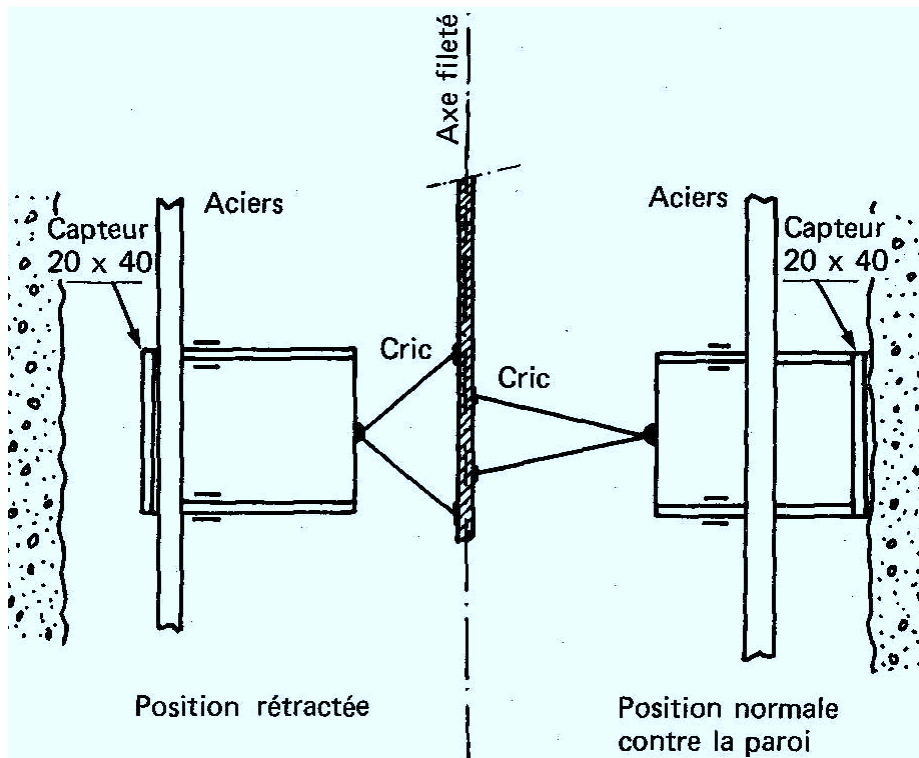


Fig. 2-9 : Schéma d'implantation de deux capteurs agissant sur deux interfaces opposées (d'après Ursat et al., 1974).

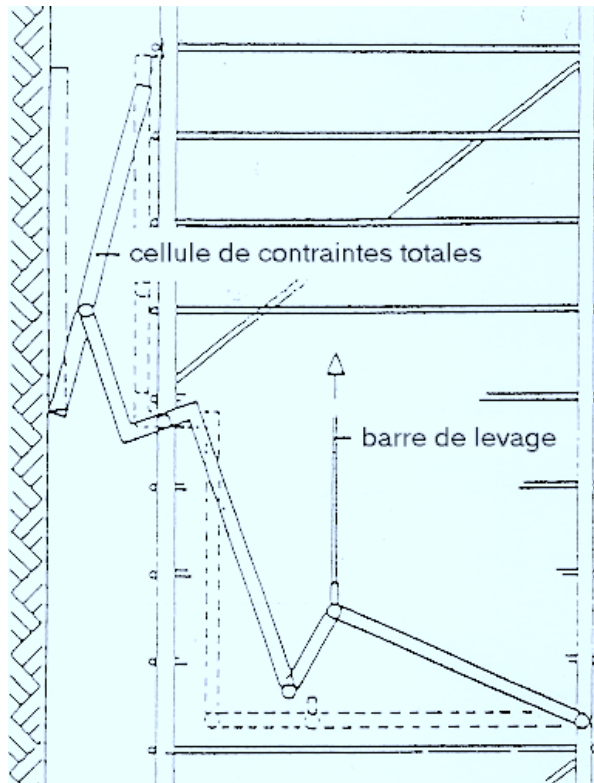


Fig. 2-10 : Schéma d'installation des coussins IGB TUBS à l'aide d'un système de leviers (d'après Rodatz et al., 1994).

Une exception par rapport à cette technique de mise en place des capteurs a été rencontrée pour l'expérimentation [2]. Dans ce cas, en dehors de l'installation de 6 capteurs Glötzl (20 x 40 cm) à l'interface de la paroi (à l'aide d'un cric de voiture), on a implanté 8 autres capteurs (Glötzl, 10 x 20 cm) dans des forages verticaux situés à une distance d'environ 0,75 m derrière l'écran. Une injection de bentonite a été réalisée au préalable pour la tenue des parois des forages.

Cette méthode d'installation présente le désavantage d'un effet d'inclusion du capteur au sein d'un sol remanié (par l'exécution du forage) et elle n'assure pas, a priori, des conditions de contact sol – capteur satisfaisantes.

L'installation des capteurs dans la paroi nécessite leur mise en contact avec le sol sous une pression imposée pour s'assurer que leur surface sensible se trouve dans le plan d'interface et pour empêcher l'infiltration du béton frais entre la surface active du capteur et le sol. Elle implique une erreur de principe de la mesure car l'expérimentation s'intéresse aux pressions agissant à l'interface en l'absence de cette

pression artificiellement imposée (erreur de discrétion).

Les valeurs des pressions imposées au contact avec le sol pour chaque expérimentation analysée ont été représentées dans le Tableau 2-3, qui rappelle aussi le mode de mise en place des capteurs. On remarque que, pour les dispositifs « artisanaux » (à cric et à levier), la pression de contact ne peut être déterminée a priori, et qu'on ne la connaît qu'à travers les valeurs des pressions totales enregistrées par les capteurs⁹.

Les dispositifs de mise en place à vérin permettent la connaissance de la pression imposée au contact sol-capteur en fonction de la force transmise par le vérin. Cette dernière peut être déterminée à partir de la pression dans le circuit hydraulique des vérins (mesurée à l'aide d'un manomètre), le diamètre du piston et le diamètre de la surface de contact du capteur avec le sol.

Ainsi, il est possible d'étudier durant le bétonnage la relation expérimentale entre la valeur estimée de la pression agissant sur la surface du capteur (à partir de la pression de vérinage et de la pression exercée par la colonne mixte boue-béton) et la valeur mesurée en même temps par les capteurs.

Un tel système avait été utilisé pour la première fois, à notre connaissance, lors de l'expérimentation [1]. La technologie adoptée a été décrite par Uff (1970) :

- ♦ la boîte en fonte contenant le capteur a été fixée au piston d'un vérin par l'intermédiaire d'une articulation ;
- ♦ le vérin a été installé, en préalable, à l'intérieur d'une gaine fixée par soudure à la cage du panneau instrumenté ;
- ♦ la cage a été ensuite descendue dans la tranchée, guidée par des patins (fixés en bas de la cage) qui empêchent, par ailleurs, ses éventuels mouvements latéraux causés par la mise en pression des vérins ;

⁹ Dans le cas [2] on s'est contenté de mentionner que « le contact avec la paroi implique une certaine précontrainte » tandis que, pour l'expérimentation [8], la solution adoptée, bien qu'ingénieuse (elle utilise 2 barres de levage articulées à une barre support du coussin permettant sa manipulation à distance), a été caractérisée simplement par une indication technologique (« the earth pressure cell is pressed to the soil »).

- ♦ une fois la cage descendue et positionnée dans la tranchée, les capteurs ont été connectés au système d'acquisition et une première série de mesures de la pression hydrostatique exercée dans la boue a été réalisée avec l'ensemble des capteurs ;
- ♦ enfin, avant le commencement du bétonnage les capteurs ont été mis en contact avec le bord vertical de la tranchée à une pression supérieure d'environ 50 kPa à la pression hydrostatique exercée par la boue.

Tableau 2-3 : Dispositifs de mise en place des capteurs et valeurs des pressions imposées au contact avec le sol

No.	Coordonnées de l'ouvrage	Système d'installation des capteurs	Pression de contact capteur -sol (kPa)
1	quai de Seaforth (Liverpool)	à vérin	$p^{\text{boue}} + 50$
2	quai du canal Rhône-Rhin (Mulhouse)	à cric (de voiture)	$p^{\text{boue}} + 20$
3	Telefonhuset (Oslo)	à vérin	$p^{\text{boue}} + (5-35)^*$
4	S.E.R.E.T.E (Paris)	à vérin	$p^{\text{boue}} + 20$
5	quai de Bougainville (le Havre)	à vérin	$p^{\text{boue}} + 15$
6	quai en eau profonde (Calais)	à vérin	$k_0 \gamma H$
7	parking (Cambridge)	à vérin	$1,2 p^{\text{boue}}$
8	quai O'Swaldkai (Hamburg)	à leviers	non précisée

*- une surpression de faible intensité est appliquée à l'arrivée du béton ;

Notations :

p^{boue} - pression hydrostatique dans la boue au niveau du capteur ;

H - profondeur d'installation du capteur par rapport au terrain naturel.

Cette technologie de mise en place des capteurs à l'aide de vérins a été ensuite reprise pour les expérimentations [3], [4], [5], [7] avec différentes modifications.

DiBiagio et Roti (1971) ont renoncé à la boîte de protection des capteurs en faveur d'une plaque support annulaire dont le diamètre intérieur était adapté à celui de la surface active du capteur. Lors du montage, cette dernière (diamètre de seulement 10 cm) a été amenée dans le même plan que la plaque support (Fig. 2-7), permettant un contact uniforme avec le bord vertical de la tranchée.

Ils ont ajouté, par ailleurs, une plaque de contre-appui du vérin sur le bord opposé de la tranchée tout en permettant le glissement du vérin à l'intérieur d'une gaine fixée à la cage d'armature.

L'instrumentation de Telefonhuset [3] a accordé une attention particulière au contrôle de la pression de contact sol-capteur durant le bétonnage. Ainsi, la valeur initiale de cette pression (variant entre 5 et 35 kPa au-dessus de la pression hydrostatique exercée par la boue) a été légèrement augmentée au moment où le niveau du béton coulé dans la tranchée s'est approché de chaque capteur. Elle a été ramenée à la valeur initiale dès que le niveau du béton a dépassé son niveau.

Josseume et Stenne (1979) ont adapté la technique « à vérin » pour installer des capteurs Glötzl.

Les coussins hydrauliques ¹⁰ ont été fixés sur une plaque en acier au travers d'une couche en plâtre (Fig. 2-8). Leur surface de contact a été protégée par un mastic. Dans ce cas, les vérins s'appuient directement sur la cage d'armature (pas de gaine) par l'intermédiaire d'un support adéquat (soudé à la cage).

Ce système a été employé aussi pour l'expérimentation [5].

Lings et al. (1993) ont utilisé un système similaire de mise en place des capteurs. Ils ont décrit, d'une façon sommaire, son principe de conception (plaque support et vérin raccordés par l'intermédiaire d'une articulation universelle) en précisant que la plaque support de chaque capteur avait été conçue plus grande pour accueillir aussi un

¹⁰ Les surfaces actives du coussin Glötzl ne sont pas parfaitement planes ce qui explique leur fixation sur la plaque d'appui à travers une couche en plâtre ; cette forme (légèrement bombée) pourrait entraîner une distribution non uniforme des pressions exercées par le sol (butée excédentaire au centre du coussin).

piézomètre pneumatique.

Dans ce cas, la pression de contact sol – capteur durant le bétonnage a été gérée directement par les signaux délivrés par les capteurs. Au moment où ceux-ci avaient indiqué une pression égale à 120 % de la pression hydrostatique de la boue exercée à leur niveau, la pression de vérinage a été maintenue constante jusqu'à la fin du bétonnage du panneau instrumenté.

2.5 Qualification des résultats expérimentaux

Pour chaque expérimentation (à l'exception de [6]), nous avons rassemblé les renseignements significatifs sur l'interprétation des mesures de pressions totales.

On s'intéresse, pour l'essentiel, aux éléments qui participent à la fiabilité des mesures et à leur exploitation qualitative et quantitative pour trois étapes significatives de chaque expérimentation :

- ♦ bétonnage des parois ;
- ♦ durcissement du béton moulé dans le sol ;
- ♦ phases de construction ultérieures et ouvrage en service.

Une attention particulière a été accordée aux observations relatives à la dernière étape, où l'ouvrage assure son rôle de soutènement en supportant des sollicitations dont la connaissance est très importante pour optimiser leur dimensionnement.

2.5.1 Bétonnage des panneaux instrumentés

2.5.1.1 Quai de Seaforth à Liverpool [1]

Uff (1970) a effectué trois séries de mesures sur l'ensemble des capteurs disponibles durant le bétonnage du panneau instrumenté :

- ♦ après l'immersion dans la bentonite (mesure 1), les résultats expérimentaux ont été comparés à la valeur estimée de la pression hydrostatique de la boue ; on constate la

concordance de la moyenne des pressions observées à chaque niveau de mesure (3 profils à 4 capteurs à 2 jauges ; Fig. 2-1) avec les valeurs estimées de la pression hydrostatique de la boue, en dépit d'un écart type des mesures individuelles à chaque niveau (3 profils x 2 jauges/niveau = 6 mesures/niveau) relativement élevé ;

- ♦ après la mise en contact des capteurs avec le bord vertical de la tranchée (mesure 2) l'augmentation de la pression enregistrée par chaque capteur a été comparée à la pression de contact exercée par le système de vérinage ; on constate la bonne corrélation des valeurs enregistrées par les cordes vibrantes solidaires de la surface active qui s'appuie sur le fond de la boîte tandis que pour la surface active en contact avec le sol on a constaté un sur-enregistrement d'environ 43 % ;
- ♦ après la fin du bétonnage (mesure 3), la pression enregistrée à chaque niveau de mesure a été comparée avec la pression du béton frais (considérée comme hydrostatique) ; leur rapport, appelé « facteur de fluidité », a été déterminé pour chaque niveau de mesure (0,57 à 16 m ; 0,74 à 13 m ; 0,70 à 8,5 m ; 0,69 à 5,5 m de profondeur).

D'une manière générale, les valeurs enregistrées par la surface active intérieure sont sensiblement plus faibles que celles enregistrées par la surface active supérieure. Uff a indiqué que, pour d'autres expérimentations réalisées avec le même type de capteurs « emboîtés », on a observé le même sur-enregistrement pour la surface active extérieure des capteurs.

2.5.1.2 Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2]

Ursat et al. (1974) considèrent que le suivi pendant le bétonnage du panneau instrumenté des pressions totales agissant à l'interface de l'écran présente un « intérêt à double titre » :

- ♦ « contrôler la bonne mise en place des capteurs »;
- ♦ « étudier le rôle du serrage contre la paroi ».

Ils ont constaté que le serrage des capteurs était nécessaire ; une pression de contact de

20 kPa ajoutée à la pression exercée par la boue a été considérée comme suffisante.

Quant aux capteurs installés dans les forages exécutés derrière la paroi, ils n'ont permis « aucune interprétation quantitative ».

2.5.1.3 Immeuble Telefonhuset à Oslo [3]

DiBiagio et Roti (1971) ont vérifié d'abord le fonctionnement des capteurs sous la pression hydrostatique appliquée par la boue. Ils ont constaté une réponse adéquate à chaque niveau de mesure ($\rho_{\text{boue}} = 1,2 \text{ t/m}^3$).

Pendant le bétonnage ils ont suivi chaque capteur de près. Ils ont pu ainsi déterminer les pressions exercées par le béton frais en soustrayant des valeurs mesurées la pression de contact imposée par le vérinage des capteurs. Ils ont représenté sur un graphique la variation avec la profondeur des pressions maximales exercées par le béton frais à l'interface de la tranchée durant le bétonnage.

On constate que le diagramme des pressions maximales exercées par le béton présente une variation hydrostatique ($\rho_{\text{bét}} = 2,35 \text{ t/m}^3$) jusqu'à une profondeur d'environ 6 m. Au-delà de cette profondeur, le gradient de croissance des pressions horizontales maximales exercées par le béton frais à son interface avec le sol est plus faible.

2.5.1.4 Immeuble parisien de la SERETE [4]

Pour l'expérimentation [4], il n'a pas été effectué de mesure de pressions totales à l'interface de la paroi durant son bétonnage. Toutefois, il a été fait appel à un capteur Glötzl, qui a été noyé complètement dans la masse de béton pour enregistrer la pression horizontale exercée par le béton frais en pied de la paroi (à une profondeur de 19,3 m).

On a pu ainsi constater une augmentation de la pression mesurée durant le bétonnage jusqu'à 150 kPa au-dessus de la pression initiale exercée par la boue (une heure après le début du bétonnage). Au moment de l'enregistrement de cette pression maximale, le niveau du béton dans la tranchée atteignait une hauteur d'environ 11,6 m au-dessus du capteur Glötzl.

Ensuite, jusqu'à la fin du bétonnage, on a constaté une baisse continue de la pression horizontale mesurée. Deux heures après le début du bétonnage (pour un niveau final du béton dans la fouille situé à 19,3 m au-dessus du niveau du capteur), elle valait environ 30 kPa de plus que la pression hydrostatique initialement exercée par la colonne de boue.

2.5.1.5 Quai de Bougainville au port du Havre [5]

Lors de l'expérimentation du quai de Bougainville, où un panneau de paroi moulée a été équipé de 55 capteurs de pression totale Glötzl, on n'a pas effectué de mesure de pressions totales durant le bétonnage.

Cependant, vu le nombre impressionnant des capteurs disponibles, on avait décidé l'installation de « huit capteurs posés sur la face avant de la paroi, qui ont été découverts lors du dragage ». Ces capteurs ont indiqué ensuite « une pression systématiquement supérieure à la pression de l'eau de la darse » (écart moyen estimé à 11,5 kPa)¹¹.

2.5.1.6 Parking souterrain à Cambridge [7]

Lings et al. (1994) ont consacré un article entier à l'étude des pressions horizontales exercées sur le bord vertical des tranchées en cours de bétonnage lors de la mise en œuvre des parois moulées dans les sols.

Ils ont présenté d'abord un modèle théorique semi-empirique permettant d'évaluer les pressions horizontales maximales exercées par le béton frais sur les coffrages verticaux. Ce modèle (qui a été adopté après des recherches expérimentales extensives) est couramment utilisé pour le dimensionnement des coffrages verticaux :

¹¹ Le sur-enregistrement systématique constaté par les huit capteurs en milieu hydrostatique (qui, en valeur absolue, dépasse à peine deux fois l'incertitude de mesure d'un capteur courant) pourrait être causé par leurs conditions de fonctionnement après leur intégration dans la paroi. Plus précisément, il pourrait s'expliquer par la raideur sous l'action des charges latérales des capteurs Glötzl, visiblement plus réduite que celle d'autres types des capteurs (à surface active protégée par un anneau rigide extérieur) et, d'autre part, par les pressions verticales élevées dans le béton (qui peuvent dépasser sensiblement celles exercées par les sols).

- ♦ la pression horizontale maximale varie d'une façon hydrostatique jusqu'à une certaine profondeur appelée profondeur critique, h_{cr} ;
- ♦ au-delà de cette profondeur critique, la pression exercée par le béton frais reste constante (les observations expérimentales ont même mis en évidence une légère réduction de la pression exercée par le béton frais pour des profondeurs supérieures à la profondeur critique) ;
- ♦ le modèle théorique propose une formule pour le calcul de la profondeur critique en fonction de plusieurs paramètres (productivité de la mise en œuvre du béton ; forme de la section transversale ; température du béton à sa mise en œuvre ; type de ciment et des additifs).

Ce modèle a été adopté pour faire suite au constat d'un comportement hydrostatique du béton frais seulement pour une durée très limitée après sa mise en œuvre. Les particules solides du mélange sont alors en suspension et la pression horizontale effective est égale à zéro. Ensuite, le béton subit un processus de consolidation sous l'effet des réactions d'hydratation et d'hydrolyse et par l'élimination de l'eau excédentaire ; la pression est transférée graduellement aux particules solides (pression effective) dont la composante horizontale représente seulement une fraction de la pression verticale effective.

Pour le cas d'un bétonnage sous eau, un rapport du CIRIA (Clear et Harrison, 1983) recommande d'estimer la courbe enveloppe des pressions horizontales exercées par le béton frais sur un coffrage vertical avec un modèle similaire, qui tient compte de la présence de la colonne d'eau.

Lings, Ng et Nash ont considéré que ce dernier modèle pouvait être appliqué aussi dans le cas du bétonnage des panneaux de parois moulées sous bentonite. La relation de calcul permettant d'estimer la distribution des pressions horizontales maximales exercées sur le bord vertical de la tranchée durant son bétonnage présente une forme bilinéaire (z – désigne la profondeur exprimée par rapport au niveau du béton à la fin du bétonnage) :

$$[\sigma_h(z)]_{\max} = \begin{cases} \gamma_{\text{béton}} z & \text{pour } z \leq h_{cr} \\ \gamma_{\text{boue}} z + (\gamma_{\text{béton}} - \gamma_{\text{boue}}) h_{cr} & \text{pour } z > h_{cr} \end{cases} \quad (2.6)$$

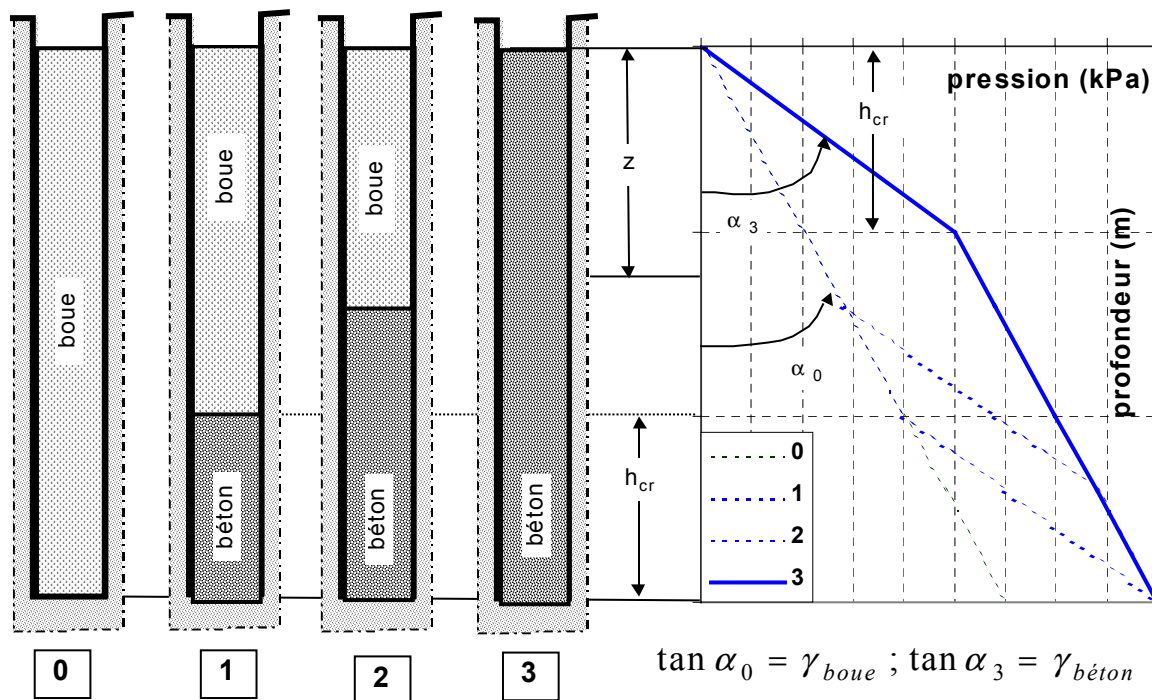
Cette relation décrit la distribution des pressions horizontales exercées à la fin du bétonnage. Elle correspond, par ailleurs, à l'enveloppe des courbes des pressions horizontales exercées sur le bord vertical de la tranchée quand le niveau du béton monte dans la tranchée (Fig. 2-11).

Dans un premier temps, Lings, Ng et Nash se sont proposés de vérifier la validité du modèle bilinéaire pour l'expérimentation [7].

Avant d'étudier la corrélation des résultats expérimentaux, ils ont insisté sur les difficultés liées à l'exploitation des mesures effectuées durant le bétonnage du panneau instrumenté (panneau 22, Fig. 2-6). Un ajustement des résultats expérimentaux a été nécessaire :

- ♦ la première mesure effectuée après la pose de la cage dans la tranchée remplie de boue a permis d'observer un sous-enregistrement de l'ordre de 20 kPa pour les 3 capteurs installés avec leur surface active côté fouille ; ce sous-enregistrement a été expliqué par des perturbations apparues à l'installation des capteurs sur la cage et il a été annulé par l'ajustement de la correction du zéro des capteurs (la pression pneumatique nécessaire pour maintenir les coussins Glötzl ouverts en absence de l'application de toute pression extérieure) ;
- ♦ après la mise en contact, sous la boue, des capteurs avec le bord vertical de la tranchée, on a constaté, pour trois systèmes de mesure, une force de véinage mobilisée sensiblement plus faible que celle estimée pour obtenir la pression de contact requise (égale à 1,20 fois la pression hydrostatique agissant à chaque niveau de mesure ; cette incohérence a été attribuée à la non-uniformité des pressions agissant au contact sol-capteur et a été corrigée par l'ajustement de la correction du zéro des capteurs afin d'obtenir des pressions de contact nettes égales à celle exercée par la bentonite) ;

- ♦ enfin, un dernier ajustement a été appliqué au capteur situé au plus haut niveau (capteur 1), qui a indiqué une croissance anormale de la pression observée juste



avant l'arrivée du béton à son niveau.

Fig. 2-11 : Modèle pour l'estimation des pressions horizontales exercées sur le bord vertical d'une tranchée en cours de bétonnage.

L'analyse de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus après la montée du béton au-dessus de chaque capteur (pressions horizontales nettes exercées par le béton frais), a permis de constater l'augmentation des pressions enregistrées, d'une façon hydrostatique, jusqu'à une certaine valeur. Ensuite, en dépit de la poursuite de la montée du niveau du béton dans la tranchée, la pression observée par chaque capteur reste quasiment constante.

En représentant les valeurs maximales des pressions horizontales nettes enregistrées à chaque niveau de mesure (durant le bétonnage du panneau instrumenté) suivant la profondeur de la paroi, les auteurs ont pu estimer la profondeur critique à environ 5 m et constater la cohérence des résultats expérimentaux avec la courbe enveloppe proposée par le modèle théorique bilinéaire.

Dans un deuxième temps, Lings, Ng et Nash ont cherché dans la littérature d'autres expérimentations de parois moulées qui se sont intéressées à l'observation des pressions exercées à leur interface avec le sol au cours du bétonnage. Ils ont identifié seulement deux anciennes publications (DiBiagio et Roti, 1972 ; Uriel et Oteo, 1977) permettant de rassembler les renseignements nécessaires pour étudier la pertinence du modèle théorique bilinéaire.

Ils ont pu ainsi construire la courbe enveloppe des pressions horizontales mesurées durant le bétonnage pour deux autres expérimentations et obtenu une forme bilinéaire caractérisée par une hauteur critique égale à environ 1/3 de la profondeur de l'écran.

En se basant sur les résultats expérimentaux fournis par les trois cas analysés, les auteurs ont conclu que le modèle semi-empirique décrivant les pressions horizontales maximales exercées sur les coffrages verticaux pendant un bétonnage sous eau peut être appliqué aussi au cas des parois moulées dans une tranchée sous boue.

Cependant, ils ont remarqué que l'application des recommandations du rapport 108 du CIRIA conduit à une sous-évaluation de la profondeur critique pour le cas des parois moulées¹² et, notamment, pour les parois de (très) grande profondeur.

Lings, Ng et Nash ont précisé que le rapport 108 du CIRIA permet l'estimation de la profondeur critique du béton coulé pour des ouvrages de profondeur inférieure à 15 m tandis que les parois moulées peuvent avoir une profondeur sensiblement supérieure (jusqu'à 40 m). Ils ont considéré que la profondeur des parois est en relation directe avec la longueur des chemins de drainage et donc avec la vitesse de dissipation de la pression de l'eau en excès, pouvant influencer la taille de la profondeur critique.

Par ailleurs, ils ont mentionné que la raideur opposée par le massif de sol aux pressions exercées par le béton frais est supérieure à celle d'un coffrage ordinaire, ce que pourrait déterminer l'augmentation des pressions horizontales exercées par le béton

¹² Les résultats fournis par le capteur noyé dans la paroi lors de l'expérimentation [4] confirment cette hypothèse. Dans ce cas, la hauteur critique a dépassé la moitié de la hauteur de l'écran (mais elle a été obtenue pour une durée de bétonnage du panneau instrumenté de seulement 2 h).

moulé dans le sol.

Enfin, vu l'écart très important entre le nombre d'expérimentations prises en compte pour établir le modèle théorique de distribution des pressions horizontales exercées sur les coffrages (plus de 350 cas) et le nombre d'expérimentations de parois moulées qui donnent des renseignements sur les pressions développées à l'interface avec le sol durant leur bétonnage, Lings, Ng et Nash concluent qu'il y a un besoin urgent de procéder à d'autres expérimentations de parois moulées, en se proposant des objectifs similaires.

2.5.1.7 O'Swalkai dans le port du Hambourg [8]

Rodat et al. (1994) ont présenté sur un diagramme la variation dans le temps des pressions totales observées à 5 niveaux (avec des coussins de large diamètre) depuis la pose de la cage instrumentée dans la tranchée jusqu'à 3 h après la fin du bétonnage.

Ce diagramme permet d'observer une croissance de la pression mesurée durant le bétonnage jusqu'à 70 à 80 kPa au-dessus de la pression initiale exercée par la boue (à l'exception du capteur situé le plus haut, à une profondeur de seulement 3m, pour lequel l'augmentation maximale de la pression observée est d'environ 35 kPa).

Vers la fin du bétonnage, la pression mesurée se réduit d'environ 30 kPa, d'abord pour le capteur le plus bas, et, ensuite, du bas vers le haut, pour les autres capteurs. Pour les deux capteurs implantés aux plus faibles profondeurs, cette réduction intervient seulement après la fin du bétonnage et elle a une ampleur presque égale à la croissance de la pression survenue durant le bétonnage.

Si l'on considère que ce diagramme correspond à la variation des pressions horizontales nettes¹³ (par exemple, en négligeant la pression de contact imposée par le système de leviers), nous pouvons estimer, grossièrement, la hauteur critique dans l'hypothèse où elle obéit au modèle bilinéaire (décrit par la relation 2.6) :

¹³ On n'a pas trouvé de précision concernant cette notion. Toutefois, on suppose que le diagramme concerne les pressions observées par les capteurs.

$$h_{cr} = \frac{[\sigma_h(z)]_{\max} - \gamma_{boue}z}{\gamma_{béton} - \gamma_{boue}} \cong \frac{75kPa}{(24-11)kN/m^3} \cong 6m \quad (2.7)$$

Cette valeur de la hauteur critique est inférieure au quart de la hauteur de l'écran, voire encore plus faible si l'on doit soustraire la pression de contact due à l'action des systèmes de leviers.

2.5.2 Béton jeune

2.5.2.1 Quai de Seaforth à Liverpool [1]

Le tronçon « prototype » du quai de Seaforth [1] a été exécuté 40 jours environ avant le début des travaux « de série ». Il a été ainsi possible de suivre les capteurs durant le durcissement du béton avant que l'état des contraintes autour de l'écran ne soit modifié par les travaux.

Uff a présenté un diagramme de variation dans le temps des pressions observées dans un seul profil de mesure (contenant les capteurs 5, 6, 7, 8 ; Fig. 2-1) durant les 60 jours suivant le bétonnage du tronçon prototype.

On a pu ainsi observer une diminution systématique des pressions mesurées par les deux transducteurs attachés à chaque capteur durant le premier mois après la mise en œuvre du tronçon prototype. Cependant le gradient de la baisse varie d'un capteur à l'autre et d'un transducteur à l'autre d'une façon significative (entre 12 % et 45 % par rapport à la valeur initiale).

On a remarqué que les pressions mesurées par les capteurs 6 et 7 sont sensiblement plus élevées que celles mesurées par le capteur 5 (le plus bas).

Au moment de la mise en œuvre du tronçon adjacent au tronçon prototype (réalisée environ 40 jours après le bétonnage de ce dernier) on a constaté dans le diagramme de variation des pressions mesurées un « saut temporaire » d'une ampleur d'environ 10%.

2.5.2.2 Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2]

Marchal et Ursat (1972) ont présenté la courbe de variation des pressions totales en fonction de la profondeur avant terrassement.

Ils ont conclu que « les pressions mesurées sont très faibles, particulièrement pour les capteurs situés dans les forages » (le diagramme présenté permet d'apprécier, grossièrement, des valeurs inférieures à 20 kPa pour des profondeurs comprises entre 2 et 6 m ; pour une profondeur supérieure à 6 m, les pressions mesurées croissent linéairement jusqu'à environ 90 kPa à une profondeur de 13 m).

2.5.2.3 Immeuble Telefonhuset à Oslo [3]

DiBiagio et Roti (1971) ont observé que les pressions mesurées à l'interface de la paroi ont diminué dans le temps durant le durcissement du béton. Ils ont indiqué que la résultante des pressions enregistrées sur la profondeur de l'écran a baissé de 3350 kN/m à la fin du bétonnage jusqu'à 2240 kN/m un mois après (baisse d'environ 33 % par rapport à la valeur initiale).

2.5.2.4 Immeuble parisien de la SERETE [4]

Jossemaume et Stenne (1979) ont précisé que la première série de mesures de pressions totales a été effectuée une semaine après le bétonnage, « alors qu'une excavation d'environ 1,4 m de profondeur avait été creusée devant la paroi ».

Ils ont calculé les valeurs expérimentales du rapport $K = \sigma_h / \gamma z$ pour une profondeur estimée à partir du niveau (initial) du terrain naturel et respectivement pour une profondeur estimée à partir du niveau de l'écran en tête (Fig. 2-4).

En se rapportant aux valeurs initiales (au repos, avant l'exécution de la paroi) estimées théoriquement, ils ont constaté que l'état initial des contraintes horizontales dans le massif n'avait pas été modifié sensiblement. Cependant, ils ont estimé que l'exécution de la paroi (excavation et bétonnage sous boue) détermine des modifications importantes de l'état initial de contraintes et, par conséquent, « il semble assez peu

vraisemblable que la pression initiale mesurée le long de la paroi soit en relation simple avec le coefficient de pression des terres au repos ».

2.5.2.5 Quai de Bougainville au port du Havre [5]

Lors de l'expérimentation du quai de Bougainville, qui s'est appuyée sur une instrumentation redondante implantée dans trois profils, il a été possible d'analyser statistiquement la dispersion des populations des mesures enregistrées à une même profondeur (ou à des profondeurs « ne différant pas de plus de 0,50 m ») pour la première série de mesures (phase 0)¹⁴.

Evidemment, on s'attendait à trouver une distribution quasi-uniforme des pressions horizontales exercées à une même profondeur le long de l'ouvrage et sur chacun de ses côtés pour une mesure effectuée avant le commencement du terrassement.

L'analyse effectuée sur 14 populations comportant de 2 à 6 valeurs individuelles a permis de constater un écart type variant entre 8,5 kPa et 97,5 kPa et un coefficient de variation compris entre 6,5% et 50 %.

Blivet et al. (1981) ont expliqué la dispersion importante des mesures (en dehors des facteurs liés à la précision des capteurs, évaluée par rapport aux mesures fournies par les huit capteurs découverts lors du dragage) par le remaniement non homogène du sol autour de la paroi causé par l'outil d'excavation de la tranchée. Par ailleurs, ils ont évoqué l'effet du «cake formé par la boue remplissant initialement la tranchée », qui « n'a pas nécessairement une épaisseur uniforme ».

Les valeurs moyennes des pressions horizontales mesurées à un même niveau ont servi pour l'estimation expérimentale du coefficient de pression initiale K_i . On a constaté que les résultats obtenus dépassent systématiquement la valeur estimée correspondant à un état du sol au repos ($K_0 = 0,45$) et que le coefficient « K_i décroît avec la profondeur (...) assez régulièrement de 1 à la cote +2,3 m à 0,8 en pied de paroi ».

¹⁴ On n'a pas trouvé dans la publication consacrée à l'expérimentation [5] de précision sur l'intervalle de temps écoulé entre le bétonnage de la paroi et l'enregistrement de la première série de mesures.

Les auteurs ont conclu que les résultats obtenus « sont cohérents avec les sollicitations imposées au sol lors de la construction de la paroi » et que « la pression initiale à l'interface sol-paroi est déterminée, dans une large mesure, par les propriétés du béton et les conditions du bétonnage ».

2.5.2.6 Parking souterrain à Cambridge [7]

Peu d'éléments sur les mesures de pression totale effectuées pendant le durcissement du béton ont été trouvés pour cette expérimentation.

Dans une des trois publications qui sont consacrées à l'analyse de cette expérimentation, (Lings et al., 1991) il est précisé que les sept capteurs Glötzl ont fourni dans cette période des valeurs réduites des pressions exercées sur l'écran.

Elles correspondent à un rapport K_i systématiquement inférieur à 1 tandis que le coefficient de pression de terres au repos, K_0 , calculé à partir de résultats d'essais pressiométriques (effectués avant l'exécution de la paroi) a été trouvé entre 1,5 et 3 (notamment en partie supérieure de la couche d'argile, surconsolidée, où les mesures pressiométriques ont conduit à un rapport $K_0 = 3$).

Les trois auteurs ont conclu que la construction des parois moulées avait provoqué une réduction significative des contraintes horizontales agissant dans le sol au voisinage de l'écran.

2.5.2.7 O'Swalkai dans le port de Hambourg [8]

Rodatz et al. (1994) ont présenté un diagramme de variation des pressions totales observées en continu pendant les quatre jours après le bétonnage de la paroi, afin de mettre en évidence l'effet causé par la marée.

Il ont constaté que la variation des pressions mesurée a une allure sinusoïdale avec une période d'environ 12 heures et une amplitude (l'écart entre les valeurs maximales et minimale pour une période) comprise entre 20 kPa en bas de l'écran et 3 à 5 kPa à 3m de profondeur.

Les résultats enregistrés dans cette période par les 5 capteurs correspondent à des valeurs qui dépassent (d'après notre estimation sur le diagramme) de moins de 40 kPa (influence de la marée comprise) les valeurs de la pression hydrostatique exercée par la boue à leur niveau. Etant donné les valeurs courantes du rapport entre le poids volumique de la boue et le poids volumique des sols (qui n'est pas indiqué) le rapport K_i , reflété par les mesures de pressions de sol exercées sur l'écran, a été inférieur à 1 à tous les niveaux de mesure durant le durcissement du béton.

2.5.3 Phases de construction ultérieures et ouvrage en service

2.5.3.1 Quai de Seaforth à Liverpool [1]

Uff a présenté dans un diagramme les distributions suivant la profondeur des pressions totales enregistrées dans les trois profils de mesure avant et après l'excavation (le dragage) devant le quai. Il a également représenté dans le diagramme les distributions de la pression interstitielle avant et après l'excavation, afin d'avoir aussi accès aux contraintes horizontales effectives.

La géométrie du quai de Seaforth lui confère une inertie et donc une raideur en flexion très importante. Pour cette raison, l'expérimentation de l'ouvrage n'a pas prévu de moyens pour accéder aux déformations de flexion (trop réduites) et l'interprétation des résultats de mesures a été effectuée en termes de poussée mobilisée, à court terme, après l'exécution de l'excavation.

Pour faciliter l'interprétation des mesures de pressions totales, l'expérimentation a comporté un suivi topographique en tête du quai (altimétrique et dans un plan horizontal) ainsi qu'un suivi dynamométrique de l'effort exercé dans le tirant d'ancrage vertical du diaphragme de renfort.

Les deux suivis ont été interprétés en termes de rotation de l'ouvrage autour de son pied.

Il a été possible ainsi de constater que le déplacement horizontal maximal en tête de l'ouvrage (environ $0,4H/1000$, où H désigne la hauteur totale de l'ouvrage) était

inférieur à celui nécessaire pour mobiliser la poussée limite ($H/1000$) et de comparer les résultats des mesures de pressions horizontales au premier niveau de mesure (dans la couche de sable supérieure) avec l'estimation théorique des contraintes de poussée limite et de confirmer que l'état de poussée limite n'avait pas été atteint.

Pour ce qui concerne les résultats expérimentaux à long terme, Uff a fait seulement une remarque sur la durabilité des capteurs : « un seul capteur ne fonctionnait plus un an après leur mise en place ».

2.5.3.2 Canal Rhône – Rhin à Mulhouse [2]

Dans un premier temps, Ursat, Zygler et Marchal ont tenté de relier la variation des pressions mesurées après la mise en tension des tirants à l'effort d'ancrage imposé. Ils ont constaté que les deux capteurs encadrant la tête d'ancrage du tirant voisin n'ont indiqué qu'une faible fraction de la variation de pression attendue (estimée dans l'hypothèse d'une « répartition triangulaire »).

Dans un deuxième temps, ils ont précisé qu'après le dragage du quai, la distribution expérimentale des pressions totales horizontales présentait une allure satisfaisante, mais que « l'analyse quantitative ne donne pas de bons résultats ».

Quant à l'estimation théorique du comportement mécanique de l'écran, elle a été réalisée par le biais des méthodes classiques (« rideau simplement buté en pied », « Rowe », « Tschebotarioff », « Schneebeli »).

Les résultats théoriques obtenus (représentés par la distribution du moment de flexion engendré dans la paroi) ont été comparés avec les résultats de la mesure des déformations linéaires verticales dans le béton (à l'aide d'extensomètres à corde vibrante préenrobés et de barreaux en acier instrumentés de 4 jauges de déformation), interprétés en termes de moment de flexion expérimental.

Les auteurs ont conclu que « les difficultés expérimentales d'ouvrages en vraie grandeur sont telles (...) qu'il ne faudra envisager à l'avenir de telles mesures que pour de simples constatations fournissant l'allure des phénomènes ». Ils ont recommandé de

faire appel plutôt à des essais sur des modèles en semi-grandeur en conditions contrôlées pour mieux comprendre le comportement des rideaux.

2.5.3.3 Immeuble Telefonhuset à Oslo [3]

DiBiagio et Roti (1971) ont analysé la variation des pressions totales observées à l'interface de l'écran avec le massif de sol soutenu pendant le déroulement des travaux d'excavation et de mise en œuvre des appuis horizontaux (planchers en béton armé).

Profitant de la densité élevée des points de mesure (un capteur de pressions totales par mètre de profondeur), ils ont effectué leur analyse en termes de variations de la résultante des pressions mesurées (par mètre linéaire d'écran) avec la profondeur. Ils ont constaté à la fin des travaux une baisse de cette résultante d'environ 600 kN/m, c'est-à-dire 26 % par rapport à la valeur initiale avant le commencement de l'excavation (2300 kN/m). Cependant, la position de cette résultante sur la profondeur de l'écran n'a pas varié de plus d'un mètre (elle a oscillé autour d'une profondeur d'environ 58% de la hauteur totale de l'écran).

Un radier a été coulé environ 8 mois après l'exécution de l'excavation complète. Cet intervalle de temps a été nécessaire pour excaver une quantité importante de roche dans le substratum, raison pour laquelle l'excavation a été laissée ouverte. Le suivi des capteurs s'est poursuivi sans apercevoir cependant de modifications sensibles. La résultante des pressions observées sur l'écran atteint sa valeur minimale d'environ 1600 kN/m environ 4 mois après la fin de l'excavation.

Après la mise en œuvre du radier, les capteurs de pressions totales, mais aussi les deux piézomètres (Fig. 2-3) ont enregistré une croissance sensible des pressions mesurées. La dernière série de mesures, réalisée 651 jours après la mise en œuvre du panneau instrumenté, a montré un retour des valeurs enregistrées vers la situation initiale prévalant au moment du début de l'excavation (72 jours après la mise en œuvre du panneau instrumenté). La résultante des pressions observées dans cette dernière série de mesures a été évaluée à environ 1970 kN/m.

Les auteurs ont rapporté les distributions des pressions totales observées pour quelques

phases significative de la construction de l'ouvrage à la distribution théorique fournie par l'application de la méthode de Rankine (en considérant $\varphi=0$ pour l'argile molle). Dans ce dernier cas, la résultante des pressions a été estimée à environ 2480 kN/m.

Le diagramme contenant les courbes décrivant ces distributions permet de remarquer que les résultats expérimentaux enregistrés jusqu'à une profondeur de 6 m ont dépassé l'estimation faite selon Rankine tandis que, pour les profondeurs supérieures à 14 m, on obtient des valeurs plus faibles, sensiblement inférieures à l'estimation faite selon Rankine.

La déformée de l'écran déduite à partir des mesures inclinométriques a permis de remarquer une valeur maximale d'environ 14 mm à une profondeur d'environ 12 m¹⁵.

DiBiagio et Roti ont conclu que la fiabilité de mesures de pressions totales a été satisfaisante (« apparently giving reliable data ») pour une durée de presque deux ans (un seul capteur a fonctionné d'une façon intermittente).

2.5.3.4 Immeuble parisien de la SERETE [4]

Josseume et Stenne (1979) ont présenté les distributions des pressions mesurées sur les deux faces du panneau instrumenté après la fin de l'excavation.

Ils ont comparé ces distributions expérimentales avec « les diagrammes limites de pressions de terres, déterminés par la méthode de Caquot-Kérisel sur la base des paramètres de cisaillement drainé des différentes couches ».

Ils ont constaté des pressions à l'interface avec le massif de sol soutenu « largement supérieures à la poussée limite » et des pressions sur la face avant nettement inférieures à la butée limite, ce qui les a conduit à suggérer « l'existence d'une contre-butée en pied de paroi ».

¹⁵ Nous notons que, dans ce cas, il n'est possible d'étudier la relation expérimentale entre les efforts horizontaux appliqués à l'écran et les déplacements correspondants, faute de disposer de mesures des efforts dans les planchers.

Par ailleurs, ils ont précisé que « compte tenu du mode d'ancrage de la paroi¹⁶, il n'y avait a priori aucune raison pour que le sol soit en état d'équilibre limite ».

Les auteurs ont aussi analysé les variations des pressions observées sur les deux faces de l'écran entre les différentes phases représentatives de la construction de l'ouvrage. Ils ont mis en évidence l'incidence de la mise en tension des deux nappes de tirants les plus basses sur les pressions observées sur la face arrière de la paroi et sur l'effort de traction mesuré dans les autres tirants.

Ils ont remarqué une dispersion importante des mesures effectuées à un même niveau de la paroi, qui a été expliquée par l'action conjointe de plusieurs facteurs (discontinuité des terrassements, conditions de contact de chaque capteur, épaisseur variable du cake, remaniement variable du sol avoisinant, présence de gros éléments).

Pour « apprécier la validité des résultats obtenus et, le cas échéant, déterminer la valeur de grandeurs difficilement mesurables, telles que le module d'Young du béton, le frottement sol-paroi», ils ont étudié la corrélation entre les différents paramètres de mesure pour satisfaire l'équilibre de la paroi exprimé sous plusieurs formes :

- ♦ à partir des efforts horizontaux agissant au-dessus du point de moment fléchissant maximum ou entre deux points de moment fléchissant maximum (ces points de moment fléchissant maximum ont été repérés par l'interprétation en termes de moment des mesures de déformations verticales dans la paroi) ;
- ♦ à partir des moments de flexion induits dans la paroi par les pressions totales mesurées à l'interface de l'écran et par les efforts mesurés dans les ancrages calculés par rapport au point théorique de moment de flexion nul (situé « le plus souvent à proximité du fond de fouille »).

Dans les équations d'équilibre, ils ont fait intervenir aussi l'effort de frottement du sol sur la face arrière de l'écran. Ce dernier a été évalué en fonction de la variation

¹⁶ La mise en tension des tirants (8 tirants précontraints sur 4 niveaux pour soutenir le panneau instrumenté) pouvait se traduire, notamment à court terme, par une cinématique de l'écran favorable à la mise en butée du sol derrière l'écran.

expérimentale de l'effort axial dans la paroi après son bétonnage, déduite à son tour, des déformations verticales dans la paroi mesurées par 20 extensomètres à corde vibrante (implantés par paires à des niveaux différents).

Cette analyse, très intéressante, a permis de constater une vérification satisfaisante des conditions de l'équilibre¹⁷, mais les résultats obtenus doivent être appréciés avec des réserves compte tenu de l'incidence des certains facteurs non entièrement maîtrisés :

- ♦ la dispersion importante des pressions et des efforts d'ancrage observés à un même niveau de mesure (la mesure des forces à l'aide des cales dynamométriques est considérée, a priori, comme plus fiable que la mesure des pressions totales) ;
- ♦ la répartition horizontale des tirants d'ancrage n'est pas homogène suivant la longueur de l'écran et est donc difficile à quantifier ;
- ♦ l'estimation « par approximations successives » de la demi-différence et de la demi-somme des déformations linéaires verticales à partir des mesures inclinométriques sur les 9 premiers mètres de profondeur (à cause d'un manque d'extensomètres implantés côté fouille) ;
- ♦ la configuration de l'ouvrage de soutènement au voisinage du panneau instrumenté ne satisfait pas complètement les hypothèses d'un état plan de déformation ; les auteurs ont estimé l'existence de « réactions latérales non nulles » entre les panneaux voisins « en raison de l'écart important constaté entre les tensions des tirants » d'une même nappe¹⁸.

Les deux auteurs ont évalué à 33200 MPa « le module d'Young de la paroi » par l'étude de la corrélation expérimentale entre le moment induit par les efforts extérieurs (pressions de sol, effort d'ancrage et frottement sol-paroi) et les paires de déformations linéaires verticales mesurées par les extensomètres à corde vibrante.

¹⁷ Josseaume et Stenne (1979) p. 60-61.

¹⁸ Il s'agit de la présence dans une coupe verticale de l'écran de composantes horizontales des contraintes de cisaillement qui sont caractéristiques de la flexion spatiale des coques. Ces contraintes s'ajoutent aux autres efforts horizontaux qui gouvernent l'équilibre d'un tronçon de l'écran.

Les mesures effectuées au moyen de ces extensomètres ont été utilisées aussi pour l'évaluation de la variation de l'effort axial dans la paroi après le durcissement du béton et (par soustraction des composantes verticales des efforts mesurés dans les ancrages) pour l'évaluation du frottement sol-paroi.

Les résultats expérimentaux obtenus après l'excavation complète ont fait l'objet d'une comparaison avec les valeurs calculées par deux méthodes :

- ♦ la méthode des éléments finis « en tenant compte d'un comportement purement élastique du sol (...) au moyen du logiciel Rosalie (...) en supposant la fouille réalisée en une seule étape » ;
- ♦ la méthode aux modules de réaction en effectuant « un calcul en poutre élastique tenant compte d'une réaction élasto-plastique du sol » et « des phases intermédiaires des travaux (...) au moyen du logiciel (...) de l'entreprise Bachy ».

Les auteurs ont estimé que « les résultats du calcul aux éléments finis concordent mieux, dans l'ensemble, avec les résultats expérimentaux ».

Pour ce qui concerne la « pression des terres », cette comparaison a mis en évidence une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs de calcul. L'écart plus important constaté « à la partie inférieure de la paroi » a été justifié par le fait que « le calcul élastique n'impose aucune limite aux contraintes dans le sol et ne peut tenir compte d'une plastification locale au sol ».

Il a été conclu que « les résultats fournis par les capteurs de pression des terres sont sensiblement moins précis » que ceux fournis par les autres appareillages « en raison des conditions de contact sol-capteur », mais que « le nombre important de capteurs implantés sur la face arrière de la paroi a permis d'obtenir un ordre de grandeur acceptable ».

2.5.3.5 Quai de Bougainville au port du Havre [5]

Les résultats expérimentaux obtenus après la mise en tension des tirants (réalisée après un terrassement de 6 m de profondeur côté bassin) et après le dragage (hauteur libre

totale de 16,5 m) ont fait l'objet d'une comparaison avec les résultats de calculs simulant le comportement bidimensionnel de la paroi pour quatre phases des travaux (pré Terrassement, mise en tension des tirants et dragage en deux temps). Ces calculs ont été effectués par :

- ♦ la méthode des éléments finis (logiciel Rosalie) en utilisant un modèle de comportement du sol « élastique linéaire plastique satisfaisant au critère de Coulomb » et en considérant un état initial de contraintes dans le massif défini par le coefficient K_0 ;
- ♦ la méthode des modules de réaction (logiciel Ponce) en considérant six configurations de calcul différant par les valeurs attribuées au coefficient de pression initiale, K_i , (considéré soit égal à K_0 , soit ajusté aux valeurs expérimentales obtenues avant le commencement du terrassement) et aux modules de réaction (les valeurs du projet du dimensionnement de la paroi et celles obtenus par l'application de la formule Ménard).

Pour ce qui concerne la phase de mise en tension des tirants, cette comparaison a mis en évidence que la simulation du comportement de l'ouvrage par la méthode des modules de réaction conduit à des résultats de prévision « plus réalistes » que la méthode des éléments finis en termes de valeurs des déplacements et du moment fléchissant.

Quant à l'estimation des pressions des sols « l'allure des diagrammes représentant les variations Δp de la pression sur la face arrière, obtenus par les deux types de calculs est très différente de celle du diagramme expérimental ».

Les auteurs ont remarqué que « le diagramme expérimental caractérise un comportement de rideau souple alors que les calculs indiquent plutôt un comportement d'ouvrage rigide ».

Par ailleurs, les auteurs ont étudié la corrélation expérimentale entre la variation des pressions totales mesurées aux interfaces de l'écran après la mise en tension des tirants, les efforts d'ancrage (cales dynamométriques Glötzl) et les déplacements horizontaux

(inclinomètre Soil Instrument).

Il a été possible de vérifier l'équilibre de la paroi en obtenant que « la composante horizontale de la tension d'ancrage (596 kN/m) équilibre à 12 % près la résultante des variations de pression sur les deux faces de la paroi (678 kN/m) »¹⁹ et de constater l'allure cohérente des diagrammes expérimentaux des pressions totales appliquées par les sols sur la paroi :

- ♦ sur la face arrière, on a enregistré un accroissement des pressions sur les deux-tiers supérieurs de la paroi « qui correspond à une mise en butée partielle du sol » ;
- ♦ sur la face avant, la pression « décroît sensiblement au-dessous du fond de fouille sur une hauteur de 7 à 8 m et augmente faiblement sur les 10 m inférieurs ».

L'analyse de la variation des pressions mesurées après la mise en tension des tirants par rapport à la cinématique observée de l'écran a permis l'évaluation expérimentale des modules de réaction instantanés (juste après la mise en tension) et différés (6 semaines après la mise en tension) et le constat d'écarts importants par rapport aux valeurs utilisées prises dans le calcul aux modules de réaction (notamment pour le cas des valeurs expérimentales instantanées).

Pour affiner la compréhension du fonctionnement de l'ouvrage après la mise en tension des tirants, les auteurs ont effectué trois calculs complémentaires aux modules de réaction en se basant sur les résultats expérimentaux pour décrire les modules de réaction, les pressions initiales et l'effort d'ancrage. Les trois configurations de calcul diffèrent par la raideur en flexion attribuée à la section de la paroi.

La dernière configuration, qui a considéré un module d'Young de 30000 MPa et un

¹⁹ Le signe du déséquilibre entre les deux résultantes des efforts horizontaux (on souligne que la mesure des efforts d'ancrage est jugée plus fiable) pourrait s'expliquer par l'effet de la croissance de l'effort axial dans la paroi au-dessous de la nappe inclinée des tirants actifs sur la réponse des capteurs Glötzl. Ces derniers pourraient indiquer une fausse croissance des pressions mesurées (il s'agit de ceux qui présentent un poids important dans l'estimation de la résultante de la variation des pressions enregistrées après la mise en tension des tirants) qui a été intégrée dans le calcul et a provoqué une sur-évaluation de la variation de la résultante des pressions mesurées.

moment d'inertie réduit de moitié « sur une hauteur de 1 m de part et d'autre de la cote d'ancrage » (afin de tenir compte de la fissuration du béton déduite de l'exploitation des mesures extensométriques), a fourni les résultats les plus proches des valeurs expérimentales tant en termes de déplacements et de moments de flexion qu'en termes de pressions estimées aux interfaces de l'écran.

Il a été conclu que la méthode des « modules de réaction permet une simulation assez correcte du comportement d'une paroi lors d'une phase de mise en tension » si l'on tient compte « de paramètres de calcul (...) suffisamment réalistes ».

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus après le dragage jusqu'à la cote finale (-7,5 m ; Fig. 2-5) a permis de constater une diminution importante de la pression du sol sur la face arrière (sauf la partie au-dessus du niveau d'ancrage, où l'on a constaté une légère croissance) et aussi sur la face avant (y compris sur la partie en fiche après dragage), tandis que l'effort d'ancrage n'avait pas bougé.

La vérification de l'équilibre de l'écran dans ce cas a mis en évidence un « déficit des forces » horizontales dirigées vers l'arrière de l'écran assez important (environ 800 kN/m). Ce déficit a été expliqué par le développement probable d'un frottement de la base de l'ouvrage sur le sol (dont la valeur mobilisable a été estimée à environ 1000 kN/m). Cette hypothèse a été confirmée par le signe du moment de flexion en pied, déterminé à partir des mesures extensométriques.

Les auteurs ont représenté aussi le diagramme des pressions effectives du sol en fin de dragage à côté des diagrammes limites de poussée et de butée déterminés par la méthode de Caquot-Kérisel. Ils ont ainsi constaté « que la pression sur la face arrière est largement supérieure à la poussée théorique et que le taux de mobilisation de la butée sur la face avant est bien inférieur à l'unité ».

Les résultats obtenus par l'application des méthodes de calcul déjà citées, ont permis la mise en évidence d'une sous-estimation importante des pressions en fin de dragage.

Les auteurs ont remarqué l'influence importante des pressions initiales prises en compte dans les calculs aux modules de réaction « mais, quelles que soient les valeurs

de K_i introduites dans le calcul, aucune ne permet de retrouver le pic du diagramme de pression observé dans la zone du niveau d'ancrage ».

La conclusion finale a été que la dispersion des mesures de pression de sol « n'est imputable aux capteurs que pour une faible part, et qu'elle semble refléter la distribution réelle des pressions, (...) assez hétérogène au voisinage immédiat de la paroi ».

2.5.3.6 Parking souterrain à Cambridge [7]

Dans une publication consacrée à l'étude de la pertinence des mesures des pressions des sols effectuées lors de cette expérimentation, (Lings et al., 1993) ont souligné qu'on avait équipé la paroi, en dehors des capteurs de pression totale, d'autres moyens de mesure (cales dynamométriques à corde vibrante sur les butons, extensomètres à corde vibrante « rebar »²⁰ sur les barres verticales de la cage d'armature, clinomètres descendus dans un tube intégré dans la paroi), afin d'analyser la relation expérimentale entre les différents paramètres de mesure.

Dans un premier temps, les pressions totales mesurées sur les interfaces du sol et de l'écran doivent satisfaire son équilibre. Les auteurs ont indiqué qu'il n'existait, à leur connaissance, que quelques cas d'expérimentations anciennes où l'on avait essayé de relier les distributions des pressions observées à la courbure²¹ de la déformée de l'écran. Pour ce faire, il faut connaître la raideur en flexion de sa section horizontale (unitaire).

Lors de la conception de l'instrumentation, on avait espéré que les mesures extensométriques « rebar » pouvaient permettre l'estimation des moments de flexion et ainsi fournir un moyen de vérification de la pertinence des autres catégories de mesures. Une vérification détaillée préalable a permis de constater « une incertitude

²⁰ Anglicisme (dérivé du « reinforcing steel bar »)

²¹ La courbure de la déformée (l'inverse du rayon de courbure) est égale (en valeur absolue) à la dérivée de la pente de la déformée, c'est-à-dire, avec les notations indiquées au chapitre 2.2, $d\phi_y(z)/dz$.

considérable dans l'interprétation des moments de flexion déterminés à partir de mesures in situ ».

Pour étudier la corrélation expérimentale entre les différentes données disponibles, les auteurs ont « développé une technique d'intégration numérique à l'aide d'un logiciel tableur » qui a permis l'exploitation de l'ensemble de résultats expérimentaux :

- ♦ les différents diagrammes dérivés pouvaient être vus simultanément avec les colonnes de données ;
- ♦ les valeurs des pressions horizontales ont pu être ajustées d'une façon progressive afin de satisfaire les conditions de contour et de l'équilibre ;
- ♦ les distributions obtenues devaient présenter une allure suffisamment lisse et avec un nombre limité d'extrêmes locaux ;
- ♦ l'effort de butonnage a été estimé à partir de la moyenne des trois valeurs mesurées à chaque niveau ;
- ♦ la raideur en flexion de la section de la paroi a été évaluée en admettant que le béton n'avait pas été fissuré ;
- ♦ le frottement latéral sol-paroi, en dépit d'une influence non négligeable dans l'équilibre de l'écran (« les forces verticales transmises par la superstructure ont augmenté graduellement durant la construction »), « n'a pas été inclus dans l'analyse » ; plusieurs tentatives de calcul prenant en compte ce frottement (orienté tant vers le bas que vers le haut de l'écran) ont permis de constater « une influence mineure sur les pressions de sol calculées » ;
- ♦ le frottement sur la base de l'écran n'a pas été inclus, non plus, dans l'analyse.

Les auteurs ont présenté les diagrammes (obtenus par la technique décrite ci-avant) de la pente de la déformée, de l'effort tranchant, du moment de flexion et des pressions totales horizontales résultantes après l'excavation complète (paroi butonnée sur trois niveaux). Ils ont précisé que le saut d'environ 100 kPa dans le diagramme de pression résultante au niveau du fond de fouille a été nécessaire pour satisfaire l'équilibre de

l'écran et d'obtenir la cohérence par rapport aux mesures de la pente de la déformée.

Ils ont déduit et représenté ensuite les diagrammes des pressions exercées sur les deux faces de l'écran et les ont comparé aux résultats enregistrés par les capteurs Glötzl (au-dessous du niveau de l'excavation, les diagrammes obtenus ont été représentés en traits pointillés dans la mesure où le diagramme des pressions résultantes ne fournit qu'une seule équation pour estimer les pressions exercées sur les 2 faces).

Les auteurs ont pu ainsi conclure que la qualité de la mesure des pressions de sol était assez variable. Toutefois, les résultats expérimentaux ont indiqué, « grossièrement, l'allure correcte, ce qui est surprenant compte tenu de leur méthode de mise en place ».

L'exploitation, sans vérification préalable de leur cohérence par rapport à d'autres paramètres de mesure, des valeurs des pressions totales enregistrées in situ a été qualifiée de « dangereuse ».

La prévision théorique du comportement de la paroi moulée a été réalisée en appliquant la méthode des modules de réaction (à l'aide du logiciel « Wallap », (Lings et al., 1991 p. 468), en considérant un module de réaction de l'argile de « Gault » égal à environ 300 fois la résistance au cisaillement non drainé (ce qui correspond à un module d'Young égal à environ 500 fois la résistance au cisaillement non drainé).

Par ailleurs, pour analyser les déplacements dans le massif de sol avoisinant, on a procédé à un calcul en éléments finis bidimensionnel en utilisant un modèle anisotrope élastique du comportement du sol²².

2.5.3.7 O'Swaldkai dans le port du Hambourg [8]

Lors de cette expérimentation, les pressions enregistrées sur la face arrière du quai durant les travaux de dragage ont montré une baisse correspondant à peu près au passage d'un état de repos au niveau de la poussée limite.

²² Aucune comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de calcul n'a été présentée dans les publications disponibles consacrées à cette expérimentation.

Compte tenu de l'objectif de cette expérimentation (augmentation de la hauteur libre du quai), une attention particulière a été accordée à la quantification de l'influence de la marée sur les pressions enregistrées (Rodatz et al., 1995).

L'enregistrement des mesures fournies par le capteur de pression totale situé à une profondeur de 9,15 m sur l'ouvrage en service (environ 7 mois après la construction de la paroi moulée), réalisé en continu pendant huit jours successifs, a permis de remarquer que celui-ci n'était presque plus sensible à la variation d'allure sinusoïdale de la pression de l'eau dans la darse (amplitude estimée à environ 20 kPa). Il a été conclu que la variation de la pression hydrostatique causée par la marée était « presque entièrement compensée par la variation de la pression effective ». « La paroi moulée se comporte comme une poutre reposant sur un milieu élastique ».

Le comportement mécanique de l'ouvrage a été étudié par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel ANSYS. Celui-ci permet la simulation d'un comportement non linéaire du sol de type Mohr-Coulomb ou Drucker-Prager. Il permet, par ailleurs, de décrire le comportement du béton armé et de l'interface sol-béton.

Grâce à une discrétisation de l'ouvrage adaptée à la position des points de mesure, il a été possible de créer un programme de calcul itératif, calé sur les résultats fournis par le logiciel ANSYS et permettant d'évaluer l'incohérence relative de différentes catégories de mesure et de les ajuster pour obtenir une corrélation satisfaisante²³.

2.6 Conclusion de l'étude bibliographique

Le nombre réduit des publications consacrées aux mesures des pressions totales exercées sur les parois moulées a imposé, mais aussi facilité, leur analyse détaillée.

On a pu ainsi apercevoir la complexité et les limites de ces expérimentations, qui sont confrontées non seulement aux difficultés inhérentes à toute instrumentation in situ

²³ Aucun renseignement sur les résultats des relations expérimentales ou sur les résultats des calcul prévisionnels n'a été fourni dans les deux articles consacrés à cette expérimentation que nous avons examinés.

mais aussi à des difficultés spécifiques à la mesure des contraintes totales (fiabilité, technologies de mise en place, calage des résultats).

Par ailleurs, on a pu remarquer l'effort fait par les expérimentateurs pour évaluer la pertinence des mesures aussi bien par des études de corrélation expérimentale entre différents paramètres de mesure que par la simulation numérique des situations observées sur l'ouvrage.

L'application de telles procédures de qualification est nécessaire, mais leur validation reste cependant très difficile et doit être appréciée avec réserve. En effet, les analyses effectuées (que ce soit sur les relations expérimentales ou sur la comparaison avec les résultats de calculs) se sont avérées, dans la plupart des cas, insuffisantes pour valider les résultats obtenus à cause de l'incidence d'une multitude de facteurs perturbateurs (en dehors de la fiabilité spécifique de mesures de contraintes totales), dont les plus significatifs sont :

- ◆ la situation de mesure réelle (en dépit d'un choix convenable des profils instrumentés), ne satisfait jamais complètement les hypothèses qui garantissent la validité des relations théoriques relatives à un état plan de déformation de l'ouvrage (hétérogénéité de la structure lithologique et des propriétés du terrain, perturbations engendrées dans le cas des ouvrages ancrés ou butonnés ponctuellement ou des soutènements de fouilles polygonales de côtés de longueurs réduites, perturbations causées par l'application des certaines technologies d'exécution, etc.) ;
- ◆ la raideur en flexion de la section composite de béton armé n'est pas entièrement maîtrisable ; elle varie suivant la profondeur et dans le temps d'une façon importante et difficilement contrôlable (l'épaisseur de l'écran n'est pas très homogène²⁴ ; le module de déformation du béton varie sensiblement dans le temps ; la section de travail en flexion du béton peut se réduire par fissuration) ;
- ◆ les expérimentations sont basées sur l'observation ponctuelle des paramètres de

²⁴ L'épaisseur de l'écran intervient à la puissance 3 dans l'expression de la raideur en flexion : un écart de 5 % de l'épaisseur se traduit par une variation de presque 16 % de la valeur de la raideur ;

mesure (ce que les techniques disponibles permettent actuellement) tandis que les relations théoriques qui gouvernent le fonctionnement de tels ouvrages sont des relations différentielles (d'ordre supérieur) qui ont des exigences particulières en termes de description des fonctions qui y interviennent ; pour l'évaluation de la pertinence des mesures, l'observation ponctuelle des paramètres de mesure peut s'avérer très insuffisante.

L'examen de cet ensemble d'études anciennes a permis d'expliquer le nombre réduit de telles instrumentations retrouvées dans la littérature, mais aussi le besoin urgent de procéder à d'autres expérimentations similaires.

L'expérience ainsi accumulée, mais aussi le progrès technologique constaté dans l'industrie des capteurs et dans la simulation assistée par ordinateur du comportement mécanique des ouvrages, ne sont que des facteurs qui amplifient ce besoin.

2.7 Réflexions en vue d'une nouvelle expérimentation

L'étude bibliographique a permis d'acquérir des renseignements précieux dans la perspective d'une nouvelle expérimentation concernant les contraintes exercées par les sols sur les parois moulées. Les plus significatifs sont présentés dans ce qui suit.

2.7.1 Choix des systèmes de mesure

2.7.1.1 Dispositif de mise en place des capteurs

Le choix du dispositif de mise en place des capteurs apparaît maintenant comme un exercice simple, compte tenu des éléments présentés dans la section 2.4.2.2. :

- ♦ la mise en place des capteurs dans des forages verticaux situés au voisinage immédiat de l'écran n'est pas envisageable (Dunnicliff (1993) p. 181-182 considère que cette méthode ne convient pas pour les mesures aux interfaces de types d'ouvrages en béton) ;

- ♦ parmi les procédures de mise en place dans la paroi, celle qui utilise un vérin est préférable, en prévoyant le contrôle de la pression de vérinage (à l'aide d'un manomètre) ;
- ♦ il est préférable de placer les capteurs dans des boîtes pour assurer une meilleure protection contre l'action des charges latérales (anneau rigide extérieur)²⁵, contre l'infiltration du béton frais (l'anneau constitue une barrière) et contre la transmission des concentrations de contraintes engendrées sur la circonférence de la surface de contact sol-capteur sur la surface active des capteurs.

La conception détaillée des systèmes de mise en place des capteurs (caractéristiques du vérin, système de contre-appui du vérin, gaine de guidage, etc.) doit être effectuée en liaison avec le type de capteur choisi et les caractéristiques de l'ouvrage (épaisseur et ferrailage du panneau instrumenté, caractéristiques physiques du sol).

2.7.1.2 Choix du capteur

Le choix du type de capteurs des contraintes totales le mieux adapté s'avère délicat dans la mesure où la littérature spécialisée donne peu d'éléments :

- ♦ les capteurs à action directe (avec une ou deux surfaces actives) doivent être évités à cause de leur sensibilité aux chargements ponctuels et de la raideur limitée de leur surface(s) active(s)²⁶;
- ♦ les coussins Glötzl, en dépit de leur utilisation extensive, voient leurs limites atteintes pour les mesures à l'interface une paroi moulée²⁷ et du sol ;

Une recherche effectuée sur le marché des capteurs de pressions totales a permis

²⁵ Une boîte de protection rigide a été utilisée seulement pour l'expérimentation [1] probablement à cause de la sensibilité élevée aux contraintes latérales des capteurs à deux surfaces actives.

²⁶ Voir les éléments indiqués dans le chapitre 2.4.2.1, mais aussi les recommandations générales sur les caractéristiques des capteurs (chapitre 2).

²⁷ Les capteurs Glötzl n'ont été pleinement satisfaisants pour aucune des expérimentations [2], [4], [5], ou [7] ; ils sont susceptibles de favoriser la perturbation des résultats de mesures à cause de leur forme (légèrement bombée) et de leur sensibilité à l'action des contraintes latérales (voir 2.5.1.5).

d'identifier les produits disponibles qui répondent aux quelques exigences spécifiques de la mesure sur une paroi moulée (Annexe 2-1²⁸) :

- ♦ étendue de mesure comprise entre 200 et 1000 kPa ;
- ♦ diamètre de la surface active du capteur supérieur à 15 cm (afin de diminuer l'effet de l'hétérogénéité locale et de l'action des charges ponctuelles correspondant aux particules de sol, dont la taille est incontrôlable)²⁹ ;
- ♦ transducteur placé à l'intérieur du capteur ou attaché directement à la cellule de mesure avec une sortie du signal par l'arrière du capteur³⁰.

Ces capteurs sont en général caractérisés par leurs fabricants par leurs performances métrologiques en milieu fluide (étendue de mesure, sensibilité, incertitude globale de mesure, hystérésis, résolution, etc.).

Toutefois, on remarque l'effort fait par certains fabricants pour que leurs produits répondent aussi aux recommandations particulières pour la mesure des pressions totales et même pour les adapter au besoin des différentes applications.

Ainsi, les fabricants « Slope Indicator », « Geokon » et « Soil Instruments Limited » proposent des produits spécialisés pour la mesure des pressions totales à l'interface des parois moulées³¹, mais seul le dernier propose aussi dans son catalogue commercial les « accessoires » (vérin et plaque d'appui).

Les deux premiers fabricants indiquent seulement le schéma de principe du système

²⁸ Cette liste n'est probablement pas exhaustive, mais elle inclut, sans aucun doute, la plupart des produits utilisables pour les parois moulées.

²⁹ Le diamètre de seulement 10 cm de capteurs utilisés pour l'expérimentation [3] pourrait s'expliquer par la mesure dans un sol argileux ou par l'offre limitée de capteurs au moment de l'instrumentation (1971).

³⁰ Les capteurs à coussin hydraulique et transducteur séparé par un tube rigide, bien adaptés pour les mesures au sein d'un massif de sol (à cause de leur épaisseur très réduite qui limite l'effet d'inclusion), ne présentent pas un intérêt particulier pour les mesures à l'interface des structures (pas d'effet d'inclusion dans le sol) et ne conviennent pas aux technologies particulières de mise en place.

³¹ « Jack out total pressure cell ».

proposé (Fig. 2-12)³².

Le tableau de l'Annexe 2-1 permet de constater une offre substantielle de produits à base d'un transducteur à corde vibrante³³ ainsi que des capteurs à action indirecte (seul « Geonor » propose des capteurs à action directe).

Par ailleurs, on constate le manque de renseignements sur la raideur de la surface active des capteurs, en dépit de son importance particulière pour les mesures de pression de sol. La seule exception est « KYOWA », qui fournit des capteurs dont la raideur est largement satisfaisante par rapport aux exigences couramment formulées.

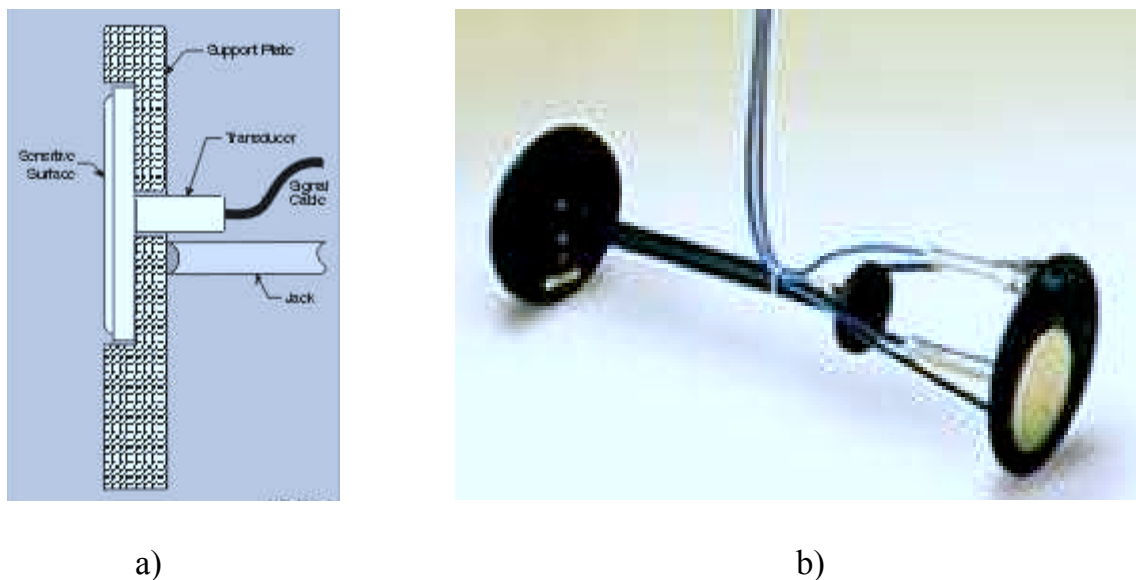


Fig. 2-12: Dispositif de mise en place des capteurs de contraintes totales dans les parois moulées : a) schéma de conception (Catalogue Slope Indicator, 1998) ; b) photographie (Catalogue en ligne Geokon, 2001).

Pour ce qui concerne les autres capteurs à action indirecte, ils doivent disposer, en principe, d'une raideur « constructive » de leur surface active qui dépend, pour l'essentiel, de la raideur du corps d'épreuve (diaphragme) intérieur de diamètre

³² On note que les deux fabricants proposent des solutions où le capteur est placé dans une boîte rigide.

³³ L'avantage de tels capteurs consiste dans la transmission non perturbée du signal (en fréquence) à une distance importante ; l'encombrement important du transducteur à corde vibrante ne constitue pas un handicap pour un capteur encastré dans la paroi dans la mesure où l'effet d'inclusion dans le sol n'intervient pas dans ce cas.

beaucoup plus réduit que le diamètre de la surface active du capteur (à condition que le liquide hydraulique est complètement désaérée et quasi-incompressible).

Enfin, les capteurs « Slope Indicator » sont équipés d'une sonde de température ce qui facilite la prise en compte de la dérive thermique³⁴ des signaux dans l'interprétation des résultats de mesure. Ces aptitudes s'avèrent très utiles pour la mesure de pression à l'interface des ouvrages en béton, compte tenu de l'ampleur attendue des variations de température après la mise en place des capteurs.

2.7.2 Qualification préalable des capteurs en laboratoire

Avant de « noyer les capteurs » dans une paroi moulée il est souhaitable de procéder à une évaluation partielle des capteurs dans des conditions « plus contrôlables ». Elle s'avère importante dans la mesure où :

- ◆ les performances des capteurs disponibles sur le marché correspondent à une mesure en milieu fluide ;
- ◆ la description des capteurs est assez sommaire par rapport aux exigences de la mesure des pressions dans les sols ;
- ◆ l'expérimentation in situ implique une mobilisation très importante de ressources dont, en particulier, un nombre important de capteurs des pressions totales qui seront immobilisés dans l'ouvrage³⁵.

Cette qualification peut comporter les étapes suivantes :

- ◆ vérification des caractéristiques métrologiques fournies par les fabricants par un essai d'étalonnage en milieu fluide (notamment la sensibilité et la dérive thermique

³⁴ La dérive thermique des capteurs est évaluée lors de l'étalonnage effectué par le fabricant.

³⁵ Il n'est plus possible de contrôler et éventuellement réparer les capteurs (par exemple, refaire « un zéro ») après leur mise en place.

du signal de sortie) ;

- ♦ qualification de la réponse des capteurs, en présence de sol, pour une situation de mesure contrôlable (chambre triaxiale, centrifugeuse, etc.) .

Il faut souligner que l'évaluation des capteurs en présence du sol n'est que partielle. dans la mesure où il n'est pas envisageable de simuler sur un modèle réduit la situation de mesure réelle sous tous ses aspects (notamment l'effet de l'inclusion du capteur dans le béton et l'effet de la technologie de mise en œuvre des capteurs dans la paroi moulée). Elle permet, cependant, de quantifier l'effet de l'interaction entre le sol et la membrane déformable sur les résultats de mesure.

2.7.3 Principe de conception de l'instrumentation

L'étude bibliographique a permis de rassembler et de mettre en évidence les principaux éléments qui concourent à la conception d'une instrumentation de parois moulées incluant la mesure des contraintes exercées par les sols.

Deux principes essentiels peuvent être soulignés, pour conclure. La conception de l'instrumentation doit faciliter :

- ♦ l'évaluation de la pertinence des mesures de contraintes totales par l'étude des corrélations expérimentales avec d'autres paramètres de mesure reconnus comme plus fiables ;
- ♦ l'estimation théorique du comportement de l'ouvrage dans les profils instrumentés.

Elle doit être précisée en fonction des caractéristiques particulières de chaque ouvrage et par rapport au budget disponible.

**CHAPITRE 3 EXPERIMENTATION EN LABORATOIRE DES CAPTEURS DE PRESSIONS
 TOTALES 3-1**

3.1	INTRODUCTION.....	3-1
3.2	CAHIER DES CHARGES DES CAPTEURS DE PRESSIONS TOTALES.....	3-2
3.2.1	<i>Exigences sur la mesure de pression dans les fluides.....</i>	<i>3-4</i>
3.2.2	<i>Exigences sur la discrétion des capteurs dans les sols.....</i>	<i>3-5</i>
3.2.3	<i>Exigences sur la mesure in situ.....</i>	<i>3-7</i>
3.3	UN EXEMPLE DE CONCEPTION : LE CAPTEUR DU CECP D'ANGERS.....	3-11
3.3.1	<i>Description du capteur.....</i>	<i>3-11</i>
3.3.1.1	Le capteur de pression de fluide Keller PA2.....	3-13
3.3.1.2	Le corps du capteur.....	3-14
3.3.1.3	Le film d'huile.....	3-15
3.3.1.4	Le transmetteur-conditionneur.....	3-15
3.3.1.5	Raideur des surfaces actives du capteur.....	3-16
3.3.1.6	Etalonnage des capteurs et méthodologie de mesure.....	3-19
3.4	LES AUTRES CAPTEURS TESTÉS.....	3-22
3.4.1	<i>Capteurs prototype d'Askegaard.....</i>	<i>3-23</i>
3.4.2	<i>Capteurs Kyowa BE-C.....</i>	<i>3-25</i>
3.4.3	<i>Capteurs Kyowa BE-M.....</i>	<i>3-27</i>
3.4.4	<i>Capteurs d'interface sol-structure.....</i>	<i>3-27</i>
3.4.4.1	Capteurs Kyowa BE-F.....	3-27
3.4.4.2	Capteurs Slope Indicator.....	3-29
3.4.5	<i>Synthèse des caractéristiques physiques des capteurs.....</i>	<i>3-30</i>
3.4.6	<i>Aperçu des essais effectués sur chaque capteur.....</i>	<i>3-31</i>
3.5	ESSAI HYDROSTATIQUE.....	3-32
3.5.1	<i>Description de l'essai hydrostatique.....</i>	<i>3-33</i>
3.5.2	<i>Résultats de l'essai hydrostatique.....</i>	<i>3-34</i>
3.5.2.1	Qualification des capteurs à une température stationnaire.....	3-35
3.5.2.2	Qualification thermique des capteurs.....	3-37
3.6	MESURES DES PRESSIONS TOTALES EN MILIEU PULVÉRULENT HOMOGENE RECONSTITUÉ.....	3-43
3.6.1	<i>Les chambres d'essai et la prévision des contraintes appliquées.....</i>	<i>3-43</i>
3.6.1.1	Centrifugeuse du LCPC.....	3-43
3.6.1.2	Chambre triaxiale du CERMES.....	3-50
3.6.2	<i>Situations de mesure expérimentées.....</i>	<i>3-55</i>
3.6.2.1	Matériau d'essai.....	3-56
	Echantillons utilisés dans les essais.....	3-56
3.6.2.3	Mise en place des capteurs à l'interface des échantillons.....	3-59
3.6.2.4	Mise en place des capteurs à l'intérieur des échantillons.....	3-61
3.6.3	<i>Expérimentations en centrifugeuse.....</i>	<i>3-63</i>
3.6.3.1	Description des expérimentations réalisées.....	3-63
3.6.3.2	Exploitation des données expérimentales.....	3-67
3.6.3.3	Analyse des résultats expérimentaux.....	3-78
3.6.4	<i>Expérimentations en chambre triaxiale.....</i>	<i>3-84</i>
3.6.4.1	Description des expérimentations réalisées.....	3-84
3.6.4.2	Exploitation des résultats expérimentaux.....	3-87
3.6.4.3	Analyse des résultats expérimentaux.....	3-98
3.7	CONCLUSION.....	3-102
3.7.1	<i>Reproductibilité des résultats de mesure des pressions totales.....</i>	<i>3-102</i>
3.7.2	<i>Discrétion de mesure des pressions totales.....</i>	<i>3-105</i>
3.7.3	<i>Perfectionnement dans la conception des capteurs.....</i>	<i>3-106</i>

Chapitre 3 EXPERIMENTATION EN LABORATOIRE DES CAPTEURS DE PRESSIONS TOTALES

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'expérimentation de plusieurs types de capteurs de pressions totales qui s'est déroulée entre juin 1999 et août 2000 dans les installations du CERMES à Marne-la-Vallée et du LCPC à Nantes pour trois situations de mesure simples :

- ♦ action d'une pression hydrostatique contrôlée ;
- ♦ action des contraintes normales transmises à l'intérieur d'échantillons de sable de Fontainebleau de densité homogène et de granulométrie uniforme ;
- ♦ action des contraintes normales à l'interface d'une paroi rigide et d'échantillons de sable de Fontainebleau de même type que pour la situation précédente.

Ces situations de mesure ont été créées, répétées et reproduites au moyen de deux outils d'étude expérimentale sur modèle réduit, spécialement conçus pour assurer le contrôle des champs de contraintes engendrés dans les échantillons testés :

- ♦ chambre triaxiale géante (CERMES) ;
- ♦ conteneur à parois rigides centrifugé (LCPC).

Les capteurs qui ont été disponibles pour cette expérimentation ont des provenances diverses :

- ♦ capteurs prototypes du CECF d'Angers ;
- ♦ capteurs prototypes de l'Université de Brunel (Royaume Uni) disponibles au centre de Nantes du LCPC ;
- ♦ capteurs Kyowa BE-C disponibles dans le réseau des LPC (CER de Rouen) ;

- ♦ capteurs Kyowa BE-M sélectionnés pour l'instrumentation d'une fondation mixte semelle-pieu sur le site de Merville (Borel, 2001) ;
- ♦ capteurs Kyowa BE-F et capteurs Slope Indicator « Vibrating Wire Jack-Out » sélectionnés pour l'instrumentation d'une paroi moulée sur le site de la Trémie Pasteur à Rouen (expérimentation présentée dans le chapitre 4 de ce mémoire).

Les capteurs prototypes du CECP d'Angers ont été développés dans le cadre du thème de recherche du réseau des LPC GEO 35 « La mesure des efforts appliqués par les sols aux ouvrages » à partir des prescriptions d'un cahier des charges prédéfini.

La qualification des capteurs a été réalisée en deux temps :

- ♦ en premier lieu, elle porte sur le respect du cahier des charges des capteurs de pressions totales ;
- ♦ en deuxième lieu, cette qualification porte sur la capacité des capteurs de restituer l'intensité des contraintes normales transmises au niveau de leurs surfaces actives dans les situations de mesure simples, créées en présence du sol ; elle est basée également sur l'analyse comparative de la réponse des capteurs dans la mesure où les grandes enceintes d'essai permettent de créer la même situation de mesure en même temps pour plusieurs capteurs.

3.2 Cahier des charges des capteurs de pressions totales

Un volet essentiel du thème de recherche GEO 35 a été la mise au point (conception, fabrication et qualification) d'un capteur capable de mieux satisfaire les exigences très contraignantes de la mesure de pressions totales.

Cette recherche a été considérée comme opportune dans le contexte du progrès significatif enregistré au cours des dernières années par l'industrie des instruments de mesure.

Un cahier des charges des capteurs de pressions totales a été rédigé par les chercheurs engagés dans les activités du thème GEO 35 en tenant compte des résultats et des

recommandations issues des études anciennes consacrées à l'analyse des performances de la mesure de pressions totales. Il contient un ensemble de prescriptions concernant les caractéristiques métrologiques et physiques attendues pour les capteurs.

Ce cahier des charges a servi pour la conception et la fabrication des capteurs du CECP d'Angers, qui présentent un diamètre de 75 mm et une étendue de mesure de 0 à 200 kPa. Ces capteurs sont destinés aux mesures de pressions totales dans les sols dont la granulométrie satisfait la relation (1.8), c'est-à-dire :

$$d_{50} < \frac{d}{50} \Rightarrow d_{50} < \frac{75mm}{50} \Leftrightarrow d_{50} < 1,5mm \quad (3.1)$$

Cette restriction granulométrique des sols qu'on peut ausculter vise à rassembler l'action d'un nombre suffisant de particules sur la surface active du capteur, afin d'obtenir des résultats de mesure représentatifs de la situation analysée (voir 1.4.2.1 a).

Le cahier des charges a été utilisé, par ailleurs, pour la qualification des résultats expérimentaux obtenus pour l'ensemble des capteurs testés dans le cadre des travaux de cette thèse.

Nous avons séparé ces prescriptions en trois catégories tenant compte des épreuves expérimentales spécifiques nécessaires à la qualification des performances de mesure des capteurs :

- ♦ exigences sur la mesure de pression dans les milieux fluides dans des conditions de grandeurs d'influence stationnaires ;
- ♦ exigences sur la mesure de pression transmise dans des échantillons de sol soumis à l'action de champs de contraintes contrôlés ;
- ♦ exigences sur la mesure in situ à long terme.

La vérification des caractéristiques des capteurs par rapport aux exigences ainsi formulées a été menée en même temps sur les différents capteurs disponibles afin de permettre la comparaison des résultats obtenus.

3.2.1 Exigences sur la mesure de pression dans les fluides

Un premier niveau d'exigence porte sur l'aptitude du capteur de pressions totales à mesurer la pression agissant dans un milieu fluide. Dans une telle situation, on dispose d'un meilleur contrôle de l'intensité du mesurande (la pression moyenne agissant sur la surface active du capteur) et d'une meilleure discrétion dans la mesure (la pression hydrostatique n'est pas perturbée par le capteur).

Le cahier des charges prescrit donc des caractéristiques métrologiques couramment formulées pour la mesure de pression dans les milieux fluides : l'incertitude de mesure¹ de la pression dans les milieux fluides ne doit pas dépasser le seuil de 1% de l'étendue de mesure du capteur (c'est-à-dire 2 kPa pour un capteur présentant une étendue de mesure de 200 kPa) dans des conditions de grandeurs d'influence² (température, pression atmosphérique, etc.) quasi-stationnaires.

L'incertitude de mesure doit être évaluée par l'étalonnage de la chaîne de mesure de pressions totales en milieu fluide par rapport à un étalon de référence³ comme pour tout capteur ordinaire de pression de fluide. Pour une meilleure caractérisation, il faut inclure dans l'analyse l'étude de la répétabilité et de la reproductibilité des résultats de l'étalonnage.

Elle inclut l'incertitude de mesure de l'étalon de référence et les erreurs aléatoires (caractérisant la fidélité de l'instrument de mesure⁴) qui interviennent aux différents niveaux de la chaîne de mesure (alimentation et fonctionnement du capteur, ligne de

¹ Incertitude de mesure : « paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

² Grandeur d'influence : « grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

³ Etalon de référence : « étalon, en général, de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurage qui y sont faits » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

⁴ Fidélité de l'instrument de mesure : « aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

transmission, dispositif de lecture).

La procédure d'étalonnage doit assurer la justesse de la mesure⁵. Les éventuelles erreurs systématiques doivent être évaluées et corrigées dans les résultats de mesure.

3.2.2 Exigences sur la discrétion des capteurs dans les sols

Un deuxième niveau d'exigence vise l'optimisation des caractéristiques physiques des capteurs de façon à leur conférer la meilleure discrétion en présence de sols. A ce propos, le cahier des charges du capteur de pressions totales prescrit :

- ♦ le rapport de forme du capteur doit respecter la condition suivante⁶ :

$$\frac{e}{D} < \frac{1}{20} \Rightarrow e < \frac{75\text{mm}}{20} \Leftrightarrow e < 3,75\text{mm} \quad (3.2)$$

- ♦ la raideur de la surface active du capteur sous l'action d'une pression uniformément répartie doit être maximale ; dans tous les cas, la raideur au centre de la surface active du capteur doit dépasser le seuil de 50 GPa/m (qui correspond à une flèche au centre de la surface active de 4 μm sous l'action d'une pression égale à la limite supérieure de l'étendue de mesure, 200 kPa)⁷ :

$$\left[\frac{p}{\delta(p)} \right]_{\min} > 50\text{GPa} / \text{m} \Rightarrow \delta_{\max} = \delta_{\text{centre}}(p = 200\text{kPa}) < \frac{200\text{kPa}}{50 \cdot 10^6 \text{kPa} / \text{m}} = 4\mu\text{m} \quad (3.3)$$

ou, si l'on exprime la déflexion au centre de la surface active du capteur de façon relative à son diamètre ($d \cong 72 \text{ mm}$) :

⁵ Justesse : « aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreurs systématiques » (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

⁶ Cette condition est environ quatre fois plus restrictive que celle proposée par la relation 1.12 (ou deux fois plus restrictive que celle proposée par Dunnycliff).

⁷ Cette condition est environ 10 fois plus restrictive que la condition 1.13 et environ 2 fois plus restrictive que la condition 1.14.

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{72 \text{ mm}} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{18000} \quad (3.3')$$

Le rapport de forme et la raideur de la surface active sont les principales caractéristiques physiques qui affectent la discrétion de mesure. Cependant, le respect des exigences formulées par le biais des relations (3.2) et (3.4) ne permet pas nécessairement de conclure que la discrétion des capteurs en présence des sols est satisfaisante.

Il convient de vérifier la discrétion des capteurs en présence du sol au moins pour une situation de mesure privilégiée favorisant la meilleure prédiction du mesurande (la pression réelle agissant à l'endroit de mesure).

Cette situation de mesure peut être créée au sein d'échantillons de sable de granularité et de densité uniformes, répétables et reproductibles dans les deux enceintes d'essai (centrifugeuse et chambre triaxiale). Elle doit correspondre à une méthode de mise en place des capteurs et une position dans l'échantillon soigneusement choisies.

La discrétion des capteurs dans une telle situation de mesure peut alors être caractérisée par un facteur de réponse⁸, calculé par rapport à la valeur supposée de la pression agissant au niveau de leur surface active.

Evidemment, pour un capteur discret et une situation de mesure parfaitement contrôlée, ce facteur doit s'approcher de l'unité, à la valeur de l'incertitude de mesure en milieu fluide près.

Cependant, le facteur de réponse ne permet pas de caractériser d'une façon certaine l'exactitude de mesure des pressions totales pour la situation analysée.

En effet, la prévision de la pression réelle appliquée à l'endroit de mesure dans les sols, même pour les situations les plus privilégiées, est affectée par une incertitude sensiblement supérieure à celle que l'on observe dans les milieux fluides.

⁸Facteur de réponse du capteur en présence du sol : rapport entre la pression mesurée (calculée à partir de la courbe d'étalonnage du capteur en milieu fluide) et la pression réelle agissant à l'endroit de mesure ; par défaut, cette dernière est considérée comme égale à la valeur de prédiction théorique de la pression appliquée dans l'enceinte d'essai au niveau de la surface active des capteurs en faisant abstraction de leur présence.

Il est donc possible de sous-estimer ou, de surestimer la pression réelle appliquée à l'endroit de mesure dans le sol de façon concomitante avec un sous-enregistrement (respectivement, un sur-enregistrement) de même ampleur indiqué par le capteur et d'obtenir ainsi un facteur de réponse égale à l'unité sans que cela implique l'exactitude de la mesure. De la même façon, une valeur du facteur de réponse éloignée de l'unité peut être due à une erreur de prévision de la pression appliquée dans le sol et, éventuellement, à une erreur de mesure de signe contraire.

Si le cahier des charges des capteurs de pressions totales ne peut donc pas formuler directement d'exigences en termes de facteur de réponse du capteur en présence du sol, qui ne peut pas être apprécié objectivement, la qualification du capteur doit être accompagnée d'un programme d'expérimentation visant à apprécier ce facteur de réponse, ce dernier étant, finalement, le paramètre utile en pratique.

Les expérimentations à mener doivent donc permettre d'apprécier concomitamment l'incertitude sur la prédiction de la valeur réelle de la pression et la réponse du capteur.

La mise au point de telles expérimentations constitue un enjeu et une difficulté sur le sujet de la mesure de pressions totales.

3.2.3 Exigences sur la mesure in situ

Enfin, un troisième niveau d'exigences vis-à-vis des capteurs de pressions totales concerne les sujétions spécifiques de l'auscultation des ouvrages géotechniques réels :

- ♦ nécessité d'un suivi des paramètres de mesure pendant une durée importante (allant jusqu'à plusieurs années) sans avoir la possibilité d'effectuer des vérifications intermédiaires sur le fonctionnement des capteurs ;
- ♦ conditions d'environnement présumées agressives.

Les situations de mesure in situ sont beaucoup plus complexes que les situations simplifiées étudiées en laboratoire. Elles sont accompagnées de l'action superposée d'une multitude de facteurs perturbateurs dont l'influence est difficile à quantifier. Les exigences spécifiques, destinées à limiter l'ampleur de ces perturbations, restent donc

difficiles à formuler.

Par ailleurs, si en le laboratoire l'apparition d'une éventuelle dérive dans le fonctionnement des capteurs (dérive du zéro, dérive de sensibilité, etc.) est très facile à identifier et à corriger, elle ne peut pas être mise en évidence après l'installation des capteurs sur l'ouvrage réel. La mise en évidence de l'apparition d'une telle dérive nécessite le dégagement complet de la surface active du capteur et sa mise en contact avec l'atmosphère (voire son déplacement dans un laboratoire adéquat), ce qui provoquerait une perturbation significative de la situation de mesure étudiée.

Quant à la discrétion in situ des capteurs, on considère que, pour une même méthode de mise en place, elle ne change par rapport à celle manifestée en laboratoire, au sein d'échantillons de sol reconstitués, que pour de raisons liées à la différence de la raideur⁹ et de la granularité du sol in situ par rapport au laboratoire.

Cette hypothèse est justifiée dans la mesure où les caractéristiques propres aux capteurs qui influencent leur discrétion (rapport de forme, raideur de la surface active) ne sont affectées ni par la situation de mesure, ni par le facteur « temps », ni par le facteur « conditions d'environnement ». Elle est par contre mise en défaut par le fait que ces caractéristiques propres ne sont pas les seules qui gouvernent la discrétion du capteur. Ainsi, le mode de mise en place des capteurs est souvent à l'origine de la perturbation des états de contraintes régnant au sein des sols...

Le fonctionnement des capteurs et, en premier lieu, la loi qui relie le signal de sortie des capteurs à la pression appliquée sur leur(s) surface(s) active(s) peut pour sa part être influencé par les conditions d'environnement (variation de la température, présence d'eau et d'agents corrosifs, etc.), ou par la dégradation des caractéristiques physiques de la chaîne de mesure des pressions totales dans le temps (module d'élasticité du matériau du capteur, fonctionnement du transducteur, système d'étanchéité, caractéristiques de la ligne de transmission du signal de sortie, etc.). Cette influence se manifeste généralement par une dérive de la sensibilité ou/et de la

⁹ Pour les capteurs de surface active présentant une raideur élevée, les résultats théoriques obtenus par Loh (Fig. 1-14) et les résultats théoriques et expérimentaux obtenus par Torry et Sparrow (Fig. 1-18, $R < 1$) ont montré que leur facteur de réponse ne dépend pas de façon significative de la raideur de sol (voir 1.4.1.2 e).

valeur du zéro des capteurs.

Un facteur d'environnement qui perturbe irrémédiablement la mesure des pressions totales est la variation de la pression atmosphérique. Si, pour les autres facteurs d'environnement (variation de température, corrosion, pression interstitielle, etc.), on s'efforce de minimiser leur influence sur la mesure des pressions totales, la variation de pression atmosphérique par rapport à la mesure initiale du zéro (au moment de la mise en place des capteurs) est « perçue » par le capteur comme toute autre pression.

En effet, pour des raisons liées aux difficultés d'entretien à long terme d'une prise d'air raccordée à leur corps d'épreuve, les capteurs sont conçus pour la mesure de la pression absolue. Ils perçoivent donc sur leur surface active en même temps l'action du mesurande, relativement à la pression atmosphérique, et la pression atmosphérique. La variation de cette dernière par rapport à la lecture initiale du « zéro » (à la mise en place en des capteurs) constitue donc une erreur systématique de mesure.

Dans ce contexte, la troisième catégorie d'exigences du cahier des charges du capteur de pressions totales rassemble les conditions suivantes (EM – désigne l'étendue de mesure du capteur) :

- ◆ durée de vie de 5 ans (étanchéité, fonctionnement des circuits de mesure) ;
- ◆ dérive de sensibilité sous charge inférieure à 1% EM / an ;
- ◆ dérive du zéro sous charge inférieure à 1%EM / an ;
- ◆ insensibilité à l'action des contraintes tangentielles agissant sur leur surface active ;
- ◆ insensibilité à l'action des contraintes normales agissant sur leur surface latérale ;
- ◆ température de fonctionnement (domaine d'emploi) comprise entre -30 et 50 °C ;
- ◆ dérive thermique de sensibilité inférieure à 0,05 % /°C ;
- ◆ dérive thermique du zéro inférieure à 0,1%EM/°C ;
- ◆ correction de l'erreur systématique causée par la variation de pression atmosphérique à l'aide d'un suivi barométrique associé aux mesures des pressions

totales (notamment pour le cas des mesures de faible intensité¹⁰).

A l'heure actuelle, il existe des solutions de conception (principe de mesure, structure mécanique, type de transducteur) permettant de satisfaire les prescriptions concernant la conservation des caractéristiques métrologiques des capteurs à long terme et leur insensibilité à l'action directe des contraintes tangentielles sur leur surface active (système de mesure à action indirecte par le biais d'un film de liquide incompressible) ou des contraintes normales sur leur surface latérale (anneau protecteur rigide à l'extérieur).

On considère donc que les six premières exigences formulées ci-avant peuvent être satisfaites par le simple respect des règles de l'art lors de la conception des capteurs.

Par contre, les exigences qui visent à limiter la sensibilité thermique des mesures de pression posent des difficultés majeures de conception, notamment dans le cas des capteurs hydrauliques dont l'agent hydraulique doit couvrir l'entière surface active des capteurs. La variation de température modifie (perturbe) la pression transmise dans l'agent hydraulique par l'action du mesurande à cause de ses caractéristiques de déformabilité thermique, différentes de celles du corps du capteur. Cette perturbation dépend du volume d'huile piégé à l'intérieur du capteur et donc de la surface active des capteurs, de taille imposée.

Par ailleurs, la variation de température peut agir à l'interface corps d'épreuve – transducteur en modifiant la loi qui gouverne la courbe d'étalonnage du capteur.

Il est donc apparu nécessaire, d'une part, de prendre lors de la conception des capteurs toutes les précautions permettant de diminuer leur sensibilité thermique et, d'autre part, d'inclure dans les campagnes d'essais une épreuve permettant de quantifier la dérive thermique des mesures de pression. A ce titre, les capteurs ont été soumis à un essai de mesure d'une pression hydrostatique contrôlée à des températures différentes, compatible avec leurs domaines d'emploi.

¹⁰ La pression atmosphérique varie couramment dans l'intervalle (99 – 103) kPa ; cette variation peut donc induire une erreur systématique dans la mesure des pressions totales allant jusqu'à environ 4 kPa, ce qui peut présenter un poids significatif pour les valeurs réduites du mesurande (par exemple, inférieures à 100 kPa).

3.3 Un exemple de conception : le capteur du CECP d'Angers

Dans le cadre du thème de recherche GEO 35, la conception et la fabrication de capteurs de pressions totales ont été confiées au Centre d'Etude et de Construction de Prototypes (CECP) d'Angers.

La fabrication des prototypes a été commandée en trois séries successives :

- ◆ la première série comporte deux capteurs nommés ci-après « P7569 » et « P7571 » (mis à disposition le 30/04/1999) ;
- ◆ la deuxième série comporte trois capteurs nommés ci-après « P7563 », « P7565 » et « P7566 » (mis à disposition le 31/01/2000) ;
- ◆ la troisième série comporte trois capteurs nommés ci-après « P7501 », « P7507 » et « P7509 » (mis à disposition le 28/08/2000).

De cette manière, il a été possible de procéder aux modifications de conception qui se sont avérées nécessaires.

3.3.1 Description du capteur

Les exigences imposées dans le cahier des charges du capteur de pressions totales ont orienté le concepteur, vers le développement d'un système de mesure à action indirecte. La pression exercée sur les surfaces actives du capteur de pressions totales est transmise à un capteur de pression miniature situé à l'intérieur par le biais d'un agent hydraulique incompressible.

On distingue les composantes principales suivantes dans un capteur (Fig. 3-1 et Fig. 3-2) :

- ◆ un cousin de pression constitué de deux plaques circulaires en acier soudées sur leur pourtour et entre lesquelles on a piégé un film d'huile hydraulique ;
- ◆ un capteur de pression de fluide « prêt à l'emploi » dont la surface sensible vient en contact avec le film d'huile ;

- ♦ un chapeau de protection du capteur de pression de l'huile ;
- ♦ un câble électrique dont la jonction avec le capteur est protégée par une gaine thermo-rétractable.

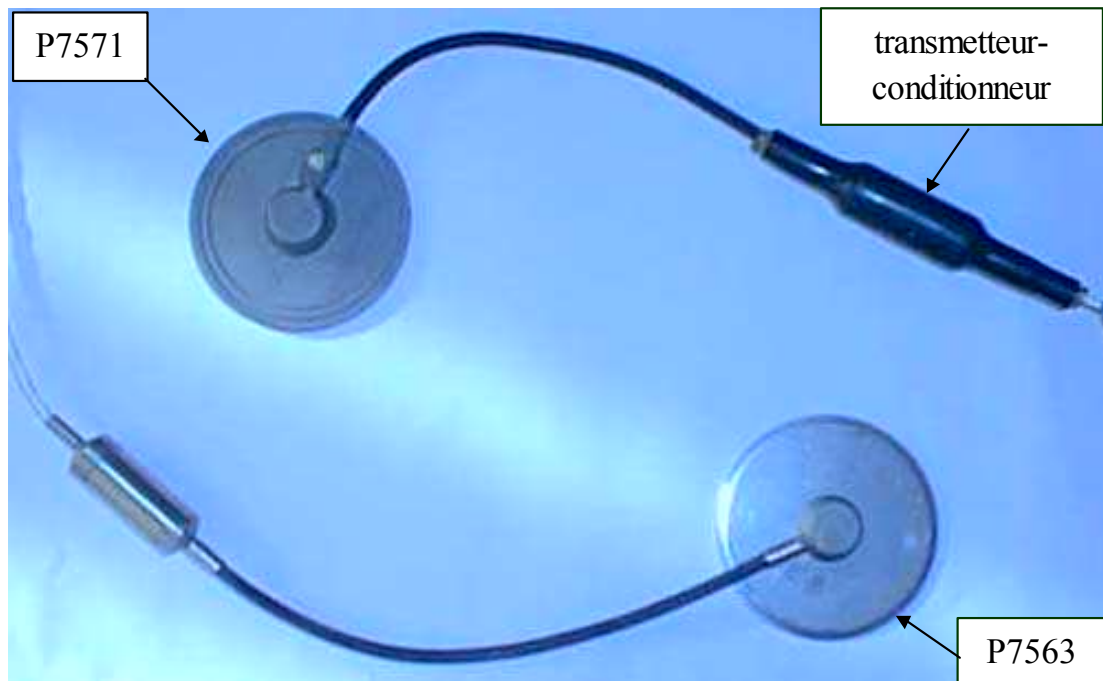


Fig. 3-1 : Capteurs prototype P7571 (série I) et P7563 (série II)

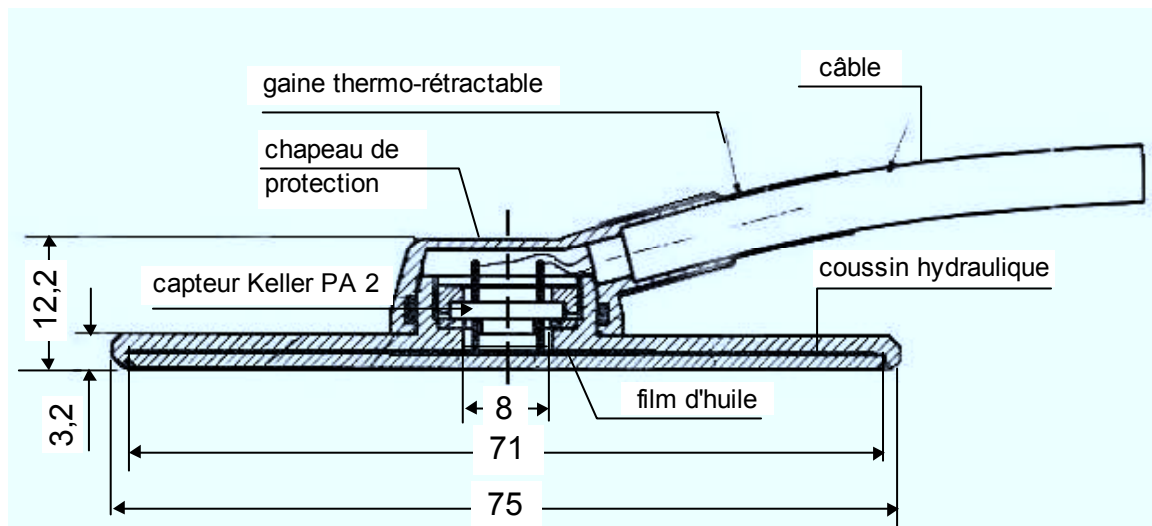


Fig. 3-2 : Capteur prototype P7569 (coupe axiale, d'après Lebrun, 1999 ; dimensions données en mm)

3.3.1.1 Le capteur de pression de fluide Keller PA2

Un capteur de pression absolue « Keller PA 2 »¹¹ dont le zéro est lié à la pression atmosphérique, conçu pour s'intégrer dans des dispositifs demandant des dimensions réduites et présentant un faible coût, a été retenu pour la mesure de la pression transmise au film d'huile.

Il s'agit d'un capteur à action directe. Sa surface active (qui constitue en même temps le corps d'épreuve) est un diaphragme en silicium instrumenté par quatre jauges piézorésistives en silicium agencées en pont de Wheatstone complet (Fig. 3-3).

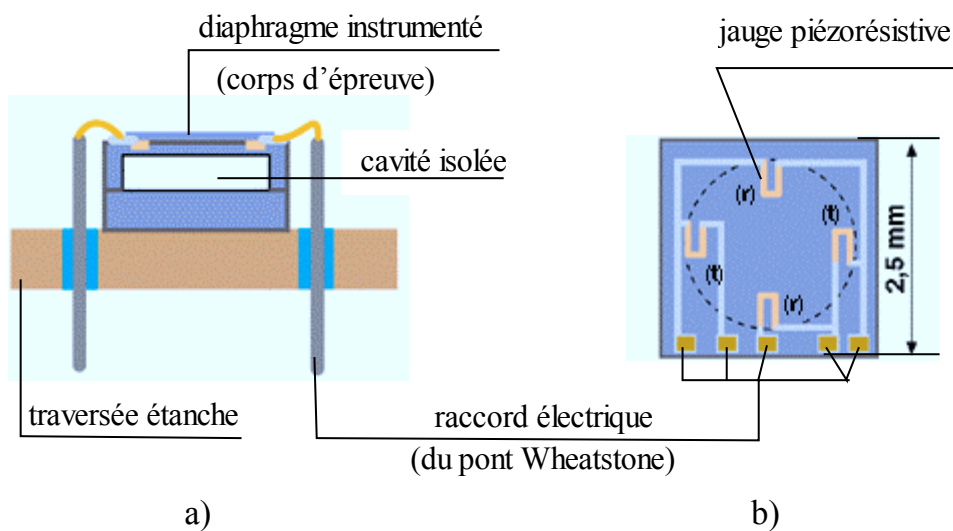


Fig. 3-3 : Capteur de pression « faible coût » Keller PA 2 : a) Cellule en silicium montée sur une traversée étanche (coupe) ; b) Diaphragme instrumenté (vue en plan)

Les jauges sont implantées directement sur le diaphragme en utilisant une technologie de micro-usinage « silicium-sur-silicium ». Cette technologie assure l'isolation diélectrique et la transmission des déformations du corps d'épreuve aux jauges.

On obtient ainsi une meilleure tenue des caractéristiques physiques et métrologiques du capteur à long terme par rapport aux technologies de fabrication classiques à base

¹¹ caractéristiques du capteur disponibles dans le catalogue en ligne de la société Keller situé à l'adresse <http://www.keller-druck.ch/>.

de jauges (à fil résistif) collées sur le diaphragme¹².

Le capteur Keller PA2 présente des caractéristiques intéressantes pour un prix relativement modéré (environ 700 FHT) :

- ♦ étendue de mesure de 0 à 500 kPa avec une surpression admissible de 750 kPa ;
- ♦ volume de respiration¹³ de la surface sensible (diaphragme instrumenté) inférieur à 0,1 mm³ sous une pression appliquée de 500 kPa ;
- ♦ incertitude de mesure intrinsèque (incluant la linéarité, l'hystérésis et la reproductibilité) inférieure à 0,5% de l'étendue de mesure (2,5 kPa) ;
- ♦ température de service comprise entre -10°C et 80°C ;
- ♦ dérive thermique du zéro inférieure à 0,1 mV/°C ;
- ♦ dérive thermique de la sensibilité inférieure à 0,025 %/°C ;

3.3.1.2 Le corps du capteur

Le corps du capteur est constitué par deux plaques en acier soudées sur leur pourtour. Pour la première série de fabrication, les deux plaques ont une épaisseur de 1,5 mm permettant une soudure classique (« tig »). Les deux plaques sont sensibles et permettent la transmission de la pression extérieure au film d'huile piégé à l'intérieur (« coussin de pression »).

Lors de la deuxième et de la troisième séries de fabrication des capteurs, la soudure des deux plaques du coussin hydraulique a été réalisée à l'aide d'une technologie à laser, qui a permis de réduire l'épaisseur des plaques à 1 mm.

Le capteur P7571 est le seul qui présente deux rainures circulaires usinées sur le pourtour de chaque plaque, dans le but de diminuer leur degré d'encastrement et donc

¹² Pour les capteurs à jauges résistives collées sur le corps d'épreuve, les performances de mesure sont affectées à long terme, notamment pour le cas d'une sollicitation variable, par le fluage de la colle (en dépit de ses caractéristiques toujours améliorées).

¹³ Volume dégagé par le fléchissement du diaphragme compris sous une pression égale à l'étendue de mesure du capteur (volume compris entre les positions déformée et non déformée du diaphragme).

de diminuer la dérive thermique du signal de sortie causée par la déformabilité thermique différente de l'huile de remplissage par rapport au coussin en acier.

Les résultats de la qualification du comportement thermique du capteur P7571 ont été jugés non satisfaisants, vraisemblablement à cause du surcroît de volume d'huile introduit sous l'action de la précontrainte (la variation thermique de pression dans l'huile causée par sa dilatation différentielle par rapport au coussin en acier est proportionnelle à son volume).

3.3.1.3 Le film d'huile

Un film d'huile de silicone de type « Wacker AK100 » de 0,2 mm d'épaisseur, présentant des caractéristiques adaptées pour venir en contact avec le chip piézorésistif Keller, sert d'agent hydraulique.

Le remplissage d'huile et l'assemblage du capteur des pressions totales (montage du chapeau de protection) ont été réalisés dans une enceinte sous vide. L'huile a été soigneusement désaérée et mise en précontrainte au montage sous une pression de l'ordre de 50 kPa afin que les deux plaques ne viennent pas en contact, l'une avec l'autre, sous l'action de la pression extérieure.

Pour les capteurs de la deuxième et de la troisième série de fabrication, on s'est contenté de diminuer l'épaisseur des deux plaques ainsi que la précontrainte de l'huile de remplissage (à environ 40 kPa pour la deuxième série et à environ 20 kPa pour la troisième série), de façon à réduire au minimum son volume.

3.3.1.4 Le transmetteur-conditionneur

Un transmetteur-conditionneur de type « Keller Progress 95 », connecté en série avec le capteur, assure l'alimentation du pont de Wheatstone en courant constant (0,8 mA) indépendamment de la tension d'alimentation appliquée (qui peut varier dans le domaine 8-28 V). Il assure, par ailleurs, le conditionnement de la tension de sortie du pont de Wheatstone en courant 4-20 mA permettant sa transmission sans perturbation à une distance importante pour la lecture ou l'enregistrement. Un tel conditionnement s'avère nécessaire, notamment, pour les lignes d'une longueur importante dont la

résistance électrique affecte la transmission d'un signal en tension (loi d'Ohm pour une portion de circuit).

Pour les capteurs de la première et de la troisième séries de fabrication, le transmetteur-conditionneur a été protégé par une gaine étanche thermo-rétractable tandis que, pour la deuxième série de fabrication, le transmetteur a été protégé par une gaine en acier. Cette dernière solution s'est avérée non fiable : les essais répétés en présence du sol ont conduit à une dégradation de l'étanchéité de la gaine métallique dans le cas du capteur P7565.

3.3.1.5 Raideur des surfaces actives du capteur

Une attention particulière a été accordée pour obtenir la raideur la plus élevée de leur surfaces actives. Les principales dispositions constructives prises à cet effet sont :

- ♦ le choix d'un système de mesure à action indirecte à base d'une huile hydraulique de module de compressibilité volumique élevé ($E_v = 1300 \text{ MPa}$) ;
- ♦ la réduction au maximum de l'épaisseur du film d'huile, par ailleurs soigneusement désaérée, tout en assurant le remplissage complet (sans piéger des poches ou des bulles d'air) du coussin hydraulique et donc le contact sur toute la surface sensible du capteur Keller ;
- ♦ le choix d'un capteur de pression de fluide miniature présentant un volume de respiration très réduit de sa surface sensible en contact avec l'huile ($V_K < 0,1 \text{ mm}^3$) ;

Une évaluation théorique de la raideur au centre de la surface active du capteur (la raideur minimale) a été réalisée dans l'hypothèse où l'huile est complètement désaérée. Le volume dégagé par le fléchissement de la surface active du capteur des pressions totales sous une pression égale à son étendue de mesure (200 kPa) est égal alors à la somme du volume dégagé par le fléchissement du diaphragme du capteur Keller intérieur (V_K) et de la réduction du volume occupé par l'huile du fait de sa compressibilité (ΔV_h).

Le volume total occupé par l'huile V_h a été estimé par un calcul de cubature en distinguant les deux composantes suivantes :

- ♦ la composante V_h^0 occupée par l'huile dans l'hypothèse où elle n'est pas précontrainte (estimée en fonction des dimensions nominales du coussin de pression) ;
- ♦ la composante V_h^p correspondant à l'augmentation du volume entre les deux plaques par l'application de la précontrainte $p_0 = 50$ kPa.

En considérant les paramètres de calcul suivants (voir Fig. 3-2) :

- ♦ diamètre des deux surfaces actives du capteur de pressions totales $d=71$ mm ;
- ♦ épaisseur des plaques en acier constituant les surfaces actives $e=1$ mm (calcul fait pour les capteurs des deuxième et troisième séries de fabrication) ;
- ♦ épaisseur du film d'huile entre les deux plaques sous une pression nulle $e_h=0,2$ mm;
- ♦ logement central permettant à l'huile de venir en contact avec le diaphragme du capteur Keller de diamètre 8 mm et d'épaisseur 1 mm (rempli d'huile) ;
- ♦ déflexion centrale d'une plaque circulaire en acier encastrée sur son pourtour et soumise à l'action d'une pression uniformément distribuée (estimée dans les limites d'un comportement linéaire-élastique du matériau), donnée par la relation (Thimoshenko) :

$$\delta_c(p) = \frac{3(1-\nu^2)d^4}{256E_a e^3} p \Leftrightarrow \delta_c(p_i) = \frac{3(1-0,3^2)71^4}{256 \times 2,1 \times 10^6 \times 1^3} 0,5 = 0,065 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Le volume total de l'huile piégée entre les deux plaques du capteur sous une précontrainte de 50 kPa est donné par la relation (3.5).

$$V_h = V_h^0 + V_h^p \leq \left[\frac{\pi \times 71^2 \times 0,2}{4} + \frac{\pi \times 8^2 \times 1}{4} \right] + 2 \frac{2}{3} \frac{\pi \times 71^2}{4} 0,065 = 1190 \text{ mm}^3 \quad (3.5)$$

La réduction du volume d'huile sous l'action d'une pression extérieure $p=200$ kPa est alors :

$$\Delta V_h = \frac{pV_h}{E_v} = \frac{0,2 \times 1190}{1300} = 0,183 \text{ mm}^3 \quad (3.6)$$

On obtient ainsi la valeur maximale du volume dégagé par la surface active du capteur prototype (volume de respiration) sous l'action d'une pression égale à son étendue de mesure :

$$V_{\max} = \Delta V_h + V_K = 0,183 + 0,100 = 0,283 \text{ mm}^3 \quad (3.7)$$

La déflexion maximale au centre de la surface active du capteur des pressions totales ne peut pas dépasser la hauteur du cône inscrit dans le volume dégagé, c'est-à-dire que l'on peut écrire :

$$\delta_{\max} (p = p_{\max} = 200 \text{ kPa}) < 0,283 \frac{4}{\pi \times 71^2} 3 = 0,214 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (3.8)$$

ou

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{0,214 \times 10^{-3}}{71} \Leftrightarrow \frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{330000} \quad (3.9)$$

La raideur théorique au centre de la surface active du capteur de pressions totales obtenue dans l'hypothèse d'une huile complètement désaérée satisfait donc largement aux prescriptions du cahier des charges (valeur minimale de 50 GPa/m) :

$$K_c > \frac{p_{\max}}{\delta_{\max}} = \frac{0,2 \text{ MPa}}{0,214 \times 10^{-6} \text{ m}} \Leftrightarrow K_c > 930 \text{ GPa/m} \quad (3.10)$$

L'obtention d'une valeur aussi élevée de la raideur de la surface active des capteurs résulte notamment de la miniaturisation du capteur piézorésistif, dont le diaphragme corps d'épreuve présente un diamètre de seulement 2,5 mm. Ses déformations très réduites (engendrées par la pression transmise dans le film d'huile) sont toutefois « lisibles » par le transducteur à jauges piézorésistives (montées en pont Wheatstone complet) grâce à leur sensibilité, nettement supérieure à celle des jauges résistives classiques.

Pour vérifier expérimentalement cette raideur, le CECP d'Angers a tenté dans une enceinte de pression d'air la mesure de la déflexion au centre des surfaces actives des capteurs P7569 et P7571. Un dispositif d'essai permettant de fixer les palpeurs de deux

capteurs de déplacement « TESA » (résolution de $0,1 \mu\text{m}$) en contact avec les centres de chaque surface active a été réalisé. Les résultats obtenus ont été cependant qualifiés de non significatifs à cause des difficultés technologiques de la mesure de déplacement sous pression et de la résolution des capteurs de déplacements disponibles, du même ordre de grandeur que la valeur estimée du mesurande ($0,2 \mu\text{m}$).

3.3.1.6 Etalonnage des capteurs et méthodologie de mesure

Chaque capteur prototype a été étalonné dans une enceinte à air du CECP d'Angers dans des conditions de grandeurs d'influence quasi-stationnaires (chambre climatisée à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). Comme référence on a utilisé un capteur étalon « HBM P3MBR » présentant une étendue de mesure de 0 à 500 kPa et une incertitude globale de mesure de $\pm 0,1\%$ de l'étendue de mesure ($\pm 0,5 \text{ kPa}$).

L'essai a comporté un cycle de variation en régime statique de la pression d'air appliquée dans la chambre dans l'intervalle 0 – 230 kPa (contrôlée par le capteur étalon), le signal délivré par les capteurs prototype (intensité du courant électrique) étant enregistré tous les 10 kPa indiqués par le capteur étalon.

Il a ainsi été possible de tracer la courbe d'étalonnage de chaque capteur dans un système de référence [Intensité du courant électrique de sortie (mA) ; pression appliquée sur la face active du capteur (kPa)] et d'estimer les caractéristiques métrologiques de chaque capteur à partir d'une analyse de régression linéaire (Tableau 3-1 et Fig. 3-4) :

- ♦ sensibilité (la pente de la meilleure droite, c'est-à-dire la pente de la droite de régression associées aux points de la courbe d'étalonnage) ;
- ♦ erreur de linéarité maximale (le plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et la meilleure droite) ;
- ♦ erreur de linéarité moyenne (écart moyen absolu entre la courbe d'étalonnage et la meilleure droite) ;
- ♦ erreur d'hystérésis (écart moyen entre la courbe d'étalonnage en montée de

pression et la courbe d'étalonnage en descente de pression).

Tableau 3-1 : Résultats de l'étalonnage des capteurs prototypes de pressions totales

Capteur		Sensibilité (mA/kPa)	Erreur de linéarité		Erreur d'hystérésis (maximale) %EM
Type	Désignation		locale (maximale) %EM	globale (moyenne) %EM	
Prototype série 1	P7569		0,06513	0,467	
	P7571	0,06453	0,382	0,162	0,230
Prototype série 2	P7563	0,06785	0,510	0,190	0,587
	P7565	0,06582	0,326	0,167	0,303
	P7566	0,06566	0,489	0,244	0,456
Prototype série 3	P7501	0,03229	0,179	0,081	0,150
	P7507	0,03230	0,099	0,043	0,040
	P7509	0,03255	0,246	0,149	0,080

On dispose ainsi des éléments permettant l'exploitation pratique des mesures (intensité du courant électrique) en termes de pression appliquée sur la surface active des capteurs en appliquant un mode opératoire en deux temps :

a) Mesure initiale (préalable) du zéro (à l'instant t_0)

A l'instant t_0 , avant d'effectuer la séquence de mesure proprement-dite, on procède à l'enregistrement du signal de sortie délivré par le capteur (intensité du courant électrique) en présence de l'atmosphère $p_{atm} = p_{atm}(t_0)$, c'est-à-dire pour une pression relative nulle appliquée sur la surface active du capteur $p(t_0) = 0^{14}$:

$$I[p(t_0)=0 ; p_{atm}(t_0)] = I(t_0) \quad (3.11)$$

b) Mesure courante (au moment t)

Au moment t où l'on s'intéresse à la valeur du mesurande $p(t)$ [pression relative à la pression atmosphérique courante $p_{atm}(t)$] agissant sur la surface active du capteur, on procède à l'enregistrement du signal de sortie du capteur (mesure courante) :

$$I[p(t) ; p_{atm}(t)] = I(t) \quad (3.12)$$

¹⁴ Cette mesure est appelée couramment, par abus de langage, « la mesure du zéro », ou encore « le zéro ».

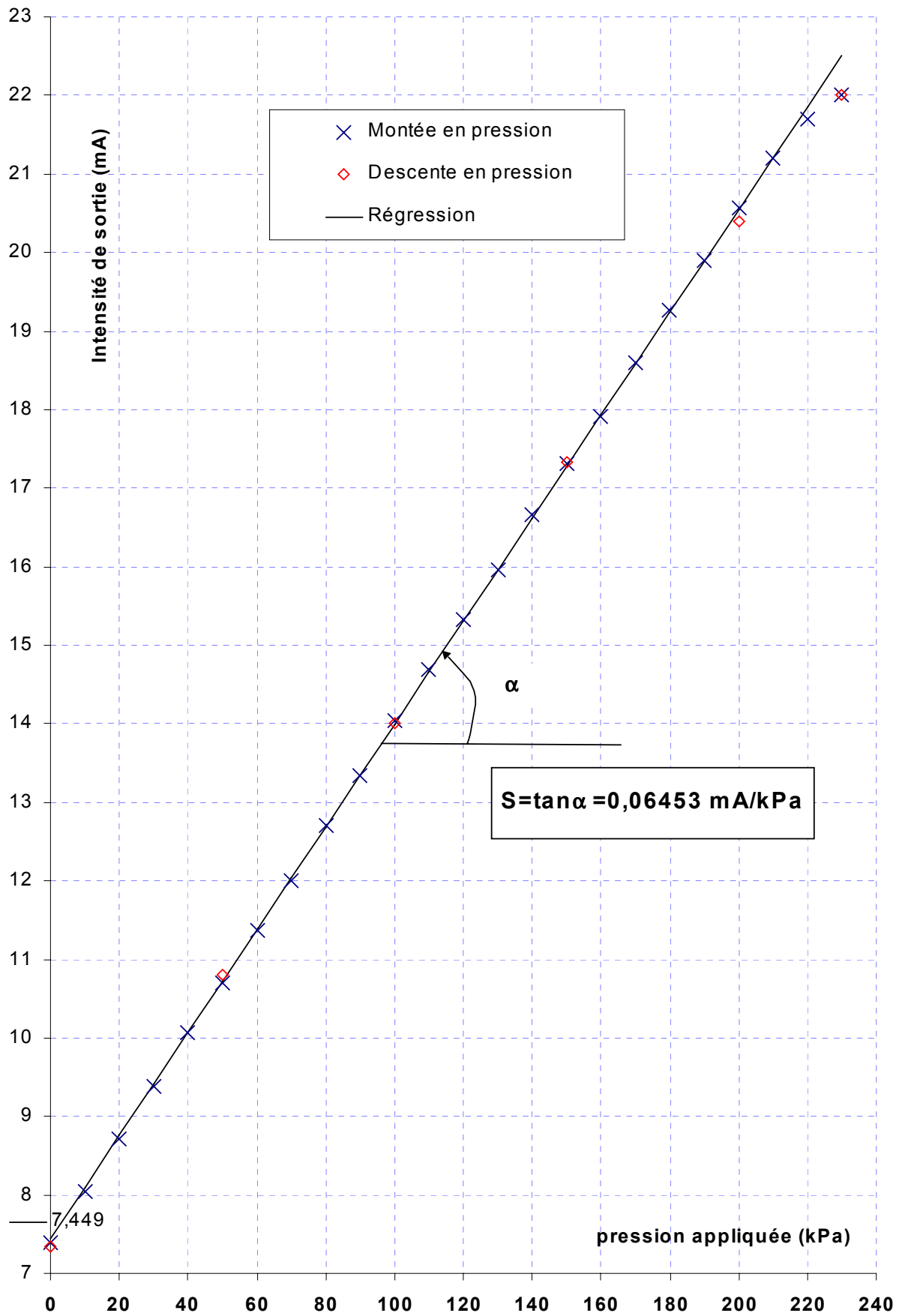


Fig. 3-4 : Résultats de l'étalonnage du capteur P7571.

Etant donné la relation linéaire qui caractérise le fonctionnement des capteurs (déterminée par l'étalonnage), le mesurande $p(t)$ est estimé avec la relation ci-après :

$$S = \frac{I(t) - I(t_0)}{p(t) + p_{am}(t) - [0 + p_{am}(t_0)]} \Rightarrow p(t) = \frac{I(t) - I(t_0)}{S} + p_{am}(t_0) - p_{am}(t) \quad (3.13)$$

Si l'on vise l'exactitude de mesure, il faudra effectuer les mesures dans des conditions proches de celles de l'étalonnage du capteur et notamment à la même température quasi-stationnaire.

Cependant, dans la plupart des cas pratiques, la relation (3.13) est utilisée pour l'exploitation des mesures effectuées en conditions de température variable et même en négligeant le terme qui correspond à la variation de pression atmosphérique entre la mesure courante et la mesure du zéro :

$$p(t) = \frac{I(t) - I(t_0)}{S} \quad (3.13')$$

Cette dernière relation a été utilisée pour l'interprétation des campagnes d'essai effectuées en laboratoire dans le cadre de cette étude. On compte donc sur une sensibilité thermique des capteurs suffisamment réduite et sur une variation de la température et de la pression atmosphérique de faible ampleur entre la mesure du zéro et la mesure courante, compte tenu d'une durée d'essai relativement courte (1 à 2 h).

Evidemment, pour les mesures in situ à long terme (caractérisées par des variations de température et de pression atmosphérique importantes) et, notamment, pour le cas d'un mesurande de faible intensité, il faut quantifier l'impact de ces facteurs (variations) avant de procéder à la simplification des relations d'interprétation des mesures.

3.4 Les autres capteurs testés

Le Tableau 3-2 regroupe l'ensemble des capteurs dont la réponse a été étudiée dans les différentes campagnes expérimentales. On indique leurs acronymes (attribués pour une identification facile) et quelques caractéristiques générales.

Tableau 3-2 : Caractéristiques générales des capteurs disponibles

Capteurs testés			Etendue de mesure (kPa)	Type de transducteur	Liquide remplissage	Diamètre total (D) (mm)
Fabricant	Type	Désignation				
CECP Angers	Prototype série 1	P7569	0-200	4 jauges piézorésistives (montage en pont de Wheatstone complet)	huile de silicone	75
		P7571	0-200			75
	Prototype série 2	P7563	0-200			75
		P7565	0-200			75
		P7566	0-200			75
	Prototype série 3	P7501	0-200			75
		P7507	0-200			75
P7509		0-200	75			
Université de Brunel	Prototype	B2	0-100	inconnu	huile de silicone	75
		B3	0-100			75
		B4	0-100			75
		B5	0-100			75
KYOWA	BE-C	5KC	0-490	4 jauges résistives à trame pelliculaire (montage en pont de Wheatstone complet)	mercure	30
		10KC	0-980			30
	BE-M**	M9	0-490			94
		M10	0-490			94
KYOWA	BE-F*	K ₂	0-490	200		
		K ₅	0-490	200		
Slope Indicator	VW Cell* Jack-Out	SI ₁	0-690	corde vibrante	éthylène glycol	230
		SI ₂	0-690			230

*-capteurs utilisés ensuite pour l'instrumentation d'une paroi moulée (site de la « Trémie Pasteur » ; voir chapitre 4)

**-capteurs utilisés ensuite pour l'instrumentation d'une fondation mixte (« site de Merville » ; Borel, 2001).

Les expérimentations ont porté sur la mesure des contraintes à l'intérieur d'échantillons de sable pour les seize premiers capteurs et à l'interface d'échantillons avec une structure pour les quatre derniers.

3.4.1 Capteurs prototype d'Askegaard

Quatre capteurs de l'Université de Brunel, Royaume-Uni (« B2 », « B3 », « B4 » et « B5 ») ont été employés lors des essais de mesure de la pression au sein d'échantillons de sable centrifugés.

Ces capteurs avaient déjà été testés dans la chambre à paroi rigide de l'Université Technique de Danemark¹⁵ et dans la centrifugeuse du LCPC¹⁶ pour plusieurs situations de mesure constituant ainsi une référence représentative pour qualifier les situations de

¹⁵ Askegaard et Brown (1995)

¹⁶ Garnier et Brown (1997).

mesure et la réponse des autres capteurs dans ces situations.

Ils constituent le résultat d'une longue et remarquable série de recherches effectuées par Askegaard pendant plusieurs décennies (1961 – 1996) pour améliorer la mesure de pression dans les milieux pulvérulents et, en particulier, pour minimiser l'influence sur la mesure des contraintes agissant sur la surface latérale des capteurs.

Les capteurs de l'Université de Brunel ont constitué le point de départ de la conception des capteurs du CECP d'Angers.

Ces capteurs avaient également été utilisés pour effectuer des mesures de pression au sein des conteneurs de sable centrifugé¹⁷ afin d'étudier l'influence de la méthode de mise en place sur leur réponse. Il a ainsi été possible de sélectionner une technique de mise en place des capteurs à l'aide d'un dispositif spécial (Fig. 3-5) permettant de diminuer l'influence du facteur « opérateur » sur la réponse des capteurs.

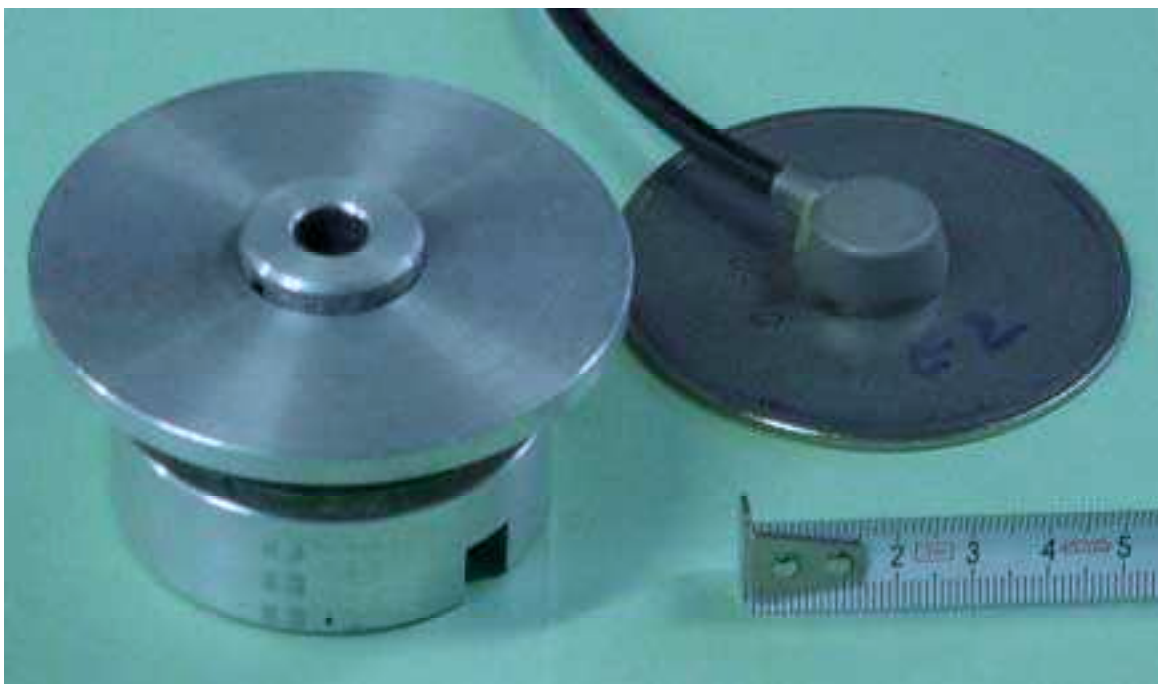


Fig. 3-5 : Capteur de l'Université de Brunel et dispositif pour sa mise en place

Ils présentent un diamètre de 75 mm et une étendue de mesure de 0 à 100 kPa. Ils sont constitués d'un coussin hydraulique composé de deux plaques circulaires en titane,

soudées sur le pourtour, à l'intérieur duquel est piégé un film d'huile d'épaisseur 0,15 mm, soigneusement désaéré.

La pression extérieure appliquée sur les surfaces actives du capteur est transmise à un capteur intérieur, miniature de pression de fluide. Une loi linéaire gouverne la transformation de la pression agissant dans l'agent hydraulique et donc aussi la pression extérieure en tension électrique (signal de sortie).

Askegaard avait caractérisé la réponse de ces capteurs lorsqu'ils sont installés au sein d'échantillons de sable soumis à l'action d'un champ de contraintes contrôlé. Cette caractérisation, effectuée au moyen de la chambre d'étalonnage de l'Université Technique du Danemark, faisait appel aux coefficients A et B intervenant dans la relation 1.23, (les valeurs idéales correspondant à une perturbation nulle sont $A=1$ et $B=0$). Pour le cas d'une mise en place des capteurs par un opérateur expérimenté, il a obtenu les résultats suivants :

- ♦ A compris dans l'intervalle [0,97 - 1,06] ;
- ♦ B compris dans l'intervalle [0,00 - 0,02].

3.4.2 Capteurs Kyowa BE-C

Deux capteurs de pressions totales Kyowa BE-C (« 5KC » et « 10KC ») ont été expérimentés en parallèle aux capteurs prototypes du CECP d'Angers dans l'ensemble des campagnes d'essai effectuées. Il a été ainsi possible d'acquérir une image représentative des performances de mesure des capteurs prototypes par rapport à celles des capteurs disponibles sur le marché.

Il s'agit de capteurs miniatures (diamètre total de 3 cm ; Fig. 3-6) destinés aux mesures de pressions totales dans des sols fins ($d_{50} < 0,6$ mm) au sein de modèles réduits ou au sein des ouvrages en vraie grandeur.

Leur surface active, de diamètre de 2,7 cm, transmet la pression extérieure par le biais

¹⁷ Garnier et al. (1999) : les résultats de cette étude expérimentale effectuée dans la centrifugeuse du LCPC sont décrits dans le chapitre 2.4.2.2.

d'un film de mercure à un diaphragme intérieur (corps d'épreuve) instrumenté par quatre jauges résistives montées en pont de Wheatstone complet.

Le pont est alimenté en courant continu (tension d'alimentation limitée à 4 V) et délivre une tension de sortie proportionnelle à la pression appliquée sur la surface active (la tension de sortie maximale correspondant à une pression égale à l'étendue de mesure des capteurs est de 1 mV pour 4V).



Fig. 3-6 : Capteur Kyowa 10KC et capteur prototype d'Angers P7569

La raideur de la surface active de ces capteurs, indiquée par leur fabricant, satisfait largement les recommandations des anciennes études :

$$\frac{\delta_{\max}}{d} < \frac{1}{100000} \quad (3.14)$$

Le capteur «5KC» présente une étendue de mesure de 0 à 490 kPa tandis que le capteur « 10KC » présente une étendue de mesure de 0 à 980 kPa.

3.4.3 Capteurs Kyowa BE-M

La réponse de deux capteurs de pressions totales Kyowa BE-M (« M9 » et « M10 ») a été qualifiée à l'intérieur d'un échantillon de sable centrifugé lors de la dernière campagne d'essai réalisée avec la centrifugeuse du LCPC de Nantes.

Ces capteurs ont été ensuite utilisés pour l'expérimentation d'une fondation mixte semelle-pieu en vraie grandeur sur le site de Merville (Borel, 2001).

Il s'agit de capteurs présentant le même principe de mesure que celui des capteurs miniature Kyowa BE-C (une seule surface active et action indirecte sur un corps d'épreuve intérieur) et une étendue de mesure de 0 à 500 kPa.

La géométrie de ces capteurs correspond à un volume sensiblement plus élevé que celui des capteurs BE-C : diamètre total de 9,4 cm (diamètre de leur surface active de 8 cm) et épaisseur de 18,2 mm.

3.4.4 Capteurs d'interface sol-structure

Les capteurs d'interface sol-structure, sélectionnés en vue de l'instrumentation d'une paroi moulée (voir chapitre 4), ont fait l'objet d'une expérimentation préalable en laboratoire. Parmi les six capteurs disponibles, on a retenu pour la qualification en laboratoire :

- ♦ les deux capteurs Kyowa BE-F ;
- ♦ deux parmi les quatre capteurs Slope Indicator.

3.4.4.1 Capteurs Kyowa BE-F

Les deux capteurs Kyowa BE-5F (« K₂ » et « K₅ ») ont été expérimentés sur l'ensemble des campagnes d'essais effectuées : en milieu hydrostatique et à l'interface d'échantillons de sable centrifugé ou dans une enceinte triaxiale.

Les capteurs BE-F présentent le même principe de conception que les capteurs BE-C et BE-M, mais ils sont destinés aux mesures in situ des pressions exercées par les sols

à l'interface des ouvrages géotechniques. Ils présentent une étendue de mesure de 0 à 490 kPa pour un diamètre total de 20 cm et un diamètre de leur surface active de 16,9 cm.

Un anneau rigide assure la protection du système de mesure (de la pression agissant sur leur surface active) contre les sollicitations appliquées sur leur surface latérale. Il comporte des trous préfabriqués facilitant le montage du capteur par vis (Fig. 3-7).

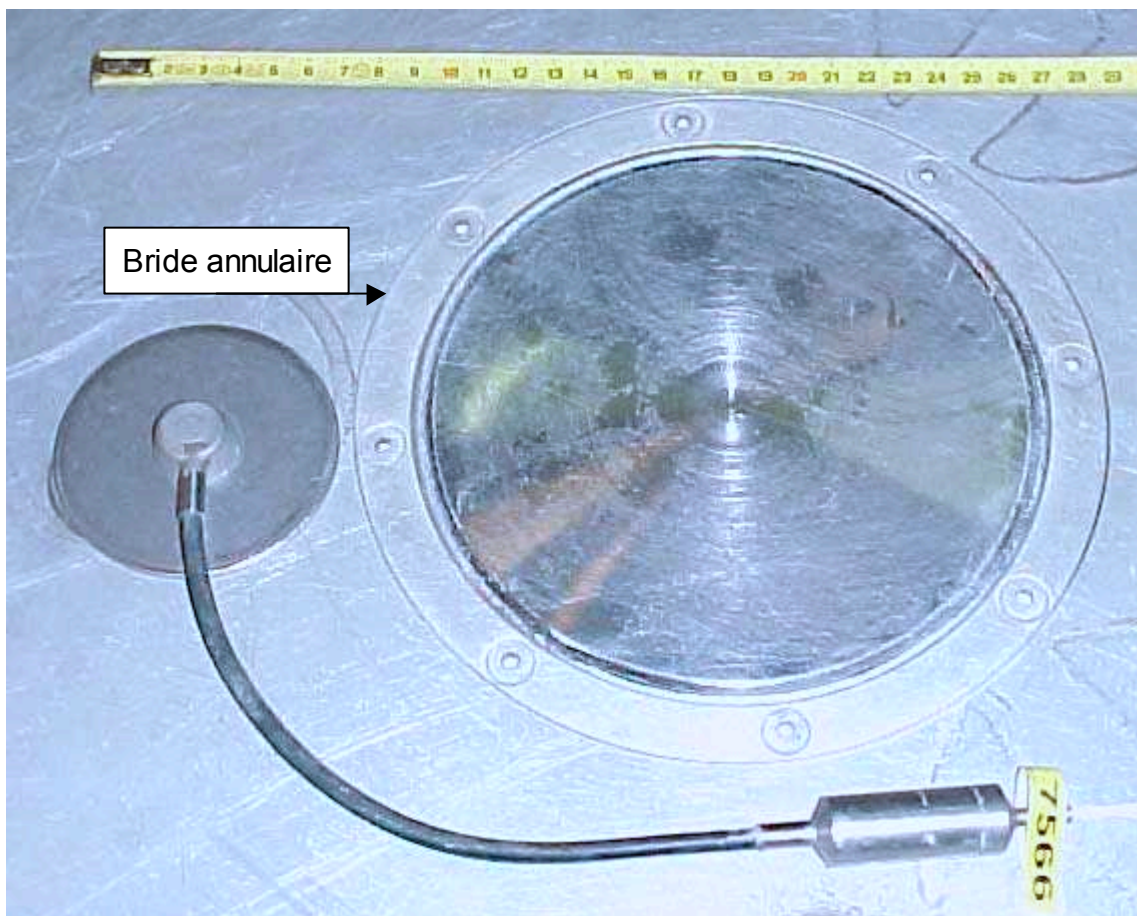


Fig. 3-7 : Capteur P7566 (posé) et capteur K_2 (encastré) sur l'embase inférieure de la chambre triaxiale du Cermes

La tension électrique d'alimentation du capteur et la tension électrique de sortie sont conduites par un câble « quatre fils » passant par la surface rigide des capteurs opposée à leur face active.

En dépit de leur taille sensiblement plus élevée que celle des capteurs BE-C et BE-M, les capteurs BE-F assurent aussi une raideur très importante de leur surface active, la

déflexion au centre de leur surface active respectant la relation (3.14).

Compte tenu du rôle essentiel joué par cette caractéristique pour assurer la discrétion de la mesure des pressions dans le sol et, notamment, pour le cas des mesures à l'interface des ouvrages, ces capteurs ont été sélectionnés pour l'instrumentation d'une paroi moulée en dépit de leur prix élevé (environ 8700 FHT/u).

Les feuilles d'étalonnage des capteurs K_2 et K_5 sont données dans l'Annexe 4-1. On remarque le manque de renseignements sur leur sensibilité thermique, ce qui a constitué une raison supplémentaire pour leur évaluation en laboratoire avant la mise en place des capteurs dans la paroi moulée.

3.4.4.2 Capteurs Slope Indicator

Deux capteurs Slope Indicator « Vibrating Wire Jack-Out » (« SI_1 » et « SI_2 ») ont été soumis à des essais de mesure de la pression transmise en milieu hydrostatique et à l'interface des échantillons de sable dans l'enceinte triaxiale. Il s'agit de capteurs à corde vibrante spécialement conçus pour l'instrumentation d'une paroi moulée.

Ces capteurs n'ont pas été testés en centrifugeuse du fait de leur encombrement excessif (Fig. 2-12) et de la perturbation de la mesure causée par la centrifugation de la corde vibrante.

Il s'agit de capteurs à action indirecte sur leur corps d'épreuve. Un film d'éthylène-glycol permet de transmettre l'action du mesurande vers un diaphragme circulaire intérieur (corps d'épreuve). Une corde vibrante solidaire à une extrémité du centre du diaphragme et fixée à l'autre extrémité constitue le transducteur.

Le fonctionnement de ces capteurs est basé sur l'exploitation de la loi physique quadratique qui relie la tension dans la corde à sa fréquence de vibration. Cette dernière est transformée par un électro-aimant en fréquence d'un courant électrique alternatif qui est transmis à distance.

L'interprétation des résultats de l'étalonnage des capteurs par une régression polynomiale de deuxième ordre permet de relier le mesurande p à la fréquence du courant électrique qu'ils délivrent :

$$p=Af^2+Bf+C \quad (3.15)$$

Les coefficients A, B, C ont été déterminés par le fabricant en conditions de pression atmosphérique normale $p_{atm}(t_0) = 101,3$ kPa et de température stationnaire $T(t_0)$ (qui sont indiquées dans les feuilles d'étalonnage de chaque capteur en Annexe 4-1).

Ces capteurs sont dotés d'une sonde de température de type RTD¹⁸ permettant un suivi en parallèle de la température à l'endroit de la mesure.

Le fabricant Slope Indicator a évalué la dérive thermique des mesures de pression C_T (« Temperature coefficient » dans l'Annexe 4-1) et propose, pour l'exploitation des mesures, une relation prenant en compte la correction de l'erreur systématique causée par les variations de la température et de la pression atmosphérique :

$$p(t)=Af^2+Bf+C-[p_{atm}(t)-p_{atm}(t_0)] - C_T[T(t) - T(t_0)] \quad (3.16)$$

3.4.5 Synthèse des caractéristiques physiques des capteurs

Le Tableau 3-3 présente les principales caractéristiques physiques qui affectent la discrétion de mesure des pressions totales de l'ensemble des capteurs testés en prenant comme référence les prescriptions du cahier des charges.

Tableau 3-3 : Caractéristiques physiques des capteurs affectant leur discrétion

Capteurs disponibles		Diamètre total (D) (mm)	Epaisseur			Rapport de forme		Raideur surface active (GPa/m)
Fabricant	Type		coussin (e) (mm)	maximale (e_M) (mm)	moyenne (e_m) (mm)	(e/D) -	(e_m/D) -	
CECP Angers	Prototype série 1	75	3,2	12,2**	3,8	< 1/23	< 1/19	>930
	Prototype série 2 et 3	75	2,2	11,2	2,8	<1/34	<1/26	>930
Université de Brunel	Prototype	75	2	12	2,6	< 1/37	< 1/30	>100
KYOWA	BE-C	30	6,5	9	7,5	<1/4,6	< 1/4	>1666
	BE-M	94	18,2	18,2	18	<1/5,1	< 1/5,2	>625
	BE-F*	200	25	75**	26	<1/8	<1/7	>295
Slope Indicator	VW Cell* Jack-Out	230	11	181**	16	<1/20	<1/14	non précisée
Cahier des charges		75				< 1/20	< 1/20	>50

*- capteurs destinés aux mesures à l'interface sol-structure ;
¹⁸ Abbréviation de l'anglicisme « resistance temperature device ».
 **- au niveau de la loge du transducteur.

On remarque que les capteurs prototypes d'Angers et, notamment les prototypes de la deuxième et de la troisième séries de fabrication présentent des caractéristiques satisfaisant largement aux prescriptions du cahier des charges et, dans l'ensemble, supérieures à celles des autres capteurs analysés.

Les capteurs Kyowa BE-C et BE-M, destinés aux mesures au sein de massifs de sol, présentent une raideur très importante de leur surface active mais un rapport de forme assez élevé par rapport aux recommandations.

Il convient de préciser que, pour les mesures à l'interface sol-structure avec un capteur encastré dans la structure ayant sa surface active contenue dans le plan d'interface, le rapport de forme du capteur n'influence pas la discrétion de la mesure parce qu'il ne constitue pas une inclusion dans le sol.

3.4.6 Aperçu des essais effectués sur chaque capteur

Les capteurs de pressions totales ont fait l'objet de trois catégories d'essais, chaque essai étant mené en faisant varier la pression transmise au niveau de leurs surfaces actives suivant différents chemins :

- ♦ essais hydrostatiques dans la grande enceinte du CERMES ;
- ♦ essais en milieu pulvérulent reconstitué dans un conteneur centrifugé (centrifugeuse du LCPC à Nantes) ;
- ♦ essais en milieu pulvérulent reconstitué dans la grande enceinte triaxiale du CERMES.

Le Tableau 3-4 indique, pour chaque capteur, le type et le nombre d'essais effectués.

Il convient de noter que la planification et le contenu de chaque essai ont été conditionnés par la disponibilité des capteurs et des équipements (centrifugeuse et chambre triaxiale), mais aussi par le nombre limité de capteurs qui pouvaient être testés en même temps.

Tableau 3-4 : Tableau récapitulatif des essais effectués

Capteurs testés	Essais effectués			
	hydrostatique	en présence du sable de Fontainebleau		
	Chambre triaxiale (CERMES)	Centrifugeuse (LCPC)		
	(spécialement aménagée)		conteneur rectangulaire	conteneur circulaire
P7569	7	2	8	1
P7571	7	2	8	1
P7563	-	1	4	1
P7565	-		2	1
P7566	-		4	1
P7501	-	-	1*	-
P7507	-	-	1	-
P7509	-	-	1	-
B2	-	-	6	-
B3	-	-	6	-
B4	-	-	4	-
B5	-	-	6	-
5KC	7	1	5	2
10KC	7	1	5	2
M9	-	-	2	-
M10	-	-	1	-
K ₂	7	11	-	4
K ₅	7	6	-	4
SI ₁	7	-	-	-
SI ₂	7	3	-	-

* - défaillance du fonctionnement du capteur ;

3.5 Essai hydrostatique

Les essais hydrostatiques ont été menés simultanément sur huit capteurs de pressions totales (Tableau 3-4). Les objectifs envisagés sont les suivants :

- ♦ étude de la reproductibilité des résultats de l'essai d'étalonnage des capteurs fournis par leurs fabricants et vérification de la loi de conformité¹⁹ des capteurs indiquée dans leurs feuilles d'étalonnage ;

¹⁹ loi de conformité : «droite ou courbe représentant la relation fonctionnelle liant la grandeur d'entrée à la grandeur de sortie» (Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994).

- ♦ qualification de la sensibilité thermique des capteurs.

3.5.1 Description de l'essai hydrostatique

L'essai hydrostatique a été réalisé dans la grande chambre triaxiale du CERMES, spécialement aménagée pour permettre de tester huit capteurs en même temps :

- ♦ la pression a été appliquée dans l'enceinte remplie d'eau à l'aide du circuit hydraulique qui assure la pression horizontale exercée sur la surface latérale des éprouvettes de sol ; elle a été contrôlée (mesurée) par un capteur de pression relative de type Schaevitz (étendue de mesure de 0 à 20 bars et incertitude sur la linéarité de 0,1 % de son étendue de mesure, soit 2 kPa) connecté sur le circuit hydraulique à l'extérieur de l'enceinte et donc non exposé à l'action des variations de température dans l'enceinte ;
- ♦ le piston qui assure l'application de la pression verticale dans les échantillons de sol a été posé sur le châssis de la chambre (piston bloqué ; circuit hydraulique correspondant purgé) ;
- ♦ des passages étanches à presse-étoupe ont été pratiqués dans l'embase supérieure de l'enceinte pour permettre la sortie des câbles provenant des capteurs.

L'essai a comporté sept cycles de variation de la pression appliquée dans l'enceinte dans le domaine 0 – 220 kPa, chacun étant mené à une température différente comprise dans le domaine [14,7 - 39,6° C].

Pour chaque niveau de la pression hydrostatique appliquée (tous les 10 kPa indiqués par le capteur Schaevitz), les signaux de sortie de chaque capteur ainsi que la température ont été enregistrés. La température a été prise égale à la moyenne des valeurs indiquées par les deux capteurs Slope Indicator.

La méthodologie d'essai ne prévoit pas de précautions spéciales permettant d'assurer que la température soit stationnaire durant chaque cycle.

L'enceinte a été remplie d'eau chaude à une température d'environ 40°C et les cycles d'essai se sont succédés au fur et à mesure que la température baissait dans l'enceinte.

L'inertie thermique importante afférente au volume d'eau dans l'enceinte (environ 250 l) et le déroulement rapide des séquences de mesure ont permis de limiter la baisse de température durant chaque cycle à moins de 1,5 °C.

L'utilisation d'un capteur de référence peu sensible à la variation de température (dérive thermique du zéro du capteur Schaevitz limitée à 0,08 kPa/°C - valeur indiquée par son fabricant), par ailleurs installé à l'extérieur de l'enceinte d'essai pour qu'il ne soit pas directement exposé aux variations de température, a permis de maîtriser la pression appliquée dans l'enceinte à chaque température d'essai.

Le dernier cycle a été réalisé après la descente de la température dans l'enceinte à une valeur stationnaire.

3.5.2 Résultats de l'essai hydrostatique

Les résultats de l'essai hydrostatique des capteurs ont été exprimés dans un système de coordonnées [pression appliquée sur la surface active du capteur, signal de sortie délivré par le capteur] par deux courbes, une première pour la montée de la pression appliquée et la seconde pour la descente de pression. La valeur moyenne des températures mesurées dans chaque demi-cycle par les deux capteurs Slope Indicator a été considérée comme représentative pour chaque courbe d'essai.

Pour les capteurs Kyowa et les capteurs prototypes de CECP d'Angers, on a procédé à une étude de régression linéaire pour caractériser les courbes obtenues pour chaque demi-cycle d'essai. Pour chacun de ces capteurs ont été ainsi obtenues sept paires de droites de conformité dont les pentes correspondent à la sensibilité des capteurs relative à la température représentative de chaque demi-cycle d'essai.

Cette procédure de dépouillement a permis de limiter l'influence de la sensibilité thermique des capteurs sur l'incertitude de mesure. La baisse de température enregistrée dans chaque demi-cycle a été inférieure à 0,8°C et donc l'erreur systématique induite par cette variation de température a été réduite.

Pour le dépouillement des mesures effectuées par les capteurs Slope Indicator, on a appliqué la relation (3.16) fournie par leur fabricant. De cette manière, on a pu obtenir

les valeurs des pressions mesurées en tenant compte de la correction due à la variation de température et on a pu conduire l'analyse en comparant directement la pression mesurée par les capteurs à la pression appliquée sur leur surface active.

3.5.2.1 Qualification des capteurs à une température stationnaire

Dans un premier temps, la réponse des capteurs en milieu hydrostatique a été interprétée séparément pour chaque demi-cycle d'essai dans des conditions de température et de pression atmosphérique qui ont été supposées stationnaires.

Le Tableau 3-5 compare les valeurs de la sensibilité des capteurs correspondant aux deux températures extrêmes (14,7°C et 39,6°C) obtenues par le dépouillement des résultats de l'essai hydrostatique aux valeurs de la sensibilité des capteurs indiquées dans les feuilles d'étalonnage fournies par les fabricants (obtenues à une température de l'ordre de 20 °C).

Les valeurs de la sensibilité des capteurs obtenues pour les températures d'essai intermédiaires ont été trouvées comprises entre les valeurs de la sensibilité afférentes aux températures extrêmes.

Il a été ainsi possible de caractériser la reproductibilité de la sensibilité des capteurs en milieu hydrostatique en conditions de température stationnaire mais différente de celle de leur étalonnage par l'écart entre la sensibilité déterminée par le fabricant et les valeurs de la sensibilité déterminées lors de l'essai hydrostatique. Les valeurs maximales de cet écart pour les capteurs prototypes du CECF d'Angers et Kyowa, présentées dans le Tableau 3-5, sont inférieures à 2% de la valeur de la sensibilité indiquée par leur fabricant. Elles ont été considérées comme satisfaisantes compte tenu des conditions spécifiques de l'essai hydrostatique (température non stationnaire, caractéristiques métrologiques du capteur de référence et de la chaîne de mesure différentes de celles utilisées pour l'étalonnage des capteurs, etc.).

Pour ce qui concerne la reproductibilité de la sensibilité des capteurs prototypes d'Angers, il convient de préciser qu'on n'a pas pu réaliser, lors de l'essai hydrostatique, l'acquisition de leur signal de sortie en intensité de courant électrique.

Une résistance électrique de précision additionnelle a été utilisée pour transformer le signal de sortie en tension permettant son acquisition, ce qui introduit une source d'erreur supplémentaire.

Tableau 3-5 : Vérification de la sensibilité des capteurs indiquée par leurs fabricants

Capteur	Etalonnage du fabricant		Résultats de l'essai hydrostatique			
	Température d'essai (°C)	Sensibilité (S)	Sensibilité (S^{EH})		Ecart maximal relatif (%) $ S-S^{EH} /S$	Dérive thermique de sensibilité*
			T=39,6°C	T=14,7°C		
P7569	20	0,06513 mA/kPa	0,06389	0,06438	1,90%	-0,031 (%/°C)
P7571	20	0,06453 mA/kPa	0,06366	0,06401	1,35%	-0,022 (%/°C)
5KC	21	28,329 [μ V/V]/[kgf/cm ²]	28,701	28,207	1,31%	0,069 (%/°C)
10KC	20	65,359 [μ V/V]/[kgf/cm ²]	65,925	64,823	0,87%	0,067 (%/°C)
K ₂	23	272,48 [μ V/V]/[kgf/cm ²]	275,98	272,54	1,28%	0,050 (%/°C)
K ₅	23	255,10 [μ V/V]/[kgf/cm ²]	256,93	253,24	0,73%	0,058 (%/°C)
SI ₁	22,4	-** Hz/kPa	-**	-**	-**	-**
SI ₂	20,7	-** Hz/kPa	-**	-**	-**	-**

* - estimation relative à la sensibilité indiquée par le fabricant entre les deux températures extrêmes de l'essai.

** - la loi de conformité des capteurs SI est quadratique ; leur sensibilité est variable suivant la pression appliquée.

Par ailleurs, il faut préciser que la dérive thermique du signal de sortie des capteurs prototypes d'Angers a été trouvée sensiblement plus élevée que celles des autres capteurs (voir 3.5.2.2) ; pour une baisse de température au cours d'un demi-cycle de l'ordre de 0,8°C, cette dérive introduit une erreur de mesure de l'ordre de 0,5 kPa, qui n'a pas été corrigée (température considérée comme constante dans un demi-cycle).

La qualification des résultats de l'essai hydrostatique des capteurs Slope Indicator a été réalisée en comparant l'écart entre la pression mesurée p_{mes} et la pression appliquée dans l'enceinte p_{apl} à l'incertitude de mesure indiquée par leur fabricant. Ainsi, cet écart a toujours été trouvé inférieur à 1,9 kPa pour le capteur SI₁ et inférieur à 2,2 kPa pour le capteur SI₂, c'est-à-dire sensiblement inférieur à leur incertitude de mesure globale indiquée par le fabricant (0,5% de leur étendue de mesure soit 3,5 kPa).

Les figures 3-8 et 3-9 présentent les sept droites de conformité obtenues pour les capteurs prototype P7569 et P7571 pour les sept demi-cycles de montée de la pression appliquée ainsi que l'estimation de leur sensibilité pour ces demi-cycles.

Les droites de conformité obtenues pour les demi-cycles en descente de la pression

appliquée ont été trouvées très légèrement décalées du fait d'une température très légèrement différente et elles n'ont pas été représentées pour des raisons de lisibilité de la représentation graphique.

Pour le dernier cycle, qui s'est déroulé à une température stationnaire, les deux courbes d'essai obtenues pour les deux demi-cycles sont quasiment superposées, indiquant une hystérésis non perceptible (négligeable).

3.5.2.2 Qualification thermique des capteurs

Dans un deuxième temps, l'essai hydrostatique a permis de caractériser la sensibilité thermique des mesures de pression dans un domaine de températures compris entre 14 et 40 °C, considéré comme représentatif pour le domaine de service des capteurs de pressions totales.

Cette sensibilité thermique a été caractérisée par le biais de deux paramètres qui ont été estimés à partir des résultats de l'essai hydrostatique :

- ♦ dérive thermique de la sensibilité ;
- ♦ dérive thermique du signal de sortie sous une pression appliquée invariable.

Le Tableau 3-5 présente l'estimation de la dérive thermique de sensibilité des capteurs entre les deux valeurs extrêmes de la température d'essai.

Pour les capteurs prototypes du CECP d'Angers, la dérive thermique de sensibilité évaluée par l'essai hydrostatique satisfait largement les prescriptions du cahier de charges (0,05% /°C). Les droites de conformité des capteurs prototypes du CECP d'Angers représentées sur les figures 3-8 et 3-9 sont quasiment parallèles.

D'une façon générale, cette dérive thermique de sensibilité est inférieure à 0,7%/°C pour l'ensemble des capteurs testés, montrant que la pente des courbes de conformité est très peu affectée par la variation de température.

pression (kPa)	Intensité du courant électrique de sortie du capteur P7569 (mA)						
	T=14,7°C	T=21,8°C	T=22,7°C	T=24,4°C	T=31,5°C	T=34,3°C	T=39,6°C
0	6,399	6,852	6,891	7,000	7,368	7,582	7,786
20	7,686	8,138	8,178	8,284	8,650	8,864	9,063
40	8,974	9,425	9,464	9,567	9,933	10,147	10,341
60	10,261	10,712	10,751	10,851	11,215	11,429	11,619
80	11,549	11,998	12,037	12,134	12,498	12,711	12,897
100	12,837	13,285	13,324	13,418	13,780	13,994	14,174
120	14,124	14,572	14,610	14,702	15,063	15,276	15,452
140	15,412	15,858	15,897	15,985	16,345	16,558	16,730
160	16,700	17,145	17,183	17,269	17,628	17,841	18,007
180	17,987	18,431	18,469	18,552	18,910	19,123	19,285
200	19,275	19,718	19,756	19,836	20,193	20,405	20,563
220	20,562	21,005	21,042	21,119	21,475	21,688	21,841
S=tgα (mA/kPa)	0,06438	0,06433	0,06432	0,06418	0,06412	0,06412	0,06389

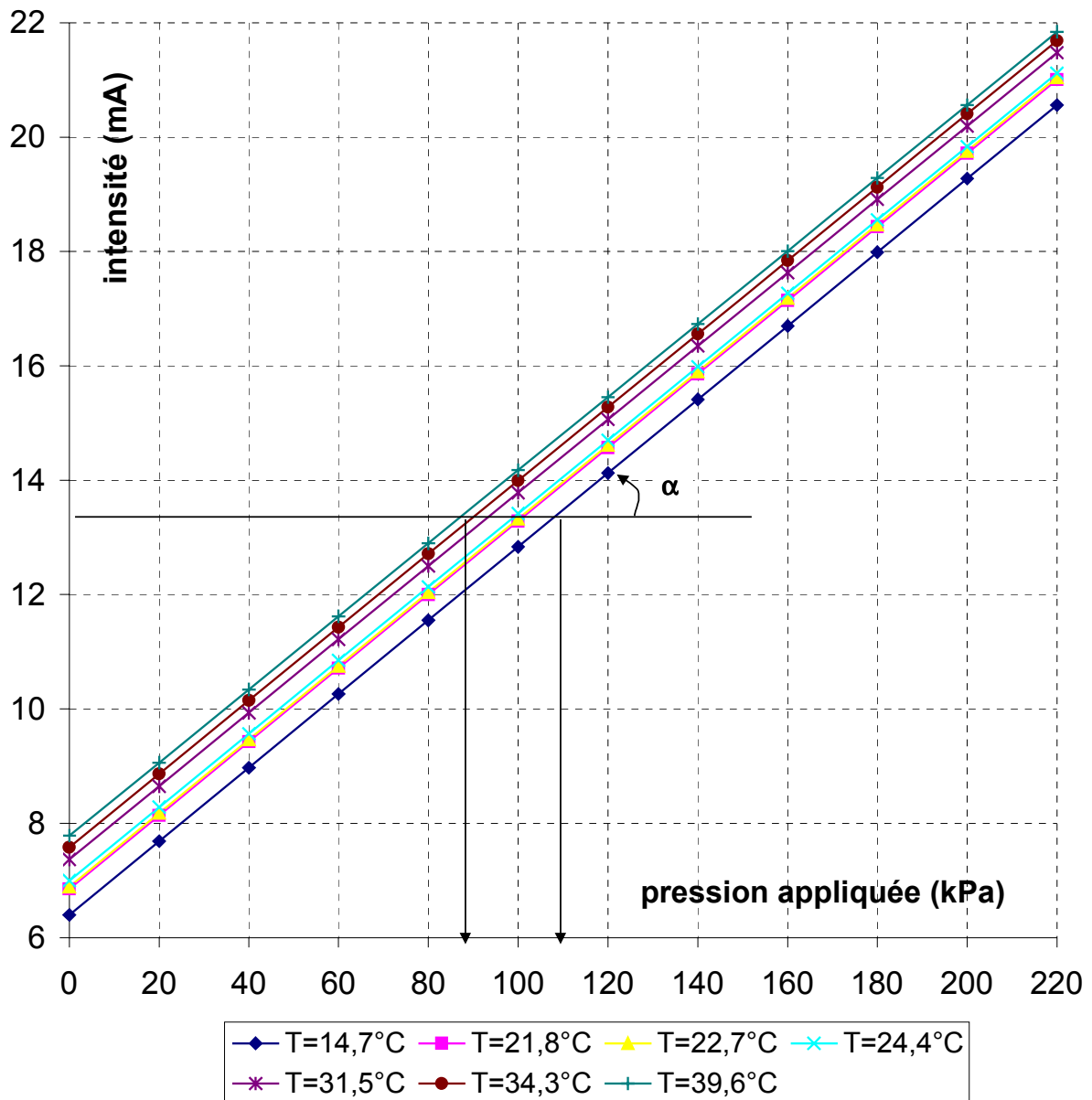


Fig. 3-8 : Résultats de l'essai hydrostatique du capteur P7569

pression p(kPa)	Intensité du courant électrique de sortie du capteur P7571 (mA)						
	T=14,7°C	T=21,8°C	T=22,7°C	T=24,4°C	T=31,5°C	T=34,3°C	T=39,6°C
0	6,774	7,129	7,158	7,233	7,582	7,737	7,905
20	8,055	8,408	8,437	8,510	8,858	9,014	9,178
40	9,335	9,687	9,716	9,787	10,134	10,291	10,452
60	10,615	10,967	10,995	11,064	11,410	11,568	11,725
80	11,895	12,246	12,274	12,340	12,686	12,845	12,998
100	13,176	13,525	13,553	13,617	13,962	14,122	14,271
120	14,456	14,805	14,832	14,894	15,238	15,398	15,544
140	15,736	16,084	16,110	16,171	16,514	16,675	16,817
160	17,016	17,363	17,389	17,448	17,790	17,952	18,090
180	18,297	18,643	18,668	18,725	19,066	19,229	19,363
200	19,577	19,922	19,947	20,001	20,342	20,506	20,636
220	20,857	21,201	21,226	21,278	21,618	21,782	21,910
S=tgα (mA/kPa)	0,06401	0,06397	0,06394	0,06384	0,06380	0,06384	0,06366

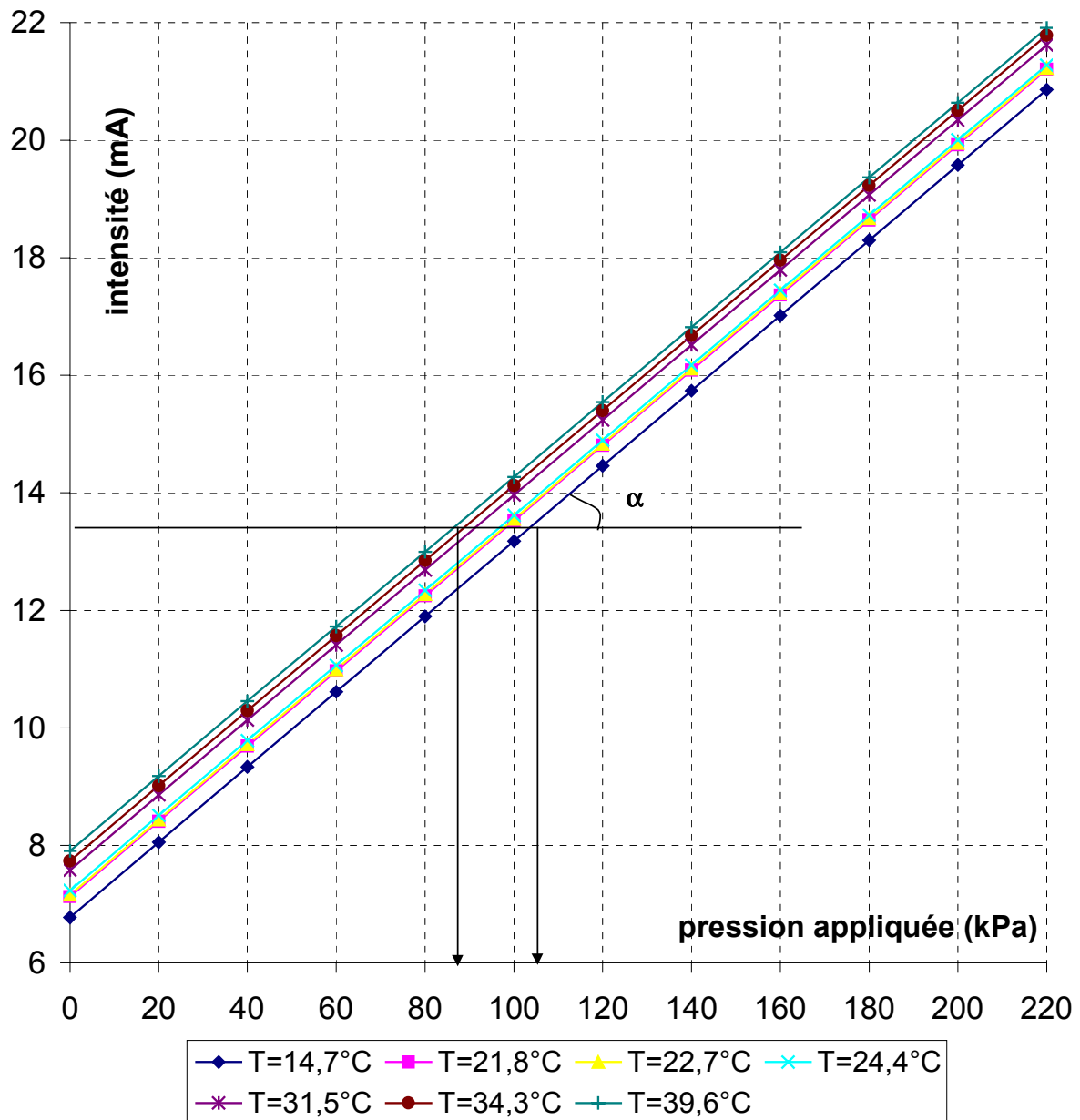


Fig. 3-9 : Résultats de l'essai hydrostatique du capteur P7571

Pour l'exploitation pratique des mesures, il est ainsi possible de considérer la dérive thermique de sensibilité comme négligeable.

Le Tableau 3-6 présente, pour l'ensemble des capteurs testés, la dérive thermique de leur signal de sortie estimée entre les deux températures d'essai extrêmes (14,7 et 49,6 °C) pour une pression appliquée nulle (dérive thermique du zéro) et pour une pression appliquée de 200 kPa, ainsi que sa traduction en dérive thermique de la pression mesurée par le biais de la loi de conformité des capteurs.

Pour les capteurs prototypes du CECP d'Angers et Kyowa, la dérive thermique de la pression mesurée est obtenue par la multiplication de la dérive thermique du signal de sortie délivré par les capteurs par l'inverse de la sensibilité des capteurs.

Capteur	Dérive thermique				
	du signal de sortie		de la pression mesurée		
	pour une pression appliquée		pour une pression appliquée		C _T (valeur moyenne)
	p _{apl} =0 kPa	p _{apl} =200 kPa	p _{apl} =0 kPa	p _{apl} =200 kPa	
		(kPa/°C)	(kPa/°C)	(kPa/°C)	
P7569	0,053 mA/°C	0,052 mA/°C	0,814	0,799	0,806
P7571	0,042 mA/°C	0,043 mA/°C	0,655	0,665	0,660
5KC	-0,080 (μV/V)/°C	-0,080 (μV/V)/°C	-0,028	-0,028	-0,028
10KC	-0,161 (μV/V)/°C	-0,171 (μV/V)/°C	-0,024	-0,026	-0,025
K ₂	-1,888 (μV/V)/°C	-1,245 (μV/V)/°C	-0,068	-0,045	-0,056
K ₅	-4,859 (μV/V)/°C	-2,932 (μV/V)/°C	-0,187	-0,113	-0,150
SI ₁ *	- Hz/°C	- Hz/°C	-0,023	-0,013	-0,018
SI ₂ *	- Hz/°C	- Hz/°C	0,018	0,034	0,026

* - les pressions mesurées sont calculées en appliquant la formule (3.16) incluant la correction de l'erreur due à la variation de température

Tableau 3-6 : Dérive thermique des mesures de pression

Pour les capteurs Slope Indicator, dont la loi de conformité n'est pas linéaire, le Tableau 3-6 présente directement la dérive thermique « résiduelle » de la pression mesurée (pression mesurée obtenue avec la relation (3.16) incluant la correction de la dérive thermique indiquée par leurs fabricants).

Les deux valeurs ainsi obtenues, correspondant à une dérive de l'ordre de 0,6 kPa pour

une variation de température de 25°C, sont sensiblement plus réduites que leur incertitude globale de mesure (3,5 kPa) et confirment la reproductibilité des résultats de l'étalonnage fournis par Slope Indicator et donc aussi la pertinence de l'essai réalisé.

La dérive thermique des pressions mesurées est trouvée satisfaisante pour l'ensemble des capteurs, à l'exception des deux capteurs prototypes du CECP d'Angers. Pour ces derniers, elle dépasse d'environ 4 fois les prescriptions du cahier des charges pour le capteur P7569 et d'environ 3,2 fois pour le capteur P7571.

La représentation des droites de conformité des capteurs prototype du CECP d'Angers P7569 et P7571 sur les figures 3-8 et 3-9 permet d'illustrer cet effet de la variation thermique sur les mesures des pressions. Ainsi, si l'on suppose que le zéro des capteurs a été pris à la température de 14,7°C et la mesure courante est prise à une température de 39,6°C, l'erreur induite dans la valeur de la pression mesurée est de l'ordre de 20 kPa pour le capteur P7569 et de l'ordre de 16 kPa pour le capteur P7571.

Etant donnés les résultats de la qualification thermique des capteurs de pressions totales, on propose de caractériser leur sensibilité thermique par la moyenne des deux valeurs de dérive thermique de la pression mesurée C_T obtenues pour une pression appliquée de 0 kPa et de 200 kPa et de procéder, le cas échéant, à la correction de l'erreur systématique due à la variation de température en appliquant une formule similaire à celle proposée par Slope Indicator (3.15).

Pour les capteurs dont la réponse est caractérisée par une loi de conformité linéaire (capteurs prototype et capteurs Kyowa), la pression appliquée sur leur surface active au moment t où ils délivrent un signal de sortie $G(t)$ sera calculée avec la relation :

$$p(t)=[G(t)-G(t_0)]/S -[p_{atm}(t)-p_{atm}(t_0)]-C_T[T(t) - T(t_0)] \quad (3.16)$$

où :

C_T - désigne la dérive thermique de la pression mesurée indiquée dans le Tableau 3-6 ;

$T(t)-T(t_0)$ - désigne la variation de température entre la lecture du zéro (au moment t_0) et la mesure courante au moment t ;

$G(t)-G(t_0)$ - désigne la variation du signal de sortie des capteurs entre la mesure courante et la mesure initiale (le zéro) ;

S - désigne la sensibilité des capteurs déduite de leur étalonnage.

Les résultats de l'essai hydrostatique (dérive thermique du zéro et dérive thermique de sensibilité) sont bien en concordance avec les résultats obtenus par Weiler et Kulhawy (Fig. 1-23) pour un capteur à membrane.

La sensibilité thermique élevée des capteurs prototypes a trouvé son explication dans la dilatation thermique différentielle entre l'huile de remplissage et le coussin de pression. On note ainsi que l'huile hydraulique AK 100 utilisée présente un coefficient de dilatation thermique volumique de $94.10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{cm}^3.\text{°C})$, c'est-à-dire environ 26 fois plus élevé que le coefficient de dilatation thermique volumique de l'acier, égal à $3,6.10^{-5} \text{ cm}^3/\text{cm}^3\text{°C}$.

Par ailleurs, on note que la diminution du degré d'encastrement des deux plaques du coussin par la création de rainures n'a eu qu'un effet limité sur la réduction de la sensibilité thermique.

Ces résultats ont conduit le CECP d'Angers à procéder à certaines modifications lors de la conception des prototypes des capteurs fabriqués dans la deuxième et dans la troisième séries de fabrication :

- ♦ l'épaisseur des surfaces actives des capteurs a été réduite de 1,5 mm à 1 mm ;
- ♦ la précontrainte dans l'huile hydraulique a été réduite de 50 kPa jusqu'à environ 20 kPa afin de diminuer au maximum le volume de l'huile de remplissage.

La dérive thermique du zéro des capteurs prototypes de la troisième série de fabrication²⁰ a été qualifiée par le CECP d'Angers pour une température comprise entre 0 et 40°C, permettant d'obtenir les résultats suivants :

- ♦ 0,133 kPa/°C pour le capteur P7501 ;
- ♦ 0,023 kPa/°C pour le capteur P7507 ;

²⁰ Lebrun, 2001 (qualification thermique réalisée au moment de la rédaction de ce mémoire).

- ♦ 0,016 kPa/°C pour le capteur P7509.

Ces résultats satisfont les prescriptions du cahier des charges (0,1% EM/°C ou 0,2 kPa/°C) montrant une diminution importante de la sensibilité thermique des capteurs prototypes d'Angers.

3.6 Mesures des pressions totales en milieu pulvérulent homogène reconstitué

L'expérimentation des capteurs des pressions totales en milieu pulvérulent a fait appel à deux outils d'analyse expérimentale permettant de transmettre des champs de contraintes contrôlables au sein d'échantillons de sable reconstitués :

- ♦ la centrifugeuse du LCPC à Nantes ;
- ♦ la chambre triaxiale du CERMES (ENPC-LCPC).

Les essais réalisés portent sur la mesure de la pression transmise à l'intérieur ou à l'interface d'échantillons homogènes de sable de Fontainebleau. Leur description ainsi que les résultats expérimentaux obtenus sont présentés ci-après.

3.6.1 Les chambres d'essai et la prévision des contraintes appliquées

3.6.1.1 Centrifugeuse du LCPC

a) Généralités

Au cours des dernières décennies, les expérimentations faisant appel à des modèles réduits centrifugés ont connu un développement particulièrement remarquable dans le domaine de la géotechnique.

Ce développement a été nécessaire à cause de la forte dépendance du comportement du sol, et en particulier de sa déformabilité, de l'état de contrainte auquel il est soumis. Le comportement des modèles réduits traditionnels, au sein desquels les contraintes

sont faibles, n'est donc pas représentatif du comportement des ouvrages réels (ouvrages prototypes).

La centrifugation des modèles réduits, qui établit l'intensité des contraintes au niveau qui existe dans les ouvrages prototype, permet d'assurer que le comportement du matériau des modèles sera, sous cet aspect, voisin de celui qui est en jeu dans l'ouvrage réel.

L'égalité des contraintes entre le modèle et le prototype impose que, si l'échelle du modèle réduit par rapport au prototype est $1/n$, le facteur déterminant l'état des contraintes de la maquette soit multiplié par n . Ainsi, la centrifugation doit permettre d'appliquer au modèle une accélération égale $a_c = ng$ pour rétablir l'intensité des contraintes dues aux forces de volume dont l'origine est le pesantier.

Les forces d'inertie induites par la centrifugation agissent alors au niveau de chaque particule du modèle d'une façon similaire à l'intensité de la pesantier (l'accélération gravitationnelle) g . On observe que, pour obtenir une accélération centrifuge quasi-uniforme, comme dans le cas du champ gravitationnel terrestre, les dimensions du modèle doivent être relativement petites par rapport au rayon de rotation de son centre de gravité.

Le LCPC a été l'un des premiers laboratoires de recherche à s'équiper d'une centrifugeuse pour effectuer des études expérimentales sur modèles réduits (Fig. 3-10).

Depuis 1985 cette installation a permis d'étudier le comportement mécanique de nombreuses catégories d'ouvrages géotechniques : fondations superficielles et profondes, ancrages de plates-formes marines, murs cloués, talus, élargissements des remblais, etc., sur des sols pulvérulents ou cohérents (Garnier et al., 1999 ; Corté et Garnier, 1993).

La centrifugeuse du LCPC a été utilisée aussi pour la qualification des mesures de pressions dans les massifs de sable (Boulebnane et Lareal, 1994 ; Garnier et al. 1998).

Ses principales caractéristiques (décrites par Corté et Garnier, 1986) sont les suivantes :

- ♦ distance de l'axe de rotation à la plate-forme de la nacelle en rotation $R_0=5,50$ m ;
- ♦ accélération centrifuge maximale à une distance de 5 m de l'axe de rotation $a_{MAX}=200g$;
- ♦ masse maximale du modèle pour une accélération centrifuge appliquée de 200g, $m(a_{MAX})=500$ kg ;
- ♦ masse maximale du modèle embarqué pour une accélération centrifuge appliquée inférieure ou égale à 100g, $m_{MAX}=2000$ kg ;
- ♦ modèle reconstitué dans des conteneurs à parois rigides de section circulaire (diamètre intérieur $D=0,90$ m et hauteur utile modulable $h=0,16$ m ; $h=0,2$ m ; $h=0,36$ m, $h=0,70$ m, etc.) ou rectangulaire (1,20 m x 0,80 m x 0,36 m) ;
- ♦ fabrication des échantillons d'essai (reconstitués) réalisée par pluviation à partir d'une trémie mobile dans le cas des sables et par malaxage d'une boue et consolidation dans un bâti de consolidation dans le cas des argiles.



a)

b)

Fig. 3-10 : Centrifugeuse du LCPC au repos ; la nacelle est équipée d'un conteneur cylindrique (a – vue latérale ; b – vue de derrière)

b) Prévision théorique des contraintes engendrées

Le principe de la centrifugation d'un modèle géotechnique ainsi que les principaux paramètres physiques qui gouvernent les champs de contraintes qu'elle crée sont

montrés sur la Fig. 3-11. Le modèle consiste en un matériau homogène de densité uniforme ρ_s remplissant complètement un conteneur cylindrique à paroi rigide de diamètre $D=0,90$ m et de hauteur utile $h=0,36$ m, mis en place dans la centrifugeuse du LCPC ($R_0 = 5,50$ m).

Il s'agit du modèle le plus simple qu'on puisse imaginer pour une application géotechnique. Il permet l'étude expérimentale des champs de contraintes géostatiques agissant dans un terrain mono-couche homogène en densité.

Pour cette étude, les capteurs de pressions totales ont été installés à l'intérieur (capteurs « enfouis ») et à l'interface (capteur « encastré ») du massif reconstitué afin de mesurer les contraintes normales engendrées par sa centrifugation. Pour l'analyse des résultats expérimentaux ainsi obtenus, il convient de se rapporter aux valeurs théoriques de ces contraintes.

On se réfère dans ce qui suit à l'estimation des contraintes normales $\sigma_z(z_1)$, agissant à une profondeur z_1 suivant la direction perpendiculaire au fond du conteneur, sous l'action d'une accélération $a_c(z_1)$ imposée dans l'axe du modèle à cette profondeur par sa centrifugation (Fig. 3-11).

Pour les études expérimentales sur une maquette réalisée à l'échelle $1/n$, cette accélération est définie de façon à respecter la similitude du modèle et du prototype, sous la forme $a_c(z_1) = ng$, n constituant le facteur d'échelle du modèle.

La transmission d'une telle accélération centrifuge nécessite l'asservissement de la vitesse angulaire de rotation de la nacelle ω , qui est maintenue constante pour obtenir un champ de contraintes stationnaire dans le massif centrifugé. Dans le cas d'un conteneur cylindrique de hauteur totale H (y compris l'épaisseur du fond de conteneur, soit $0,09$ m) embarqué dans la centrifugeuse du LCPC, la valeur de la vitesse angulaire est donnée par l'équation :

$$a_c(z_1) = ng = \omega^2 (R_0 - H + z_1) \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{ng}{R_0 - H + z_1}} \quad (3.17)$$

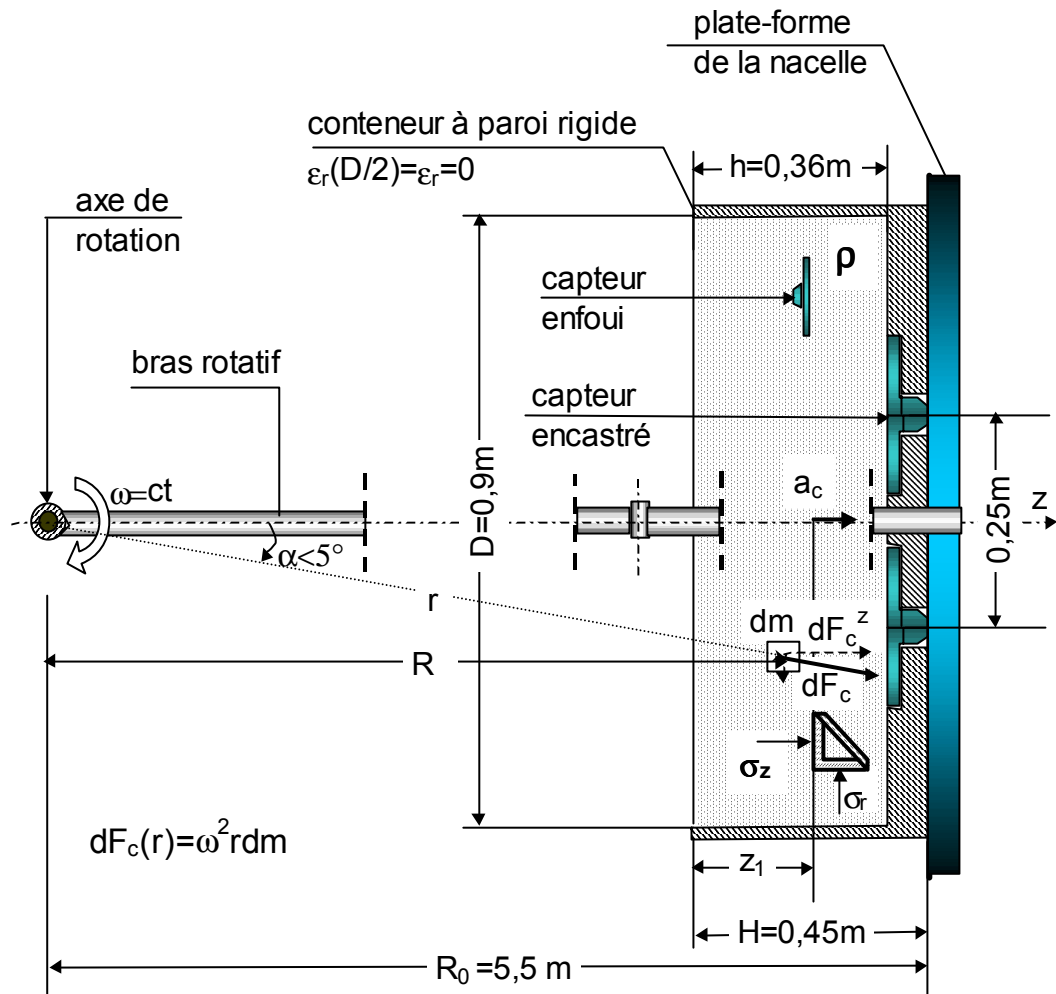


Fig. 3-11 : Principe de centrifugation d'un modèle géotechnique, illustré pour un conteneur instrumenté dans la centrifugeuse du LCPC (vue de dessus).

La centrifugation d'un échantillon de sable dans un tel conteneur induit l'apparition au centre de gravité de chaque particule d'une force d'inertie élémentaires dF_c proportionnelle à son rayon polaire par rapport au centre de rotation. Chaque force centrifuge élémentaire est orientée suivant la direction de son rayon polaire, qui fait un angle α par rapport à la direction z de l'axe du conteneur soumis à centrifugation.

Si la distance entre le centre de poids de l'échantillon et l'axe de rotation est suffisamment grande par rapport aux dimensions de l'échantillon, alors l'angle α prend des valeurs réduites pour l'ensemble des particules élémentaires, permettant d'accepter que $\cos \alpha = 1$.

C'est le cas de l'exemple étudié dans la centrifugeuse du LCPC ($R_0 = 5,5$ m) pour lequel l'angle α correspondant à l'ensemble de particules respecte la relation suivante :

$$\alpha \leq \arctg \frac{D}{2(R_0 - H)} \Leftrightarrow \alpha \leq \arctg \frac{0,9}{2(5,5 - 0,45)} = 0,0889 \text{ rad} \Rightarrow \cos \alpha \geq 0,996 \quad (3.18)$$

La composante suivant la direction z de chaque force centrifuge élémentaire peut donc être considérée comme constante à une profondeur donnée de l'échantillon. Les contraintes normales agissant à la même profondeur suivant la direction z peuvent donc aussi être considérées comme constantes si l'on admet comme négligeable l'effet induit par le frottement agissant à l'interface de l'échantillon avec la paroi latérale, rigide, du conteneur.

L'analyse de l'équilibre du volume V_z de l'échantillon compris entre la surface libre du conteneur et une coupe parallèle à la profondeur z_1 ($V_z = S z_1$) conduit alors à l'intensité des contraintes normales engendrées à la profondeur z_1 $\sigma_z(z_1)$:

$$\sigma_z(z_1) = \frac{\int_{V_z} dF_c^z}{S} = \frac{\int_{V_z} \rho_s(V_z) a_c(r) \cos \alpha dV_z}{S} \quad (3.19)$$

Compte tenu de l'hypothèse faite sur la densité du matériau (distribution uniforme, $\rho_s = \text{constant}$) et sur l'accélération centrifuge (distribution uniforme suivant la section de l'échantillon), la relation (3.19) devient :

$$\sigma_z(z_1) = \rho_s \int_{R_0-H}^{R_0-H+z_1} a_c(R) dR = \rho_s \omega^2 z_1 \frac{2R_0 - 2H + z_1}{2} = \rho_s z_1 \omega^2 \left(R_0 - H + z_1 - \frac{z_1}{2} \right) \quad (3.20)$$

En tenant compte de la valeur imposée à l'accélération centrifuge à la profondeur z_1 (relation 3.17) on obtient :

$$\sigma_z(z_1) = \rho_s z_1 n g \left[1 - \frac{z_1}{2(R_0 - H + z_1)} \right] = \gamma_s n z_1 \left[1 - \frac{z_1}{2(R_0 - H + z_1)} \right] \quad (3.21)$$

Pour une interprétation convenable des résultats expérimentaux obtenus sur une maquette, on admet en général l'approximation $z_1 \ll 2(R_0 - H + z_1)$ et alors on obtient :

$$\sigma_z(z_1) \cong \gamma_s (n z_1) \quad (3.21)$$

Cette relation montre que, par l'application d'une accélération centrifuge $a_c = ng$ à une

profondeur z_1 dans le modèle, la contrainte engendrée à la même profondeur est égale à la contrainte verticale géostatique qui existerait dans le champ gravitationnel terrestre à une profondeur n fois plus élevée que celle considérée.

Il convient d'observer que la formule simplificatrice (3.21') est affectée par une erreur systématique de justesse due à la variation de l'intensité de l'accélération centrifuge suivant la profondeur de l'échantillon.

Ainsi, à la profondeur $z_1 = 0,18\text{m}$ (profondeur d'installation des capteurs enfouis dans le conteneur cylindrique), l'erreur systématique est :

$$e_s(z_1 = 0,18\text{ m}) = \frac{0,18}{2(5,5 - 0,45 + 0,18)} = 0,0172 \quad \Leftrightarrow \quad e_s(z_1 = 0,18\text{ m}) = 1,72\% \quad (3.22)$$

tandis qu'à la profondeur de $z_1 = h = 0,36\text{m}$, profondeur d'installation des capteurs encastres, l'erreur systématique est :

$$e_s(z_1 = 0,36\text{ m}) = \frac{0,36}{2(5,5 - 0,45 + 0,36)} = 0,0333 \quad \Leftrightarrow \quad e_s(z_1 = 0,36\text{ m}) = 3,33\% \quad (3.22')$$

La prédiction des contraintes normales appliquées au niveau des capteurs a été donc réalisée, pour le besoin de la présente recherche, avec la relation (3.21). Elle nécessite la connaissance de la densité de chaque échantillon, de la profondeur d'installation de chaque capteur.

Quant à la maîtrise de l'accélération centrifuge appliquée à la profondeur z_1 , de l'échantillon, elle ne pose pas de difficultés puisqu'elle est contrôlée par la vitesse angulaire de rotation de la nacelle ou le temps nécessaire pour une rotation complète (ou encore la fréquence de rotation de la nacelle).

Enfin, il faut préciser que la relation (3.21) a été établie en négligeant l'influence de l'accélération de la pesanteur du fait de son intensité nécessairement très réduite par rapport à l'accélération centrifuge appliquée dans l'échantillon de sable au moment de l'expérimentation des pressions engendrée par centrifugation ($a_c > 10g$), en admettant donc que l'axe du conteneur tourne dans un plan horizontal.

3.6.1.2 Chambre triaxiale du CERMES

a) Généralités

Pour les mêmes raisons que celles qui ont conduit au développement des expérimentations sur modèles centrifugés en géotechnique, les grandes chambres triaxiales ont connu un développement important ces dernières décennies.

Elles permettent en effet d'appliquer des contraintes au sol proches de celles appliquées en réalité et permettent dans ces conditions d'étudier la réponse des équipements destinés aux mesures in situ (pénétromètres, sondes pressiométriques, capteurs des contraintes totales) et de problèmes d'interaction sol-structure (pieux, micropieux).

Il existe maintenant dans le monde de nombreuses installations permettant la sollicitation triaxiale d'échantillons de forme cylindrique présentant un diamètre jusqu'à environ 2 m.

La pression est transmise sur les embases circulaires de l'échantillon par le biais d'un piston rigide ou d'un coussin flexible rempli d'un fluide.

Une pression de fluide est exercée sur la surface latérale des échantillons, ces derniers étant habillés par une membrane flexible, imperméable. Un tel système de sollicitation permet d'éviter les perturbations liées aux mouvements entre le sol et la membrane (qui apparaissent dans le cas des enceintes à paroi rigide) et donc d'éliminer le frottement sol-membrane.

En général, on utilise deux sources de pressions permettant d'appliquer une pression sur la surface latérale de l'échantillon différente de celle appliquée sur ses bases afin de pouvoir réaliser des sollicitations variées. Il existe cependant des chambres d'essai alimentées par une seule source de pression. Dans ce dernier cas, il est seulement possible de réaliser des essais de type isotrope.

Le CERMES a mis au point une grande chambre d'essai triaxiale (Fig. 3-12) au début des années 1990 dans le cadre d'une collaboration avec les universités de Louisiane et de Clarkson (Etats-Unis d'Amérique).

Elle permet de fabriquer et de soumettre à l'essai triaxial des échantillons cylindriques de sable de diamètre de 0,52 m et de hauteur allant jusqu'à environ 0,70 m.

En général, la fabrication des échantillons est réalisée par pluviation. Un sable sec, de granulométrie uniforme, est utilisé à cet effet, permettant l'obtention d'une densité relativement uniforme et répétable.

Cette chambre a servi d'abord pour l'évaluation de la réponse d'un mini-pressiomètre dans un sable fin dans le cadre des travaux d'une thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Dupla, 1995).



a)

b)

Fig. 3 -12 : Chambre triaxiale du CERMES : a) - échantillon sous l'action d'une dépression ; b) vue générale pendant l'essai triaxial (cerce et couvercle montés sur l'échantillon)

Elle a ensuite été utilisée pour des essais sur des modèles des fondations profondes (micro-pieux et groupes des micro-pieux) soumis à différentes sollicitations dans un sable fin.

Les composantes de la chambre d'essai du CERMES ainsi que le schéma de principe de la transmission des actions sur la surface d'un échantillon durant l'essai triaxial sont présentés sur la Fig. 3-13.

Deux sources de pression d'air (10 bars) sont utilisées pour la mise sous pression triaxiale des échantillons expérimentés. Elles alimentent séparément deux cellules « air-eau » qui transforment les pressions d'air en pressions d'eau transmises dans deux circuits hydrauliques et appliquées respectivement sur la surface latérale de l'échantillon et au piston.

Les deux pressions de confinement transmises à l'échantillon sont contrôlées par le biais de deux capteurs de pression relative de type Schaevitz (étendue de mesure de 0 à 2000 kPa et incertitude sur la linéarité de 0,1% de leur étendue de mesure, soit 2 kPa).

Les deux capteurs Schaevitz sont installés à l'extérieur de l'enceinte d'essai, sur les circuits hydrauliques qui la relie aux deux cellules eau-air, à la même cote que celle de l'embase inférieure.

L'embase inférieure assure la transmission à l'échantillon de la résultante des pressions verticales qui agissent sous le piston, alors que la base supérieure de l'échantillon est bloquée par l'embase supérieure. Cette dernière est fixée au bâti de la chambre par le biais d'un ensemble de tiges en acier.

Le mode opératoire de fabrication et d'essai des échantillons reconstitués de sable dans la grande chambre triaxiale du CERMES a été décrit de façon exhaustive par Dupla (1995).

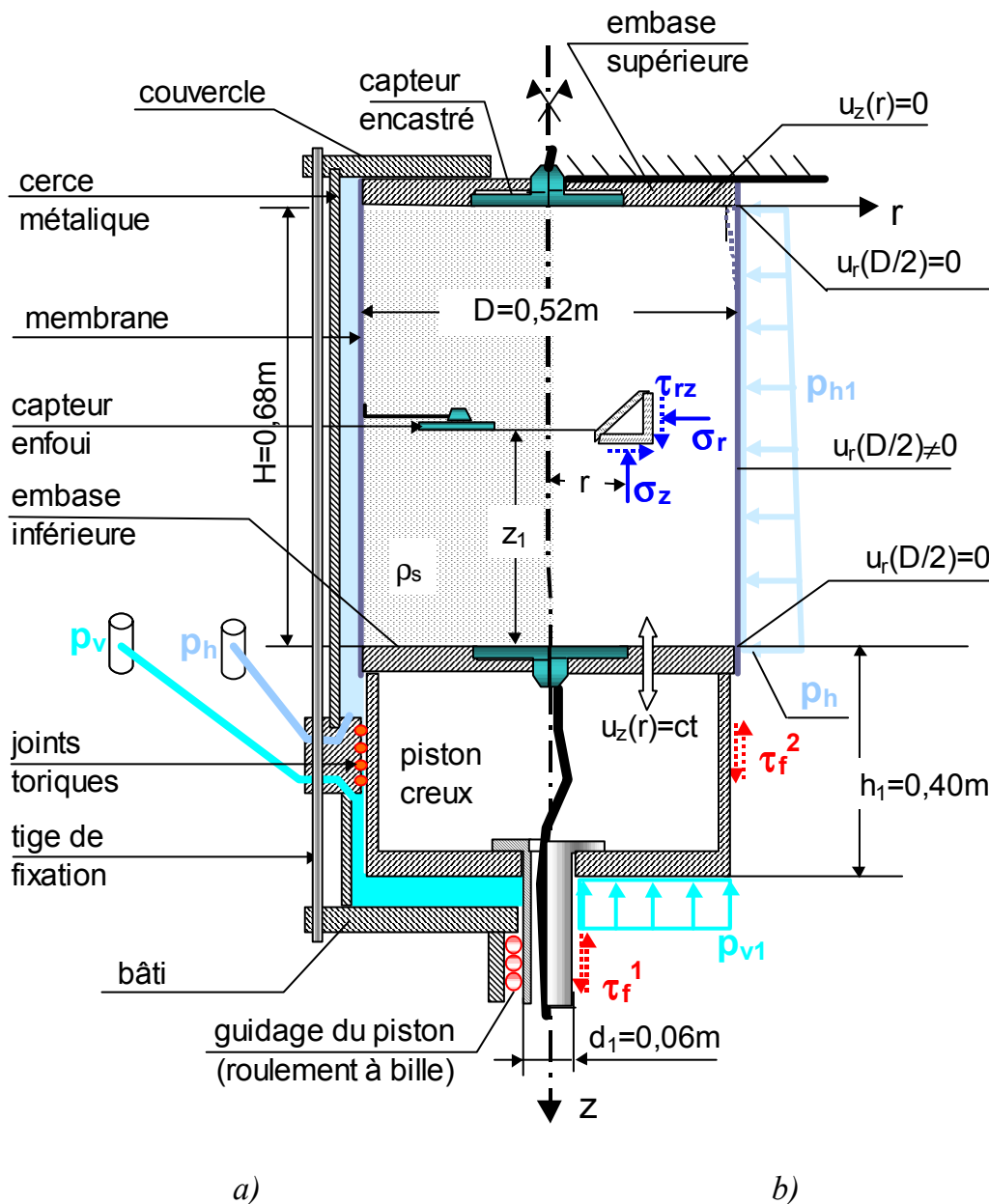


Fig. 3-13 : Principe de l'expérimentation des contraintes normales verticales dans un échantillon soumis à une sollicitation triaxiale dans la chambre d'essai du CERMES (a – coupe axiale ; b – schéma statique).

b) Prévion théorique des contraintes appliquées

Les contraintes normales verticales $\sigma_z(z_1)$ agissant dans l'échantillon de sable à une hauteur z au-dessus de l'embase inférieure de la chambre sous l'action d'une sollicitation triaxiale, définie par les deux pressions mesurées par les capteurs de pression de fluide Schaevitz, p_v et p_h , sont supposées uniformément distribuées. Leur

intensité résulte alors de l'analyse de l'équilibre local du massif de sol (G_p et S_p – désignent le poids et la surface du piston) :

$$\sigma_z(z_1) = (p_v + \gamma_w h_1) \frac{D^2 - d_1^2}{D^2} - \frac{G_p}{S_p} - \gamma_s z_1 = p_v \left(1 - \frac{d_1^2}{D^2}\right) + \gamma_w h_1 \left(1 - \frac{d_1^2}{D^2}\right) - \frac{G_p}{S_p} - \gamma_s z_1 \quad (3.23)$$

Les hypothèses prises pour établir la relation (3.23) sont les suivantes :

- ♦ le poids volumique du sable γ_s est considéré comme uniforme au sein du volume de l'échantillon ;
- ♦ les déformations radiales de l'échantillon de sable sont supposées libres sur toute la surface latérale et aux interfaces avec les deux embases ; en particulier, on a négligé l'effet causé par l'empêchement des déformations radiales à la jonction de la membrane flexible avec les embases ainsi que le frottement mobilisé par le sol sur les embases rigides ;
- ♦ le frottement (τ_f^2) entre le piston et le bâti de la chambre qui intervient au niveau du joint étanche (quatre joints toriques qui assurent le découplage des deux circuits hydrauliques), ainsi que le frottement (τ_f^1) qui intervient au niveau du guidage du piston sont considérés comme négligeables.

La relation (3.23) peut être simplifiée du fait que le produit $\gamma_w h_1 = 10 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,4 \text{ m} = 4 \text{ kPa}$ est de même ordre de grandeur que la perte de charge due au poids du piston, les deux termes étant, par ailleurs petits par rapport à la pression verticale appliquée dans la chambre. En tenant compte des caractéristiques géométriques de la chambre du CERMES, on obtient :

$$\sigma_z(z_1) = p_v \left(1 - \frac{d_1^2}{D^2}\right) - \gamma_s z_1 = \left(1 - \frac{0,063^2}{0,52^2}\right) p_v - \gamma_s z_1 = 0,985 p_v - \gamma_s z_1 \quad (3.24)$$

Pour les besoins de différentes expérimentations effectuées dans cette chambre triaxiale à une pression verticale appliquée qui est, en général, supérieure à 100 kPa, la relation (3.24) peut encore être simplifiée pour l'estimation des contraintes transmises au centre de l'échantillon, au prix de deux approximations successives :

$$\sigma_z(H/2) \cong p_v - 0,5\gamma_s H \quad \text{ou} \quad \sigma_z \cong p_v, \quad \text{si} \quad p_v > 100 \text{ kPa} \quad (3.24')$$

Dans la présente recherche, la prévision des contraintes normales appliquées au niveau des capteurs a été faite avec la relation (3.24).

On observe que si, dans le cas de la centrifugeuse, le contrôle des contraintes nécessite la connaissance du poids volumique de l'échantillon, dans le cas de la chambre triaxiale, les contraintes engendrées sont le résultat de l'action de la pression appliquée, le poids volumique du matériau jouant un rôle secondaire. Cependant, pour les deux moyens d'expérimentation sur modèle réduit, il est essentiel de disposer d'échantillons homogènes, présentant une distribution uniforme du poids volumique à travers leur volume pour espérer que les valeurs calculées des contraintes s'approchent des valeurs réelles.

3.6.2 Situations de mesure expérimentées

Deux situations de mesure des pressions transmises dans un sable de Fontainebleau ont été expérimentées dans chacune de deux installations d'essai :

- ♦ mesure des contraintes normales agissant dans la zone centrale des échantillons suivant une direction perpendiculaire, au plan du fond du conteneur centrifugé ou à celui des deux embases de la chambre d'essai triaxiale ;
- ♦ mesure des contraintes normales agissant à l'interface des échantillons et d'une paroi rigide, cette dernière étant constituée, soit par le fond du conteneur centrifugé, soit par les embases des échantillons triaxiaux.

Ces situations de mesure ont été privilégiées car elles permettent une meilleure estimation des contraintes expérimentées en appliquant les relations théoriques (3.21) et (3.23).

La première situation de mesure a été expérimentée pour les capteurs prototype du CECP d'Angers et les capteurs Kyowa BE-C au sein des deux enceintes d'essai. Pour les capteurs de l'Université de Brunel et les capteurs Kyowa BE-M, elle a été expérimentée seulement en centrifugeuse.

La deuxième situation de mesure a été expérimentée pour les capteurs Kyowa BE-F dans les deux enceintes d'essai tandis que, pour les capteurs Slope Indicator, elle a été expérimentée seulement en chambre d'essai triaxiale.

Les résultats expérimentaux obtenus sont représentatifs pour le type du sable étudié et pour les méthodes de mise en place des capteurs précisées ci-après.

3.6.2.1 Matériau d'essai

Un seul type de sable de Fontainebleau de granularité uniforme a été utilisé pour fabriquer l'ensemble des échantillons expérimentés en centrifugeuse et en chambre d'essai triaxiale.

Il s'agit d'un sable de granulométrie comprise entre 0,1 à 0,4 mm ($d_{50}=0,202$ mm), lavé (moins de 0,2%, en pourcentage massique, de particules présentant une dimension inférieure à 0,075 mm) et de granularité suffisamment uniforme pour permettre de reconstituer des échantillons présentant un poids volumique uniforme et répétable. Le coefficient d'uniformité du sable de Fontainebleau choisi est :

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \cong \frac{0,210mm}{0,140mm} = 1,5 \quad (3.25)$$

3.6.2.2 Echantillons utilisés dans les essais

Tous les échantillons de sable sec utilisés en centrifugeuse et en chambre triaxiale ont été reconstitués à un même poids volumique, uniforme, prédéfini, Les installations de fabrication d'échantillons ont donc été asservies à cet objectif :

$$\gamma_s = 15,3 \text{ kN/m}^3 \quad (3.26)$$

Il a été ainsi possible d'étudier la répétabilité et la reproductibilité des résultats expérimentaux obtenus dans les deux chambres d'essai.

Au total, huit échantillons de sable ont été préparés dans un conteneur à section rectangulaire (1,20 m x 0,80 m) de hauteur égale à 0,36 m et quatre échantillons ont été préparés dans un conteneur de section circulaire (diamètre de 0,90 m et hauteur de 0,36m) pour les expérimentations menées en centrifugeuse.

Huit échantillons de sable présentant un diamètre de 0,52 m et une hauteur égale à 0,86 m ont été préparés pour les expérimentations menées en chambre d'essai triaxial.

Les procédures de fabrication des échantillons sont décrites en ce qui suit.

a) Préparation des échantillons pour centrifugation

La fabrication des échantillons de sable a été réalisée dans une chambre spéciale par pluviation en respectant un mode opératoire prédéfini (Garnier et al., 1993).

La pluie de sable est lâchée à partir d'une trémie mobile qui se déplace au-dessus du conteneur d'essai suivant un trajet de va-et-vient permettant de couvrir toute la surface horizontale du conteneur. Une fente pratiquée sous la trémie, munie d'un commutateur permettant d'actionner son ouverture, assure un débit uniforme de chute du sable sous l'action de sa pesanteur.

La trémie se déplace automatiquement suivant une cinématique asservie (vitesse de translation et de remontée en bout de course) pour conserver une hauteur de chute constante durant le remplissage du conteneur. En cas de dérive, la hauteur de chute peut être ajustée par la commande manuelle du déplacement vertical de la trémie.

La hauteur de chute et l'ouverture de la fente sont les deux paramètres qui assurent le contrôle du poids volumique des massifs de sable reconstitués.

Pour obtenir le poids volumique désiré pour cette étude, on a réglé la hauteur de chute à 0,60 m et l'ouverture de la fente à 4 mm.

Cette méthode de mise en place du sable de Fontainebleau permet d'obtenir un poids volumique très uniforme à travers le modèle : « la variation spatiale du poids volumique est inférieure à 0,25 kN/m³ » (Garnier, 1999).

Vu son influence essentielle sur l'intensité des champs des contraintes engendrés dans les échantillons centrifugés (relation 3.21), le poids volumique de chaque échantillon est en outre contrôlé. Il est pris égal à la moyenne de deux ou quatre valeurs locales mesurées au moyen de boîtes noyées (posées sur le fond de conteneur dans la zone centrale) de volume calibré (environ 400 cm³). La mesure de densité a suivi une

procédure standardisée.

b) Préparation d'échantillons pour un essai triaxial

La fabrication des échantillons de sable a été réalisée directement sur le bâti qui sert de support pour la suite de l'essai. Un mode opératoire prédéfini a été respecté à cet effet (Dupla, 1995).

La mise en place du sable par pluviation est réalisée à l'intérieur d'un moule cylindrique à paroi rigide dont la surface intérieure est habillée, au préalable, par une membrane flexible en caoutchouc imperméable (nécessaire pour l'application de la pression d'eau sur la surface latérale de l'échantillon durant l'essai triaxial).

Le sable tombe par jets à partir d'un réservoir cylindrique, monté sur le moule dans le même axe. Le fond du réservoir, constitué par un système de deux plaques perforées (diamètres de trous de 4 ou de 8 mm) et superposées, permet son ouverture ou sa fermeture en faisant coulisser une plaque par rapport à l'autre.

Un diffuseur formé par deux tamis (maille carrée 2x2 mm) superposés et espacés de 10 cm transforme les jets de sable en une pluie homogène. Le diffuseur est entraîné en montée à vitesse imposée (par un mécanisme poulies-moteur) pour assurer une hauteur de chute constante.

Pour la fabrication de l'ensemble des échantillons expérimentés, on a utilisé la même grille coulissante pour le fond de réservoir (trous de diamètre de 8 mm) et on a réglé la hauteur de chute à 10 cm pour obtenir le poids volumique voulu.

Le démoulage de chaque massif reconstitué est réalisé après l'installation de l'embase supérieure et son raccordement étanche à la membrane flexible et après l'application d'une dépression d'environ 30 kPa à l'intérieur du massif.

Cette dépression est maintenue pendant l'installation de la cerce métallique autour de l'échantillon, pendant le remplissage d'eau de l'espace annulaire entre la cerce et la membrane et pendant le montage étanche du couvercle. Elle est réduite à zéro au fur et à mesure de la mise en pression de l'échantillon, cette dernière s'effectuant par l'intermédiaire de deux circuits hydrauliques et étant poursuivie jusqu'à un niveau de

pression de l'ordre de 20 kPa.

Chaque échantillon expérimenté a été caractérisé par son poids volumique moyen, calculé à partir de ses dimensions et de son poids pesé en fin de chaque essai.

3.6.2.3 Mise en place des capteurs à l'interface des échantillons

Pour la mise en place des capteurs à l'interface des échantillons avec les chambres d'essai on a été amené à usiner des sous-ensembles spécialement adaptés à la géométrie des capteurs (un fond de conteneur cylindrique pour les expérimentations en centrifugeuse et deux embases pour l'essai triaxial).

Cette solution d'installation des capteurs, assez coûteuse, a été retenue pour s'assurer que leur surface active est rigoureusement contenue dans le plan d'interface entre l'échantillon expérimenté et l'enceinte d'essai. Les expérimentations menées par Boulebnane et al. (1994) dans le cadre du programme de recherche « Macrogravité 92/93 » avaient mis en évidence une perturbation significative des pressions développées dans un sable à l'interface avec des plaques en acier ou en bois installées dans un conteneur centrifugé, du fait de l'effet d'inclusion.

a) Capteurs Kyowa BE-F expérimentés en centrifugeuse

Un fond pour conteneur cylindrique en acier massif (épaisseur de 90mm) a été usiné afin de loger deux capteurs Kyowa BE-F en même temps à l'interface des échantillons de sable centrifugés (Fig. 3-11). Il a été doté à cet effet de deux niches circulaires disposées de façon symétrique dans la zone centrale du fond de conteneur (distance de 0,25m entre les axes de deux niches).

Les capteurs Kyowa BE-F ont une forme adaptée pour une fixation facile à l'interface des structures avec le sol. Ils comportent un anneau extérieur rigide (assurant sa protection contre l'action des sollicitations latérales) doté de trous préfabriqués permettant un montage convenable par vissage à une structure support. Le serrage du capteur contre la structure n'induit pas de dérive du zéro des capteurs (anneau rigide).

Ces capteurs ont donc été fixés par vis à l'aide d'une bride annulaire (bague) adaptée à leur forme particulière, de telle façon que la bague et la surface active des capteurs soient contenues dans le même plan que le fond du conteneur.

b) Capteurs Kyowa BE-F expérimentés en chambre triaxiale

Une embase inférieure (Fig. 3-7) et une embase supérieure ont été spécialement fabriquées pour expérimenter en même temps les contraintes normales exercées par le sable sur les deux embases des échantillons soumis à l'essai triaxial. Une niche circulaire a été usinée au centre de chaque embase (Fig. 3-13) de telle façon que les centres des surfaces actives des deux capteurs (après leur installation) soient contenus dans le même axe que l'échantillon expérimenté.

Chaque niche a été dotée d'une rainure circulaire permettant d'installer un joint torique entre le capteur et l'embase pour permettre la mise en dépression de l'échantillon par rapport à l'atmosphère. Les capteurs sont fixés par vis sur l'embase à l'aide d'une bride annulaire similaire à celle utilisée pour le conteneur circulaire permettant d'écraser le joint torique et assurer ainsi l'isolation de l'échantillon d'essai par rapport à l'atmosphère.

c) Capteur Slope Indicator expérimenté en chambre triaxiale

Un seul capteur Slope Indicator (SI_2) a été utilisé pour la mesure des pressions exercées par le sable à l'interface supérieure des échantillons avec la chambre triaxiale. L'embase supérieure conçue pour l'installation des capteurs Kyowa BE-F a été réutilisée à cet effet.

La niche existante a été élargie et aménagée pour permettre de loger le capteur SI_2 avec sa surface active contenue dans le plan d'interface de l'embase avec l'échantillon.

Les capteurs Slope Indicator « Vibrating Wire Jack-Out », spécialement conçus pour les mesures de pression in situ à l'interface des parois moulées, ne sont pas adaptés pour une installation à l'interface d'une structure métallique pour une expérimentation en laboratoire. Ils présentent un encombrement excessif (le transducteur à corde vibrante, installé à l'extérieur du capteur, présente une longueur d'environ 0,17 m) et ils ne bénéficient pas d'un anneau extérieur permettant leur vissage contre une structure support.

La fixation étanche du capteur SI_2 sur l'embase supérieure de la chambre triaxiale a été

donc beaucoup plus difficile que celle des capteurs Kyowa. Elle a été réalisée par le biais de huit brides ponctuelles (parallépipèdes métalliques rigides 20 x 10 x 10 mm), répartis de façon uniforme à l'extérieur de la circonférence du capteur, qui ont été serrés contre l'embase.

L'installation du capteur SI₂ a été réalisée au prix d'un décalage du zéro et d'une légère dérive du zéro constatée à chaque expérimentation. Cette dérive du zéro a été provoquée, vraisemblablement, par la respiration du capteur durant l'essai triaxial, qui s'était accompagnée par un léger desserrage des vis.

Les précautions qui ont été prises pour que la surface active des capteurs (Kyowa BE-F et Slope Indicator) soit contenue dans le même plan que celui de l'interface des échantillons avec les enceintes d'essai visaient à éviter l'apparition d'un effet d'inclusion à l'intérieur de l'échantillon et donc à éviter la perturbation des champs des contraintes. On considère donc que la discrétion des capteurs d'interface est affectée seulement par l'effet d'interaction entre le sol et la surface active déformable des capteurs.

3.6.2.4 Mise en place des capteurs à l'intérieur des échantillons

La mise en place des capteurs à l'intérieur des échantillons expérimentés a été réalisée après l'interruption de la pluviation et le nivellement de la surface du sable déposé dans le conteneur à l'aide d'une règle appropriée. La surface de pose a été ainsi préparée plane et horizontale pour l'ensemble des expérimentations analysées.

Les situations de mesure étudiées correspondent à des méthodes de mise en place spécifiques pour chaque capteur expérimenté. Elles ont été reproduites par le même opérateur dans les deux chambres d'essai.

a) Capteurs d'Askegaard

La mise en place des capteurs d'Askegaard a été réalisée à l'aide du dispositif présenté sur la figure 3-5 en suivant la procédure proposée par Garnier et al. (voir chapitre 1.4.2.2.a) pour minimiser l'influence du facteur opérateur sur les résultats de mesure.

Une masse additionnelle de 0,240 kg et deux rotations excentriques ont été nécessaires pour la mise en place des capteurs.

b) Capteurs prototypes du CECP d'Angers

La mise en place des capteurs prototypes des CECP d'Angers a été réalisée manuellement par un opérateur non expérimenté, entraîné au préalable pour simuler la procédure utilisée pour la mise en place des capteurs d'Askegaard.

Il convient de préciser que le dispositif de mise en place des capteurs d'Askegaard ne pouvait pas être utilisé du fait d'une géométrie non adaptée à la forme des capteurs prototypes du CECP d'Angers.

c) Capteurs Kyowa BE-C

La mise en place des capteurs Kyowa BE-C s'est avérée difficile à cause de leur taille très réduite et de la rigidité de leur câble de sortie, dont tout mouvement entraînait un dérangement de la position des capteurs.

Ces capteurs ont été posés simplement sur la surface du sable en accordant une attention particulière pour obtenir une position stable et horizontale.

Pour la première expérimentation déroulée en centrifugeuse, les capteurs Kyowa BE-C ont été posés avec leur surface active orientée vers le fond du conteneur. Du fait des résultats de mesure non satisfaisants, ils ont été posés ensuite avec leur surface active orientée vers le haut.

Cette dernière position a permis d'obtenir des résultats expérimentaux plus proches des valeurs calculées de la pression appliquée à leur niveau en centrifugeuse.

Pour l'essai en chambre triaxiale, ces capteurs ont été posés avec leur surface active orientée vers l'embase inférieure.

d) Kyowa BE-M

Les capteurs Kyowa BE-M ont été simplement posés sur le sable avec leur surface active orientée vers le haut. Cette position a été choisie en tenant compte des résultats

expérimentaux obtenus pour les capteurs Kyowa BE-C pour les deux positions de mise en place étudiées (surface active vers le haut ou vers le bas du conteneur) et de leur même principe de fabrication.

Leur mise en place n'a posé aucun problème de stabilité de leur position du fait de leur taille et de leur poids élevés, les plus élevés parmi les capteurs installés au sein des échantillons.

3.6.3 Expérimentations en centrifugeuse

3.6.3.1 Description des expérimentations réalisées

Douze études expérimentales des contraintes normales exercées dans un sable centrifugé ont été effectuées dans la centrifugeuse du centre du Nantes du LCPC :

- ♦ huit expérimentations sur huit capteurs différents placés simultanément au sein d'un échantillon de sable reconstitué dans un conteneur rectangulaire (1,20 m x 0,80 m x 0,36 m), désignées ci-après $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3,$ et B_4 ;
- ♦ quatre expérimentations de quatre ou cinq capteurs (dont les deux Kyowa BE-F encastrés) placés simultanément dans un conteneur cylindrique (diamètre de 0,90 m et profondeur de 0,36 m), désignées ci-après $C_1, C_2, C_3,$ et C_4 .

Le Tableau 3-7 rassemble pour chacune de ces douze expérimentations quelques caractéristiques significatives :

- ♦ les poids volumiques mesurés γ_i , leur moyenne γ_m et l'écart type $\sigma[\gamma_i]$ caractérisant la population de deux ou quatre mesures individuelles de poids volumique ;
- ♦ la profondeur z_1 où l'on a appliqué l'accélération centrifuge $a_c(z_1)$ asservie à un multiple de g , le pas de variation de cette accélération entre deux mesures successives $\Delta a_c(z_1)$ et la valeur maximale de cette accélération $a_c^{\text{Max}}(z_1)$;
- ♦ les capteurs testés ainsi que leur profondeur d'installation z_i ; cette dernière correspond à la profondeur où l'on a appliqué l'accélération $a_c(z_1)$ au moins pour une partie des capteurs testés en même temps.

Dans les expérimentations A_1 , A_2 , A_3 , et A_4 , toutes les mesures de pressions ont été réalisées à la profondeur de 0,20 m. La valeur maximale de l'accélération $a_c^{\text{Max}}(z)$ a été imposée pour que la valeur prévue de la pression appliquée dans le sable à cette profondeur reste inférieure à l'étendue de mesure minimale des capteurs testés.

Dans les expérimentations B_1 , B_2 , B_3 , et B_4 on a mesuré les pressions engendrées à deux profondeurs différentes au sein des échantillons de sable centrifugés (Tableau 3-7) afin que la pression appliquée au niveau des capteurs puisse s'approcher de la limite de leur étendue de mesure, différente d'un capteur à l'autre.

Les expérimentations C_1 , C_2 , C_3 , et C_4 ont été consacrées aux mesures des pressions exercées à l'interface des échantillons de sable avec le fond du conteneur, mais elles ont permis aussi la réalisation des mesures de pression à l'intérieur des échantillons. L'accélération centrifuge $a_c^{\text{max}}(z)$ et la profondeur d'installation des capteurs à l'intérieur de l'échantillon ont été imposées selon le même critère que celui appliqué pour les expérimentations B_1 , B_2 , B_3 , et B_4 .

Une même disposition des capteurs dans un plan horizontal (Fig. 3-14a) a été utilisée pour l'ensemble d'expérimentations réalisées dans le conteneur à section rectangulaire.

Les capteurs ont été disposés dans le conteneur cylindrique suivant le schéma présenté sur la Figure 3-15a en considérant pour les capteurs enfouis, le cas échéant, une disposition à deux capteurs (contour des capteurs représenté en trait plein) ou à trois capteurs (contour des capteurs en trait pointillé).

Trois cycles de centrifugation suivant un chemin de variation de l'accélération $a_c(z_1)$ prédéfini 0 - 10g - $a_c^{\text{max}}(z_1)$ - 10g-0 ont été réalisés pour chaque expérimentation.

L'accélération centrifuge $a_c(z_1)$ a été modifiée entre 10g et $a_c^{\text{max}}(z_1)$ par pas successifs multiple de g (2g, 3g, 5g ou 10g). Trois séquences successives de mesures ont été enregistrées pour chaque capteur après chaque pas de variation de l'accélération, la vitesse angulaire de rotation de la centrifugeuse étant maintenue uniforme environ deux minutes à cet effet. Les trois séquences de mesure ont été séparées d'un intervalle de temps de l'ordre de 30 secondes.

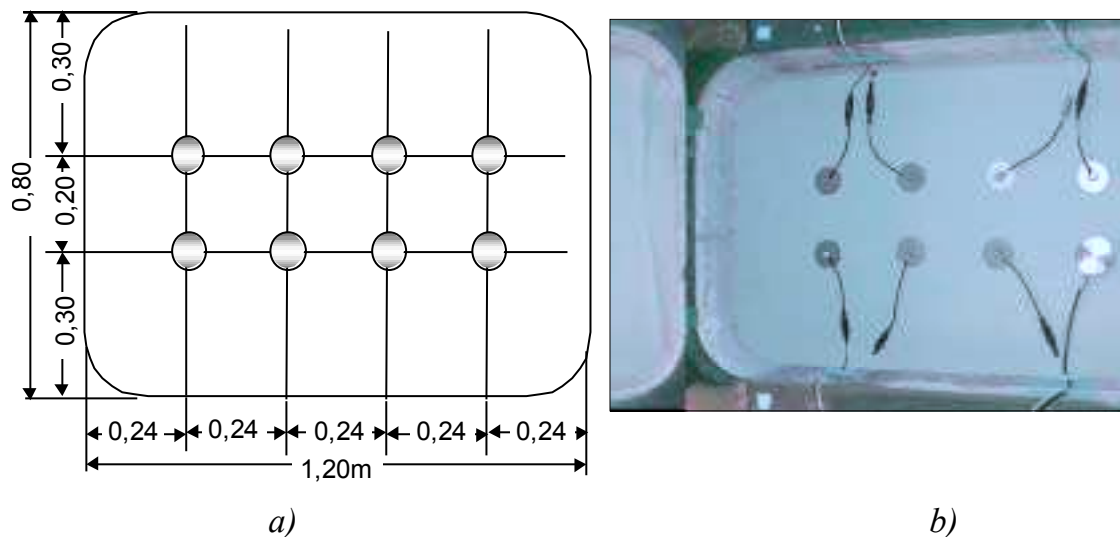


Fig. 3-14 : Disposition des capteurs dans le conteneur rectangulaire. a) Schéma de positionnement dans un plan horizontal ; b) Disposition des capteurs (P7569, P7571, P7563, P7566, P7501, P7507, P7509 et M9) pour l'expérimentation A₄

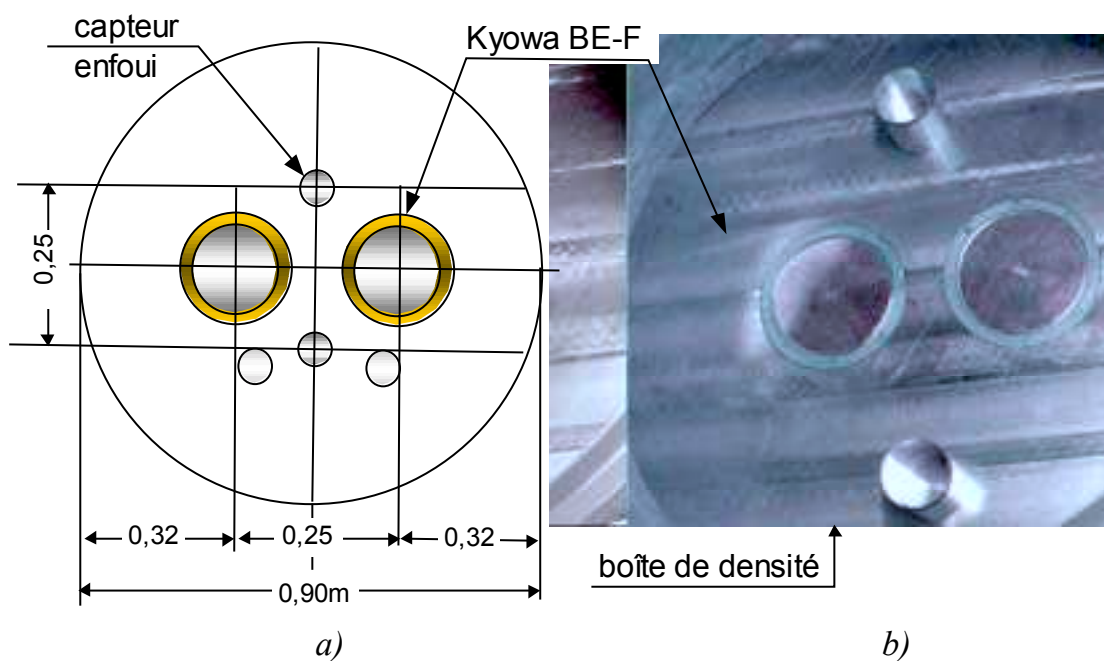


Fig. 3-15 : Disposition des capteurs dans le conteneur cylindrique. a) Schéma de positionnement dans un plan horizontal (en pointillé, la situation avec trois capteurs enfouis) ; b) Détail du fond de conteneur (dans la zone centrale contenant les deux capteurs encastrés) avant le commencement de la pluviation

On dispose ainsi pour chaque expérimentation de la variation de la réponse de chaque capteur par rapport à l'accélération centrifuge appliquée $a_c(z_1)$.

Un suivi de température dans l'échantillon de sable a été effectué seulement pour une partie des expérimentations, permettant de constater des variations de très faible ampleur (variation de température limitée à 1,5°C durant chaque expérimentation).

3.6.3.2 Exploitation des données expérimentales

La moyenne des trois valeurs du signal de sortie de chaque capteur enregistrées à chaque niveau stationnaire de l'accélération centrifuge a été considérée comme représentative pour caractériser les mesures de pression dans les échantillons expérimentés.

Les signaux délivrés par les capteurs ont été interprétés en termes de pression en suivant la méthodologie décrite dans le chapitre 3.3.1.6. L'effet de la température a été négligé du fait de sa faible variation durant chaque expérimentation.

a) Dérive du zéro des capteurs en centrifugation

Trois expérimentations complémentaires ont été ajoutées pour évaluer l'effet sur la réponse des capteurs de leur propre centrifugation. Elles étaient nécessaires pour l'interprétation des mesures effectuées dans les douze expérimentations en termes de pressions nettes exercées par le sable à la profondeur de mesure.

Les capteurs ont été simplement posés sur un lit de sable et ils ont été ensuite soumis à trois cycles de centrifugation suivant un chemin de variation de l'accélération centrifuge dans le domaine de 0 à 100g. Trois séquences de mesures ont été enregistrées pour chaque capteur tous les 5g lors de l'augmentation puis de la diminution de la vitesse angulaire de rotation de la centrifugeuse.

Les signaux délivrés par les capteurs sont le résultat de l'action des forces centrifuges sur leur propre masse. Ils permettent de caractériser la dérive de leur zéro en centrifugation, puisque la pression extérieure est nulle.

Une analyse de régression sur les résultats obtenus pour chaque capteur a mis en

évidence une variation linéaire de la pression mesurée par rapport à l'accélération centrifuge appliquée. Les coefficients de corrélation de la régression linéaire pour l'ensemble des capteurs sont compris de façon systématique dans l'intervalle de 0,98 à 1,00.

La dérive du zéro des capteurs en centrifugation δ^0 a été estimée alors comme étant égale à la pente de la droite de régression correspondant à l'ensemble des expérimentations complémentaires effectuées. Elle a été exprimée par référence à l'accélération de la pesanteur g (kPa/g).

b) Estimation expérimentale des pressions exercées dans le sable centrifugé

Les valeurs expérimentales nettes des pressions exercées par le sable ont été déduites pour chaque niveau de l'accélération centrifuge $a_c(z_1)=ng$ avec la relation suivante :

$$p_m^n[a_c(z_1) = ng] = p_m^b[a_c(z_1) = ng] - n\delta^0 \quad (3.26)$$

où $p_m^b[a_c(z_1)]$ désigne la valeur brute mesurée par les capteurs.

c) Estimation théorique des pressions exercées dans le sable centrifugé

Pour les capteurs installés à la profondeur z_1 la pression appliquée par le sol à leur niveau a été estimée avec la relation (3.21) tandis que, pour les capteurs installés à une profondeur z différente de z_1 , l'accélération centrifuge agissant dans le sable au niveau de leur surface active $a_c(z)$ à une distance R par rapport à l'axe de rotation de la centrifugeuse n'est plus un multiple entier de g :

$$a_c(z) = \frac{a_c(z_1)}{R_1} R = ng \frac{R_0 - H + z}{R_0 - H + z_1} \quad (3.27)$$

L'intensité des contraintes normales appliquées à cette profondeur a été estimée alors avec la relation (généralisation de la relation 3.21) :

$$\sigma_z(z) = \gamma_s n z \left[1 - \frac{2z - z_1}{2(R_0 - H + z_1)} \right] \quad (3.28)$$

d) Résultats expérimentaux

Pour chaque expérimentation, les mesures des pressions de chaque capteur ont été représentées par une courbe caractéristique dans un système d'axes orthogonaux par rapport à l'estimation théorique de la pression exercée par le sable à leur niveau (avec la relation 3.21 ou 3.28). La bissectrice des deux axes a été aussi représentée car elle correspond à la réponse d'un capteur idéal.

Les figures 3-16 à 3-21 présentent quelques-unes de ces représentations graphiques pour le cycle 1 (m1 –courbe en montée d'accélération et d1 – courbe en descente d'accélération) et le cycle 3 (m3 –courbe obtenue en montée et d3 – courbe obtenue en descente d'accélération).

Dans l'ensemble des expérimentations effectuées, on a pu constater que, pour une même intensité de la pression appliquée en montée ou en descente de l'accélération, la pression mesurée baisse, très légèrement, d'un cycle à l'autre. Pour cette raison on a représenté sur les figures 3-16 à 3-21 seulement les courbes obtenues pour les cycles 1 et 3, afin d'assurer une meilleure lisibilité des graphiques.

Pour chaque cycle i de chaque expérimentation, les mesures de pression ont été caractérisées pour chaque capteur par un facteur de variation de la réponse en montée d'accélération F_m^i et un facteur de variation de la réponse en descente d'accélération F_d^i entre $10g$ et $a_c^{\max}(z_1)$. Ces variations ont été définies par rapport à la variation de la pression appliquée à la profondeur de mesure :

$$F_m^i = \frac{p_m^n[a_c(z_1) = a_c^{\max}(z_1)] - p_m^n[a_c(z_1) = 10g]}{\sigma_z[z, a_c(z_1) = a_c^{\max}(z_1)] - \sigma_z[z, a_c(z_1) = 10g]} \quad (3.29)$$

et

$$F_d^i = \frac{p_m^n[a_c(z_1) = a_c^{\max}(z_1)] - p_m^n[a_c(z_1) = 10g]}{\sigma_z[z, a_c(z_1) = a_c^{\max}(z_1)] - \sigma_z[z, a_c(z_1) = 10g]} \quad (3.29')$$

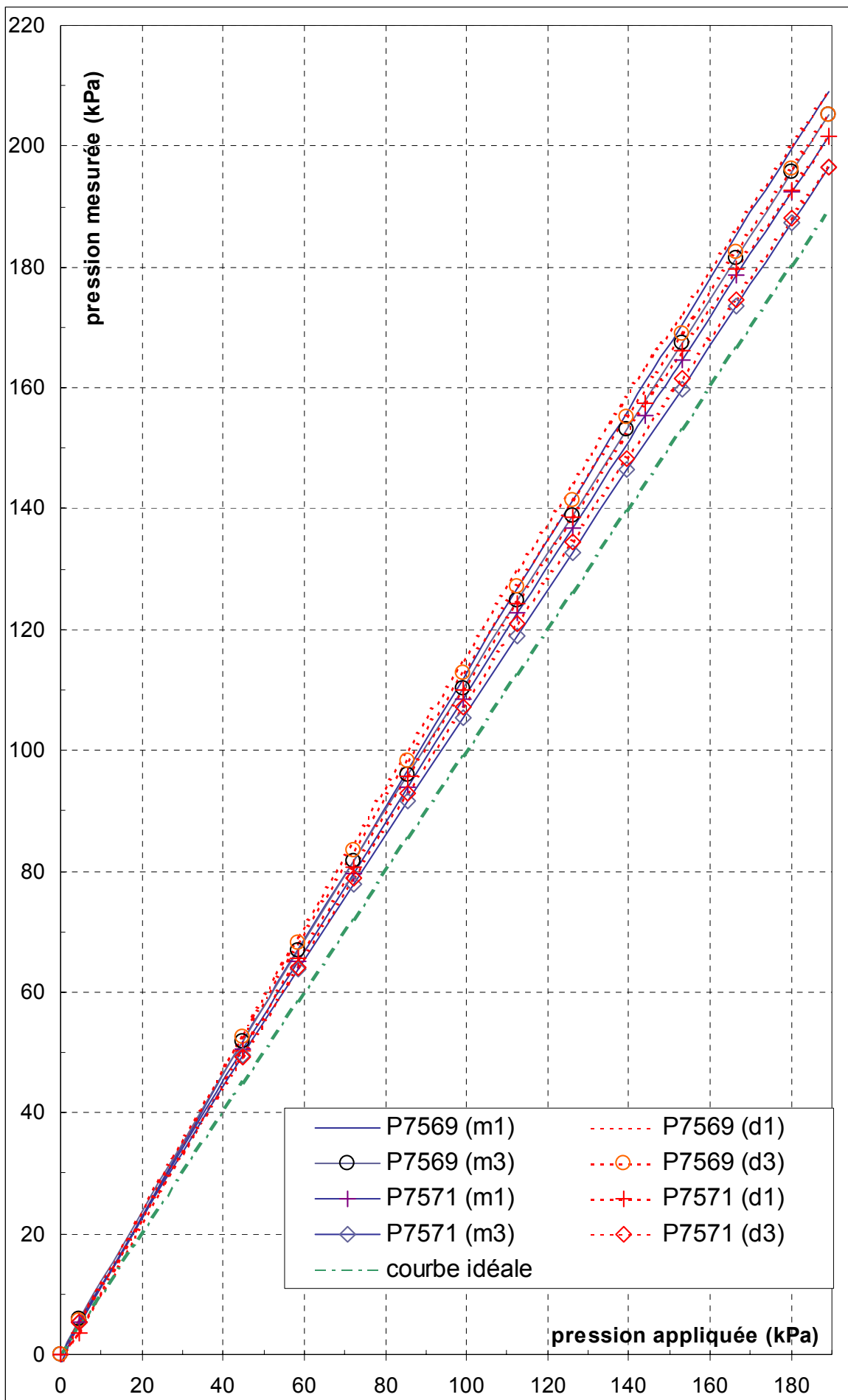


Fig. 3-16 : Résultats de l'expérience B₂ des capteurs P7569 et P7571
3-70

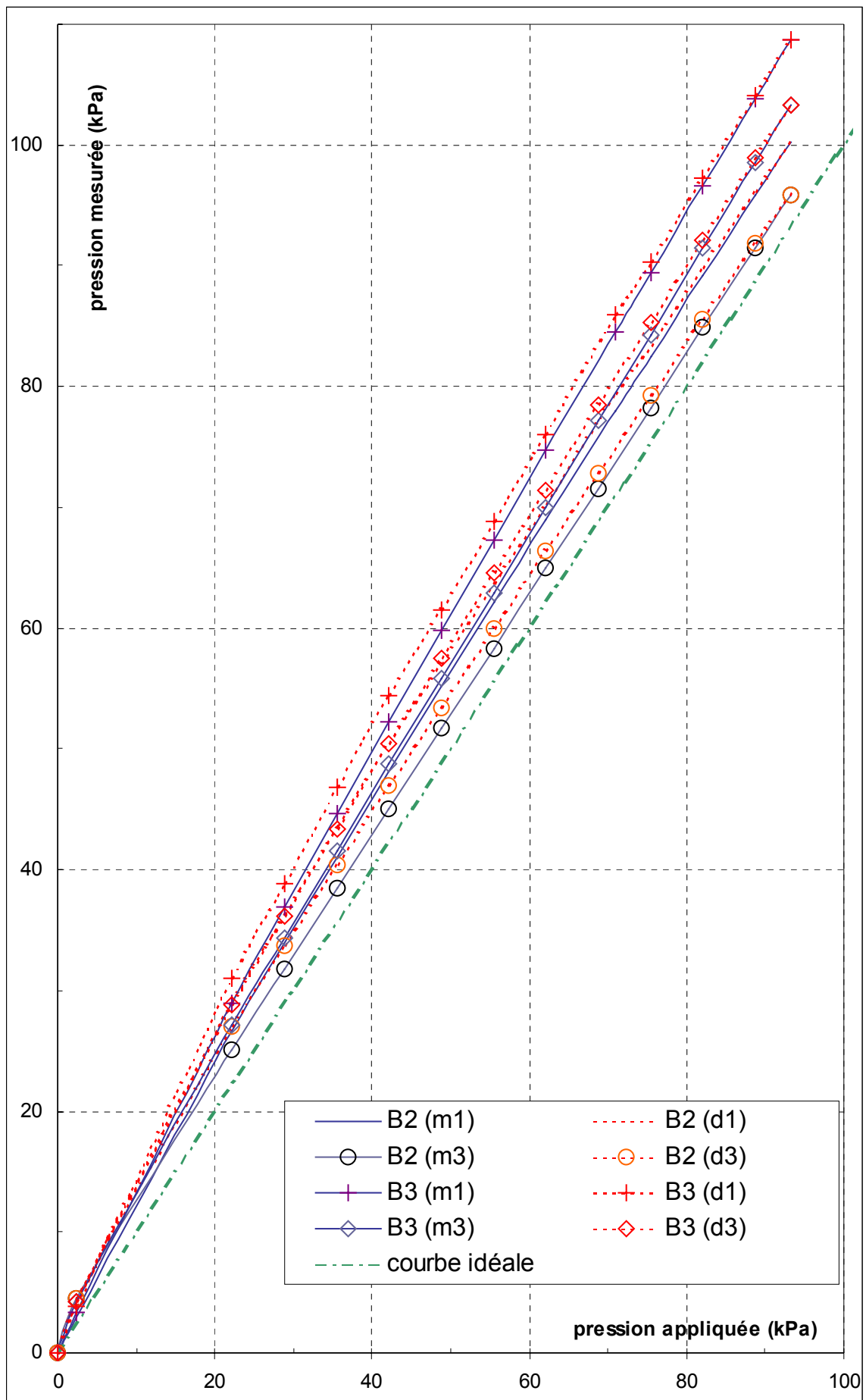


Fig.3 -17 : Résultats de l'expérimentation B_2 des capteurs B2 et B3

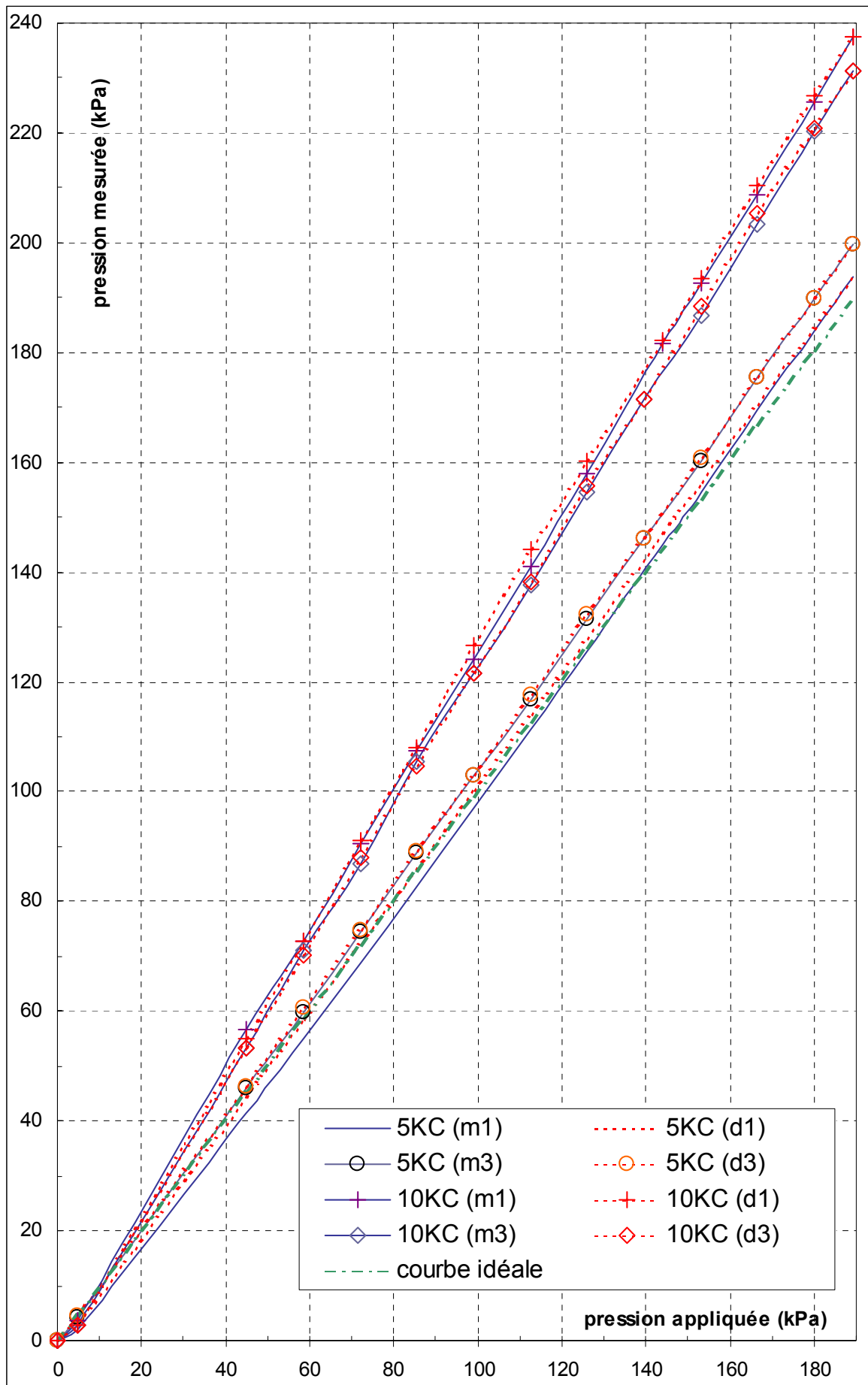


Fig. 3-18 : Résultats de l'expérimentation B_2 des capteurs 5KC et 10KC

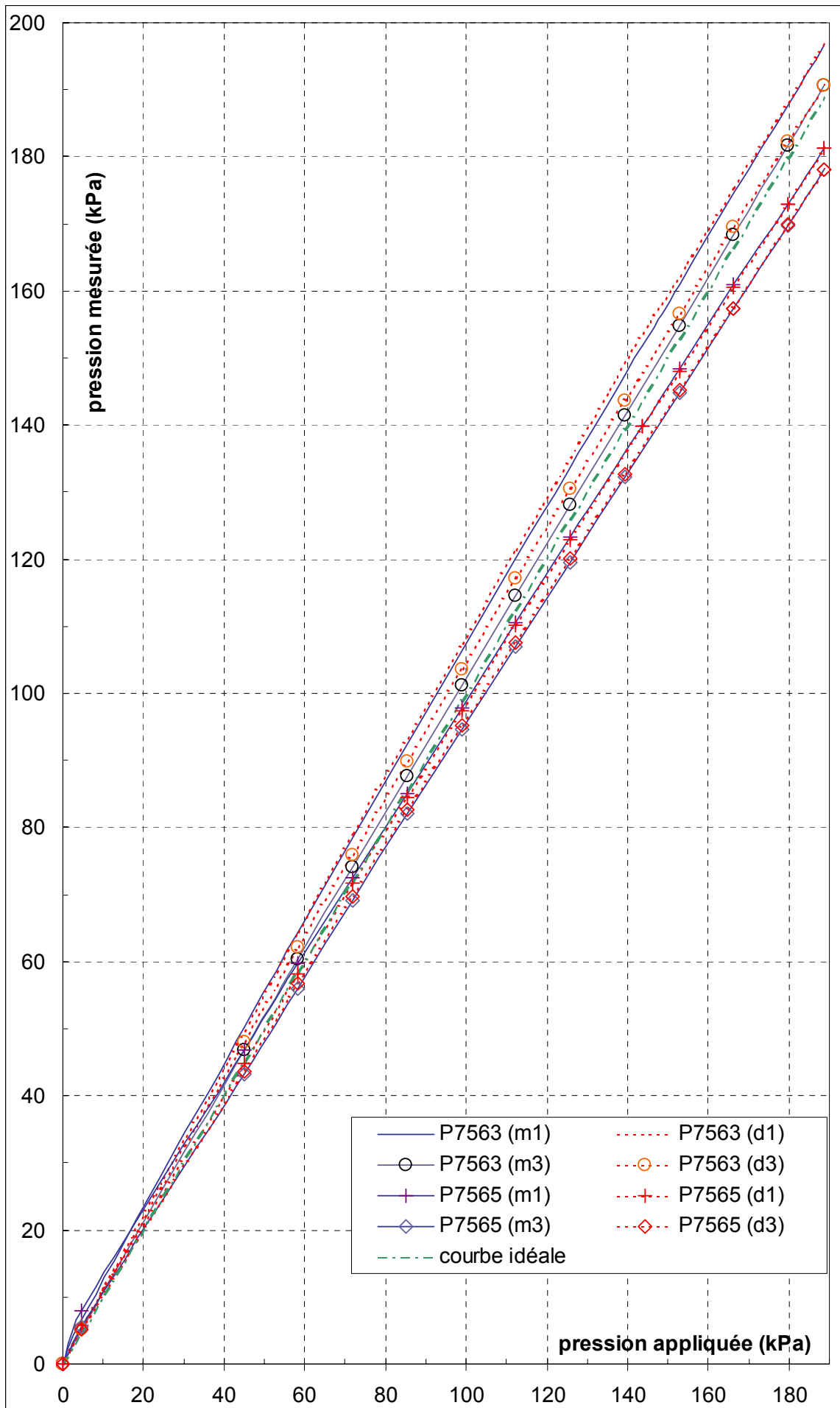


Fig. 3-19 : Résultats de l'expérience B₃ des capteurs P7563 et P7565
3-73

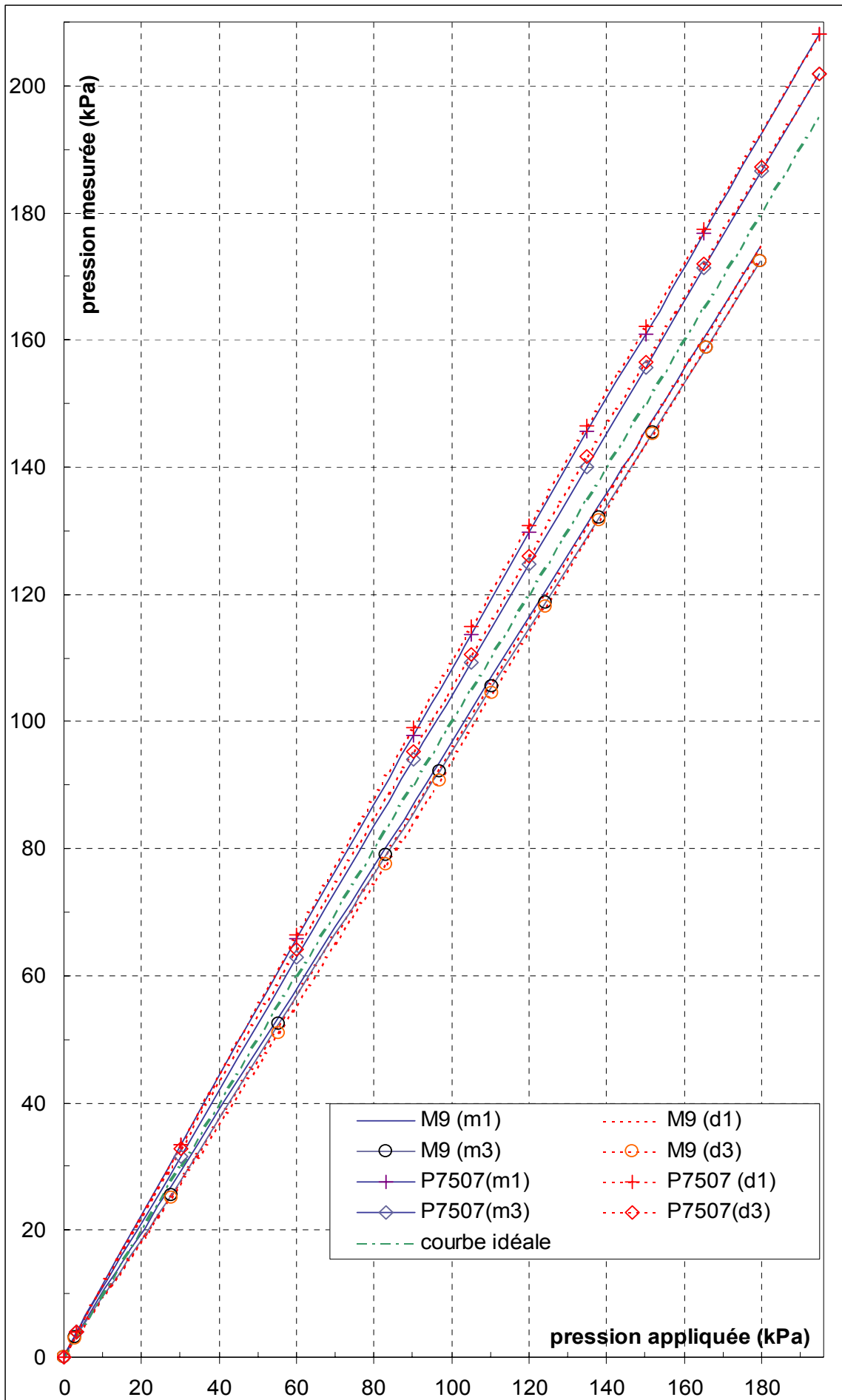


Fig. 3-20 : Résultats de l'expérience A_4 des capteurs M9 et P7507

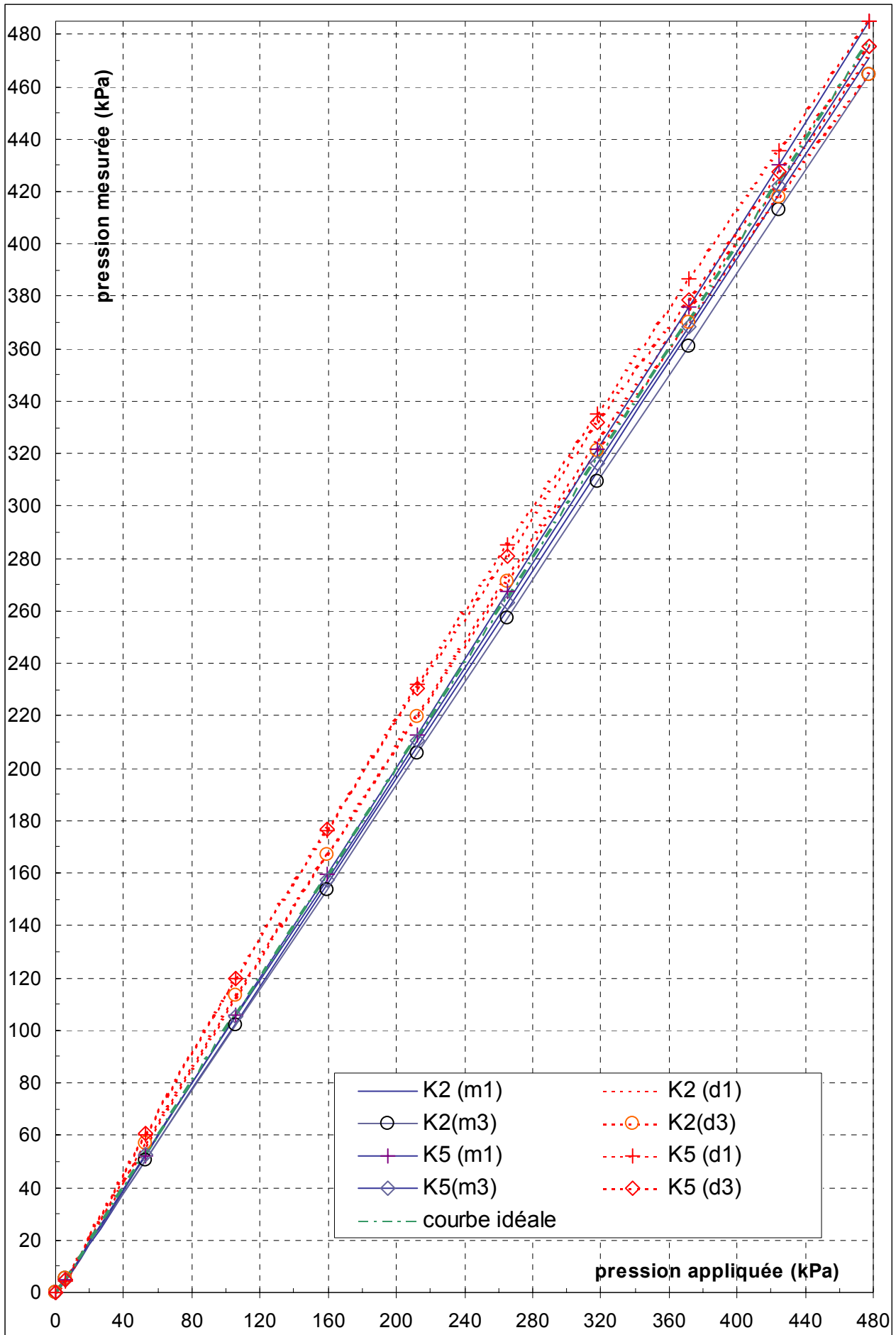


Fig. 3-21 : Résultats de l'expérience C_1 des capteurs K_2 et K_5

On a donc analysé les résultats expérimentaux en termes de variation entre deux valeurs de l'accélération suffisamment éloignées ce qui permet d'éliminer :

- ♦ l'influence d'une (éventuelle) faible dérive des signaux des capteurs (sous l'action de variations de la température et de la pression atmosphérique) entre le moment de leur mise en place et le commencement de l'essai de centrifugation (parfois les échantillons ont été préparés la veille de la réalisation des expérimentations) ;
- ♦ l'influence sur la mesure de l'accélération de la pesanteur ; cette dernière est constante entre les deux accélérations centrifuges considérées pour le calcul des facteurs et le principe de superposition des effets permet d'admettre que l'influence de l'accélération de la pesanteur est éliminée.

Les facteurs de variation de la réponse des capteurs dans le cycle 2 (F_m^2 et F_d^2) sont présentés dans le Tableau 3-8 pour l'ensemble des expérimentations. Ils ont été considérés comme représentatifs pour caractériser les expérimentations effectuées dans la mesure où ceux obtenus pour les cycles 1 et 3 les encadrent à 1% près.

Le Tableau 3-9 regroupe plusieurs paramètres significatifs, nécessaires pour l'interprétation des situations de mesure étudiées :

- ♦ le nombre d'expérimentations effectuées pour chaque capteur ;
- ♦ la dérive moyenne du zéro en centrifugation de chaque capteur ;
- ♦ l'hystérésis²¹ maximale de chaque capteur observée dans l'ensemble des cycles effectués (exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure EM) ;
- ♦ les résultats d'une analyse statistique (valeur moyenne et écart type) pour caractériser le facteur de variation dans le cycle 2 en fonctions des valeurs obtenues pour chaque capteur lors de la montée et, respectivement, de la baisse de l'accélération centrifuge ;

²¹ différence entre la pression mesurée en descente et, respectivement, en montée d'accélération centrifuge pour une même pression appliquée.

Tableau 3-8 : Facteurs de variation de la réponse des capteurs lors de l'augmentation et de la baisse de l'accélération centrifuge, calculés par rapport à la variation estimée de la pression exercée par le sable (cycle 2)

Essai	P7569		P7571		B2		B3		B4		B5		5KC		10KC		P7563		P7565		P7566		
	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	
A1*	1,050	1,071	1,095	1,087	1,067	1,040	1,092	1,064	1,034	0,994	1,006	0,996	1,913	1,813	1,675	1,589							
A2	1,145	1,145	1,128	1,118	1,029	0,994	1,093	1,060	1,035	1,000	1,127	1,089	1,144	1,157	1,319	1,333							
A3	1,063	1,058	1,050	1,047	1,019	0,980	1,035	1,007			0,978	0,956					1,033	1,038	0,932	0,929	0,956	0,974	
A4	1,088	1,100	1,064	1,068													1,026	1,046			0,955	0,960	
B1	1,127	1,119	1,064	1,054	0,974	0,956	1,050	1,016	1,000	0,985	0,971	0,960	1,158	1,169	1,237	1,237							
B2	1,080	1,064	1,036	1,027	1,018	0,989	1,098	1,064	0,991	0,959	1,065	1,032	1,060	1,052	1,254	1,254							
B3	1,097	1,088	1,067	1,075	1,009	0,983	1,022	1,013			1,089	1,062					1,009	1,002	0,939	0,939	0,985	1,000	
B4	1,021	1,026	1,032	1,034									1,107	1,110	1,106	1,106	1,022	1,028			0,992	0,984	
C1													1,243	1,237	1,068	1,068							
C2													1,133	1,134	1,275	1,284							
C3	1,086	1,082	1,015	1,008																			
C4																	0,935	0,930	0,960	0,951	0,989	0,977	

* - les capteurs Kyowa BE-C ont été installés avec leur surface active orientée vers le fond de conteneur.

Essai	P7507		P7509		M9		M10		K2		K5	
	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d	F ₂ ^m	F ₂ ^d
A4	1,042	1,036	1,043	1,034	0,968	0,972						
B4					0,993	0,986	0,894	0,894				
C1									0,980	0,965	1,003	0,983
C2									0,979	0,965	0,996	0,978
C3									0,989	0,972	0,998	0,980
C4									0,959	0,939	1,002	0,972

- ♦ les résultats d'une analyse statistique (valeur moyenne et écart type) du facteur de variation dans le cycle 2, lors de la montée et de la baisse de l'accélération, pour l'ensemble des capteurs de même type (prototypes du CECP d'Angers, Askegaard, Kyowa BE-C, Kyowa BE-M, Kyowa BE-F).

Tableau 3-9 : Dérive du zéro en centrifugation, hystérésis maximale et analyse statistique des facteurs de variation dans le cycle 2 de la réponse des capteurs

Capteur	Nombre essais	Dérive moyenne du zéro kPa/1g	Hystérésis maximale (%EM)	Facteur moyen de variation de la réponse (cycle 2)					
				montée		descente		par type capteur	
				valeur moyenne	écart type	valeur moyenne	écart type	valeur moyenne	écart type
P7569	9	0,221	1,87	1,084	0,033	1,084	0,032	1,034	0,056
P7571	9	0,304	1,41	1,061	0,032	1,058	0,027		
P7563	5	0,193	1,20	1,005	0,036	1,009	0,042		
P7565	3	0,102	0,90	0,944	0,012	0,940	0,009		
P7566	5	0,097	1,50	0,975	0,016	0,979	0,013		
P7507	1	0,157	0,62	1,042	-	1,036	-		
P7509	1	0,160	0,92	1,043	-	1,034	-		
B2	6	0,118	2,39	1,019	0,027	0,990	0,025	1,023	0,043
B3	6	0,059	2,32	1,065	0,030	1,037	0,026		
B4	4	0,030	2,46	1,015	0,020	0,985	0,016		
B5	6	0,074	2,32	1,039	0,058	1,016	0,050		
5KC*	7	0,112	1,35	1,141	0,056	1,143	0,057	1,177	0,084
10KC*	7	0,113	1,21	1,210	0,091	1,214	0,095		
M9	2	0,436	2,29	0,981	0,013	0,979	0,007	0,951	0,041
M10	1	0,443	1,05	0,894	-	0,894	-		
K ₂	4	0,408	2,90	0,977	0,011	0,960	0,013	0,979	0,017
K ₅	4	0,414	3,40	1,007	0,016	0,985	0,016		

*- résultats de l'expérimentation A1 exclus de l'analyse statistique

3.6.3.3 Analyse des résultats expérimentaux

Les tableaux 3-8 et 3-9 fournissent une image représentative de la pertinence des résultats expérimentaux obtenus pour les deux situations de mesure étudiées en centrifugeuse (à l'intérieur et à l'interface de l'échantillon de sable avec le fond du conteneur), qui nous a poussé à donner l'interprétation suivante :

a) Dérive du zéro en centrifugation

La quantification de la dérive du zéro des capteurs en centrifugation a permis dans un premier temps l'estimation des valeurs nettes mesurées des pressions exercées par la centrifugation de la couche de sable située au-dessus de chaque capteur (corrigées des pressions engendrées par la centrifugation des capteurs).

Par ailleurs, cette dérive du zéro permet d'acquérir une « radiographie » de l'inertie des capteurs et, en premier lieu, du liquide incompressible piégé à l'intérieur de chaque capteur. L'analyse des résultats obtenus pour les différents capteurs donne quelques renseignements utiles pour l'optimisation de la conception des futurs capteurs :

- ◆ la dérive thermique du zéro la plus élevée est constatée pour les capteurs Kyowa, à cause de leur remplissage en mercure ;
- ◆ les valeurs de la dérive du zéro des capteurs prototypes du CECF d'Angers sont reliées à la précontrainte dans l'huile de remplissage et aux conditions d'encastrement des deux plaques du coussin hydraulique sur le pourtour :
 - les capteurs de la première série, remplis d'huile sous la précontrainte la plus élevée (50 kPa), sont caractérisés par une dérive du zéro en centrifugation plus élevée que celle des prototypes fabriqués ultérieurement ;
 - en particulier, le capteur P7571, dont les rainures pratiquées sur ses faces actives conduisent à une augmentation du volume d'huile piégé sous la même précontrainte, présente la dérive du zéro en centrifugation la plus élevée ;
- ◆ la dérive du zéro la plus réduite a été observée pour les capteurs d'Askegaard, qui ont été remplis d'huile à une précontrainte, vraisemblablement, très réduite, voire nulle ;

b) Hystérésis

L'hystérésis de la pression mesurée lors de la baisse de l'accélération centrifuge a eu une ampleur très limitée. Sa valeur maximale (Tableau 3-9), déterminée pour

l'ensemble des cycles réalisés pour chaque capteur, a été observée aux environs de la moitié de l'accélération centrifuge maximale $a_c(z_1)$. Elle a été trouvée inférieure à 3,4 % de l'étendue de mesure de chaque capteur.

Ce résultat est en concordance avec ceux obtenus par Memier (1980) et Boulebnane (1996) qui ont montré que, pour les capteurs à action indirecte dont la surface active a une raideur très importante, l'hystérésis est réduite.

c) *Discrétion des capteurs d'interface et contrôle des contraintes normales engendrées par la centrifugation des échantillons de sable*

La qualification des résultats des mesures de pression à l'interface des échantillons de sable avec le fond de conteneur est basée sur les constats suivants :

- ♦ la valeur moyenne du facteur de variation de la réponse dans le cycle 2 pour les deux capteurs Kyowa BE-F s'approche de l'unité à 2,1 % près (le meilleur résultat parmi les différents types des capteurs testés) ;
- ♦ la valeur moyenne du facteur de variation de la réponse dans le cycle 2 pour les deux capteurs Kyowa BE-F est inférieure à un (0,979) ;
- ♦ l'ensemble des seize valeurs individuelles des facteurs de variation dans le cycle 2 de la réponse (en montée et en descente d'accélération) se trouve dans l'intervalle (0,94 - 1,00) tandis que leur écart type est de 0,017 (l'écart type le plus réduit parmi les différents types de capteurs).

Ces résultats reflètent une très bonne concordance des mesures effectuées à l'interface de l'échantillon avec les valeurs prévues des pressions appliquées par le sable. Cette concordance a été possible grâce à une conception de la situation de mesure prévoyant toutes les précautions nécessaires pour assurer la discrétion des capteurs :

- ♦ l'installation des capteurs à l'interface de l'échantillon et du fond de conteneur supprime tout effet d'inclusion (surface active du capteur contenue dans le plan d'interface et corps du capteur noyé dans le fond de conteneur) ;
- ♦ la raideur de la surface active des capteurs et celle du fond de conteneur support sont très importantes afin de réduire au maximum la perturbation des contraintes

par la mobilisation des effets de voûte dans le sable ;

- ♦ la situation de mesure n'est pas affectée par des erreurs de répétabilité de la méthode d'installation des capteurs ; une seule mise en place des capteurs a été suffisante pour l'ensemble des expérimentations effectuées (il n'est pas nécessaire de démonter les capteurs pour refaire une expérimentation).

Par ailleurs, l'application de la relation (3.21) pour la prévision des contraintes développées par le sable centrifugé s'est avérée, vraisemblablement, très judicieuse. Si l'on néglige la variation de l'accélération centrifuge sur la profondeur de l'échantillon (3.21') la valeur moyenne du facteur de variation de la réponse baisse à 0,946.

La justesse acquise par l'application de cette relation est affermie par les valeurs du facteur de variation de la réponse obtenues pour les capteurs installés au sein des échantillons, qui ont été trouvées, en général, supérieures à l'unité. En effet, si pour l'ensemble des capteurs on trouvait systématiquement des facteurs inférieurs à l'unité, on pourrait suspecter que les expérimentations étaient affectées par une erreur systématique inconnue.

En prenant certaines réserves vis-à-vis de la répétabilité et notamment de la reproductibilité des résultats des mesures des pressions à l'interface des échantillons de sable (nombre relativement réduit d'expérimentations effectuées et reproductibilité non étudiée en utilisant d'autres capteurs), nous sommes en position de confirmer et de mieux justifier les résultats obtenus par Boulebnane et al. (1994, voir 1.4.2.2.b) :

- ♦ la centrifugation des échantillons de sable de granulométrie et de densité uniformes permet un contrôle fin des contraintes engendrées ;
- ♦ les mesures de pressions à l'interface des échantillons de sable centrifugés sont fiables à condition que la surface active des capteurs soit contenue dans le plan d'interface avec l'échantillon et que sa raideur soit très élevée.

d) *Discrétion des capteurs à l'intérieur des échantillons de sable*

La qualification des mesures de pression à l'intérieur des échantillons de sable par analyse statistique des populations de valeurs du facteur de variation de la réponse

obtenues pour chaque type de capteur est maintenant possible. On prend appui à cet effet sur la pertinence de la prévision théorique des contraintes normales engendrées par centrifugation qui a été prouvée ci-avant.

Les résultats de l'analyse statistique (Tableau 3-9) effectuée sur les populations des facteurs de variation de la réponse des différents types des capteurs pour une variation de l'accélération entre $10g$ et $a_c^{Max}(z_1)$ nous poussent à leur donner les interprétations suivantes.

La méthode de mise en place des capteurs présente une influence très importante sur la mesure. A ce propos, les écarts types des facteurs de variation de la réponse obtenus pour les différents types des capteurs sont éloquentes :

- ♦ la valeur la plus faible de l'écart type (4,3%) est obtenue pour les capteurs d'Askegaard qui ont été mis en place suivant un mode opératoire spécial et à l'aide d'un dispositif de mise en place spécial destiné à diminuer l'influence de l'opérateur ; elle est cependant deux fois plus élevée que la valeur obtenue pour les capteurs installés à l'interface des échantillons, qui est exemptée complètement de l'influence de l'opérateur (une seule mise en place des capteurs pour l'ensemble des expérimentations) ;
- ♦ la valeur de l'écart type (5,3%) obtenue pour les capteurs prototypes du CECF d'Angers (5,5%) correspond à un même mode opératoire mais la mise en place a été faite sans utiliser le dispositif mentionné ci-avant par un opérateur entraîné ;
- ♦ la valeur de l'écart type obtenue pour les capteurs Kyowa BE-C (8,4%) est sensiblement plus élevée que celles des capteurs précédents à cause, vraisemblablement, des difficultés de mise en place dues à leur taille miniature ;
- ♦ la valeur de l'écart type obtenue pour les capteurs Kyowa BE-M (4,1%) est peu représentative du fait du nombre réduit d'expérimentations (6 valeurs individuelles du facteur de variation de leur réponse) ; cependant, il convient de constater qu'elle correspond à la méthode de mise en place la plus simple (capteurs simplement posés sur la surface du sable).

Nous sommes donc en position de confirmer les résultats obtenus par Garnier et al.

(1999) sur l'influence importante de la technique de mise en place des capteurs sur la mesure et sur la nécessité d'utiliser des techniques de mise en place des capteurs adéquates et répétables.

Par ailleurs, la raideur très importante de la surface active des capteurs testés a été essentielle pour obtenir des valeurs des facteurs de variation de la réponse des capteurs très proches de l'unité pour l'ensemble des capteurs testés (à l'exception des capteurs Kyowa BE-C, dont la réponse a été probablement affectée par des difficultés de mise en place). On remarque à ce propos que :

- ♦ les valeurs moyennes du facteur de variation de la réponse obtenues pour les capteurs d'Askegaard et pour les capteurs prototype du CECP d'Angers s'approchent à 2,3 % et, respectivement, 3,4% près de l'unité ; elles sont comparables avec les résultats obtenus pour les capteurs d'interface, en dépit de leur discrétion moins satisfaisante du fait de l'effet de l'inclusion ;
- ♦ les valeurs du facteur de variation de la réponse obtenues pour les capteurs Kyowa BE-M, comprises entre 0,894 et 0,993, sont jugées satisfaisantes en dépit de leur rapport de forme très élevé (environ 6 fois plus élevé que pour les capteurs prototypes du CECP d'Angers et les capteurs d'Askegaard) ; avec les réserves nécessaires du fait du nombre réduit d'expérimentations réalisées sur ce type de capteur, les résultats montrent une influence limitée sur leur réponse de leur volume élevé, sensiblement disproportionné par rapport aux autres capteurs expérimentés à l'intérieur des échantillons.

Nous sommes donc en position de confirmer l'hypothèse formulée lors de plusieurs études antérieures (Trollope et Lee, 1961, Memier, 1980, etc.) concernant l'influence majeure sur la mesure des pressions totales de la raideur de la surface active des capteurs. Le mode d'action indirect de la pression sur le corps d'épreuve des capteurs constitue alors une solution de conception capable d'assurer une raideur suffisante.

3.6.4 Expérimentations en chambre triaxiale

3.6.4.1 Description des expérimentations réalisées

Neuf études expérimentales des contraintes normales exercées aux interfaces des échantillons de sable avec les deux embases sous l'action d'une sollicitation triaxiale appliquée en trois cycles ont été effectuées dans la chambre triaxiale du CERMES :

- ♦ trois expérimentations des capteurs K_2 et K_5 (appelées ci-après I_1 , I_2 et I_3) sous une sollicitation « quasi-isotrope »²²;
- ♦ trois expérimentations des capteurs K_2 et SI_2 (appelées ci-après I_4 , I_5 , et I_6) sous une sollicitation « quasi-isotrope »²²;
- ♦ trois expérimentations des capteurs K_2 et K_5 (appelées ci-après J_1 , J_2 et J_3) sous une sollicitation de type « quasi- K_0 »²² ;

Deux autres expérimentations des contraintes normales exercées dans des échantillons de sable soumis à l'action d'une sollicitation triaxiale appliquée en cinq cycles (trois premiers cycles de type isotrope et ensuite deux cycles de type K_0)²³ ont été également réalisées :

- ♦ une expérimentation des capteurs P7569, P7571, 5KC et 10KC installés au sein de l'échantillon (appelée ci-après L_1) et du capteur K_2 encastré dans l'embase inférieure ;
- ♦ une expérimentation des capteurs P7569, P7571 et P7563 installés au sein de

²² Le rapport entre les deux pressions d'eau appliquées à l'échantillon triaxial (p_v et p_h) a été réglé en actionnant manuellement (à deux mains) simultanément les deux régulateurs d'air connectés aux deux cellules air-eau ; le chemin de variation des pressions appliquées est alors plus ou moins affecté en fonction de la qualité de l'asservissement de l'opérateur aux indications (affichées) fournies par les deux capteurs Schaevitz.

²³ La réalisation des expérimentations a posé une difficulté technologique particulière lors de la continuation de la pluviométrie après la mise en place des capteurs (Fig. 3-22) du fait de l'espace annulaire très étroit (environ 6 mm d'épaisseur) entre le diffuseur des jets de sable et le moule de fabrication de l'échantillon. Cet espace devait permettre le passage des câbles provenant des capteurs (3mm de diamètre) et alors des précautions spéciales ont été prises pour le centrage parfaitement axial du diffuseur afin qu'il n'accroche pas, dans sa montée, les câbles. On a donc augmenté le nombre de cycles dans chaque expérimentation afin d'étudier la réponse des capteurs à l'intérieur de l'échantillon pour les deux types de chemins de variation de la pression appliquée (isotrope et K_0).

l'échantillon (appelée ci-après L_2) et du capteur K_2 encastré dans l'embase inférieure.

Le tableau 3-10 rassemble, pour chacune des onze expérimentations effectuées quelques caractéristiques significatives :

- ♦ le poids volumique moyen γ_m de l'échantillon ;
- ♦ la dépression δp appliquée à l'intérieur de l'échantillon au moment où il est fixé par l'intermédiaire de son embase supérieure et de son couvercle au bâti de l'enceinte triaxiale ;
- ♦ les deux valeurs initiales p_v^i et p_h^i de la pression appliquée à l'échantillon au début du premier cycle au moment de la remise à zéro de la dépression appliquée à l'intérieur de l'échantillon pour permettre le montage de l'essai ;
- ♦ le pas de variation Δp_v de la pression verticale entre deux mesures successives et la valeur maximale de cette pression p_v^{Max} ;
- ♦ les capteurs testés ainsi que leur profondeur de mise en place z_i .

Dans l'ensemble d'expérimentations réalisées et pour chaque cycle d'essai, la pression verticale appliquée au piston a varié dans l'intervalle $(p_v^i - p_v^{\text{Max}})$, tandis que la pression horizontale a été asservie à l'obtention d'un rapport $K=p_h/p_v$ constant ($K=1$ pour une sollicitation isotrope et $K=0,4$ pour une sollicitation de type K_0).

La valeur $K=0,40$ a été considérée, par défaut, comme une valeur représentative pour caractériser le coefficient de pression des terres au repos du sable de Fontainebleau ($\phi=35-40$ degrés). Une sollicitation rigoureusement de type K_0 dans un appareillage triaxial demanderait le contrôle des déplacements radiaux de l'échantillon et l'asservissement du rapport K appliqué durant l'essai à l'obtention de déplacements radiaux nuls...

La pression verticale a été modifiée entre p_v^i et p_v^{Max} par pas successifs de 10 kPa ou de 20kPa. A chaque niveau intermédiaire, la pression appliquée est maintenue constante environ deux minutes pour permettre l'enregistrement des mesures de pression, de façon séquentielle, toutes les vingt secondes.

Essai	γ_m (kN/m ³)	Dépression δp (kPa)	Pressions appliquées				Capteurs testés					
			valeurs initiales		Pas Δp_v (kPa)	p_v^{Max} (kPa)	profondeur de mise en place z_i (m)					
			p_v^i (kPa)	p_h^i (kPa)			embase		au sein de l'échantillon			
					inf.	sup.						
I1	15,267	35	35	35	20	480	K ₂	K ₅				
							0,685	0,00				
I2	15,267	35	35	35	20	480	K ₂	K ₅				
							0,685	0,00				
I3	15,267	30	30	30	10	480	K ₂	K ₅				
							0,685	0,00				
I4	15,282	30	30	30	20	480	K ₂	SI2				
							0,690	0,00				
I5	15,239	30	30	30	20	480	K ₂	SI2				
							0,680	0,00				
I6	15,241	30	30	30	20	480	K ₂	SI2				
							0,685	0,00				
J1	15,075	30	38	15	20	480	K ₂	K ₅				
							0,685	0,00				
J2	15,137	29	25	11	20	400	K ₂	K ₅				
							0,690	0,00				
J3	15,330	32	18	14	20	400	K ₂	K ₅				
							0,692	0,00				
L1	15,493	20	30	30	20	160	K ₂		P7569	P7571	5KC	10KC
							0,690		0,320	0,320	0,320	0,320
L2	15,267	20	20	20	20	200	K ₂		P7569	P7571	P7563	
							0,685		0,320	0,320	0,320	
Moyenne	15,261	kN/m ³										
$\sigma[\gamma]$	0,105	kN/m ³										

Tableau 3-10 : Caractéristiques des expérimentations réalisées en chambre triaxiale en présence de sable de Fontainebleau

Les capteurs ont été disposés pour chaque expérimentation suivant le schéma de principe présenté sur la figure 3-13.

Pour l'expérimentation L_1 , les quatre capteurs enfouis ont été installés dans un même plan horizontal (profondeur de 0,32 m) suivant deux diamètres orthogonaux. La position des trois capteurs prototype du CECP d'Angers pour l'expérimentation L_2 est représentée sur la photo de la figure 3-22.



*Fig. 3-22 : Capteurs du CECP d'Angers posés sur le sable dans le moule
(expérimentation L_2)*

Un suivi ponctuel de température dans la salle d'essai a permis de constater des variations limitées à $\pm 0,5^\circ\text{C}$ durant chaque expérimentation.

3.6.4.2 Exploitation des résultats expérimentaux

Une réponse des capteurs légèrement différée a été remarquée par rapport aux variations de la pression appliquée au piston pour l'ensemble d'expérimentations réalisées. Par conséquent, la dernière séquence de mesure prise à chaque niveau de la pression appliquée a été considérée comme représentative pour caractériser les mesures de pression dans les échantillons expérimentés.

a) Estimation expérimentale des pressions exercées dans le sable

Les signaux délivrés par les capteurs ont été interprétés en termes de pression en suivant la méthodologie décrite dans le chapitre 3.3.1.6.

L'effet de la température a été négligé du fait de sa faible variation durant chaque expérimentation.

Pour ce qui concerne l'exploitation des mesures prises par le capteur SI₂, le décalage du zéro, constatée après son serrage par vis à l'embase supérieure (environ 17,6 kPa), a été corrigé. Par contre, la dérive de ce décalage du zéro durant chaque expérimentation (constatée en fin de chaque expérimentation), qui est de l'ordre de 5 kPa, n'a pas été prise en compte pour l'interprétation des mesures.

b) Estimation théorique des pressions exercées dans le sable

Pour chaque séquence de mesure, l'estimation de la pression appliquée par le sol au niveau des capteurs a été réalisée avec la relation 3.24 en fonction de la pression p_v enregistrée simultanément par le capteur Schaevitz installé sur le circuit hydraulique du piston et de la profondeur d'installation des capteurs.

c) Résultats expérimentaux

Pour chaque expérimentation, les mesures des pressions de chaque capteur ont été représentées, de la même façon que pour les expérimentations en centrifugeuse, par rapport à l'estimation théorique des contraintes normales verticales appliquées dans le sable à leur niveau.

Les figures 3-23 à 3-29 présentent quelques-unes de ces représentations graphiques pour deux cycles de variation de la pression appliquée :

- ♦ les cycles 1 et 3 pour les expérimentations I₂, I₃, I₅ et J₁ ;
- ♦ les cycles 3 et 4 pour les expérimentations L₁ et L₂.

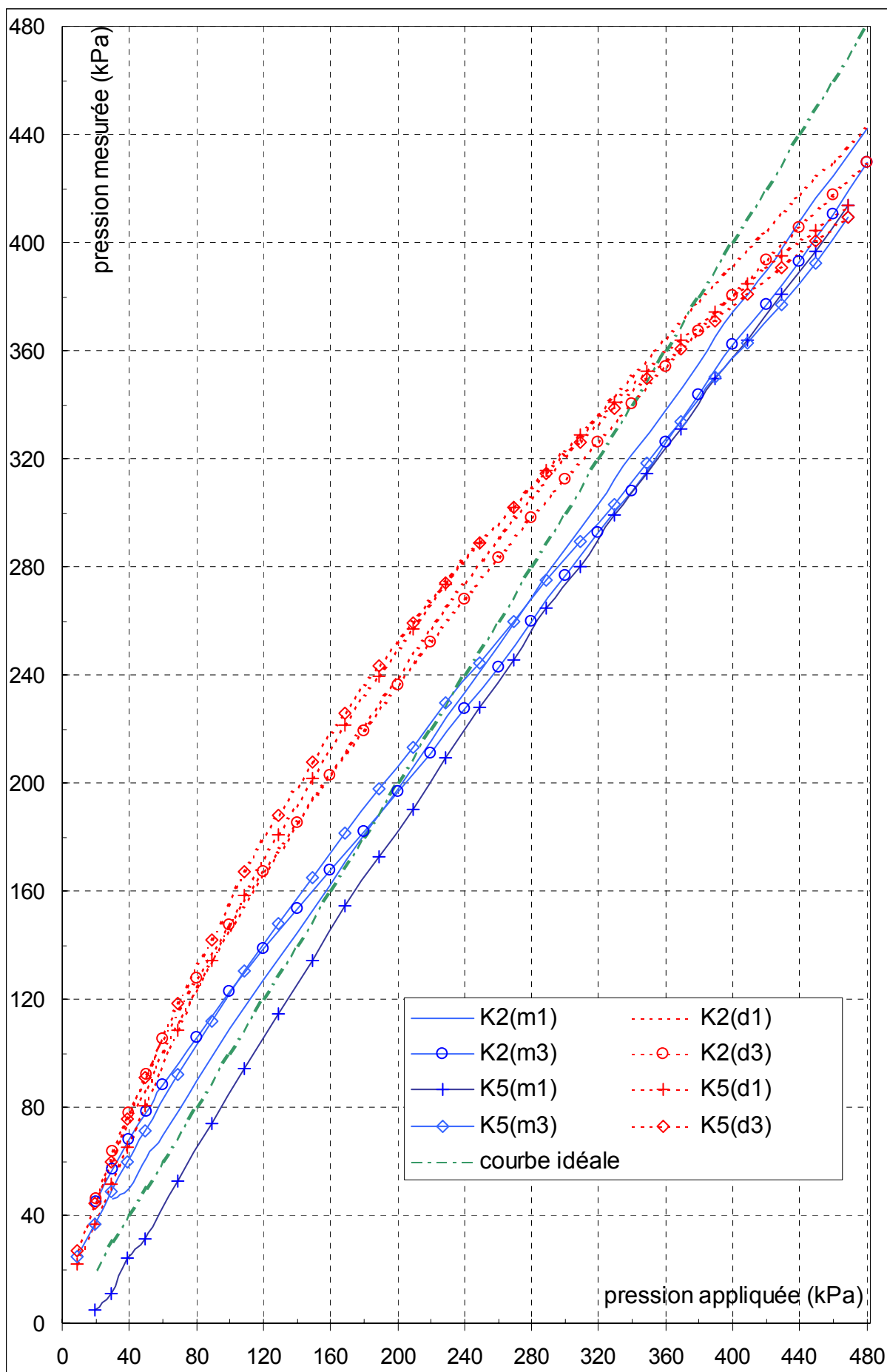


Fig. 3-23 : Résultats de l'expérimentation I_2 des capteurs K_2 et K_5

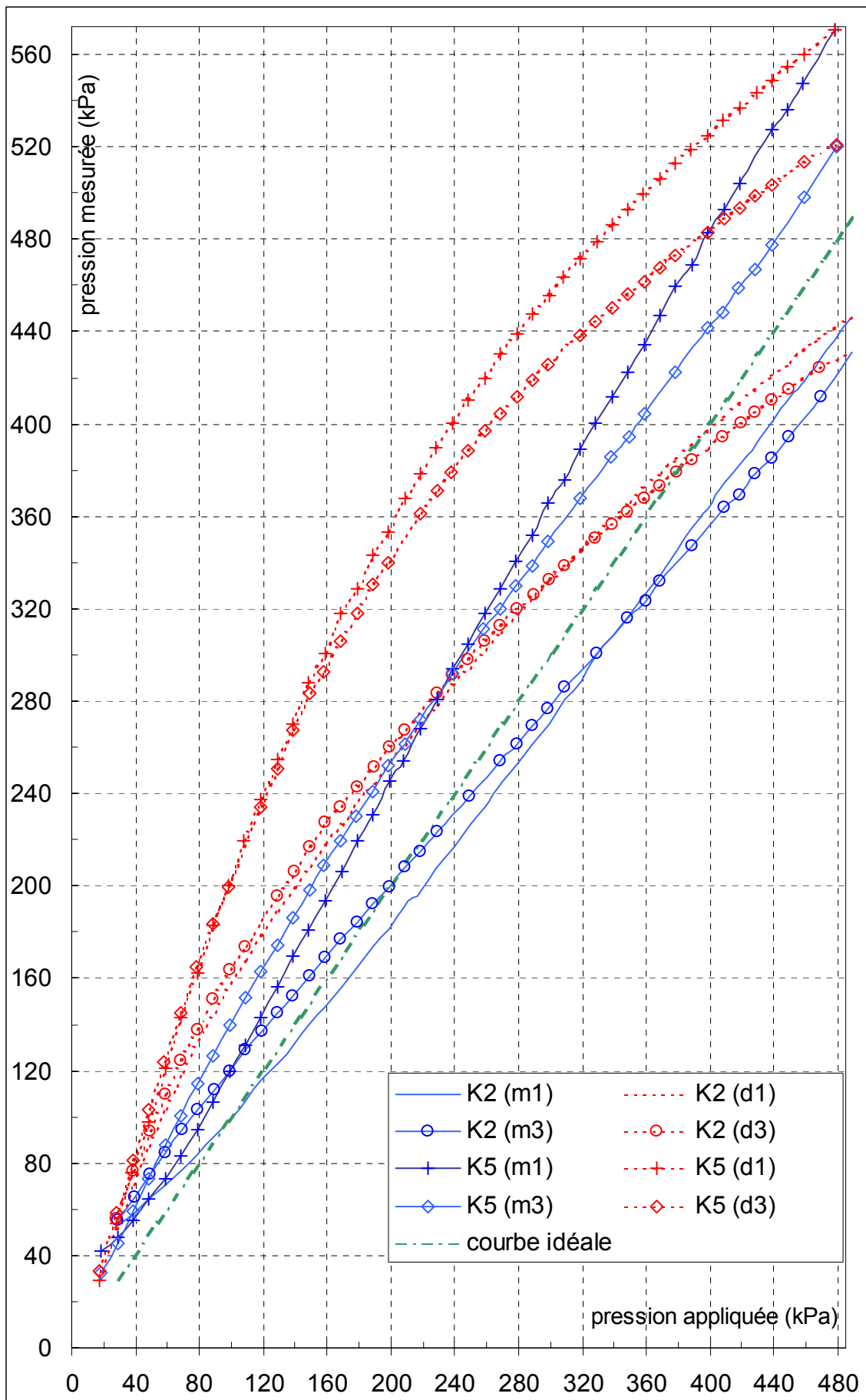


Fig. 3-24 : Résultats de l'expérimentation I_3 des capteurs K_2 et K_5

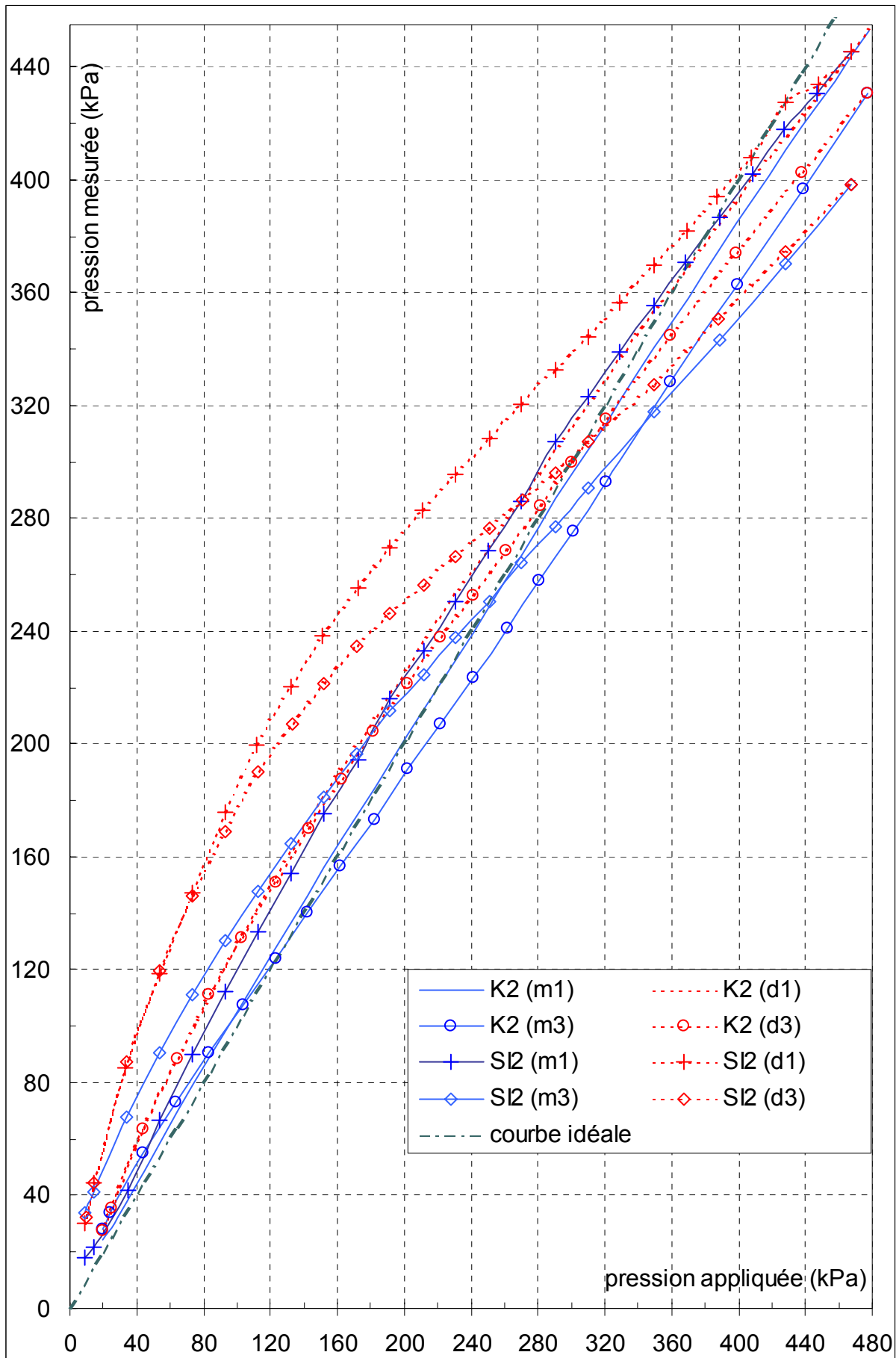


Fig. 3-25 : Résultats de l'expérimentation I_6 des capteurs K_2 et SI_2

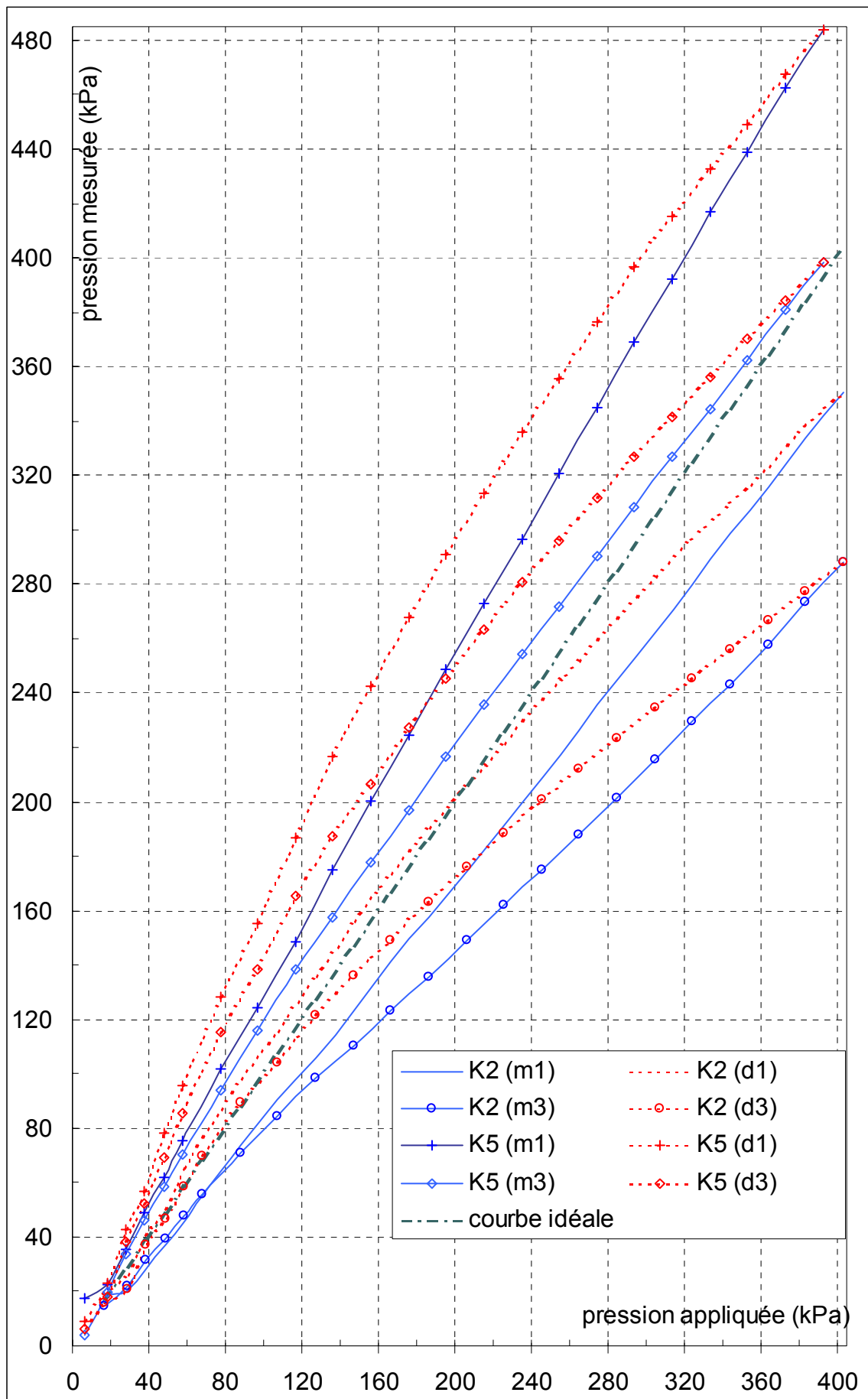


Fig. 3-26 : Résultats de l'expérimentation J_2 des capteurs K_2 et K_5

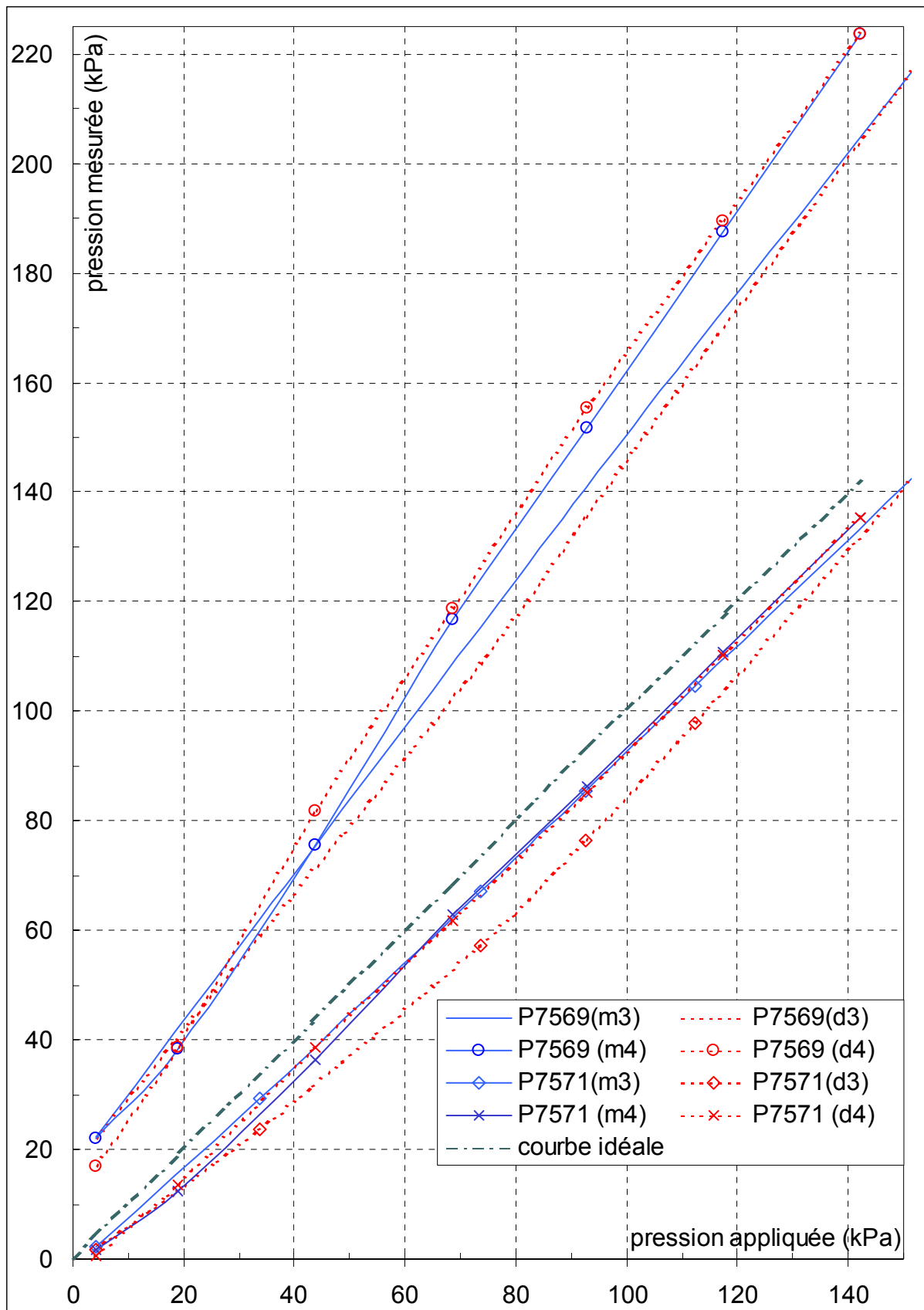


Fig. 3-27 : Résultats de l'expérience L_1 des capteurs P7569 et P7571 cycle 3 (sous une sollicitation isotrope) et cycle 4 (sous une sollicitation de type K_0)

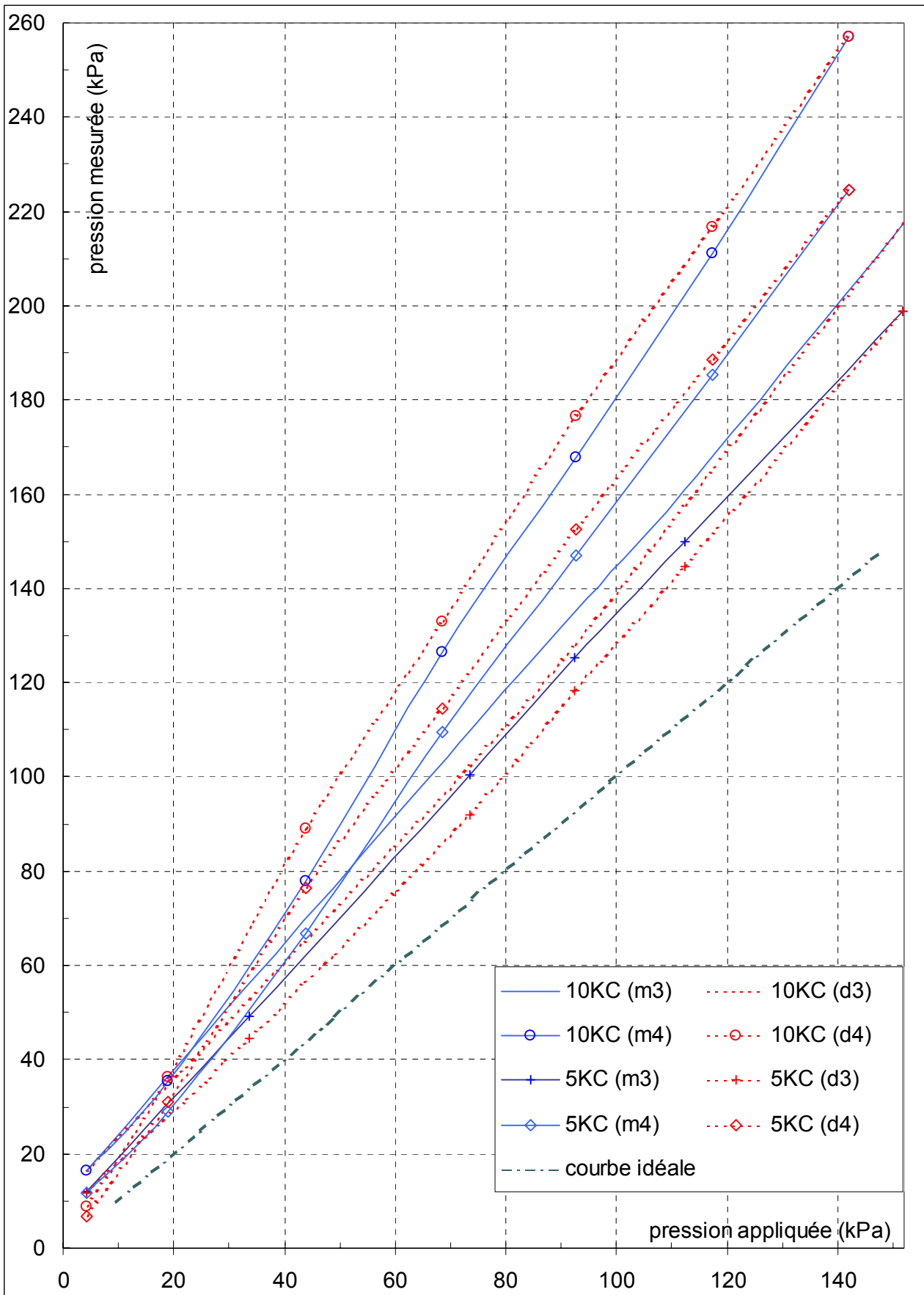


Fig. 3-28 : Résultats de l'expérience L_1 des capteurs 5KC et 10KC cycle 3 (sous une sollicitation isotrope) et cycle 4 (sous une sollicitation de type K_0)

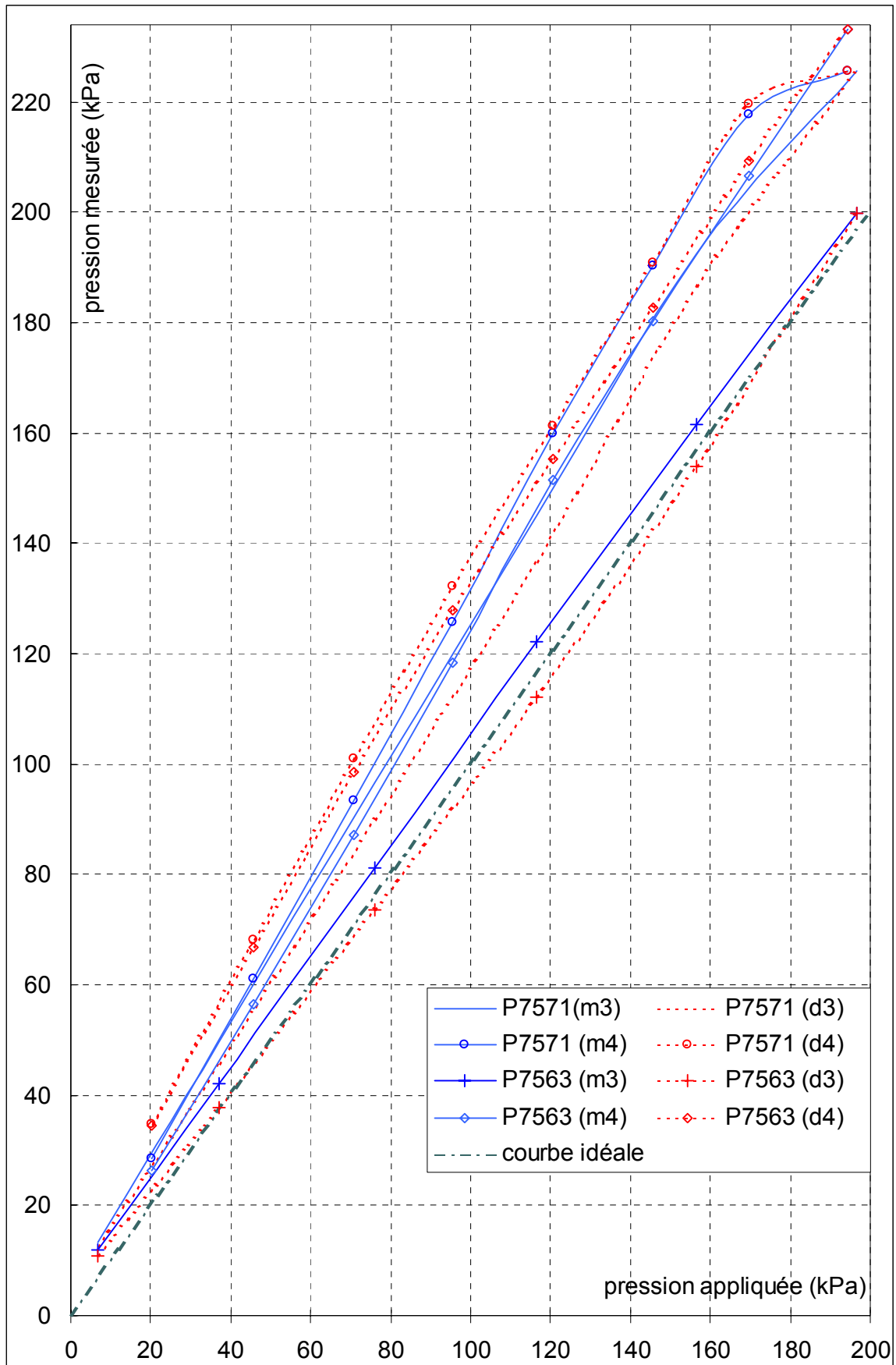


Fig. 3-29 : Résultats de l'expérimentation L_2 des capteurs P7571 et P7563, cycle 3 (sous une sollicitation isotrope) et cycle 4 (sous une sollicitation de type K_0)

On remarque que, pour une même intensité de la pression appliquée, la pression mesurée baisse légèrement d'un cycle à l'autre de façon similaire aux résultats obtenus en centrifugeuse...

Chaque cycle i de chaque expérimentation réalisée a été caractérisé par deux facteurs de variation de la réponse de chaque capteur, un en montée de pression F_m^i et l'autre en descente de pression F_d^i pour une variation de la pression appliquée $\Delta p_v = 200$ kPa (expérimentations $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, J_1, J_2,$ et $J_3,$) ou $\Delta p_v = 100$ kPa (expérimentations L_1, L_2) dans l'intervalle $[p_v^{\max} - \Delta p_v, p_v^{\max}]$. Ces variations ont été définies par rapport à la variation de la pression appliquée à la profondeur de mesure en utilisant les relations :

$$F_m^i = \frac{p_m(p_v = p_v^{\max}) - p_m(p_v = p_v^{\max} - \Delta p_v)}{\sigma_z(z_1, p_v = p_v^{\max}) - \sigma_z[z_1, p_v = p_v^{\max} - \Delta p_v]} \quad (3.30)$$

et

$$F_d^i = \frac{p_m(p_v = p_v^{\max}) - p_m(p_v = p_v^{\max} - \Delta p_v)}{\sigma_z(z_1, p_v = p_v^{\max}) - \sigma_z[z_1, p_v = p_v^{\max} - \Delta p_v]} \quad (3.30')$$

On a conduit l'analyse des résultats expérimentaux, de façon similaire aux expérimentations en centrifugeuse, en termes de variation de la réponse entre deux valeurs de la pression appliquée.

De cette façon, on arrive à éliminer de l'analyse l'influence d'une éventuelle faible dérive des signaux des capteurs de pression (y compris pour les capteurs Schaevitz) sous l'action de la variation de la température et de la pression atmosphérique entre le moment de leur mise en place et le commencement de l'essai triaxial (parfois les échantillons ont été préparés la veille de la réalisation des expérimentations).

Les facteurs de variation de la réponse des capteurs dans le cycle 2 (F_m^2 et F_d^2) sont présentés dans le tableau 3-11 pour l'ensemble des expérimentations. Ils ont été considérés comme représentatifs pour caractériser les expérimentations effectuées dans la mesure où ceux obtenus pour les cycles 1 et 3 les encadrent de près.

Pour les expérimentations L_1 et L_2 nous présentons aussi les facteurs de variation de la réponse des capteurs pour le cycle 4 correspondant à un chemin de type K_0 de variation de la pression appliquée.

Le tableau 3-12 regroupe plusieurs paramètres significatifs, nécessaires pour l'interprétation des situations de mesure étudiées :

- ♦ le nombre d'expérimentations effectuées pour chaque capteur ;
- ♦ l'hystérésis maximale de chaque capteur observée dans l'ensemble des cycles effectués (exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure EM) ;
- ♦ les résultats d'une analyse statistique (valeur moyenne et écart type) sur le facteur de variation de la réponse des capteurs dans le cycle 2 obtenu en montée et en descente de la pression appliquée.

Tableau 3-12 : Hystérésis maximale et analyse statistique des facteurs de variation

Capteur	Nombre essais	Hystérésis maximale par type d'essai					Facteur moyen de variation de la réponse des capteurs (cycle2)			
		I1, I2, I3	I4, I5, I6	J1, J2, J3	L1, L2		montée en pression		descente en pression	
		K=1	K=1	$K_0=0,4$	K=1	$K_0=0,4$	valeur	écart	valeur	écart
		(%EM)	(%EM)	(%EM)	(%EM)	(%EM)	moyenne	type	moyenne	type
K_2	11	12,12	10,99	6,95			0,866	0,069	0,673	0,082
K_5	6	19,17		12,07			0,988	0,195	0,721	0,195
SI2	3		12,52				0,798	0,181	0,556	0,044
5KC	1				-1,58	2,03	1,266		1,331	
10KC	1				-1,38	2,94	1,360		1,421	
P7569	2				-5,56	4,26	1,047	0,371	1,143	0,311
P7571	2				-5,15	3,87	1,008	0,064	1,098	0,062
P7563	1				-5,41	5,65	0,992		1,094	

dans le cycle 2 de la réponse des capteurs

3.6.4.3 Analyse des résultats expérimentaux

Les représentations graphiques des figures 3-23 à 3-29 ainsi que les paramètres expérimentaux groupés dans les tableaux 3-11 et 3-12 montrent qu'il existe des écarts importants entre les résultats de mesure et leur estimation théorique. Il n'est possible d'acquérir une image représentative de la pertinence des mesures des composantes

normales des contraintes agissant dans les échantillons de sable car ces écarts ne sont pas à imputer, pour l'essentiel, à la fiabilité des mesures.

En effet, vu les résultats pertinents obtenus en centrifugeuse pour les mêmes situations de mesure que celles expérimentées en chambre triaxiale, nous sommes poussés à expliquer ces écarts importants par une estimation insuffisante des contraintes agissant au niveau des capteurs.

Nous avons donné l'interprétation suivante aux résultats ainsi obtenus.

a) Hystérésis

Les courbes d'essai des capteurs représentées sur les figures 3-23 à 3-29 diffèrent de façon significative en fonction du signe de la variation de la pression appliquée (signe positif pour la montée en pression et signe négatif pour la descente en pression) et la situation de mesure (à l'interface ou à l'intérieur des échantillons) :

- ♦ pour les mesures à l'interface des échantillons, les facteurs de la variation de la réponse des capteurs obtenus lors de la montée de la pression appliquée sont de façon systématique plus élevés que les facteurs obtenus lors de la baisse de la pression ;
- ♦ pour les mesures à l'intérieur des échantillons (expérimentations L_1 et L_2), les facteurs de variation de la réponse des capteurs obtenus lors de la montée de la pression sont systématiquement plus faibles que ceux obtenus lors de la descente de la pression appliquée pour les cycles de sollicitation isotrope tandis que, pour les cycles de sollicitation de type K_0 , les résultats obtenus sont variables.

De façon générale, on constate une hystérésis apparente significative dont la valeur maximale, indiquée dans le tableau 3-12, a été observée aux environs de la moitié de la valeur maximale p_v^{Max} de la pression appliquée dans chaque cycle.

Pour les expérimentations I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 et I_6 (sollicitation isotrope), l'hystérésis de la pression mesurée par les capteurs d'interface (K_2 , et K_5 ou K_2 et SI_2) lors de la baisse de la sollicitation appliquée a une ampleur très importante (jusqu'à 12% de l'étendue de mesure ou 60 kPa pour le capteur K_2 , jusqu'à 19% de l'étendue de mesure ou 95

kPa pour le capteur K_5 , jusqu'à 12% de l'étendue de mesure ou environ 80 kPa pour le capteur SI_2).

Pour les expérimentations J_1 , J_2 , et J_3 effectuées sous une sollicitation de type K_0 , l'hystérésis de la pression mesurée par les capteurs d'interface lors de la baisse de la sollicitation appliquée a une ampleur sensiblement plus faible que celle observée pour les expérimentations suivant une sollicitation isotrope. Les valeurs obtenues sont cependant 2 à 4 fois plus élevées que celles obtenues en centrifugeuse.

Pour les capteurs installés au sein des échantillons (expérimentations L_1 et L_2), l'hystérésis observée pour les cycles effectués sous une sollicitation isotrope présente une ampleur sensiblement plus réduite que celle observée pour les capteurs d'interface, mais cette ampleur est toutefois deux à quatre fois plus élevée que celle obtenue en centrifugeuse pour les mêmes capteurs. On remarque par ailleurs que, pour les cycles de sollicitation isotrope, l'hystérésis observée change de signe (hystérésis négative, c'est-à-dire que la valeur mesurée lors de la baisse de la pression est plus petite que celle obtenue pour la montée de la pression appliquée) contrairement à l'ensemble des autres résultats obtenus.

Etant donné la qualification des résultats expérimentaux enregistrés en centrifugeuse pour les mêmes situations de mesure, il apparaît, en effet, qu'il s'agit d'une hystérésis apparente. Cette hystérésis ne peut être imputée que pour une faible part à l'interaction entre le capteur et le sable soumis aux sollicitations cycliques. Elle est vraisemblablement imputable à une estimation insuffisante de l'état de contrainte engendré dans les échantillons soumis à l'essai triaxial lors de la montée comme de la descente de la pression appliquée. Quelques raisons peuvent expliquer qualitativement les résultats obtenus :

- ♦ le frottement observé au niveau du guidage du piston τ_f^1 et notamment celui agissant sur le piston au niveau des joints toriques qui séparent les deux circuits hydrauliques actifs autour de l'échantillon τ_f^2 (Fig. 3-13) exercent probablement une influence significative sur la pression transmise à l'échantillon, qui n'a pas été prise en compte dans l'estimation théorique de la pression appliquée ; pour ce qui

concerne l'intensité du frottement τ_f^2 , sa dépendance du niveau de la pression d'eau appliquée sur les joints d'étanchéité et du signe de la variation appliquée (montée en pression ou descente en pression) pourrait expliquer les résultats observés ;

- ♦ le frottement agissant aux interfaces entre les embases et le sable, dû à la différence très importante de leurs raideurs radiales, constitue une autre cause majeure²⁴ qui détermine la perturbation des composantes normales des contraintes par rapport à la distribution uniforme considérée pour le calcul de prévision de la pression appliquée (relation 3.24) ; ce frottement change d'orientation lors de la baisse de la pression appliquée par rapport à la situation où cette pression augmente ;
- ♦ enfin, l'intensité des effets de voûte qui se développent dans l'échantillon peut être influencée par les mécanismes de poussée et butée qui dépendent du sens de la variation de la pression appliquée (poussée lors de la baisse de la pression appliquée et butée lors de son augmentation).

b) Discrétion des capteurs de pressions totales et contrôle des contraintes normales appliquées à l'échantillon durant l'essai triaxial

Compte tenu de la différence importante et systématique observée entre les résultats expérimentaux obtenus lors de la montée et de la baisse de la pression, l'analyse statistique de la population des facteurs de variation de la réponse des capteurs (Tableau 3-11) a été conduite séparément pour les deux demi-cycles du cycle 2 de chaque expérimentation.

La répétabilité des résultats expérimentaux est analysée par le biais des écarts type des populations des facteurs de réponse obtenus lors de la montée et de la baisse de la pression appliquée. Elle a été jugée peu satisfaisante du fait des valeurs élevées des écarts types (valeurs comprises entre 0,044 et 0,195), sensiblement plus élevées que celles obtenues en centrifugeuse.

Les valeurs des facteurs de réponse des capteurs ne permettent donc pas de juger la discrétion de mesure des capteurs. On considère qu'elles reflètent notamment une

²⁴ voir les résultats obtenus par Clayton et Bica (1993) présentées au chapitre 1 (page 1-82).

estimation insuffisante de la variation des champs de contraintes transmises dans les échantillons soumis à l'essai triaxial (le dénominateur dans les relations 3.30) à cause de la variation de l'intensité du frottement entre le piston et le bâti d'essai triaxial.

Nous sommes donc en position de confirmer l'hypothèse formulée par Clayton et Bica (1993) sur le développement de contraintes verticales non uniformes dans les échantillons soumis à l'essai triaxial si l'on ne suit pas de chemins de variation des pressions appliquées de type K_0 (respectant rigoureusement la condition de déplacement radial nul).

3.7 Conclusion

Les expérimentations présentées et analysées dans ce chapitre ont été consacrées à l'évaluation en laboratoire de la pertinence de mesure des composantes normales des contraintes totales exercées dans les sols

Plusieurs types de capteurs de pressions totales à action indirecte, caractérisés par une raideur très élevée de leur surface active (satisfaisant les recommandations les plus exigeantes issues des expérimentations antérieures) ont été testés sous l'action contrôlée exercée par une pression hydrostatique ainsi que par les contraintes agissant dans des échantillons de sable de Fontainebleau sollicités dans deux moyens expérimentaux spécialement conçus pour assurer un meilleur contrôle des contraintes engendrées dans les échantillons d'essai.

Il a été ainsi possible d'obtenir quelques résultats significatifs qui méritent d'être soulignés et qui pourront être pris en compte lors des travaux ultérieurs pour le perfectionnement des capteurs des pressions totales.

3.7.1 Reproductibilité des résultats de mesure des pressions totales

Les expérimentations effectuées en centrifugeuse et en chambre triaxiale ont été conduites afin d'étudier la reproductibilité des résultats des mesures des composantes normales dans les deux enceintes d'essai.

Un même type de matériau (sable de Fontainebleau ayant le diamètre représentatif des particules d_{50} de l'ordre de 0,2 mm), reconstitué avec un même poids volumique (γ_s de l'ordre de 15,3 kN/m³) a été utilisé à cet effet dans les deux chambres d'essai. Deux situations de mesure simples et privilégiées, à l'intérieur et à l'interface de l'échantillon avec une paroi rigide, ont été étudiées en utilisant les mêmes capteurs et les mêmes méthodes de mise en place des capteurs.

La sollicitation appliquée lors des expérimentations J_1 , J_2 , et J_3 , réalisées en chambre triaxiale a suivi un chemin de variation de type K_0 similaire à celui appliqué systématiquement en centrifugeuse.

L'analyse de la réponse des capteurs pour les expérimentations effectuées dans les deux enceintes d'essai a été réalisée en fonction des valeurs théoriques estimées des contraintes appliquées au niveau de leur surface active. Une erreur dans l'estimation théorique des contraintes par rapport aux contraintes réelles entraîne donc un écart entre la pression mesurée et son estimation théorique qui ne doit pas être interprété comme erreur de mesure.

Les expérimentations en centrifugeuse ont permis la qualification des mesures comme pertinentes par rapport aux valeurs estimées des contraintes appliquées.

Par contre, les résultats obtenus lors des expérimentations dans la chambre triaxiale ne permettent pas de se prononcer sur la pertinence de la mesure. Les écarts importants constatés entre les mesures et les estimations théoriques sont considérés comme imputables, en premier lieu, à une estimation insuffisante des contraintes appliquées dans les échantillons soumis à l'essai triaxial.

A ce propos, il convient de comparer les conditions d'expérimentation dans les deux enceintes d'essai qui gouvernent l'intensité des champs des contraintes engendrés dans les échantillons d'essai.

a) Nature et contrôle de la sollicitation appliquée

Les contraintes normales correspondant aux situations de mesure analysées lors de l'expérimentation des échantillons centrifugés constituent le résultat de l'action des

forces d'inertie qui agissent au niveau du centre de gravité de l'ensemble des particules. Pour un échantillon de granularité et de densité uniformes, les forces centrifuges élémentaires sont uniformes à une certaine profondeur dans l'échantillon et d'intensité contrôlable par le biais de la vitesse angulaire de rotation de l'installation centrifuge.

Les contraintes normales verticales correspondant aux situations de mesure analysées lors de l'expérimentation des échantillons triaxiaux constituent le résultat de l'interaction entre une paroi rigide (l'embase inférieure) et l'échantillon. Le mécanisme de transmission de la sollicitation assure seulement le contrôle de la pression uniforme appliquée sous le piston et donc de sa résultante. Pour l'estimation des contraintes transmises à l'interface entre l'embase inférieure et l'échantillon on a fait certaines hypothèses :

- ♦ le frottement entre le piston et le bâti de l'installation triaxiale a été considéré comme négligeable et indépendant de l'intensité de la pression appliquée ;
- ♦ la distribution des contraintes normales agissant dans le sable sur son interface avec l'embase inférieure a été considérée uniforme.

b) Conditions aux limites de l'échantillon expérimenté

Les expérimentations en centrifugeuse ont été réalisées sur des échantillons reconstitués dans un conteneur à paroi rigide (de type oedométrique) assurant des conditions de déplacements radiaux nuls sur toute la surface latérale. Sur la base inférieure de l'échantillon les déplacements en direction normale sont bloqués tandis que sur la base supérieure de l'échantillon l'on assure de conditions des contraintes (normales et tangentielles) nulles (échantillon à surface libre).

Ces conditions aux limites, associées à la sollicitation uniforme appliquée par les forces d'inertie déterminent l'apparition des contraintes et de déformations uniformes à une certaine profondeur dans l'échantillon.

Les expérimentations triaxiales ont été réalisées dans une chambre à paroi latérale flexible (échantillons couverts sur leur surface latérale par une membrane en

caoutchouc) assurant l'élimination du frottement entre le sable et la membrane. L'on assure donc sur la surface latérale de l'échantillon des conditions aux limites correspondant à des contraintes de cisaillement nulles et des contraintes normales égales à celles appliquées par l'eau. Cependant, les déplacements radiaux ne sont pas uniformes sur la surface latérale de l'échantillon du fait de la raideur radiale quasi-infinie des deux embases (déplacements radiaux nuls à la jonction de la membrane avec les deux embases et déplacements radiaux libres sur la hauteur de la membrane).

Durant l'essai triaxial, on assure le blocage des déplacements verticaux sur l'interface de l'échantillon avec l'embase supérieure tandis qu'une distribution uniforme des déplacements verticaux est imposée à l'interface de l'échantillon avec l'embase inférieure rigide.

Ces conditions aux limites, associées à la sollicitation correspondant à la pression uniforme appliquée sous le piston, n'assurent pas l'apparition d'une compression triaxiale uniforme dans l'échantillon, du fait que ses déplacements radiaux sont gênés au niveau des jonctions des embases avec la membrane.

3.7.2 Discrétion de mesure des pressions totales

La discrétion de mesure des capteurs en présence du sable a été évaluée par l'analyse des facteurs de variation de la réponse des capteurs obtenus lors des expérimentations en centrifugeuse. Il est possible de formuler quelques conclusions :

- ♦ les capteurs d'interface ayant une raideur très élevée de leur surface active, qui est, par ailleurs, rigoureusement incluse dans le plan d'interface de l'échantillon avec les échantillons, présentent une discrétion de mesure quasiment parfaite ;
- ♦ les capteurs destinés aux mesures au sein de l'échantillon présentent une discrétion de mesure très satisfaisante si la raideur de leur surface active est très élevée et leur mise en place respecte une méthodologie adéquate ; la mise au point d'une méthodologie de mise en place adéquate et facilement répétable constitue dans ce cas une voie permettant d'améliorer la discrétion de mesure.

3.7.3 Perfectionnement dans la conception des capteurs

Quelques résultats intéressant la conception des capteurs de pressions totales sont rappelés ci-après. Ils sont à prendre en compte pour le perfectionnement du capteur du CECP d'Angers :

- ♦ l'augmentation au maximum de la raideur de la surface active des capteurs constitue le critère de conception principal ; les différentes dispositions constructives applicables à cet effet portent sur l'utilisation de systèmes de mesure à action indirecte, l'augmentation de la raideur de leur corps d'épreuve intérieur, la diminution du volume du liquide intérieur et sa désaération complète ;
- ♦ les exigences formulées sur la diminution du rapport de forme du capteur paraissent satisfaisantes ; à ce titre, on remarque la bonne qualification des mesures réalisées avec les capteurs BE-M, qui présentent un rapport de forme environ cinq fois plus élevé que celui des capteurs prototype du CECP d'Angers ;
- ♦ pour les capteurs destinés aux mesures in situ, il est nécessaire d'optimiser la conception des capteurs pour diminuer la dérive thermique de leur zéro ; le choix d'un liquide de remplissage présentant des caractéristiques de déformabilité thermique adaptées à celles du corps des capteurs, la diminution aussi forte que possible de la précontrainte appliquée et de son volume sont les voies à suivre à cet effet ;
- ♦ pour les capteurs destinés aux mesures in situ, il convient d'intégrer dans les capteurs de pressions totales un capteur de température ; à ce propos, on note que l'industrie des capteurs de pression propose actuellement des solutions technologiques permettant d'assurer la mesure de pression et de température ainsi que le conditionnement des signaux sur un chip piézorésistif ayant une taille égale à celle du capteur Keller PA2 ; la solution de conception comportant un transmetteur-conditionneur installé sur le câble de sortie à l'extérieur des capteurs, afin de diminuer au maximum leur volume, nécessite donc d'être revue à cet effet.

CHAPITRE 4 L'EXPÉRIMENTATION DE LA « TRÉMIE PASTEUR » À ROUEN.....4-1

4.1	ASPECTS GÉNÉRAUX	4-1
4.2	L'OUVRAGE ET SON SITE.....	4-2
4.2.1	<i>Description de l'ouvrage et de son implantation</i>	4-2
4.2.2	<i>Conditions géotechniques du site</i>	4-5
4.2.2.1	Essais in situ	4-5
4.2.2.2	Structure lithologique.....	4-6
4.2.2.3	Hydrologie.....	4-6
4.2.2.4	Caractéristiques géotechniques des sols	4-7
4.3	PROJET DE L'OUVRAGE ET PROJET D'INSTRUMENTATION.....	4-8
4.3.1	<i>Aperçu de l'étude du projet de parois moulées</i>	4-8
4.3.2	<i>Conception de l'instrumentation</i>	4-12
4.3.2.1	Principe et choix du profil instrumenté	4-12
4.3.2.2	Composition de l'instrumentation	4-13
4.4	MISE EN PLACE DES CAPTEURS DE CONTRAINTES TOTALES	4-16
4.4.1	<i>Les capteurs disponibles</i>	4-16
4.4.2	<i>Position des capteurs</i>	4-17
4.4.3	<i>Dispositifs et mode opératoire de mise en place des capteurs</i>	4-18
4.4.3.1	Dispositifs de mise en place des capteurs	4-18
4.4.3.2	Fixation des capteurs sur la cage d'armature.....	4-21
4.4.3.3	Mise en œuvre du panneau instrumenté	4-25
4.4.3.4	Activation des capteurs et mesures initiales (séquence 0)	4-27
4.5	AUTRES DISPOSITIFS DE MESURE.....	4-31
4.5.1	<i>Mise en place des tubes inclinométriques dans les parois</i>	4-31
4.5.1.1	Les dispositifs de mesure de la déformée de la paroi.....	4-31
4.5.1.2	Position des tubes inclinométriques	4-33
4.5.1.3	Mode opératoire d'installation des tubes inclinométriques	4-33
4.5.1.4	Relevés inclinométriques de référence (séquence 0)	4-35
4.5.1.5	Dépouillement des mesures inclinométriques.....	4-36
4.5.2	<i>Mise en place des tubes inclinométriques dans le massif de sol soutenu</i>	4-38
4.5.2.1	Les dispositifs de mesure des déformations du massif soutenu	4-38
4.5.2.2	Position des tubes inclinométriques	4-39
4.5.2.3	Mode opératoire d'installation des tubes inclinométriques	4-39
4.5.2.4	Relevé inclinométrique de référence (séquence 0)	4-40
4.5.2.5	Dépouillement des mesures inclinométriques.....	4-40
4.5.3	<i>Mise en place des systèmes de mesure de la convergence des parois en vis-à-vis</i>	4-40
4.5.3.1	Les systèmes de mesure des déplacements à fil invar	4-40
4.5.3.2	Position des points de mesure.....	4-41
4.5.3.3	Mode opératoire et mesure de référence (phase 0)	4-41
4.5.4	<i>Mise en place des butons instrumentés</i>	4-42
4.5.4.1	Les jauges des déformations sur les butons	4-42
4.5.4.2	Position des points de mesure.....	4-45
4.5.4.3	Équipement en usine des butons expérimentaux	4-46
4.5.4.4	Connexion des jauges au dispositif d'acquisition sur le chantier	4-48
4.5.4.5	Mesure initiale.....	4-49
4.5.4.6	Dépouillement des mesures de déformations sur les butons.....	4-50
4.6	PHASAGE DE MESURE.....	4-52
4.7	COMPORTEMENT OBSERVÉ ET PRÉVISIONS THÉORIQUES	4-52
4.7.1	<i>Mise en œuvre du panneau instrumenté (séquence 0)</i>	4-54
4.7.1.1	Pression exercée dans la boue	4-55
4.7.1.2	Pression exercée par la boue sur le bord vertical de la tranchée	4-56
4.7.1.3	Pressions observées après la montée du béton au-dessus des capteurs.....	4-59
4.7.1.4	Résultats obtenus pendant la réduction à 0 de la pression de vérinage.....	4-66
4.7.1.5	Analyse des résultats expérimentaux obtenus lors du bétonnage du panneau instrumenté.....	4-70
4.7.2	<i>Durcissement du béton (béton jeune)</i>	4-76
4.7.2.1	Séquence 1 : première semaine après le bétonnage	4-76
4.7.2.2	Séquence 2 : mise en œuvre d'un panneau adjacent	4-78
4.7.2.3	Séquence 3 : exécution de la poutre de couronnement.....	4-79
4.7.2.4	Analyse des résultats obtenus avant terrassement.....	4-80
4.7.3	<i>Simulation théorique du comportement du profil expérimental après terrassement</i>	4-83
4.7.4	<i>Pré-terrassement et mise en place des butons instrumentés (séquence 4)</i>	4-90
4.7.4.1	Déformée de la paroi	4-91

4.7.4.2	Pressions totales agissant à l'interface de la paroi	4-93
4.7.4.3	Efforts transmis par les butons à la paroi.....	4-97
4.7.5	<i>Excavation jusqu'au fond de fouille (séquence 5)</i>	4-103
4.7.5.1	Déformée de la paroi et déplacements du massif du sol soutenu	4-103
4.7.5.2	Pressions totales agissant à l'interface de la paroi	4-110
4.7.5.3	Efforts transmis par les butons à la paroi.....	4-113
4.7.6	<i>Corrélation des résultats expérimentaux en phase d'excavation</i>	4-118
4.7.6.1	Aperçu des moyens d'étude disponibles.....	4-118
4.7.6.2	Corrélation expérimentale « variation des efforts – variation des déplacements » (séquence 5 / séquence 4)	4-121
4.7.6.3	Corrélation expérimentale « efforts horizontaux – déplacements engendrés » (séquence 5)	4-127
4.7.7	<i>Comportement subjectif de l'écran en phase d'excavation</i>	4-131
4.7.8	<i>Mise en œuvre du radier (séquence 6)</i>	4-135
4.7.8.1	Déformée de la paroi	4-135
4.7.8.2	Pressions totales agissant à l'interface du sol et de la paroi.....	4-138
4.7.8.3	Efforts transmis par les butons à la paroi.....	4-139
4.7.8.4	Comportement de l'écran après la mise en œuvre du radier	4-143
4.7.9	<i>Dépose des butons (séquence 7)</i>	4-146
4.7.9.1	Déformée de la paroi	4-147
4.7.9.2	Pressions totales agissant à l'interface de la paroi	4-148
4.7.9.3	Déformations rémanentes dans les butons	4-154
4.7.10	<i>Cinq semaines après la dépose des butons (séquence 8)</i>	4-155
4.7.10.1	Déformée des parois et déplacements dans le massif de sol soutenu	4-156
4.7.10.2	Pressions totales agissant à l'interface du sol et de la paroi.....	4-161
4.7.11	<i>Comportement de l'écran après la dépose des butons</i>	4-163

Chapitre 4 L'expérimentation de la « Trémie Pasteur » à Rouen

4.1 Aspects généraux

L'expérimentation réalisée pendant la construction de la « Trémie Pasteur » à Rouen a été conçue pour valider des systèmes de mesure des pressions de sol sur un soutènement en paroi moulée.

Elle fait suite au programme d'essais d'évaluation des capteurs de contraintes totales en conditions de laboratoire (chambre d'étalonnage et centrifugeuse) décrit dans le chapitre 3 et permet d'intégrer à l'analyse les conditions propres aux chantiers (notamment l'influence de la procédure de mise en œuvre des capteurs sur un ouvrage réel), qui sont difficilement reproductibles en laboratoire en respectant les conditions de similitude.

Cette expérimentation vise par ailleurs des objectifs généraux de mesure sur ouvrages réels : approfondissement des connaissances sur le comportement mécanique des ouvrages et validation des modèles de calcul.

L'analyse de plusieurs projets de parois moulées a permis de retenir pour l'instrumentation le chantier de la « Trémie Pasteur », qui fait partie de l'aménagement de l'axe est – ouest de transport en commun en site propre de Rouen (projet « TEOR »).

La construction de la « Trémie Pasteur » a été réalisée de janvier à octobre 2000 par le groupement d'entreprises, QUILLERY – SOLETANCHE BACHY – QUILLE. L'expérimentation a été menée par le LCPC en partenariat avec SOLETANCHE BACHY, qui a pris en charge les sujétions liées à l'instrumentation, et le CETE

Normandie-Centre (CER de Rouen et LRPC de Rouen) qui a réalisé la mise en place et le suivi des appareillages pour les différentes phases de mesure.

4.2 L'ouvrage et son site

4.2.1 Description de l'ouvrage et de son implantation

Le projet de la « Trémie Pasteur » consiste en l'aménagement souterrain de l'artère routière du Quai Gaston Boulet, sur la rive droite de la Seine (Fig. 4-1) de façon à libérer le niveau de surface pour la réalisation de la ligne de transport en commun en site propre.

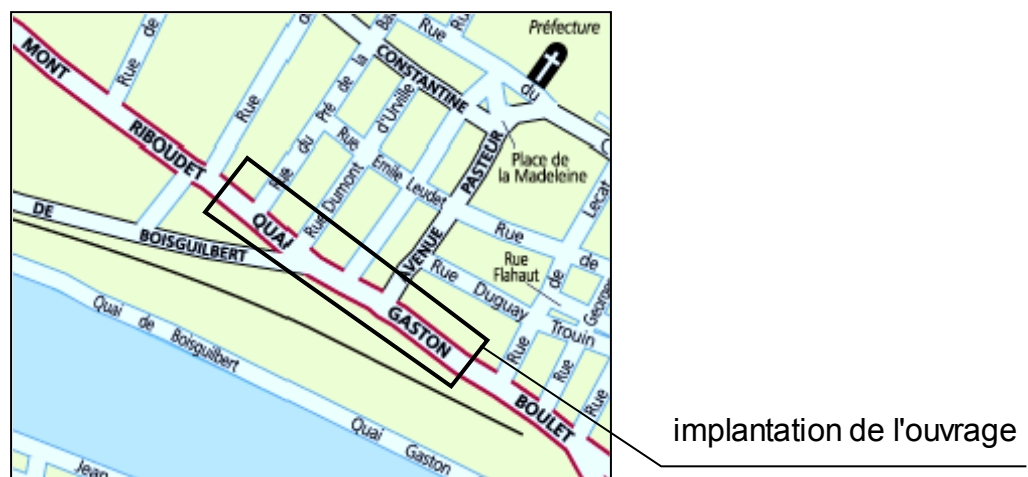


Fig. 4-1 : Plan de situation de l'ouvrage

Le tronçon souterrain a une longueur d'environ 320 m et présente deux profils transversaux caractéristiques :

- ♦ une tranchée couverte dans la zone centrale, sur une longueur de 158 m, permettant l'intersection dénivelée avec la rue Dumont d'Urville et l'avenue Pasteur ;
- ♦ une tranchée ouverte aux deux extrémités de la zone centrale, pour rejoindre les interconnexions en surface avec l'avenue du Mont Riboudet et avec le Quai Gaston Boulet.

Sur toute sa longueur, la voie routière est réalisée à l'intérieur d'une «trémie» de protection en béton armé comportant (Fig. 4-2) :

- ♦ un radier rigide en béton armé d'épaisseur variant entre 0,45 m (aux 2 extrémités de l'ouvrage) et 0,70 m (dans la zone centrale) ;
- ♦ deux murs de soutènement en paroi moulée encadrant parallèlement la voie de circulation ; leur hauteur est comprise entre 5 m (aux deux extrémités de l'artère) et 16 m (dans la zone centrale), tandis que leur épaisseur varie de 0,60 m (aux deux extrémités) à 0,80 m (dans la zone centrale).

Pendant l'excavation du sol entre les parois et jusqu'à la mise en service du radier, les parois sont soutenues provisoirement par des butons fixés entre les panneaux situés en vis-à-vis.

Le phasage de réalisation de l'ouvrage est alors le suivant :

1. réalisation des parois moulées ;
2. couronnement des parois moulées en béton coffré ;
3. pré Terrassement jusqu'au-dessous de la cote de butonnage ;
4. mise en place des butons ;
5. terrassement jusqu'à la cote de fondation du radier ;
6. coulage du radier ;
7. coulage de la dalle de couverture (seulement pour la zone en tranchée couverte) ;
8. dépose des butons après durcissement du radier en béton.

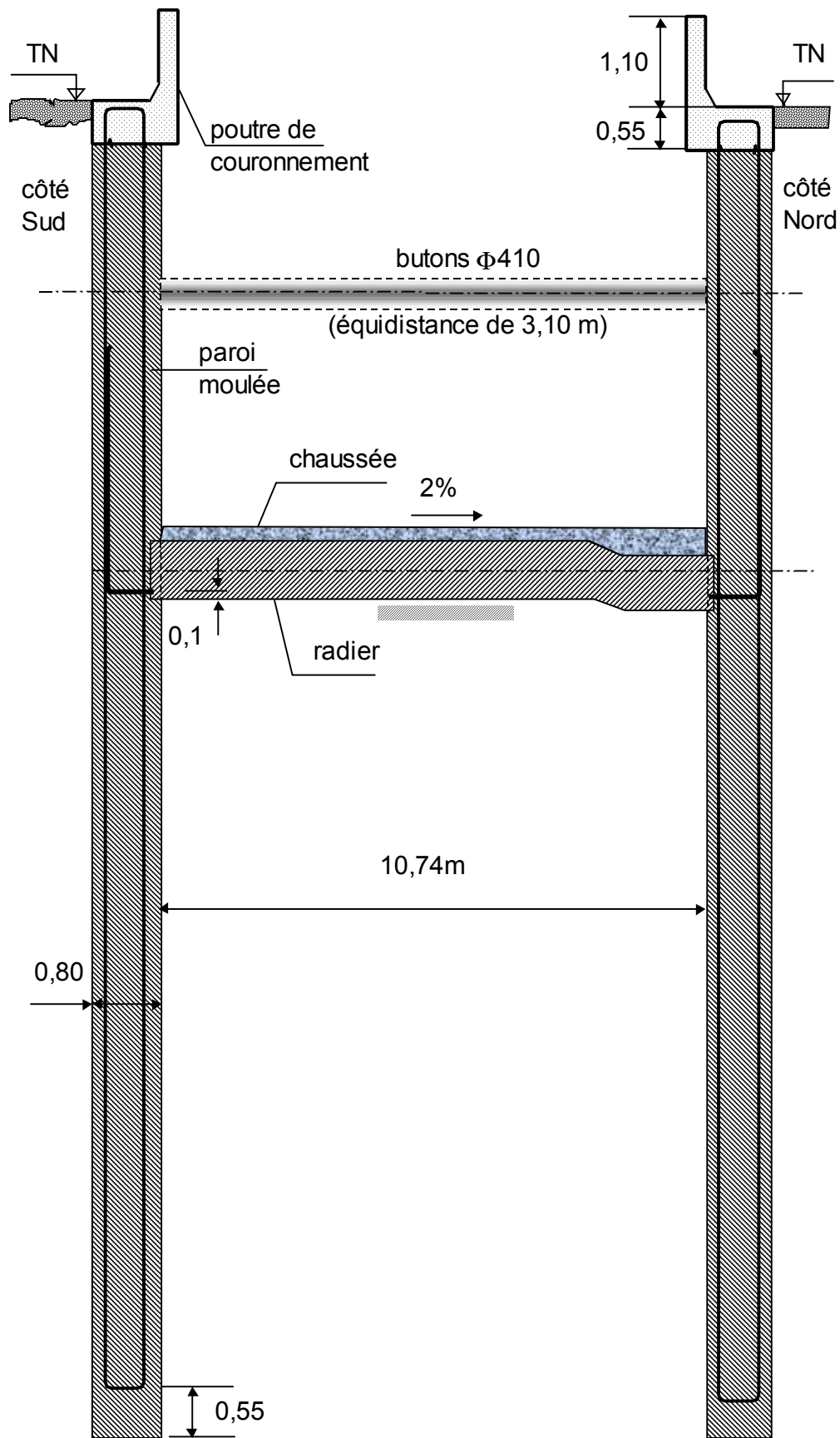


Fig. 4-2 : La «Trémie Pasteur» : coupe transversale dans la zone en tranchée ouverte
(aux environs du profil instrumenté)

4.2.2 Conditions géotechniques du site

L'ouvrage est implanté dans une zone alluvionnaire de la vallée de la Seine. Il s'agit de dépôts récents de 15,5 m d'épaisseur reposant sur un substratum de marnes sableuses.

Une étude géotechnique préliminaire, basée sur une campagne d'investigation réalisée le long du tracé, a permis de caractériser les conditions de fondation de l'ouvrage.

4.2.2.1 Essais in situ

La campagne d'investigation sur site a comporté :

- ♦ 8 sondages de reconnaissance géologique réalisés à la tarière hélicoïdale continue de 200 mm de diamètre jusqu'à une profondeur de 15 à 16 m, avec prise d'échantillons tous les 50 cm ;
- ♦ 6 sondages pressiométriques avec essais tous les 1,50 m jusqu'à une profondeur de 18 m ;
- ♦ 2 sondages carottés jusqu'à des profondeurs respectives de 18,5 m et de 16 m (carottier poinçonneur à piston) avec prélèvement d'échantillons intacts ($\phi 115$ mm) au-dessous de la couche superficielle de remblais ; dans chacun de deux sondages ont été installés des piézomètres ouverts, crépinés respectivement entre 16 et 18,5 m de profondeur et entre 13,5 et 16 m de profondeur ;
- ♦ 2 profils de cohésion non drainée, mesurée au scissomètre de chantier, jusqu'à une profondeur de 10,5 m ; dans chacun des deux profils a été installé, à l'issue des essais, un piézomètre court (3m de profondeur) au sein des remblais ;
- ♦ le suivi de la pression interstitielle à l'aide de 2 capteurs installés respectivement à 7 m et à 12 m de profondeur, dans un forage réalisé à la tarière hélicoïdale ;
- ♦ 2 piézomètres ouverts entre 4 et 5,50 m de profondeur ;
- ♦ 12 essais de perméabilité LEFRANC réalisés à différentes profondeurs allant de 4,2 m à 18,5 m dans les 2 sondages scissométriques et les 2 tubes piézométriques.

4.2.2.2 Structure lithologique

Les sondages réalisés ont permis de préciser la structure lithologique du terrain le long de l'ouvrage. Quatre couches de composition assez variable le long de l'ouvrage, reposant sur un substratum de marnes sableuses à plus de 15,5 m de profondeur ont été identifiées.

Dans la zone de l'ouvrage retenue pour l'instrumentation, qui se trouve aux environs du sondage pressiométrique PR₂ et approximativement à mi-distance entre les sondages à la tarière T₂ et T₃, on distingue, au-dessous de la structure de chaussée existante (d'épaisseur 0,6 m), les couches suivantes (Fig. 4-4) :

- ♦ couche 0 : remblais sableux et limoneux comportant des débris divers et présentant une épaisseur de 1,9 m ;
- ♦ couche 1 : argile limoneuse, grise, organique et tourbeuse, présentant une épaisseur d'environ 5 m ;
- ♦ couche 2 : limon argileux et sableux présentant une épaisseur d'environ 6,1 m ;
- ♦ couche 3 : graves sablo-limoneuses ayant une épaisseur de 2,2 m ;
- ♦ couche 4 : marnes sableuses grises à blanches calcaires, à partir d'une profondeur d'environ 15,8 m.

4.2.2.3 Hydrologie

Le site est parallèle au cours de la Seine (à une distance d'environ 200 m), qui subit l'effet des marées. Par ailleurs, les différentes nappes aquifères, régnant dans les différentes couches non argileuses, sont en interconnexion par les séquences sableuses ou les passages tourbeux des limons organiques. On note aussi la localisation du site dans une région très pluvieuse.

Ces raisons, qui rendent difficile l'interprétation d'un suivi piézométrique de longue durée, ont conduit à procéder seulement à des suivis ponctuels de la pression interstitielle pendant un à quelques jours au mois d'août 1999.

Les résultats des observations effectuées aux environs du profil instrumenté pour une variation du niveau de la Seine de 3,20 m (de 0,22 m à 3,42 m NGF) sont les suivantes :

- ♦ le niveau de la nappe dans les remblais varie de seulement 0,28 m (de 3,45 à 3,73 NGF ; profondeur moyenne de la nappe à 2,20 m du niveau du terrain naturel) ;
- ♦ le niveau piézométrique dans les graves sablo-limoneuses varie de 0,98 m ; il se situe entre 1,96 et 2,94 NGF ;
- ♦ le niveau piézométrique dans les marnes sableuses varie de 1,64 m (de 1,81 à 3,45 NGF) indiquant une perméabilité assez élevée du substratum.

Les deux capteurs de pression interstitielle installés dans un sondage situé aux environs de l'intersection de la trémie avec l'avenue Pasteur (à une distance d'environ 120 m du profil instrumenté) indiquent des variations de pression de très faible amplitude :

- ♦ à la profondeur de 7 m (dans la couche argileuse), on constate une pression interstitielle oscillant autour de 55 kPa et correspondant à un niveau piézométrique situé à 1,5 m sous le niveau du terrain naturel) ;
- ♦ à la profondeur de 12 m (dans la couche de limon argileux), la pression interstitielle vaut environ 86 kPa, ce qui correspond à un niveau piézométrique situé à 3,4 m sous le niveau du terrain naturel.

Ces résultats ont permis d'estimer le niveau piézométrique de référence à une profondeur de 2,05 m sous le niveau du terrain naturel (3,75 m NGF).

4.2.2.4 Caractéristiques géotechniques des sols

Les échantillons de sol prélevés à la tarière et par carottage ont fait l'objet d'essais de caractérisation géotechnique en laboratoire.

Les paramètres de résistance au cisaillement (c et ϕ) ont été déterminés par des essais triaxiaux de type CU+u permettant d'estimer leurs valeurs apparentes à court et à long terme.

Le tableau 4-1 présente les valeurs moyennes de ces paramètres estimés par rapport à l'ensemble des échantillons prélevés sur le site. Les valeurs de calcul proposées pour la cohésion non drainée c_u sont cohérentes avec les valeurs estimées in situ par les essais scissométriques dans les couches d'argile et limon.

Tableau 4-1 : Caractéristiques géotechniques des couches de sol

Couche	Niveau assise NGF	γ (kN/m^3)	ϕ	ϕ'	c_u	c'	α	E_M	p_l
			court terme	long terme	court terme	long terme			
	(m)	(deg)	(deg)	(kPa)	(kPa)	(-)	(MPa)	(MPa)	
Terrain naturel (TN)	5,79								
Corps chaussée existante	5,19	24,0	-	-	-	-	0,33	-	-
Remblais sableux limoneux	3,29	20,5	0	27	55	10	0,33	4,4	0,32
Argile limoneuse tourbeuse	-1,71	16,0	0	20	21	0	0,66	2,1	0,12
Limon argileux et sableux	-7,81	19,5	0	25	40	0	0,50	3,9	0,43
Graves sablo-limoneuses	-10,01	22,0	35	35	0	0	0,33	19,5	3,04
Marnes sableuses	-	22,0	0	25	300	100	0,50	96,8	>5

Ce tableau contient par ailleurs la lithologie et les caractéristiques pressiométriques relevées dans le profil pressiométrique PR₂ (voir 4.2.2.2), situé au voisinage du futur profil instrumenté. On remarque la dispersion importante des caractéristiques pressiométriques (et, notamment, celles dans la couche d'argile) à travers les 6 sondages effectués.

4.3 Projet de l'ouvrage et projet d'instrumentation

4.3.1 Aperçu de l'étude du projet de parois moulées

Dans la zone retenue pour l'instrumentation, l'ouvrage présente une structure en trémie ouverte constituée par les deux parois moulées encastrées dans le radier soutenant la voie de circulation.

Les parois sont été ancrées dans la couche de marne sur une hauteur supérieure à 0,30 m. On a associé aux parois qui encadrent la voie deux écrans transversaux (ancrés dans

les marnes sur une même profondeur), disposés aux deux extrémités de l'ouvrage pour former avec les parois longitudinales un caisson en béton armé étanche limitant les venues d'eau sous le radier.

Le dimensionnement des parois a été réalisé d'une façon classique, en considérant qu'elles sont sollicitées en flexion par les actions suivantes :

- ♦ les pressions exercées par le sol sur l'écran (qui obéissent aux hypothèses de la méthode aux modules de réaction) ;
- ♦ la pression interstitielle et la sous-pression agissant au-dessous du radier, dans l'hypothèse où la nappe se trouve respectivement à 3,75 NGF (phases travaux et en service normal) et à 5,00 NGF (exceptionnel) ;
- ♦ les charges circulant derrière la paroi (10 kPa pour les phases de travaux et 35 kPa pour l'ouvrage en service supportant un convoi exceptionnel de type D);
- ♦ le poids propre de la nouvelle voie (6,5 kPa) et les charges circulant au-dessus (22 kPa) ;
- ♦ l'effet du choc accidentel d'un véhicule sur le parapet de la poutre de couronnement des parois ($F_h = 50 \text{ kN/m}$ et $M = 25 \text{ kNm/m}$).

Pour le dimensionnement de l'écran, on a considéré un schéma statique de poutre libre en déplacement horizontal et en rotation en pied, soutenue latéralement pendant les phases provisoires par des appuis élastiques au niveau de butonnage. Après l'enlèvement des butons, l'écran retrouve son appui élastique au niveau du radier.

Le comportement mécanique de l'ouvrage a été évalué pour quatre schémas de sollicitations correspondant aux phases des travaux et pour sept schémas de sollicitations pour l'ouvrage en service, correspondant aux différentes combinaisons d'actions qui pouvaient intervenir simultanément.

Etant donné la pente longitudinale imposée à l'artère routière (environ 3,8 %) dans cette zone, qui détermine la variation de la hauteur libre de la paroi et de la profondeur de son point d'appui horizontal (au niveau du radier), et, par conséquent, la variation

des efforts agissant le long de l'ouvrage, le calcul est réalisé dans deux coupes transversales (C_1 – située au voisinage du tympan ouest de l'ouvrage traversant les panneaux S78 et N78 et C_2 – située à une distance d'environ 22 m au niveau des panneaux S85 et N85 ; Fig. 4-3).

La réponse de la paroi sous l'action des sollicitations a été estimée par un calcul simplifié basé sur l'utilisation de la méthode des coefficients de réaction à l'aide d'un logiciel spécialisé (« Paris »). Les coefficients de réaction du sol ont été estimés conformément aux recommandations LCPC pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement (juillet 1984), en tenant compte pour les phases provisoires de la présence des butons (voir la note de calcul NC107-C).

Les phases de travaux qui ont fait l'objet d'un calcul lors de l'étude du projet et qui intéressent l'expérimentation sont les suivantes :

1. préterrassément pour la mise en place des butons (2,5 NGF pour la coupe C_1 et 3,1 NGF pour la coupe C_2) ;
2. mise en place des butons et excavation au fond de fouille (-0,80 NGF pour la coupe C_1 et 0,00 NGF pour la coupe C_2) ;
3. mise en œuvre du radier et dépose des butons.

Dans la zone instrumentée, le projet prévoit des panneaux de parois moulées présentant une épaisseur de 0,80 m et une profondeur (en dessous de la cote de recépage) de 15,55 m. Elles sont équipées de cages d'armatures préfabriquées de type « H » (carcasse 15,45 m x 2,60 m x 0,66 m à base de filants $\phi 25$ en acier Fe E 500 MPa) espacées de 0,50 m. Le béton utilisé est de type B32, avec un dosage en ciment de 400 kg/m³, un agrégat 0/20 mm et une consistance fluide. Les butons sont des tubes en acier à section circulaire (diamètre extérieur de 410 mm et diamètre intérieur de 387 mm).

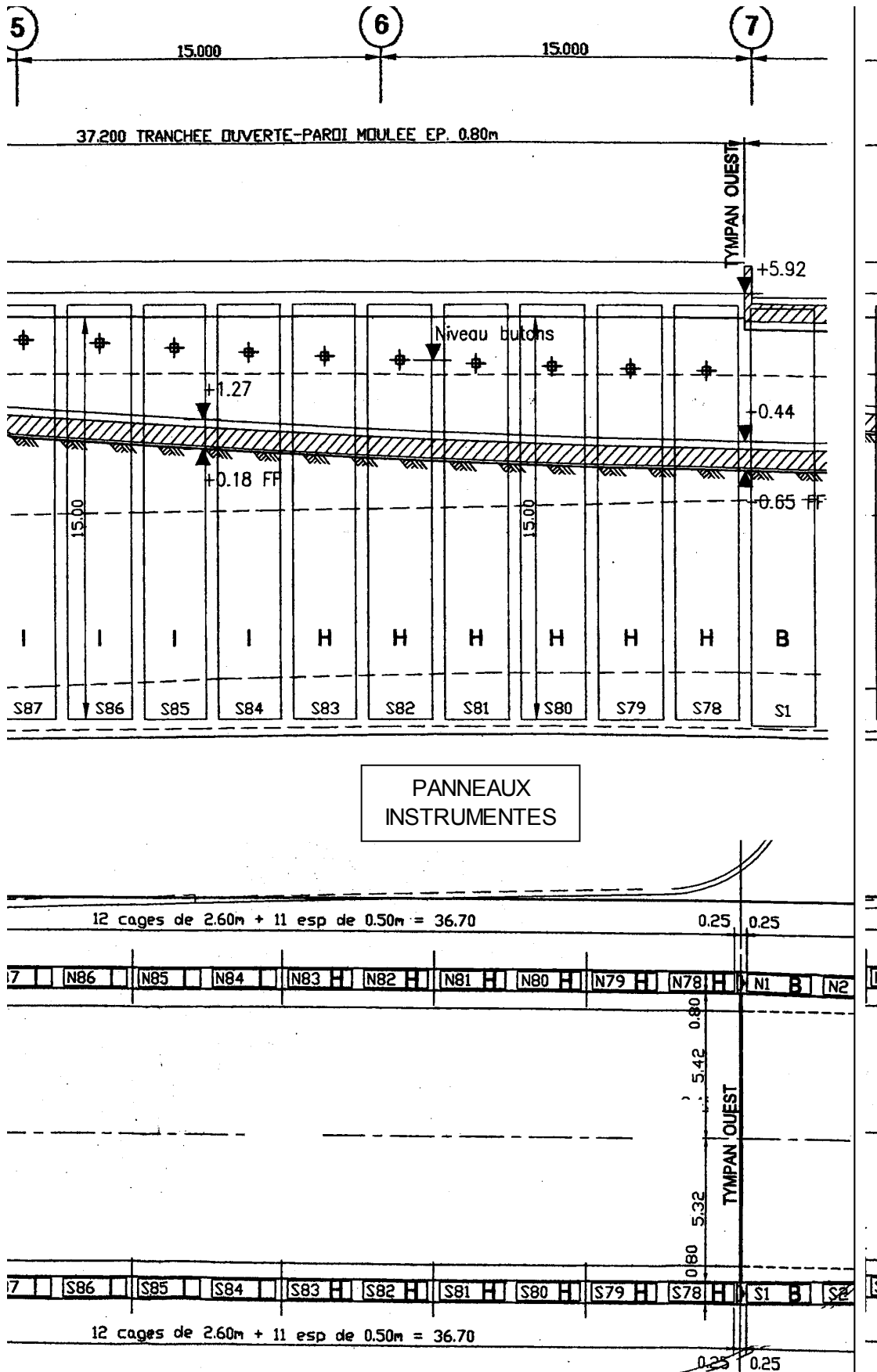


Fig. 4-3 : Vues en élévation (paroi moulée côté sud) et en plan de l'ouvrage aux environs du profil instrumenté

4.3.2 Conception de l'instrumentation

4.3.2.1 Principe et choix du profil instrumenté

L'idée directrice de la conception du projet d'instrumentation a été de se donner les moyens d'étudier la pertinence des mesures de pressions totales exercées par les sols sur la paroi à tout en restant dans un budget limité¹.

Une recherche sur le marché des capteurs de pressions totales et une étude bibliographique ont permis de sélectionner les produits les mieux adaptés à ce type d'ouvrage. Ils ont été soumis, au préalable, à un programme d'essais en laboratoire (chapitre 3).

L'instrumentation a été définie avec deux idées :

- ♦ équiper un profil de l'ouvrage de moyens de mesure donnant accès aux efforts horizontaux qui concourent à son équilibre en phase butonnée (il s'agit notamment de la phase précédant le coulage du radier) ;
- ♦ équiper l'ouvrage de moyens de mesure (reconnus comme fiables) donnant accès à ses déformations, afin de permettre une étude de corrélation expérimentale avec les mesures des pressions totales.

On a retenu pour l'instrumentation un profil en tranchée ouverte situé dans la zone ouest de l'ouvrage, au voisinage de la zone centrale en tranchée couverte. Il a été choisi approximativement à mi-distance entre les deux profils de calcul de l'étude du projet (C_1 et C_2) comme un compromis entre la nécessité d'être suffisamment éloigné du tympan de l'ouvrage et le souhait de disposer d'une hauteur libre importante.

Les vues en plan et en élévation de l'ouvrage aux environs de la zone instrumentée sont présentées sur la figure 4-3.

¹ Il n'était pas envisageable d'équiper la paroi de plusieurs dizaines des capteurs « noyés » dans le béton pour rassembler des informations essentiellement qualitatives sur son comportement.

L'essentiel de l'équipement de mesure est installé dans le panneau S81 (côté sud). Des équipements additionnels, peu coûteux, mais qui permettent de bénéficier de redondance dans l'interprétation des mesures, ont été prévus pour les panneaux adjacents S82 et S83 ainsi que pour ceux situés en vis-à-vis, N81, N82 et N83.

4.3.2.2 Composition de l'instrumentation

Les mesures suivantes ont été prévues :

- ◆ un suivi des pressions appliquées par le sol à la paroi à différentes profondeurs dans le panneau S81 (6 capteurs de contraintes totales) ;
- ◆ un suivi des déformations longitudinales sur trois butons successifs (panneaux 80, 81 et 82) ; les butons sont équipés à chaque extrémité de 4 jauges ;
- ◆ un suivi de l'inclinaison de la paroi en fonction de la profondeur pour deux panneaux successifs côté sud et nord (1 tube inclinométrique dans chacun des panneaux S81, S82, N81 et N82) ;
- ◆ des mesures de convergence entre le panneau instrumenté et le panneau situé en vis-à-vis (fil invar) pour 3 panneaux successifs (81,82 et 83 côtés sud et nord) ;
- ◆ un suivi des déformations du massif de sol soutenu par la paroi côté sud (2 tubes inclinométriques installés derrière la paroi).

Les mesures sont acquises en discontinu, à l'exception des déformations longitudinales dans les butons, qui ont fait l'objet d'une acquisition en continu.

L'implantation des équipements des mesure sur une coupe transversale de l'ouvrage est présentée dans les figures 4-4 (capteurs de pressions totales) et 4-5 (équipements complémentaires).

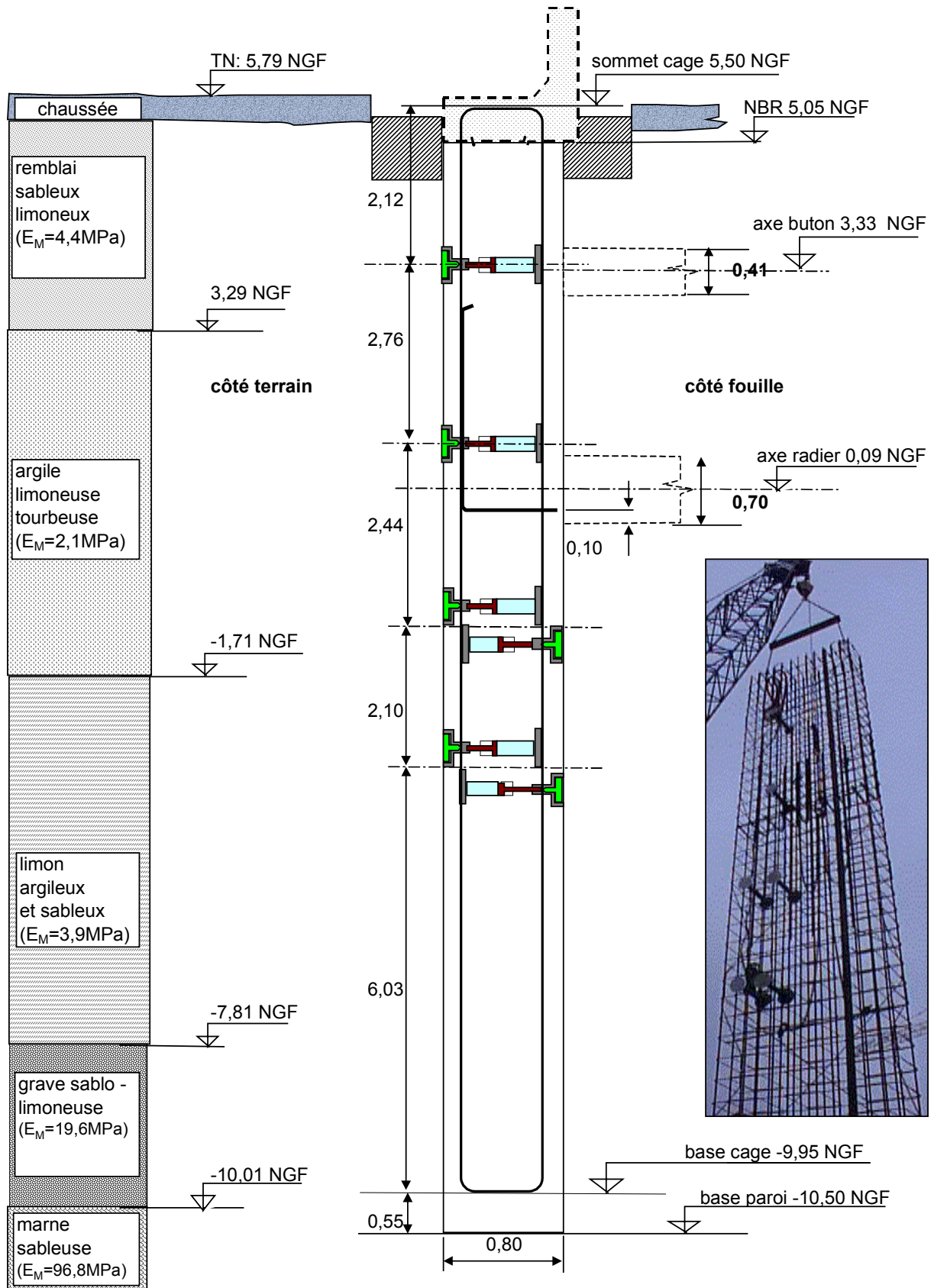


Fig. 4-4 : Schéma d'implantation des capteurs de contraintes totales dans le panneau S81 (coupe transversale et vue en élévation de la cage équipée avant la descente) et coupe lithologique du terrain à cet endroit (profil PR₂)

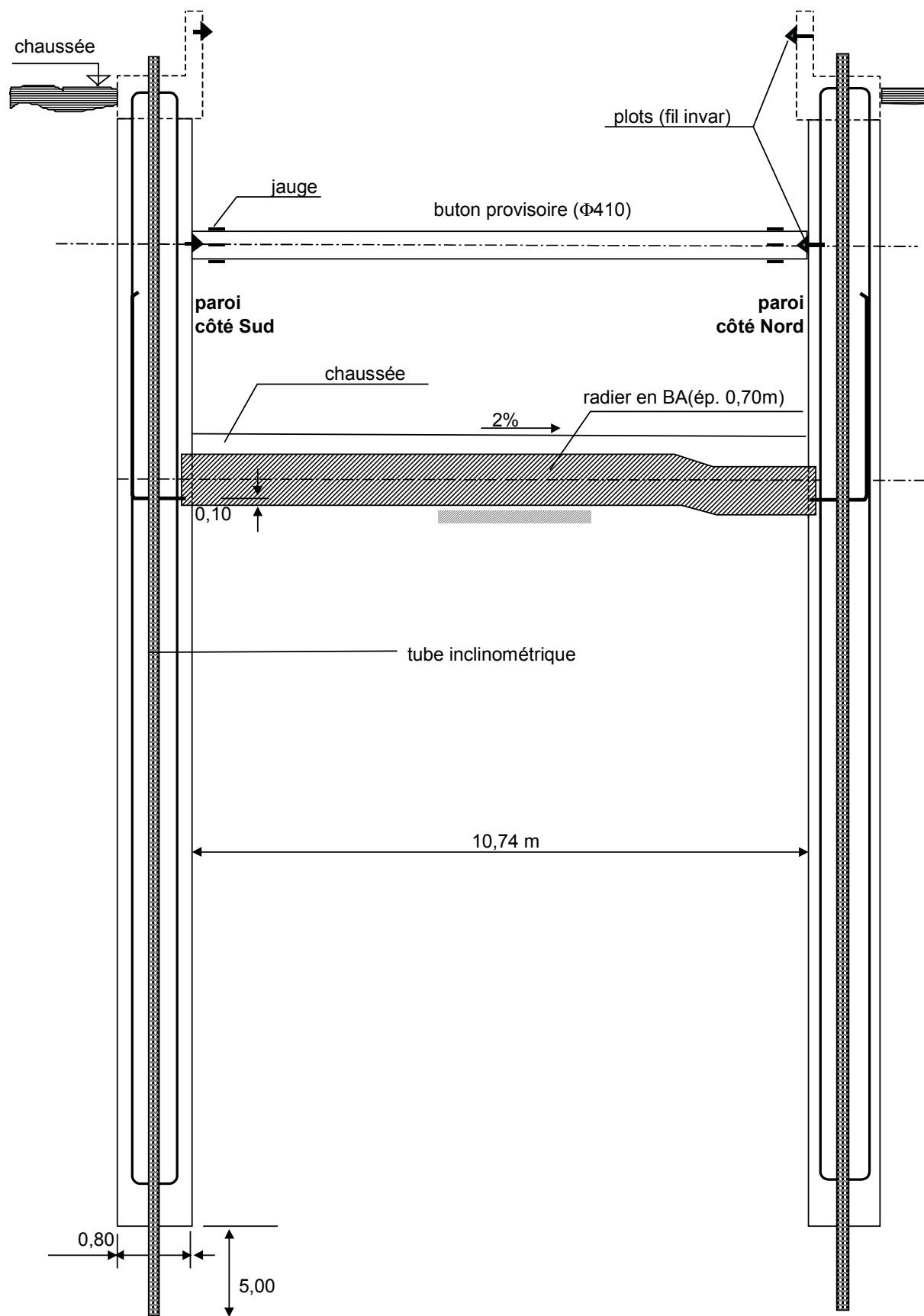


Fig. 4-5 : Coupe transversale de l'ouvrage dans la zone instrumentée et implantation des équipements complémentaires aux capteurs de contraintes totales

4.4 Mise en place des capteurs de contraintes totales

4.4.1 Les capteurs disponibles

L'étude d'évaluation préliminaire des capteurs de contraintes totales disponibles sur le marché (Annexe 2-1) a permis de sélectionner deux types de capteurs, proposés respectivement par les sociétés Kyowa et Slope Indicator / Interfels.

Pour cette expérimentation, on a disposé de deux capteurs de type « Kyowa BE-5KF » (nommés ci-après K_2 et K_5 respectivement) et de 4 capteurs « Slope Indicator / VW Jack-Out Total Pressure Cell– 52618230 » (nommés ci-après respectivement SI_0 , SI_1 , SI_2 et SI_3).

Les caractéristiques principales des deux types de capteurs sont présentées dans le tableau 4-2, tandis que les feuilles d'étalonnage de chaque capteur sont dans l'Annexe 4-1.

Deux moyens d'acquisition des signaux provenant des capteurs ont été utilisés :

- ♦ pour les capteurs Slope Indicator, on utilise un dispositif de type « Slope Indicator / VW Portable Indicator » permettant seulement la lecture manuelle des fréquences de vibrations et des températures (sondes de température de type RTD) ;
- ♦ pour les capteurs Kyowa, on fait appel à une acquisition automatique permettant l'enregistrement séquentiel des mesures sur un ordinateur.

Avant leur installation dans la paroi, les capteurs ont fait l'objet d'essais d'évaluation en laboratoire (chapitre 3). Leur réponse a été analysée en milieu fluide à plusieurs températures ainsi qu'en présence de sable, en chambre d'étalonnage et en centrifugeuse, sous l'action des sollicitations contrôlées.

Tableau 4-2 : Caractéristiques générales des capteurs (données des fabricants)

Caractéristique	Kyowa BE-5KF	Slope Indicator VW Jack-Out Cell
étendue de mesure (EM)	0-490 kPa	0-690 kPa
domaine de non-détérioration	0-1100 kPa	0-13800 kPa
incertitude globale	±1% (EM)	±0,5% (EM)
principe de conception liquide de remplissage	action indirecte mercure	action indirecte éthylène glycol
transducteur	jauges à trame pelliculaire (pont Wheatstone complet)	corde vibrante
sonde de température	-	RTD - inclus
dérive thermique du 0 (kPa/°C)	0,056 ; 0,150 *	0,022 ; 0,120 ; 0,041 ; 0,022
épaisseur coussin	2,5 cm	1,1cm
encombrement total (transducteur et raccord)	7,6 cm	18 cm
diamètre total	20 cm	23 cm
diamètre surface active	16,9 cm	23 cm

* - caractéristiques évaluées par essai hydrostatique lors de la réception des capteurs

4.4.2 Position des capteurs

Les capteurs ont été implantés suivant un seul profil de mesure situé dans le panneau S81 (la paroi côté sud de l'axe routier). Les six capteurs ont été répartis suivant la profondeur de la paroi à quatre niveaux de mesure espacés d'une distance de 2 à 3 m (Fig. 4-4) :

- ♦ les capteurs K₂, K₅, SI₁ et SI₃ sont disposés à l'interface de la paroi avec le massif de sol soutenu ;
- ♦ les capteurs SI₀ et SI₂ sont placés à l'interface de la paroi avec le sol côté opposé (fouille), aux mêmes profondeurs que SI₁ et SI₃.

Les capteurs installés côté terrain sont décalés de 36 cm dans une section horizontale par rapport aux capteurs installés côté fouille (Fig. 4-6).

Ce schéma d'implantation a été choisi à partir d'une analyse des distributions des pressions de sol sur l'ouvrage prévues par l'étude de projet. Les points de mesure ont été répartis suivant la profondeur dans la zone de la paroi où l'on attend des variations

significatives des pressions entre les phases de réalisation de l'ouvrage. Par ailleurs, les capteurs ont été placés au-dessus du point d'effort tranchant nul de la paroi, de façon à pouvoir comparer la résultante des pressions mesurées avec l'effort de butonnage.

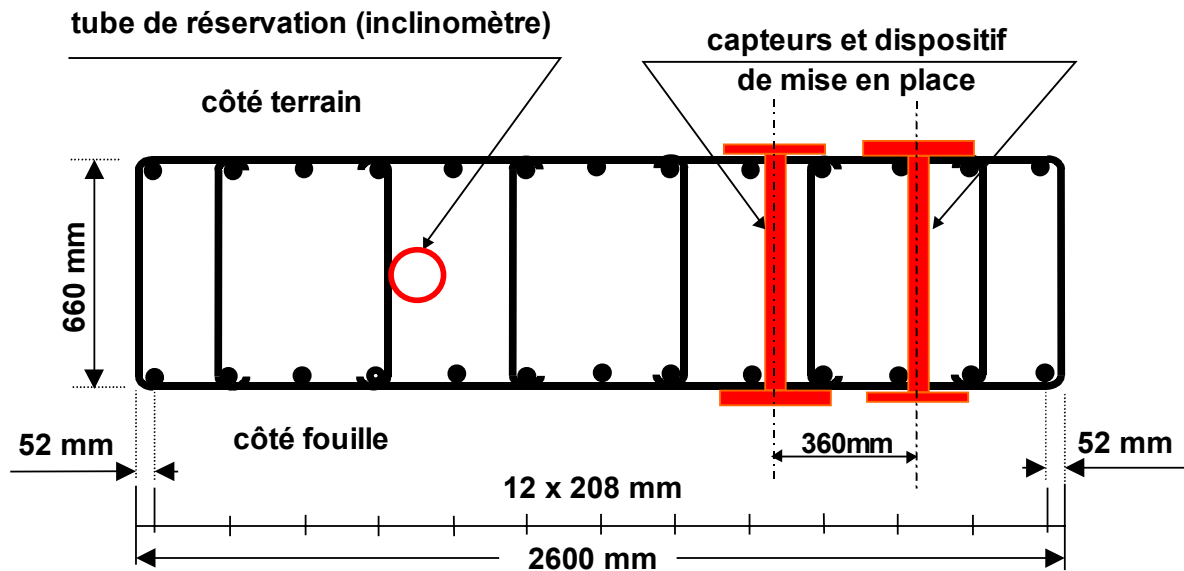


Fig. 4-6 : Position des systèmes de mesure dans la cage S81 (vue en plan)

4.4.3 Dispositifs et mode opératoire de mise en place des capteurs

L'installation des capteurs à l'interface paroi/sol nécessite l'utilisation de dispositifs spéciaux et une procédure de mise en place comportant trois étapes successives :

- ◆ fixation des capteurs sur la cage d'armature ;
- ◆ mise en place de la cage équipée ;
- ◆ mise en contact à pression contrôlée des capteurs avec le sol.

4.4.3.1 Dispositifs de mise en place des capteurs

La mise en place des capteurs fait appel à des dispositifs de montage (Fig. 4-7) qui sont intégrés dans l'ouvrage au moment du bétonnage de la paroi. Ces dispositifs sont destinés, d'une part, à la fixation des capteurs sur la cage et, d'autre part, à leur mise en contact avec le sol après la descente et la pose de la cage sous boue.

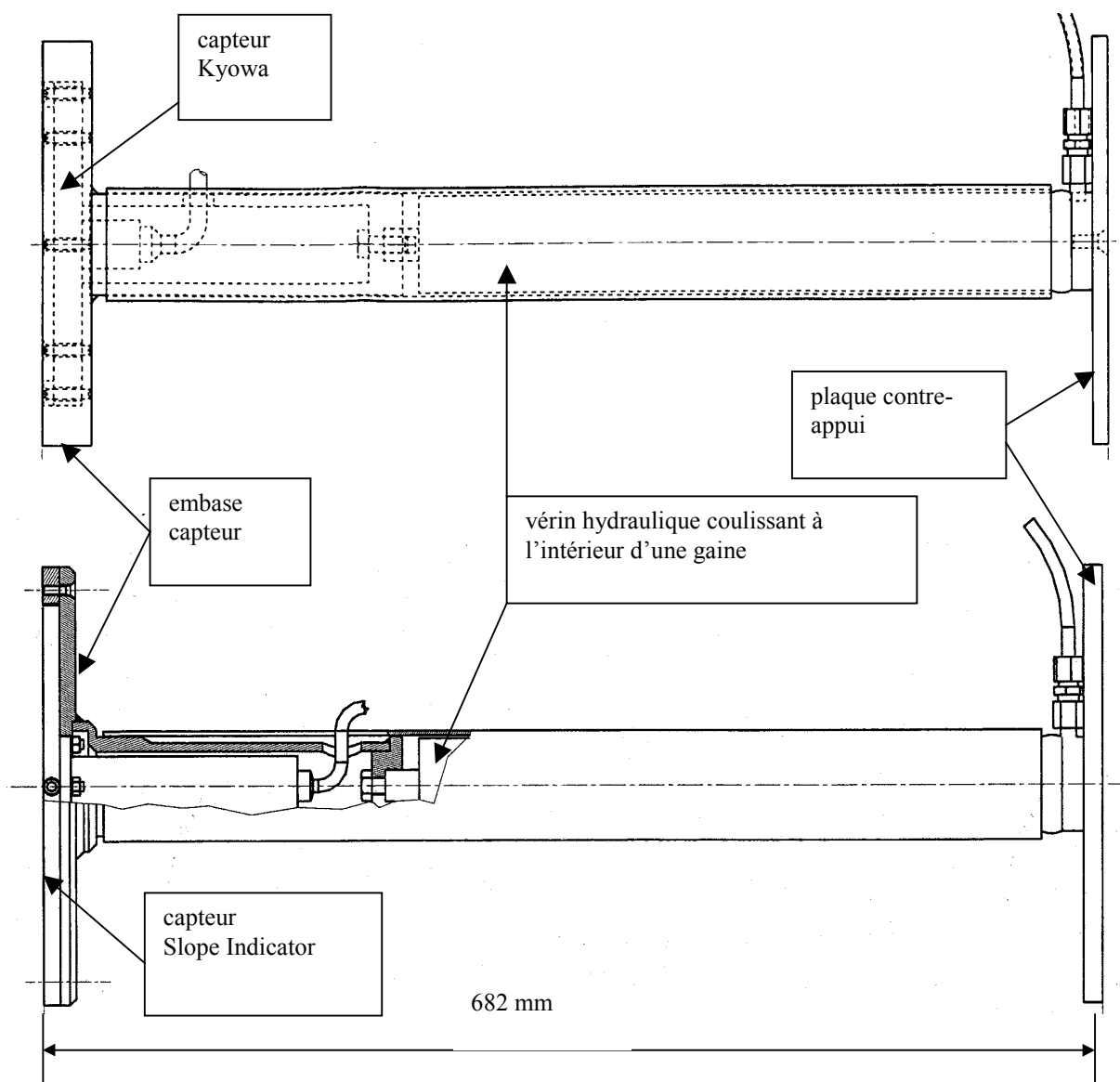


Fig. 4-7 : Dispositifs de mise en place des capteurs de contraintes totales pour un capteur Kyowa (en haut) et pour un capteur Slope Indicator (en bas).

On distingue les sous-ensembles suivants :

a) Embase du capteur

Un disque à trou central est utilisé comme embase du capteur. Il assure en même temps la connexion au vérin. Le disque présente une géométrie adaptée à la forme de chaque type de capteur (diamètre supérieur de 5 cm à celui de capteur, c'est-à-dire 28 cm pour les capteurs Slope Indicator et 25 cm pour les capteurs Kyowa).

Le trou central permet le passage du raccord à travers l'embase. Un tube métallique soudé à l'embase autour de son trou central permet, d'une part, la protection du raccord

électrique du capteur et, d'autre part, la fixation de l'embase, au moyen d'une vis, en tête de la tige du vérin hydraulique.

b) Couronne de protection du capteur

Une couronne fixée à l'embase par des vis entoure chaque capteur et protège sa surface latérale contre l'action des sollicitations transversales (susceptibles de parasiter la mesure des sollicitations normales). De plus, en phase de bétonnage, la couronne sert d'écran à la pénétration du béton fluide vers la surface active du capteur.

Pour les capteurs Kyowa, la couronne sert aussi à les fixer à l'embase par vissage (les capteurs Slope Indicator sont fixés à l'embase par collage).

Les couronnes présentent un diamètre extérieur égal à celui de l'embase, un diamètre intérieur et une épaisseur adaptés à la géométrie de chaque type de capteur.

c) Vérin hydraulique pour la mise en contact du capteur avec le sol

La mise en contact des capteurs avec le bord vertical de la tranchée à une pression contrôlée est réalisée en actionnant des vérins hydrauliques. Ces vérins sont commandés à distance en utilisant de l'eau comme agent hydraulique (l'utilisation d'eau est préférable dans un premier temps pour tester l'absence de fuite dans les tubulures ; dans un deuxième temps, il convient de lui substituer de l'air afin d'éviter de mettre en pression les vérins à la descente de la cage). Leurs caractéristiques sont adaptées à la configuration du projet :

- ♦ diamètre du piston de 5 cm ;
- ♦ longueur (tige retirée) de 45 cm ;
- ♦ course de 35 cm ;
- ♦ pression de service 0 –80 bars ;
- ♦ raccord au tuyau flexible (80 bars) de longueur convenable pour l'action des vérins à une distance d'environ 25 m.

Ils permettent d'obtenir une pression de contact sol / surface active du capteur allant

jusqu'à 250 kPa pour les capteurs Slope Indicator et jusqu'à 320 kPa pour les capteurs Kyowa.

Des trous filetés sont pratiqués dans la tête de la tige et dans la base des vérins pour leur connexion par vissage à l'embase du capteur, d'une part, et à la plaque de contre-appui, d'autre part.

d) *Plaque de contre-appui du vérin*

Habituellement, l'effort de réaction dans les vérins est transféré sur le bord vertical de la tranchée située en vis-à-vis du capteur. Il doit être réparti sur une surface suffisante afin de ne pas poinçonner le sol. Une plaque de contre-appui d'un diamètre égal à celui de l'embase de fixation du capteur est prévue à cet effet.

Cependant, la structure lithologique du site comportant (pour la plupart des niveaux de mesure) des terrains médiocres (Fig. 4-4) la surface de calage a été modifiée. Dans ce projet, au lieu de prendre appui contre le sol, les plaques ont été fixées directement sur la cage d'armature par soudure.

e) *Gaine de guidage du système de mesure soudée sur la cage*

Une gaine profilée à section carrée (70 mm x 70 mm x 3 mm) soudée à la cage (entre deux filants situés en vis-à-vis) permet la mise en place et le guidage des systèmes de mesure.

4.4.3.2 Fixation des capteurs sur la cage d'armature

L'installation des capteurs sur la cage d'armature du panneau S81 a suivi la procédure ci - après.

a) *Mise à disposition du matériel*

Les capteurs, leurs dispositifs de mise en place, ainsi que la cage à équiper ont été livrés une semaine avant la date programmée pour la mise en œuvre du panneau expérimental (soit le 29/02/2000), afin de disposer d'un intervalle de temps suffisant pour le montage des systèmes des mesures et la vérification de leur fonctionnement.

La cage, équipée en usine d'un tube de réservation pour les mesures inclinométriques (Fig. 4-6), a été posée le long des murettes guide (exécutées en vue de l'exécution à venir d'un autre tronçon de paroi moulée). De cette manière, on a pu utiliser l'espace dégagé entre les murettes pour faciliter le montage des dispositifs de mesure.

b) Installation des dispositifs de mise en place des capteurs sur la cage (Fig. 4-8)

Après avoir précisé la position de chaque capteur sur la cage (en fonction de la position des armatures), on a soudé les gaines de guidage entre les filants situés en vis-à-vis.

Chaque vérin, auquel son tuyau flexible a été retiré, a été introduit dans sa gaine.

L'embase et la plaque de contre-appui ont alors été vissés aux deux extrémités du vérin. Ensuite, chaque plaque de contre-appui a été fixée par soudure à la cage.

La figure 4-8 présente une vue des dispositifs de mise en place des capteurs ainsi installés sur la cage.

c) Installation des capteurs sur les embases (Fig. 4-9)

On passe d'abord le câble sortant de chaque capteur par le trou central pratiqué dans son embase. Ensuite, la procédure de montage diffère en fonction du type de capteur :

- ♦ les capteurs Kyowa (comportant un anneau rigide à l'extérieur de la surface active) sont fixés à l'embase par des vis traversant la couronne et l'anneau ;
- ♦ les capteurs Slope Indicator sont collés à l'embase (colle à base de résine époxydique) et protégés à l'extérieur par des couronnes fixées aux embases par des vis (ces capteurs ont prouvé, lors des essais en chambre d'étalonnage, une dérive du zéro causée par le vissage contre une embase).



a)



b)

Fig. 4-8 : Dispositifs de mise en place des capteurs montés sur la cage (a – dispositif pour un capteur Kyowa ; b- dispositifs pour deux capteurs Slope Indicator agissant sur les faces opposées)



a)



b)

Fig. 4-9 : Installation des capteurs sur la cage (a – capteur Kyowa en cours de fixation sur son embase ; b- capteurs Slope Indicator avant et après installation)

d) Acheminement des câbles et des tuyaux sur la cage d'armature

Les câbles d'alimentation et de mesure des capteurs et les tuyaux hydrauliques alimentant les vérins ont été remontés vers le haut de la cage le long d'un filant situé côté terrain (à l'intérieur de la cage).

Des ligatures au filant ont été régulièrement réalisées. Une boucle d'un diamètre de 20 cm au départ de chaque capteur avant la première ligature a été prévue afin de permettre la sortie de la tige du vérin sans mettre le câble en traction.

e) Vérification des circuits hydrauliques sous pression

Les circuits hydrauliques des 6 capteurs ont été mis en pression (50 bars) afin de vérifier leur étanchéité ainsi que le bon fonctionnement des vérins.

La mise en pression a été réalisée par une centrale hydraulique (100 bars), alimentée en air par un compresseur de chantier. La connexion des tuyaux hydrauliques provenant des vérins a été réalisée par l'intermédiaire d'une rampe de 6 robinets montés en série. Chaque robinet est accompagné d'un manomètre permettant le contrôle de la pression appliquée dans chaque vérin.

Les circuits hydrauliques des vérins n'ont pas été purgés avant la mise en pression. La poche d'air piégée dans les vérins devait permettre, par son élasticité, de maintenir le contact des capteurs avec le sol dans le cas où la montée rapide du béton aurait été accompagnée par une dépression dans le circuit hydraulique.

Les déplacements des dispositifs de mesure ont été ensuite bloqués de façon à éviter une sortie accidentelle en dehors du gabarit lors de la descente de la cage dans la tranchée.

f) Vérification du fonctionnement des capteurs

Enfin, une série de mesures a été réalisée pour vérifier le fonctionnement des capteurs installés sur les cages.

4.4.3.3 Mise en œuvre du panneau instrumenté

Le panneau de paroi moulée S81 a été exécuté en même temps que les deux panneaux voisins S82 et S83. Les travaux se sont déroulés le 08/03/2000 durant l'après-midi (pour ce qui concerne la perforation) et le 09/03/2000 entre 12 h et 17 h (pour le bétonnage).

L'état d'avancement des travaux aux environs des panneaux expérimentaux était alors le suivant :

- ♦ les trois panneaux voisins côté ouest S84, S85 et S86, étaient déjà réalisés depuis environ 10 jours ;
- ♦ les trois panneaux voisins côté est, S80, S79 et S78, devaient être réalisés une semaine plus tard ;
- ♦ un premier tronçon de la dalle de couverture de la zone centrale de la trémie était déjà exécuté depuis quelques jours ; ce tronçon, situé à proximité de la zone instrumentée, devait permettre le maintien du trafic traversant la trémie à son intersection dénivelée avec la rue Dumont d'Urville.

L'excavation de 9,30 m longueur a été effectuée avec une benne hydraulique sur Kelly (KS 3000) montée sur une châssis de grue (Fig. 4-10).

La stabilité de la tranchée a été assurée depuis le début de l'excavation jusqu'à la fin du bétonnage par une boue bentonitique remplissant la tranchée et in fine substituée par le béton mis en œuvre. Cette boue est traitée et recyclée dans la centrale prévue à cet effet.

L'une après l'autre, les trois cages ont été levées verticalement et descendues dans la tranchée remplie de boue à l'aide d'une grue spécialisée. Elles sont guidées par rapport aux bords de l'excavation par des sabots en béton montés au fur et à mesure de leur descente dans la tranchée (Fig. 4-11).

Les cages noyées dans la boue ont été suspendues aux murettes-guide à l'aide de poutres en acier (barres $\Phi 40$). Les anses d'accrochage sont soudées de telle manière

que le positionnement altimétrique des cages soit conforme au projet. Les poutres d'accrochage sont enlevées après la fin du bétonnage.

La mise en œuvre du béton afférent aux trois panneaux a été effectuée par deux tubes plongeurs. Ils ont été alimentés en parallèle par deux camions (toupies) ; chaque série de deux camions (environ 6 m³ de béton par camion) permettait le bétonnage de la tranchée sur une hauteur d'environ 1,5 m.



Fig. 4-10 : Outil de perforation à benne hydraulique monté sur un bâti de guidage Kelly-Solétanche équipé d'un jeu de poches 800 x 2700 (parois d'épaisseur de 0,80m)



Fig. 4-11 : Cage instrumentée en cours de descente dans la tranchée remplie de boue

4.4.3.4 Activation des capteurs et mesures initiales (séquence 0)

La connexion des câbles provenant des capteurs aux dispositifs d'acquisition et la première série de mesures ont été réalisées en cours de la descente de la cage avant que la première rangée des capteurs (SI_0 et SI_1) ne soit sous boue. Ces valeurs constituent la mesure du zéro des capteurs (capteurs montés sur la cage avec leurs surfaces actives dans le plan vertical en conditions de pression atmosphérique et de température connues) ; elles permettent de calculer pour les phases de mesure ultérieures les « valeurs nettes » causées par les actions qu'on veut apprécier expérimentalement (pression hydrostatique dans la boue, pressions d'interface sol / capteur).

En se servant d'un niveau de chantier et d'un repère altimétrique existant à proximité, on a déterminé la cote effective du sommet de la cage posée (NSC) ainsi que le niveau de la murette guide (NMG) et le niveau du terrain (NT) dans le profil instrumenté. On a pu obtenir ainsi les cotes absolues d'implantation des capteurs ainsi que la hauteur de la colonne de boue au-dessus de chaque capteur en fonction du niveau de la boue mesuré par rapport au NMG.

Le tableau 4-3 présente l'implantation altimétrique des capteurs dans le profil instrumenté (cotes absolues NGF et relatives).

Trois séries de mesures de la pression hydrostatique agissant aux niveaux des capteurs ont été réalisées avant le commencement du bétonnage ainsi que du niveau de la boue dans la fouille (Annexe 4-2).

Pendant le bétonnage, des mesures ont été réalisées toutes les deux toupies déchargées dans la fouille (au total, 11 séries de mesure). On a relevé à l'aide d'un fil à plomb en même temps les niveaux par rapport au NMG de la boue et du béton déposé dans la fouille. Ainsi, pour chaque série de mesure, on peut estimer les pressions hydrostatiques transmises par la colonne de boue et de béton fluide aux niveaux des capteurs.

La mise en contact de la surface active des capteurs avec le sol a été commandée par la centrale hydraulique connectée aux vérins. La procédure de mise en pression des vérins

a été établie en fonction de l'avancement du bétonnage de la fouille. Cette mise en contact des capteurs et du sol n'est intervenue qu'après la mise en œuvre de deux séries de toupies dans la fouille, de façon à bloquer la cage d'armature en pied. A ce moment, le niveau du béton coulé dans la fouille était à environ 3m au-dessous du niveau d'implantation des capteurs le plus bas.

Les quatre capteurs implantés en bas de la cage ont été alors mis en contact avec le sol par l'application d'une pression de vérinage de $p_{v1} = 11$ bars.

Tableau 4-3 : Implantation altimétrique des capteurs dans le profil S81

Profil lithologique	Niveau caractéristique	Cote NGF (m)	Profondeur relative à		
			TN (m)	NMG (m)	NSC (m)
	<i>TN (terrain naturel côté sud du panneau)</i>	5,79	0,00		
corps chaussée	NSC (niveau sommet cage)*	5,50	0,30		0,00
	NMG (niveau murette - guide)	5,48	0,32	0,00	0,02
	Niveau sommet paroi en fin bétonnage	5,38	0,42	0,10	0,12
	<i>Interface corps chaussée / remblai</i>	5,19	0,60	0,28	0,30
remblai sableux	NB (niveau boue) - variable	4,98-5,48	0,81-0,31	0-0,50	0,02-0,52
	NBR (niveau béton récépé)	5,05	0,74	0,43	0,45
	Kyowa BE - 5KF5 (K₅) - côté terrain	3,38	2,42	2,10	2,12
	Axe butonnage	3,33	2,46	2,15	2,17
	<i>Interface remblai/argile tourbeuse</i>	3,29	2,50	2,18	2,20
argile tourbeuse	Kyowa BE - 5KF2 (K₂) - côté terrain	0,62	5,18	4,86	4,88
	Radier niveau supérieur	0,44	5,36	5,04	5,06
	Radier niveau inférieur	-0,26	6,06	5,74	5,76
	<i>Interf. argile tourbeuse / limon argileux</i>	-1,71	7,50	7,18	7,20
limon argileux	Capteur SI 68983 (SI₃) - côté terrain	-1,82	7,62	7,30	7,32
	Capteur SI 68982 (SI₂) - côté fouille	-1,82	7,62	7,30	7,32
	Capteur SI 68981 (SI₁) - côté terrain	-3,92	9,72	9,40	9,42
	Capteur SI 68980 (SI₀) - côté fouille	-3,92	9,72	9,40	9,42
	<i>Interf. limon argileux / grave limoneuse</i>	-7,81	13,60	13,28	13,30
grave limon.	Niveau base cage	-9,95	15,74	15,43	15,45
marnes sableuses	<i>Interf. grave limoneuse / marne sableuse</i>	-10,01	15,80	15,48	15,50
	Niveau théorique base paroi	-10,50	16,29	15,98	16,00

*- pour les phases 1 et 2 NSC=5,43m ; à l'issue de ces phases, la cage a été relevée de 7cm.

La pression de vérinage a été augmentée, après la troisième série de bétonnage, à $p_{v2} = 14$ bars. Cette pression correspond à une pression de contact sol/capteur environ 50 % plus élevée que la pression hydrostatique de la boue agissant aux niveaux des capteurs.

On considère cette valeur comme un bon compromis par rapport aux objectifs

envisagés :

- ♦ empêcher l'infiltration du béton frais entre le sol et la surface active des capteurs ;
- ♦ ne pas perturber d'une manière importante l'état initial des pressions d'interface sol/paroi et, surtout, ne pas poinçonner le sol (supposé présenter un comportement médiocre).

Une fois la pression de vérinage amenée à la valeur p_{v2} , le circuit correspondant a été isolé et la pression dans le vérin laissée libre d'évoluer en fonction de la sollicitation apportée par le bétonnage. On a observé que la pression de vérinage a diminué alors lentement au fur et à mesure que le béton est remonté dans la fouille (jusqu'à une valeur de 7 bars en fin de bétonnage).

Dans un deuxième temps, on a commandé la mise en contact du capteur K_2 (après 7 séries de bétonnage) et ensuite du capteur K_5 (après 8 séries de bétonnage) à une pression de vérinage égale avec celle existant dans les circuits des capteurs Slope Indicator (respectivement 10 bars après 7 séries de bétonnage et 8,5 bars après 8 séries de bétonnage).

Après la fin du bétonnage, on a procédé à la réduction progressive de la pression de vérinage par étapes successives :

- ♦ après un intervalle de 30 minutes, la pression de vérinage a été réduite à 3,5 bars ;
- ♦ elle a été réduite à 2 bars, 60 minutes après la fin du bétonnage ;
- ♦ elle est ramenée à zéro, 100 minutes après la fin du bétonnage pour les capteurs Slope Indicator et 240 minutes depuis la fin du bétonnage pour les capteurs Kyowa.

Les mesures effectuées avec les six capteurs de contraintes totales lors de la mise en œuvre du panneau instrumenté sont regroupées dans l'Annexe 4-2/1 (capteurs Kyowa) et l'Annexe 4-2/2 (capteurs Slope Indicator).

Pour chaque série de mesure, sont rappelés en parallèle :

- ♦ le niveau de la boue relevé par rapport au NMG (NB) ;

- ♦ la profondeur du béton déposé dans la fouille (Annexe 4-2/1) par rapport au NMG (moyenne des profondeurs mesurées en deux points le long de la paroi à l'aide d'un fil à plomb) ;
- ♦ la pression dans le circuit hydraulique de vérinage des capteurs ($p_{\text{vérin}}$).

Pour les capteurs Kyowa, pour lesquels on a observé un décalage du zéro de 5 kPa lors de la série de mesures initiale (série « 0 »), on présente, pour chaque série de mesures, les valeurs brutes (obtenues par le biais des coefficients d'étalonnage hydrostatique) ainsi que les valeurs nettes des pressions mesurées. Ces dernières valeurs incluent, par ailleurs, une correction de dérive thermique (évaluation préalable lors de l'étalonnage hydrostatique des capteurs) établie à partir de la moyenne des températures enregistrées par les capteurs Slope Indicateur (SI).

Pour les capteurs SI, on présente les fréquences de vibration transmises par les cordes vibrantes et les températures relevées par les sondes RTD (valeurs consignées manuellement à chaque série de mesures) ainsi que les valeurs des pressions correspondantes.

Ces dernières incluent des corrections de température ainsi que de pression atmosphérique courantes (la pression atmosphérique est la valeur moyenne du jour courant fournie par le Service local du Météo France) ; pour ces capteurs, on n'a pas procédé à des corrections de dérive du zéro parce l'écart constaté dans la série de mesure initiale tient plutôt de la précision des capteurs que d'un décalage causé par une modification de l'état initial.

On note cependant comme exception le capteur SI_0 qui indique un décalage du zéro de 3,4 kPa. Ce dernier capteur présente ensuite un fonctionnement différent du comportement attendu : les valeurs enregistrées lors des séries de mesures de la pression hydrostatique (dans la boue) sont sensiblement décalées par rapport à l'estimation de la pression hydrostatique agissant à son niveau ainsi que par rapport aux valeurs indiquées par les autres capteurs.

Afin d'avoir une première image du bilan des pressions appliquées et mesurées par les

capteurs, on indique pour chaque série de mesures, en parallèle avec les valeurs enregistrées par les capteurs :

- ♦ la pression hydrostatique agissant au niveau du capteur (calculée en fonction du niveau de la boue et de son poids volumique, $\gamma_b=11,7 \text{ kN/m}^3$) ;
- ♦ la pression de contact capteur / sol (calculée en fonction de la pression de vérinage dans l'hypothèse d'une distribution uniforme des pressions transmises sur la surface totale de l'embase).

4.5 Autres dispositifs de mesure

4.2.1 Mise en place des tubes inclinométriques dans les parois

4.5.1.1 Les dispositifs de mesure de la déformée de la paroi

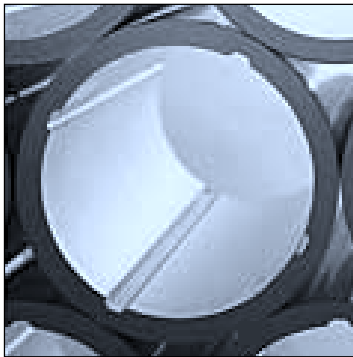
Le suivi de la déformée de la paroi a été réalisé par la mesure des variations de son inclinaison. Le dispositif de mesure comporte deux composantes principales :

- ♦ un « tube inclinométrique » (de type « Slope Indicator / EPIC Casing ») muni de rainures de guidage (Fig. 4-12-a) ; intégré dans la paroi, il constitue le corps d'épreuve du système de mesure, qui sera « perdu » en fin de l'expérimentation ;
- ♦ une sonde (de type « Slope Indicator / Digitilt Inclinometer Probe ») équipée de deux paires de roulettes (Fig. 4-12-b) qui peut être descendue dans le tube en coulissant dans les rainures de guidage (résolution de 4×10^{-5} rad) ; elle utilise comme transducteur deux accéléromètres asservis pour déterminer son inclinaison par rapport à la verticale dans les deux directions de mesure (A et B) orthogonales, qui correspondent aux pistes de guidage du tube inclinométrique.

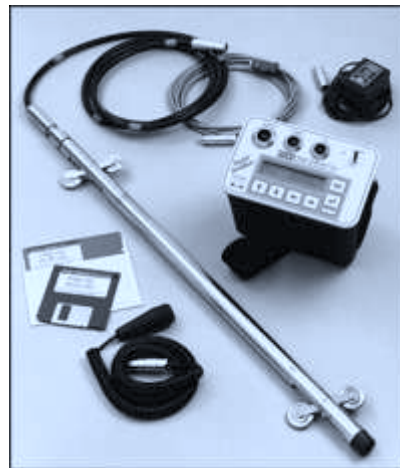
Le tube inclinométrique a été descendu et scellé à l'intérieur d'un autre tube vertical de réservation attaché à la cage d'armature du panneau expérimental dans son plan médian. La déformée d'un tel tube suit fidèlement la déformée de la paroi dans la mesure où la rigidité en flexion de l'ensemble formé par les 2 tubes peut être

considérée comme négligeable par rapport à celle de la paroi et où le coulis de scellement assure une bonne transmission des déformations d'un tube à l'autre.

La lecture et l'enregistrement des mesures de l'inclinaison (effectués tous les 0,50 m suivant la profondeur des tubes) ont été réalisés avec un dispositif d'acquisition de type «Slope Indicator / Digitilt Data Mate » ; les données ont ultérieurement été transférées vers un ordinateur et interprétées en termes de déplacements horizontaux à l'aide d'un logiciel spécialisé.



a)



b)

Fig. 4-12 : Dispositif de mesures inclinométriques : a) Vue en coupe d'un tube inclinométrique ; b) Sonde et dispositif d'acquisition.

Les parois moulées ont été équipées de 4 tubes inclinométriques disposés aux environs du profil contenant les capteurs de contraintes totales :

- ♦ 2 tubes inclinométriques côté sud de l'axe routier dans les panneaux S81 et S82 (désignés ci – après par « I_{S81} » et « I_{S82} ») ;
- ♦ 2 tubes côté nord de l'axe routier dans les panneaux situés en vis-à-vis (désignés ci-après par « I_{N81} » et « I_{N82} »).

Chaque tube inclinométrique a été prolongé d'environ 5 m au-dessous de la paroi dans un forage vertical réalisé à l'intérieur du tube de réservation. De cette manière, un tronçon de tube a été encastré dans la couche de marne et n'a pas subi les déformations

causées par les sollicitations appliquées à la paroi ; il est possible ainsi d'éliminer les erreurs systématiques éventuelles dans la mesure des inclinaisons et, par conséquent, d'améliorer leur interprétation en termes de déflexions.

4.5.1.2 Position des tubes inclinométriques

La figure 4-13 présente la position schématique des tubes inclinométriques dans une vue en plan de l'ouvrage dans la zone instrumentée.

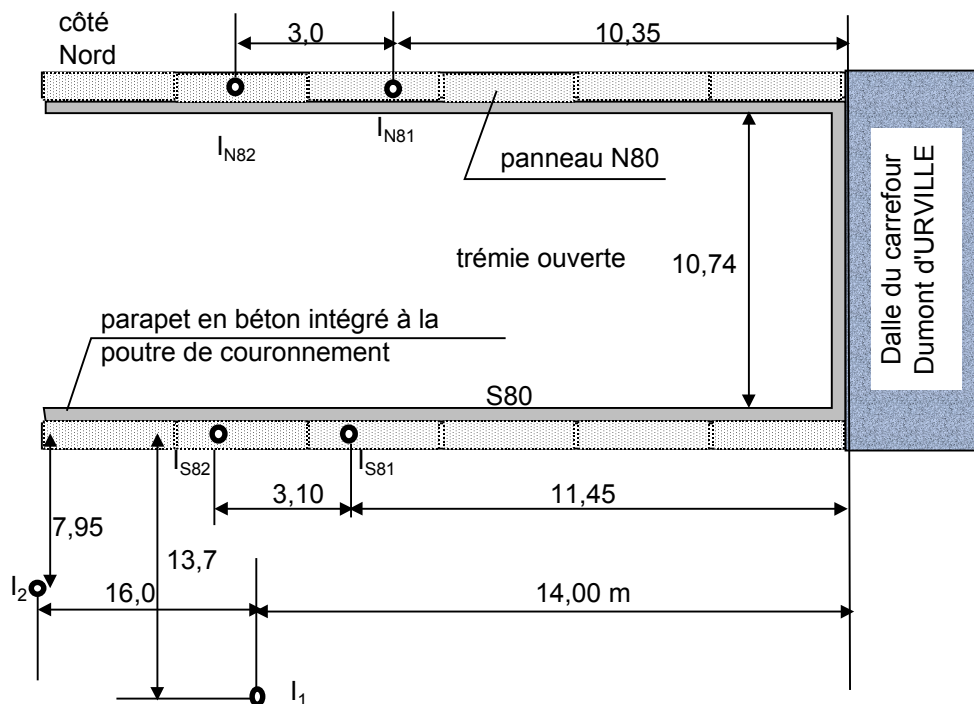


Fig. 4-13 : Schéma de positionnement des tubes inclinométriques (vue en plan)

4.5.1.3 Mode opératoire d'installation des tubes inclinométriques

La mise en place des tubes inclinométriques a suivi une procédure classique comportant plusieurs étapes successives.

a) Mise en place des tubes de réservation

Chacune des cages correspondant aux panneaux instrumentés (S81, S82, N81 et N82) a été équipée en usine dans son plan médian vertical (Fig. 4-6) d'un tube de réservation en acier (ϕ_{int} 114 mm, ϕ_{ext} 118 mm).

Ces tubes, qui traversent les cages sur toute leur hauteur (16 m), ont été obturés à leur extrémité inférieure par des bouchons étanches en plâtre, forables, qui ont pour rôle d'empêcher la montée du béton fluide dans le tube lors du bétonnage de la paroi.

Avant le bétonnage de la poutre de couronnement, chaque tube a été prolongé jusqu'à la cote projet de l'ouvrage (cote projet du trottoir de service sur le couronnement) à l'aide d'un morceau de tube manchonné à extrémité supérieure. Les bouts des tubes ont été protégés par des bouchons amovibles en acier.

b) Mise en place des tubes inclinométriques

La mise en place des tubes inclinométriques a été réalisée à peu près trois semaines après le bétonnage de la paroi, à la cadence d'un tube par jour (du vendredi 31/03/2000 au mercredi 05/04/2000). Elle est intervenue avant le recépage de la paroi (réalisé entre le 07/04 et le 10/04/2000).

Une foreuse en roto-percution de type SEDIDRILL 500 a été utilisée pour exécuter un forage au-dessous de la paroi sur une profondeur d'environ 6 m. Le forage a été exécuté en $\phi 107$ mm dans le prolongement des tubes de réservation.

Les tubes inclinométriques (ϕ_{ext} 70 mm ; ϕ_{int} 59 mm, disponibles en tronçons de longueur 3,05 m) ont été assemblés et descendus dans leurs tubes de réservation jusqu'au fond du forage. Les rainures de guidage ont été orientées de telle manière que les deux directions de mesure A et B correspondent aux directions principales d'inertie de la paroi.

Les tubes inclinométriques ont ensuite été scellés en utilisant un coulis de composition fluide (ciment 16%, kaolin 22 %, bentonite 2% et eau 60%). Cette formulation du coulis permet un bon remplissage de l'espace entre les deux tubes sur toute la longueur (environ 21 m) tout en assurant, après sa prise, des caractéristiques d'adhérence et de rigidité appropriées à une bonne transmission des déformations du tube de réservation au tube inclinométrique.

La photographie de la figure 4-14 montre la sortie du tube de réservation du panneau S82 de la paroi au moment du recépage du tronçon de paroi voisin, S83 (le 07/04/2000,



murette-guide excavée depuis le 06/04).

Fig. 4-14 : Recépage du panneau S83 en cours d'exécution (07/04/2000)

4.5.1.4 Relevés inclinométriques de référence (séquence 0)

La première série de mesures inclinométriques a été réalisée le 04/05/2000, c'est-à-dire environ un mois après la mise en place des tubes inclinométriques (Fig. 4-15). Le délai d'un mois observé à l'issue de la mise en place des tubes devait permettre le durcissement du coulis de scellement.

Cette mesure initiale survient après la mise en œuvre de la poutre de couronnement mais avant toute excavation aux environs du profil instrumenté. Elle constitue la phase de référence (phase 0) pour toutes les phases ultérieures s'intéressant à l'estimation expérimentale du comportement mécanique de la paroi.

Pour chaque tube, les mesures d'inclinaison dans les deux directions principales (A, transversale à l'ouvrage, et B, longitudinale) ont été effectuées tous les 0,50 m.

Chaque mesure a été répétée en retournant la sonde. Cette méthodologie permet

d'obtenir sur place une première indication sur la qualité des données recueillies (calcul de l'écart type de la population gaussienne de la demi – somme des deux



valeurs mesurées à chaque niveau dans les deux positions de la sonde ; ce calcul est fait automatiquement par le dispositif d'acquisition en fin de mesure).

a)

b)

Fig.4-15 : Relevé inclinométrique initial (I_{N82}). a) la sonde Slope Indicator avant la descente ; b) mesure inclinométrique en cours

Les relevés des mesures inclinométriques effectuées dans toutes les phases de mesure sont présentés séparément pour chaque tube inclinométrique dans les tableaux de l'Annexe 4-3.

4.5.1.5 Dépouillement des mesures inclinométriques

Le dépouillement des mesures inclinométriques permet d'accéder à la pente de la déformée du tube (et donc de la paroi) suivant les deux directions de mesure (A et B) ainsi qu'à la déformée de la paroi suivant les mêmes directions (A et B) par l'intégration de la pente suivant la profondeur de la paroi. Il a été réalisé conformément

aux prescriptions de la norme NF P 94-156 en considérant que la partie de chaque tube descendant sous la paroi reste fixe entre les séries de mesure successives. Cette hypothèse, confirmée par analyse statistique sur les données mesurées en pied des tubes (9 niveaux de mesure pour le tube I_{S81} et 11 niveaux pour le I_{S82}), permet de corriger l'erreur systématique engendrée par l'appareillage à chaque niveau de mesure.

La procédure de dépouillement utilisée inclut aussi la prise en compte du vrillage (ω) des deux directions de mesure (A et B) des tubes inclinométriques par rapport aux directions intéressées (transversale et longitudinale de la paroi) en s'appuyant sur les hypothèses suivantes (Fig. 4-16) :

$$\omega^0(k) = \omega^i(k) = \omega(k) \quad ; \quad (4.1)$$

- ♦ à chaque niveau de mesure (k), le vrillage du tube au moment de la mesure i ne change pas par rapport à la mesure initiale :

$$\Delta x^i(k) = 0 \Leftrightarrow \operatorname{tg} \omega(k) = -\frac{\Delta \phi_B^i(k)}{\Delta \phi_A^i(k)} \quad (4.2)$$

- ♦ pour chaque séquence de mesure (i) et à chaque niveau de mesure, la pente de la déformée est nulle dans la direction longitudinale de la paroi ($\Delta \phi_x^i(k)=0$) ; on a donc :

De cette façon, à chaque niveau de mesure (k) on obtient la pente de la déformée de la paroi dans la direction transversale (séquence de mesure i) :

ainsi que le déplacement horizontal dans la direction transversale :

Pour obtenir une allure plus proche de l'allure théorique (courbe continue à dérivée

$$\Delta \phi_y^i(k) = \Delta \phi_A^i(k) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega(k)} \quad (rad) \quad (4.3)$$

$$y^i(k+1) = y^i(k) + 500 \Delta \phi_y^i(k) = 500 \sum_{j=1}^k \Delta \phi_y^i(j) \quad (mm) \quad (4.4)$$

continue), la déformée expérimentale de l'écran ainsi obtenue est soumise à un lissage en appliquant le procédé de la moyenne mobile. Dans cette étude, les déformées expérimentales ont été lissées en utilisant une moyenne mobile sur trois valeurs successives des déplacements obtenues avec la relation (4.4).

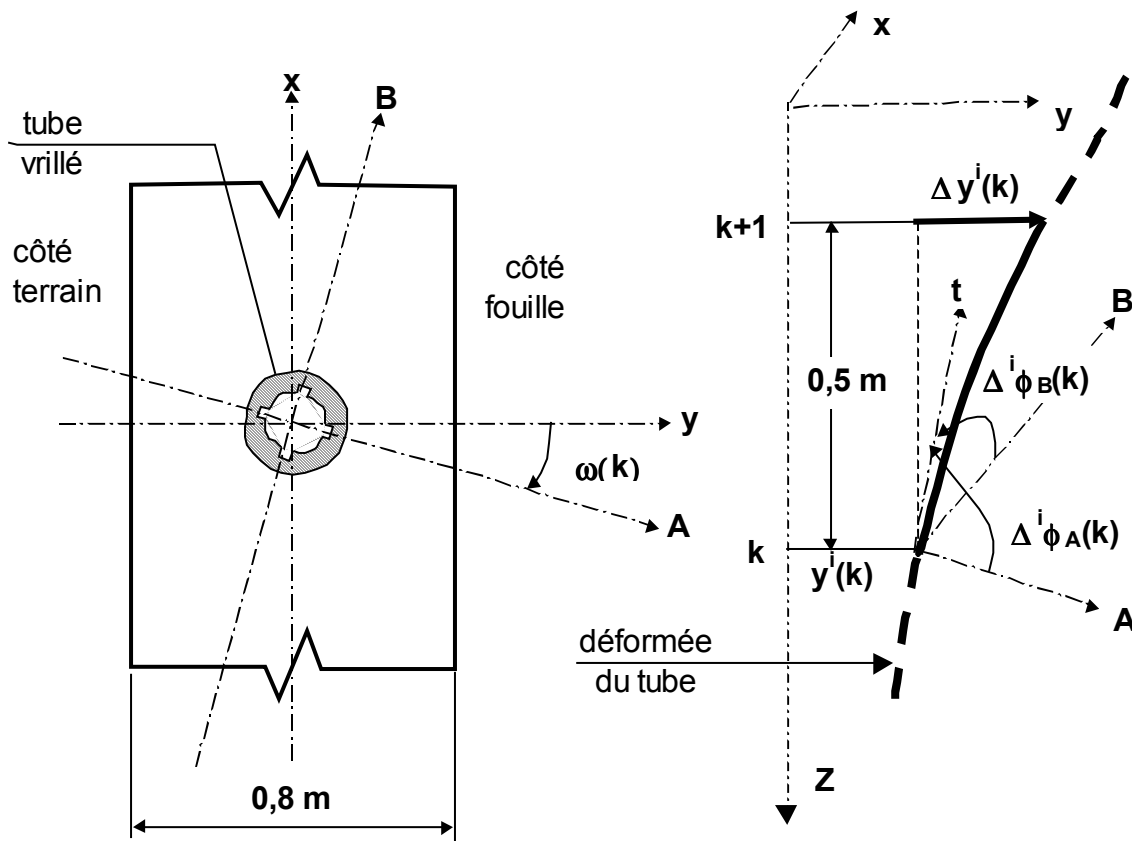


Fig. 4-16 : Prise en compte du vrillage du tube dans le dépouillement des mesures.
 (a – coupe horizontale dans la paroi au niveau de mesure k avec un tube vrillé;
 b – déformée du tube contenue dans le plan vertical transversal à la paroi zy)

4.5.2 Mise en place des tubes inclinométriques dans le massif de sol soutenu

4.5.2.1 Les dispositifs de mesure des déformations du massif soutenu

On a eu recours à deux autres tubes inclinométriques (dénommés ci-après I_1 et I_2) pour mesurer les déformations engendrées par la construction de l'ouvrage dans le massif de sol soutenu par la paroi moulée, côté sud de l'axe routier.

Les tubes inclinométriques, de même type que ceux utilisés pour les mesures dans la paroi moulée, sont descendus directement dans un forage vertical exécuté à cet effet.

4.5.2.2 Position des tubes inclinométriques

Le choix de l'implantation de ces tubes a été conditionné par la nécessité de les mettre à l'abri de la circulation de chantier ainsi que par la présence des réseaux souterrains. La figure 4-13 montre la position des tubes inclinométriques I_1 et I_2 par rapport à l'ouvrage.

La longueur totale des tubes est de 21 m, dont le quart inférieur est encastré dans la couche de marne.

4.5.2.3 Mode opératoire d'installation des tubes inclinométriques

L'installation des tubes inclinométriques dans le massif de sol soutenu a suivi celle des tubes inclinométriques dans la paroi (entre le 06/04 et le 08/04/2000).

La procédure de mise en place de ces tubes a été simplifiée par rapport à la méthode classique qui recommande que le forage soit réalisé à l'abri d'un tubage provisoire (afin d'éviter l'éboulement du sol). Compte tenu des difficultés d'extraction des tubes provisoires (rencontrées lors de la réalisation d'un premier forage), on a procédé à l'installation directe des tubes inclinométriques dans le forage. L'application de cette procédure simplifiée dans le contexte d'un terrain argileux (à cohésion importante) a permis l'installation des tubes sans aucune difficulté.

L'orientation des tubes, définie par les directions des rainures de guidage, est identique à celle donnée aux tubes installés dans la paroi (directions perpendiculaire et parallèle à l'axe longitudinal de la paroi).

Les tubes ont été scellés dans le terrain en utilisant le même coulis de scellement que pour les tubes intégrés dans la paroi. En tête, ils ont été protégés par un bouchon amovible.

4.5.2.4 Relevé inclinométrique de référence (séquence 0)

La première phase des mesures inclinométriques (qui constitue la phase de référence pour l'évaluation des déformations dans le sol causées par la construction de l'ouvrage) a été réalisée le même jour et suivant la même méthodologie que pour les tubes installés dans la paroi (le 04/05/2000). Les données obtenues sont présentées dans l'Annexe 4-3.

4.5.2.5 Dépouillement des mesures inclinométriques

Le dépouillement des mesures inclinométriques réalisées dans les deux tubes installés derrière la paroi a été réalisé de même façon que pour les tubes installés dans la paroi en considérant que le tronçon de tube descendu dans le substratum de marnes reste fixe entre les mesures successives.

4.5.3 *Mise en place des systèmes de mesure de la convergence des parois en vis-à-vis*

4.5.3.1 Les systèmes de mesure des déplacements à fil invar

Cette expérimentation a permis d'observer, par ailleurs, la variation de la distance entre les parois situées en vis-à-vis à l'aide d'un système de mesure à fil invar. Il est possible ainsi d'accéder d'une façon simple et immédiate à la somme des déflexions locales subies par les deux parois situées en vis-à-vis (parois sud et nord) entre les différentes phases d'auscultation, $\Delta y^S(k) + \Delta y^N(k)$, pour un niveau de mesure z_k .

Le système de mesure utilisé (fabriqué au LRPC de Lyon) comporte un fil en acier invar de longueur (modulable) adaptée à la distance entre les parois. Le fil est fixé à ses extrémités entre deux plots scellés en vis-à-vis dans les parois (à l'aide des connecteurs vissés sur les têtes des plots). Ensuite, le fil est tendu sous un effort contrôlé par un dynamomètre à ressort. Un vernier, connecté en série avec le dynamomètre et le fil (Fig. 4-17), permet la mesure de la variation de distance entre les parois avec une résolution de 0,1 mm.

Même si l'on ne peut pas découpler les déflexions de chacune des parois situées en vis-à-vis, les mesures de convergence à fil invar donnent des indications quantitatives



précises, utiles et fiables pour l'interprétation des autres catégories de mesures qui permettent l'accès aux déflexions d'une façon indirecte (mesures inclinométriques, mesures de déformations dans les butons, mesures des pressions des sols).

Fig. 4-17 : Dispositif de mesure des déplacements à fil invar (détail de la connexion du fil au plot installé sur le couronnement du panneau S82 et du dispositif de mesure associant dynamomètre et vernier)

4.5.3.2 Position des points de mesure

Les mesures de convergence des parois moulées intéressent deux niveaux :

- ♦ un niveau situé à 20 cm de l'extrémité supérieure de la poutre de couronnement (appelé ci-après Z_h) ;
- ♦ un niveau qui correspond à l'axe des butons (appelé ci-après Z_b).

Ce dispositif a été répété pour trois profils de mesure pour les deux parois moulées encadrant l'axe routier.

4.5.3.3 Mode opératoire et mesure de référence (phase 0)

a) Mise en place des plots

Les plots ont été scellés (en utilisant un mortier préfabriqué à prise rapide) dans les

parois en deux reprises :

- ♦ la rangée haute (Z_h) a été mise en place sur la poutre de couronnement le 09/05/2000 avant toute excavation entre les parois ;
- ♦ la rangée basse (Z_b) a été scellée sur les parois lors de la mise en place des butons (le 16/05/2000) ; à ce stade, l'excavation entre les parois était réalisée jusqu'à une profondeur variable entre 0,8 et 1,4 m au-dessous de l'axe des butons.

Les têtes des plots ont été protégées par des bouchons filetés.

b) *Mesure de référence (phase 0)*

La mesure de référence permet de repérer la distance initiale entre les parois sur le vernier du dispositif de mesure. Elle a été réalisée (au moins) 1 h après la mise en place des plots (afin de permettre la prise du mortier de scellement).

Dans un premier temps, le fil invar de longueur adaptée à la distance entre les parois est relié au dispositif de mesure. Ses deux extrémités sont fixées aux plots situés face en face. Le fil est ensuite tendu sous un effort contrôlé par le dynamomètre. On note alors la position d'un repère mobile sur la règle du vernier (résolution 0,1 mm) qui correspond à la distance entre les parois moins une longueur invariable (qui constitue la base de mesure).

Pour chaque paire de plots, cette mesure a été répétée 6 fois, le fil étant par ailleurs retourné pour les 3 dernières mesures. La valeur de référence est calculée comme moyenne des 6 lectures effectuées. Le récapitulatif des valeurs de référence mesurées est présenté dans l'Annexe 4-4.

4.5.4 *Mise en place des butons instrumentés*

4.5.4.1 *Les jauges des déformations sur les butons*

À chaque extrémité, les trois butons successifs correspondant aux panneaux 80, 81 et 82 (ci-après B_{80} , B_{81} et B_{82}) ont été équipés de 4 jauges de déformation afin d'accéder

aux efforts transmis à la paroi (effort axial et moment de flexion). Le buton B_{80} a été équipé de plus, à son extrémité sud, d'un capteur de température.

Les quatre jauges ont été collées à l'extérieur du buton dans une même section transversale (section tubulaire circulaire à parois minces) suivant deux diamètres orthogonaux. Leur base de mesure est orientée suivant la direction longitudinale du tube.

On a choisi deux types de jauges résistives à trame pelliculaire en constantan fournies par « Vishay Micromesures » (jauges encapsulées dans une enveloppe en polyamide) :

- ♦ 20 jauges de type CEA-06-250UW-120 (Fig. 4-18-a) pour équiper les butons B_{81} (j_1^{81} à j_8^{81}), B_{82} (j_1^{82} à j_8^{82}) et l'extrémité sud du buton B_{80} (j_1^{80} à j_4^{80}) ;
- ♦ 4 rosettes de type CEA-06-125UT-120 (Fig. 4-18-b) à 2 jauges disposées à 90 degrés pour équiper l'extrémité nord du buton B_{80} (j_5^{80} à j_8^{80}).

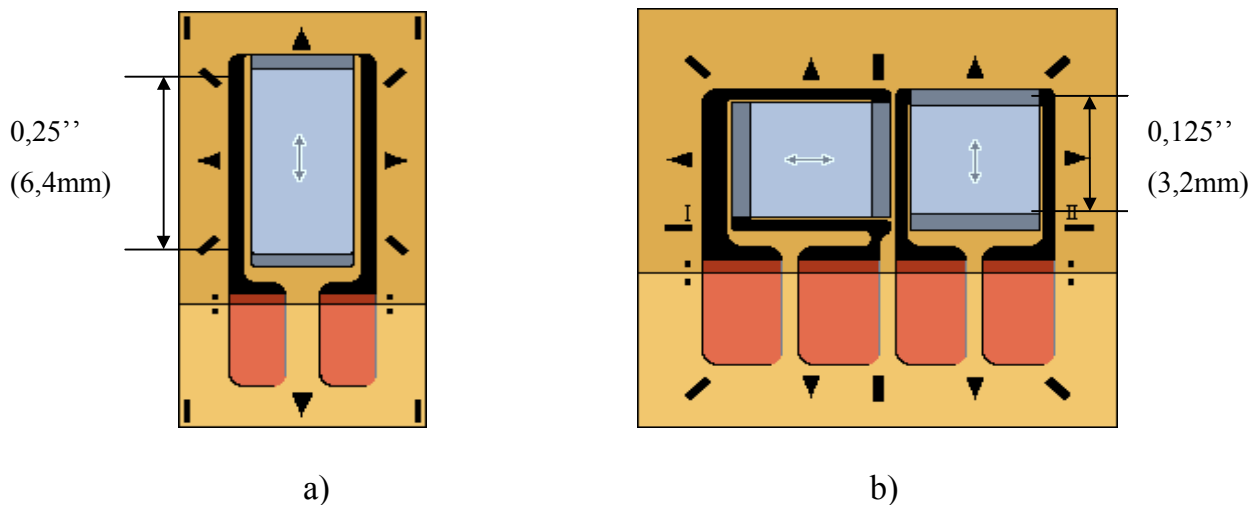


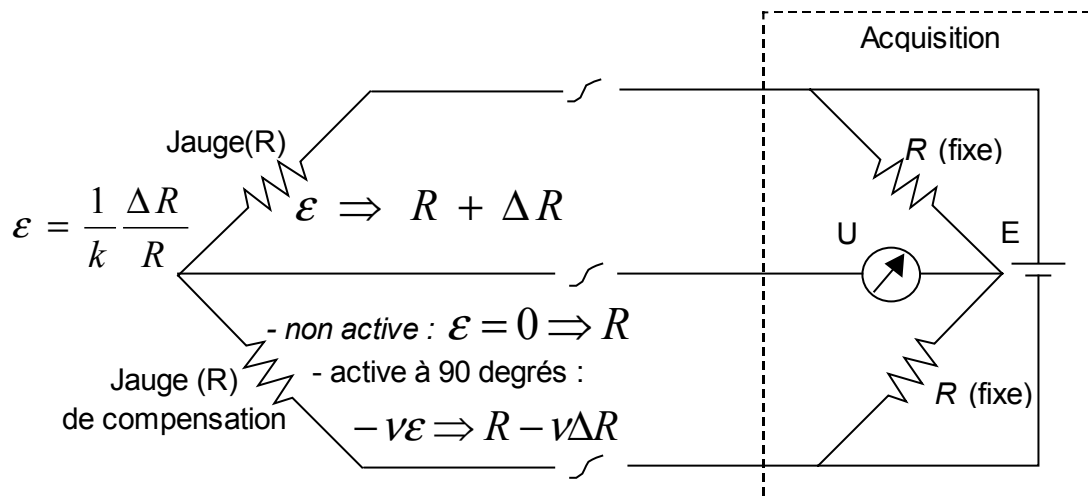
Fig. 4-18 : Jauges à trame pelliculaire « Vishay Micromesures ».

a) Jauge de type CEA-06-250UW-120 ; b) Rosette de type CEA-06-125UT-120.

Ces jauges sont de type « autocompensées en température » (elles sont constituées d'un alliage dont les caractéristiques physiques de variation thermique de la résistance électrique et de dilatation thermique sont adaptées au support, en acier, afin de rendre les déformations de dilatation ou retrait thermique de la structure imperceptibles par le dispositif de mesure). Ainsi, les résultats de mesure ne reflètent que les déformations

engendrées dans les butons par les sollicitations mécaniques (effort axial et moment fléchissant) auxquelles ils sont soumis.

Le dispositif de mesure est basé sur le montage des jauges dans des circuits de type demi-pont Wheatstone (Fig. 4-19). Un tel circuit utilise deux résistances électriques fixes (intégrées dans le dispositif de mesure) reliées à deux jauges qui sont collées sur la structure auscultée ; parmi ces deux jauges, l'une, nommée souvent jauge de



compensation, permet d'annuler l'effet de la variation de température sur la résistance électrique des câbles de connexion de la jauge de mesure.

Fig.4-19 : Montage des jauges en demi-pont Wheatstone

Les jauges de compensation correspondant aux jauges de type 250UW sont des jauges additionnelles (1 jauge sur chaque bouton, désignées ci-après par j_0^{80} , j_0^{81} et j_0^{82}), qui sont collées sur un morceau d'acier non exposé aux sollicitations transmises dans les butons (jauges non actives).

Pour ce qui concerne les rosettes 125UT, la jauge dont la base de mesure est disposée transversalement à l'axe du bouton constitue la jauge de compensation. Il s'agit, cette fois-ci, d'une jauge active qui permet par ailleurs d'amplifier le déséquilibre du pont Wheatstone (le signal de sortie de la jauge de mesure) de $(1+\nu)$ par rapport au montage avec une jauge de compensation non active.

Une station de mesure comportant 3 cartes d'acquisition de type IMP 35951B (3 fois

10 voies de mesure) reliées à un ordinateur a été utilisée pour l'enregistrement en continu de signaux provenant des jauges de déformations, du capteur de température ainsi que des deux capteurs de pression des sols Kyowa.

4.5.4.2 Position des points de mesure

La figure 4-20 présente la position des butons instrumentés ainsi que du front d'excavation entre les parois au moment de la pose des butons et de la première mesure des déformations qui l'a suivie.

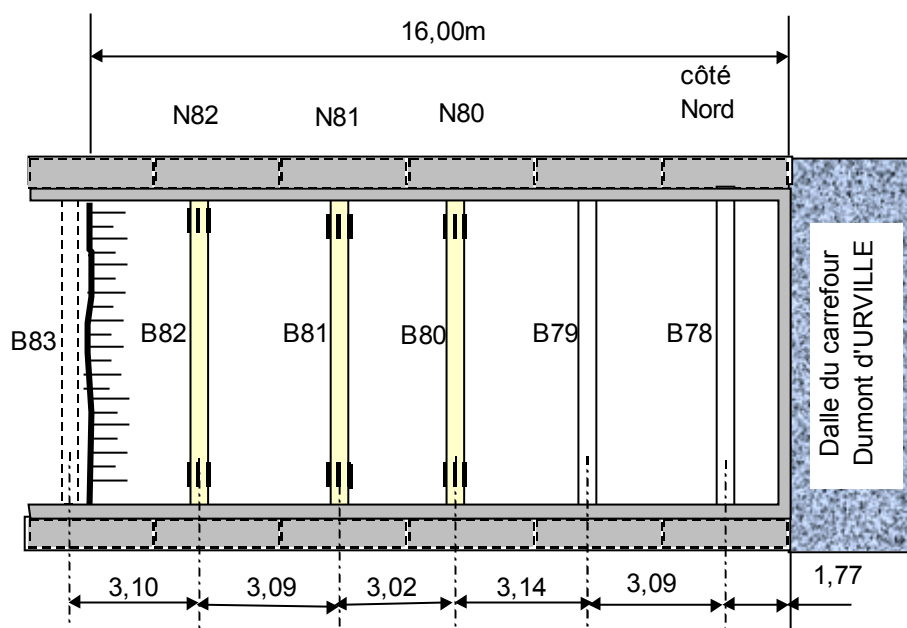


Fig.4-20 : Position des butons par rapport au tympan ouest de la trémie couverte

La position des butons expérimentaux et les caractéristiques géométriques de leur coupe transversale sont présentées dans le tableau 4-4, tandis que la position des jauges sur chaque bouton est montrée sur dans la figure 4-21.

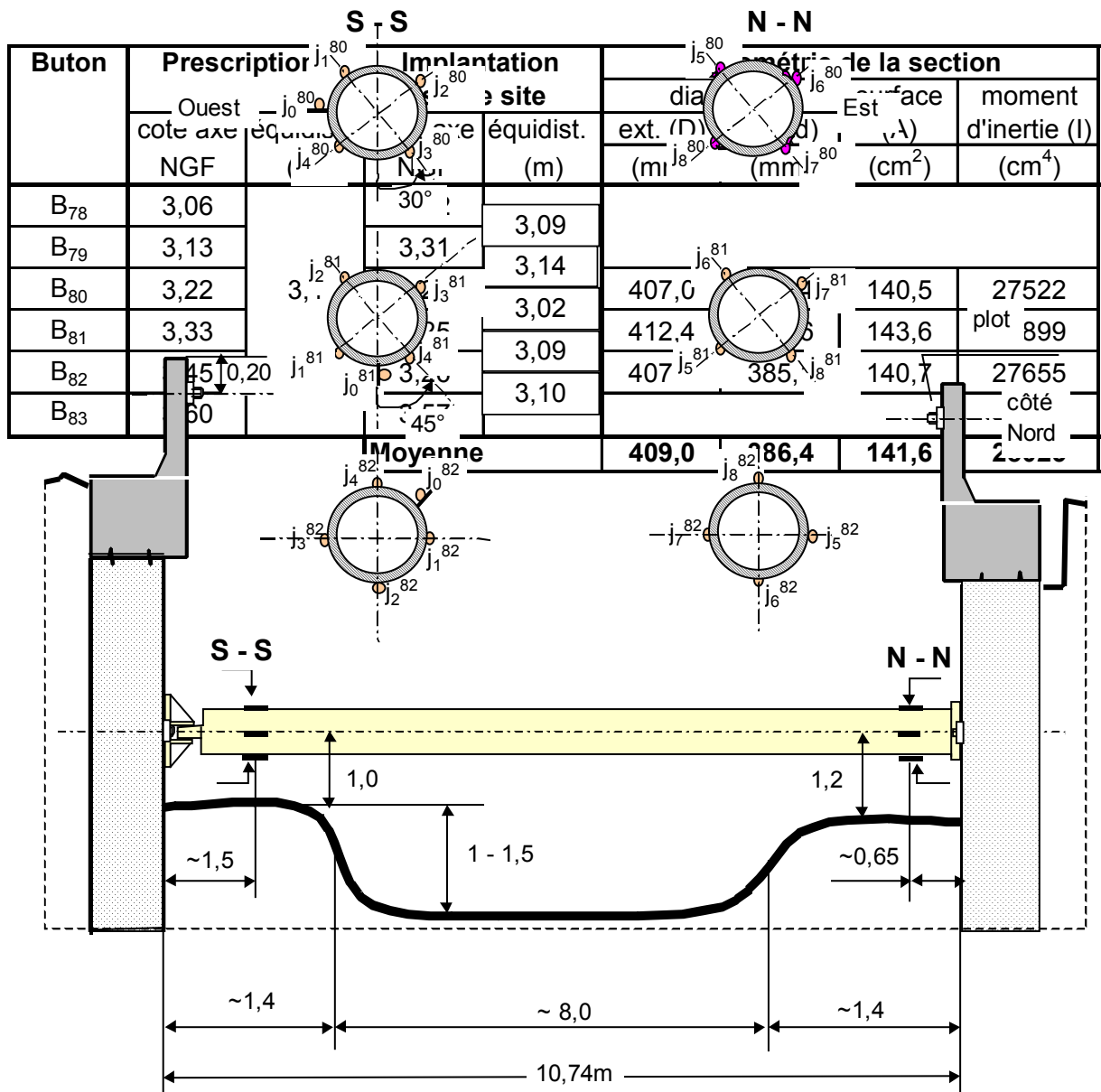


Tableau 4-4 : Position des butons et géométrie de leur section transversale

Fig. 4-21: Coupe transversale de l'ouvrage au moment de la mise en place des butons et position des jauges sur les butons

4.5.4.3 Équipement en usine des butons expérimentaux

L'installation des jauges sur les trois butons a été réalisée dans l'usine qui fabrique les butons. La technique d'installation des jauges utilisée est celle indiquée par « Vishay Micromesures ». Cette procédure doit permettre d'obtenir une transmission parfaite

aux jauges des déformations engendrées dans les butons. Elle demande un travail minutieux et des conditions d'environnement dont on ne dispose pas, a priori, sur le chantier. Les étapes suivies sont les suivantes :

a) Préparation de la surface support (surface extérieure du bouton en acier)

Cette étape a pour objectif d'obtenir une surface support sans aspérités, chimiquement propre et comportant des repères d'alignement des jauges. Dans la zone des points de mesure, la surface du bouton est successivement dégraissée, polie, repérée, nettoyée et neutralisée chimiquement à l'aide de produits spéciaux.

b) Collage des jauges

Les jauges sont d'abord posées sur la surface support dans la position requise ; on se sert d'une bande collante en Cellophane d'une longueur convenable (environ 6 cm) pour manipuler les jauges et appliquer la colle (colle à catalyseur de type M-Bond 200 en alkyle cyanocrylate).

c) Connexion des câbles

À chaque extrémité, le fil de la grille (le corps d'épreuve de la jauge) est fixé sur une patte en cuivre permettant la connexion par soudure de la jauge au circuit de mesure.

On a utilisé des câbles à quatre fils (deux fils soudés sur chaque patte) d'une longueur convenable compte tenu de la position sur site de l'armoire de mesure par rapport aux butons instrumentés. Ce montage de jauges en quatre fils assure une meilleure compensation de l'effet de la variation thermique de la résistance électrique des fils conducteurs sur la mesure. Après leur connexion aux jauges, les câbles sont attachés aux butons.

d) Protection des jauges

Etant donné le risque élevé d'endommager les jauges pendant le transport des butons ou dans les opérations de manutention sur le chantier, on a renforcé la protection de type « M Coat F » par un capot en acier soudé au bouton autour de chaque jauge.

Le produit « M Coat F » (recommandée par Vishay Micromesures pour des conditions sévères d'environnement) comporte l'application de plusieurs couches successives au-dessus de chaque jauge, qui assurent d'abord une protection contre les solvants et l'humidité mais aussi une certaine protection mécanique.

Le capot est fixé ensuite autour de chaque jauge par un point de soudure afin de ne pas modifier la section comprimée des boutons.

e) *Mesure de référence en usine (séquence 0)*

En dernier lieu, on a effectué une auscultation des jauges pour deux positions de chaque bouton instrumenté (boutons posés horizontalement ; Annexe 4-5/1) :

- ♦ avec la jauge de compensation (j_0) au-dessus ;
- ♦ avec la jauge de compensation (j_0) au-dessous.

Cette mesure permet, d'une part, de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure et, d'autre part, de déterminer le déséquilibre initial du pont pour chaque point de mesure sous sollicitation nulle. Ces valeurs seront utilisées pour corriger les valeurs des déformations enregistrées correspondant à chaque série de mesure après la mise en place des boutons.

4.5.4.4 Connexion des jauges au dispositif d'acquisition sur le chantier

La mise en place des boutons B78 à B82 a été réalisée le 16/05/2000, durant l'après-midi au fur et à mesure de la progression de l'excavation entre les parois (depuis le tympan vers le côté ouest de l'ouvrage).

Les boutons ont d'abord été posés entre les appuis accrochés sur les panneaux de parois moulées situés face en face. Ils ont ensuite été serrés à l'aide d'une clef manuelle assurant leur mise en faible compression.

Le front d'excavation s'est arrêté à une distance d'environ 16m du tympan ouest de l'ouvrage en fin de journée (Fig. 4-20) tandis que sa profondeur en section transversale était variable (Fig. 4-21).

Le dispositif d'acquisition a été installé dans une armoire située dans l'enceinte du chantier, tous près du tympan ouest, sur la rive sud de l'ouvrage.

Les câbles ont été ligaturés le long de chaque buton. A l'appui sud de chaque buton, ils ont été accrochés contre la paroi juste au-dessous la poutre de couronnement et ramenés vers le tympan ouest de l'ouvrage, au droit duquel ils ont été passés de l'autre côté de la paroi par-dessus la poutre de couronnement. Les câbles ont été connectés au dispositif d'acquisition par des boîtiers multivoies.

4.5.4.5 Mesure initiale

Après avoir vérifié le bon fonctionnement des circuits de mesure, on a programmé l'acquisition des mesures de déformations pendant la nuit de 16/05 à 17/05 à une fréquence de deux séries par heure.

Les jauges installées sur le B₈₂ ont nécessité une rallonge du câble de liaison ; leur auscultation a commencé le 17/05 à 11h33, juste avant la reprise de l'excavation.

Dans l'Annexe 4-5/1 on présente le relevé des mesures initiales effectuées dans l'intervalle du 16/05 à 21h55 au 17/05 à 14h03.

Les valeurs enregistrées sont traduites directement en microdéformations ($\mu\text{m}/\text{m}$) dans l'hypothèse où la variation de résistance électrique engendrée par les déformations de jauges, ΔR , est petite par rapport à la résistance initiale (120Ω). On utilise les relations :

- ♦ pour les jauges de type 250UW (ayant un facteur de jauge, $k = 2,065$) incluses dans un demi-pont à jauge de compensation non active (Fig. 4-19) :

$$\varepsilon = \frac{10^6}{k} \frac{\Delta R}{R} = \frac{10^6}{2,065} \frac{4U}{E} = \frac{1,937U}{E} 10^6 \quad ; \quad (4.5)$$

- ♦ pour les rosettes de type 125UT ($k = 2,045$) incluses dans un demi-pont à jauge de compensation active en sens transversal (Fig. 4-19) :

$$\varepsilon = \frac{10^6}{k} \frac{\Delta R}{R} = \frac{10^6}{2,045} \frac{4U}{(1+0,285)E} = \frac{1,522U}{E} 10^6 \quad . \quad (4.6)$$

4.5.4.6 Dépouillement des mesures de déformations sur les butons

Les mesures des déformations ont été interprétées en termes d'effort appliqué par les butons sur la paroi. La disposition des quatre jauges dans une même section d'un buton en positions diamétralement opposées permet d'obtenir d'une façon redondante l'effort axial qui s'y développe, ainsi que les moments de flexion agissant dans les deux plans contenant les diamètres orthogonaux reliant les jauges.

Pour chaque buton instrumenté «8j» (j=0,1,2) et pour chaque série de mesure «i» (i = 1,n), on a obtenu l'effort axial à partir des déformations enregistrées par chaque paire de jauges diamétralement opposées. Les formules utilisées (qui intègrent les corrections correspondant aux déformations mesurées en usine sous un effort axial nul, ε^0) sont les suivantes :

- ♦ à l'extrémité sud de chaque buton instrumenté (deux valeurs) :

$$N_{8j}^i = EA_{8j} \frac{(\varepsilon_{1j}^i - \varepsilon_{1j}^0) + (\varepsilon_{3j}^i - \varepsilon_{3j}^0)}{2} \quad \text{et} \quad N_{8j}^i = EA_{8j} \frac{(\varepsilon_{2j}^i - \varepsilon_{2j}^0) + (\varepsilon_{4j}^i - \varepsilon_{4j}^0)}{2} ; \quad (4.7)$$

- ♦ à l'extrémité nord de chaque buton instrumenté (deux valeurs) :

$$N_{8j}^i = EA_{8j} \frac{(\varepsilon_{5j}^i - \varepsilon_{5j}^0) + (\varepsilon_{7j}^i - \varepsilon_{7j}^0)}{2} \quad \text{et} \quad N_{8j}^i = EA_{8j} \frac{(\varepsilon_{6j}^i - \varepsilon_{6j}^0) + (\varepsilon_{8j}^i - \varepsilon_{8j}^0)}{2} . \quad (4.8)$$

On dispose de cette façon d'un moyen de vérification immédiate de la qualité des mesures, sachant que les deux valeurs de l'effort axial obtenues dans une même section de mesure sont égales et que les valeurs de l'effort axial obtenues aux deux extrémités de chaque buton sont aussi égales dans la mesure où l'on assure leur mise en place horizontalement. Evidemment, cette relation est vérifiée tant que les jauges sont bien installées dans des positions diamétralement opposées et sont collées et orientées avec leur base de mesure dans la direction longitudinale du buton.

Par ailleurs, pour chaque buton instrumenté « 8j » et chaque série de mesure « i » on a obtenu les composantes du moment de flexion agissant aux deux extrémités des butons (dans les sections instrumentées) dans les plans contenant les diamètres reliant les

jauges. On a utilisé les relations suivantes :

- ♦ à l'extrémité sud de chaque buton instrumenté (vecteurs moment orientés dans les directions diamétrales orthogonales reliant les jauges 2 à 4 et respectivement 1 à 3):

$$M_{8j}^i(2-4) = EI_{8j} \frac{(\varepsilon_{3j}^i - \varepsilon_{3j}^0) - (\varepsilon_{1j}^i - \varepsilon_{1j}^0)}{D_{8j}} \quad \text{et}$$

$$M_{8j}^i(1-3) = EI_{8j} \frac{(\varepsilon_{4j}^i - \varepsilon_{4j}^0) - (\varepsilon_{2j}^i - \varepsilon_{2j}^0)}{D_{8j}} \quad ; \quad (4.9)$$

- ♦ à l'extrémité nord de chaque buton instrumenté (vecteurs moment orientés dans les directions diamétrales orthogonales reliant les jauges 6 à 8 et respectivement 5 à 7):

$$M_{8j}^i(6-8) = EI_{8j} \frac{(\varepsilon_{7j}^i - \varepsilon_{7j}^0) - (\varepsilon_{5j}^i - \varepsilon_{5j}^0)}{D_{8j}} \quad \text{et}$$

$$M_{8j}^i(5-7) = EI_{8j} \frac{(\varepsilon_{8j}^i - \varepsilon_{8j}^0) - (\varepsilon_{6j}^i - \varepsilon_{6j}^0)}{D_{8j}} \quad (4.10)$$

Le relevé de la position exacte des jauges sur la section transversale pour chaque buton instrumenté (Fig. 4-21) permet de déterminer les composantes du moment fléchissant agissant dans les plans horizontal et vertical.

Ainsi, pour le buton B₈₂ les formules 4.9 et 4.10 permettent d'obtenir directement les composantes du moment fléchissant agissant dans les plans horizontal [M(1-3) et M(5-7)] et vertical [M(2-4) et M(6-8)] tandis que, pour les butons B₈₀ et B₈₁, il faut tenir compte de l'inclinaison par rapport à la verticale des deux diamètres orthogonaux reliant les deux paires de jauges (respectivement 30 degrés et 45° degrés; voir figure 4-21).

Théoriquement, si l'on considère que les butons sont articulés en appui et installés avec leur axe longitudinal en position rigoureusement perpendiculaire aux parois, le moment de flexion agissant dans le plan horizontal doit être nul, tandis que le moment de flexion développé dans le plan vertical (causé par le poids propre du buton) est estimé à environ 7,5 kNm à l'extrémité sud et à environ 3,5 kNm à l'extrémité nord (compte

tenu de la position des sections instrumentées des butons ; Fig 4-21. Cependant, en pratique on peut constater des moments de flexion parasites à cause d'une articulation imparfaite des butons ou de leur positionnement dévié par rapport à la position théorique ou même à cause d'une température non uniforme suivant leur circonférence (en fonction de la position du soleil).

L'Annexe 4-5/2 présente les efforts expérimentaux obtenus en appliquant les relations 4.7, 4.8, 4.9 et 4.10 pour l'ensemble des mesures enregistrées dans cette étude.

4.6 Phasage de mesure

Après la mise en place de l'instrumentation, le suivi des appareillages de mesure a été organisé en fonction de l'avancement des travaux, afin d'observer leur effet sur le comportement mécanique de la paroi moulée.

Ainsi, il a été effectué une mesure avant et après chaque phase de réalisation de l'ouvrage.

Par ailleurs, des mesures intermédiaires ont été réalisées pour certaines processus où l'on s'intéresse à la variation des paramètres de mesure. C'est le cas des mesures de pression d'interface pendant le bétonnage (surveillance et enregistrement manuels des mesures) mais aussi celui des mesures des déformations longitudinales des butons, pour lesquelles la variation journalière de température présente une influence importante (acquisition automatique à une fréquence imposée).

Le calendrier des mesures réalisées est présenté dans le tableau 4-5 par référence aux phases de construction observées.

4.7 Comportement observé et prévisions théoriques

Les résultats expérimentaux obtenus pour chaque phase de construction (phases numérotées de 0 à 8 dans le tableau 4-5) sont présentés ci-après. Chaque fois que possible, ils font l'objet d'une comparaison avec les résultats de la prévision

théorique :

Tableau 4-5 : Phasage de construction et calendrier des mesures dans le profil instrumenté

No. séq.	Date	Description des phases de construction	Séquences des mesures réalisées						
			Contraintes d'interface sol / paroi	Déformations longitudinales dans les butons	Mesures inclinométriques		Convergence entre les parois		
					déformée de la paroi	déplacement du massif soutenu	en haut de la paroi	au niveau des butons	
0.	9-mars	Mise en œuvre des parois moulées (S81 - S83)	mesure 0 (22 séries)						
1.	10-mars 15-mars	Béton jeune	mesure 1 (10 séries)						
2.	16-mars 21-mars	Mise en œuvre d'un panneau adjacent (78-80)	mesure 2 (3 séries)						
3.	17-avr 2-mai	Exécution de la poutre de couronnement	mesure 3 (4 séries)	(avant) mesure 0*	mesure 0 (après)	mesure 0 (après)	mesure 0 (après)		
4.	16-mai	Préterrassment et mise en place des butons instrumentés	mesure 4 (2 séries)	mesure 4 (après, en continu)	mesure 1 (après)		mesure 1 (après)	mesure 0 (après)	
5.	17-mai 18-mai	Excavation jusqu'à la cote de fondation du radier	mesure 5 (10 séries)	mesure 5 (en continu)	mesures 2 et 3 (après)	mesure 3 (après)	mesures 2, 2bis et 3 (après)	mesures 2bis et 3 (après)	
6.	8-juin 9-juin	Mise en œuvre du radier entre les parois	mesure 6 (2 séries)	mesure 6 (en continu)	mesure 4 (après)		mesure 4 (après)	mesure 4 (après)	
7.	20-juin	Dépose des butons	mesure 7 (1 série)	mesure 7 (en continu)	mesure 5 (après)		mesure 6 (après)	mesure 5 (après)	
8.	26-juil	5 semaines après la fin des travaux dans la zone instrumentée	mesure 8 (1 série)		mesure 6	mesure 6	mesure 6	mesure 6	

*- la mesure 0 a été réalisée dans l'usine qui fabrique les butons.

- ♦ pour ce qui concerne le bétonnage de l'écran (séquence 0), les résultats expérimentaux sont comparés aux valeurs calculées avec les formules empiriques proposées par Lings et al. (1994) ;
- ♦ pour ce qui concerne les phases qui précèdent l'excavation devant l'écran (séquences 1 à 3), on se contente de présenter, les observations expérimentales ;
- ♦ pour ce qui concerne les phases de sollicitation en flexion de l'écran (séquences 4 à 8), les résultats expérimentaux sont rapportés à leur prévision théorique fournie par l'application de la méthode du coefficient de réaction (Balay, 1985 ; Delattre, 1999).

Pour ces dernières phases (qui suscitent un intérêt particulier sur le plan de fonctionnement mécanique de l'ouvrage), on a envisagé trois configurations de calcul pour simuler le comportement observé dans un profil transversal du panneau S81.

4.7.1 Mise en œuvre du panneau instrumenté (séquence 0)

Le premier ensemble de résultats de cette expérimentation porte sur la variation des pressions exercées à l'interface de la paroi moulée avec le sol durant le bétonnage.

Cet ensemble de résultats consiste en une séquence de 22 mesures de pression (voir 4.4.3.4 et l'Annexe 4-2) étalées sur un intervalle de temps de 11 h et portant sur les 6 capteurs de pressions totales. Ces mesures se rapportent à quatre situations de mesure principales qui se sont succédées après la pose de la cage d'armature instrumentée dans la fouille remplie de boue bentonitique :

- ♦ pression au sein de la colonne de boue bentonitique (avant la mise en contact des capteurs avec le bord vertical de l'excavation ; mesures 1 à 4) ;
- ♦ pression exercée par la boue à l'interface avec le bord vertical de la tranchée (après le vérinage des capteurs ; mesures 5 à 8) ;
- ♦ pression exercée par le béton sur le bord vertical de l'excavation, durant sa mise en œuvre (capteurs vérinés ; mesures 9 à 15) ;

- ♦ pression exercée à l'interface de la paroi moulée avec le sol durant la réduction à zéro de la pression de vérinage des capteurs (mesures 16 à 22).

Les résultats expérimentaux indiqués dans l'Annexe 4-2 comportent la correction de la dérive thermique des signaux des capteurs due aux variations de température mesurées en parallèle avec les sondes RTD intégrées aux capteurs SI.

On remarque l'homogénéité des températures observées avec les quatre capteurs SI ; pour chaque mesure, que ce soit dans la boue, durant le bétonnage ou après le bétonnage, l'écart type des quatre valeurs mesurées en même temps ne dépasse jamais 2%.

Par défaut, la correction de la dérive thermique des mesures, pour l'interprétation des mesures provenant des capteurs Kyowa, a été effectuée en utilisant une température prise égale à la moyenne des valeurs indiquées par les quatre capteurs SI.

Simultanément aux mesures de pressions provenant des six capteurs de pressions totales, ont été relevés :

- ♦ le niveau de la boue dans la fouille, noté NB, relevé par rapport au niveau de la murette guide, NMG ;
- ♦ le niveau du béton mis en œuvre dans la fouille, noté NBB, relevé par rapport au NMG ;
- ♦ la pression dans les circuits de vérinage des capteurs (p_v), mesurée en haut de la fouille.

4.7.1.1 Pression exercée dans la boue

Les mesures 1, 2, 3 et 4 (voir l'Annexe 4-2/1-D et l'Annexe 4-2/2-D), effectuées après la mise en place de la cage instrumentée dans la tranchée, concernent la pression hydrostatique exercée au sein de la colonne de boue. Ces mesures ont permis de vérifier le fonctionnement des capteurs et d'estimer in situ le poids volumique moyen de la boue, compte tenu du niveau de la boue, dans la tranchée et de la position altimétrique des capteurs.

Un premier constat concerne le mauvais fonctionnement du capteur SI_0 : un sous-enregistrement d'environ 20 kPa est mis en évidence par rapport à la valeur estimée de la pression hydrostatique agissant à son niveau. Ce sous-enregistrement est supérieur à 3% de l'étendue de mesure, EM, du capteur alors que la précision de mesure indiquée par le fabricant est de 0,5% EM. Notons qu'il s'agit du capteur pour lequel il a auparavant été constaté un décalage du zéro plus important (4.4.3.4).

Les cinq autres capteurs présentent une réponse en bonne concordance avec l'estimation de la pression hydrostatique agissant à leur niveau. Pour ces capteurs, l'écart des valeurs mesurées aux valeurs estimées de la pression hydrostatique est toujours inférieur à 2 kPa (inférieur à 0,4% de l'EM).

Une analyse par régression linéaire sur l'ensemble des valeurs mesurées par ces cinq capteurs sur les mesures 1 à 4 a permis d'estimer la valeur moyenne du poids volumique de la boue (la pente de la droite de régression).

On obtient $\gamma_{\text{boue}}=11,70 \text{ kN/m}^3$ avec une écart type de 1,8 %. Cette valeur a été retenue pour le calcul des pressions hydrostatiques engendrées par la colonne de boue pour les situations de mesure ultérieures ; elle est en bonne concordance avec la valeur obtenue par pesage des échantillons de volume connu prélevés sur le retour du circuit de recyclage de la boue ($11,6 \text{ kN/m}^3$).

La température observée est pour sa part quasiment constante pour les quatre séries de mesure (environ $15,4 \text{ }^\circ\text{C}$) ; elle est supérieure d'environ $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$ à la température enregistrée dans la mesure 0 (cage en cours de descente).

4.7.1.2 Pression exercée par la boue sur le bord vertical de la tranchée

Les mesures 5, 6, 7 et 8 sont réalisées après la mise en contact des surfaces actives des capteurs SI avec le bord vertical de la fouille, mais avant que le béton ne soit arrivé au niveau des capteurs les plus bas (SI_0 et SI_1).

Dans cette situation, la pression p_{mes} mesurée par les capteurs, correspond à la valeur de la pression hydrostatique de la boue agissant à leurs niveaux, à laquelle s'ajoute la

pression moyenne de contact avec le sol causée par le vérinage, p_{ct}^v . On peut donc exprimer les valeurs expérimentales de la pression hydrostatique dans la colonne de boue par la relation :

$$p_{exp} = p_{mes} - p_{ct}^v \quad (4.11)$$

Dans cette relation, la valeur p_{ct}^v est calculée en fonction de la pression hydraulique dans les vérins, (p_v), du diamètre du piston ($\phi_p = 5$ cm) et du diamètre de la surface de contact du capteur et de la couronne de la plaque d'appui ($d_c=28$ cm pour les capteurs SI et $d_c=25$ cm pour les capteurs Kyowa) :

$$p_{ct}^v = \frac{p_v \phi_p^2}{d_c^2} \quad (4.12)$$

Le tableau 4-6 présente pour chaque série de mesures les valeurs théoriques (p_{th} - calculées en fonction du γ_{boue} et du niveau de la boue relevé dans la tranchée, NB) et expérimentales (p_{exp} - calculées avec la relation 4.11) de la pression hydrostatique agissant au niveau de chaque capteur.

Tableau 4-6 : Pression hydrostatique de la boue (valeurs théoriques et observées).

Capt.	Prof. NMG=0 (m)	Mesure 5		Mesure 6		Mesure 7		Mesure 8	
		p_{ct}^v	p_{mes}	p_{ct}^v	p_{mes}	p_{ct}^v	p_{mes}	p_{ct}^v	p_{mes}
		p_{th}	p_{exp}	p_{th}	p_{exp}	p_{th}	p_{exp}	p_{th}	p_{exp}
		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
K₅	2,10	0,0	22,8	0,0	22,0	0,0	-	0,0	-
		23,0	22,8	22,1	22,0	19,4		19,4	
K₂	4,86	0,0	54,7	0,0	54,2		-		-
		55,3	54,7	54,4	54,2	51,7		51,7	
SI₃	7,30	35,1	111,3	30,3	112,4	44,6	126,0	43,0	123,9
		83,8	76,2	82,9	82,1	80,3	81,4	80,3	80,8
SI₂	7,30	35,1	113,7	30,3	121,4	44,6	131,2	43,0	135,1
		83,8	78,6	82,9	91,1	80,3	86,6	80,3	92,1
SI₁	9,40	35,1	117,6	30,3	120,2	44,6	123,4	43,0	125,3
		108,4	82,5	107,5	90,0	104,8	78,8	104,8	82,2
SI₀	9,40	35,1	149,2	30,3	153,9	44,6	166,8	43,0	159,6
		108,4	114,1	107,5	123,6	104,8	122,2	104,8	116,6

On mentionne qu'à ce stade les capteurs Kyowa n'étaient pas vérinés et que leurs signaux ont été interrompus au moment des mesures 7 et 8.

La figure 4-22 compare pour les phases 6 et 8 les valeurs expérimentales (p_{mes} et p_{exp}) et les diagrammes théoriques de variation de la pression hydrostatique (p_{th}) de la boue suivant la profondeur de la paroi (exprimée par rapport au niveau de la murette guide NMG). On a retenu seulement ces deux phases parce que les phases 5 et 7, qui surviennent juste après la mise en (sur)pression des circuits de vérinage, sont moins représentatives (pression hydraulique dans les circuits incomplètement stabilisée).

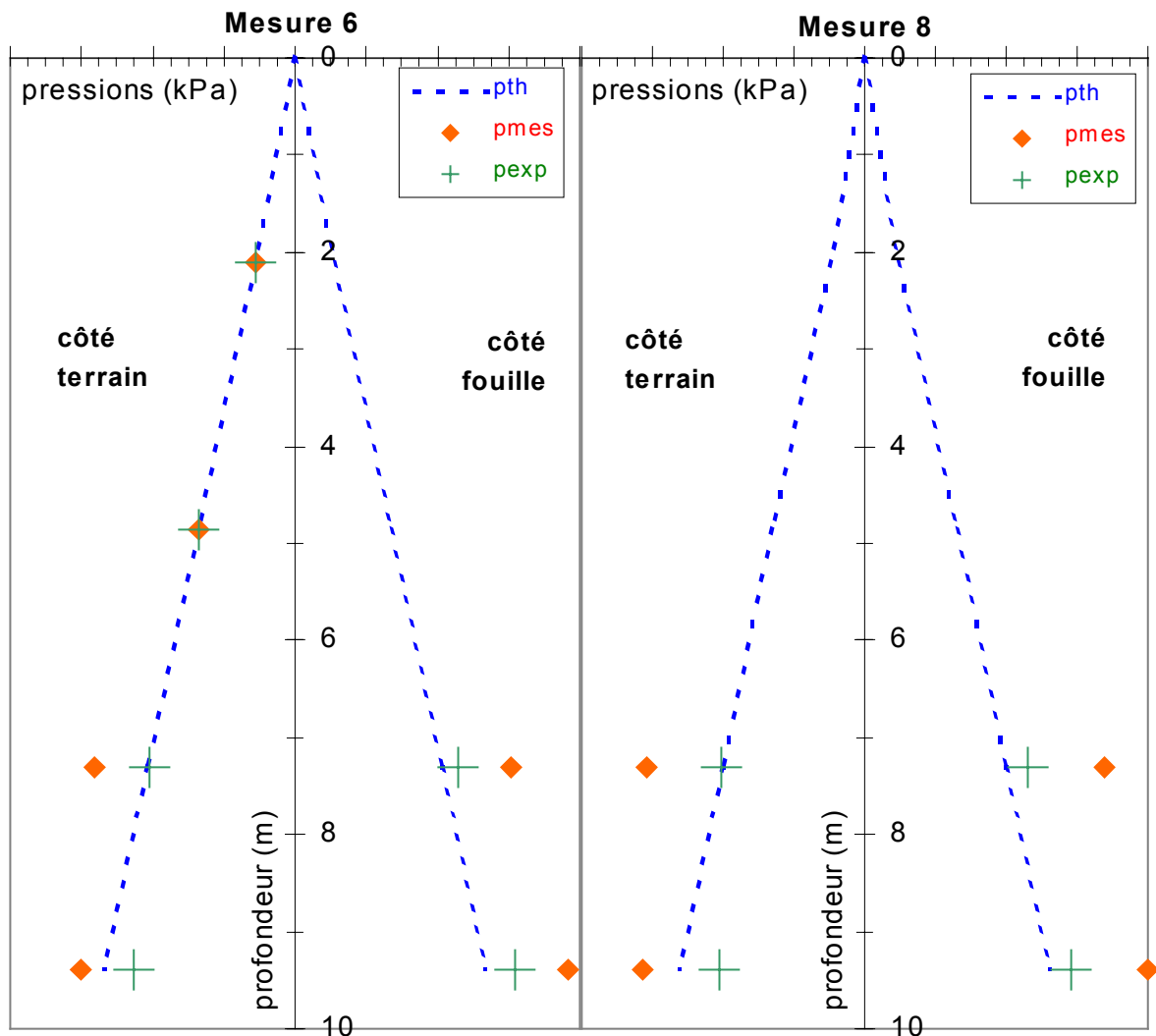


Fig. 4-22 : Résultats de mesure (mesures 6 et 8) et valeurs théoriques de la pression hydrostatique

Les écarts constatés entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques

présentent une ampleur variable d'un capteur à l'autre :

- ♦ pour le capteur SI_0 (côté fouille), on constate un sur-enregistrement de l'ordre de 15 % (16 kPa) ;
- ♦ pour le capteur SI_1 (côté terrain), on constate un sous-enregistrement de l'ordre de 20 % (22 kPa) ;
- ♦ pour le capteur SI_2 (côté fouille), on constate un sur-enregistrement de l'ordre de 14% (11 kPa) ;
- ♦ pour le capteur SI_3 (côté terrain), les résultats expérimentaux sont quasiment identiques aux valeurs théoriques (erreur relative $e_r < 1\%$).

4.7.1.3 Pressions observées après la montée du béton au-dessus des capteurs

La mesure 9 intervient après que le niveau du béton coulé dans la fouille a dépassé le niveau des capteurs les plus bas. A ce stade, les deux capteurs (SI_0 et SI_1) changent de situation de mesure : ils observent la pression transmise par le béton fluide sur le bord vertical de l'excavation, à laquelle s'ajoute la pression transmise par les vérins.

La mesure 10 est réalisée après la mise en œuvre de deux autres toupies de béton dans la fouille. A ce stade, le niveau du béton relevé dans la fouille dépasse de 0,35 m la deuxième rangée de capteurs (SI_2 et SI_3).

Les capteurs Kyowa sont alors mis en contact avec le bord vertical de la tranchée, en deux temps :

- ♦ le plus bas (K_2) après la phase de mesure 10 ;
- ♦ le plus haut (K_5) après la phase de mesure 11.

La mesure 15 est effectuée après la fin du bétonnage des panneaux instrumentés.

Les tableaux 4-7 et 4-8 présentent les valeurs théoriques et expérimentales correspondant à la pression agissant au niveau de chaque capteur pour les séries de mesure 10, 12, 13 et 15. La hauteur du béton coulé au-dessus de chaque capteur est désignée par $H_{\text{béton}}$.

Tableau 4-7 : Bilan des résultats de mesure des séries 10 et 12 (estimation théorique et expérimentale des pressions agissant au niveau des capteurs)

Capt.	Prof. NMG=0 (m)	Mesure 10			Mesure 12		
		p_{boue} (kPa)	$p_{bét}$ (kPa)	p_{mes} (kPa)	p_{boue} (kPa)	$p_{bét}$ (kPa)	p_{mes} (kPa)
		p_{th} (kPa)	$H_{bét}$ (m)	p_{exp} (kPa)	p_{th} (kPa)	$H_{bét}$ (m)	p_{exp} (kPa)
K ₅	2,10	19,9	0,0	17,9	20,4	20,4	56,9
		19,9	-	17,9	20,4	-	22,9
K ₂	4,86	52,2	0,0	49,8	40,2	25,3	115,7
		52,2	-	49,8	65,5	1,1	81,7
Sl ₃	7,30	76,6	8,4	141,6	40,2	83,5	153,3
		85,0	0,4	106,5	123,8	3,50	126,2
Sl ₂	7,30	76,6	8,4	145,4	40,2	83,5	152,3
		85,0	0,4	110,3	123,8	3,5	125,1
Sl ₁	9,40	76,6	58,5	158,3	40,2	108,1	157,8
		135,1	2,5	123,3	148,4	5,6	130,7
Sl ₀	9,40	76,6	58,5	158,8	40,2	108,1	143,4
		135,1	2,5	123,7	148,4	5,6	116,3

Tableau 4-8 : Bilan des résultats de mesure des séries 13 et 15 (estimation théorique et expérimentale des pressions agissant au niveau des capteurs)

Capt.	Prof. NMG=0 (m)	Mesure 13			Mesure 15		
		p_{boue} (kPa)	$P_{bét}$ (kPa)	p_{mes} (kPa)	p_{boue} (kPa)	$p_{bét}$ (kPa)	p_{mes} (kPa)
		p_{th} (kPa)	$H_{bét}$ (m)	p_{exp} (kPa)	p_{th} (kPa)	$H_{bét}$ (m)	p_{exp} (kPa)
K ₅	2,10	19,1	0,0	62,6	1,5	47,7	86,0
		19,1	0,0	31,0	49,3	2,0	58,0
K ₂	4,86	21,4	61,1	126,5	1,5	95,5	130,0
		82,5	2,6	94,9	97,0	4,8	102,0
Sl ₃	7,30	21,4	107,2	150,2	1,5	95,5	143,1
		128,6	5,0	125,0	97,0	7,2	120,7
Sl ₂	7,30	21,4	107,2	141,1	1,5	95,5	133,7
		128,6	5,0	115,9	97,0	7,2	111,4
Sl ₁	9,40	21,4	131,7	143,6	1,5	95,5	136,6
		153,1	7,1	118,4	97,0	9,3	114,3
Sl ₀	9,40	21,4	131,7	131,3	1,5	95,5	160,3
		153,1	7,1	106,1	97,0	9,3	138,0

Les pressions expérimentales sont obtenues en appliquant la relation (4.11) aux valeurs mesurées par les capteurs et à la pression de contact imposée par les vérins. La pression p_v , dans le circuit hydraulique de vérinage (circuit maintenu fermé dont la pression a été relevée à chaque série de mesure), diminue lentement (de 14 bars au moment de la mesure 7 jusqu'à 7 bars à la fin du bétonnage). Cette diminution peut être attribuée à l'effet de la surpression appliquée sur le bord de l'excavation suite à la montée du niveau du béton.

Pour ce qui concerne les valeurs théoriques, on distingue deux situations en fonction de la profondeur de calcul par rapport au niveau du béton mis en œuvre dans la tranchée :

- ♦ au-dessus du niveau du béton, elles correspondent à l'estimation de la pression hydrostatique de la boue ($\gamma_{boue}=11,70 \text{ kN/m}^3$) :

$$p_{th}(z) = \gamma_{boue}z, \quad \text{pour } z \in [0, z_{b-b}) \quad ; \quad (4.13)$$

- ♦ au-dessous, la distribution théorique de la pression horizontale est définie par les courbes qui concourent à la description du modèle semi-empirique bilinéaire proposée par Lings et al. (voir 2.5.1.6 et la figure 2.11) :

$$p_{th}(z) = p_{boue} + p_{bét} = \begin{cases} \gamma_{boue}z_{b-b} + \gamma_{bét}(z - z_{b-b}), & \text{pour } z \in [z_{b-b}, z_{b-b} + h_{cr}) \\ \gamma_{boue}(z - h_{cr}) + \gamma_{bét}h_{cr} & \text{pour } z \in [z_{b-b} + h_{cr}, H_p] \end{cases} \quad (4.14)$$

Dans les relations (4.13) et (4.14), on a noté :

z – la profondeur exprimée par rapport à NB (niveau de la boue dans la fouille relevé à chaque série de mesures ; voir Annexes 4-3.1 et 4-3.2) ;

p_{boue} - la composante de la pression transmise au niveau du capteur et due à la colonne de boue au dessus du niveau du béton ;

$p_{bét}$ - la composante de la pression transmise au niveau du capteur et due à la colonne de béton au dessus du capteur ;

z_{b-b} – la profondeur du béton coulé dans la fouille par rapport à NB ;

H_p – la profondeur de la paroi, exprimée par rapport à NB ;

$\gamma_{\text{béton}}$ – le poids volumique du béton coulé ; en l'absence de mesures, il a été pris égal au poids volumique déterminé à 7 jours sur 6 éprouvettes prélevées le jour de bétonnage ($\gamma_{\text{bét}} = 23,87 \text{ kN/m}^3$) ;

h_{cr} – la hauteur critique de la colonne de béton pour laquelle la variation de la pression exercée par le béton varie suivant une loi hydrostatique ; elle a été estimée en traçant l'enveloppe des courbes instantanées des pressions horizontales exercées sur le bord vertical de la tranchée durant le bétonnage (Fig. 4-23) sous une forme bilinéaire.

Pour une hauteur critique de 3,5 m, l'écart type entre les valeurs expérimentales nettes maximales et la courbe enveloppe bilinéaire est d'environ 12 kPa, c'est-à-dire 2 à 3 fois l'incertitude globale de mesure en milieu fluide des capteurs. On peut donc estimer que les pressions maximales horizontales observées durant le bétonnage sont cohérentes avec le modèle bilinéaire.

La figure 4-23 présente aussi les résultats de la dernière mesure de la journée (mesure 22, après la réduction à zéro de la pression de vérinage) afin de donner une idée de leur position par rapport aux valeurs maximales.

Les figures 4-24 et 4-25 présentent les diagrammes de variation théoriques de la pression horizontale exercée par la colonne de boue et béton sur le bord vertical de la tranchée en fonction du niveau du béton relevé (relations 4.13 et 4.14) ainsi que les résultats expérimentaux obtenus à chaque mesure.

Seules les mesures 10 et 12 (Fig. 4-24) et les mesures 13 et 15 (Fig. 4-25) ont été retenues pour cette représentation. A chaque stade, un trait bleu horizontal indique sur le graphique le niveau du béton relevé dans la fouille.

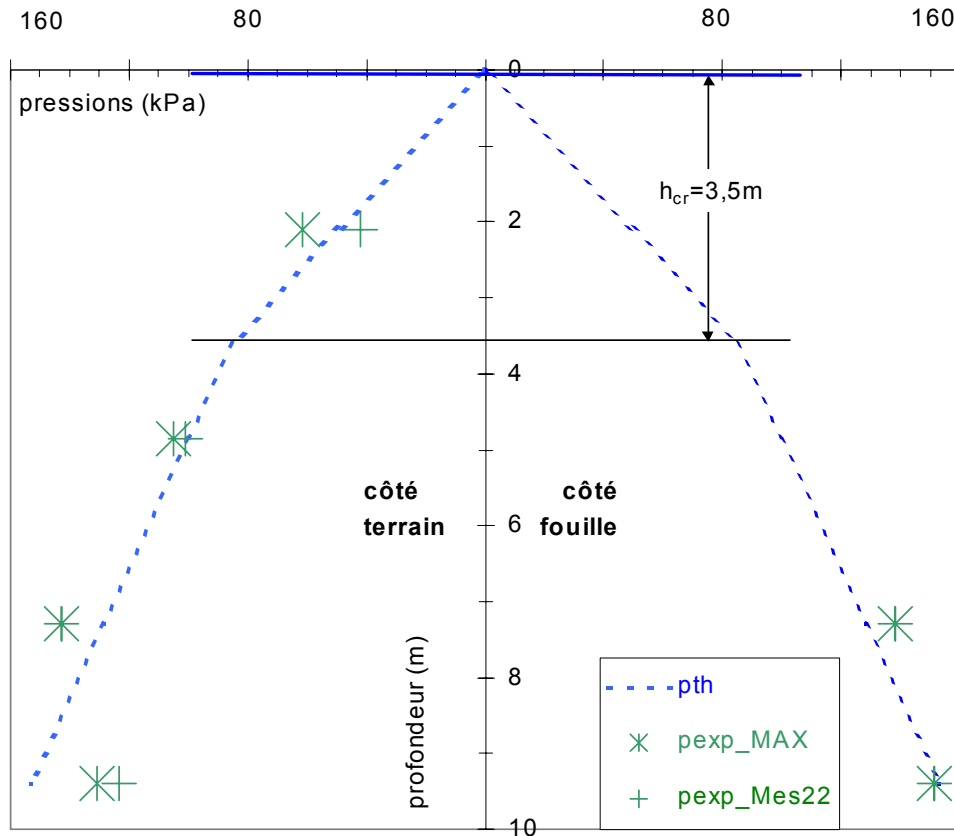


Fig. 4-23 : Pressions horizontales nettes maximales (p_{exp_MAX}) et ultimes (p_{exp_Mes22}) observées durant le bétonnage et estimation bilinéaire pour la courbe enveloppe des pressions horizontales nettes maximales

Le tableau 4-9 présente pour les mesures 9 à 15, l'ensemble des valeurs expérimentales correspondant aux pressions exercées à l'interface de l'excavation (obtenues avec la relation 5.11) et les estimations théoriques (calculées avec la relation 5.13 ou 5.14). Le bilan des résultats obtenus est effectué en évaluant l'écart relatif :

$$e_r = \frac{P_{exp} - P_{th}}{P_{th}} 100 \quad (\%) \quad (4.15)$$

Les résultats obtenus varient sensiblement d'un capteur à l'autre :

- ♦ pour les capteurs SI_0 et SI_1 on constate un sous-enregistrement systématique relativement élevé (entre 5 et 27 % ou, en écart absolu, compris entre 7 et 47 kPa) ;
- ♦ pour les capteurs SI_2 et SI_3 on constate un sur-enregistrement important dans la phase 10 qui diminue lors des phases 11 et 12 et change de signe (sous-

enregistrement) pour les phases ultérieures ; sauf pour la phase 10, l'erreur relative reste assez limitée (inférieure à 13% ou, en valeur absolue, 17 kPa) ;

- ♦ pour le capteur K_2 (mis en contact avec le bord vertical de l'excavation juste avant la mesure 11) on constate un sur-enregistrement important (24 %) après sa couverture par le béton (phase 12) ; pour les phases ultérieures, le sur-enregistrement diminue progressivement jusqu'à 1% après la fin du bétonnage (ce qui correspond à l'incertitude de mesure en milieu fluide du capteur) ;
- ♦ pour le capteur K_5 (mis en contact avec le bord vertical de l'excavation juste avant la mesure 12) on observe le même comportement que pour le capteur K_2 , mais les erreurs relatives sont sensiblement plus élevées (amplifiées, sans doute, par la valeur très réduite de la pression à ce niveau).

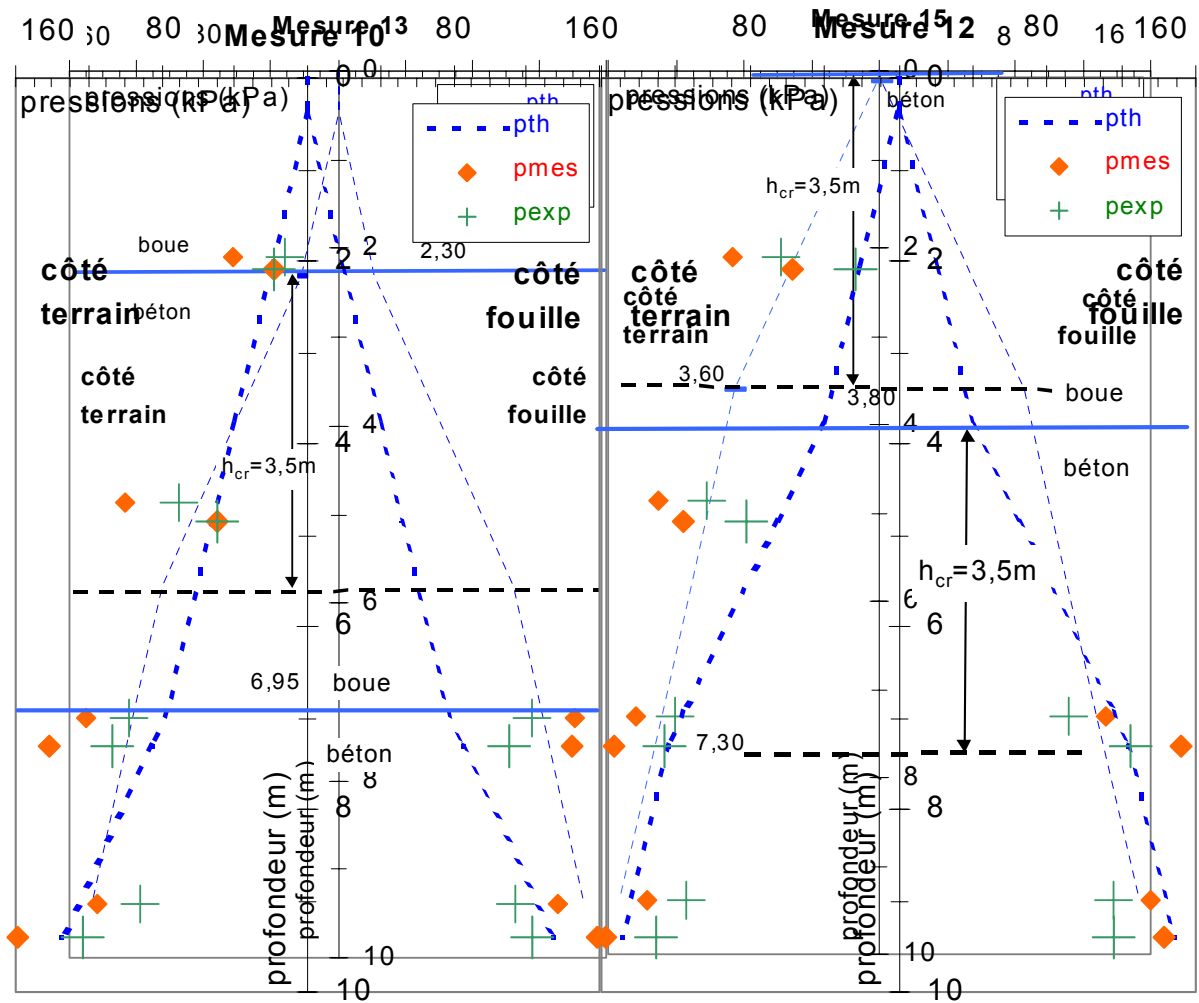


Fig. 4-24 : Résultats de mesure (mesures 10 et 12) et valeurs théoriques de la pression exercée sur le bord vertical de la tranchée

Fig. 4-25 : Résultats de mesure (mesures 13 et 15) et valeurs théoriques de la pression exercée sur le bord vertical de la tranchée

Pour ce qui concerne le suivi des températures avec les capteurs SI, on note que la température moyenne progresse, légèrement, de 15,6 °C pour la mesure 9 jusqu'à 16,9 °C pour la mesure 15.

Pour chaque mesure, la température varie très peu d'un capteur à l'autre (écart type des valeurs individuelles par rapport à leur moyenne inférieur à 0,2°C).

Tableau 4-9 : Écart relatif entre les résultats expérimentaux et l'estimation semi-empirique bilinéaire (phases 9 à 15)

Capt.	Prof. (m)	Mes. 9	Mes. 10	Mes. 11	Mes. 12	Mes. 13	Mes. 14	Mes. 15
		14h15	14h35	14h45	15h35	16h00	16h20	16h55
		p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)	p_{exp} (kPa)
		p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)	p_{th} (kPa)
		e_r (%)	e_r (%)	e_r (%)	e_r (%)	e_r (%)	e_r (%)	e_r (%)
K ₅	2,10	-	17,9	17,8	22,9	31,0	49,9	58,0
		24,6	19,9	19,3	20,4	19,1	38,8	49,3
			-10,0	-7,9	12,7	62,7	28,5	17,8
K ₂	4,86	-	49,8	61,9	81,7	94,9	102,7	102,0
		56,9	52,2	51,6	65,5	82,5	98,5	99,8
			-4,5	20,1	24,6	15,0	4,3	2,2
SI ₃	7,30	90,5	106,5	116,9	126,2	125,0	120,0	120,7
		85,4	85,0	103,9	123,8	122,5	127,1	128,3
		5,9	25,4	12,5	2,0	2,0	-5,6	-5,9
SI ₂	7,30	102,4	110,3	114,4	125,1	115,9	120,9	111,4
		85,4	85,0	103,9	123,8	122,5	127,1	128,3
		19,9	29,8	10,1	1,1	-5,4	-4,9	-13,2
SI ₁	9,40	105,7	123,3	124,8	130,7	118,4	113,7	114,3
		120,9	135,1	147,3	148,4	147,1	152,0	152,9
		-12,6	-8,8	-15,2	-11,9	-19,5	-25,2	-25,2
SI ₀	9,40	128,2	123,7	117,8	116,3	106,1	124,6	138,0
		120,9	135,1	147,3	148,4	147,1	152,0	152,9
		6,0	-8,4	-20,0	-21,6	-27,9	-18,1	-9,8

- les valeurs relatives aux capteurs situés au-dessous du niveau du béton sont indiquées en gras.

4.7.1.4 Résultats obtenus pendant la réduction à 0 de la pression de vérinage

La réduction de la pression de vérinage jusqu'à zéro a été réalisée en trois temps (voir 4.4.3.4). A l'issue de chaque étape, on a relevé les pressions exercées sur la surface active de chaque capteur (l'Annexe 4-2).

La figure 4-26 présente les courbes théoriques enveloppes de la pression exercée en fin de bétonnage (obtenues avec la relation 3.5) ainsi que les résultats expérimentaux pour la mesure 16 (après la fin du bétonnage) et pour la mesure 18 (après la réduction de moitié de la pression hydraulique dans les vérins).

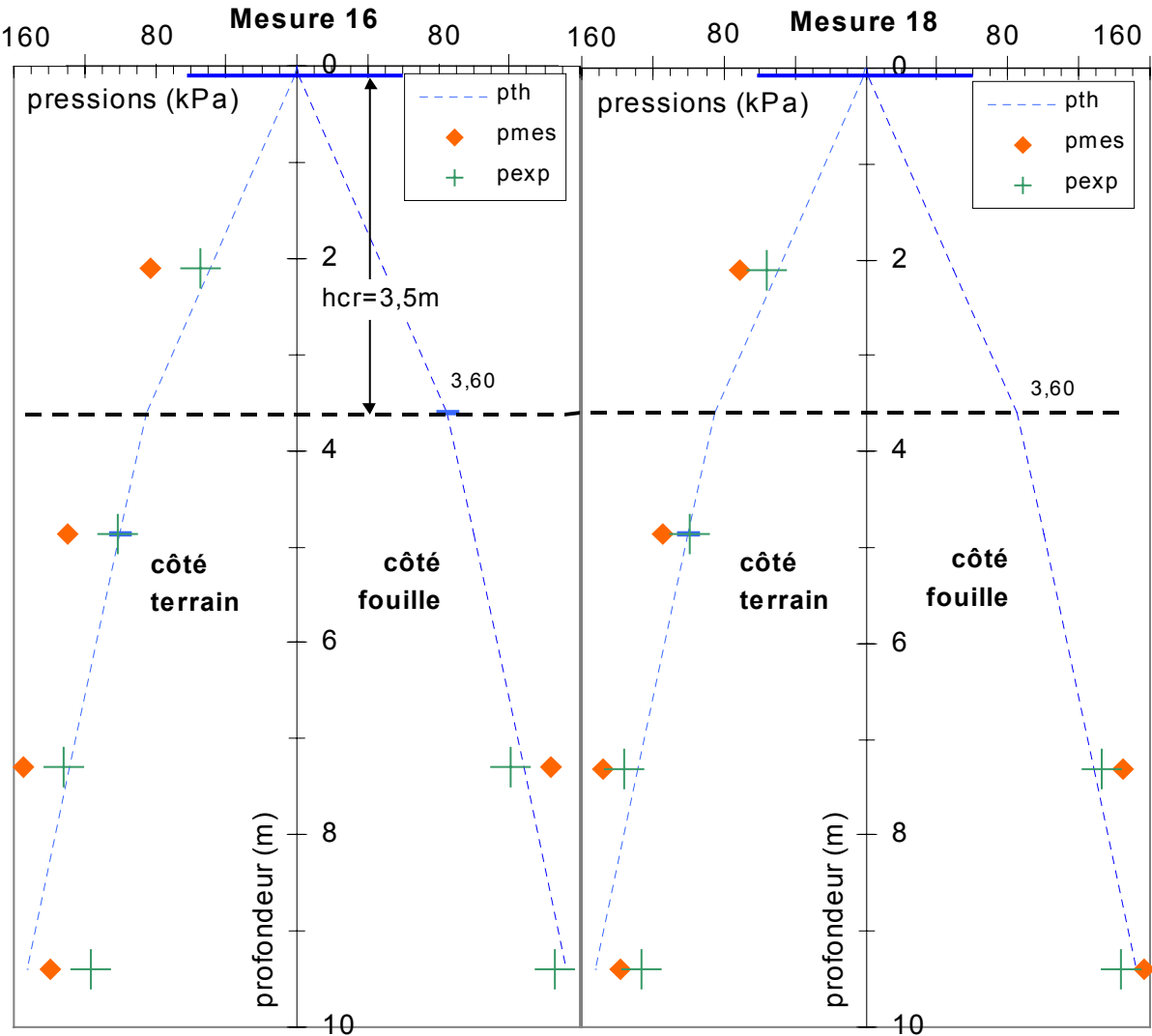


Fig. 4-26: Résultats expérimentaux (mesures 16 et 18) et valeurs théoriques de la pression exercée sur le bord vertical de la tranchée

En prenant comme référence les mêmes diagrammes bilinéaires de variation de la pression horizontale maximale que pour la figure 4-26, on présente sur la figure 4-27 les résultats expérimentaux obtenus pour la mesure 19 (après la réduction de la pression de vérinage à 2 bars) et pour la mesure 22 (après la réduction à 0 de la pression hydraulique dans les vérins).

Le tableau 4-10 compare l'ensemble des pressions observées à l'interface de la paroi moulée pour les mesures 16 à 22 aux valeurs théoriques.

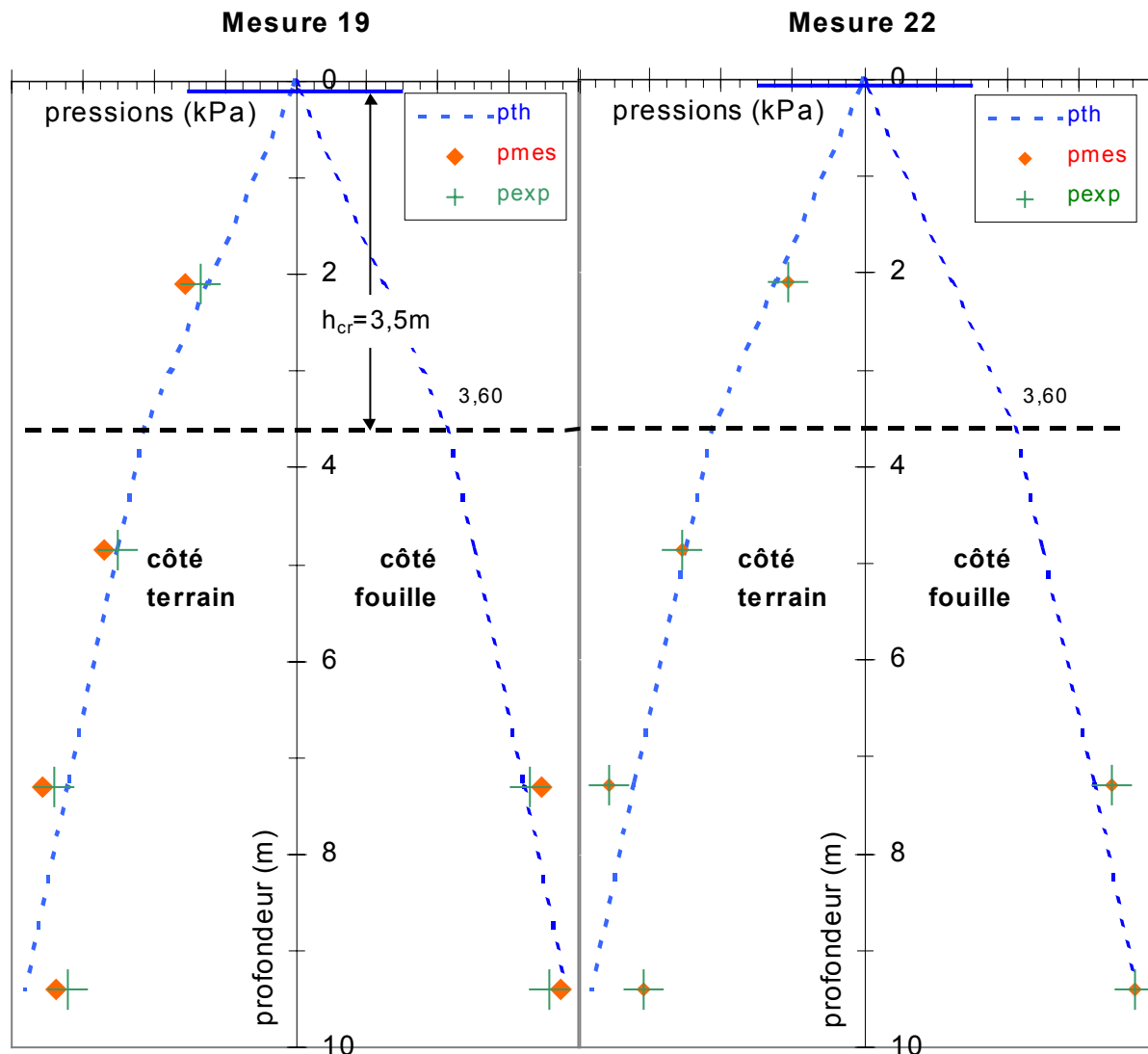


Fig. 4-27: Résultats de mesure (mesures 19 et 22) et estimation semi-empirique de la pression exercée sur le bord vertical de la tranchée

Les résultats obtenus varient sensiblement d'un capteur à l'autre :

- ♦ pour les capteurs SI₀ et SI₁ on constate un sous-enregistrement systématique (jusqu'à 23 % ou jusqu'à 35 kPa en valeur absolue) ;
- ♦ pour les capteurs SI₂ et SI₃ on constate un léger sur-enregistrement ; l'écart relatif reste inférieur à 11 % (15 kPa en valeur absolue) ;
- ♦ pour le capteur K₂ on constate une réponse fidèle dans la mesure où l'erreur relative

est inférieure à l'incertitude de mesure en présence d'un fluide (5 kPa);

- ♦ pour le capteur K₅ on observe une diminution des pressions mesurées (baisse d'environ 25 % entre la mesure 16 et la mesure 22).

Tableau 4-10 : Bilan des résultats expérimentaux pour les phases 16 - 22. Écarts relatifs par rapport aux prévisions théoriques

Capt.	Prof.	Mes. 16	Mes. 17	Mes. 18	Mes. 19	Mes. 20	Mes. 21	Mes. 22
		17h10	17h25	17h55	18h00	18h30	20h50	21h04
NMG=0		P_{exp}(kPa)	p_{exp}(kPa)	p_{exp}(kPa)	p_{exp}(kPa)	p_{exp}(kPa)	p_{exp}(kPa)	P_{exp}(kPa)
		P_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)	p_{th}(kPa)
		e _r (%)	e _r (%)	e _r (%)	e _r (%)	e _r (%)	e _r (%)	e _r (%)
K ₅	2,10	54,5	61,5	55,8	54,0	50,4	45,8	42,3
		49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3
		10,7	24,8	13,4	9,7	2,4	-7,0	-14,2
K ₂	4,86	101,2	105,0	99,0	99,9	97,1	97,3	101,3
		99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8
		1,4	5,2	-0,8	0,1	-2,7	-2,5	1,5
Sl ₃	7,30	132,0	138,1	136,3	136,1	135,6	133,1	143,1
		128,3	128,3	128,3	128,3	128,3	128,3	128,3
		2,8	7,6	6,2	6,0	5,6	3,7	11,5
Sl ₂	7,30	121,0	135,1	133,0	131,7	131,6	129,5	138,3
		128,3	128,3	128,3	128,3	128,3	128,3	128,3
		-5,7	5,3	3,6	2,6	2,5	0,9	7,7
Sl ₁	9,40	117,0	128,8	126,1	123,5	127,8	129,4	123,5
		152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9
		-23,5	-15,8	-17,5	-19,2	-16,4	-15,4	-19,2
Sl ₀	9,40	145,5	149,0	144,2	151,7	142,5	139,7	151,7
		152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9	152,9
		-4,9	-2,5	-5,7	-0,8	-6,8	-8,6	-0,8

La dernière série de mesures (mesure 22), réalisée après l'annulation de la pression de véinage, est retenue pour caractériser la distribution initiale des pressions à l'interface de la paroi moulée après la fin du bétonnage. Elle constitue, par ailleurs, la mesure de référence pour les mesures ultérieures.

4.7.1.5 Analyse des résultats expérimentaux obtenus lors du bétonnage du panneau instrumenté

Les relevés du niveau du béton coulé et du niveau de la boue dans la tranchée (par rapport à NMG) effectués en même temps que les séries de mesures des pressions totales et de la pression de vérinage (toutes les deux toupies de béton déchargées) ont permis d'acquérir une image représentative de l'évolution des pressions horizontales exercées à l'interface de la tranchée pendant son bétonnage.

Il a ainsi été possible, non seulement d'estimer les courbes correspondant aux différents niveaux successifs du béton dans la tranchée, mais aussi de construire l'enveloppe des distributions des pressions horizontales exercées durant le bétonnage.

a) Dynamique des pressions au cours du bétonnage

Afin d'évaluer la concordance des mesures effectuées par rapport au modèle semi-empirique bilinéaire, les pressions horizontales estimées au niveau de chaque capteur à partir de ces courbes fournies par ce modèle ont été comparées pour chacune des phases de bétonnage aux pressions horizontales nettes observées à l'interface de la tranchée (estimées avec la relation 4.11)².

La figure 4-28 compare l'ensemble des résultats expérimentaux fourni par les six capteurs à la variation théorique des pressions horizontales exercées à leur niveau le jour du bétonnage (entre 10h43 pour la mesure 1 et 21h07 pour la mesure 22).

L'écart initial, l'écart maximal et l'écart type par rapport aux estimations bilinéaires correspondant aux sous-ensembles des résultats expérimentaux enregistrés après la montée du béton au-dessus de chaque capteur (de 9 valeurs pour K_5 à 14 valeurs pour SI_0 et SI_1) sont présentés dans le tableau 4-11.

² C'est, à notre connaissance, la première fois que les résultats d'une telle comparaison sont présentés. Lors de l'expérimentation de Cambridge, on s'est préoccupé seulement de la construction des courbes enveloppes. Aucune vérification n'a été faite sur la cohérence des résultats expérimentaux intermédiaires par rapport aux courbes théoriques des pressions horizontales correspondant aux différents niveaux successifs du béton dans la tranchée.

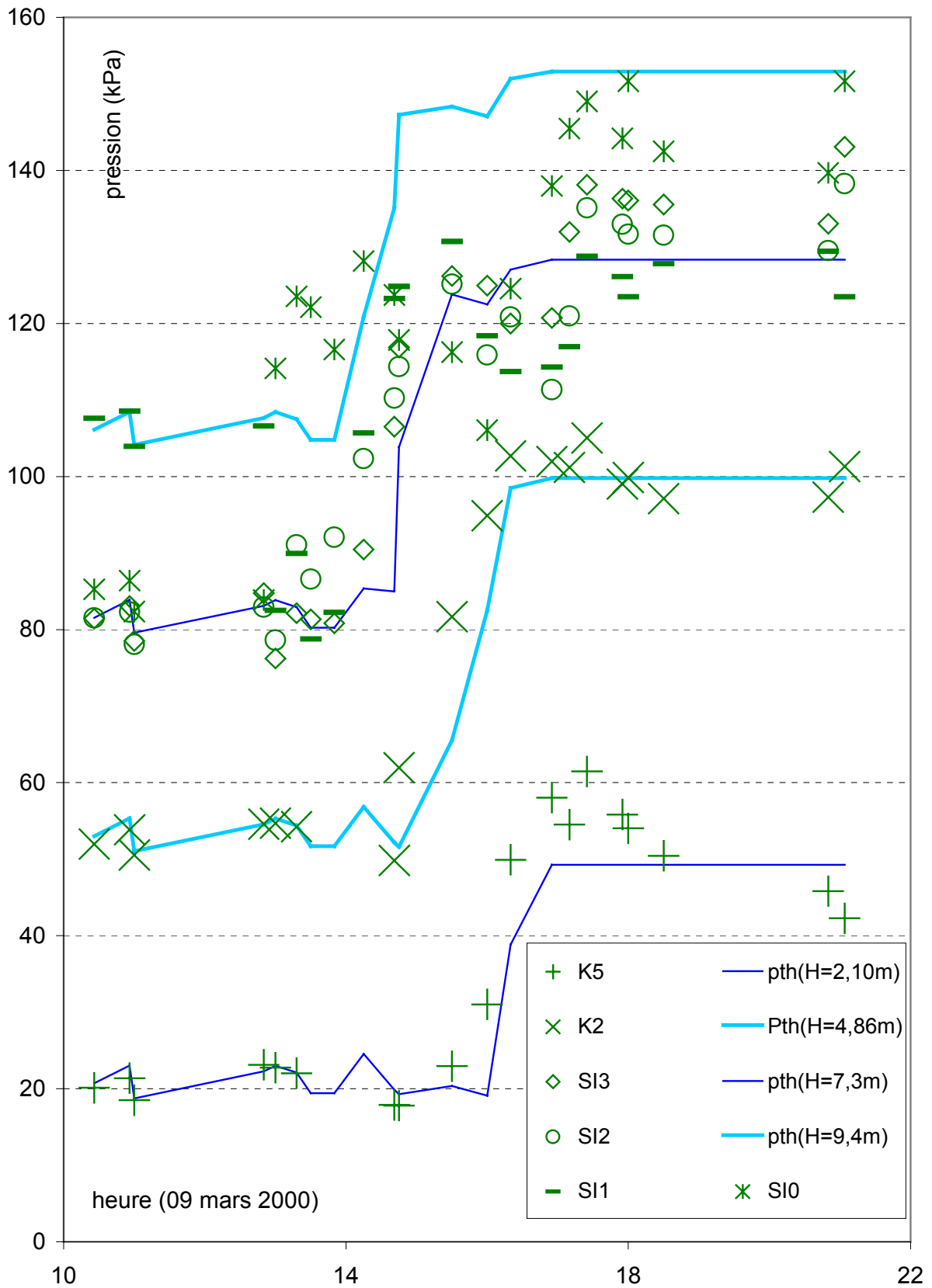


Fig. 4-28 : Comparaison des pressions horizontales nettes sur le bord vertical de la tranchée et des valeurs théoriques attendues (le jour du bétonnage)

Tableau 4-11 : Ecart initial, écart maximum et écart type entre les pressions horizontales nettes observées à l'interface sol-béton et leurs estimations basées sur le modèle semi-empirique bilinéaire.

Capteur	Profondeur NMG=0 (m)	Nombre des valeurs	Ecart ($p_{exp} - p_{th}$)		
			initial*	maximum	moyen **
			(kPa)	(kPa)	(kPa)
K ₅	2,10	9	11,1	12,2	6,1
K ₂	4,86	11	16,1	16,1	5,7
SI ₃	7,30	13	21,6	21,6	7,7
SI ₂	7,30	13	25,3	25,3	10,0
SI ₁	9,40	14	-15,2	-38,6	7,4
SI ₀	9,40	14	7,3	-41,0	12,3

*- juste après la montée du béton au-dessus de chaque capteur ;

** -moyenne des valeurs absolues des écarts enregistrés.

Pour une interprétation convenable de ces résultats (Fig. 4-28 et Tableau 4-11), il faut tenir compte (au moins, d'une façon qualitative) du cumul d'erreurs qui y interviennent.

Ces erreurs peuvent affecter aussi bien l'expression quantitative des valeurs expérimentales nettes (incertitude globale de mesure des capteurs en milieu fluide, incertitude de mesure de la pression de vérinage, erreur de mesure causée par la distribution non uniforme des pressions au contact sol-capteur) que l'expression quantitative de l'estimation semi-empirique (erreurs sur l'estimation du niveau du béton coulé et de la boue dans la tranchée, du poids volumique du béton frais et de la bentonite). Sur ces différents points nous avons fait les observations suivantes :

- ♦ la montée du béton au-dessus des capteurs se traduit, en général, par un éloignement de la mesure (sur-enregistrement pour les capteurs K₅, K₂, SI₃, SI₂ et sous-enregistrement pour le capteur SI₁) par rapport au modèle (écart initial, en valeur absolue, sensiblement plus élevé que l'écart absolu moyen³) ; cet écart plus important (l'écart initial est égal à l'écart maximum pour les quatre capteurs situés

³ Ce constat n'est pas valable pour le capteur SI₀.

en haut de la paroi) pourrait s'expliquer par l'effet dynamique du déversement du béton dans la tranchée ;

- ♦ pour une profondeur de mesure jusqu'à 7,30 m, les résultats expérimentaux sont en (très) bonne cohérence avec l'estimation bilinéaire ; l'écart type par rapport au modèle dépasse à peine deux fois l'incertitude globale de mesure des capteurs de pression totale ;
- ♦ à une profondeur de mesure de 9,40 m, on constate un éloignement assez important des résultats expérimentaux (SI_0 et SI_1) par rapport au modèle ; les pressions horizontales nettes observées à l'interface sol-béton sont, en général, sensiblement, plus faibles que l'estimation bilinéaire ; on peut les rapprocher des observations faites lors de l'élaboration du modèle bilinéaire pour le béton coffré (au-dessous d'une certaine profondeur, les pressions horizontales maximales sont inférieures à l'estimation bilinéaire).

b) Coefficient de pression initiale à l'interface sol-béton

Les résultats des mesures permettent d'analyser les pressions initiales horizontales exercées à l'interface verticale sol-paroi après le bétonnage. Dans cette étude, la distribution expérimentale initiale est caractérisée par les résultats de la dernière série de mesure du jour de bétonnage (mesure 22 effectuée 4 h après la fin du bétonnage et la réduction à zéro de la pression de vérinage). Elle permet d'estimer le coefficient de pression initiale à l'interface de la paroi moulée, K_i , à ce stade initial.

Le tableau 4-12 compare présente les valeurs expérimentales de ce coefficient à son estimation semi-empirique fournie par la littérature⁴ et au coefficient des pressions de terres au repos⁵, K_0 , avant toute intervention sur le site.

⁴ Balay (1985), citant Josseume (1979), propose cette formule pour la simulation du comportement des parois moulées par la méthode des modules de réaction ;

⁵ Des essais oedométriques effectués sur des échantillons prélevés dans la zone du profil instrumenté après l'exécution complète de l'ouvrage ont permis de caractériser le sol argileux comme normalement consolidé.

Tableau 4-12 : Estimations théorique et expérimentale du coefficient de pression initiale

Niveau caractéristique (profil panneau S81)	Prof. (TN=0)	σ'_z	σ'_z	K_0^*	K_i (coef. pression initiale)				
					Jaky	th. - Balay		exp. - f(Mes. 22)	
		$1-\sin\phi'$		$0,8\sigma'_{bét}/\sigma'_z$		$(p_{exp}-u)/\sigma'_z$			
		Niveau de la nappe		(long terme)	Niveau de la nappe				
		3,75 NGF	3,0 NGF		3,75 NGF	3,0 NGF	3,75 NGF	3,0 NGF	
(m)	(kPa)	(kPa)	(adimensionnel)						
Terrain naturel (TN)	0,00								
Assise chaussée / remblai	0,60	14,4	14,4	0,49	0,41	0,41			
Niveau nappe (3,75 NGF)	2,04	43,9	43,9	0,55	0,76	0,76			
K_5	2,41	47,8	51,5		0,78	0,79	0,88	0,82	
Remblai/argile tourbeuse	2,50	48,8	53,4	0,66	0,79	0,79			
Niveau nappe (3,00 NGF)	2,79	50,5	58,0		0,83	0,82			
K_2	5,17	64,8	72,3		1,05	1,03	1,08	1,07	
Argile tourbeuse/limon	7,50	78,8	86,3	0,58	1,19	1,16			
Sl_3	7,61	79,8	87,3		1,19	1,16	1,10	1,09	
Sl_2	7,61	79,8	87,3		1,19	1,16	1,03	1,03	
Sl_1	9,71	99,7	107,2		1,19	1,16	0,47	0,51	
Sl_0	9,71	99,7	107,2		1,19	1,16	0,75	0,77	
Limon argileux/graves	13,60	136,7	144,2		1,18	1,16			
Graves/marnes	15,80	163,1	170,6	0,43	1,14	1,13			
Pied de la paroi (théorique)	16,29	169,0	176,5	0,58	1,13	1,12			

*- sol normalement consolidé (hypothèse confirmée par les résultats d'essais oedométriques).

L'estimation semi-empirique du coefficient K_i considère la pression effective horizontale comme égale à une fraction de la pression hydrostatique exercée par le béton fluide $\sigma'_{bét}$ (déjaugée pour la partie de la paroi située au-dessous de la nappe) :

$$K_i(z) = 0,80 \frac{\sigma'_{bét}(z)}{\sigma'_z(z)} \quad (4.16)$$

Le calcul du coefficient K pour les différents cas envisagés a été effectué dans l'hypothèse où la pression interstitielle obéit à une loi de variation hydrostatique en considérant deux niveaux de la nappe :

- ♦ niveau pris en compte dans le projet, 3,75 NGF ;
- ♦ niveau estimé en place, 3,00 NGF .

On note que l'estimation semi-empirique du K_i avec formule 4.16 concerne l'état de contraintes à l'interface de la paroi après sa construction complète mais, le fait qu'elle est exprimée par rapport à la pression exercée par le béton fluide, la place en bonne position pour décrire l'état de contrainte à la fin du bétonnage.

Les résultats présentés dans le tableau 4-12 ont été obtenus en considérant le poids volumique du béton égal à celui obtenu à 7 jours ($\gamma_{\text{béton}} = 23,87 \text{ kN/m}^3$) et le niveau du béton en tête de la paroi à la fin du bétonnage égal au niveau du sommet de la cage d'armatures (5,50 NGF). Pour l'estimation des contraintes verticales effectives σ'_z , dans le sol avoisinant, on a considéré la structure lithologique indiquée au chapitre 4.2.2, en prenant pour chaque couche le poids volumique indiqué dans le tableau 4-1.

La figure 4-29 compare les valeurs expérimentales des pressions horizontales totales initiales à l'interface de la paroi (mesure 22) aux estimations données par la formule semi-empirique (4.16) et au diagramme des pressions horizontales des terres au repos (Jaky)⁶. Cette figure permet de mettre en évidence l'effet de la mise en œuvre du béton sur l'état de contrainte dans le sol. On remarque que :

- ♦ l'application de la formule de Balay se traduit par une augmentation de l'ordre de 40 à 50 % des pressions horizontales dans le sol par rapport à l'état au repos ;
- ♦ pour les quatre points de mesure situés en haut de la paroi, les résultats expérimentaux obtenus sont en bonne concordance avec le diagramme semi-empirique proposé par Balay et Josseaume (écart relatif inférieur à 6%) ;
- ♦ par contre, les résultats fournis par les deux capteurs les plus bas (SI_0 et SI_1) sont inférieurs d'environ de 30% aux valeurs attendues ; cet écart important pourrait être imputé à la formule semi-empirique, qui fait l'hypothèse d'un comportement hydrostatique du béton fluide sur toute la profondeur de la tranchée (hypothèse infirmée par le modèle bilinéaire utilisé pour le béton coffré et le béton moulé).

Pour les températures observées (Annexe 4-2-2) avec les capteurs SI dans les phases

⁶ On a représenté seulement les diagrammes correspondant à un niveau de la nappe de 3,75 NGF.

précédentes (16-22), on remarque la même homogénéité des 4 points de mesure (écart-type inférieur à 0,2°C). La valeur moyenne augmente lentement de 16,9°C (mesure 16) jusqu'à 17,8°C (mesure 22).

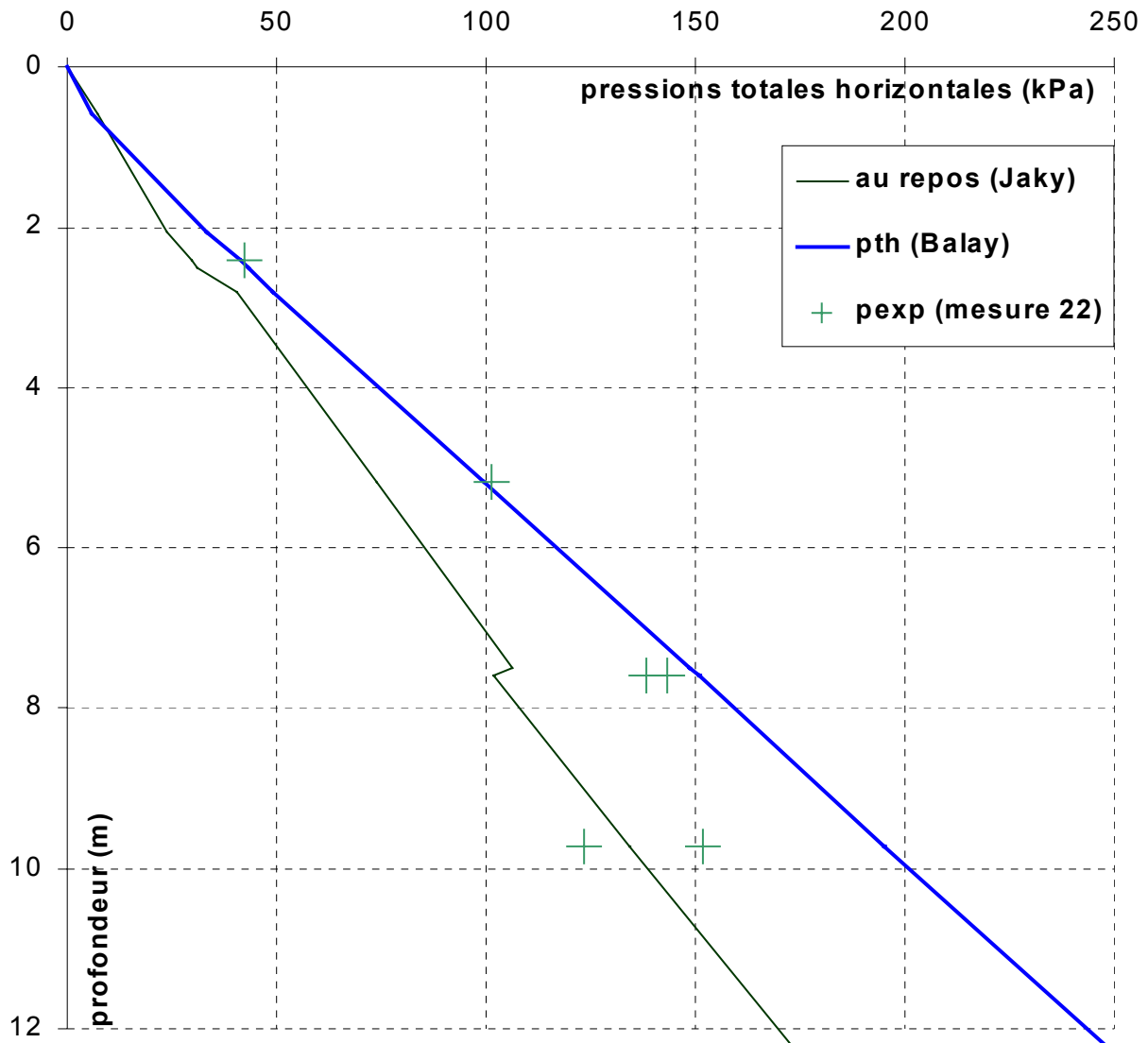


Fig. 4-29: Pressions horizontales initiales à l'interface de la paroi (valeurs expérimentales et théoriques) et contraintes horizontales totales au repos (Jaky)

4.7.2 Durcissement du béton (béton jeune)

4.7.2.1 Séquence 1 : première semaine après le bétonnage

L'expérimentation de la « Trémie Pasteur » a permis d'observer la variation des pressions et des températures à l'interface de la paroi avec le sol pendant le

durcissement du béton (béton jeune). A ce titre, durant la première semaine qui a suivi la mise en œuvre du panneau instrumenté, les capteurs ont été suivis quotidiennement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4-13, la dernière mesure (mesure 22), réalisée le jour de bétonnage, étant rappelée en référence. La profondeur est exprimée, cette fois-ci, par rapport au niveau du terrain naturel relevé à l'endroit du panneau instrumenté (5,79 NGF).

La température croît dans les 2-3 premiers jours (de 17°C jusqu'à des valeurs supérieures à 37°C), pour diminuer ensuite lentement jusqu'à 27°C, une semaine après la mise en œuvre du panneau instrumenté. A chaque phase, on constate une répartition homogène des températures enregistrées aux quatre points de mesure, comme en témoigne l'écart type des valeurs mesurées (tableau 4-13).

D'une manière générale, on observe une diminution systématique des pressions mesurées, dont le gradient de variation décroît dans le temps. Ainsi, 17 h après la fin du bétonnage (phase 1), la diminution constatée est approximativement égale à la moitié de la diminution totale enregistrée pour la mesure 8 (de la séquence 1).

Tableau 4-13 : Suivi de capteurs durant le durcissement du béton

Capt.	Prof. TN =0 m	Séq. 0	Séquence 1							
		Mes.22	Mes.1	Mes.2	Mes.3	Mes.4	Mes.5	Mes.6	Mes.7	Mes.8
		4h	17h	22 h	42 h	67h	4j	5j	6j	7j
		pression mesurée (p_{exp})								
		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
K ₅	2,41	42,3	56,2	52,8	56,6	54,1	42,7	40,5	43,2	41,9
K ₂	5,17	101,3	84,7	74,1	71,3	75,6	65,2	63,1	65,0	64,4
Sl ₃	7,61	143,1	129,9	125,4	125,0	122,6	122,3	118,1	118,4	117,4
Sl ₂	7,61	138,3	127,4	122,5	119,9	115,1	113,8	108,8	109,5	108,3
Sl ₁	9,71	123,5	115,8	112,2	112,4	109,2	108,3	106,4	106,2	105,4
Sl ₀	9,71	151,7	113,5	102,4	93,0	87,5	85,5	81,5	80,9	78,8
T _{moyenne} (°C)		17,8	30,9	34,2	37,3	34,8	32,1	30,7	29,0	27,9
σ_T (°C)		0,2	0,4	0,5	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8

Le capteur K₅ constitue une exception notable à cette évolution puisque l'on observe d'abord (mesure 1) une augmentation importante de la pression mesurée (environ 33% par rapport à la valeur initiale), suivie par une diminution durant les 6 jours suivants

d'une ampleur équivalente (environ 34%).

Par ailleurs, on remarque la diminution très marquée de la pression mesurée par le capteur SI₀ (environ 48 % par rapport à la valeur initiale). Il s'agit du capteur pour lequel on a observé une réponse non satisfaisante au moment des mesures de pression hydrostatique de la boue (voir 6.1.1).

4.7.2.2 Séquence 2 : mise en œuvre d'un panneau adjacent

La mise en œuvre des panneaux S80, S79 et S78 situés au voisinage du panneau instrumenté (S81) a été réalisée le 20 mars, c'est-à-dire 11 jours après la mise en œuvre des panneaux S83, S82 et S81. Pour étudier l'effet produit par la mise en œuvre de ces panneaux, on a réalisé deux séries de mesures :

- ♦ mesure 1 : après l'excavation de la tranchée afférente aux trois panneaux (tranchée remplie de boue) ;
- ♦ mesure 2 : après le bétonnage de la tranchée (le lendemain) ;

En prenant comme référence la mesure à 7 jours (séquence 1 / mesure 8), on présente dans le tableau 4-14 les résultats des observations effectuées.

Capt.	Prof. TN =0 m	Séq. 1	Séquence 2			
		Mes.8 (7j)	Mes.1 (11j)		Mes. 2 (12 j)	
		(réf.)	(après excavation)		(après bétonnage)	
		p ⁰ _{exp}	p ¹ _{exp}	Δ p/p ⁰	p ² _{exp}	Δ p/p ⁰
		kPa	kPa	%	kPa	%
K ₅	2,41	41,9	43,6	4,2	33,6	-19,6
K ₂	5,17	64,4	65,9	2,4	57,9	-10,1
SI ₃	7,61	117,4	122,7	4,4	109,9	-6,4
SI ₂	7,61	108,3	110,7	2,2	103,1	-4,9
SI ₁	9,71	105,4	105,4	0,0	100,6	-4,5
SI ₀	9,71	78,8	80,7	2,4	76,9	-2,3
T _{moyenne} (°C)		27,9	24,9		24,2	
σ _T (°C)		0,8	0,8		0,8	

Tableau 5-14 : Effet de la mise en œuvre d'un panneau adjacent

L'excavation de la tranchée des panneaux S80 à S78 génère une surpression au niveau du panneau instrumenté qui se superpose à la tendance à la diminution des pressions d'interface constatée pour le béton jeune. On constate une augmentation des pressions mesurées de l'ordre de 2 à 4 %.

Par contre, la mise en œuvre du béton dans l'excavation conduit à une chute des pressions mesurées dont l'ampleur croît, d'une façon significative, du bas vers le haut de la paroi, de 2-4 % (pour les capteurs les plus bas SI₂ et SI₁) jusqu'à 20% (pour le capteur le plus haut K₅).

La température enregistrée décroît de presque 4°C durant les 5 jours.

4.7.2.3 Séquence 3 : exécution de la poutre de couronnement

Dans la zone instrumentée de l'ouvrage, les travaux de génie civil de la poutre de couronnement ont été réalisés entre le 17 avril et le 2 mai. Au préalable, on a excavé les murettes - guide (le 06 avril) et recépé les parois en tête (entre le 07 et le 10 avril).

Le tableau 4-15 présente les pressions observées pour trois phases significatives :

- ♦ mesure 1 : avant l'excavation des murettes guide (30 mars) ;
- ♦ mesure 2 : après le recépage des parois moulées (13 avril) ;
- ♦ mesure 3 : après le bétonnage de la poutre de couronnement (4 mai).

Tableau 4-15 : Exécution de la poutre de couronnement

Capt.	Prof. TN = 0 m	Séq. 2	Séquence 3						
		M.2 (12j)	Mesure 1 (21j)			Mesure 2 (35j)		Mesure 3 (56 j)	
		(réf.)	(avant recépage)			(après recépage)		(poutre coulée)	
		p ⁰ _{exp}	p ¹ _{exp}	Δp/p ⁰	p ¹ _{exp}	Δp/p ⁰	p ² _{exp}	Δp/p ⁰	
		kPa	kPa	%	kPa	%	kPa	%	
K ₅	2,41	33,6	32,7	-2,9	35,2	4,5	33,2	-1,4	
K ₂	5,17	57,9	53,9	-6,8	47,3	-18,2	44,9	-22,3	
SI ₃	7,61	109,9	106,0	-3,6	100,9	-8,2	96,5	-12,2	
SI ₂	7,61	103,1	101,2	-1,8	95,2	-7,7	92,2	-10,5	
SI ₁	9,71	100,6	96,6	-4,0	92,4	-8,1	94,9	-5,6	
SI ₀	9,71	76,9	68,1	-11,5	57,0	-25,9	41,0	-46,7	
T _{moyenne} (°C)		24,2	24,3		22,5		20,9		
σ _T (°C)		0,8	0,2		0,1		0,1		

Par rapport aux résultats expérimentaux obtenus précédemment (séquence 2/ mesure 2) on observe une diminution systématique des pressions à tous les niveaux de mesure, dont l'ampleur diffère d'un capteur à l'autre. Pour le capteur SI₀, cette diminution est sensiblement plus importante (plus de deux fois) que pour les autres capteurs.

4.7.2.4 Analyse des résultats obtenus avant terrassement

L'expérimentation de la « Trémie Pasteur » a permis de suivre les pressions horizontales développées à l'interface d'une paroi moulée et du sol, pendant environ deux mois avant les phases de terrassement.

On a pu ainsi remarquer la tendance des pressions horizontales du sol sur l'écran à revenir à un niveau proche de celui régnant avant la construction des parois (défini par le coefficient de pressions des terres au repos). La baisse est plus rapide pendant les 12 premiers jours après le bétonnage. Il ralentit sensiblement ensuite.

La figure 4-30 regroupe sur un même graphique les pressions observées 21 jours et 56 jours après le bétonnage (séquence 3, mesures 1 et 3) et celles observées après la fin du bétonnage (séquence 0 / mesure 22) et les compare aux distributions théoriques des pressions totales horizontales initiales (Balay) et au repos (Jaky) en considérant le niveau de la nappe à 3,75 m NGF. Elle permet de remarquer que la variation des pressions observées diffère d'un capteur à l'autre :

- ♦ pour les capteurs K₅, SI₂ et SI₃, la pression mesurée 56 jours après le bétonnage se stabilise à des valeurs très proches de valeurs estimées au repos (écart inférieur à 6 kPa, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que l'incertitude globale de mesure) ;
- ♦ pour les capteurs K₂ et SI₁, la pression diminue davantage par rapport aux valeurs estimées au repos (de l'ordre de 30 kPa, soit environ 6% de leur étendue de mesure);
- ♦ pour le capteur SI₀, la pression mesurée à 56 jours est inférieure d'environ 90 kPa à la pression horizontale au repos estimée à son niveau ; son signal de sortie est vraisemblablement affecté par une dérive dans le temps (cette dérive a été évaluée à

environ 1 kPa/jour afin d'obtenir une même variation relative de la pression mesurée que la moyenne des variations enregistrées par les autres capteurs durant l'intervalle de temps de 56 jours).

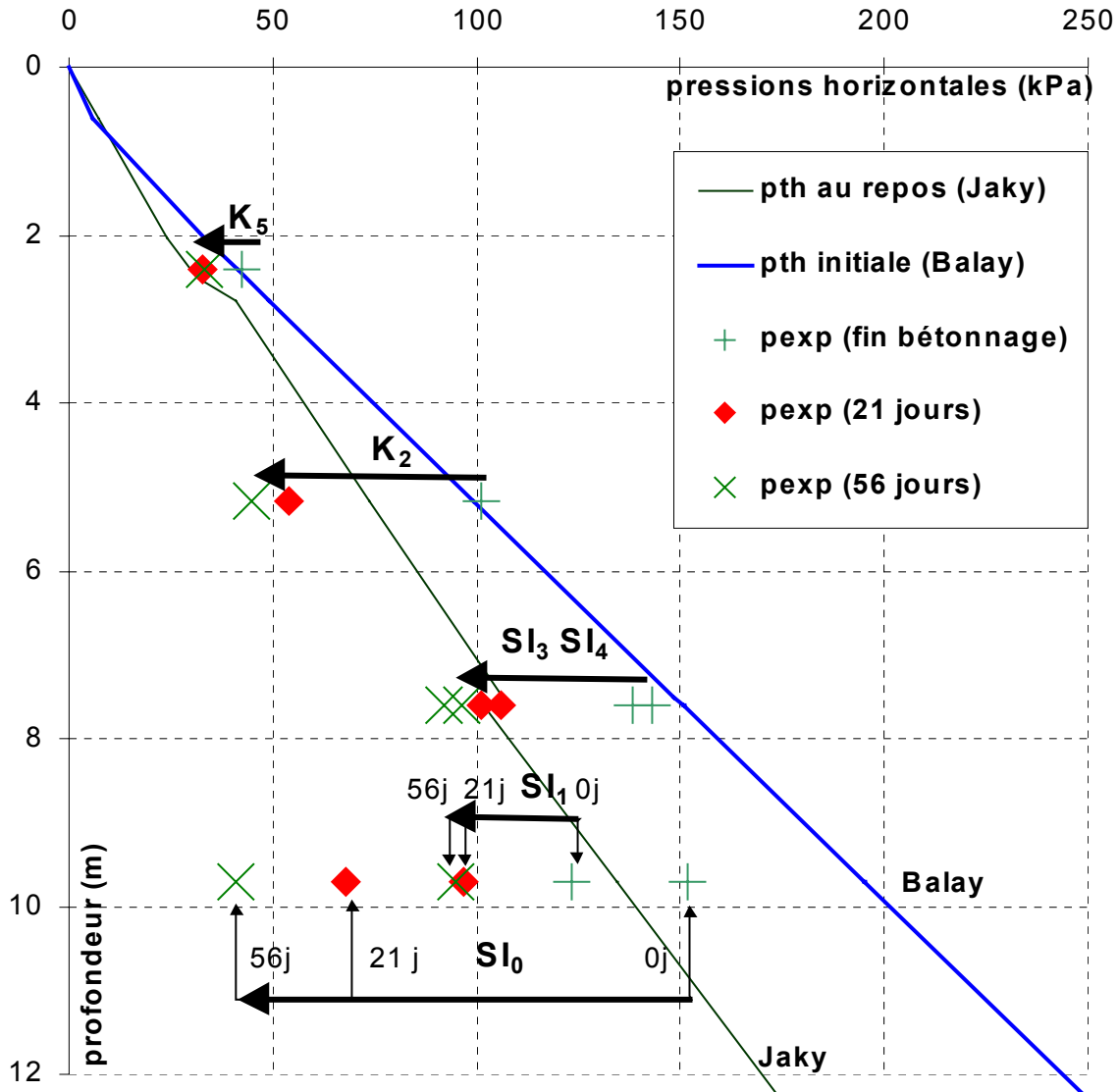


Fig. 4-30 : Variations au cours de temps des pressions horizontales observées à l'interface de la paroi et du sol et distributions théoriques de référence de Balay et de Jaky

Par rapport aux résultats des mesures après le bétonnage (séquence 0 : mesure 22), la baisse moyenne⁷ des pressions enregistrées à l'interface de la paroi est de 28,8% après 21 jours, de 31,2% après 35 jours et de 33,2% après 56 jours.

⁷ On exclut de l'analyse les résultats fournis par le capteur SI₀.

Ce constat est cohérent avec les résultats trouvés⁸ par :

- ◆ Uff (baisse des pressions mesurées à l'interface paroi - sol argileux de 12 à 45 % après 30 jours par rapport aux valeurs enregistrées après le bétonnage de la paroi) ;
- ◆ DiBiagio et Roti (baisse à l'interface paroi-argile molle de 33 % 30 jours après le bétonnage) ;
- ◆ Josseume et Stenne (retour à un état au repos une semaine depuis le bétonnage à l'interface paroi-sol sableux).
- ◆ Ursat, Zyglér et Marchal (baisse très importante⁹ à l'interface avec des sables et graviers argileux) ;
- ◆ Lings, Nash, Ng et Boyce (baisse importante à l'interface de la paroi et d'une argile surconsolidée jusqu'à des valeurs sensiblement plus réduites que celles estimées au repos).

Il est en contradiction avec les résultats trouvés par :

- ◆ Blivet, Bonafous, Frank et Josseume (valeurs enregistrées à l'interface avec un terrain sableux et limoneux, sensiblement supérieures à celles estimées au repos¹⁰).

Cet ensemble de résultats expérimentaux suggère de caractériser les pressions horizontales développées à l'interface sol-paroi moulée de la façon suivante :

- ◆ les pressions développées sur le bord vertical de la tranchée durant son bétonnage sont gouvernées par le comportement « pseudo-fluide » du béton, mais c'est ensuite le massif de sol qui prend le relais et impose un retour des pressions vers l'état régnant au repos avant la mise en œuvre de la paroi ;
- ◆ ce retour se produit au cours du temps en fonction du comportement mécanique du sol (pour les sols sableux et graveleux il se fait le plus rapidement, pour les argiles

⁸ Voir chapitre 2.5.2

⁹ Il s'agit des mesures effectuées avec des capteurs descendus dans des forages derrière la paroi (résultats moins représentatifs et appréciés comme non fiables).

normalement consolidés l'intervalle de temps nécessaire est plus important tandis que, pour les sols surconsolidés, l'intervalle de temps nécessaire dépasse a priori celui raisonnablement disponible avant l'exécution du terrassement devant l'ouvrage) ;

- ♦ la formule proposée par Balay et Josseume décrit bien les pressions à l'interface de la paroi jusqu'à une certaine profondeur mais seulement pour les premiers jours après le bétonnage ; elle ne prévoit pas dégradation du comportement fluide du béton au-delà d'une certaine profondeur et pas non plus l'influence du facteur temps (temps écoulé depuis le bétonnage).

La température enregistrée par les quatre capteurs SI montre la même tendance à la baisse dans le temps : en 35 jours, elle diminue de 24,3°C à 20,9°C.

4.7.3 Simulation théorique du comportement du profil expérimental après terrassement

L'excavation devant l'écran détermine un changement radical sur le plan de son fonctionnement mécanique : les pressions horizontales agissant des deux côtés de l'écran ne sont plus égales en fonction de la profondeur, ce qui entraîne une sollicitation en flexion de l'écran avec le développement d'efforts intérieurs permettant d'assurer son l'équilibre.

Le comportement mécanique de l'ouvrage dans ces phases peut être simulé par l'application de méthodes de calcul spécifiques, parmi lesquelles on trouve la méthode des coefficients de réaction (la plus couramment utilisée pour les études de projet) et la méthode des éléments finis (qui se présente comme une alternative de plus en plus performante, permettant la prise en compte de lois de comportement des sols, du béton et des interfaces de plus en plus complexes).

Les résultats expérimentaux sont comparés dans la suite de ce chapitre aux estimations

¹⁰ On ne précise pas l'intervalle de temps coulé depuis le bétonnage de la paroi ; les valeurs expérimentales incluent, probablement, une erreur systématique induite par l'intégration des coussins Glötzl dans la paroi.

théoriques obtenues par application de la méthode des coefficients de réaction (logiciel Denebola – LCPC). Trois configurations de calcul ont été étudiées :

- ◆ configuration «projet» pour la zone ouest de la trémie (C_I) ;
- ◆ configuration «théorique» pour le profil expérimental de l'ouvrage (C_{II}) ;
- ◆ configuration «réelle» calée sur les résultats expérimentaux (C_{III}).

Les trois configurations comportent plusieurs paramètres de calcul identiques :

- ◆ le niveau de la nappe (situé à 3,75 NGF, soit à une profondeur de 2,04 m à partir du niveau du terrain naturel, $TN=5,79$ NGF) ;
- ◆ la profondeur de pré-excavation (3,50 m à partir du TN) ;
- ◆ les caractéristiques de résistance à cisaillement (à court et à long terme) de chaque couche ;
- ◆ le coefficient de pression initiale ($K_i = K_0$) ;
- ◆ la géométrie de la paroi (profondeur de 16,29 m et épaisseur de 0,80 m) ;
- ◆ les conditions aux limites et d'appui en déplacement horizontal (paroi libre en déplacement horizontal en pied et en tête ; appui élastique au niveau des butons et du radier) ;
- ◆ les actions de calcul (on prend en compte seulement les actions permanentes : les pressions totales exercées à l'interface de la paroi, le moment de 6 kNm/m transmis par la poutre de couronnement en tête de la paroi et une charge uniforme de 20kPa, correspondant au poids propre du radier) ;

Les trois configurations diffèrent par les valeurs des autres paramètres de calcul, données dans le tableau 4-16.

La configuration C_I reprend les caractéristiques retenues dans le projet pour la zone ouest de la trémie, tandis que la configuration C_{II} prend en compte la stratigraphie et les coefficients de réaction déduits du sondage pressiométrique PR_2 (situé aux environs du profil instrumenté de l'ouvrage). Ce choix est justifié par la variation importante de

la stratigraphie et des modules pressiométriques le long de l'ouvrage ainsi que par leur influence importante sur les résultats des calculs.

Par ailleurs, la configuration C_{II} tient compte d'une raideur en flexion de la paroi calculée dans l'hypothèse d'un comportement à court terme sous l'action de faibles sollicitations (comportement linéaire élastique du béton sollicité en traction ; section composite non fissurée ; relation 4.17 et figure 4-31). Cette hypothèse est justifiée par le fait que les séquences de mesure ont été réalisées juste après l'exécution des phases de travaux et que la paroi n'est pas sollicitée par certaines actions non permanentes (charges circulant sur le chantier et sur l'ouvrage en service et actions accidentelles) pour lesquelles elle a été dimensionnée :

$$(EI)_{ech} = \frac{E'_b}{(1-\nu_b^2)} \left[\frac{0,8^3}{12} + 0,33^2(n-1)A_a \right] \quad (4.17)$$

Tableau 4-16 : Description des configurations de calcul

Paramètres de calcul	Configuration de calcul		
	C _I	C _{II}	C _{III}
Stratigraphie	coupe T ₂ T ₃	profil PR ₂	profil PR ₂
	coupe de projet de la zone ouest	(profil mesuré aux environs du panneau S81 (panneau instrumenté))	
Coefficients de réaction (K _h)	(formule de Menard)		
	K _h = f(E _M -moyen)	K _h = f(E _M -PR ₂)	K _h = f(E _M -PR ₂)
Principe de calcul	poutre en béton (flexion)	coque en béton armé (flexion cylindrique section non fissurée)	
Module de déformation du béton (E _b)	23000 MPa	35000 MPa	35000 MPa
	(long terme)	(instantané)*	(instantané)*
Raideur des butons	théorique	théorique	expérimentale
Phasage de calcul	simplifié	simplifié	complexe**
Rotation en pied	libre	libre	rotule élastique

*- seulement pour les phases des travaux (à court terme) ;

** - prise en compte de la technologie réelle de mise en place des butons.

Dans la relation 4.17, le coefficient du Poisson ν_b est pris égal à 0,2 et le module de déformation instantanée du béton de classe 32 est estimé au moyen de la relation (4.8)

(règles BAEL 91) :

$$E'_b = 11000\sqrt[3]{32} \cong 35000 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

La raideur en flexion de la section composite en béton armé ainsi estimée est sensiblement supérieure à la valeur de $E_b I_b$ retenue dans le projet ($E'_b = 1,522 E_b$; $n=6$) :

$$(EI)_{ech} = (1,586 E_b) [1,075 I_b] = 1,70 (E_b I_b) \quad (4.19)$$

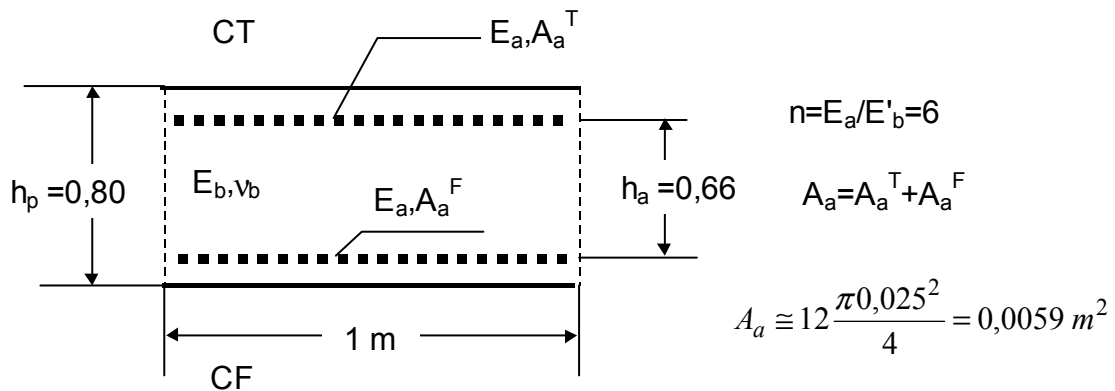


Fig.4-31: Coupe horizontale schématique de la section composite de béton armé

Quant à la configuration C_{III}, elle a été retenue après la mise en évidence d'une discordance importante entre les raideurs théoriques et expérimentales des butons.

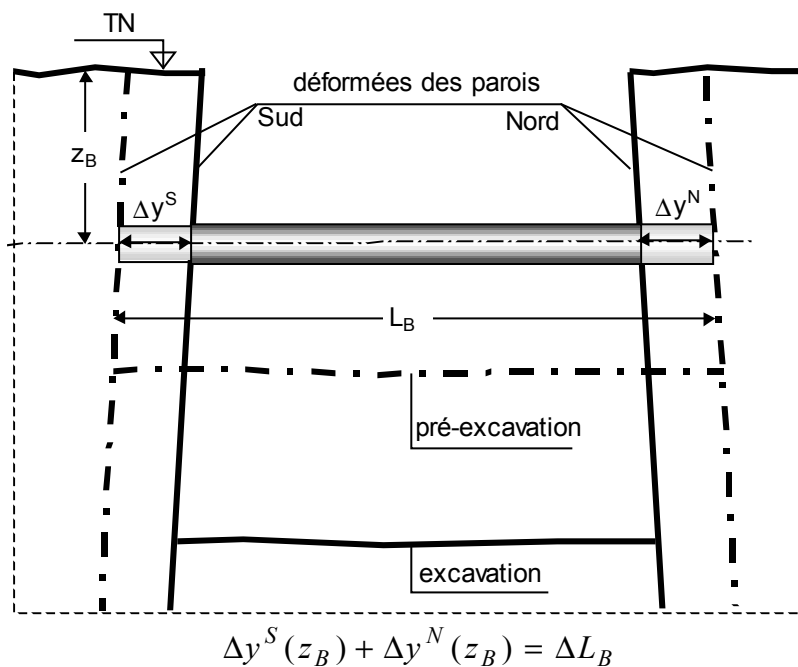
En effet, les butons sont modélisés comme des appuis élastiques en supposant que la somme des déplacements de flexion des deux parois situées en vis-à-vis entre deux phases, $\Delta y^S(z_B) + \Delta y^N(z_B)$, est égale au raccourcissement des butons ΔL_B (condition de continuité des déplacements ; figure 4-32). Ce raccourcissement impose aux butons une variation proportionnelle de l'effort axial (qui est transmise à la paroi de façon répartie sur une distance égale à l'équidistance entre les butons, e_B) :

$$\Delta N_B = A_B E_a \frac{\Delta L_B}{L_B} = A_B E_a \frac{\Delta y^S + \Delta y^N}{L_B} = \Delta N_p e_b \quad (4.20)$$

où A_B , e_B et L_B désignent la section, l'entraxe et la longueur du buton et E_a le module d'élasticité de l'acier.

La raideur théorique des butons par mètre d'ouvrage, qui définit leur comportement dans la méthode des modules de réaction, s'obtient alors en faisant l'hypothèse que les déplacements enregistrés par les deux parois en vis-à-vis sont égaux ($\Delta y^S = \Delta y^N = 0,5\Delta L_B$) :

$$k_B^{th} = \frac{\Delta N_p}{\Delta y^s} = \frac{2A_b E_a}{e_B L_B} = \frac{2 \times 141,6 \text{ cm}^2 \cdot 21000 \text{ kN / cm}^2}{3,10 \text{ m} \cdot 10,74 \text{ m}} \cong 178600 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (4.21)$$



Cette raideur a été utilisée pour les configurations de calcul C_I et C_{II} .

Fig.4-32 : Schéma de principe pour le calcul de la raideur des butons

Une estimation expérimentale de cette raideur a été effectuée à partir des valeurs de la convergence des parois au niveau de l'axe des butons et des déformations longitudinales des butons mesurées pour deux séquences successives (la séquence 4, après la mise en place des butons, et la séquence 5, après l'excavation jusqu'au fond de fouille). La variation expérimentale de l'effort de butonnage entre les deux séquences de mesure a été estimée pour quatre valeurs de la température enregistrée par le capteur

installé à l'extrémité sud du buton B₈₀ (Tableau 4-17), à partir des mesures des déformations enregistrées lors de deux séries de mesure. On a retenu pour cette interprétation seulement un tiers des jauges installées, à cause de la défaillance d'une grosse partie du matériel de mesure. Le traitement statistique des données permet d'obtenir une variation expérimentale moyenne de l'effort axial de butonnage, à température constante, égale à $\Delta N_B^{\text{exp}} = 203 \text{ kN}$.

L'écart type de la population de seize données analysées ne permet pas de mettre en doute la qualité des mesures du fait qu'il est du même ordre de grandeur que la variation d'effort axial qui est causée par un écart de 1°C de la température moyenne du buton par rapport aux valeurs enregistrées à l'extrémité sud du buton B₈₀.

Tableau 4-17 : Résultats expérimentaux de la variation de l'effort axial de butonnage

B₈₀			B₈₁		valeurs moyennes
extrémité sud			extr. sud	extr. nord	
T($\Delta T=0$) (°C)	ΔN_{1-3} (kN)	ΔN_{2-4} (kN)	ΔN_{2-4} (kN)	ΔN_{6-8} (kN)	$\Delta N_m(T)$ (kN)
16,6	177	156	150	144	157
17,4	257	224	173	190	211
19,8	301	267	251	260	270
14,8	210	200	151	132	173
$\Delta N(\text{pré-excavation} - \text{excavation au fond})$			ΔN_B^{exp}		203
écart type			$\sigma(\Delta N ; 16 \text{ données})$		52
coefficient de variation			CV(ΔN)		0,26

causée par l'excavation jusqu'au fond de fouille (entre les séquences de mesure 4 et 5)

Ainsi, un écart de seulement 1°C provoque une variation de l'effort axial (déplacements axiaux des tubes supposés nuls aux deux extrémités) égal à :

Par ailleurs, les mesures de convergence réalisées au fil invar au niveau de butons instrumentés (séquences de mesure 4 et 5) ont permis d'estimer la somme des déplacements de flexion des parois situées en vis-à-vis entre les deux phases. Pour une population de six valeurs mesurées (deux séries de trois mesures après l'excavation jusqu'au fond de fouille, d'écart type $\sigma = 0,48 \text{ mm}$ et coefficient de variation CV

=0,10), on a obtenu une valeur moyenne du déplacement de flexion de :

$$[\Delta y^S(z_B) + \Delta y^N(z_B)]_{\text{exp}} = 4,83 \text{ mm.} \quad (4.23)$$

En faisant la même hypothèse que pour l'estimation théorique de l'effort de butonnage, $\Delta y^S(z_B) = \Delta y^N(z_B)$, on obtient l'estimation expérimentale de la raideur des butons par mètre linéaire de paroi,

$$k_B^{\text{exp}} = \frac{\Delta N_p}{\Delta y^S} = \frac{2\Delta N_B^{\text{exp}}}{2\Delta y^S e_B} = \frac{2 \cdot 203}{4,83 \cdot 10^{-3} \cdot 3,10} \cong 27100 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (4.24)$$

c'est-à-dire une valeur 6,6 fois plus faible que la raideur théorique.

Le raccourcissement des butons est donc environ 6,6 fois inférieur à la somme des déplacements de flexion des parois situées en vis-à-vis :

$$\Delta L_B = \frac{203 \cdot 10740}{2,1 \cdot 10^4 \cdot 141,6} \cong 0,73 \text{ mm} \quad (4.25)$$

L'écart important entre les valeurs expérimentale et théorique de la raideur des butons ne met pas en cause la qualité de mesure. En effet, on peut imaginer que les conditions de contact des butons avec la paroi sont telles (surface de la paroi mal nettoyée ou présentant une géométrie irrégulière) que, sous l'effet de l'augmentation de la pression de contact (à cause de l'excavation jusqu'au fond de fouille ou de la variation de température), il se produise un écrasement local du béton après la mise en place des butons et avant l'excavation jusqu'au fond de fouille¹¹. Un poinçonnement d'environ 2 mm de la surface de contact à chaque extrémité permettrait de justifier les faibles valeurs expérimentales de l'effort de butonnage et de la raideur axiale des butons.

Etant donné ces réflexions, la configuration de calcul C_{III} définit les appuis élastiques au niveau des butons en considérant leur raideur expérimentale (4.24).

Cette configuration prend, par ailleurs, en compte la technologie de mise en place des butons. Si les configurations C_I et C_{II} tiennent en effet compte d'un phasage simplifié

¹¹ La face latérale de la paroi découverte après le terrassement est repiquée dans le but de la rendre propre et plane. Cependant, des « vestiges » du sol excavé, écrasables, peuvent rester accrochés en assurant un premier faux contact avec les butons.

en deux temps (excavation à une profondeur de 3,50 m et mise en place des butons), la configuration C_{III} comporte trois étapes :

- ♦ pré-excavation jusqu'à une profondeur de 2,80 m ;
- ♦ mise en place des butons à une profondeur de 2,54 m ;
- ♦ poursuite de l'excavation jusqu'à la profondeur de 3,50 m.

Par cette description du phasage d'exécution, la configuration C_{III} prend en compte dans le calcul, d'une façon simplifiée, l'influence de la méthode d'installation des butons adoptée sur le site. La mise en place des butons au fur et à mesure de l'avancement de l'excavation (Fig. 4-20) et le maintien des risbermes sur le bord de l'excavation (Fig. 4-21) limitent la flexion de la paroi par rapport à la configuration envisagée par les calculs C_I et C_{II} .

Enfin, la configuration C_{III} comporte une description plus adéquate des conditions aux limites en pied des parois en tenant compte de leur encastrement dans le substratum marneux et dans les graves. Cette modification des conditions aux limites a été décidée après avoir constaté en pied de paroi une discordance entre la rotation de la section observée in situ (mesures inclinométriques) et celle résultant du calcul dans l'hypothèse d'une rotation libre en pied.

La configuration de calcul C_{III} prend en compte au pied de l'écran un comportement de rotule élastique dont la raideur en rotation a été calée, par défaut, sur les résultats expérimentaux (300000 kNm/rad).

4.7.4 Pré-terrassement et mise en place des butons instrumentés (séquence 4)

Le pré-terrassement entre les parois moulées et la mise en place des butons ont été réalisés le 16 mai dans la zone instrumentée de l'ouvrage.

La technologie d'exécution adoptée comportait la mise en place des butons (les cinq butons associés aux cinq panneaux successifs 78 à 82) au fur et à mesure de l'avancement du front d'excavation du tympan de la trémie couverte (panneau 78) vers

l'extrémité ouest de l'ouvrage. A l'issue de leur mise en place, les butons ont été légèrement précontraints par le serrage d'une vis au moyen d'une clef manuelle.

Cette technologie d'exécution a été préférée par l'entrepreneur pour des raisons de productivité à une technologie consistant à effectuer le préterrassément sur l'ensemble de la zone instrumentée avant la mise en place des butons et leur serrage. Une telle technologie aurait permis d'obtenir un comportement mécanique de la paroi plus proche de celui qui est pris en compte dans les calculs théoriques (paroi en état de déformation plane sollicitée en flexion cylindrique).

La profondeur atteinte par la pré-excavation était assez irrégulière, tant en profil transversal que le long de l'ouvrage. Elle a été appréciée grossièrement, dans la zone instrumentée, à environ 3,5 m par rapport au terrain naturel.

La configuration de l'ouvrage en plan et en profil pour cette phase de travaux et la séquence de mesures qui lui est associée (séquence 4) est représentée sur les figures 4-20 et 4-21.

La séquence de mesure pour étudier le comportement de l'ouvrage durant cette phase de travaux a été réalisée en deux temps :

- ♦ mesure 0 : (juste) avant le commencement de l'excavation (11h) ;
- ♦ mesure 1 : (juste) après la fin des travaux dans la zone instrumentée (17h) et avant la reprise de l'excavation (le 17 mai à 12h).

Les résultats expérimentaux sont comparés dans ce qui suit aux estimations théoriques obtenues pour les trois configurations de calcul analysées.

4.7.4.1 Déformée de la paroi

La déformée expérimentale de la paroi moulée à l'issue de la pré-excavation a été déduite des mesures inclinométriques réalisées le 16 mai à 18h15 (mesure 1) dans les tubes installés dans les panneaux S81 et S82 (I_{S81} et I_{S82}). Comme référence (mesure 0), on a considéré la mesure réalisée le 4 mai, soit environ 6 semaines avant la pré-excavation. On n'a pas réalisé de mesure dans les tubes installés dans la paroi nord

(I_{N81} et I_{N82}) et derrière la paroi sud (I_1 et I_2) dans la mesure où l'intervalle de temps disponible avant la reprise de l'excavation était très limité.

Par ailleurs, les mesures de convergence par fil invar réalisées le 17 mai à 9h30 ont permis l'évaluation de la convergence en tête des panneaux instrumentés et donc du déplacement de chacun d'eux dans l'hypothèse où ils sont égaux. La mesure de référence pour ce calcul des déplacements a été réalisée le 9 mai (Annexe 4-4).

Les diagrammes expérimentaux et théoriques de variation avec la profondeur de la pente et du déplacement horizontal sont représentés sur la figure 4-33 pour les trois configurations de calcul analysées (C_I , C_{II} , C_{III}). La valeur moyenne (3,47 mm) du déplacement en tête de l'écran résultant de l'interprétation des mesures à fil invar est également figurée. Ces mesures à fil invar, réputées de grande précision (mesures directes), sont caractérisées par un écart type ($\sigma = 0,23$ mm) et un coefficient de variation ($C_v=3\%$) qui rendent inutile un traitement séparé des trois valeurs individuelles (correspondant aux 3 paires de plots installées sur les panneaux 81, 82 et 83).

La figure 4-33 permet de faire les constats suivants :

a) pente de la déformée de l'écran

- ♦ les inclinaisons de la déformée obtenues dans les tubes I_{S81} et I_{S82} sont en bonne concordance (l'écart absolu moyen entre les deux courbes est de $0,30 \cdot 10^{-4}$ rad, soit du même ordre de grandeur que la résolution de mesure de la sonde inclinométrique) ; elles prennent des valeurs comprises entre 2 et $3 \cdot 10^{-4}$ rad (faible variation) sur la plupart de la profondeur de l'écran ;
- ♦ les diagrammes de variation théorique de la pente de la déformée obtenus pour les configurations C_I , C_{II} et C_{III} présentent une allure bien différente de celle des courbes expérimentales ; on distingue, en fonction de la profondeur, trois tronçons présentant une variation distincte (la pente de la déformée est quasiment constante en haut de la paroi, elle baisse d'une façon quasi-linéaire entre 4 et 11 m de profondeur et elle reste constante au-dessous de 11 m de profondeur) ; parmi les

trois courbes, celle correspondant à la configuration C_{III} , est plus proche, sur toute la profondeur de la paroi, des diagrammes expérimentaux ;

b) déplacements horizontaux transversaux de l'écran

- ♦ les déformées expérimentales de l'écran obtenues à partir des mesures inclinométriques dans les deux tubes sont presque superposées (l'écart absolu moyen entre les deux déformées est inférieur à 0,16 mm) et en très bonne concordance avec le résultat des mesures à fil invar ; ainsi, à une profondeur de 0,50 m, on a obtenu pour le tube I_{S81} un déplacement horizontal de 3,4 mm avec un écart type de 0,8 mm, tandis que le tube I_{S82} a donné un déplacement horizontal de 3,6 mm avec un écart type de 0,6 mm ;
- ♦ on remarque également la bonne cohérence de la déformée obtenue pour la configuration de calcul C_{III} (caractérisée par un déplacement horizontal de 3,8 mm à 0,50 m de profondeur) avec les résultats expérimentaux.

4.7.4.2 Pressions totales agissant à l'interface de la paroi

Pour observer l'effet des travaux de terrassement sur les pressions agissant à l'interface du sol et des parois moulées, deux séries de mesures ont été effectuées le même jour (16 mai) :

- ♦ mesure 0 : juste avant le commencement des travaux (à 9h50) ;
- ♦ mesure 1 : juste après la fin des travaux (à 19h15).

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau 4-18, à côté des valeurs théoriques des pressions totales agissant des deux côtés de la paroi (côté terrain, CT, et côté fouille, CF) à l'emplacement de chaque capteur. Pour le capteur SI_0 , on a procédé à un ajustement de la dérive au cours du temps de son signal de sortie.

Le tableau 4-18 fait apparaître par ailleurs les valeurs du coefficient de pression initiale et du coefficient de réaction déduit de la stratigraphie relevée dans le sondage PR_2 et utilisé pour le calcul.

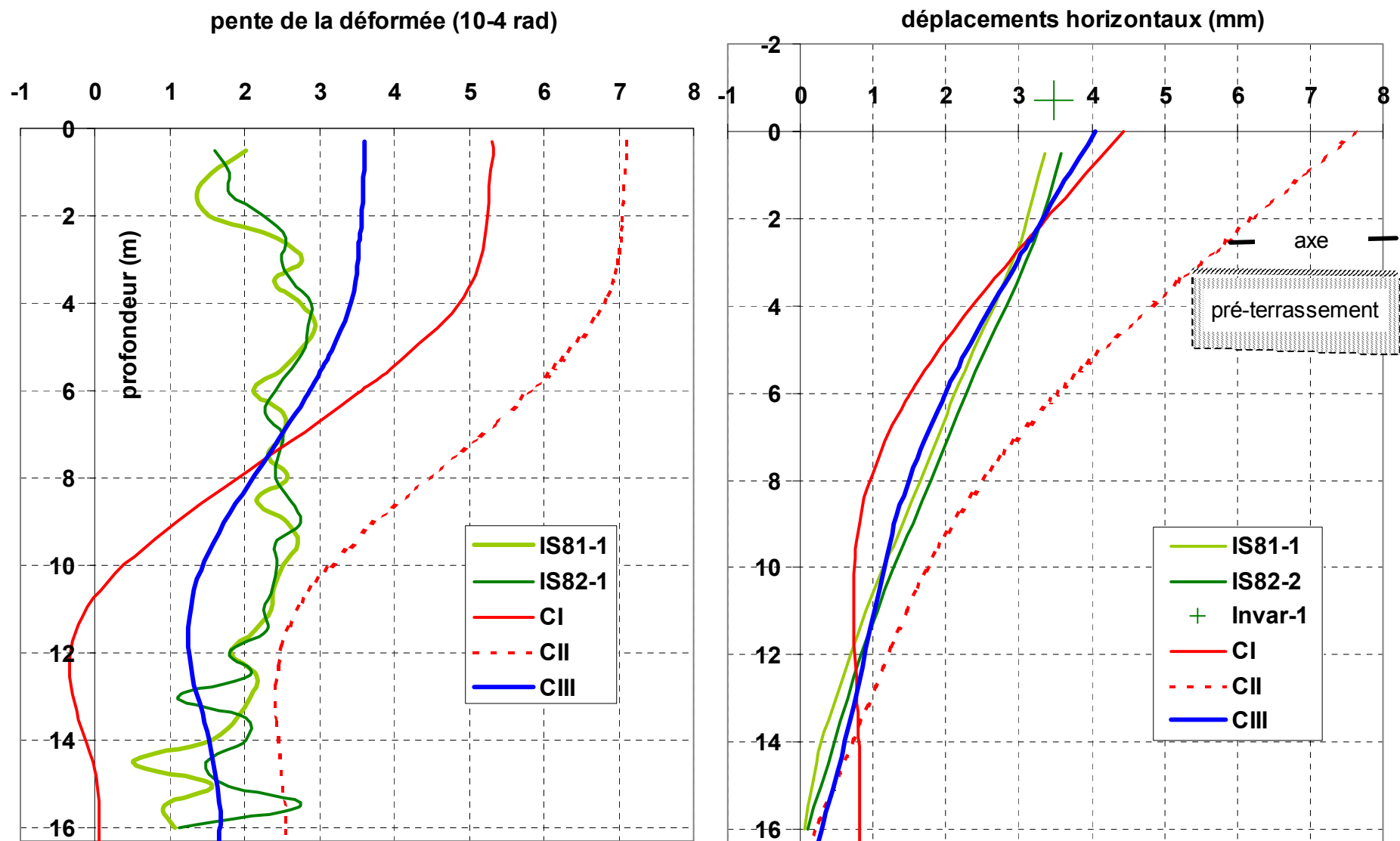


Fig. 4-33 : Déformée de la paroi sud (pente de la déformée et déplacements horizontaux) en phase de pré-excavation. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} et I_{S82}) et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III}) et déplacement expérimental en tête de la paroi (Invar).

Tableau 4-18: Pressions totales exercées à l'interface sol-écran après le pré-terrassement (valeurs théoriques et expérimentales)

Niveau caractéristique (S81)	Prof. (TN=0)	k_i^*		k_h		Contraintes théoriques (p_{th})				Contr. exp. (p_{exp})	
		projet	exp.	E_M -projet	E_M -PR ₂	initiales	Séq. 4 (après pré-terras.)			Réf.	Séq. 4
(stratigraphie relevée dans le sondage pressiométrique PR ₂)	(m)	$k_i = k_0$	$k_i = f(p_0)$	C_I	C_{II} et C_{III}	(au repos)	C_I	C_{II}	C_{III}	Mes. 0	Mes. 1
		-	(Mes. 0)	$H_L = 3,5m$	$H_L = 3,5m$	p_0	p_1^{CT} ou p_1^{CF}			p_0	p_1^{CT}, p_1^{CF}
				(kPa/m)	(kPa/m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Terrain naturel (TN)	0,00										
Assise chaussée / remblai	0,60	-	0,00		4430						
Nappe (3,75 NGF)	2,04										
K₅ (côté terrain)	2,41	0,55	0,29	4300	2710	29,8	12,4	10,6	12,0	17,4	6,6
Remblai/argile tourbeuse	2,50										
Nappe (3,00 NGF)	2,79										
Pré-excavation	3,50				860						
K₂ (côté terrain)	5,17	0,66	0,48	2700	1190	63,2	60,0	58,5	60,3	45,9	78,2
Argile tourbeuse/limon	7,50										
SI₃ (côté terrain, CT)	7,61		0,68			78,2	91,2	73,5	76,5	92,8	81,1
SI₂ (côté fouille, CF)	7,61		0,66			78,2	94,5	91,1	88,1	90,0	70,4
SI₁ (côté terrain)	9,71	0,58	0,52	7300	3270	101,9	91,8	95,9	97,5	90,9	86,8
SI₀ (côté fouille)**	9,71		0,49			101,9	102,7	108,1	106,4	87,1	80,9
Limon argileux/graves	13,60										
Graves/marnes	15,80	0,43		29000	26100						
Bas paroi théorique	16,29	0,58		54000	81100						

*- pour les couches de sol cohérent (argiles et limon), k_i est exprimé en contraintes totales ($k_i = p_0/\sigma_z$) ;

- les résultats du capteur SI₀ comportent un ajout correctif de 53 kPa compte tenu des résultats de l'étude de corrélation des mesures des pressions totales avec les mesures inclinométriques (voir 4.7.6.2).

Les contraintes horizontales initiales ont été estimées pour chaque configuration de calcul (C_I , C_{II} et C_{III}) en prenant un coefficient de pression initiale égal au coefficient de pression de terres au repos K_0 .

Les contraintes horizontales théoriques obtenues après le pré-terrassement ne diffèrent pas de façon significative entre les trois configurations analysées (à l'exception de la situation correspondant au capteur SI_3). Cependant, on observe des discordances importantes entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques, tant pour les contraintes initiales que pour celles obtenues après le pré-terrassement :

- ♦ au niveau du capteur K_5 , les valeurs théoriques sont sensiblement plus élevées que les valeurs expérimentales, mais leur baisse relative après le pré-terrassement est quasiment identique à celle constatée expérimentalement (environ 60% de la valeur initiale) ;
- ♦ au niveau du capteur K_2 , les valeurs théoriques sont très peu influencées par l'exécution du pré-terrassement (pour la configuration C_{III} on constate une baisse d'environ 4% de la valeur initiale), tandis que les résultats expérimentaux montrent une augmentation importante de la contrainte (environ 71 % de la valeur initiale) ;
- ♦ au niveau des capteurs SI_2 et SI_3 , les valeurs expérimentales initiales sont supérieures d'environ 17 % aux valeurs théoriques ; après le pré-terrassement, elles diminuent des deux côtés de l'écran, mais de façon plus significative côté fouille (22% côté fouille par rapport à 13 % côté terrain) ; a contrario, les résultats théoriques montrent une augmentation d'environ 13% côté fouille tandis que, côté terrain, la pression reste quasi stationnaire ;
- ♦ au niveau des capteurs SI_0 et SI_1 , les valeurs expérimentales initiales sont de l'ordre de 13 % plus faibles que les valeurs théoriques ; après terrassement, elles diminuent légèrement des deux côtés de l'écran (environ 4% côté terrain et environ 7 % côté fouille), tandis que les résultats théoriques montrent une faible diminution côté terrain (4%) et une faible augmentation côté fouille (environ 4%).

On précise toutefois que, si la méthode numérique implantée dans le logiciel DENEbola-LCPC assure le respect des conditions de continuité en déplacements de

la déformée entre les tronçons successifs de discrétisation de l'écran, elle ne permet d'obtenir le respect de ces conditions dans le diagramme de variation des pressions totales. En ces points d'interface entre les tronçons, la pression totale ne prend pas une valeur unique et la comparaison avec les valeurs expérimentales est approximative.

4.7.4.3 Efforts transmis par les boutons à la paroi

Après la mise en place des boutons et le raccordement des jauges au dispositif d'acquisition, les déformations longitudinales des deux extrémités des boutons, ainsi que la température, ont fait l'objet d'un enregistrement automatique avec un intervalle de temps de 30 minutes.

On a pu ainsi accéder aux efforts (effort axial et moments de flexion développés dans deux plans perpendiculaires) agissant dans les sections de mesure des boutons, en utilisant les relations de calcul (4.7) à (4.10), et à leurs variations en fonction de la température.

a) Effort axial dans les boutons

Le tableau 4-19 présente les valeurs de l'effort axial obtenues pour quatorze séries de mesure. On note la défaillance partielle du matériel de mesure, en dépit des précautions particulières qui ont été prises pour la protection des jauges durant le transport, le stockage et la manipulation des boutons instrumentés. Ainsi, au lieu de douze valeurs de l'effort axial pour les trois boutons instrumentés, on a dû se contenter pour chaque série de mesures de seulement cinq valeurs correspondant aux boutons B_{80} et B_{81} .

Pour le bouton B_{82} , le suivi des jauges a commencé le 17 mai à 11h33, après leur recâblage au dispositif d'acquisition.

Les valeurs de l'effort axial dans le bouton B_{81} obtenues à partir des jauges j_1^{81} et j_3^{81} , (tableau 4-19) n'ont pas été interprétées dans cette étude du fait des incohérences relevées entre les résultats des mesures provenant de la jauge j_3^{81} et ceux provenant des autres jauges (zéro décalé, d'une part, et variation thermique des mesures effectuées sur cette jauge en contradiction avec celles obtenues avec les autres jauges, d'autre

part). Cependant, les mesures provenant de la jauge j_1^{81} ont été utilisées, par défaut, en combinaison avec celles provenant de la jauge j_7^{81} (située à l'autre extrémité du buton en position diamétralement opposée) afin d'accéder à l'effort axial dans l'hypothèse d'une distribution uniforme le long du buton (buton horizontal) et d'un moment de flexion réduit et de même ordre de grandeur dans les deux sections de mesure du buton B_{81} .

date	heure	temp. (°C)	B_{80}			B_{81}				
			extrémité sud		N_{B80}	extrémité sud		extrémité nord		N_{B81}
			N_{1-3} (kN)	N_{2-4} (kN)	(moyen) (kN)	N_{1-3} (kN)	N_{2-4} (kN)	N_{1-7} (kN)	N_{6-8} (kN)	(moyen) (kN)
16-mai	21:55	19,1	-287	-259	-273	-1002	-802	-769	-745	-772
16-mai	23:25	17,6	-195	-157	-176	-889	-705	-670	-647	-674
17-mai	00:25	16,6	-168	-132	-150	-867	-679	-646	-622	-649
17-mai	01:55	15,6	-116	-66	-91	-803	-635	-598	-574	-603
17-mai	02:25	14,3	-21	28	3	-717	-550	-511	-488	-516
17-mai	03:25	13,5	4	44	24	-712	-523	-481	-462	-489
17-mai	04:55	12,7	48	81	65	-694	-474	-437	-413	-441
17-mai	06:55	11,4	110	131	121	-611	-437	-395	-374	-402
17-mai	08:55	12,9	-3	35	16	-643	-527	-483	-463	-491
17-mai	09:25	13,6	-31	5	-13	-674	-563	-521	-500	-528
17-mai	09:55	14,5	-67	-35	-51	-731	-602	-568	-545	-571
17-mai	11:33	17,4	-127,1	-138,6	-133	-1122	-679	-634	-607	-640
17-mai	12:18	19,7	-221,4	-210,5	-216	-1273	-765	-735	-692	-731
17-mai	12:33	19,5	-224,3	-214,1	-219	-1317	-772	-729	-696	-732

*-on a fait l'hypothèse d'un moment de flexion identique dans les deux sections de mesure du buton B_{81} .

Tableau 4-19 : Effort axial dans les butons instrumentés en phase de pré-excavation

Pour chaque buton, l'effort axial est pris égal à la moyenne des valeurs individuelles (deux valeurs pour le buton B_{80} et trois valeurs pour le buton B_{81}) obtenues au moyen des paires de jauges diamétralement opposées.

On observe des différences importantes entre les efforts axiaux expérimentaux obtenus pour les deux butons (dans le buton B_{81} l'effort axial est presque trois fois plus élevé).

Par ailleurs, les efforts axiaux expérimentaux sont beaucoup plus élevés que l'effort correspondant au serrage au moment de la mise en œuvre des butons (pour un coefficient de frottement acier – béton qui ne peut pas être inférieur à 0,25, une surface d'appui des butons de 0,60 m de diamètre, une clef de serrage ayant un bras de 1m et

une force de serrage de 0,1 kN correspondant à un poids de 100 kg, l'effort axial initial ne dépasse pas 20 kN).

La seule configuration de calcul qui permette d'obtenir un effort axial de butonnage non nul est C_{III} (les deux autres calculs simulent le comportement de l'écran en considérant des boutons passifs installés après le pré-terrassement) :

$$C_{III} : N_B = \Delta T(z_b=2,54 \text{ m}) \cdot e_B = 20,1 \cdot 3,10 = 62,3 \text{ kN}$$

b) Variation thermique de l'effort dans les boutons

Une estimation de la variation thermique unitaire de l'effort axial dans les boutons (relation 4.26) est présentée dans le tableau 4-20 pour l'ensemble des trente séries de mesures enregistrées en phase de pré-terrassement. Pour une mesure courante « i », les valeurs de la variation thermique unitaire ont été calculées soit par rapport à une mesure ultérieure « j » (pour les neuf premières mesures) soit par rapport à une mesure antérieure « k » (pour les vingt et une dernières mesures) en utilisant la relation (4.26)¹² :

$$\left. \frac{\Delta N}{\Delta T} \right|_i = \begin{cases} \frac{N_j - N_i}{T_j - T_i} & \text{si } j(\text{réf.}) \text{ après } i \\ \frac{N_i - N_k}{T_i - T_k} = \frac{N_k - N_i}{T_k - T_i} & \text{si } k(\text{réf.}) \text{ avant } i \end{cases} \quad \left[\frac{\text{kN}}{^\circ\text{C}} \right] \quad (4.26)$$

L'analyse statistique de l'ensemble des séries de mesures met en évidence une variation thermique unitaire de l'effort de butonnage assez homogène pour les six populations individuelles analysées. A l'exception des résultats obtenus à partir des mesures provenant de la jauge j₃⁸¹ (Tableau 4-20), on a obtenu une distribution de la variation thermique unitaire de l'effort axial dans les deux boutons caractérisée par une moyenne (en valeur absolue) de 47,8 kN/°C¹³, un écart type de 4,4 kN/°C et un

¹² On a soustrait toujours la valeur antérieure de la valeur postérieure, de façon à retrouver les éventuelles variations de l'effort de butonnage d'origine non thermique avec le même signe.

¹³ La variation thermique unitaire prend un signe identique à celui de l'effort de compression aussi bien pour la croissance que pour la baisse de température. Si l'on attribue, conventionnellement, le signe négatif pour un effort de compression pour traction alors la variation thermique unitaire prend toujours un signe négatif.

coefficient de variation d'environ 9%.

Tableau 4-20 : Variation thermique unitaire de l'effort axial dans les butons

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁			
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord	
			$\Delta N_{1-3}/\Delta T$	$\Delta N_{2-4}/\Delta T$	$\Delta N_{1-3}/\Delta T$	$\Delta N_{2-4}/\Delta T$	$\Delta N_{1-7}/\Delta T$	$\Delta N_{6-8}/\Delta T$
			(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)
16-mai	21:55	19,1	-51,4	-50,5	-50,6	-50,6	-47,3	-48,4
16-mai	22:25	18,8	-55,2	-52,0	-48,5	-48,5	-48,6	-50,0
16-mai	22:55	18,5	-52,4	-49,1	-45,3	-45,3	-47,5	-48,6
16-mai	23:25	17,6	-49,2	-46,5	-44,7	-44,7	-43,1	-44,3
16-mai	23:55	16,9	-51,5	-48,5	-48,5	-48,5	-44,8	-46,0
17-mai	00:25	16,6	-53,7	-50,8	-49,2	-49,2	-46,7	-48,2
17-mai	00:55	16,3	-55,8	-52,1	-48,4	-48,4	-48,6	-49,4
17-mai	01:25	16,0	-53,4	-50,1	-46,3	-46,3	-46,5	-47,7
17-mai	01:55	15,6	-54,3	-47,4	-46,0	-46,0	-47,7	-48,7
17-mai	02:25	14,3	-54,9	-59,0	-58,9	-51,9	-53,2	-53,1
17-mai	02:55	13,9	-54,7	-56,1	-57,9	-52,2	-53,2	-53,0
17-mai	03:25	13,5	-51,3	-53,4	-51,1	-49,3	-50,7	-50,0
17-mai	03:55	13,2	-49,7	-52,3	-48,1	-48,0	-49,5	-49,8
17-mai	04:25	13,1	-50,3	-51,8	-47,2	-48,4	-49,5	-48,8
17-mai	04:55	12,7	-52,1	-53,0	-48,0	-51,1	-51,6	-51,7
17-mai	05:25	12,3	-51,8	-52,9	-48,1	-51,0	-52,0	-51,5
17-mai	05:55	11,9	-50,3	-51,7	-47,8	-48,5	-49,7	-49,4
17-mai	06:25	11,5	-51,3	-52,4	-50,4	-50,2	-51,0	-50,9
17-mai	06:55	11,4	-51,4	-50,5	-50,6	-47,3	-48,4	-48,0
17-mai	07:25	11,4	-50,8	-49,8	-52,5	-47,5	-48,1	-47,8
17-mai	07:55	11,7	-45,7	-47,0	-53,1	-44,7	-45,4	-45,8
17-mai	08:25	12,2	-46,4	-48,6	-55,4	-43,8	-45,0	-44,8
17-mai	08:55	12,9	-45,4	-47,0	-57,5	-44,0	-45,8	-45,2
17-mai	09:25	13,6	-46,3	-47,6	-59,4	-43,2	-44,9	-44,4
17-mai	09:55	14,5	-47,3	-48,0	-58,2	-43,1	-43,2	-43,1
17-mai	11:33	17,4	-39,6	-45,0	-85,1	-40,3	-39,8	-38,7
17-mai	11:48	17,7	-42,1	-42,2	-89,1	-43,4	-42,3	-42,2
17-mai	12:03	19,0	-38,1	-49,2	-80,5	-36,2	-43,1	-36,7
17-mai	12:18	19,7	-39,8	-41,0	-79,4	-39,4	-40,7	-38,1
17-mai	12:33	19,5	-41,3	-42,7	-87,2	-41,4	-41,3	-39,8
$\Delta N/\Delta T_{med}$ (kN/°C)		-47,8	-49,3	-49,6	-56,4	-46,4	-47,0	-46,8
Ecart type (kN/°C)		4,36	5,0	4,0	13,8	4,0	3,8	4,5
Coef. variation		0,09	0,10	0,08	0,24	0,09	0,08	0,10

30 s é r i e s d e m e s u r e

Observations :

Pour obtenir des résultats représentatifs (moins influencés par la maîtrise insuffisante de la température) la variation thermique unitaire pour une série courante est calculée par rapport à une série prise à une température suffisamment éloignée. Plus précisément :

- pour les séries prises entre 21h55 et 01h55 on s'est rapporté à la mesure prise à 06h55 ;
- pour les séries prises entre 02h25 et 09h55 on s'est rapporté à la mesure prise à 21h55 ;
- pour les séries prises entre 11h33 et 12h33 on s'est rapporté à la mesure prise à 06h55.

Cette variation thermique unitaire expérimentale est à comparer à la variation

thermique unitaire théorique calculée dans l'hypothèse où les extrémités des butons sont bloquées en déplacement dans la direction longitudinale. Cette dernière a été estimée à environ 36 kN/°C avec la relation (5.22).

L'écart entre la valeur expérimentale et la valeur théorique pourrait être expliqué par la «convergence» de la trémie sous l'action différée des pressions appliquées par les sols. Cette tendance à la convergence des parois situées face en face se traduit par une croissance différée de l'effort de butonnage. Cette dernière s'ajoute à la variation thermique de l'effort de butonnage entre deux mesures successives et se retrouve incluse dans la variation thermique unitaire.

c) *Flexion des butons*

Le tableau 4-21 présente les valeurs expérimentales du moment de flexion qui se développe dans les deux sections de mesure de chaque buton (4.9 et 4.10) pour quelques-unes des séries de mesures enregistrées.

On observe que, par opposition à l'effort axial, le moment de flexion ne varie pas de façon significative avec la température, ce qui correspond bien aux attentes.

Il prend, par ailleurs, des valeurs cohérentes avec les estimations théoriques sous l'action du poids propre des butons, dans l'hypothèse où leur appui sur les parois¹⁴ est articulé. L'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques montre que l'articulation des butons sur les parois n'est pas parfaite, même à leur extrémité sud, où ils présentent une réduction importante d'inertie.

Le moment développé à l'extrémité sud du buton B₈₁, dans le plan axial du buton passant par le diamètre reliant la jauge j₂⁸¹ à la jauge j₄⁸¹, fait toutefois exception. Ce moment, qui est obtenu à partir des résultats des mesures des jauges j₁⁸¹ et j₃⁸¹, est affecté par les mauvais résultats provenant de cette dernière.

¹⁴ soit environ 7,5 kNm à l'extrémité sud et environ 3,5 kNm à l'extrémité nord (voir 4.5.4.6 et Fig. 4-21).

Tableau 4-21 : Moments de flexion développés dans les sections instrumentées des butons en phase de pré-excavation entre les parois situées en vis-à-vis

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁			
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord	
			M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M ₁₋₃ (kNm)	M _{2-4(j3)} (kNm)	M _{v(7-8)} (kNm)	M _{h(6-7)} (kNm)
16-mai	21:55	19,1	3,1	10,5	12,5	23,9	2,4	-2,5
16-mai	23:25	17,6	3,3	11,5	12,5	22,8	2,6	-2,6
17-mai	00:25	16,6	3,4	11,4	12,5	22,8	2,6	-2,5
17-mai	01:55	15,6	3,9	11,5	12,4	21,2	2,4	-2,7
17-mai	02:25	14,3	2,1	12,6	12,3	21,4	2,5	-2,6
17-mai	03:25	13,5	3,7	11,6	12,1	23,7	2,1	-2,2
17-mai	04:55	12,7	3,0	11,7	12,7	26,6	2,7	-2,7
17-mai	06:55	11,4	2,5	10,7	12,5	22,7	2,6	-2,6
17-mai	08:55	12,9	2,7	11,2	11,8	16,6	1,8	-2,3
17-mai	09:25	13,6	2,5	10,6	11,6	15,9	2,1	-2,1
17-mai	09:55	14,5	3,3	10,5	10,9	16,2	2,6	-1,0
17-mai	11:33	17,4	3,4	10,8	10,1	46,9	3,5	0,7
17-mai	12:18	19,7	4,7	12,4	10,3	51,2	5,6	1,5
17-mai	12:33	19,5	3,6	11,7	10,5	56,0	4,6	2,1

4.7.5 Excavation jusqu'au fond de fouille (séquence 5)

L'excavation dans la zone instrumentée jusqu'à la profondeur correspondant à la cote de fondation du radier a débuté le 17 mai durant l'après-midi et a été achevée le 18 mai dans la journée, tandis que les travaux de pré-excavation et de mise en place des butons étaient poursuivis vers l'extrémité ouest de l'ouvrage.

L'auscultation de l'ouvrage durant cette phase a été réalisée à plusieurs reprises, en utilisant la totalité des appareillages disponibles (Tableau 4-5).

Les résultats expérimentaux sont présentés ci-dessous et comparés aux estimations théoriques obtenues pour les trois configurations de calcul, C_I, C_{II} et C_{III} définies auparavant, en considérant une profondeur d'excavation de 6 m par rapport au niveau du terrain naturel (valeur théorique à l'endroit du panneau S81).

4.7.5.1 Déformée de la paroi et déplacements du massif du sol soutenu

Après l'excavation jusqu'à la cote de fondation du radier et avant l'exécution du

radier, on a réalisé deux séries de mesures inclinométriques à un intervalle de vingt jours dans les quatre tubes installés dans les parois moulées (I_{S81} et I_{S82} dans la paroi sud et I_{N81} et I_{N82} dans la paroi nord) :

- ♦ mesure 2 (le 19 mai, à court terme) : juste après la fin de l'excavation dans la zone instrumentée ;
- ♦ mesure 3 (le 8 juin, à long terme) : juste avant la mise en œuvre du radier dans la zone instrumentée (radier coulé dans la zone de trémie couverte, c'est-à-dire à une distance d'environ 10 m de la zone instrumentée) ;

La mesure 3 comporte par ailleurs l'auscultation des deux tubes installés derrière la paroi sud (I_1 et I_2). Pour l'interprétation de l'ensemble de ces mesures inclinométriques, la mesure 0 réalisée le 4 mai est prise comme référence.

Les relevés inclinométriques et les déplacements horizontaux des parois moulées qui en ont été déduits sont représentés sur les figures 4-34 et 4-35, avec diagrammes théoriques obtenus pour les trois configurations de calcul retenues dans cette étude (C_I , C_{II} et C_{III}). Les mesures inclinométriques ont été corrigées de l'erreur systématique, en faisant l'hypothèse que le tronçon de tube descendu sous la paroi reste fixe entre les mesures successives, et interprétées en tenant compte du vrillage du tube (relation 4.3). Les diagrammes expérimentaux des déplacements horizontaux des parois ont été établis à partir de diagrammes lissés (moyenne mobile sur trois points) de ces relevés inclinométriques corrigés.

La figure 4-35 représente également les valeurs moyennes des déplacements horizontaux résultant de l'interprétation des mesures de convergence par fil invar (Annexe 4-4) :

- ♦ mesure 2 (le 19 mai) : mesures de convergence au niveau de la poutre de couronnement seulement, du fait de l'impossibilité d'accéder à la fouille pour les mesures de convergence au niveau des butons ;
- ♦ mesure 2bis (le 23 mai) et mesure 3 (8 juin) : mesures de convergence réalisées aux deux niveaux instrumentés.

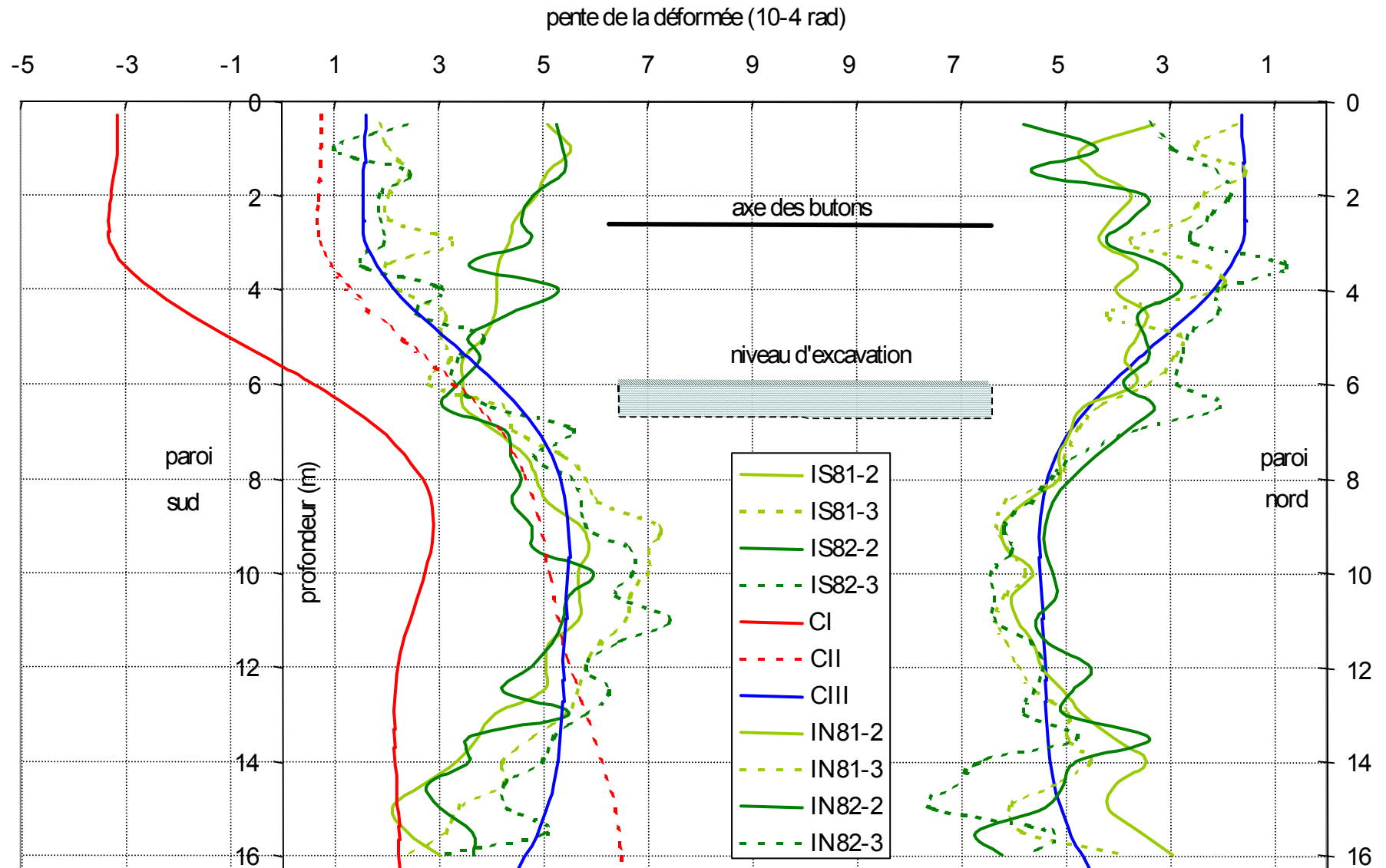


Fig.4-34: Pente de la déformée des parois après l'excavation jusqu'à la cote de fondation du radier. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III})

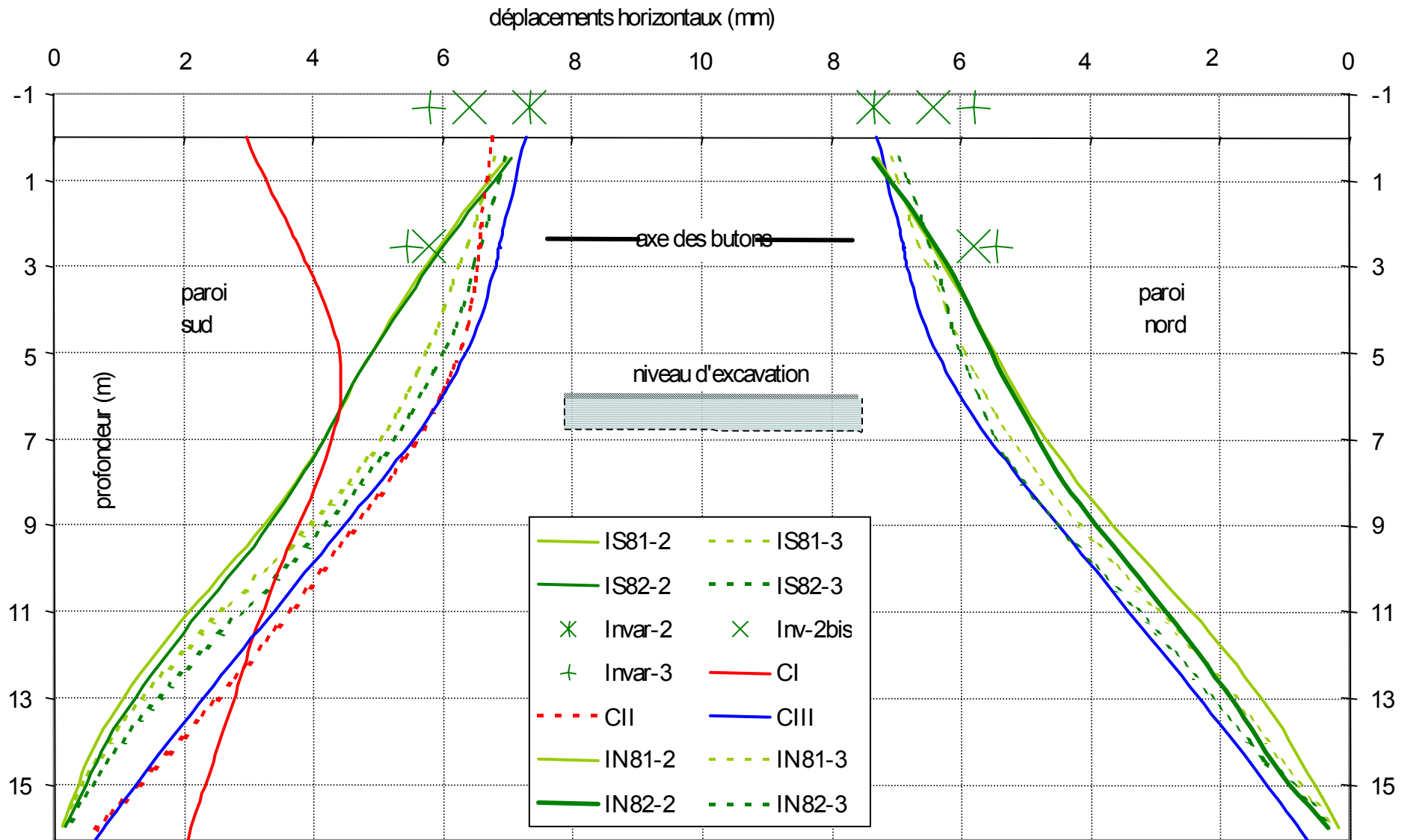


Fig.4-35: Déformée des parois après l'excavation jusqu'à la cote de fondation du radier. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} , I_{N81} et I_{N82}) et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III}) et déplacements expérimentaux déduits de l'interprétation des mesures à fil invar.

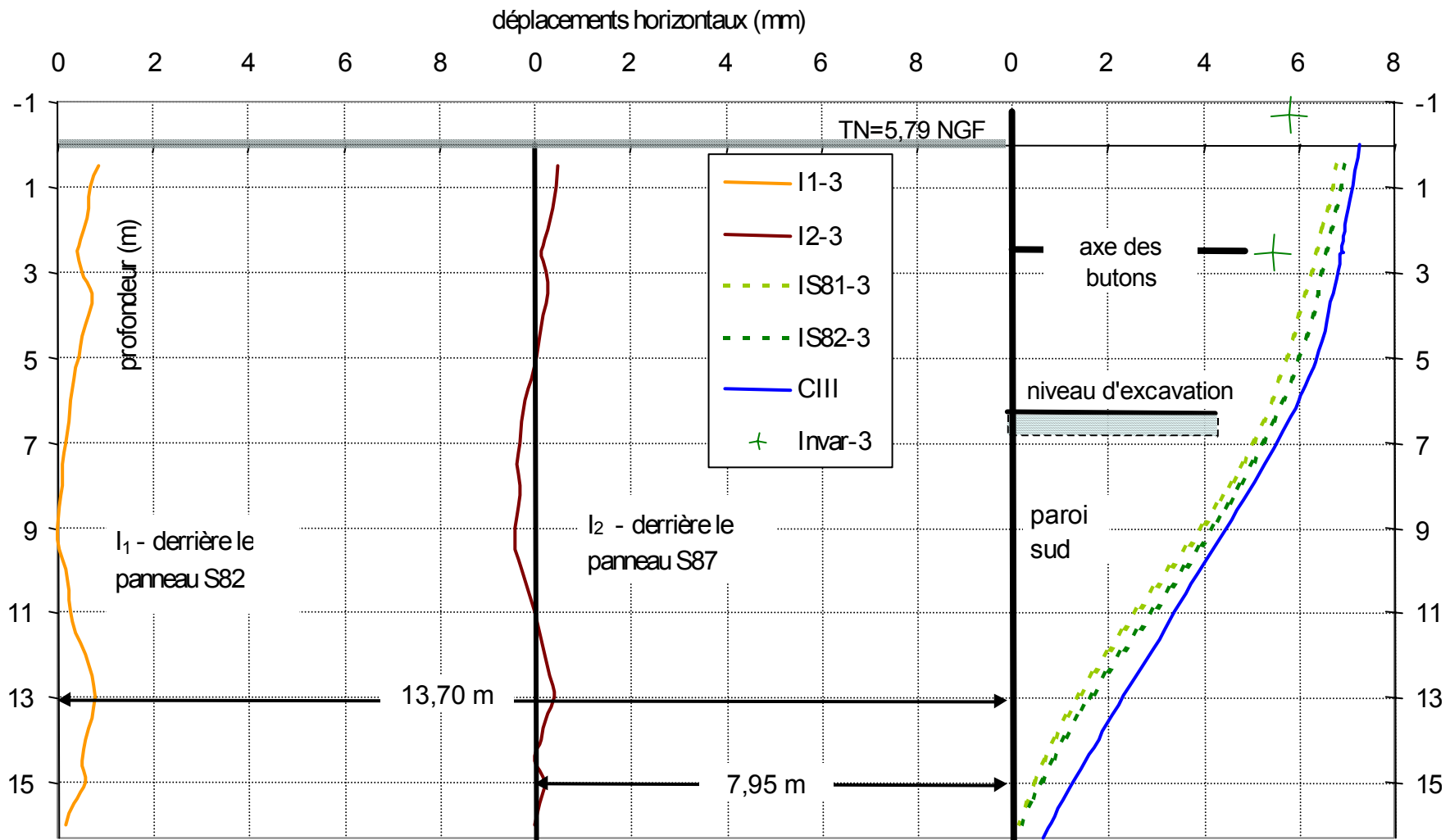


Fig.4-36 Déplacements horizontaux du terrain derrière la paroi sud radier après l'excavation complète dans le plan perpendiculaire à l'écran. Diagrammes expérimentaux (I_1 et I_2) et déplacements horizontaux de la paroi (I_{S81} , I_{S82} et C_{III})

Les valeurs moyennes des déplacements au niveau des butons ont été calculées après avoir écarté la valeur relative au panneau 80, plus faible d'environ 10 % que les valeurs mesurées pour les panneaux 81 et 82. La valeur écartée ne doit pas être considérée comme affectée par une erreur de mesure, mais par la présence à une distance de seulement 7 m du tympan ouest de la dalle de couverture.

Par ailleurs, les déplacements au niveau des butons ont été estimés en procédant à un recalage du zéro, le zéro ayant été mesuré le 17 mai après la pré-excavation. Ce recalage a été effectué à partir des déplacements horizontaux obtenus au même niveau dans les deux tubes inclinométriques I_{S81} et I_{S82} en phase de pré-excavation (mesure 1).

Les valeurs ponctuelles des déplacements horizontaux transversaux y en tête de l'écran (à une profondeur de 0,5 m) et au niveau des butons (à une profondeur de 2,54 m) estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques et des mesures à fil invar, ainsi que l'écart type, σ^y , de l'erreur qui entache leur estimation, sont présentés dans le tableau 4-22.

Tableau 4-22 : Estimation expérimentale (séquence 5) des déplacements de convergence des parois situées en vis-à-vis (en tête de l'écran et au niveau des butons)

Mesure	Prof. z (m)	Panneau	Mesures inclinométriques				Fil invar		
			paroi sud		paroi nord		convergence		
			$y^S(z)$	$\sigma^y(z)$	$y^N(z)$	$\sigma^y(z)$	y^S+y^N	y^S+y^N	$\sigma^y(z)$
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2 19-mai	-0,70	81-83	Mesure 2 :				14,71	0,69	
			Mesure 2bis :				12,83	0,58	
2bis 23-mai	0,50	81	7,00	0,63	7,27	0,86	14,27		
		82	7,07	0,65	7,34	0,99	14,42		
	2,54	81	5,97	0,56	6,45	0,77	12,42	11,59	0,67
		82	6,03	0,58	6,39	0,88	12,42		
3 8-juin	-0,70	81-83					11,60	0,53	
	0,50	81	6,81	0,74	7,07	0,91	13,88		
		82	6,97	0,71	6,95	1,16	13,92		
2,54	81	6,39	0,66	6,65	0,81	13,05	10,89	0,96	
	82	6,59	0,63	6,49	1,04	13,08			

Les déplacements horizontaux du massif du sol soutenu, observés par le biais des tubes inclinométriques I_1 et I_2 (Fig. 4-13), sont présentés sur la figure 4-36 avec les

déplacements expérimentaux (mesure 3) et théoriques (configuration C_{III}) de la paroi sud.

Ces représentations nous incitent de faire quelques remarques :

a) *inclinaison de la déformée de l'écran*

- ◆ les résultats expérimentaux obtenus dans les deux tubes installés dans la paroi sud sont en bonne concordance tant pour la mesure 2 (écart absolu moyen entre les deux courbes de $0,45 \cdot 10^{-4}$ rad) que pour la mesure 3 (écart absolu moyen entre les deux courbes de $0,57 \cdot 10^{-4}$ rad) ;
- ◆ les courbes d'inclinaison de l'écran obtenues dans les deux tubes installés dans la paroi nord ont la même allure observée pour la paroi sud ; cependant, on observe des perturbations locales plus importantes ainsi qu'une concordance générale entre les deux courbes moins satisfaisante (écart absolu moyen entre les deux courbes de $0,84 \cdot 10^{-4}$ rad pour la mesure 2 et de $0,77 \cdot 10^{-4}$ rad pour la mesure 3, c'est-à-dire, environ deux fois la résolution de la sonde inclinométrique) ;
- ◆ entre les mesures 2 et 3, on constate une variation de l'inclinaison de l'écran semblable pour les quatre tubes : elle augmente légèrement au-dessous du niveau de l'excavation (de 1 à $2 \cdot 10^{-4}$ rad) et elle diminue d'une façon plus significative au-dessus (de l'ordre de 2 à $3 \cdot 10^{-4}$ rad), avec une croissance de la courbure de la déformée sur toute la profondeur de la paroi (effet différé) ;
- ◆ les courbes expérimentales d'inclinaison de la déformée de l'écran (et notamment celles obtenues pour la mesure 3) sont en bonne concordance avec la courbe théorique obtenue pour la configuration C_{III} ; l'inclinaison de la déformée obtenue pour la configuration C_{II} est légèrement plus faible en haut de l'écran et plus élevée en bas de l'écran, tandis que, pour la configuration C_I , l'inclinaison présente une variation complètement différente de valeurs observées (elle est sensiblement plus faible au dessous du niveau de l'excavation, pour devenir même négative en dessus) ;

b) déplacements horizontaux transversaux de l'écran

- ♦ les déformées expérimentales observées dans les deux tubes inclinométriques installés dans chaque paroi instrumentée (I_{S81} et I_{S82} pour la paroi sud et I_{N81} et I_{N82} pour la paroi nord) sont en bonne cohérence, l'une par rapport à l'autre, tant pour la mesure 2 que pour la mesure 3 (l'écart absolu moyen entre les deux courbes de déplacements horizontaux est inférieur à 0,24 mm pour les deux parois et pour chaque mesure) ;
- ♦ entre la mesure 2 et la mesure 3, la courbure de la déformée s'accroît visiblement (on l'observe d'une façon plus claire que dans les diagrammes d'inclinaison de la paroi) en indiquant un effet différé dans la flexion de l'écran ;
- ♦ les déformées théoriques obtenues pour les configurations C_{II} et C_{III} sont en bonne concordance avec les déformées expérimentales et notamment avec celles obtenues dans la mesure 3 ; ainsi, les déplacements théoriques en tête de l'écran à une profondeur de 0,5 m (6,8 mm pour la configuration C_{II} et 7,3 mm pour la configuration C_{III}) diffèrent de moins d'un écart type de leurs estimations expérimentales les plus probables (ils se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de confiance expérimental correspondant à une probabilité de 68%) pour l'ensemble des mesures analysées (Tableau 4-22) ; la déformée obtenue pour la configuration C_I se trouve quant à elle en discordance sur toute la profondeur de l'écran ;
- ♦ les déplacements de convergence des parois mesurés à l'aide du dispositif à fil invar sont, à l'exception des résultats obtenus pour la mesure 2 (Tableau 4-22), plus faibles que ceux estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques (pour la mesure 2_{bis}, ils sont plus faibles d'environ 10%, tandis que, pour la mesure 3, ils sont plus faibles de 20 % par rapport aux estimations les plus probables des déplacements de convergence) ; on note également que, les quatre tubes inclinométriques, la correction de l'erreur systématique qui affecte les mesures a eu comme résultat de diminuer les déplacements horizontaux (si l'on renonce à cette correction, l'écart entre les résultats déduits des mesures inclinométriques et les résultats obtenus avec le dispositif à fil invar serait donc plus important) ;

c) déplacements du massif de sol soutenu par la paroi sud

- ♦ les déplacements horizontaux transversaux observés dans le massif soutenu à une distance de 13,7 m et respectivement 8 m derrière la paroi sont presque nuls pour les deux tubes inclinométriques sur toute la profondeur auscultée.

4.7.5.2 Pressions totales agissant à l'interface de la paroi

Huit séries de mesures de pressions totales à l'interface du sol et du panneau instrumenté S81 (Annexe 4-2/3) ont été réalisées dans l'intervalle compris entre la fin de l'excavation (le 18 mai) et la mise en œuvre du radier dans la zone instrumentée de l'ouvrage (le 12 juin).

Un suivi en continu, parallèle à celui des jauges sur les boutons, a par ailleurs été effectué pour les capteurs Kyowa (K_5 et K_2). Ces derniers ont été connectés à la centrale d'acquisition automatique après la mise en place des boutons instrumentés. On a ainsi pu observer que la variation (thermique) journalière de l'effort de butonnage n'a pas été accompagnée par des variations sensibles des pressions totales à l'interface de la paroi avec le massif soutenu (ceci alors que K_5 est implanté à seulement 13 cm au-dessus de l'axe du bouton B_{81}).

L'analyse effectuée porte seulement sur les séries de mesures effectuées en même temps que les mesures inclinométriques ou à fil invar (2, 2_{bis}, et 3). Les résultats expérimentaux, accompagnés des estimations théoriques des pressions totales appliquées à l'écran sont présentés dans le tableau 4-23. Pour mettre en évidence l'influence des travaux exécutés (excavation au fond de fouille) sur les données obtenues, le tableau 4-23 présente également, comme référence, les résultats expérimentaux et théoriques (configuration C_{III}) obtenus après le pré-terrassement (séquence 4 / mesure 1).

L'analyse de ces données montre que :

- ♦ au niveau du capteur K_5 , l'excavation conduit à une diminution des contraintes appliquées à la paroi ; cette diminution constatée expérimentalement est également

mise en évidence par le calcul ;

- ♦ au niveau du capteur K_2 , les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques sont faiblement affectées par la poursuite de l'excavation ; cependant, même si l'on observe une meilleure cohérence entre données expérimentales et théoriques pour cette phase que pour la séquence 4 précédemment analysée, les résultats expérimentaux restent jusqu'à 36% plus élevés que les résultats théoriques ;
- ♦ à une profondeur de 7,61 m par rapport au niveau du terrain naturel (ou de 1,51 m par rapport au fond de fouille), l'exécution du terrassement détermine une baisse de la pression mesurée de l'ordre de 23% (16 kPa) côté fouille et respectivement de l'ordre de 13 % (11 kPa) côté terrain, par rapport à la séquence 4 (pré-terrassement); pour les mesures différées (2bis et 3), on constate une tendance au retour des valeurs enregistrées côté terrain à un niveau proche de leurs valeurs précédentes, tandis qu'il n'y a pas de modification sensibles côté fouille ;
- ♦ ces résultats sont en discordance avec les résultats théoriques obtenus pour toutes les configurations de calcul, notamment côté fouille, où ils sont sensiblement plus faibles (plus d'un tiers) ; de plus, le signe de la pression totale horizontale résultante calculées pour les configurations C_{II} et C_{III} est inverse du signe observé ;
- ♦ au niveau de la rangée de capteurs la plus profonde (SI_0 et SI_1), les pressions sont peu affectées par les travaux exécutés ; on remarque une bonne concordance des résultats obtenus à l'interface vers le massif de sol soutenu (légère baisse de 2 à 3 %) tandis que, côté fouille, les résultats théoriques montrent une croissance des pressions plus significative (5 à 6%) ; pour le capteur SI_0 , le résultat indiqué comporte une correction de la dérivé (constatée lors des mesures précédentes) de 53 kPa (correction déduite par analyse de corrélation expérimentale ; voir 4.7.6.3);

Tableau 4-23 : Pressions totales exercées à l'interface de l'écran après l'excavation complète (valeurs théoriques et expérimentales)

Niveau caractéristique (S81)	Prof. (TN=0)	k_h		Contraintes théoriques (p_{th})				Contraintes expérimentales (p_{exp})			
		E_M -projet	E_M -PR ₂	Réf: Séq4	Séquence 5 (après excav.)			Réf: Séq4	Séquence 5 (après excav.)		
(stratigraphie relevée dans le sondage pressiométrique PR ₂)	(m)	C_I	C_{II} et C_{III}	C_{III}	C_I	C_{II}	C_{III}	Mes.1	Mes. 2	Mes. 2b	Mes. 3
		$H_L=6m$	$H_L=6 m$	$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}			$p_0^{CT,CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}		
		(kPa/m)	(kPa/m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Terrain naturel (TN)	0,00										
Assise chaussée / rembla	0,60		2920								
Nappe (3,75 NGF)	2,04										
K₅ (côté terrain)	2,41	2500	1750	12,0	10,7	9,4	1,0	6,6	1,7	4,3	5,7
Remblai/argile tourbeuse	2,50										
K₂ (côté terrain)	5,17		540	60,3	56,0	57,3	58,1	78,2	73,5	72,5	79,1
Excavation	6,10	1500									
Argile tourbeuse/limon	7,50		760								
SI₃ (côté terrain, CT)	7,61			76,5	91,2	67,9	68,5	81,1	70,2	73,4	78,3
SI₂ (côté fouille, CF)	7,61			88,1	83,3	96,7	95,9	70,4	54,0	56,8	55,9
SI₁ (côté terrain)	9,71	4200	2140	97,5	94,0	95,0	95,8	86,8	82,5	83,2	87,0
SI₀ (côté fouille)	9,71			106,4	114,7	113,5	112,8	80,9	69,4	73,1	78,2
Limon argileux/graves	13,60										
Graves/marnes	15,80	17000	17600								
Bas paroi théorique	16,29	32000	53100								

- les résultats du capteur SI₀ comportent un ajout correctif de 53 kPa compte tenu des résultats de l'étude de corrélation des mesures des pressions totales avec les mesures inclinométriques (voir 4.7.6.2).

4.7.5.3 Efforts transmis par les boutons à la paroi

Le suivi des déformations des boutons (Annexe 4-5) s'est poursuivi après l'excavation complète entre les parois moulées d'une façon ponctuelle (du fait d'interruptions de l'alimentation électrique de la centrale d'acquisition) le 19 mai (mesure 2), le 22 mai (2'), le 26 mai (2''), le 29 mai (2''') et le 5 juin (3') et d'une façon continue le 23 mai (mesure 2bis ; 16 séries de mesures à une fréquence d'acquisition de 5 minutes) et le 8 juin (mesure 3 ; 84 séries d'acquisition des mesures tous les 5 minutes).

L'analyse des données acquises a été réalisée en termes d'efforts développés (effort axial et moment de flexion) dans les sections instrumentées des boutons. Elle vise deux aspects :

- ♦ la variation dans le temps des efforts expérimentaux par rapport à la séquence de mesure initiale, pour une même température de mesure (Tableau 4-24) ;
- ♦ la variation thermique journalière de l'effort axial (Tableau 4-25).

Pour les jauges installées sur le bouton B_{82} , pour lesquelles l'acquisition a démarré le 17 mai, et qui comportent une mesure du 0 après la mise en place des boutons, on a constaté une variation expérimentale de l'effort axial sensiblement supérieure à celle obtenue pour les boutons B_{80} et B_{81} . Par conséquent, ces résultats expérimentaux n'ont pas été retenus pour l'analyse.

a) Variation des efforts expérimentaux dans les boutons instrumentés par rapport à la phase de pré-terrassement

Compte tenu de l'intervalle de temps important disponible avant la reprise des travaux dans la zone instrumentée de l'ouvrage (mise en œuvre du radier réalisée environ 3 semaines après l'excavation complète), il a été possible d'observer le comportement de l'ouvrage en phase d'excavation complète tant à « court terme » (mesures 2, 2bis,...) qu'à « long terme » (mesures 3, 3').

Un premier constat concerne le fonctionnement de la jauge j_8^{81} , qui n'était plus en service le 19 mai, après l'excavation complète.

Tableau 4-24 : Efforts expérimentaux dans les butons instrumentés (séquence 5)

Mesure	date	heure	temp. (°C)	B ₈₀			B ₈₁					B ₈₀		B ₈₁			
				extrémité sud		N _{B80}	extrémité sud		extrémité nord		N _{B81}	extrémité sud		extrémité sud		extr. nord	
				N ₁₋₃	N ₂₋₄	(moyen)	N ₁₋₃	N ₂₋₄	N ₁₋₇	N ₆₋₈	(moyen)	M ₁₋₃	M ₂₋₄	M ₁₋₃	M ₂₋₄	M _{h(6-7)}	
				(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
Séq. 4 (réf.) 1	16-mai	21:55	19,1	-287	-259	-273	-1002	-802	-769	-745	-772	3	10	12	24	-3	
	17-mai	00:25	16,6	-168	-132	-150	-867	-679	-646	-622	-649	3	11	12	23	-2	
	17-mai	09:55	14,5	-67	-35	-51	-731	-602	-568	-545	-571	3	11	11	16	-1	
	17-mai	11:33	17,4	-127	-139	-133	-1122	-679	-634	-607	-640	3	11	10	47	1	
	17-mai	12:18	19,7	-221	-211	-216	-1273	-765	-735	-692	-731	5	12	10	51	2	
2	19-mai	09:32	12,3	-125	-88	-107	-649	-590	-445	-517	-517	6	4	11	16	16	
2'	22-mai	14:34	21,5	-587	-552	-570	-1570	-1049	-885	-1007	-980	10	25	11	62	24	
2bis	23-mai	10:11	16,1	-341	-277	-309	-903	-816	-666	-753	-745	8	22	11	18	19	
	23-mai	10:36	16,6	-345	-288	-317	-937	-829	-677	-766	-758	10	22	10	21	18	
	23-mai	10:56	17,1	-373	-351	-362	-986	-848	-711	-798	-786	9	22	11	21	20	
	23-mai	11:06	17,4	-384	-362	-373	-994	-852	-708	-797	-786	8	22	10	22	20	
2''	26-mai	14:44	19,9	-522	-477	-500	-1453	-1016	-844	-952	-937	8	22	11	54	22	
2'''	29-mai	13:45	17,9	-415	-392	-404	-1113	-854	-705	-812	-791	10	24	10	34	23	
variation efforts ct. terme	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-2\text{bis}}$			16,6	177	156	167	70	150	32	144	109	-6	-11	2	2	-21
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-2\text{bis}}$			17,4	257	224	240	-128	173	74	190	146	-5	-11	0	24	-19
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-2\text{bis}}$			19,8	301	267	284	180	251	109	260	207	-4	-10	0	-3	-21
variation moyenne court terme				212								-9					
3'	5-juin	11:55	14,8	-277	-235	-256	-597	-752	-576	-677	-668	8	22	2	-15	22	
3	8-juin	09:36	16,6	-490	-585	-537	-989	-1019	-945	-1038	-1000	8	25	9	-3	23	
	8-juin	09:41	17,1	-524	-603	-564	-1223	-1036	-972	-1064	-1024	7	23	10	17	24	
	8-juin	09:51	18,3	-558	-624	-591	-1290	-1029	-967	-1068	-1022	11	24	10	24	25	
	8-juin	10:06	19,9	-591	-682	-637	-1415	-1055	-989	-1073	-1039	13	25	9	34	23	
	8-juin	10:26	21,5	-616	-710	-663	-1496	-1026	-974	-1060	-1020	14	26	9	44	21	
	8-juin	10:31	22,0	-585	-696	-640	-1493	-998	-938	-1019	-985	13	24	9	47	21	
	8-juin	10:51	23,3	-598	-723	-660	-1542	-988	-953	-1054	-999	14	25	9	53	21	
	8-juin	12:36	25,7	-742	-812	-777	-1729	-1107	-1076	-1155	-1112	15	27	9	61	14	
8-juin	13:01	27,3	-798	-846	-822	-1759	-1159	-1115	-1214	-1163	13	28	10	62	15		
variation efforts lg. terme	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-3}$			16,6	322	452	387	123	339	299	416	351	-5	-13	3	25	-25
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-3}$			17,1-17,4	397	465	431	101	357	338	457	384	-4	-12	0	30	-23
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{1-3}$			19,9	370	472	421	141	290	255	381	309	-8	-13	1	18	-21
variation moyenne long terme				393								-10					

Mesure	date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁				O B S	
				extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord			
				$\Delta N_{1-3}/\Delta T$	$\Delta N_{2-4}/\Delta T$	$\Delta N_{1-3}/\Delta T$	$\Delta N_{2-4}/\Delta T$	$\Delta N_{1-7}/\Delta T$	$\Delta N_{6-8}/\Delta T$		
				(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)	(kN/°C)		
2	19-mai	09:32	12,3	-51	-54	-70	-53	-55	-58	16 s é r i e s	
2'	22-mai	14:34	21,5	-50	-50	-99	-50	-48	-53		
2bis	23-mai	10:11	16,1	-56	-49	-66	-59	-58	-61		
	23-mai	10:26	16,2	-53	-50	-66	-56	-53	-58		
	23-mai	10:36	16,6	-51	-47	-67	-56	-54	-58		
	23-mai	10:56	17,1	-51	-54	-70	-53	-55	-58		
23-mai	11:06	17,4	-51	-54	-68	-52	-52	-55			
2''	26-mai	14:44	19,9	-52	-51	-105	-56	-52	-57		
2'''	29-mai	13:45	17,9	-52	-54	-83	-47	-47	-53		
3'	5-juin	11:55	14,8	-61	-71	-134	-41	-59	-57		
3	8-juin	09:36	16,6	-25	-25	-102	-2	-6	-5	41 s é r i e s	
	8-juin	09:41	17,1	-21	-24	-62	2	0	1		
	8-juin	09:46	17,7	-20	-23	-66	-1	-6	-8		
	8-juin	09:51	18,3	-18	-27	-64	1	-2	2		
	8-juin	09:56	18,9	-29	-17	-59	8	3	1		
	8-juin	10:01	19,5	-16	-22	-58	12	9	16		
	8-juin	10:06	19,9	-30	-29	-126	-11	-13	-10		
	8-juin	10:11	20,2	-28	-32	-124	-12	-16	-17		
	8-juin	10:16	20,7	-28	-23	-113	-5	-6	-7		
	8-juin	10:21	21,2	-23	-25	-104	-2	-5	-8		
	8-juin	10:26	21,5	-25	-25	-102	-2	-6	-5		
	8-juin	10:31	22,0	63	29	7	59	74	84		*
	8-juin	10:36	22,3	-32	-23	-56	-14	-23	-12		
	8-juin	10:46	22,9	-14	-25	65	4	-10	-23		
	8-juin	10:51	23,3	-10	-22	-39	7	-12	-27		
	8-juin	11:01	23,9	-28	-17	-43	-6	-14	-22		
	8-juin	11:06	24,4	-27	-28	-42	-9	-16	-18		
	8-juin	11:21	24,8	-31	-17	-52	-23	-25	-25		
	8-juin	11:31	25,3	-32	-28	-59	-23	-33	-37		
	8-juin	12:16	25,4	-40	-27	-69	-26	-25	-21		
	8-juin	12:21	25,7	-41	-24	-63	-22	-25	-25		
	8-juin	12:26	26,0	-37	-27	-60	-26	-27	-23		
	8-juin	12:36	25,7	-42	-31	-64	-29	-37	-36		
	8-juin	12:41	26,6	-37	-26	-55	-27	-31	-29		
8-juin	12:46	26,9	-44	-31	-53	-29	-31	-31			
8-juin	12:51	26,1	-49	-40	-64	-37	-42	-45			
8-juin	13:01	27,3	-40	-28	-50	-30	-33	-36			
2, 2'	$\Delta N/\Delta T_{med}$ (kN/°C)		-53,4	-51,3	-50,9	-73,2	-54,4	-52,9	-57,3		
2bis	Ecart type (σ)		3,9	1,9	3,1	12,0	3,5	3,4	3,5		
	Coef. variation (Cv)		0,07	0,04	0,06	0,16	0,06	0,06	0,06		
3	$\Delta N/\Delta T_{med}$ (kN/°C)		-22,2	-31,6	-23,9	-60,3	-15,7	-18,6	-21,5		
	Ecart type (σ)		13,2	9,5	8,0	30,9	15,1	12,3	14,5		
	Coef. variation (Cv)		0,60	0,30	0,33	0,51	0,97	0,66	0,67		

* perturbation accidentelle de l'effort de butonnage (probablement causée par l'activité sur le chantier) ;

Tableau 4-25 : Variation thermique de l'effort axial dans les butons instrumentés

En considérant comme référence les résultats obtenus en phase de pré-terrassement, le tableau 4-19 donne une image représentative des efforts de butonnage développés après l'excavation. Les résultats obtenus pour des températures enregistrées en phase de pré-terrassement (séquence 4) et qui se sont répétées en phase d'excavation complète (séquence 5) à court et à long terme, ont été privilégiés pour cette représentation. De cette façon, l'effet de la variation de température est éliminé et il devient possible d'isoler l'effet des seuls travaux d'excavation sur les efforts dans les butons.

Ainsi, on met en évidence une augmentation moyenne de l'effort axial de compression à court terme de 212 kN (voir aussi le tableau 4-12 pour les résultats d'analyse statistique) tandis qu'à long terme la variation moyenne est de 393 kN par rapport à la phase de pré-terrassement (c'est-à-dire 1,85 fois plus qu'à court terme).

Ces résultats sont à comparer aux variations thermiques de l'effort de butonnage calculées pour chaque configuration de calcul en fonction du saut dans le diagramme de l'effort tranchant de l'écran au niveau de l'axe des butons et la distance entre les butons ($e_B = 3,10$ m) :

$$C_I: N_B = \Delta T(z_b=2,54\text{m}) \cdot e_B = 121,4 \cdot 3,1 = 376 \text{ kN} ;$$

$$C_{II}: N_B = 130,9 \cdot 3,1 = 405,8 \text{ kN} ;$$

$$C_{III}: N_B = 121,7 \cdot 3,1 = 377 \text{ kN}.$$

La variation de l'effort axial théorique par rapport à la phase de pré-terrassement (séquence 4) est alors de :

$$C_I: \Delta N_B = 376 - 0 = 376 \text{ kN} ;$$

$$C_{II}: \Delta N_B = 406 - 0 = 406 \text{ kN} ;$$

$$C_{III}: \Delta N_B = 377 - 62 = 315 \text{ kN}.$$

On remarque que les résultats obtenus pour les configurations C_I et C_{II} encadrent à moins de 4% près la variation expérimentale de l'effort axial estimée à long terme (396

kN), tandis que la valeur obtenue pour la configuration C_{III} se trouve, approximativement, à mi-chemin entre les valeurs expérimentales à court et à long terme.

Pour ce qui concerne les moments de flexion développés dans les sections instrumentées des butons, on observe (Tableau 4-24), d'une façon générale une augmentation après l'excavation entre les parois. Cependant, cette augmentation n'est pas affectée par la variation de température. Elle intervient à des moments précis :

- ♦ pour le B_{80} l'augmentation du moment de flexion à l'extrémité sud intervient entre les mesures 2 et 2' ;
- ♦ pour le bouton B_{81} elle intervient seulement à l'extrémité nord avant la mesure 2 (probablement avant la fin de l'excavation dans la zone instrumentée de l'ouvrage) ; à l'extrémité sud du bouton B_{81} , on n'enregistre pas de variation significative du moment de flexion (le moment M_{2-4} , calculé à partir des déformations enregistrées par les jauges j_1^{81} et j_3^{81} , présente une variation thermique importante, qui conduit à mettre en doute, ici encore, le bon fonctionnement de la jauge j_3^{81} ; pour cette raison, les valeurs des efforts déduits des déformations provenant de cette jauge sont indiquées dans le tableau 4-24 et ne sont pas pris en compte lors des interprétations.

En dépit de leur variation relative importante par rapport à la phase de pré-excavation, les moments de flexion restent assez faibles : ils ne dépassent qu'occasionnellement 10 % de la valeur du moment capable de la section des butons ($M_{cap} = 220$ kNm pour un acier mou dans l'hypothèse d'une flexion pure).

b) Variation thermique de l'effort axial dans les butons instrumentés

L'analyse de la variation thermique unitaire de l'effort axial est synthétisée dans le tableau 4-25. Elle a été effectuée en se rapportant à la variation thermique unitaire théorique des butons, calculée dans l'hypothèse où les déplacements axiaux sont nuls à leurs extrémités ($36\text{kN}/^\circ\text{C}$).

L'observations des données obtenues (notamment pour les mesures acquises en

continu) nous a permis de distinguer deux populations à caractéristiques statistiques différentes :

- ♦ pour les mesures à court terme (17 séries de mesures), on met en évidence, comme pour la phase de pré-terrassment, une variation thermique unitaire de l'effort de butonnage homogène à travers les cinq populations individuelles analysées (valeur moyenne de 53,4 kN/°C et écart type de 3,9 kN/°C, ce qui correspond à un coefficient de variation d'environ 7%), qui est de près de 48% supérieure à la valeur théorique dans l'hypothèse des extrémités bloquées ;
- ♦ pour les mesures à long terme (50 séries successives retenues pour cette analyse), on met en évidence une dispersion sensiblement plus élevée des données (écart type de 13,2 kN/°C), qui ont une valeur moyenne (22,2 kN/°C) nettement plus faible que 36 kN/°C (d'environ 62%).

4.7.6 Corrélation des résultats expérimentaux en phase d'excavation

4.7.6.1 Aperçu des moyens d'étude disponibles

La cinématique expérimentale de l'écran pour les phases de préterrassment (4.7.4 ; séquence 4) et d'excavation complète (4.7.5 ; séquence 5) est approchée de façon relativement sûre dans la mesure où :

- ♦ les résultats expérimentaux (mesures inclinométriques et par fil invar) obtenus dans les différents profils sont répétables ;
- ♦ l'écart entre les résultats des mesures de convergence des parois au fil invar et des valeurs déduites de l'interprétation des mesures inclinométriques (de l'ordre de 1 mm par paroi), est imputable, pour l'essentiel, à l'estimation approximative de l'erreur systématique qui entache les mesures inclinométriques¹⁵.

¹⁵ Calcul statistique sur la population des mesures effectuées dans la partie du tube descendue sous la paroi (supposée fixe entre les séquences successives) ; pour une paroi de 16 m de hauteur, une erreur de $0,625 \cdot 10^{-4}$ rad

Cette cinématique est par ailleurs reproduite de façon relativement satisfaisante par le calcul théorique mené par la méthode du coefficient de réaction.

Quant à la synthèse des efforts (horizontaux) expérimentaux et théoriques appliqués sur la paroi, elle indique une cohérence beaucoup moins satisfaisante :

- ♦ l'effort axial de butonnage observé n'est pas répétable (pour les deux séquences de mesure) et il est beaucoup trop élevé par rapport aux estimations ; cependant, la variation de l'effort de butonnage entre les deux séquences de mesure (5/4) paraît cohérente (répétabilité satisfaisante et concordance avec les calculs) ;
- ♦ les pressions totales mesurées à l'interface de l'écran ne concordent pas avec les estimations théoriques établies à l'aide de la méthode du coefficient de réaction, tant en valeur absolue qu'en direction de la pression horizontale résultante¹⁶ ;
- ♦ le capteur SI₀ ne fournit pas de résultats directement exploitables et la correction forfaitaire (1 kPa/jour) proposée dans le chapitre 4.7.2 est représentative pour évaluer la dérive avant le terrassement (elle n'est pas, a priori, extrapolable) ; on peut espérer, cependant, que la dérive constatée avant préexcavation, causée probablement par le fluage de la corde précontrainte, pourrait cesser après avoir atteint une certaine réduction de la précontrainte initiale¹⁷ ;

Evidemment, l'image globale ainsi acquise pousse à considérer que seules les résultats de l'observation de la cinématique de l'écran sont probablement suffisamment fiables. Pourtant, en dehors des résultats fournis par le capteur SI₀ (qui sont affectés par une erreur grossière), il n'y a aucun autre indice permettant d'invalidier les résultats des mesures de pression totale.

Avant de procéder à des analyses théoriques plus compliquées, on peut essayer d'évaluer la pertinence des mesures de pressions totales, qui est l'objet principal de

(1,5 fois la résolution de mesure) dans l'estimation de cette erreur systématique explique 1mm d'erreur dans l'estimation du déplacement en haut de la paroi ;

¹⁶ A la profondeur de 7,61 m, le vecteur de la pression horizontale résultante expérimentale est orienté vers la fouille tandis que le vecteur théorique est orienté vers le massif soutenu.

¹⁷ Dans un tel cas, le capteur serait capable d'indiquer la variation de la pression agissant sur sa surface entre deux mesures successives.

cette recherche, par le biais d'une étude de leur corrélation expérimentale avec les autres paramètres mesurés.

La voie à suivre est maintenant plus claire :

- ♦ une étude directe de la corrélation entre les efforts horizontaux qui concourent à l'équilibre de l'écran butonné n'est pas envisageable compte tenu de données expérimentales disponibles ;
- ♦ les diagrammes expérimentaux de l'inclinaison de l'écran, qui se présentent comme potentiellement fiables (notamment dans la paroi qui contient les capteurs de pressions totales), constituent un moyen de calage obligé ;
- ♦ l'étude de la corrélation expérimentale doit se faire, dans un premier temps, en termes de variations des paramètres de mesure dans la phase d'excavation par rapport à la phase de pré-terrassement ; cette méthode d'étude est imposée tant par les résultats absolus particuliers qui ont été obtenus (efforts de butonnage et capteur SI_0) que par l'aptitude générale des moyens de mesure utilisés à fournir de meilleures performances en termes de la variation du paramètre de mesure qu'en termes de valeur absolue ¹⁸;
- ♦ l'équation de la déformée de l'écran (3.3) et les équations qui assurent son équilibre permettent, en principe, d'envisager plusieurs niveaux de calage (pression, effort tranchant, moment de flexion, inclinaison) pour l'analyse de la corrélation efforts – déplacements ; cependant, le niveau de calage qui assure la moindre distorsion des données se trouve dans ce cas au niveau du moment de flexion (qui peut être obtenu, d'une part, à partir des inclinaisons¹⁹ et, d'autre part, à partir des efforts²⁰);

¹⁸Les valeurs absolues peuvent intégrer des erreurs de dérive du zéro survenue pour différentes raisons avant le préterrassement (pour les capteurs de pression totale, leur installation dans le béton peut causer une dérive du zéro ; pour les mesures inclinométriques, les rainures de guidage des tubes peuvent être salies localement dans cet intervalle de temps et, pour les mesures de déformation sur les butons, il n'est pas à exclure que le zéro pris en usine soit différent du zéro pris juste avant leur installation sur les parois).

¹⁹ Le diagramme expérimental de l'inclinaison offre une densité élevée de points de mesure équidistants permettant d'accéder numériquement à ses dérivées ; cependant, cette densité peut s'avérer insuffisante pour approcher d'une façon suffisamment précise les diagrammes des dérivées d'ordres supérieurs.

- ♦ le passage de l'inclinaison au moment de flexion doit se faire, dans un premier temps, par le biais de la raideur en flexion de la section composite de l'écran à court terme (4.20) ; d'éventuels ajustements de cette valeur peuvent s'avérer ensuite nécessaires.

4.7.6.2 Corrélation expérimentale « variation des efforts – variation des déplacements » (séquence 5 / séquence 4)

La procédure adoptée comporte plusieurs étapes et sous-étapes, qui sont décrites dans ce qui suit.

a) Diagramme expérimental de la variation de l'inclinaison de l'écran

Pour chaque niveau de mesure et chaque séquence de mesure (séquence 4 / mesure 1 et séquence 5 / mesure 3²¹), on détermine d'abord l'inclinaison de la paroi sud comme moyenne des inclinaisons observées dans les deux tubes intégrés à la paroi (I_{S81} et I_{S82}).

Les deux diagrammes de l'inclinaison ont ensuite fait l'objet d'un lissage dont les modalités, en fonction du niveau considéré, sont les suivantes :

- ♦ pour les quatre points de mesure situés au-dessus des butons (profondeurs de 0,5 m, 1 m, 1,5 m et 2 m), les valeurs individuelles sont remplacées par leur moyenne ; ce traitement est justifié par le rapport réduit entre les valeurs enregistrées à ces faibles profondeurs et la résolution de mesure²², par la précision de la mesure, moins satisfaisante pour les profondeurs de 0,5 et 1 m et par les efforts appliqués à la paroi au-dessus de la cote de butonnage, supposés très réduits ;
- ♦ à partir d'une profondeur de 2,5 m, on applique un traitement de lissage du diagramme de l'inclinaison par moyenne mobile sur 3 points ;

²⁰ la position altimétrique des points de mesure des efforts est connue d'une façon précise ; donc, il n'y a pas de risque d'ajouter d'erreur dans le calcul du moment de flexion.

²¹ On a préféré la mesure 3 à la mesure 2 du fait que l'écart type de la demi-somme des variations angulaires (qui caractérise la précision de la mesure des inclinaisons) est plus réduit pour cette mesure.

²² Les valeurs de l'inclinaison enregistrées à ces profondeurs ne dépassent pas 5 fois la résolution de mesure de la sonde inclinométrique.

La variation de l'inclinaison de l'écran entre les séquences 4 et 5 est obtenue par soustraction de l'inclinaison de la paroi sud ainsi évaluée pour la séquence 4 (mesure 1) à la valeur de l'inclinaison pour la séquence 5 (mesure 3). Elle est représentée sur la figure 4-37, avec le résultat d'une analyse de régression polynomiale du quatrième ordre effectuée pour les profondeurs supérieures à 2,5 m (marquées par un « x »).

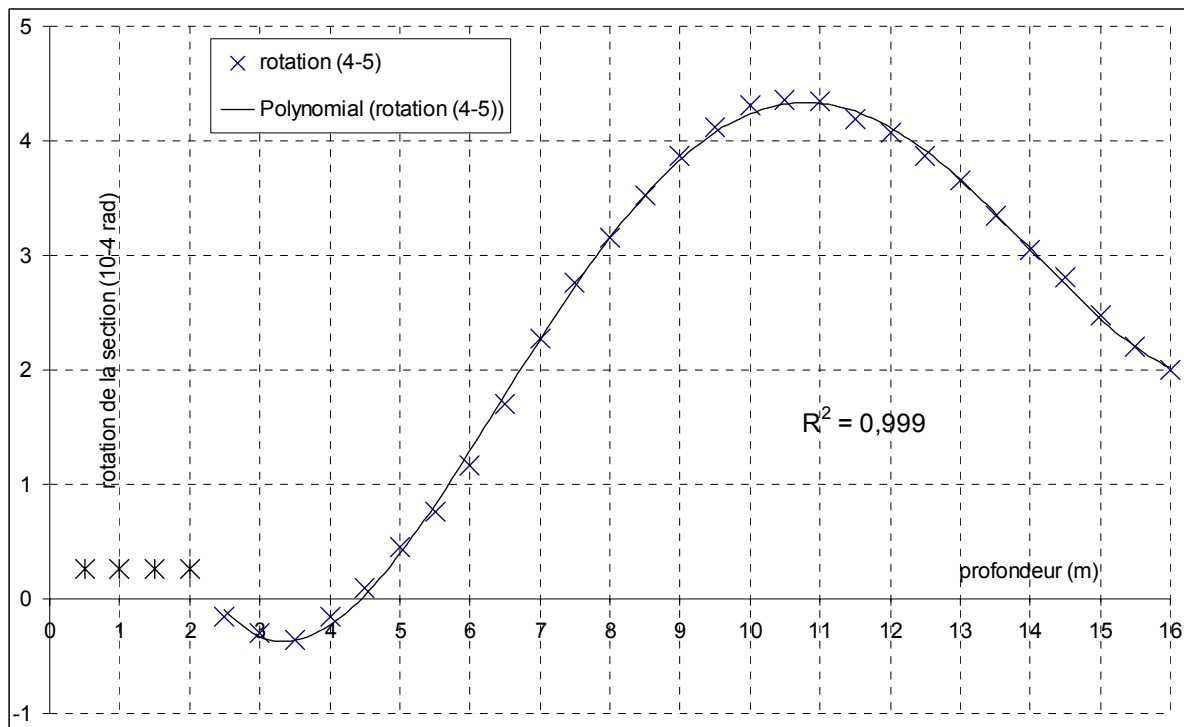


Fig. 4-37 : Variation de l'inclinaison de l'écran sud entre les séquences 4 et 5 et courbe de variation avec la profondeur obtenue par régression polynomiale du quatrième ordre.

Le coefficient de corrélation de cette analyse de régression (égal quasiment à 1) permet d'espérer obtenir l'allure de la distribution des contraintes horizontales résultantes suivant la profondeur de l'écran (ou plutôt son estimation par une distribution linéaire) avec une confiance raisonnable.

b) Estimation de la variation du moment de flexion à partir de la variation de l'inclinaison

Pour chaque niveau de mesure i , la variation du moment de flexion entre les séquences 4 et 5 est calculée à partir de la dérivée de la variation de l'inclinaison de l'écran²³ $[\Delta\varphi_y]'_i$.

On a fait appel à une dérivation approximative en différences finies centrales²⁴ qui permet de déterminer la dérivée en chaque nœud i d'un réseau de discrétisation en fonction des valeurs de la fonction $\Delta\varphi_y(z)$ aux deux nœuds adjacents $i-1$ et $i+1$. On profite dans ce cas du réseau fourni par le pas de mesure des inclinaisons ($\lambda_z=0,5$ m) :

$$\Delta M^{4-5}(\Delta\phi^{4-5}) = -(EI)_{ech} \left. \frac{d(\Delta\varphi_y)}{dz} \right|_{z=z_i} \cong -(EI)_{ech} \frac{\Delta\varphi^{i+1} - \Delta\varphi^{i-1}}{2 \times 0,5} \quad (4.27)$$

Le signe du diagramme de la variation du moment représenté sur la Fig. 4-38 a été choisi de telle façon qu'il figure sur la fibre sollicitée en traction.

On remarque que cette procédure de dérivation a pour effet d'éliminer l'éventuelle erreur systématique affectant les mesures inclinométriques du fait que cette dernière est constante avec la profondeur de l'écran mais est de nature à amplifier l'effet de l'erreur aléatoire, puisque cette dernière, par nature, change de signe aléatoirement.

Le diagramme de variation du moment entre les séquences 4 et 5 ainsi obtenu est présenté sur la figure 4-38.

²³ On a considéré que la raideur en flexion de la section reste constante entre les deux séquences de mesure ;

²⁴ A l'exception des points situés aux extrémités de chacun de deux tronçons de variation de l'inclinaison, où l'on applique, suivant le cas, une dérivation à différences finies progressives ou régressives.

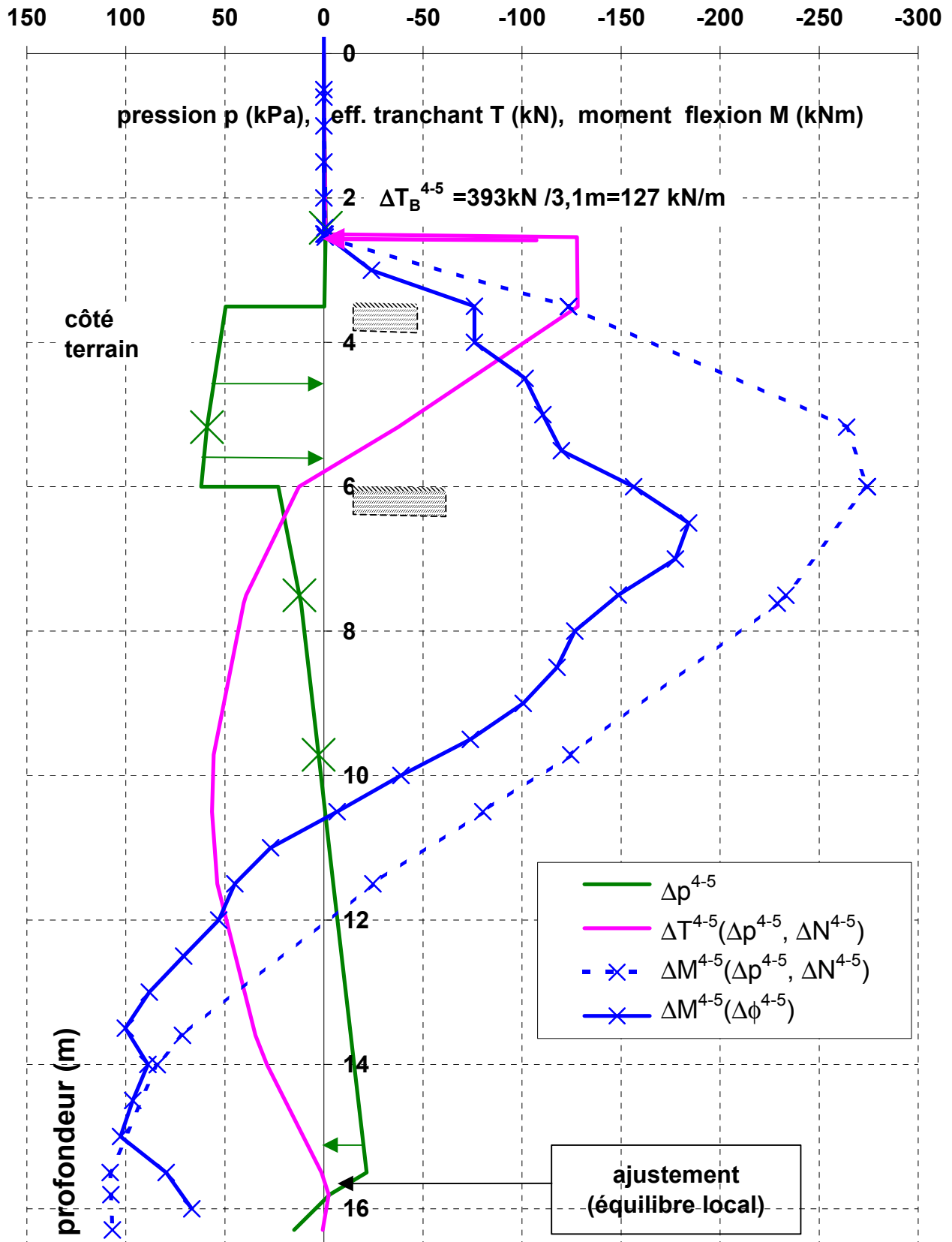


Fig. 4-38 : Relation expérimentale entre la variation des efforts horizontaux et la variation de l'inclinaison de la paroi entre les séquences 4 et 5 par le biais de la

c) Variation du moment de flexion à partir de la variation des efforts horizontaux

Sur la figure 4-38 on a superposé au diagramme de variation du moment dérivé de la mesure inclinométrique les diagrammes de variation de la pression horizontale résultante, de l'effort tranchant et du moment de flexion déduits de l'équilibre (local) de l'écran.

La variation de la force de réaction horizontale transmise par les butons correspond à la variation de l'effort de butonnage à long terme (Tableau 4-19: 393 kN), entre les deux situations de mesure considérées.

Le signal fourni par le capteur SI_0 a été interprété en considérant qu'il n'y a pas eu de dérive significative entre les deux séquences de mesure et que la variation de pression indiquée est correcte.

Le diagramme de variation de la pression totale résultante a été obtenu par interpolation et extrapolation linéaire sur la hauteur de l'écran des mesures ponctuelles fournies par les six capteurs en tenant compte de la profondeur de l'excavation du côté fouille au moment des deux séquences de mesure (3,5 m pour la séquence 4 et 6 m pour la séquence 5). En pied de l'écran, un ajustement de la pente de la pression résultante a été apporté pour assurer, d'une part, l'équilibre local du tronçon de la paroi situé au-dessous du point d'effort tranchant nul et, d'autre part, pour rendre compte de la variation locale du moment qui montre non seulement un effet d'encastrement mais aussi un effet de contre-butée apparu entre les deux séquences de mesure (le moment maximum d'encastrement se trouve à une profondeur inférieure à 15,5 m, ce qui signifie que la pression horizontale résultante est orientée en pied vers la fouille).

d) Analyse des courbes de la figure 4.38

La superposition des efforts expérimentaux [Δp_{4-5} , $\Delta T_{4-5}(\Delta p_{4-5}, \Delta N_{B4-5})$, $\Delta M_{4-5}(\Delta p_{4-5}, \Delta N_{B4-5})$] résultant de l'interprétation des mesures des pressions totales et des

déformations sur les butons, et des efforts expérimentaux $[\Delta M_{4-5}(\Delta \phi_{4-5})]$, résultant de l'interprétation des mesures inclinométriques (Fig. 4-38), permet une vérification de l'ensemble des résultats expérimentaux :

- ♦ les deux courbes de moments présentent une allure semblable, mais sont légèrement décalées ; en particulier, on observe que la raideur en flexion de l'écran a été sous-estimée en dépit de son évaluation à court terme pour les besoins de cette étude ;
- ♦ la courbure du diagramme de variation du moment déduite de la variation de l'inclinaison valide le signe de la pression horizontale totale résultante obtenu expérimentalement et invalide le signe de la pression totale résultante obtenu par calcul pour les profondeurs de 7,61 m et de 9,71 m (4.7.5.2) ;
- ♦ la variation de l'effort tranchant entre les séquences 4 et 5 est nulle pour deux profondeurs ($z \approx 6$ m et $z \approx 15,5$ m) qui correspondent à peu près aux deux maxima du diagramme de variation du moment résultant de l'exploitation des mesures inclinométriques ;
- ♦ la variation expérimentale de l'effort de butonnage a été probablement légèrement sur estimée ; un calcul rapide montre en effet que, pour une distribution des pressions horizontales inchangée :
 - un ajout de 30 kN à la valeur de la variation de l'effort de butonnage, (c'est-à-dire 10 kN/m environ par mètre de paroi), modifie d'une façon radicale l'allure du diagramme de variation du moment en partie basse de l'écran compte tenu du rôle déterminant que joue alors le bras de levier : le diagramme passe entièrement côté fouille et l'effet d'encastrement observé dans les graves n'apparaît plus ;
 - une diminution de la variation de l'effort de butonnage du même ordre peut par contre assurer une meilleure corrélation entre les deux courbes de moment, à la correction à apporter à la raideur en flexion de l'écran près ;

- une diminution de la variation de l'effort de butonnage plus importante serait accompagnée, pour assurer l'équilibre de l'écran, par l'apparition d'une force de réaction en pied orientée vers l'arrière de la paroi, ce que amplifierait le décalage entre les deux courbes expérimentales de variation du moment de flexion.

4.7.6.3 Corrélation expérimentale « efforts horizontaux – déplacements engendrés » (séquence 5)

a) Particularités de l'algorithme appliqué

Les résultats de l'étude de la corrélation entre les variations des paramètres de mesure encouragent à aller plus loin : analyser la corrélation expérimentale entre les valeurs absolues de ces paramètres après l'excavation complète devant l'écran (séquence 5).

Une procédure similaire est utilisée afin d'obtenir les mêmes types de diagrammes d'efforts et de les superposer (Fig. 4-39). Toutefois, on a recours aux ajustements supplémentaires suivants :

- ♦ la pression agissant sur la surface active du capteur SI_0 est prise égale à 78 kPa, afin que la pression totale horizontale résultante soit nulle à la profondeur à laquelle le diagramme du moment de flexion obtenu par l'exploitation des inclinaisons présente un point d'inflexion (profondeur estimée à 10,5 m) ; l'ajustement nécessaire consiste à augmenter de 53 kPa la valeur mesurée par SI_0 ;
- ♦ l'effort de butonnage indiqué sur la figure 4-39 (526 kN) résulte de l'application d'une condition d'effort tranchant nul à la profondeur de 14 m, pour laquelle le moment déterminé par l'exploitation des mesures inclinométriques présente un maximum ;
- ♦ le diagramme de la pression horizontale totale résultante a été ajusté en partie basse (à partir de la profondeur correspondant à une pression horizontale résultante nulle) de façon à assurer la cohérence générale des autres diagrammes dans cette zone de l'écran (courbure du diagramme de moment et effort tranchant nul à la base) ; cet

ajustement correspond qualitativement à un effet de butée dans la couche de limon et un effet de contre-butée dans la couche de graves ;

- ♦ les diagrammes des pressions exercées par les sols des deux côtés de l'écran sont indiqués aussi en trait pointillé ; pour ce qui concerne leur partie située sous les capteurs les plus bas, la solution indiquée est une solution possible (p^{CT} et p^{CF}), satisfaisant la distribution de la pression totale résultante, qui concourt à une mise en butée côté fouille de la couche de limon et à une mise en contre-butée des couches de graves et de marnes.

b) Analyse des résultats (séquence 5)

Une fois l'excavation achevée (terrassement sur une profondeur de 6m), les résultats de l'auscultation de la paroi butonnée sont plus facilement interprétables que lors de la phase de préterrassement, où elle ne fléchissait que très peu.

Les résultats de mesure montrent que la paroi se comporte comme une poutre encastree en fiche et soutenue latéralement par l'appui constitué par les butons.

L'encastrement en fiche est très net sur la courbe des moments dérivée des mesures inclinométriques. Cette dernière courbe fait apparaître vers la cote -14,00 un moment d'encastrement d'intensité égale aux trois-quarts du moment régnant «en travée» de l'écran (entre les butons).

Ce moment d'encastrement conduit à envisager, en-dessous de -14,00, un effort tranchant positif dans la convention de signe adoptée, pour l'annulation duquel intervient une contre-butée en partie basse de l'écran ; notons que cette contre-butée peut être l'effet de la mobilisation de l'appui dans les marnes, sur les 0,50 m inférieurs de la paroi, voire de la mobilisation du frottement à la base de la paroi.

Par ailleurs, on remarque la pression de seulement quelques kilopascals enregistrée par le capteur de pressions totales installé le plus haut, qui indique une flexion de la paroi quasiment nulle au-dessus du niveau de butonnage. Ce résultat est bien en cohérence avec la cohésion élevée du sol obtenue dans la couche de remblai à court terme (55 kPa).

Les résultats de la mesure des pressions appliquées par les sols permettent de retrouver la courbure locale du diagramme de moment déduit des mesures inclinométriques.

Séquence 5 : excavation au fond de fouille

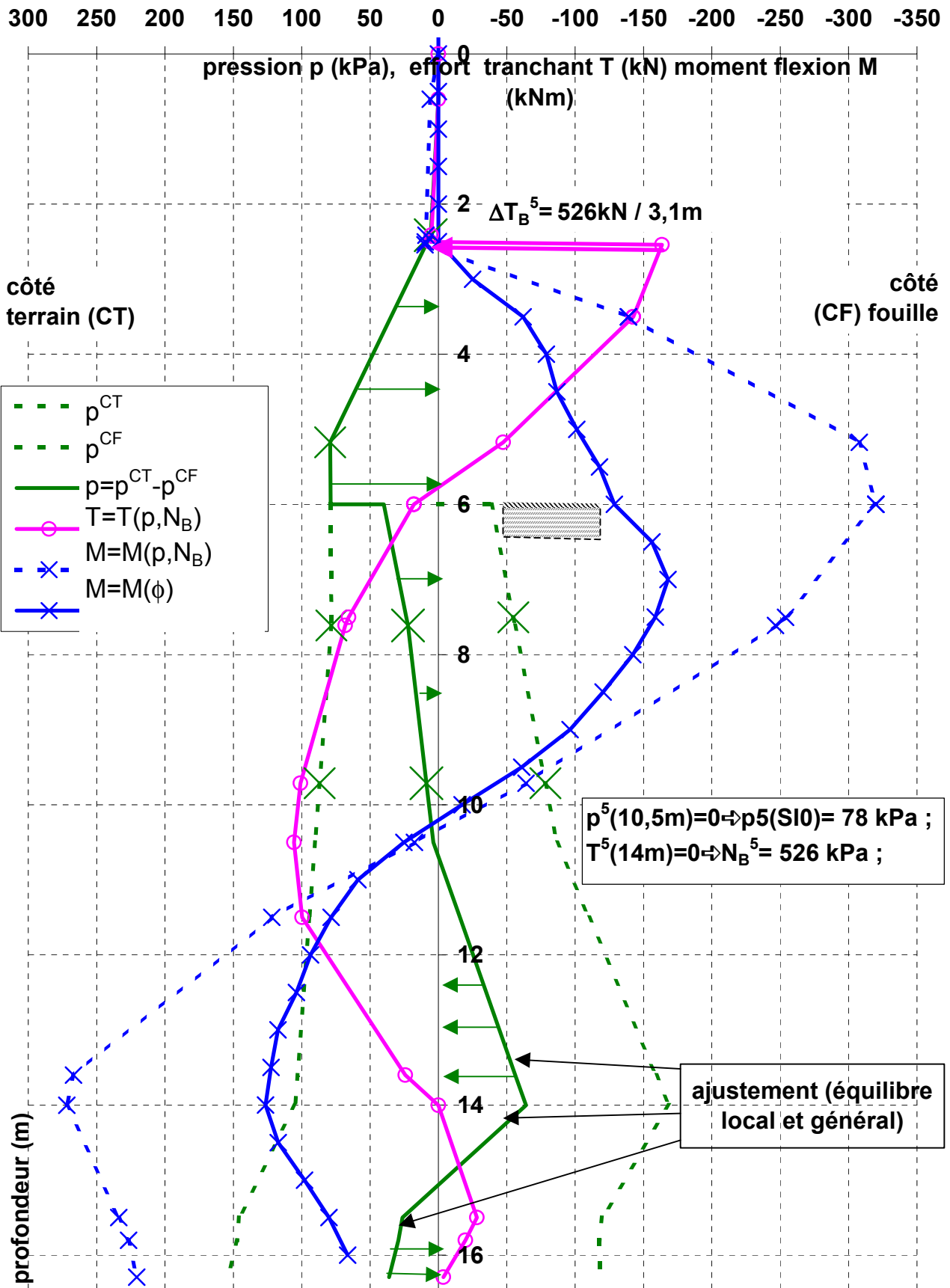


Fig. 4-39 : Relations expérimentales entre les efforts horizontaux et l'inclinaison de la paroi par le biais du moment de flexion induit (séquence 5)

4.7.7 Comportement subjectif de l'écran en phase d'excavation

Si l'on superpose les diagrammes expérimentaux du moment de flexion et de l'effort tranchant déduits ci-avant et représentés sur la figure 4-39 aux diagrammes du moment de flexion et de l'effort tranchant obtenus par calcul pour la configuration C_{III}^{25} , on obtient une image (Fig. 4-40) plus riche en renseignements sur le comportement mécanique de l'écran que celles qui comportent la cinématique observée et la cinématique théorique après la fin de l'excavation (figures 4-20 et 4-21).

En effet, la bonne prévision de la cinématique globale de l'ouvrage obtenue par l'application de la méthode des coefficients de réaction (configurations de calcul C_{II} et C_{III}) cache des écarts importants par rapport aux résultats expérimentaux, qui se trouvent au niveau des dérivées de différents ordres de la déformée de l'écran.

On remarque d'abord que la modélisation de l'encastrement de l'écran par une rotule élastique, en dépit d'une estimation correcte du moment en pied²⁶ (grâce au calage sur les résultats expérimentaux), ne « voit » pas l'effet d'encastrement dans la couche de graves (sur une hauteur importante).

²⁵ pour les configurations C_I et C_{II} les diagrammes théoriques présentent une allure similaire à celle obtenue pour la configuration C_{III} .

²⁶ Le moment de flexion obtenu pour les calculs C_I et C_{II} et dans le projet ne change pas de signe sur la profondeur de l'écran (la fibre sollicitée en traction se trouve côté fouille sur toute la profondeur de l'écran) ; il est égal à zéro en pied de l'écran.

Séquence 5 : excavation au fond de fouille

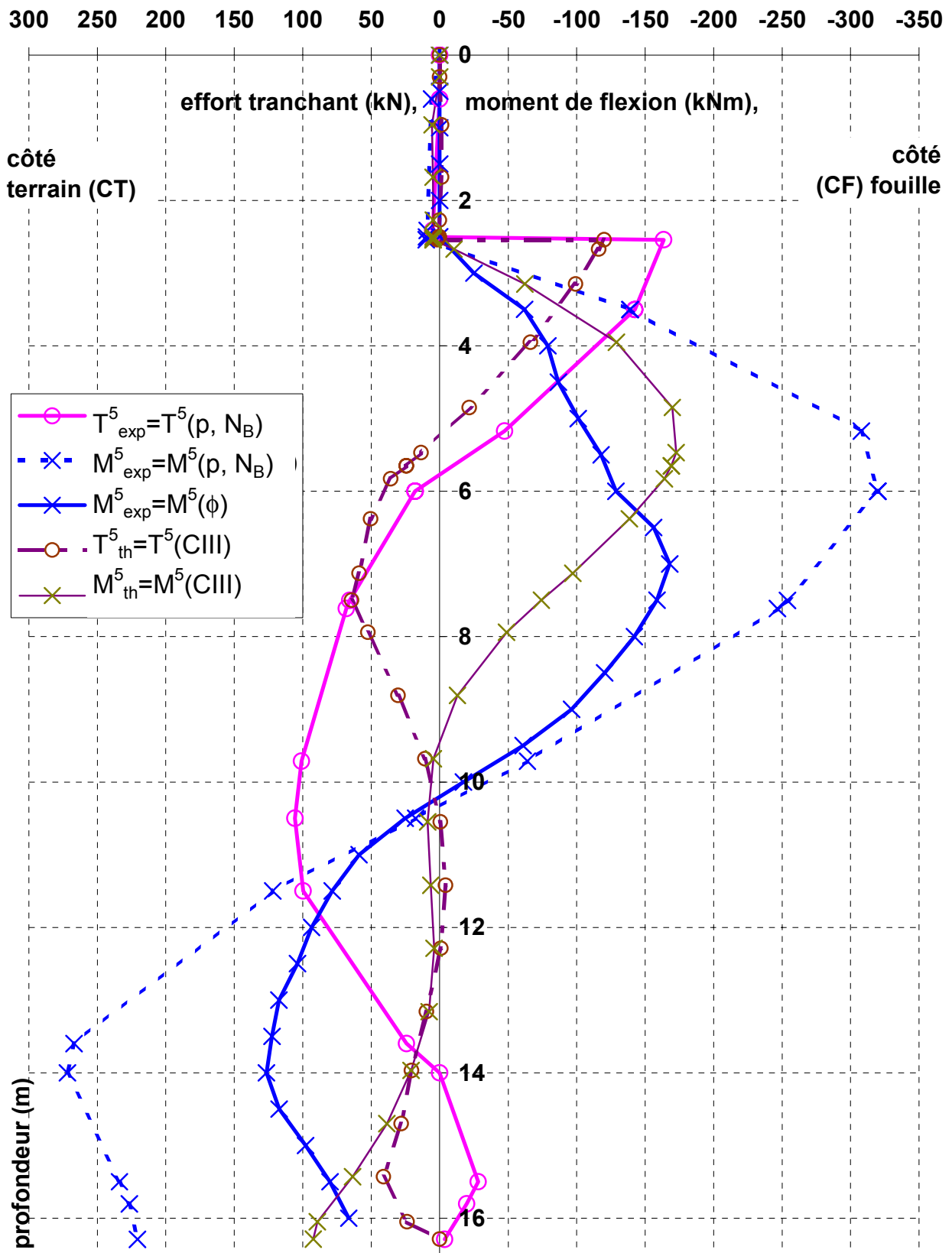


Fig.4-40 : Estimations expérimentale et théorique (C_{III}) du moment de flexion et de

l'effort tranchant dans le profil instrumenté (séquence 5)

Ensuite on observe des contradictions entre les courbures des diagrammes théoriques²⁷ et expérimentaux des moments de flexion au-dessous d'une profondeur d'environ 7,5 m:

- ♦ pour une profondeur comprise entre 7,5 m et 10,5 m, la courbure théorique correspond à une pression totale résultante dirigée vers l'arrière de l'écran, à l'opposé de la courbure expérimentale du moment et aussi aux résultats des mesures des contraintes totales ; les résultats théoriques indiquent une mise en butée (limite) de la partie inférieure de la couche d'argile et de la moitié supérieure de la couche de limon ;
- ♦ pour une profondeur comprise entre 10,5 et environ 15 m, la courbure théorique correspond à une pression horizontale résultante dirigée vers la fouille ; elle indique une mise en contre-butée de la moitié inférieure de la couche de limon et aussi de la couche de graves.

Enfin, on remarque la discordance importante entre les réactions horizontales expérimentale et théorique opposées par les butons (l'effort de butonnage trouvé pour la configuration C_{III}, 377 kN, est inférieur d'environ 150 kN à celui déduit par l'étude expérimentale et d'encore plus par rapport à celui mesuré sur les butons, (Tableau 4-19) et notamment la discordance des diagrammes de l'effort tranchant au-dessous d'une profondeur d'environ 7,5 m.

On a cherché une explication pour justifier cet écart important au niveau des hypothèses adoptées pour la simulation du comportement de l'ouvrage. On a identifié trois causes potentielles pouvant expliquer la discordance constatée :

- ♦ la technologie de mise en place des butons n'a pas été décrite d'une façon satisfaisante dans le calcul²⁸ ; l'effort de butonnage réel (l'effort initial et aussi

²⁷ Les mêmes constats sont valables aussi pour les résultats de calcul obtenus dans le projet et pour les configurations C_I et C_{II}.

²⁸ en dépit de l'effort fait pour mieux la décrire pour la configuration C_{III} ;

celui après l'excavation complète) est probablement sensiblement plus élevé que celui qu'a donné le calcul et ne permet pas la mise en butée de la couche d'argile située devant la paroi ; par contre, après le préterrassment, il détermine une croissance d'environ 70 % de la pression mesurée par le capteur K₂, situé derrière la paroi d'environ 70 % (voir Tableau 4-13) ;

- ♦ la cohésion non drainée de la couche de limon adoptée dans le calcul pour définir la butée limite à court terme (40 kPa, tandis que celle de la couche d'argile vaut 21 kPa) a été probablement surestimée. Or elle a une grande influence sur la pression limite de butée : à la profondeur de 7,61 m, qui correspond au niveau du capteur SI₂, situé juste au-dessous de l'interface théorique entre les deux couches, la pression mesurée par SI₀ est voisine de 56 kPa après l'excavation complète, la pression limite en butée est d'environ 111 kPa si l'on considère la cohésion du limon et de seulement 73 kPa si l'on considère la cohésion de l'argile ;
- ♦ il est impossible de prévoir le comportement réel de l'écran d'une façon satisfaisante par une description simple de la stratigraphie et des caractéristiques du sol qui gouvernent l'interaction avec l'ouvrage (par exemple par la description suivante : « à 7,50 m de profondeur on passe d'une cohésion de 21 kPa à une cohésion de 40 kPa et à une profondeur de 13,6 m on passe d'un coefficient de réaction de 2140 kN/m³ à un coefficient de réaction de 17600 kN/m³).

Cette comparaison entre les mesures et les prévisions théoriques du comportement mécanique des parois moulées a mis en évidence le besoin d'une meilleure caractérisation géotechnique du terrain.

Par conséquent, après la fin des travaux sur le chantier de la « Trémie Pasteur » mais avant la mise en service de l'ouvrage, le LCPC a procédé à une investigation complémentaire du sol dans les environs du profil instrumenté.

Des échantillons non remaniés ont été prélevés à différentes profondeurs dans les couches d'argile et de limon, dans un forage carotté situé derrière le panneau S81. Ils ont été soumis à un programme d'essais oedométriques et triaxiaux de type CU+u afin

d'affiner les caractéristiques géotechniques du sol dans la zone instrumentée.

Les résultats de ces essais n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction de ce mémoire. Ils vont faire l'objet d'une analyse ultérieure par rapport aux données prises en compte dans cette étude.

4.7.8 Mise en œuvre du radier (séquence 6)

Le bétonnage du radier (épaisseur de 0,70m) a été réalisé dans la zone instrumentée de la Trémie Pasteur le 12 juin, après la pose préalable de la cage d'armature (les 8 et 9 juin). L'auscultation de l'ouvrage dans cette phase de construction a été réalisée, pour l'essentiel, le 15 juin, en utilisant les appareillages de mesure disponibles, à l'exception des tubes inclinométriques installés derrière la paroi sud.

Les résultats expérimentaux ainsi que les estimations théoriques obtenues pour les trois configurations de calcul (C_I , C_{II} et C_{III}) sont présentés ci-dessous. Les estimations théoriques ont été établies en considérant une hauteur libre de l'écran réduite à 5,3 m par rapport au niveau de terrain naturel du fait de la présence du radier (valeur théorique à l'endroit du panneau S81).

4.7.8.1 Déformée de la paroi

L'observation de la déformée des parois au moyen des tubes inclinométriques a été réalisée le 15 juin en même temps que les mesures de convergence des parois à l'aide du dispositif à fil invar. L'interprétation des résultats expérimentaux a été réalisée de la même façon que pour la séquence de mesure précédente (séquence 5) et a permis d'accéder aux diagrammes de l'inclinaison et des déplacements horizontaux en fonction de la profondeur des parois.

Ces diagrammes expérimentaux, ainsi que les diagrammes théoriques obtenus pour les trois configurations de calcul, sont présentés sur la figure 4-41 (inclinaison) et la figure 4-42 (déplacements horizontaux).

Le tableau 4-26 rassemble les déplacements horizontaux en tête de l'écran (à une

profondeur de 0,5 m) et au niveau des butons (à une profondeur de 2,54 m) estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques et des mesures de convergence des parois effectuées avec le dispositif à fil invar ainsi que l'écart type de l'erreur, σ^y qui entache leur estimation.

Mesure	Prof. z (m)	Panneau	Mesures inclinométriques				Fil invar			
			paroi sud		paroi nord		convergence			
			$y^S(z)$	$\sigma^y(z)$	$y^N(z)$	$\sigma^y(z)$	y^S+y^N	y^S+y^N	$\sigma^y(z)$	
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
4 15-juin	-0,70	81-83							13,33	1,37
	0,50	81	7,15	0,75	7,37	0,91	14,52			
		82	7,17	0,85	6,95	1,16	14,11			
	2,54	81	6,54	0,66	6,80	0,81	13,34	11,99		0,95
		82	6,64	0,75	6,49	1,04	13,13			

Tableau 4-26 : Estimation expérimentale (séquence 6) des déplacements de convergence des parois situées en vis-à-vis (en tête de l'écran et au niveau des butons)

La séquence 3, avant préterrassément, étant prise comme référence, la cinématique de la paroi est caractérisée de la façon suivante :

a) inclinaison de l'écran

- ◆ les deux diagrammes d'inclinaison de l'écran obtenus pour chaque paroi instrumentée sont en concordance (l'écart moyen absolu entre les deux courbes est de $0,51 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi sud et de $1,07 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi nord) ;
- ◆ les courbes expérimentales de l'inclinaison de la déformée de l'écran, notamment celles obtenues pour la paroi sud, sont en relative concordance avec les courbes théoriques obtenues pour les configurations C_{II} et C_{III} ; on remarque cependant que l'inclinaison théorique présente un point d'inflexion à une profondeur d'environ 9,5 m, contrairement aux courbes expérimentales ;
- ◆ les courbes expérimentales de l'inclinaison de la déformée de l'écran sont en discordance avec la courbe théorique obtenue pour la configuration C_I.

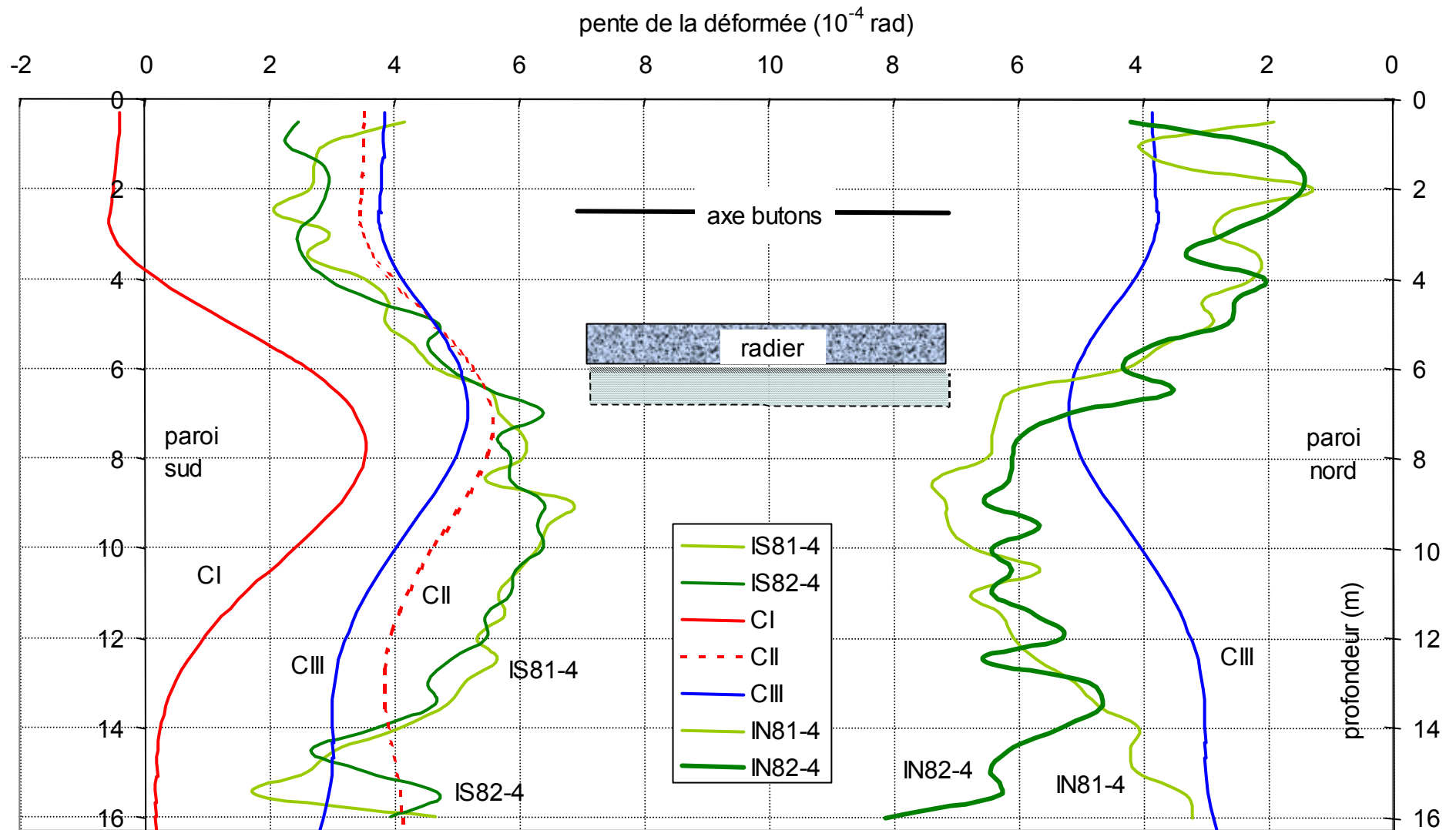


Fig. 4-41 : Pente de la déformée des parois après le bétonnage du radier. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III})

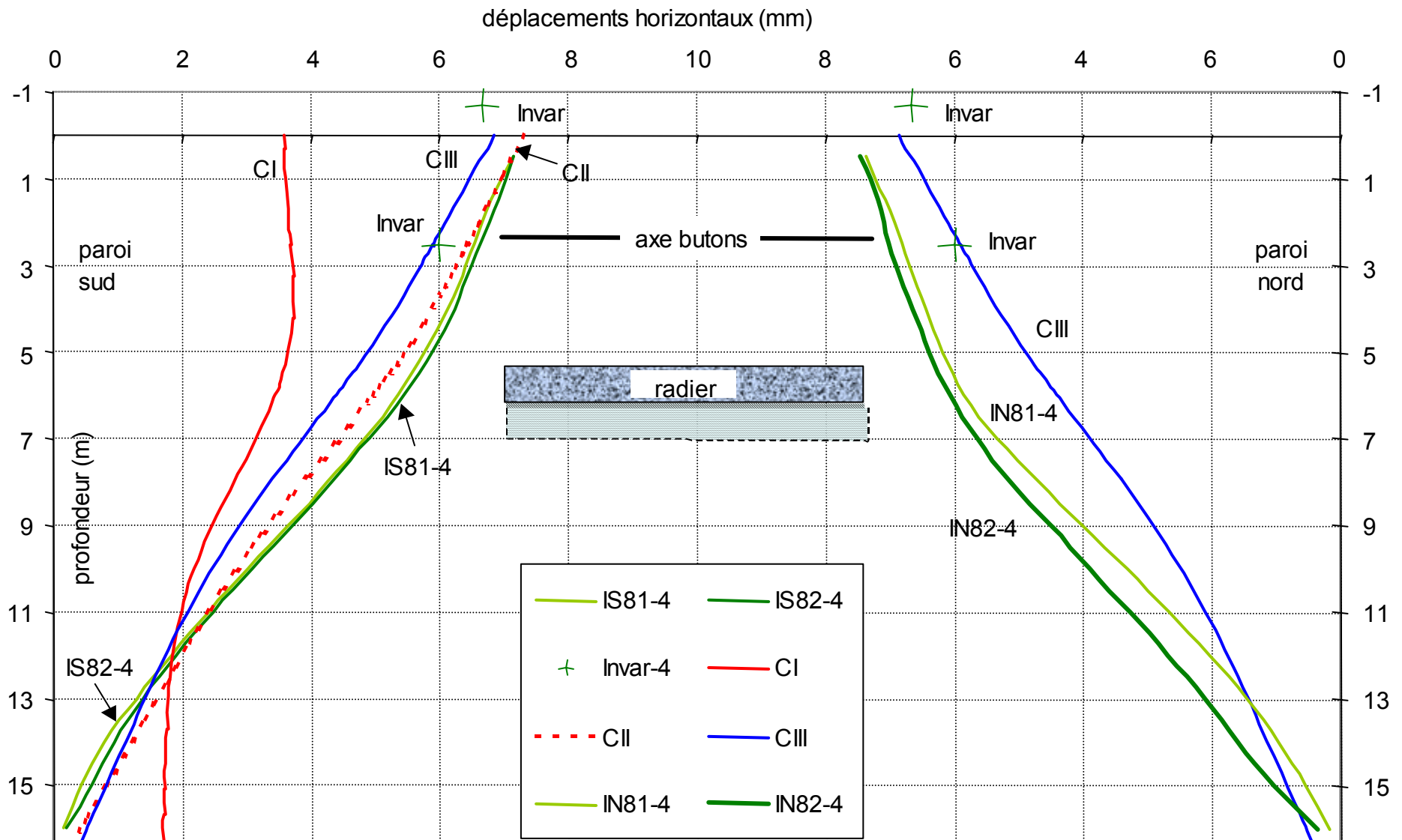


Fig. 4-42 : Déformée des parois après le bétonnage du radier. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et théoriques (C_I , C_{II}

et C_{III}) et déplacements ponctuels mesurés au fil invar.

b) déplacements horizontaux transversaux de l'écran

- ♦ les deux déformées expérimentales obtenues pour chaque paroi instrumentée sont en cohérence, l'une par rapport à l'autre (l'écart moyen absolu entre les deux courbes de déplacements horizontaux est inférieur à 0,10 mm pour la paroi sud et de 0,38 mm pour la paroi nord) ;
- ♦ les déformées expérimentales de la paroi sud s'approchent de façon plus satisfaisante de celles obtenues par le calcul pour les configurations C_{II} et C_{III} que les déformées expérimentales de la paroi nord ;
- ♦ les déplacements de convergence des parois mesurés à l'aide du dispositif à fil invar sont inférieurs d'environ 10% à ceux estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques ; ils sont cependant en concordance avec les estimations théoriques obtenues pour la configuration C_{III} ;
- ♦ la déformée obtenue pour la configuration C_I est en discordance avec la déformée observée sur toute la profondeur de l'écran.

4.7.8.2 Pressions totales agissant à l'interface du sol et de la paroi

Deux séries de mesures de pressions totales à l'interface du sol et du panneau S81 (le 15 juin et le 20 juin) ont été réalisées dans l'intervalle de temps séparant le bétonnage du radier et la dépose des butons (Annexe 4-2/3). On a retenu pour l'interprétation la mesure effectuée le 15 juin, en parallèle aux mesures inclinométriques et au fil invar (mesure 4).

Les résultats expérimentaux et les estimations théoriques des pressions totales à l'interface sol-écran sont présentés dans le tableau 4-27, qui contient aussi, à titre de référence, les résultats obtenus à l'issue de l'excavation. Ils appellent les remarques suivantes :

- ♦ les résultats de mesure des capteurs implantés CT de l'écran (K₅, K₂, SI₃, et SI₁) ainsi que les estimations théoriques correspondantes montrent que le bétonnage du radier n'a pas d'influence notable sur les pressions développées par le massif

soutenu ; les résultats théoriques obtenus pour la configuration C_{III} semblent assez cohérents par rapport aux résultats expérimentaux, notamment en termes de variations des pressions après le bétonnage du radier, et cela en dépit d'une sous-évaluation des pressions agissant au niveau des trois premiers capteurs et d'une surévaluation de la pression agissant au niveau du capteur SI₁ ;

- ♦ quant aux résultats expérimentaux côté fouille (CF) de l'écran, on remarque une augmentation des pressions après le bétonnage du radier de l'ordre de 9 kPa au niveau du capteur SI₂ et de l'ordre de 7 kPa au niveau du capteur SI₀ ; cependant, ces valeurs restent plus faibles que celles obtenues à la même profondeur de l'autre côté de l'écran, tandis que les résultats théoriques, qui montrent une augmentation des pressions (de l'ordre de 7 à 10 kPa) voisine de celle enregistrée expérimentalement, restent nettement supérieurs aux valeurs expérimentales et aux valeurs théoriques côté terrain (CT).

4.7.8.3 Efforts transmis par les boutons à la paroi

Le suivi des déformations sur les boutons instrumentés (Annexe 4-5) s'est poursuivi après le bétonnage du radier d'une façon continue entre le 13 juin à 14h31 et le 14 juin à 4h01 (27 acquisitions à une fréquence de deux par heure) et le 15 juin entre 13h05 et 15h35 (11 mesures à une fréquence d'acquisition de quatre par heure) et d'une façon ponctuelle le 19 (à 13h40) et le 20 juin (à 10h).

L'analyse de l'ensemble de ces données a mis en évidence une faible variation des efforts expérimentaux après le bétonnage du radier. L'interprétation quantitative de cette variation paraît assez difficile dans la mesure où les données semblent affectées, d'une façon significative, par la circulation de chantier ainsi que par la variation de la température.

Parmi l'ensemble des mesures disponibles, l'analyse a porté sur des mesures réalisées durant la nuit (Tableau 4-28). On profite ainsi de l'arrêt de la circulation de chantier et de la meilleure homogénéité des températures dans les boutons instrumentés (qui ne sont plus exposés à l'ensoleillement).

La diminution moyenne de l'effort axial dans les butons après le bétonnage du radier, à température constante, est ainsi évaluée à 42 kN, l'écart type de la population des 12 données retenues pour l'analyse étant de 15,7 kN.

Pour acquérir une image de l'influence des deux facteurs évoqués ci-avant, le tableau 4-28 donne aussi la variation expérimentale des efforts enregistrés, à la même température de mesure, entre la nuit et le jour. On observe une augmentation importante des efforts axiaux de compression entre la nuit du 13 ou du 14 juin et le jour du 15 juin (variation moyenne de 111 kN et écart type de 61 kN) qui ne peut être imputée qu'en (faible) partie à un effet différé dans la répartition des efforts horizontaux autour de l'écran ; l'autre partie est probablement due à l'effet de la circulation de chantier et à une maîtrise locale (à l'endroit de chaque jauge) de la température dans la journée.

Les calculs réalisés au moyen du logiciel Dénébola conduisent par ailleurs aux efforts axiaux suivants pour les trois configurations de calcul étudiées:

$$C_I : N_B = \Delta T(z_b=2,54m) \times e_B = 106,1 \text{ kN/ml} \times 3,1m = 329 \text{ kN} ;$$

$$C_{II} : N_B = 107,5 \text{ kN/ml} \times 3,1m = 333 \text{ kN} ;$$

$$C_{III} : N_B = 94,7 \text{ kN/ml} \times 3,1m = 294 \text{ kN}.$$

La variation de l'effort axial par rapport à la phase d'excavation complète (séquence 5) vaut alors :

$$C_I : \Delta N_B = 329 - 376 = -47 \text{ kN} ;$$

$$C_{II} : \Delta N_B = 333 - 406 = -73 \text{ kN} ;$$

$$C_{III} : \Delta N_B = 294 - 377 = -83 \text{ kN}.$$

Les résultats de la simulation du comportement de l'écran pour la configuration C_I sont en bonne cohérence avec les résultats expérimentaux. Cependant, l'écart important (du simple au double) entre les résultats obtenus pour les configurations C_{II} et C_{III} et le résultat expérimental doit être relativisé dans la mesure où il est du même ordre de grandeur que la variation théorique de l'effort axial dans les butons (dont les extrémités sont considérées comme bloquées) sous l'action d'une variation de température de 1°C (36 kN).

Tableau 4-27 : Pressions totales exercées à l'interface de l'écran après la mise en œuvre du radier (calculs et mesures)

Niveau caractéristique (S81)	Prof. (TN=0)	k_h		Contraintes théoriques (p_{th})				Contr. exp. (p_{exp})	
		E_M -projet	E_M -PR ₂	Réf: Séq5	Séquence 6 (après radier)			Réf: Séq5	Séq. 6
(stratigraphie relevée dans le sondage pressiométrique PR ₂)	(m)	C_I	C_{II} et C_{III}	C_{III}	C_I	C_{II}	C_{III}	Mes.3	Mes. 4
		$H_L=6m$	$H_L=5,3m$	$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}			$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}
		(kPa/m)	(kPa/m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Terrain naturel (TN)	0,00								
Assise chaussée / remblai	0,60	2500	2920						
Nappe (3,75 NGF)	2,04		1750						
K₅ (côté terrain)	2,41			1,0	10,8	9,5	4,1	5,7	5,7
Remblai/argile tourbeuse	2,50	1500							
K₂ (côté terrain)	5,17		540	58,1	57,1	57,7	59,1	79,1	79,1
Radier (côte projet)	5,30		760						
Argile tourbeuse/limon	7,50								
SI₃ (côté terrain, CT)	7,61	4200	2140	68,5	96,6	70,5	72,6	78,3	79,2
SI₂ (côté fouille, CF)	7,61			95,9	94,8	105,6	102,7	55,9	64,5
SI₁ (côté terrain)	9,71			95,8	93,7	98,7	101,2	87,0	88,0
SI₀ (côté fouille)	9,71			112,8	120,7	122,2	118,1	78,2	85,8
Limon argileux/graves	13,60								
Graves/marnes	15,80	17000	17600						
Bas paroi théorique	16,29	32000	53100						

- les résultats du capteur SI₀ comportent un ajout correctif de 53 kPa compte tenu des résultats de l'étude de corrélation des mesures des pressions totales avec les mesures inclinométriques (voir 4.7.6.2).

Tableau 4-28 : Efforts expérimentaux dans les butons instrumentés après le bétonnage du radier(séquence 6)

Mesure	date	heure	temp. (°C)	B ₈₀			B ₈₁					B ₈₀		B ₈₁		
				extrémité sud		N _{B80}	extrémité sud		extrémité nord		N _{B81}	extrémité sud		extrémité sud		extr. nord
				N ₁₋₃	N ₂₋₄	(moyen)	N ₁₋₃	N ₂₋₄	N ₁₋₇	N ₆₋₈	(moyen)	M ₁₋₃	M ₂₋₄	M ₁₋₃	M ₂₋₄	M _{h(6-7)}
				(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
Séq. 5 (réf) (nuit)	8-juin	21:27	23,7	-780	-744	-762	-1743	-1222	-1052	-1154	-1143	10	21	10	61	22
	8-juin	22:27	21,9	-639	-604	-622	-1534	-1052	-898	-995	-982	9	21	10	57	21
	8-juin	22:57	20,9	-583	-553	-568	-1447	-1007	-860	-962	-943	7	21	11	53	20
	8-juin	23:27	20,2	-547	-513	-530	-1357	-975	-829	-926	-910	7	21	10	47	19
	8-juin	23:57	19,4	-530	-474	-502	-1311	-948	-793	-887	-876	8	21	11	45	20
	9-juin	00:27	18,9	-502	-442	-472	-1247	-919	-765	-847	-844	8	21	10	42	18
	9-juin	01:27	17,7	-434	-385	-409	-1123	-866	-710	-794	-790	9	20	11	36	18
9-juin	03:27	16,2	-366	-316	-341	-942	-792	-641	-724	-719	8	21	11	24	18	
4 (nuit)	13-juin	19:31	22,8	-692	-658	-675	-1500	-1169	-997	-1116	-1094	8	20	10	44	24
	13-juin	20:01	21,6	-639	-595	-617	-1423	-1091	-934	-1035	-1020	8	22	10	42	21
	13-juin	21:01	20,3	-511	-477	-494	-1291	-975	-822	-896	-898	7	19	11	40	18
	13-juin	21:31	19,3	-462	-418	-440	-1220	-921	-775	-852	-850	8	21	11	38	18
	13-juin	22:01	18,7	-408	-369	-389	-1154	-860	-732	-803	-798	7	21	12	37	16
	13-juin	22:31	17,8	-375	-329	-352	-1095	-832	-696	-763	-763	7	20	12	35	15
	14-juin	03:31	16,2	-322	-271	-296	-866	-784	-643	-713	-713	7	21	11	17	16
4 (jour)	15-juin	13:05	18,7	-542	-522	-532	-1142	-1026	-844	-955	-942	8	22	10	23	24
	15-juin	13:20	17,9	-542	-515	-529	-1167	-1011	-829	-933	-925	9	24	10	27	23
	15-juin	13:50	19,1	-517	-478	-498	-1161	-982	-805	-904	-897	9	24	10	28	23
	15-juin	14:20	20,0	-531	-506	-519	-1174	-996	-815	-916	-909	9	24	10	28	23
	15-juin	14:35	19,7	-513	-484	-498	-1158	-972	-801	-903	-892	9	24	11	28	23
	15-juin	15:35	19,4	-547	-520	-534	-1183	-1013	-837	-946	-932	9	24	11	28	24
variation efforts (nuit et nuit)	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{3-4}$		19,4	-68	-55	-62	-91	-27	-17	-35	-26	0	1	0	7	3
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{3-4}$		16,2	-44	-45	-44	-76	-8	1	-11	-6	1	0	0	7	2
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{3-4}$		20,3	-36	-37	-36	-66	1	-7	-30	-12	0	2	0	7	1
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{3-4}$		17,7	-59	-56	-58	-29	-35	-14	-31	-27	2	0	-1	1	3
variation moyenne (3-4) :				-42								1				
variation efforts (nuit et jour)	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{4-4}$		19,4	86	101	94	-37	92	61	94	82	-1	-3	0	11	-6
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{4-4}$		20,3	20	29	25	-118	21	-6	20	11	-1	-5	1	12	-5
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{4-4}$		18,7	134	152	143	-12	167	112	152	144	-1	0	2	14	-8
	$(\Delta N \text{ et } \Delta M)^{4-4}$		17,8	168	186	177	73	180	133	170	161	-2	-4	2	8	-8
variation moyenne (4-4)/n-j :				111								-2				

4.7.8.4 Comportement de l'écran après la mise en œuvre du radier

a) *Procédure d'étude des données expérimentales*

Une étude de la corrélation expérimentale entre les efforts horizontaux appliqués à la paroi et l'inclinaison de sa déformée a été également réalisée pour la séquence de mesure 6 correspondant à la mise en place du radier.

Cette analyse a été menée en faisant l'hypothèse que, pour cette phase, le radier n'est pas encore à même d'appliquer des efforts horizontaux à la paroi et, par conséquent, la modification du comportement mécanique de l'écran causée par la mise en œuvre du radier n'est pas influencée par la présence d'un appui au niveau du radier.

Cette étude est réalisée de la même façon que pour la séquence 5, en rassemblant sur une même figure les différents diagrammes traduisant l'équilibre de l'écran (Fig. 4-43).

Cependant, si, pour la séquence précédente, on a été amené à ajuster l'effort de butonnage et estimer la dérive de la mesure fournie par le capteur SI_0 , l'analyse de cette séquence de mesure nous permet de vérifier la pertinence de ces ajustements :

- ♦ l'effort de butonnage dans la séquence 6 est celui trouvé par l'analyse de corrélation expérimentale pour la séquence 5 (526 kN) auquel est ajouté la variation expérimentale de l'effort de butonnage entre la séquence 5 et la séquence 6 (-42 kN ; Tableau 4-28) ; en termes de force de réaction horizontale appliquée à la paroi, il vaut alors environ 156 kN/m pour une distance des butons de $e_B=3,10\text{m}$;
- ♦ la pression mesurée par le capteur SI_0 lors de la mesure du 15 juin (32,8 kPa) est corrigée en ajoutant la dérive estimée lors de l'étude de corrélation expérimentale relative à la séquence 5 (53 kPa) ;

Séquence 6 : bétonnage du radier

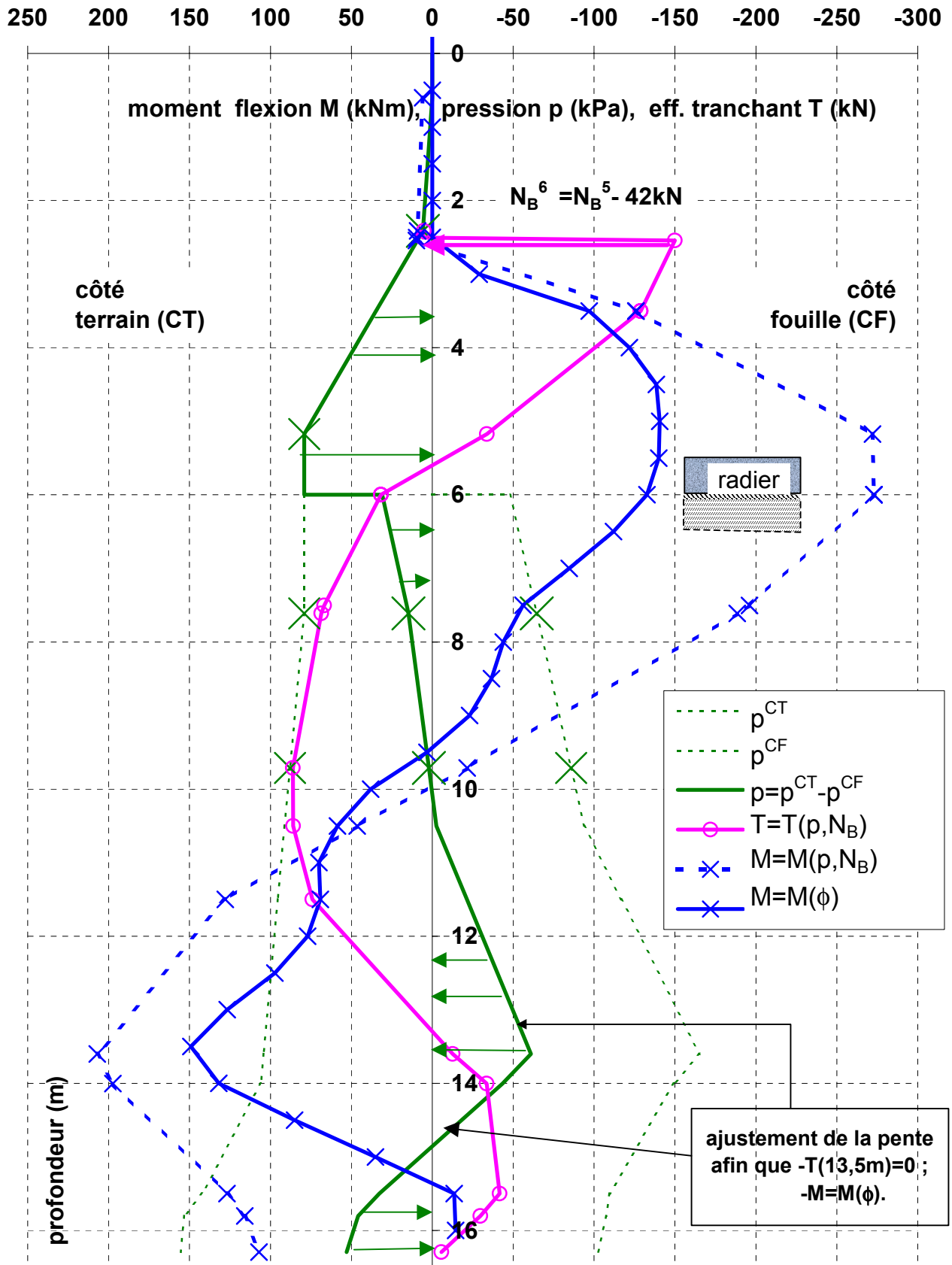


Fig. 4-43 : Etude de corrélation expérimentale entre les efforts horizontaux et

l'inclinaison de la paroi par le biais du moment induit (séquence 6)

- ♦ enfin, en partie basse de la paroi, au-dessous de la profondeur de 10,5 m, la pente du diagramme de la pression horizontale résultante est ajustée pour correspondre à la distribution expérimentale du moment de flexion résultant de l'interprétation des mesures inclinométriques (effort tranchant nul obtenu à la profondeur de 13,5 m, où le moment de flexion présente un extremum correspondant au moment d'encastrement) mais aussi satisfaire la condition d'équilibre local de l'écran.

La figure 4-43 présente également une solution possible concernant les distributions des pressions totales horizontales agissant des deux côtés de l'écran, et en partie basse de l'écran, de façon à rendre compte de la pression totale résultante satisfaisant aux conditions d'équilibre indiquées ci-dessus.

b) Analyse des résultats (séquence 6)

Après la mise en œuvre du radier, le moment de flexion dérivé des mesures inclinométriques est cohérent avec celui qui est estimé par le biais des efforts horizontaux mesurés aux interfaces de l'écran et du sol : les deux courbes expérimentales du moment de flexion présentent la même allure, notamment pour ce qui concerne la position des fibres sollicitées respectivement en traction et en compression, ainsi que la position des extrêmes.

On remarque, en particulier, que l'ensemble des résultats expérimentaux correspondant à l'effort de butonnage estimé dans la séquence 5 (526 kN), la variation expérimentale de l'effort de butonnage entre la séquence 5 et la séquence 6 (-42 kN) et les pressions mesurées par les capteurs K_5 (5,7 kPa) et K_2 (79,1 kPa) conduisent à un extréma du diagramme des moments obtenu à partir des efforts horizontaux (point d'effort tranchant nul) en concordance presque parfaite avec le point de moment maximal fourni par l'exploitation des mesures inclinométriques.

On remarque aussi que la mise en œuvre du radier se traduit par une augmentation des pressions enregistrées côté fouille d'environ 9 kPa au niveau du capteur SI_2 et d'environ 7 kPa au niveau du capteur SI_0 , ce qui fait remonter le point de pression

nulle d'environ 0,50 m (les capteurs installés côté terrain n'enregistrent pas une variation sensible de la pression mesurée après la mise en œuvre du radier ; Tableau 4-22). Le point de pression totale résultante nulle se trouve alors au même niveau que le point d'inflexion du diagramme des moments.

L'ensemble des résultats présentés sur la figure 4-43 permet de penser que les ajustements effectués pour la corrélation des paramètres de mesure enregistrés dans la séquence 5 ont été pertinents.

L'écart important entre les deux courbes de moment de flexion, enfin, semble pour sa part indiquer :

- ♦ qu'en dépit de son évaluation à court terme, la raideur en flexion de la section de l'écran a été sous-estimée ;
- ♦ que la raideur en flexion de la section de l'écran estimée par la formule 4.19 ne prend pas en compte la présence des barres verticales d'ancrage du radier, localisées entre 3,5 m et 5,7 m de profondeur (là où l'écart entre les deux courbes expérimentales de moment est maximum) ; ces barres (10 HA40 pour chaque panneau) apportent une augmentation de la raideur locale de la section de la paroi d'environ 5 % ;
- ♦ qu'enfin, la contribution des composantes tangentielles des contraintes appliquées à la paroi est susceptible de jouer un rôle dans l'équilibre de ce dernier.

4.7.9 Dépose des butons (séquence 7)

La dernière phase de construction suivie au moyen de l'instrumentation a été la dépose des butons provisoires. Elle est survenue le 20 juin pour toute la zone ouest de la trémie ouverte.

L'auscultation de l'ouvrage a été réalisée le lendemain (le 21 juin) en utilisant les mêmes appareillages de mesure que pour la séquence précédente, à l'exception de la mesure des déformations sur les butons, qui a été réalisée au moment de la déconnexion de chaque buton instrumenté. Une auscultation à long terme a également

été réalisée cinq semaines après la dépose des butons (4.7.10).

4.7.9.1 Déformée de la paroi

L'interprétation des mesures inclinométriques et à fil invar a été réalisée de la même façon que pour la séquence 6, en termes de déformée de l'écran, la séquence 3 (avant toute excavation) étant prise comme référence.

Les diagrammes expérimentaux et théoriques de l'inclinaison de la paroi et des déplacements horizontaux sont présentés sur les figures 4-44 et 4-45.

Les déplacements horizontaux en tête de l'écran et au niveau des butons déduits des mesures inclinométriques et des mesures au fil invar sont présentés dans le Tableau 4-29, avec l'écart type σ^y de l'erreur qui entache leur estimation.

Mesure	Prof. z (m)	Panneau	Mesures inclinométriques				Fil invar		
			paroi sud		paroi nord		convergence		
			$y^S(z)$	$\sigma^y(z)$	$y^N(z)$	$\sigma^y(z)$	y^S+y^N	y^S+y^N	$\sigma^y(z)$
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5 21-juin	-0,70	81-83						17,23	0,80
	0,50	81	9,97	0,69	10,74	0,99	20,70		
		82	9,88	0,76	10,15	0,91	20,03		
	2,54	81	8,72	0,61	9,28	0,88	18,00	14,24	1,31
		82	8,69	0,68	9,06	0,82	17,75		

Tableau 4-29 : Estimation expérimentale (séquence 7) des déplacements de convergence des parois situées en vis-à-vis (en tête de l'écran et au niveau des butons)

La cinématique observée des parois appelle les remarques suivantes :

a) inclinaison de l'écran

- ♦ les deux diagrammes d'inclinaison de l'écran obtenus pour chaque paroi instrumentée sont en bonne concordance, (l'écart moyen absolu entre les deux courbes est de $0,41 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi sud et de $1,32 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi nord) ;
- ♦ l'allure des courbes expérimentales d'inclinaison de la déformée (faible variation

de l'inclinaison suivant la profondeur de l'écran) est sensiblement différente de celle des courbes résultant du calcul pour les configurations C_I , C_{II} et C_{III} ;

- ♦ les courbes d'inclinaison de l'écran obtenues par calcul présentent trois tronçons distincts de variation suivant la profondeur de l'écran ; on remarque notamment la discordance entre leurs dérivées de premier ordre et celles des courbes expérimentales pour le tronçon situé entre 5 et 11 m de profondeur ainsi que le maintien de la discordance de la deuxième dérivée (qu'on a constaté précédemment) au-dessous d'une profondeur de 8m.

b) déplacements horizontaux transversaux de l'écran

- ♦ les deux déformées expérimentales obtenues pour chaque paroi instrumentée sont en cohérence, l'une par rapport à l'autre, (l'écart moyen absolu entre les deux courbes de déplacements horizontaux est inférieur à 0,1 mm pour la paroi sud et inférieur à 0,3 mm pour la paroi nord) ;
- ♦ en dépit de l'allure sensiblement différente des courbes expérimentales par rapport à celles obtenues par le calcul, les déplacements en tête de l'écran sont de même ordre de grandeur (de 10 à 11 mm) ;
- ♦ les déplacements de convergence des parois mesurés par le dispositif à fil invar sont sensiblement plus réduits que ceux estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques (de l'ordre de 26 % au niveau des butons).

4.7.9.2 Pressions totales agissant à l'interface de la paroi

Les pressions expérimentales et résultant du calcul obtenues après la dépose des butons sont présentées dans le tableau 4-30. Les résultats obtenus dans la séquence précédente (séquence 6) sont par ailleurs rappelés afin de mettre en évidence l'incidence de la dépose des butons sur ces pressions. La lecture du tableau 4-30 appelle les remarques suivantes :

- ♦ la dépose des butons conduit à une chute des pressions expérimentales appliquées par le massif soutenu au-dessus du niveau du radier (le capteur K_5 indique une

chute à 0 tandis que le capteur K_2 indique une chute d'environ 57 % par rapport à la valeur enregistrée avant la dépose) ; les résultats du calcul par la méthode des coefficients de réaction indiquent pour leur part une diminution au niveau du capteur K_5 , seulement, cette diminution n'étant pas significative au niveau du capteur K_2 ;

- ♦ les deux autres capteurs installés avec leur surface active du côté du massif de sol soutenu (SI_3 et SI_1) indiquent une très légère augmentation des pressions (de 4 % et de 1% respectivement) d'une façon semblable aux résultats de calcul (de l'ordre de 1 à 2 %) pour les configurations C_{II} et C_{III} ; cependant ces résultats de calcul sont, en valeur absolue, très différents (à la profondeur de 7,61 m, les résultats de calcul sont de l'ordre de 11 % inférieurs à la valeur expérimentale tandis qu'à la profondeur de 9,71 m ils dépassent de 14% la valeur mesurée) ; les résultats du calcul C_I s'écartent d'une façon plus significative des résultats expérimentaux que ceux des configurations C_{II} et C_{III} .
- ♦ les valeurs expérimentales obtenues du côté fouille (CF) de l'écran sont, pour leur part, en légère diminution après la dépose des butons (de l'ordre de 2 à 4 % par rapport aux valeurs mesurées dans la séquence 6), ce qui correspond à une pression totale résultante dirigée vers la fouille ; les résultats des calcul à la profondeur d'implantation des capteurs n'enregistrent pas de modification par rapport à la séquence précédente, mais, en valeur absolue, ils restent largement supérieurs aux valeurs observées in situ (de l'ordre de 64 % au niveau du capteur SI_2 et de l'ordre de 40 % au niveau du capteur SI_0) et par rapport aux valeurs théoriques obtenues du côté terrain (CT) (valeur théorique de la pression totale résultante dirigée vers le massif derrière l'écran).

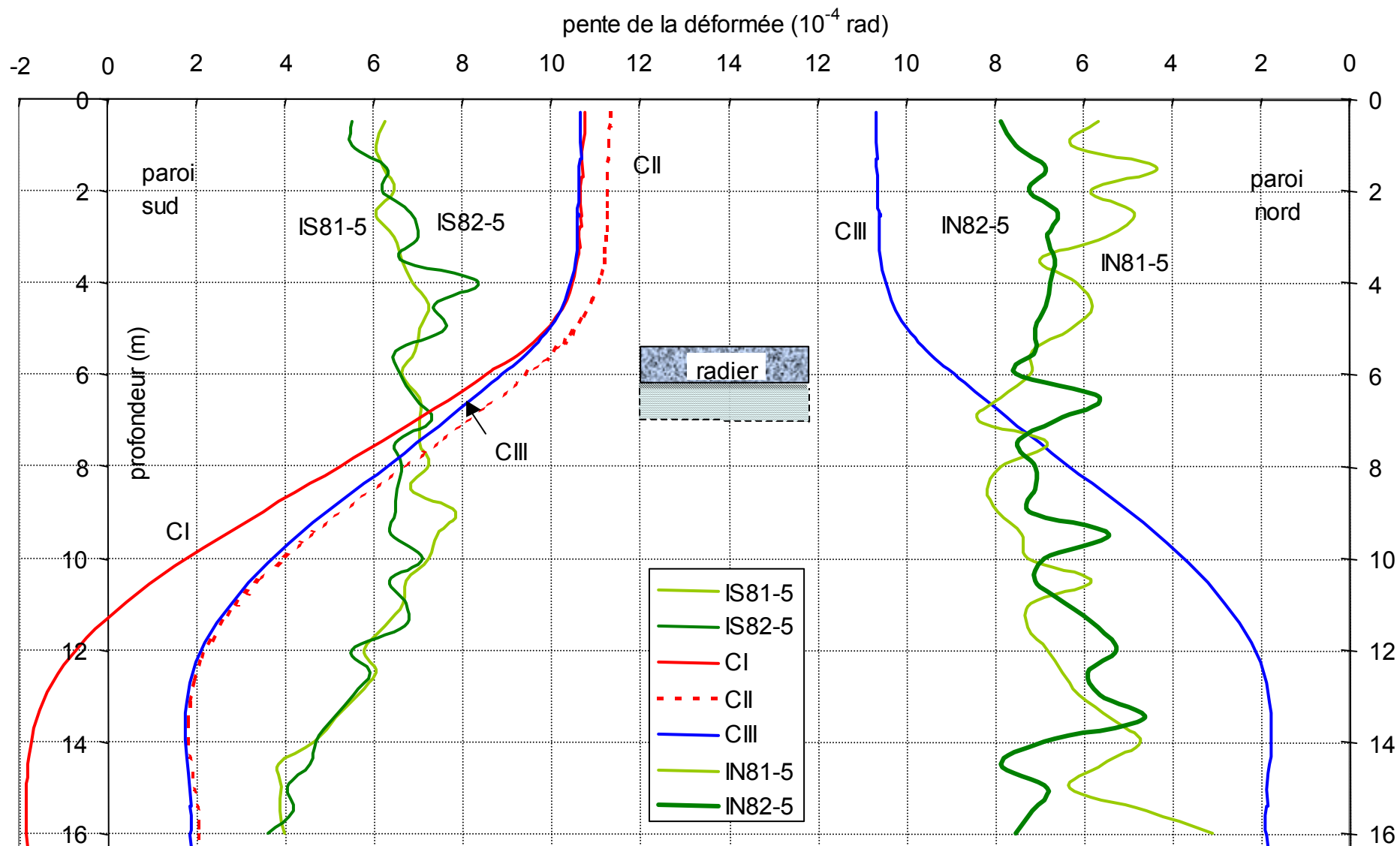


Fig. 4-44 : Pente de la déformée des parois après la dépose des butons. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et

théoriques (C_I , C_{II} et C_{III})

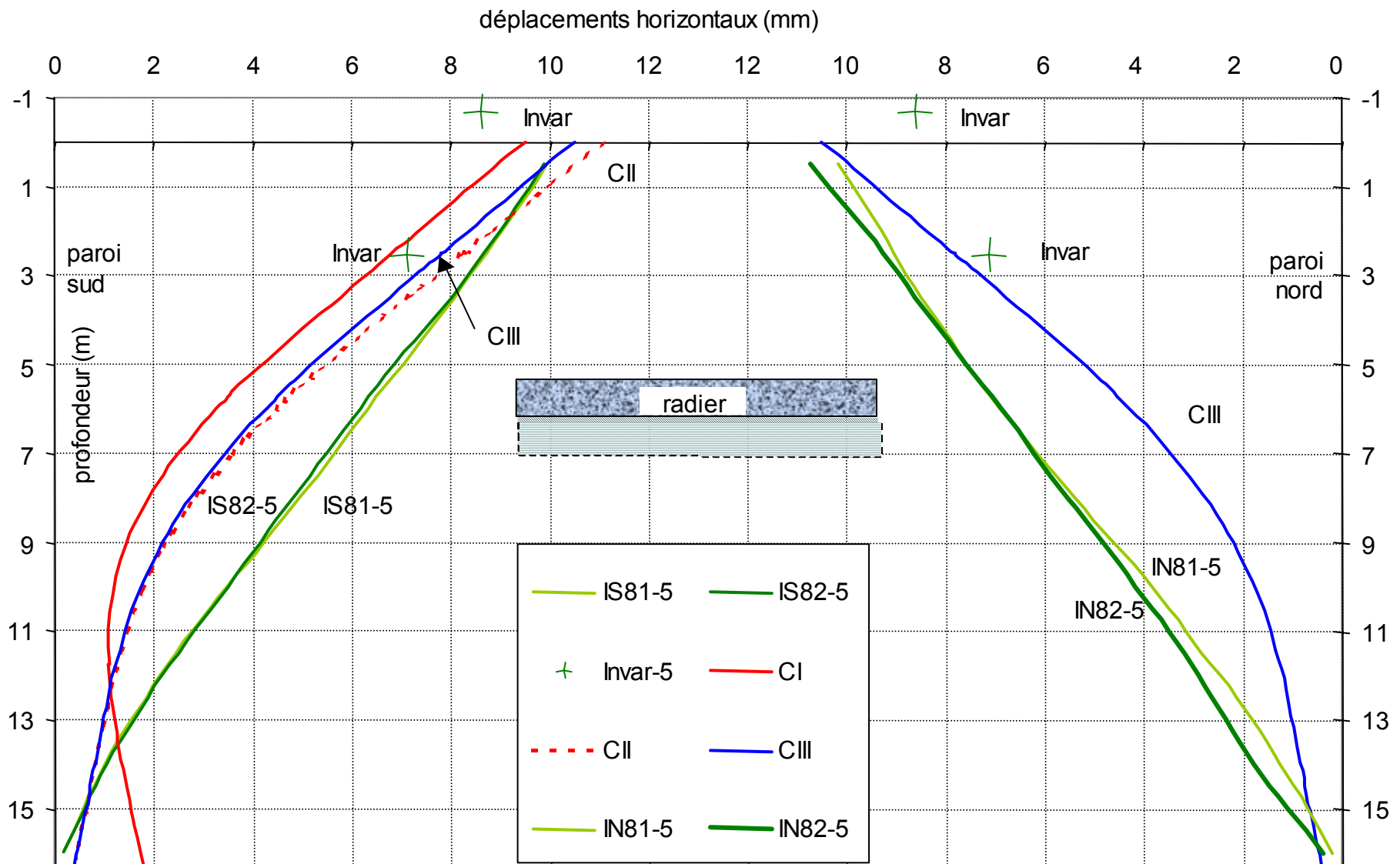


Fig. 4-45 : Déformée des parois après la dépose des boutons. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III}) et déplacements déduits des mesures au fil invar.

Tableau 4-30 : Pressions totales exercées à l'interface du sol et de l'écran après la dépose des butons (valeurs théoriques et expérimentales)

Niveau caractéristique (S81)	Prof. (TN=0)	k_h	E_M -projet	Contraintes théoriques (p_{th})				Contr. exp. (p_{exp})		
				E_M -PR ₂	Réf: Séq6	Séquence 7 (après dépose butons)			Réf: Séq6	Séq. 7
					C_I	C_{II} et C_{III}	C_{III}	C_I	C_{II}	C_{III}
(stratigraphie relevée dans le sondage pressiométrique PR ₂)	(m)	(kPa/m)	(kPa/m)	$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}			$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}	
				(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
Terrain naturel (TN)	0,00									
Assise chaussée / remblai	0,60	2500	2920							
Nappe (3,75 NGF)	2,04		1750	4,1	2,7	5,8	2,4	5,7	0,6	
K₅ (côté terrain)	2,41									
Remblai/argile tourbeuse	2,50									
K₂ (côté terrain)	5,17	1500	540	59,1	56,6	57,8	58,9	79,1	34,1	
Radier (côte projet)	6,10		760							
Argile tourbeuse/limon	7,50									
SI₃ (côté terrain, CT)	7,61	4200	2140	72,6	97,8	72,8	73,9	79,2	82,8	
SI₂ (côté fouille, CF)	7,61			102,7	93,5	103,4	101,3	64,5	61,6	
SI₁ (côté terrain)	9,71			101,2	97,9	101,3	101,2	88,0	88,9	
SI₀ (côté fouille)	9,71			118,1	116,5	119,7	118,1	85,8	84,1	
Limon argileux/graves	13,60									
Graves/marnes	15,80	17000	17600							
Bas paroi théorique	16,29	32000	53100							

- les résultats du capteur SI₀ comportent un ajout correctif de 53 kPa compte tenu des résultats de l'étude de corrélation des mesures des pressions totales avec les mesures inclinométriques (voir 4.7.6.2).

Tableau 4-31 : Déformations initiales (mesure du zéro) et rémanentes enregistrées sur les boutons instrumentés

date	temp (B ₈₀) °C	Bouton 80 (3)				Bouton 81 (1)				Bouton 82 (2)		
		déformations à l'extrémité sud (μéf)				déformations à l'extrémité sud (μéf)				déformations à l'extrémité sud (μéf)		
		j1	j2	j3	j4	j1	j2	j3	j4	j1	j3	j4
0. Après l'installation des jauges sur les boutons en usine												
02-mai	19,0	-7	5	2	7	6	-9	69	18	2	2	1
02-mai	19,0	-21	19	18	-11	-3	15	66	10	-14	16	-16
9. Avant la dépose des boutons												
19-juin	35,4	-599	-524	-350	-432	-565	-600	-861	-556	-594	-721	-730
20-juin	25,8	-368	-310	-186	-254	-443	-459	-459	-398	-434	-546	-515
20-juin	31,0	10. Dépose B80 (11h25)				11. Dépose B81(11h45)				12. Dépose B82 (12h01)		
juste avant la déconnexion des boutons		-448	-415	-303	-387	-563	-531	-797	-530	-584	-666	-648
		-442	-419	-303	-387	-561	-527	-790	-532	-586	-657	-644
		-446	-418	-302	-387	-561	-529	-797	-533	-585	-657	-636
		-439	-422	-301	-383	-566	-531	-796	-532	-580	-661	-648
		-426	-420	-305	-378	-564	-531	-797	-533	-583	-654	-642
juste après la déconnexion des boutons		-311	-279	-227	-293	-507	-440	-740	-422	-343	-335	-309
		-313	-278	-228	-287	-505	-438	-737	-422	-342	-343	-318
		-306	-288	-227	-285	-507	-440	-740	-420	-342	-331	-313
		-299	-273	-223	-293	-507	-442	-738	-422	-332	-332	-308
		-308	-289	-227	-293	-507	-440	-738	-420	-337	-340	-313
déf. moyenne avant		-440	-419	-303	-385	-563	-530	-796	-532	-584	-659	-643
déf. rémanente		-307	-281	-226	-290	-507	-440	-739	-421	-339	-336	-312
déf. réversible		133	137	77	94	56	90	57	111	245	323	331

*- jauge de compensation (j₀) placée au-dessus du bouton ;

** - jauge de compensation (j₀) placée au-dessous du bouton (rotation du bouton de 180°).

4.7.9.3 Déformations rémanentes dans les butons

Les jauges ont fait l'objet d'un suivi détaillé au moment de l'enlèvement des butons instrumentés (le 20 juin), afin d'accéder aux déformations rémanentes des butons à l'issue de leur déconnexion.

Dans ce but, les butons ont été maintenus suspendus en position horizontale, leurs extrémités étant libérées, le temps nécessaire pour l'acquisition de plusieurs séries de mesure (toutes les 2 secondes).

Les mesures acquises juste avant la déconnexion des butons et juste après leur déconnexion sont données à la fin de l'Annexe 4-5/1.

Le tableau 4-31 reprend ces résultats (seulement pour les jauges installées à l'extrémité sud des butons), en faisant abstraction du facteur temps, ainsi que les mesures initiales effectuées après l'installation des jauges sur les butons. On observe des déformations rémanentes très élevées par rapport aux valeurs initiales mesurées en usine avant toute sollicitation.

Ces déformations rémanentes ne sont pas justifiables dans les limites d'un comportement élastique de l'acier. Elles pourraient avoir une origine thermique mais, compte tenu du type de jauges utilisé (jauges autocompensées en température pour un support en acier au carbone présentant un coefficient de dilatation thermique linéaire de $12,1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, montées en ponts de Wheatstone à jauges de compensation installées dans un bras adjacent au bras de mesure), la déformation apparente enregistrée par de telles jauges resterait alors inférieure à $20 \mu\text{m}/\text{m}$ pour des températures comprises entre 0 et 50°C .

Ces déformations résiduelles doivent alors être expliquées par le dépassement de la limite élastique de l'acier des butons, même si c'est de façon occasionnelle. Pour un acier au carbone d'utilisation courante (la qualité de l'acier utilisé n'est pas connue dans la mesure où l'entrepreneur a utilisé des tubes de rebut), l'apparition des déformations plastiques se produit à partir d'un niveau de contraintes normales (de compression) de l'ordre de 200 MPa (la limite d'écoulement de l'acier étant environ

240 MPa).

On estime que l'apparition de telles déformations plastiques est possible sous l'action combinée du trafic lourd (desservant le chantier) et de la variation de température qui se superposent aux actions permanentes (poussées de terres). En effet, pour un raccourcissement des butons par rapport à leur longueur initiale (à la mise en place) de 7 mm (compatible avec les résultats des mesures à fil invar au niveau des butons effectuées en l'absence de charges roulantes ; voir l'Annexe 4-4) et pour une augmentation de la température de 30 °C par rapport à celle enregistrée à leur mise en place (la température maximale enregistrée durant le suivi des jauges a été de 35,4 °C mais, on peut estimer qu'elle pouvait vraisemblablement dépasser 50°C sous l'éclairage direct du soleil), les contraintes aux points de mesure sont données (dans l'hypothèse d'une variation uniforme sur la section des butons) par la formule :

$$\sigma(\Delta L_B = 7mm; \Delta T = 30^\circ C) = E \left(\frac{\Delta L_B}{L_B} + \alpha \Delta T \right) \quad 4.27$$

où :

$$\sigma = 210000MPa \left(\frac{7}{10740} + 12 \times 10^{-6} \times 30 \right) \cong 137 + 76 = 213MPa \quad 4.27'$$

Ces résultats justifieraient l'apparition de déformations plastiques dans les butons et, par conséquent, pourraient expliquer les valeurs élevées des déformations rémanentes présentées dans le tableau 4-31. L'apparition des déformations plastiques est d'autant plus probable qu'on a constaté des valeurs élevées de l'effort de butonnage initial (après la mise en place des butons suivant la technologie « panneau pré-terrassé, buton installé »). Les déplacements de convergence des parois après l'excavation complète, mesurés au fil invar au niveau des butons (de l'ordre de 5 à 6 mm par rapport à la mesure initiale, de référence, exécutée le 17 mai) ne prennent pas en compte l'action de cet effort axial initial.

4.7.10 Cinq semaines après la dépose des butons (séquence 8)

La dernière séquence de mesure a été réalisée le 26 juillet, c'est-à-dire environ 5 semaines après la fin des travaux de génie civil dans la zone instrumentée. Une

auscultation complète de l'ouvrage a été réalisée, en utilisant l'ensemble des appareillages disponibles (y compris les tubes inclinométriques installés derrière la paroi sud).

La modélisation du comportement de l'ouvrage pour les configurations de calcul C_{II} et C_{III} a été réalisée après avoir réduit à 23000 MPa le module de déformation du béton, pour simuler un comportement à long terme.

4.7.10.1 Déformée des parois et déplacements dans le massif de sol soutenu

L'interprétation des mesures inclinométriques et à fil invar (mesure 6) a été réalisée en termes de déformée de l'écran, en prenant comme référence la situation avant toute excavation.

Les diagrammes expérimentaux et les résultats de calcul de l'inclinaison et du déplacement horizontal des parois sont présentés sur les figures 4-46 et 4-47.

Les déplacements horizontaux en tête de l'écran et au niveau des butons déduits des mesures inclinométriques et des mesures de convergence des parois effectuées au fil invar, sont donnés dans le tableau 4-32, avec l'écart type σ^y de l'erreur qui entache leur estimation.

Tableau 4-32 : Estimation expérimentale (séquence 8) des déplacements de

Mesure	Prof. z (m)	Panneau	Mesures inclinométriques				Fil invar		
			paroi sud		paroi nord		convergence		
			$y^S(z)$ (mm)	$\sigma^y(z)$ (mm)	$y^N(z)$ (mm)	$\sigma^y(z)$ (mm)	y^S+y^N (mm)	y^S+y^N (mm)	$\sigma^y(z)$ (mm)
6 27-juil	-0,70	81-83						23,00	0,44
	0,50	81	12,22	0,89	12,35	0,97	24,57		
		82	12,45	0,75	12,61	1,15	25,07		
	2,54	81	9,85	0,79	10,20	0,87	20,05	16,94	0,89
82		10,09	0,67	10,30	1,02	20,39			

convergence des parois situées en vis-à-vis (en tête de l'écran et au niveau des butons)

Les déplacements du massif du sol soutenu, mesurés au moyen des tubes inclinométriques I₁ et I₂ sont présentés sur la figure 4-48, à côté des déplacements

expérimentaux et théoriques de la paroi sud (mesure 6).

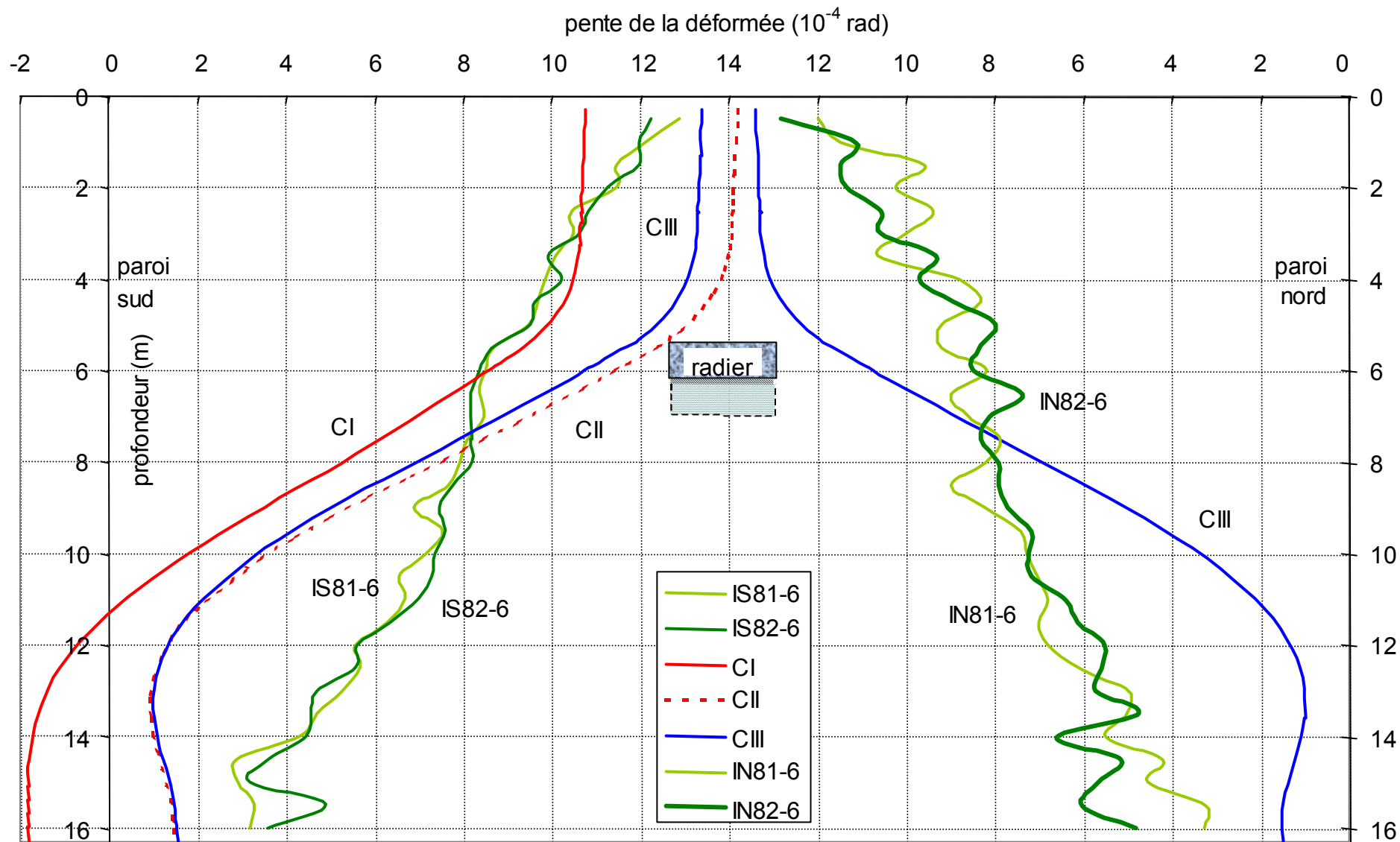


Fig. 4-46 : Pente de la déformée des parois à 35 jours après la dépose des boutons. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82})

et théoriques (C_I , C_{II} et C_{III})

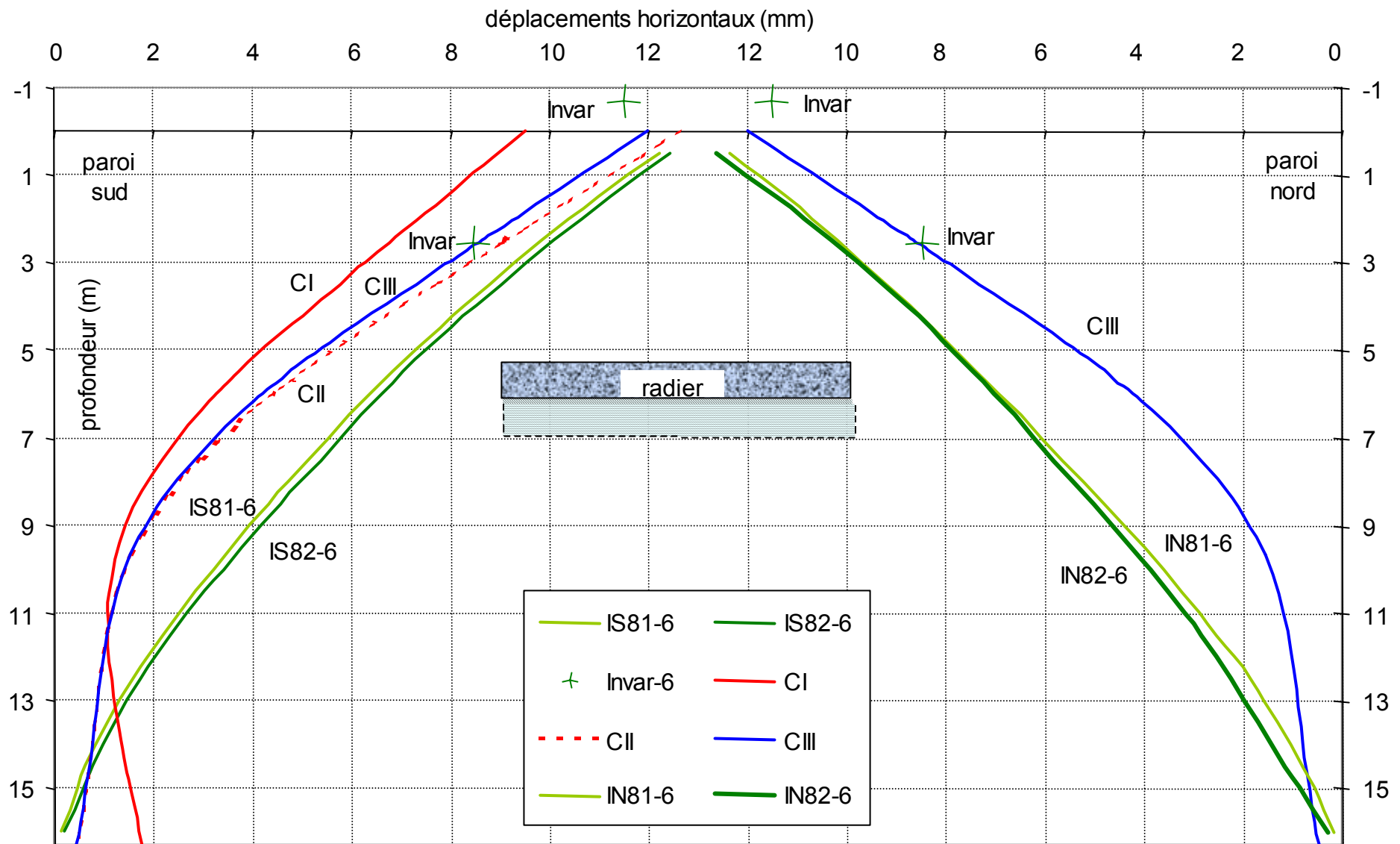


Fig.4-47 : Déformée des parois à 35 jours après la dépose des boutons. Diagrammes expérimentaux (I_{S81} , I_{S82} et I_{N81} , I_{N82}) et théoriques

(C_I, C_{II} et C_{III}) et déplacements mesurés au fil invar.

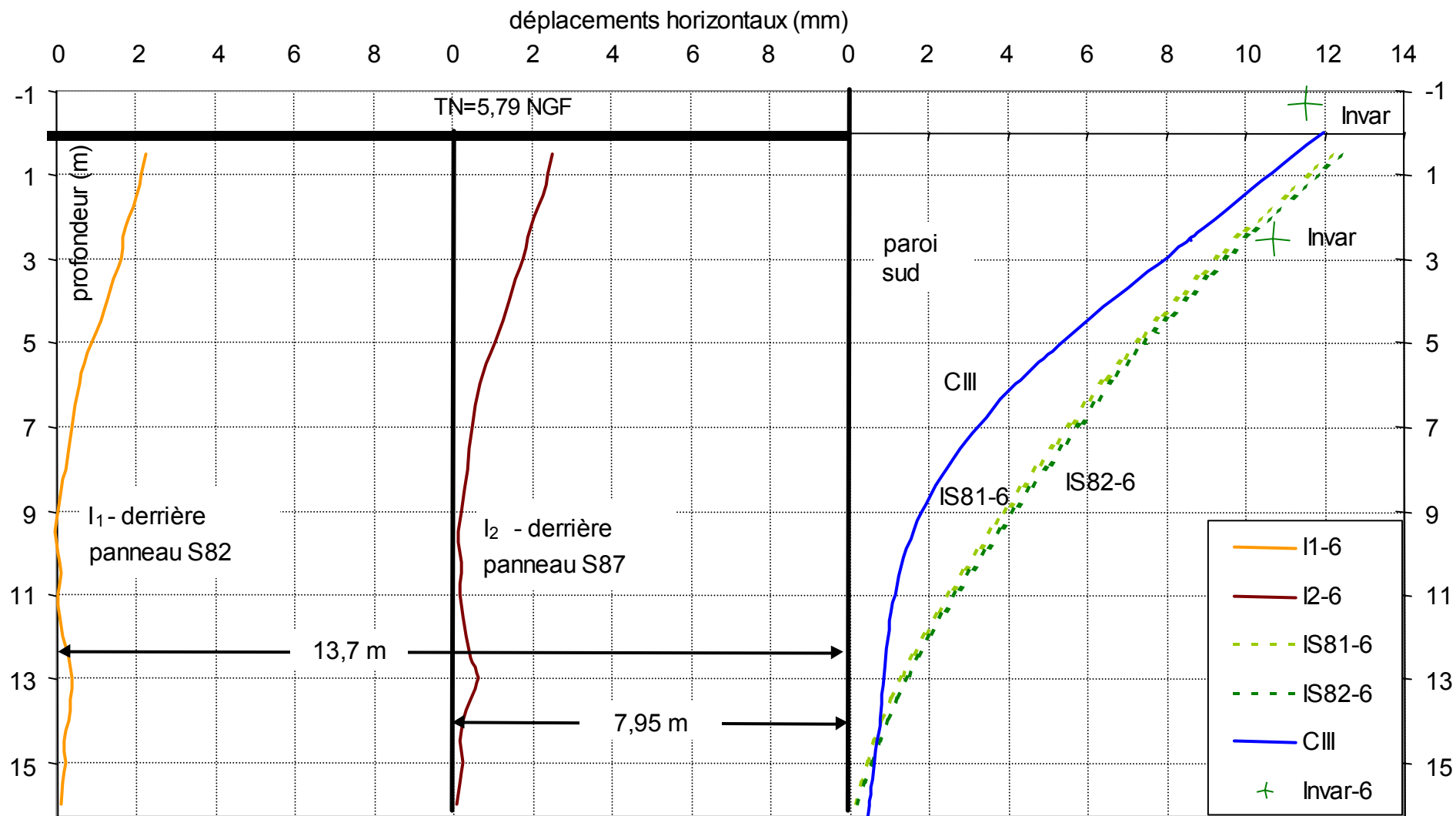


Fig.4-48 : Déplacements horizontaux du terrain derrière la paroi sud, 35 jours après la dépose des butons dans la direction transversale à l'écran. Diagrammes expérimentaux pour les déplacements du terrain (I_1 et I_2) et pour les déplacements de la paroi (I_{S81} , I_{S82} et C_{III})

a) pente de la déformée de l'écran

- ♦ les deux diagrammes de la pente de la déformée de l'écran obtenues pour chaque paroi instrumentée sont en bonne concordance (l'écart moyen absolu entre les deux courbes est de $0,30 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi sud et de $0,85 \cdot 10^{-4}$ rad pour la paroi nord) ; ils présentent une variation quasi-linéaire suivant la profondeur des parois (caractérisée par une dérivée de l'ordre de $8 \cdot 10^{-4}$ rad /16 m de profondeur) ;
- ♦ l'allure des courbes de l'inclinaison calculées pour les configurations C_{II} et C_{III} est sensiblement différente de celle des courbes expérimentales ; elle présente trois tronçons successifs en fonction de la profondeur (de 0 à 4 m et de 12 à 16 m, la dérivée des courbes de l'inclinaison est presque nulle, tandis qu'entre 4 et 12 m de profondeur la pente des courbes de l'inclinaison de l'écran obtenues pour les configurations C_{II} et C_{III} est de l'ordre de $12 \cdot 10^{-4}$ rad /8 m) ;
- ♦ pour la configuration C_I les résultats du calcul sont identiques à ceux de la séquence 7, dans la mesure où l'on a utilisé les mêmes paramètres de calcul.

b) déplacements horizontaux transversaux de l'écran

- ♦ les deux déformées expérimentales obtenues pour chaque paroi instrumentée sont presque identiques (l'écart moyen absolu entre les deux courbes est de 0,20 mm pour la paroi sud et de 0,21 mm pour la paroi nord) ;
- ♦ en dépit de l'allure différente des déformées expérimentales par rapport à celles résultant des configurations de calcul C_{II} et C_{III}, les déplacements en tête de l'écran sont du même ordre de grandeur (environ 12 mm) ;
- ♦ les déplacements de convergence des parois mesurés au fil invar sont plus faibles (d'environ 19%) que ceux estimés par l'interprétation des mesures inclinométriques.

c) déplacements du massif de sol soutenu par la paroi sud

- ♦ les déplacements enregistrés dans les deux tubes inclinométriques dans la direction transversale à la paroi sont presque identiques (l'écart moyen absolu entre les deux courbes est de 0,15 mm) ;

- ♦ les déplacements horizontaux observés dans le terrain derrière l'écran à des distances de 8 m et 13,7 m, respectivement, sont assez faibles par comparaison aux déplacements enregistrés par la paroi ; au niveau du terrain naturel (où les valeurs maximales), ils sont de l'ordre de 2,5 mm, c'est à dire à peu près 20% des déplacements horizontaux enregistrés au niveau de la tête des parois par rapport à la phase initiale (avant toute excavation).

4.7.10.2 Pressions totales agissant à l'interface du sol et de la paroi

Les pressions mesurées le 26 juillet et celles qui résultent du calcul pour les trois configurations sont présentées dans le tableau 4-33. Les résultats correspondant à la séquence précédente (séquence7) sont rappelés dans ce tableau pour servir de référence.

Il est possible de faire les observations suivantes sur les résultats expérimentaux et théoriques ainsi obtenus :

- ♦ parmi les quatre capteurs installés à l'interface de l'écran avec le massif de sol soutenu, seul le capteur K_2 enregistre une variation sensible de la pression : il indique une croissance de l'ordre de 37 % par rapport à la valeur enregistrée juste après la dépose des butons ;
- ♦ pour les capteurs installés côté fouille (CF), on observe une augmentation des pressions enregistrées, environ 12 % pour le capteur SI_2 et environ 23% pour le capteur SI_0 ; la valeur expérimentale de la pression totale résultante reste dirigée vers la fouille à une profondeur de 7,61m, mais elle dirigée vers le massif derrière à une profondeur de 9,71m contrairement à la séquence précédente 7 ;
- ♦ la simulation par le calcul du comportement de l'écran à long terme ne détermine pas de modifications significatives des pressions agissant de part et d'autre de l'écran par rapport à la phase précédente ; la valeur théorique de la pression totale résultante reste dirigée vers le massif arrière à la profondeur de mesure des capteurs SI ; les différences par rapport aux résultats expérimentaux diminuent toutefois du fait des variations observées par les capteurs K_2 , SI_2 et SI_0 .

Tableau 4-33 : Pressions totales exercées à l'interface du sol et de l'écran 5 semaines après la dépose des butons (valeurs théoriques et expérimentales)

Niveau caractéristique (S81)	Prof. (TN=0)	k_h		Contraintes théoriques (p_{th})				Contr. exp. (p_{exp})	
		E_M -projet	E_M -PR ₂	Réf: Séq7	Séquence 8 (36 jours après dépose)			Réf: Séq7	Séq. 8
(stratigraphie relevée dans le sondage pressiométrique PR ₂)	(m)	C_I	C_{II} et C_{III}	C_{III}	C_I	C_{II}	C_{III}	Mes.1	Mes. 2
		$H_L=6m$	$H_L=5,3m$	$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}			$p_0^{CT, CF}$	p_1^{CT} ou p_1^{CF}
		(kPa/m)	(kPa/m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
Terrain naturel (TN)	0,00								
Assise chaussée / rembla	0,60	1250	2920						
Nappe (3,75 NGF)	2,04								
K₅ (côté terrain)	2,41		1750	4,1	2,6	4,1	2,4	0,6	0,5
Remblai/argile tourbeuse	2,50								
K₂ (côté terrain)	5,17	750	540	59,1	56,7	57,7	58,8	34,1	46,8
Excavation	6,10								
Argile tourbeuse/limon	7,50		760						
SI₃ (côté terrain, CT)	7,61	2100	2140	72,6	97,9	73,5	74,5	82,8	83,0
SI₂ (côté fouille, CF)	7,61			102,7	93,4	102,6	100,7	61,6	69,1
SI₁ (côté terrain)	9,71			101,2	97,8	102,2	102,0	88,9	89,0
SI₀ (côté fouille)	9,71			118,1	116,7	118,7	117,3	84,1	103,3
Limon argileux/graves	13,60								
Graves/marnes	15,80	8500	17600						
Bas paroi théorique	16,29	16000	53100						

- les résultats du capteur SI₀ comportent un ajout correctif de 53 kPa compte tenu des résultats de l'étude de corrélation des mesures des pressions totales avec les mesures inclinométriques (voir 4.7.6.2).

4.7.11 Comportement de l'écran après la dépose des boutons

Après la dépose des boutons provisoires, on a observé par le biais des appareillages et évalué théoriquement le comportement de l'écran pour deux phases représentatives :

- ♦ à court terme, le lendemain de la dépose des boutons (séquence 7) ;
- ♦ après environ 5 semaines depuis la dépose des boutons (séquence 8).

Pour l'évaluation de la pertinence des résultats ainsi obtenus on ne peut plus associer à l'analyse une étude de corrélation expérimentale entre les différents paramètres de mesure pour les raisons suivantes :

- ♦ après la dépose des boutons, la paroi retrouve son appui latéral au niveau du radier qui n'a pas été instrumenté (il n'est plus possible de faire une analyse quantitative des résultats expérimentaux en terme de **l'équilibre de l'écran**) ;
- ♦ la variation expérimentale (pour les deux séquences de mesure) de l'inclinaison de l'écran suivant sa profondeur (Fig. 4-44 – diagramme quasi-uniforme ; Fig. 4-45 – diagramme quasi-linéaire) ne permet plus une interprétation quantitative satisfaisante au niveau de son dérivée tandis que la densité réduite de points de mesure des pressions totales ne permet plus une interprétation quantitative satisfaisante au niveau de ses intégrales successives (il n'est plus possible de faire une analyse de corrélation en terme de **la déformée de l'écran**).

On se contente donc d'observer la variation des paramètres de mesure par rapport aux séquences précédentes et de comparer les résultats expérimentaux aux résultats théoriques.

a) Comportement de l'écran à court terme

L'écran ressent l'effet de la dépose des boutons d'une façon différente suivant sa profondeur (Fig. 4-44, Fig. 4-45 et Tableau 4-30).

Ainsi, pour ce qui concerne sa moitié supérieure, l'écran change complètement son comportement par rapport à la séquence précédente :

- ♦ la pression totale mesurée par les deux capteurs Kyowa baisse d'une façon importante (voir 4.7.9.2) tandis que l'inclinaison de l'écran observée par le biais des tubes inclinométriques augmente d'une façon importante et, de plus, en changeant le signe de son gradient suivant la profondeur ; ce mécanisme de variation des paramètres observés correspond bien à une mise en poussée (limite) du terrain situé derrière l'écran et une faible sollicitation en flexion de l'écran dont la fibre sollicitée en traction passe CT ;
- ♦ les résultats du calcul par la méthode aux coefficients de réaction (calcul à court terme) montrent une croissance encore plus importante de l'inclinaison de l'écran dans cette zone, mais, ils n'arrivent pas à associer à cette cinématique une réduction de la pression résultée au niveau de deux capteurs Kyowa.

Pour ce qui concerne sa moitié inférieure, l'écran est peu influencé par l'enlèvement des butons :

- ♦ les mesures inclinométriques ainsi que les pressions totales mesurées par les capteurs SI indiquent des modifications de faible ampleur par rapport à la séquence 6 ; ces résultats correspondent donc à une faible mobilisation supplémentaire du sol au delà d'une profondeur d'environ 7m après la dépose des butons ;
- ♦ les résultats théoriques pour les trois configurations de calcul (C_I , C_{II} , C_{III}) indiquent une variation significative de la dérivée de l'inclinaison dans la couche de limon par rapport à la séquence 6 ; la pression totale déduite au niveau des capteurs SI est faiblement modifiée par rapport à la phase précédente et donc la pression totale résultante reste dirigée vers l'arrière de l'écran montrant la même mise en butée du limon situé sous le radier ;

Il apparaît donc que l'écran, qui est obligé de fonctionner en porte-à-faux après l'enlèvement des butons, présentent un comportement de poutre encastrée dans les graves et appuyée sur l'appui élastique matérialisé par le radier. La pente de la déformée de l'écran (Fig. 4-44) et donc aussi le rapport entre le moment de flexion et la raideur en flexion s'avèrent assez réduits sur toute la hauteur de l'écran.

b) Comportement de l'écran à long terme

Cinq semaines après la dépose des butons, l'écran transmet aux instruments d'auscultation (Fig. 4-46, Fig. 4-47, Tableau 4-33) qu'il s'incline davantage, notamment dans sa moitié supérieure. Cette croissance de l'inclinaison de la déformée de l'écran peut s'expliquer par la réduction dans le temps de la raideur qu'il oppose à la sollicitation en flexion mais aussi par la croissance dans le temps de la poussée exercée par la couche d'argile (observée par le capteur K_2).

L'augmentation des pressions enregistrées par les capteurs SI_0 et SI_2 montrent, que sous l'effet de cette cinématique différée de l'écran vers la fouille, la couche de limon située sous le radier se met en butée en exerçant des pressions latérales plus élevées à son interface avec l'écran.

Les résultats des calculs par la méthode aux modules de réaction montrent que la cinématique de l'écran présente la même tendance que celle qui a été observée expérimentalement. Cette tendance est le résultat de la réduction de la raideur en flexion de sa section qu'on avait pris comme hypothèse dans le calcul.

Le comportement mécanique de l'écran reste le même que pour la séquence précédente, rassemblant à celui d'une poutre encastree dans les graves et appuyée sur un appui élastique au niveau du radier. Les déformées expérimentales et théoriques de l'écran (Fig. 4-47) montrent que sa fibre sollicitée en traction se trouve sur toute sa hauteur côté terrain. Ce résultat est en concordance avec le comportement théorique d'une poutre fonctionnant en porte-à-faux sur un appui élastique.

Annexe 4-1 : Feuilles d'étalonnage des 6 capteurs des pressions totales disponibles

Annexe 4-2 : Relevé des mesures des pressions totales à l'interface de la paroi

Annexe 4-3 : Relevé des mesures inclinométriques

Annexe 4-4 : Relevé des mesures de convergence à fil invar

Annexe 4-5 : Relevé des mesures de déformations dans les butons

Annexe 4-6 : Caractérisation géotechnique des échantillons d'argile et de limon prélevés aux environs du profil instrumenté après l'exécution des travaux

Conclusion générale

L'analyse des contraintes agissant dans les ouvrages géotechniques pour les différentes situations qui intéressent leur fonctionnement mécanique constitue un enjeu fort dans la mécanique des sols.

Ce mémoire constitue la synthèse d'une recherche doctorale consacrée à l'étude de la pertinence de la mesure des composantes normales des contraintes totales dans les sols.

Deux volets ont été approfondis à cet effet :

- ◆ l'évaluation en laboratoire de plusieurs types de capteurs de contraintes totales normales, soumis à des sollicitations contrôlées ;
- ◆ l'étude de la pertinence des mesures de pressions totales à l'interface du sol et d'une paroi moulée en vraie grandeur.

Il a été possible d'apporter quelques contributions dans ce domaine, où les recherches antérieures se sont heurtées à des difficultés importantes dans la validation des résultats obtenus.

- Le premier chapitre synthétise les résultats d'une étude bibliographique sur la mesure des composantes normales des contraintes totales en développant cinq sujets :
 - ◆ le principe de la mesure des pressions totales ;
 - ◆ la classification des capteurs de pressions totales ;
 - ◆ les phénomènes physiques affectant la discrétion de mesure ;
 - ◆ les facteurs affectant la pertinence de la mesure et les recommandations pour son amélioration ;
 - ◆ les capteurs disponibles sur le marché.

On insiste sur la notion de discrétion des capteurs ainsi que sur ses paramètres d'influence.

- Le deuxième chapitre est aussi consacré à une étude bibliographique, pour le cas particulier de la mesure des pressions totales aux interfaces des parois moulées. On s'y intéresse d'abord aux différents moyens de mesure sur ouvrage réel qui pourraient être associés à l'instrumentation d'une paroi moulée, afin de permettre d'étudier expérimentalement la pertinence de la mesure des pressions totales.

Ensuite, on présente huit expérimentations antérieures consacrées à la mesure des pressions totales sur les parois moulées, pour lesquelles on développe quelques sujets intéressant la conception d'une nouvelle expérimentation :

- ◆ les dispositifs de mesure des contraintes totales (capteurs et dispositifs de mise en place) et les moyens de mesure complémentaires ;
- ◆ la qualification des résultats expérimentaux pour trois étapes significatives du fonctionnement mécanique de l'ouvrage :
 - le bétonnage des panneaux instrumentés ;
 - le comportement du béton jeune et
 - les phases de construction ultérieures et l'ouvrage en service.

L'expérience accumulée lors de ces expérimentations est utilisée pour définir l'instrumentation future des parois moulées. L'étude bibliographique et l'analyse des capteurs utilisables pour l'instrumentation des parois moulées disponibles sur le marché ont permis de préciser :

- ◆ le choix des systèmes de mesure (capteur et dispositif de mise en place) ;
- ◆ la qualification préalable en laboratoire des capteurs ;
- ◆ le principe de conception de l'instrumentation.

Cette étude bibliographique fournit une image originale de l'état actuel des connaissances dans ce domaine particulier étroit et a grandement contribué à la conception d'une nouvelle expérimentation centrée sur l'évaluation de la pertinence des mesures de pressions totales sur les parois moulées.

- Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation en laboratoire de plusieurs types des capteurs des pressions totales. Deux types d'essais ont été réalisés à cet effet :
 - ◆ des essais hydrostatiques (destinés à valider les résultats de l'étalonnage des capteurs fournis par leur fabricants et à évaluer la sensibilité thermique de ces capteurs) ;
 - ◆ des essais en présence de sable de Fontainebleau en utilisant deux moyens d'étude expérimentale sur modèle réduit spécialement conçus pour un meilleur contrôle des champs des contraintes transmis dans les échantillons (centrifugeuse et chambre triaxiale).

Deux situations de mesure ont été étudiées : capteurs placés à l'intérieur des échantillons de sable et à leur interface avec une paroi rigide (fond du conteneur centrifugé et embases de l'appareillage triaxial). Les échantillons ont été reconstitués par pluviation afin d'obtenir une même densité, tandis que la mise en place de chaque capteur a été réalisée de la même façon pour l'ensemble d'expérimentations.

Il a été ainsi possible d'évaluer les résultats de mesure par rapport à l'estimation théorique des contraintes exercées par le sable au niveau des capteurs, ainsi que d'étudier la reproductibilité des résultats expérimentaux dans les deux moyens d'essai.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de formuler quelques conclusions sur le potentiel de mesure :

- ◆ les résultats des mesures de pressions totales à l'interface et à l'intérieur des échantillons de sable centrifugé (à l'exception de ceux obtenus avec les capteurs miniature, Kyowa BE-C) sont en bonne cohérence avec l'estimation théorique des contraintes appliquées à leur niveau ;
- ◆ l'analyse statistique des résultats expérimentaux obtenus en centrifugeuse a mis en évidence leur bonne répétabilité et une bonne cohérence par rapport à la méthode de mise en place de chaque capteur ;
- ◆ la centrifugeuse est donc capable de créer des champs des contraintes contrôlables

dans les échantillons de sable de granularité et de densité homogènes ;

- ◆ la raideur de la surface active des capteurs et la méthode de mise en place des capteurs sont vraisemblablement les paramètres principaux qui affectent la discrétion des capteurs et la pertinence de la mesure des pressions totales ; leur amélioration devra donc constituer une préoccupation lors de tout développement ultérieur des méthodologies de mesure des pressions totales ;
- ◆ les résultats expérimentaux obtenus en chambre triaxiale n'ont pas pu être évalués de façon concluante à cause probablement d'une estimation incorrecte des contraintes agissant au niveau des capteurs ;
- ◆ les résultats expérimentaux obtenus en centrifugeuse permettent de confirmer et de mieux justifier la pertinence de la mesure des pressions totales avec des capteurs possédant une surface active de raideur élevée.

Les résultats expérimentaux obtenus en chambre d'étalonnage pour les mêmes situations de mesure que celles analysées en centrifugeuse pourront être utilisés comme appui pour une future analyse des champs des contraintes agissant dans les échantillons soumis à l'essai triaxial.

Cette étude expérimentale en laboratoire constitue donc une étape significative sur le chemin sinueux qu'il faut parcourir pour la connaissance des contraintes réelles, au moins pour les situations de mesure les plus simples.

- Le dernier chapitre du mémoire est consacré à l'expérimentation de parois moulées sur le chantier de la « Trémie Pasteur » à Rouen. Son objectif principal a été l'étude de la pertinence de la mesure des pressions totales pour trois étapes significatives de la vie de l'ouvrage.

Durant le bétonnage de la paroi, les résultats des mesures de pressions totales aux interfaces verticales de la paroi avec le terrain sont en cohérence avec le comportement pseudo-fluide du béton, notamment avec l'estimation théorique du modèle bilinéaire proposé par Lings et al. (1994).

Durant le durcissement du béton, le suivi des capteurs a permis de constater que les contraintes normales aux interfaces des parois moulées tendent à revenir dans le temps vers l'état estimé au repos, avant la mise en œuvre de la paroi.

Pour ce qui concerne les phases de mise en flexion de la paroi, la pertinence des mesures de pressions totales a été analysée par l'étude de la relation entre le moment de flexion suivant la profondeur de la paroi déduit des efforts horizontaux mesurés appliqués sur la paroi (pressions totales et effort axial de butonnage) et le moment de flexion déduit des mesures inclinométriques sur la paroi et de la valeur estimée de la raideur en flexion de la section de la paroi.

Il a été possible ainsi de qualifier les résultats des mesures de pressions totales comme pertinentes par rapport aux résultats expérimentaux fournis par les autres moyens d'instrumentation, considérés en général comme plus fiables.

Évidemment, les résultats obtenus ne présentent pas un caractère absolu. Il faut procéder à d'autres expérimentations similaires avant de formuler des conclusions sur la pertinence des mesures de pressions totales aux interfaces des sols et des parois moulées. Toutefois, ces résultats, obtenus avec des moyens d'instrumentation de plus en plus perfectionnés, encouragent les expérimentateurs à procéder à des réflexions supplémentaires avant de rayer de leurs listes de fournitures les capteurs des pressions totales parce qu'ils jugent leur fiabilité réduite...

Bibliographie

AGARWAL, S. L. and VENKATESAN, S. (1965) : « **An Instrument to measure skin friction and normal earth pressure on deep foundations** », Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, Special Technical Publication No. 392, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 152-169 ;

AMAR, S., JEZEQUEL, J.-F. : « **Propriétés mécaniques des sols déterminées en place** », *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, fascicule C 220* ;

AMRANI K.(1993) : « **Pression totale au sein d'un sable : étude de la réponse d'un capteur à contre pression** », *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 159 pages* ;

ASKEGAARD, V. (1984) : « **Design basis for cells measuring shear stresses in an interface** », *Geotechnical Testing Journal*, pp. 94-98 ;

ASKEGAARD, V. (1981) : « **Design and application of stress and strain cells with small measuring errors** », *NDT International*, pp. 271-277 ;

ASKEGAARD, V. and BROWN, C.J., (1995) : « **Influence of Personal Factor on Cell Response when mounting embedded pressure cells** », *Silo Monitoring Volume 15, N° 2*, pp. 221-224 ;

AUDIBERT, J. M. and TAVENAS, F. A. (1975) : « **Discussion** » of « **Evaluation of stress cell performance** » by R. J. KRIZEK, M. H. FARZIN, A. E. Z. WISSA, and R. T. MARTIN, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT 7*, pp. 705-707 ;

BALAY, J. : « **Parois moulées. Ancrages** », *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, fascicule C 252* ;

BALAY, J. (1985): « **Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction** », *note d'information technique, 24 pages* ;

BALIGH, M. M., TORRENCE MARTIN, R., AZZOUZ, A. S. and MORISSON, M. J. (1985) : « **The piezo-lateral stress cell** », *Proceedings of 11-th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*, pp. 841-844 ;

- BAUER, G. E., SHIELDS, D. H., SCOTT, J. D. and NWABUOKEI, S.O. (1979) : « **Normal and shear stress measurements on a strip footing** », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, pp. 177-189 ;
- BJERRUM, L. and ANDERSEN, K. H. (1972) : « **In-situ measurements of lateral pressures in clay** », *Proceedings of 5-th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid*, pp. 11-19 ;
- BLIGHT, G. E. (1986) : « **Pressures exerted by materials stored in silos :part I and II** », *Géotechnique*, Vol. 36, pp. 33-56 ;
- BLIVET, J.-C., BONAFOUS, FRANK, R., JOSSEAUME, H. (1981) : « **Comportement d'un quai en paroi moulée au port du Havre** », *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 113, pp. 109-134 ;
- BOULEBNANE, A. (1996) : « **Contraintes totales dans les sols : étude sur modèles en macrogravité et en semi-grandeur** », *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 293 pages ;
- BOULEBNANE, A., LAREAL, P., LONG, N.T. (1995) : « **Bearing capacity of pneusol** », *10-th Danubian Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Mamaia, Vol. 1*, pp. 41-47 ;
- BOULEBNANE, A., LAREAL, P., GARNIER, J. and COTTINEAU, L.-M.(1994) : « **Mesures de la pression des sols dans des modèles réduits de sable centrifugés** », *7th International IAEG Congress, Balkema, Rotterdam*, pp. 575-581 ;
- BOREL, S. (2001) : « **Comportement et dimensionnement des fondations mixtes** », *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 300 pages ;
- BROWN, S. F. (1977) : « **State-of-the-Art Report on Field Instrumentation for Pavement Experiments** », *Transportation Research, Rec. No. 640*, pp. 13-28.
- BUISSON, R., GABRIEL, S., et SERRIERE, C. (1989) : « **Capteur d'action grain paroi à grande raideur** », *Construction métallique*, No. 2, pp. 19-30 ;
- CAQUOT, A. et KERISEL, J. (1966) : « **Traité de Mécanique des Sols** », *Gauthier-Villard, Paris*, quatrième édition, pp. 223-226 ;
- CLAYTON, C. R. I. and BICA, A. V. D. (1993) : « **The design of diaphragm-type boundary total stress cells** », *Géotechnique*, Vol. 43, pp. 523-535 ;
- CLAYTON, C. R. I. and BICA, A. V. D. (1995) : « **Discussion** » on « **The design of diaphragm-type boundary total stress cells** » *Géotechnique*, Vol. 45, pp. 349-351 ;

CLAYTON, C. R. I. KHATRUSH, S. A. BICA, A. V. D., and SIDDIQUE, A (1989) : « **The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation** » *Geotechnical Testing Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 69-76* ;

CORTÉ J.-F., GARNIER J. (1986) : « **Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique** » *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées No. 146, pp. 5-28* ;

DELATTRE L., et MESPOULHE, L. (1996) : « **Etude expérimentale du comportement du quai en eau profonde du port de Calais** », *Collection des Etudes et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées, GT65, 193 pages* ;

DELATTRE L., DUCA, V., MESPOULHE, L. (1997) : « **Etude expérimentale du quai d'Osaka** », *Rapport de recherche du LCPC, Paris, 85 pages + annexes* ;

DELATTRE L., DUCA, V., SCHERRER, P., et RIVIERE, P. (1999) : « **Efforts d'ancrage du quai d'Osaka au Port Autonome du Havre** », *proceedings of the twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, vol. 2, pp. 713-718* ;

DELATTRE, L. (1999) : « **Comportement des écrans de soutènement. Expérimentations et calculs** », *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 492 pages* ;

DIBIAGIO, E. et ROTI, J. A. (1972) : « **Earth pressure measurements on a braced slurry-trench wall in soft clay** », *Proceedings of 5-th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid, vol. I, pp. 473-483* ;

DUNNICLIFF, J. (1988) : « **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance** », *John Wiley & Sons, Inc., pp. 165-184* ;

DUPLA, J.-C. (1995) : « **Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable** », *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 423 pages* ;

ERDEMGIL, M. (1979) : « **A strain gage installed earth pressure measuring device** », *Design parameters in geotechnical engineering, BGS, London, Vol. 2, pp. 35-40* ;

FILZ, G. M. and DUNCAN, J. M. (1992) : « **An experimental and analytical study of earth loads on rigid retaining walls** », *Geotechnical Engineering Division, Dep. of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia VA, 345 pages* ;

FILZ, G. M. and DUNCAN, J. M. (1993) : « **Drift of flush-mounted pressure cell readings** » *Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 432-441* ;

GARNIER, J. and COTTINEAU, L.-M. (1988) : « **La centrifugeuse du LCPC : Moyens de préparation et instrumentation** », *Centrifuge '88, Balkema, Rotterdam*, pp. 83-92 ;

GARNIER, J., TERNET, O., COTTINEAU, L.-M., BROWN C.J. (1998) : « **Placement of embedded pressure cells** », *Géotechnique, Vol. XLIX, 3*, pp. 405-414 ;

GARNIER, J., KUS, B., LEVACHER, D.(1998) : « **Cartographie des densités de massifs de sable reconstitués par pluviation** », *6^e Colloque franco-polonais de mécanique des sols, Douai*, pp. 105-112 ;

GARNIER, J., DERKX, F., COTTINEAU, L.-M., RAULT, G. (1999) : « **Etudes géotechniques sur modèles centrifugés. Evolution des matériels et des techniques expérimentales** », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 223*, pp. 27-50 ;

GUEZOULI, A. (1985) : « **Mesure des pressions au contact sol-fondations ; utilisation du capteur pneumatique GLÖTZL** » *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 220 pages ;

HANNA, T. H. (1985) : « **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering** », *Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld*, 843 pages ;

INGRAM, J. K. (1965) : « **The development of a free-field soil-stress gage for static and dynamic measurements** », *Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, Special Technical Publication No. 392, American Society for Testing and Materials, Philadelphia*, pp. 20-35 ;

JARETT, N. D, BROWN, C. J. and MOORE, D. B. (1992) : « **Obtaining accurate pressure measurements in a stored granular medium** », *Canadien Geotechnical Journal, Vol. 29*, pp. 217-224 ;

JOSSEAUME, H. et STENNE, R. (1979) : « **Etude expérimentale d'une paroi moulée ancrée par 4 nappes de tirants** » *Revue Française de Géotechnique n° 8*, pp. 51-64 ;

JEZEQUEL, J., GOULET, G., LEMEE, G. et LE MEHAUTE, A. (1972) : « **Mesures de pression totale** », *Bulletin de Liaison LCPC No. 58*, pp. 10-13 ;

KERISEL, J., FERRAND, J., LAREAL, P. et CLEMENT, P. (1972) : « **Mesures de poussée et de butée avec 42 boutons asservis** », *Proceedings of 5-th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid*, pp. 265-273 ;

- KHAN, I. H. (1983) : « **An electro-capacitance gauge for stress measurements** », *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich*, pp. 177-186 ;
- KLETZEL, G., TKATCHEV, V. and LEBEDEV, J. (1983) : « **Practice of measurements of stressed state of rock mass by means of a multicomponent dilatometer** » *International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zurich*, pp. 187-196 ;
- KRUSE, G. H. (1965) : « **Measurement of embankment stresses on a hundred-foot-high retaining wall** », *Instruments and Apparatus for Soil and Rock Mechanics, ASTM*, pp. 131-142 ;
- LABANIEH, S. and ELHAJAL, S. (1991) : « **Reliability of stress measurements in geomechanics** », *Field Measurements in Geotechnics, Sorum, Balkema, Rotterdam*, pp. 153-159 ;
- LEVILLAIN, J.-P. (1972) : « **Capteur de pressions totale à contre pression pneumatique et débit contrôlé** », *Bulletin de liaison LCPC No. 58*, pp. 14-17 ;
- LEVILLAIN, J.-P. (1973) : « **Capteurs de pression totale dans les sols** », *Rapport de recherche No. 1, LRPC Angers, parties 1, 2, 3* ;
- LEVILLAIN, J.-P. (1973) : « **Mesure des pressions derrière et sous un mur de soutènement** », *Rapport de recherche No. 22, LCPC* ;
- LINGS, M.L., NG, C.W.W., NASH, D.F.T. (1994) : « **The lateral pressure of wet concrete in diaphragm wall pannels cast under bentonite** », *Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Engng, 107*, pp. 163-172 ;
- LINGS, M.-L., NASH, D.F.T. NG, C.W.W. (1993) : « **Reliability of earth pressure measurements adjacent to a multi-propped diaphragm wall** », *Retaining structures, Thomas Telford, London*, pp. 258-269 ;
- LINGS, M.L., NASH, D.F.T., NG, C.W.W., BOYCE, M. D. (1991) : « **Observed behaviour of a deep excavation in Gault Clay : a preliminary appraisal** », *Proc. 10th European Conf. soil mechanics and foundation engineering*, pp. 467-470 ;
- MAGNAN, J.-P. (1997-1998) : « **Cours de mécanique des sols et des roches** », *Volume I, ENPC*, pp. 2.1-2.26 ;
- MAGNAN, J.-P. : « **Description, identification et classification des sols** », *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, fascicule C 208* ;
- MAGNAN, J.-P. : « **Déformabilité des sols. Tassements. Consolidation** », *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, fascicule C 214* ;

MAGNAN, J.-P. : « **Corrélations entre les propriétés des sols** », *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, fascicule C 219* ;

MARCHAL, J., PERRIN, J. et OLLIER, B. (1975) : « **Détermination des contraintes totales dans les sols. Principe de mesure** », *Bulletin de Liaison LCPC No. 76*, pp. 16-19 ;

MARCHAL, J., URSAT, P. (1972) : « **Expérimentation in situ sur paroi moulée ancrée en tête** », *Proceedings of 5-th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid, vol. 1*, pp. 275-283 ;

MEMIER, B. (1980) : « **Contribution à l'étude des capteurs de pression totale dans les sols** », *Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 347 pages ;

PACOVSKY, J., BARTAK, J. and BUCEK, M. (1991) : « **Measuring of contact stress between soil and rock mass and engineering structure** », *Field Measurements in Geotechnics, Sorum, Balkema, Rotterdam*, pp. 61-70 ;

PAIKOWSKY, S. G. and HAJDUK, E. L. (1997) : « **Calibration and use of grid-based tactile pressure sensors in granular material** », *Geotechnical Testing Journal, Vol. 20, No. 2*, pp. 218-241 ;

PAIKOWSKY, S. G. PLAYER, C. M. and CONNORS, P. J. (1995) : « **A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces** », *Geotechnical Testing Journal, Vol. 18, No. 2*, pp. 168-193 ;

PAIKOWSKY, S. G. PLAYER, C. M. and CONNORS, P. J. (1996) : « **Discussion** » on « **A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces** », *Geotechnical Testing Journal, Vol. 19, No. 4*, pp. 446-451 ;

PAKDAMAN, K. (1961) : « **Contribution à l'étude des contraintes au sein d'un massif pulvérulent semi-infini et homogène** », *Ed. Eyrolles*, 101 pages ;

PENMAN A. D. M., ROCHA, FILHO, P., TORNIATTI, N.B., GUSMAO, L. A. P. (1991) : « **Horizontal plate gauges used in large dams** », *Field Measurements in Geotechnics, Sorum, Balkema, Rotterdam*, pp. 251-260 ;

PICHA, J. (1991) : « **A contribution to measurements of rock pressure on concrete constructions using hydraulic pressure cells** » *Field Measurements in Geotechnics, Sorum, Balkema, Rotterdam*, pp. 71-75 ;

PINCENT, B., LALAUT, DELATTRE, L., LAVISSE, (1991) : « **Calais : instrumentation d'un quai en eau profonde** », *Proceedings of X CEMSTF Firenze, Balkema, vol. 2*, pp. 737-740 ;

PLANTEMA, I. G. (1953) : « **A soil pressure cell and calibration equipment** », *Proceedings of 3-rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich*, pp. 283-288 ;

PLANTEMA, I. G. (1953) : « **Soil pressure measurements during loading tests on a runway** », *Proceedings of 3-rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich*, pp. 289-298 ;

PRAGER, R. (1974) : « **La mesure des contraintes dans les sols et la cellule GLOTZL de pression totale** », *Thèse de doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble*, 126 pages ;

PRECUPANU, D. (1996) : « **Theory of Elasticity** », *Université Technique « Gh. ASACHI » IASI*, 356 pages ;

PRODINGER, W. (1983) : « **Measurement of the redistribution of stress around deep foundations** », *International symposium on Field Measurements in Geomechnics, Zurich*, pp. 543-551 ;

O'ROURKE, J. E. (1978) : « **Soil Stress Measurement Experiences** », *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, GT.12*, pp. 1501-1514 ;

RODATZ, W., HARTUNG, M. et MAYBAUM, G. (1994) : « **Back analysis of geotechnical measurements at the Port of Hamburg based on FEM** », *Computer Methods and Advances in Geomechanics, Sinwardane & Zaman, Balkema, Rotterdam*, pp. 2005-2010 ;

RODATZ, W., MAYBAUM, G. et GATTERMANN, J. (1995) : « **Pressure and deformation measurements at two retaining walls at the port of Hamburg** », *FMGM 95 – 4th international symposium*, pp. 291-299 ;

REHNMAN, S. E. and BROMS, B. B. (1972) : « **Lateral pressures on basement wall. Results from full-scale tests** », *Proceedings of 5-th European Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Madrid* ;

SELIG, E. T. et REINIG, I. G.(1982) : « **Vertical soil extensometer** », *Geotechnical Testing Journal, Vol. 5, No. 3/4*, pp. 76-84 ;

SOKOL, L. BEAUFONT, J. et PASSERIEUX, D. (1989) : « **Conception et caractéristiques de fonctionnement des capteurs d'action BETA** », *Construction métallique, No. 2*, pp. 31-34 ;

TAYLOR, D. W. (1948) : « **Field measurement of soil pressures in foundations, in pavements and on walls and conduits including a review of work of the fact finding survey and other field investigations of the Corps of Engineers of the U. S.** »

Army », *Proceedings of the 2-nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, pp. 84-89* ;

TERZAGHI, K., PECK, R. B. (1967) : « **Soil Mechanics in Engineering Practice** », *John Wiley and Sons, New York, Second Edition, Art. 67, pp. 648-660* ;

TERZAGHI, K. (1962) : « **Measurement of stresses in rock** » *Géotechnique Vol. 12, No. 2, pp. 105-124* ;

THOMAS, H. S. H. and WARD, W. H. (1969) : « **The design construction and performance of a vibrating-wire earth pressure cell** », *Géotechnique, Vol. 19, pp. 39-51* ;

TRIANDAFILIDIS, G. E. (1974) : « **Soil-stress gage design and evaluation** », *Journal of Testing and Evaluation, American Society for Testing and Materials, Vol. 2, No. 3, pp. 146-158* ;

TROLLOPE, D. H. and LEE, I. K. (1961) : « **The measurement of soil pressures** », *Proceedings of 5-th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, pp. 493-499* ;

UFF, J. F. (1970) : « **In-situ measurements of earth pressure for a quay wall at Seaforth, Liverpool** », *Proceedings of the Conference on In Situ Investigations in Soil & Rock, British Geotechnical Society, London, pp. 229-239* ;

URIEL, S., OTEO, C., S. (1977) : « **Stress and strain beside a circular trench wall** », *Proc. 9th Int. Conf. soil mechanics and foundation engineering, Tokyo, vol. 1, pp. 781-788* ;

URSAT, P., ZYGLER, M., MARCHAL, J. (1974) : « **Parois moulées expérimentales. Traversée de Mulhouse par le canal du Rhône au Rhin** », *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 74, pp. 73-86* ;

WATTS, K. S. and CHARLES, J. A. (1988) : « **In situ measurement of vertical and horizontal stress from a vertical borehole** », *Géotechnique, Vol. 38, No. 4, pp. 619-626* ;

WEILER, W. A., and KULHAWY, F. H. (1982) : « **Factors affecting stress cell measurements in soil** », *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, GT.12, pp. 1529-1548* ;

WIFFEN, A.C. (1964) : « **Piezoelectric gauge for measuring dynamic stresses under roads** », *Bulletin RILEM, No. 23, pp. 95-97* ;

WONG, H. Y. (1974) : « **Some design and performance considerations of diaphragm type pressure cells using strain gauges** », *Géotechnique, Vol. 24, pp. 93-99* ;

Annexes

Annexe 2-1 : Types des capteurs des pressions totales utilisables pour les mesures sur les parois moulées

Distributeur (Fabricant)	Caractéristiques générales			Transducteur		Système de pose	Prix catalogue (FHT)		Observations
	Type	Diam. (cm)	EM (kPa)	Type	Position		Capteur	Syst. pose	
Boart Longyear (Slope Indicator)	Jack out*	23	700	- acoustique (1CV)	extérieur	- fourni** (vérin)	4600	2500	- sonde température RTD incluse ;
	- action indirecte -1 face active (éthylène glycol)			23			2100		- pneumatique
Soil Instruments Limited	Jack out*	24	500; 1000 ; < 3500	- acoustique	extérieur	-fourni (vérin+plaque d'appui)	5750	3750	- équipé d'un piézomètre
	- action indirecte -1 face active			24			- pneumatique		3500
Geokon (Geokon)	4820 (jackout *) - action indirecte -1 face active	15,2	350, 700 ; 1700	- acoustique (1CV)	extérieur	- non fourni	3750		- raideur surface active non précisée
Glötzl France Géotechnique (Glötzl)	-action indirecte -coussin hydraulique (huile, mercure)	17	200 ; 500 ; 2000 ;	- contre pression d'air	extérieur	-fourni** (vérin+plaque support)	2300	3500	- raideur surface active non précisée
		15 x 25		- acoustique (1CV)			4100		
		20 x 30		- électrique			4400		
Phimesures (Kyowa)	BE-F -action indirecte -1 face active (Hg)	20	200 ; 500 ; 1000	- électrique (4 jauges à trame pelliculaire)	intérieur	- non fourni	8700		- raideur surface active très importante ($\delta/D < 1/100000$) ;
TLM (Sonepar Electronique)	KD-B -action indirecte -1 face active	20	200 ; 500 ; 1000	- électrique (4 jauges à trame pelliculaire)	intérieur	- non fourni	9000		- raideur surface active non précisée
Geonor (Geonor)	P-100	16,5	300	- acoustique (2 CV)	intérieur	- non fourni	7600		- raideur surface active non précisée
	P-105 -action directe -1 face active	23	700				11400		

* - capteur conçu spécialement pour les mesures de pressions totales exercées sur les parois moulées ;

** - sur commande spéciale ;

Abréviation : CV - corde vibrante ;

EM - étendue de mesure.

Annexe 4-1 : Feuilles d'étalonnage des six capteurs des pressions totales disponibles

検査成績表
CALIBRATION SHEET

土木用変換器
TRANSDUCERS FOR CIVIL ENGINEERING



型式名 Model	BE-5KF		製造番号 Serial No.	8Z0670005		検査年月日 Inspected date	1999.2.8	
温度 Temp.	23℃	湿度 Humid.	35%	検査者 Inspector	四方田	責任者 Supervisor	宮田	
測定範囲, 容量 Measuring range, Capacity			0 ~ 5 #		計器長 Instrument length			
1. 定格出力 Rated output	1275 2549	$\mu V/V$ $\times 10^{-6}$	6. 計器の線膨張係数 β_s Applicable coefficient of linear expansion (of Transducer)		*** $\times 10^{-6}/^{\circ}C$			
2. 初期不平衡 Initial bridge unbalance	+43 +35	$\mu V/V$ $\times 10^{-6}$	7. 零点 S_0 Zero output		*** $\times 10^{-6} (^{\circ}C)$			
3. 校正係数 Calibration constant	0.00392 0.00196	#/ $\mu V/V$ #/1.0 $\times 10^{-6}$	8. 温度係数 β Temperature calibration constant		*** $^{\circ}C/1 \times 10^{-6}$			
4. 非直線性 Nonlinearity	0.22	%RO	9. 絶縁抵抗 Insulation resistance		10000 M Ω (50VDC) 以上			
5. 入出力抵抗 Input & output resistance	入力 Input 出力 Output	350.3 Ω 350.7 Ω	注 $1 \mu V/V = 2 \times 10^{-6}$ 等価ひずみ (G.F.=2.00) Note Equivalent strain					
単位 Unit.....# kgf/cm² mm deg mm kgf								

注 ****の個所は、本製品の検査に該当しない項目です。
Note. The inspection item marked with asterisk are not applied to this instrument.

型式名 Model	BE-5KF		製造番号 Serial No.	8Z0670002		検査年月日 Inspected date	1999.2.8	
温度 Temp.	23℃	湿度 Humid.	35%	検査者 Inspector	四方田	責任者 Supervisor	宮田	
測定範囲, 容量 Measuring range, Capacity			0 ~ 5 #		計器長 Instrument length			
1. 定格出力 Rated output	1362 2723	$\mu V/V$ $\times 10^{-6}$	6. 計器の線膨張係数 β_s Applicable coefficient of linear expansion (of Transducer)		*** $\times 10^{-6}/^{\circ}C$			
2. 初期不平衡 Initial bridge unbalance	+46 +92	$\mu V/V$ $\times 10^{-6}$	7. 零点 S_0 Zero output		*** $\times 10^{-6} (^{\circ}C)$			
3. 校正係数 Calibration constant	0.00367 0.00184	#/ $\mu V/V$ #/1.0 $\times 10^{-6}$	8. 温度係数 β Temperature calibration constant		*** $^{\circ}C/1 \times 10^{-6}$			
4. 非直線性 Nonlinearity	0.19	%RO	9. 絶縁抵抗 Insulation resistance		10000 M Ω (50VDC) 以上			
5. 入出力抵抗 Input & output resistance	入力 Input 出力 Output	349.9 Ω 349.8 Ω	注 $1 \mu V/V = 2 \times 10^{-6}$ 等価ひずみ (G.F.=2.00) Note Equivalent strain					
単位 Unit.....# kgf/cm² mm deg mm kgf								

注 ****の個所は、本製品の検査に該当しない項目です。
Note. The inspection item marked with asterisk are not applied to this instrument.

Calibration Record

Jack Out Total Pressure Cell

Customer	INTERFELS GMBH	Serial No.	68980
Cust. No.	15940	Part No.	52618230
Order No.	90477	Range	100 psi
Date	05/20/1999	Cable	50613524
Cal. By.	cm	Length	33 Meters
Note			

Conversion Factors for Serial No. 68980

Referenced To Standard Atmosphere*

Units	Manual ABC Factors			IDA ABC Factors		
	A	B	C	A	B	C
psi	-0.000024223	-0.0048374	251.26	-43.062	-6.4499	251.26
ft H2O	-0.000055873	-0.011158	579.56	-99.330	-14.878	579.56
kN/m ² (kPa)	-0.00016701	-0.033353	1732.3	-296.90	-44.470	1732.3
m H2O	-0.000017030	-0.0034010	176.65	-30.276	-4.5347	176.65
bar	-0.0000016701	-0.00033353	17.323	-2.9690	-0.44470	17.323
kg/cm ²	-0.0000017030	-0.00034010	17.665	-3.0276	-0.45347	17.665

IF Factor = T

Temperature Coefficient = -0.0032 PSI/°C

RTD Offset: 2.2 °C

Test Data

Referenced To Standard Atmosphere*

PSI	Frequency	% FS Error
0.0	3122.82	-0.07
9.1	3063.77	-0.03
18.2	3003.09	0.08
27.3	2941.78	0.10
36.4	2879.81	0.04
45.5	2816.63	-0.04
54.6	2751.47	-0.03
63.7	2684.64	-0.01
72.8	2616.58	-0.04
81.9	2546.52	-0.04
91.0	2474.28	0.00
100.0	2400.54	0.06

Calibrated at = 21.9 °C

RTD Reading = 24.1 °C

*Standard Atmosphere = 14.696 psi, 1013 millibar.

Annexe 4-1 : Feuilles d'étalonnage des six capteurs des pressions totales disponibles

Calibration Record

Jack Out Total Pressure Cell

Customer	INTERFELS GMBH	Serial No.	68981
Cust. No.	15940	Part No.	52618230
Order No.	90477	Range	100 psi
Date	05/19/1999	Cable	50613524
Cal. By.	cm	Length	31 Meters
Note			

Conversion Factors for Serial No. 68981

Referenced To Standard Atmosphere*

Units	Manual ABC Factors			IDA ABC Factors		
	A	B	C	A	B	C
psi	-0.000029640	0.017163	236.14	-52.693	22.884	236.14
ft H2O	-0.000068368	0.039589	544.68	-121.54	52.786	544.68
kN/m ² (kPa)	-0.00020436	0.11834	1628.1	-363.30	157.78	1628.1
m H2O	-0.000020839	0.012067	166.02	-37.047	16.089	166.02
bar	-0.0000020436	0.0011834	16.281	-3.6330	1.5778	16.281
kg/cm ²	-0.0000020839	0.0012067	16.602	-3.7047	1.6089	16.602

IF Factor = T

Temperature Coefficient = -0.0174 PSI/°C

RTD Offset: 2.6 °C

Test Data

Referenced To Standard Atmosphere*

PSI	Frequency	% FS Error
0.0	3126.32	0.10
9.1	3072.42	-0.02
18.2	3017.13	-0.09
27.3	2959.60	0.01
36.4	2902.25	-0.11
45.5	2841.82	0.04
54.6	2781.02	0.03
63.7	2718.64	0.03
72.8	2654.54	0.04
81.9	2588.76	0.03
91.0	2521.27	0.00
100.0	2452.48	-0.04

Calibrated at = 22.4 °C

RTD Reading = 25.0 °C

*Standard Atmosphere = 14.696 psi, 1013 millibar.

Annexe 4-1 : Feuilles d'étalonnage des six capteurs des pressions totales disponibles

Calibration Record

Jack Out Total Pressure Cell

Customer	INTERFELS GMBH	Serial No.	68982
Cust. No.	15940	Part No.	52618230
Order No.	90477	Range	100 psi
Date	05/20/1999	Cable	50613524
Cal. By.	cm	Length	29 Meters
Note			

Conversion Factors for Serial No. 68982

Referenced To Standard Atmosphere*

Units	Manual ABC Factors			IDA ABC Factors		
	A	B	C	A	B	C
psi	-0.000029139	0.010108	242.30	-51.802	13.478	242.30
ft H2O	-0.000067213	0.023317	558.91	-119.49	31.089	558.91
kN/m ² (kPa)	-0.00020090	0.069696	1670.6	-357.16	92.927	1670.6
m H2O	-0.000020486	0.0071070	170.35	-36.420	9.4760	170.35
bar	-0.0000020090	0.00069696	16.706	-3.5716	0.92927	16.706
kg/cm ²	-0.0000020486	0.00071070	17.035	-3.6420	0.94760	17.035

IF Factor = T

Temperature Coefficient = -0.0059 PSI/°C

RTD Offset: 2.1 °C

Test Data

Referenced To Standard Atmosphere*

PSI	Frequency	% FS Error
0.0	3061.33	0.16
9.1	3008.26	-0.09
18.2	2952.72	-0.10
27.3	2895.69	-0.06
36.4	2837.54	-0.04
45.5	2778.03	0.00
54.6	2717.33	0.01
63.7	2655.05	0.03
72.8	2591.21	0.04
81.9	2525.67	0.05
91.0	2458.36	0.05
100.0	2390.98	-0.11

Calibrated at = 20.7 °C

RTD Reading = 22.8 °C

*Standard Atmosphere = 14.696 psi, 1013 millibar.

Calibration Record

Jack Out Total Pressure Cell

Customer	INTERFELS GMBH	Serial No.	68983
Cust. No.	15940	Part No.	52618230
Order No.	90477	Range	100 psi
Date	05/20/1999	Cable	50613524
Cal. By.	cm	Length	27 Meters
Note			

Conversion Factors for Serial No. 68983

Referenced To Standard Atmosphere*

Units	Manual ABC Factors			IDA ABC Factors		
	A	B	C	A	B	C
psi	-0.000026555	0.0070833	238.36	-47.208	9.4445	238.36
ft H2O	-0.000061253	0.016339	549.80	-108.89	21.785	549.80
kN/m ² (kPa)	-0.00018309	0.048838	1643.4	-325.49	65.117	1643.4
m H2O	-0.000018670	0.0049801	167.58	-33.191	6.6401	167.58
bar	-0.0000018309	0.00048838	16.434	-3.2549	0.65117	16.434
kg/cm ²	-0.0000018670	0.00049801	16.758	-3.3191	0.66401	16.758

IF Factor = T

Temperature Coefficient = -0.0032 PSI/°C

RTD Offset: 2.3 °C

Test Data

Referenced To Standard Atmosphere*

PSI	Frequency	% FS Error
0.0	3132.03	0.05
9.1	3074.69	0.00
18.2	3015.95	-0.02
27.3	2955.82	-0.01
36.4	2894.60	-0.03
45.5	2831.78	-0.03
54.6	2767.43	-0.01
63.7	2701.32	0.02
72.8	2633.52	0.04
81.9	2564.00	0.05
91.0	2492.35	0.06
100.0	2420.55	-0.08

Calibrated at = 19.6 °C

RTD Reading = 21.9 °C

*Standard Atmosphere = 14.696 psi, 1013 millibar.

Mise en place des capteurs: relevé des pressions (atm. et hydrostatique) avec les capteurs Slope Indicator

Date	No. série	Description phase	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.- 68982 (SI ₂)			Slope I. -68983 (SI ₃)		
			temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa
C. Installation des capteurs sur la cage														
07-mars		Après installation des capteurs sur la cage (cage horizontale)	14,9	3124,87	-2,5	18,3	3127,42	0,2	14,4	3064,64	-2,3	15,3	3132,01	0,5
D. Mise en place de la cage														
09-mars 10h	0	Mesure "0" (capteurs en position vert./ /cage vert. avant descente)	10,9	3124,62	-3,4	10,9	3127,8	-0,6	10,0	3062,44	-0,8	10,9	3133,16	-1,9
09-mars 10h25	1	Après pose cage (NSC=5,43, NB=5,08) pression hydrost. niveau capteur	14,4	3041,1	85,3	14,4	3032,58	107,59	14,5	2990,42	81,5	13,8	3056,23	81,4
					106,1			106,1			81,6			81,6
d-mars 10h50	2	Après pose cage (NSC=5,43, NB=5,28) pression hydrost. niveau capteur	15,4	3040,02	86,4	15,4	3031,62	108,5	15,4	2989,72	82,3	15,3	3054,65	83,1
					108,5			108,5			83,9			83,9
09-mars	3	Après soulèv. cage (7cm) (NSC=5,50, NB=4,98) pression hydrost. niveau capteur	15	3043,87	82,4	15,7	3035,69	103,9	15,5	2993,45	78,1	15,5	3058,91	78,5
					104,2			104,2			79,6			79,6
		pression atmosphérique courante	101,3	kPa	07-mars (valeur standard prise par défaut)									
		pression atmosphérique courante	102,6	kPa	09-mars 102,8 (au niveau de la mer)									

Bétonnage panneaux S81, S82 et S83 : relevé des pressions avec les capteurs Slope Indicator

Date	No. série	Description phase	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.- 68982 (SI ₂)			Slope I. -68983 (SI ₃)		
			temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa

Annexe 4-2/2 : capteurs Slope Indicator

Relevé des mesures de pression lors du bétonnage des panneaux S81, S82, S83

E. Mise en œuvre du béton en séries de 2 camions (6mc)														
09-mars 12h50	4	Après série 1 (NSC=5,50 ; NB=5,28) <i>pression hydrost. niveau capteur</i>	15,6	3042,43	83,9	15,8	3033,29	106,6	15,5	2989,14	82,9	15,6	3053,07	84,8
					107,7			107,7			83,1			83,1
09-mars 13h00	5	Après série 2 (NB=5,35) et mise en contact capteurs SI <i>pression hydrost. niveau capteur</i> <i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 11 bars)	15,6	2979,52	149,2	15,8	3023,5	117,6	15,5	2961,82	113,7	15,6	3028,15	111,3
					108,5			108,5			83,9			83,9
					35,1			35,1			35,1			35,1
09-mars 13h18	6	Après série 2 (NB=5,25) et capteurs SI en contact le sol <i>pression hydrost. niveau capteur</i> <i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 9,5 bars)	15,6	2975,01	153,9	15,8	3021,12	120,2	15,5	2954,96	121,4	15,6	3027,08	112,4
					107,3			107,3			82,7			82,7
					30,3			30,3			30,3			30,3
09-mars 13h30	7	Après série 3 (NB=5,04) suppression vérinage SI <i>pression hydrost. niveau capteur</i> <i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 14 bars)	15,5	2962,39	166,8	15,8	3018,27	123,4	15,5	2946,14	131,2	15,6	3014,25	126,0
					104,9			104,9			80,3			80,3
					44,6			44,6			44,6			44,6
09-mars 13h50	8	Après série 4 (NB=5,04) pression vérinage en diminution <i>pression hydrost. niveau capteur</i> <i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 13,5 bars)	15,5	2969,38	159,6	15,7	3016,61	125,3	15,5	2942,64	135,1	15,6	3016,26	123,9
					104,9			104,9			80,3			80,3
					43,0			43,0			43,0			43,0
09-mars	9	Après série 5 (NB=5,48) pression vérinage en diminution <i>pression hydrost. niveau capteur</i> <i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 12 bars)	15,6	2962,73	166,4	15,8	2999,8	144,0	15,4	2937,69	140,6	15,5	3011,65	128,7
					110,0			110,0			85,4			85,4
					38,3			38,3			38,3			38,3

Bétonnage panneaux S81, S82 et S83 : relevé des pressions avec les capteurs Slope Indicator

Date	No. série	Description phase	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.- 68982 (SI ₂)			Slope I.-68983 (SI ₃)		
			temp. °C	fréquence Hz	pression kPa	temp. °C	fréquence Hz	pression kPa	temp. °C	fréquence Hz	pression kPa	temp. °C	fréquence Hz	pression kPa
E. Mise en œuvre du béton en séries de 2 camions (6mc) - suite														
09-mars 14h35	10	Après série 6 (NB=5,08) pression vérinage en diminution	16,2	2970,18	158,8	16,5	2986,7	158,3	15,7	2933,42	145,4	15,7	2999,41	141,6

Annexe 4-2/2 : capteurs Slope Indicator

Relevé des mesures de pression lors du bétonnage des panneaux S81,S82, S83

		<i>pression hydrost. niveau capteur</i>			105,3				105,3				80,8			80,8
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 11 bars)			35,1				35,1				35,1			35,1
09-mars 14h45	11	Après série 7 (NB=5,03) et après mise en contact K2	16,6	2979	149,7	16,7	2988,15	156,7	16,4	2932,58	146,3	16,3	2992,58	148,8		
		<i>pression hydrost. niveau capteur</i>			104,9			104,9			80,3			80,3		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 10 bars)			31,9			31,9			31,9			31,9		
09-mars 15h35	12	Après série 8 (NB=5,12) et mise en contact du K5	16,7	2985,19	143,4	16,7	2987,16	157,8	16,5	2927,16	152,3	16,5	2988,21	153,3		
		<i>pression hydrost. niveau capteur</i>			105,7			105,7			81,0			81,0		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 8,5 bars)			27,1			27,1			27,1			27,1		
09-mars 16h00	13	Après série 9 (NB=5,01) et pression vérinage en diminution	16,8	2996,9	131,3	16,8	3000	143,6	16,6	2937,24	141,1	16,6	2991,24	150,2		
		<i>pression hydrost. niveau capteur</i>			104,5			104,5			79,8			79,8		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 7,9 bars)			25,2			25,2			25,2			25,2		
09-mars 16h20	14	Après série 10 (NB=5,40) pression vérinage en diminution	16,8	2981,77	146,9	16,9	3006,81	136,0	16,7	2935,33	143,2	16,7	2998,71	142,3		
		<i>pression hydrost. niveau capteur</i>			109,4			109,4			85,1			85,1		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 7 bars)			22,3			22,3			22,3			22,3		
09-mars 16h55	15	Après fin béton.(21x6mc) NB=5,51 pression vérinage stationnaire	17	2968,69	160,3	16,9	3006,28	136,6	16,8	2943,88	133,7	16,7	2998	143,1		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 7 bars)			22,3			22,3			22,3			22,3		

Après la fin du bétonnage : relevé des pressions avec les capteurs Slope Indicator

Heure mesure	No. série	Description phase	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.- 68982 (SI ₂)			Slope I. -68983 (SI ₃)		
			temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression	temp.	fréquence	pression
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa

F. Après la fin du bétonnage le même jour

09-mars 17h10	16	Après fin bétonnage (21 x 6mc) pression vérinage stationnaire	17	2961,36	167,8	17	3003,87	139,3	16,8	2935,22	143,3	16,8	2987,28	154,3		
		<i>pression de contact capteur/sol</i> (p _{vérin} = 7 bars)			22,3			22,3			22,3			22,3		

Annexe 4-2/2 : capteurs Slope Indicator

Relevé des mesures de pression lors du bétonnage des panneaux S81,S82, S83

09-mars 17h25	17	Après la réduction de la pression de vérinage à moitié pression de contact capteur/sol (p _{vérin} = 3,5 bars)												
			17	2968,8	160,2	17	3003,28	140,0	16,9	2932,53	146,3	16,8	2992,05	149,3
					11,2			11,2			11,2			11,2
09-mars 17h55	18	Après la conservation de la pression vérinage stationnaire pression de contact capteur/sol (p _{vérin} = 3,8 bars)												
			17,1	2972,6	156,3	17	3004,81	138,3	17	2933,59	145,1	16,9	2992,87	148,4
					12,1			12,1			12,1			12,1
09-mars 18h00	19	Après la réduction de la pression de vérinage pression de contact capteur/sol (p _{vérin} = 2 bars)												
			17,2	2979,75	149,0	17,1	3007,52	135,2	17	2939,94	138,1	16,9	2998,59	142,4
					6,4			6,4			6,4			6,4
09-mars 18h30	20	Après la conservation de la pression vérinage stationnaire pression de contact capteur/sol (p _{vérin} = 2 bars)												
			17,2	2979,8	148,9	17,2	3008,46	134,2	17,2	2940,05	137,9	16,9	2999,06	142,0
					6,4			6,4			6,4			6,4
09-mars 18h40	21	Après la réduction de la pression de vérinage à 0 pression de contact capteur/sol (p _{vérin} = 0 bars)												
			17,2	2988,73	139,7	17,3	3012,71	129,4	17	2947,61	129,5	17	3007,52	133,1
					0,0			0,0			0,0			0,0
09-mars 20h50	22	Dernière série du jour bétonnage (p _{vérin} = 0)												
			17,9	2977,09	151,7	18,0	3017,98	123,5	17,7	2939,72	138,3	17,6	2997,95	143,1

Date Heure	No. série	Description de l'ouvrage au moment des mesures	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.-68982 (SI ₂)			Slope I.-68983 (SI ₃)			Kyowa BE-5KF*			
			temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	K ₂	kgf/cm ²	K ₅	kgf/cm ²
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	μdéf	kPa	μdéf	kPa
Séquence 1 : durcissement du béton (béton jeune)																		
10-mars 9h30	1	Grue (Quillery) toujours disposée dans les environs du panneau S81	31	3013,42	113,5	31,5	3023,14	115,8	30,5	2948,74	127,4	30,6	3009,88	129,9	495	0,91	301	56,2
10-mars 9h50	1'	9h50	31	3013,77	113,1	31,6	3023,14	115,7	30,5	2948,85	127,2	30,8	3010,11	129,7	495	0,91	301	56,2
10-mars 14h35	2'	Grue enlevée de la proximité du panneau	34,2	3023,74	102,7	34,8	3026	112,2	33,5	2952,94	122,6	34	3014,01	125,5	435	0,80	280	52,8
10-mars 14h55	2	14h55	34,2	3023,98	102,4	34,9	3026	112,2	33,6	2952,94	122,5	34,2	3014,13	125,4	435	0,80	280	52,8
sam. 11-mars	3	10h40	36,8	3032,93	93,0	38,4	3025,41	112,4	36,1	2955,21	119,9	37,9	3014,36	125,0	418	0,71	298	56,6
dim. 12-mars	4	11h30	34,1	3038,21	87,5	35,9	3028,51	109,2	33,4	2959,65	115,1	35,6	3016,73	122,6	443	0,71	287	54,1
lundi 13-mars	5	15h15	31,5	3041,76	85,5	33,2	3031,08	108,3	30,7	2962,33	113,8	32,9	3018,57	122,3	452	0,69	296	42,7
mardi 14-mars	6	10h35	30,1	3045,56	81,5	31,8	3032,93	106,4	29,5	2966,82	108,8	31,5	3022,55	118,1	420	0,71	276	40,5
mercredi 15-mars	7	15h20	28,4	3046,17	80,9	30	3033,24	106,2	27,8	2966,28	109,5	29,8	3022,31	118,4	416	0,71	293	43,2
jeudi 16-mars 15h30	8	Terassem. et coffrage murette guide panneaux adjacents (S80 - S78)	27,3	3048,22	78,8	28,8	3034,13	105,4	26,8	2967,31	108,3	28,6	3023,26	117,4	412	0,64	284	41,9
Séquence 2 : mise en œuvre d'un panneau adjacent																		
lundi 20-mars 9h20	1	Avant bétonnage panneaux S80- S78	24,2	3046,47	80,7	25,7	3034,43	105,4	fluctuant			25,6	3018,39	122,7	422	0,64	296	43,6
									23,9	2965,3	110,7							
									23,9	2962,45	113,9							
mardi 21-mars 14h	2	Après bétonnage des panneaux adjacents (S78-S80)	23,5	3050,04	76,9	25	3038,8	100,6	23,2	2972,13	103,1	25	3030,42	109,9	373	0,64	244	33,6
jeudi 23-mars	3	10h45	24,7	3051,1	75,8	24,7	3038,81	100,6	24,4	2971,68	103,5	24,4	3032,22	108,0	366	0,65	235	32,7
Séquence 3 : exécution de la poutre de couronnement																		
jeudi															0,6			0,36

Date Heure	No. série	Description de l'ouvrage au moment des mesures	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.-68982 (SI ₂)			Slope I.-68983 (SI ₃)			Kyowa BE-5KF*			
			temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	K ₂	kgf/cm ²	K ₅	kgf/cm ²
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	μdéf	kPa	μdéf	kPa
30-mars	1	12h00	24,6	3058,42	68,1	24,2	3042,43	96,6	24,4	2973,75	101,2	24	3034,13	106,0	358	53,9	234	32,7
vendredi 07-avr	1'	Murette guide excavée depuis 1jour Recépage en cours	23,4	3059,39	67,1	23,2	3036,41	103,5	23,1	2970,87	104,5	22,9	3030,66	109,7	374	56,8	196	23,7
jeudi 13-avr 11h38	2	Recépage fini	22,6	3068,93	57,0	22,6	3046,29	92,4	22,5	2979,17	95,2	22,3	3038,94	100,9	290	47,3	198	35,2
jeudi 04-mai 9h	3	Poutre de couronnement coulée depuis 2 jours (NT= NPS-2m)	21,0	3084,09	41,0	21,0	3044,24	94,9	20,9	2981,83	92,2	20,8	3043,13	96,5		44,9		33,2
Séquence 4 : prétrassement et mise en place des butons																		
mardi 16-mai 9h50	0	Avant excavation entre les parois instrum.	20,4	3090,54	34,1	20,5	3047,86	90,9	20,3	2983,8	90,0	20,3	3046,65	92,8		45,9		17,4
mardi 16-mai 19h15	1	Après excav (+2,0NGF) entre les parois instrum. et pose des butons	20,4	3096,4	27,9	20,4	3051,49	86,8	20,3	3001,17	70,4	20,2	3057,57	81,1		78,2		6,6
Séquence 5 : excavation jusqu'à la cote de fondation du radier																		
mercredi 17-mai 10h25	1'	Même config. que pour la série 17 (front exc. butons +3m)	20,3	3097,52	26,7	20,5	3051,98	86,3	20,2	3002,58	68,8	20,2	3058,91	79,7		83,1		4,6
mercredi 17-mai 14h10	4	Excavation fond fouille paroi 79-80 en cours	20,3	3098,27	25,9	20,3	3052,83	85,3	20,3	3003,4	67,8	20,2	3060,25	78,2		82,2		6,2
vendredi 19-mai 9h00	2	Après excavation compl. entre les parois instrum. (jusqu'au -0,30 NGF)	20,2	3107,17	16,4	20,3	3055,38	82,5	20,1	3015,55	54,0	20,1	3067,71	70,2		73,5		1,7
lundi 22-mai 14h30	5	Après la mise en œuvre d'une couche de forme sur le fond de fouille	20,2	3105,04	18,6	20,2	3055,62	82,2	19,9	3016,14	53,3	19,9	3064,52	73,7		53,5		7,0
mardi 23-mai	2 bis	Béton propreté en place Perçage paroi en cours pour l'ancrage du radier	20,1	3103,66	20,1	20,1	3054,77	83,2	19,7	3013,14	56,8	19,8	3064,77	73,4		72,5		4,3
vendredi 26-mai	6	Après la mise en place des ancrages pour le	19,9	3104	19,8	20	3055,26	82,6	19,5	3016,14	53,3	19,6	3069,97	67,8		57,0		4,6

Date Heure	No. série	Description de l'ouvrage au moment des mesures	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.- 68982 (SI ₂)			Slope I. -68983 (SI ₃)			Kyowa BE-5KF*			
			temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	temp.	fréq.	pression	K ₂	kgf/cm ²	K ₅	kgf/cm ²
			°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	°C	Hz	kPa	μdéf	kPa	μdéf	kPa
		radier																
lundi 29-mai	7	Ferraillage radier en cours de pose sous la dalle du carrefour Dum.	19,9	3101,9	22,0	19,9	3054,77	83,2	19,3	3015,55	54,0	19,3	3063,42	74,9		0,79		0,09
lundi 05-juin	8	Après la mise en œuvre du radier sous la dalle Dumont d'Urville	19,6	3099,52	24,6	19,5	3055,07	82,9	18,7	3013,66	56,2	18,9	3062,69	75,6		0,80		0,08
jeudi 08-juin 9h	3	Ferraillage radier en cours de pose dans la zone instrumentée	19,4	3098,9	25,2	19,5	3051,49	87,0	18,5	3013,89	55,9	18,7	3060,25	78,3		0,86		0,09
jeudi 08-juin 15h	9	Ferraillage radier en cours de pose dans la zone instrumentée	19,4	3100,27	23,8	19,5	3052,22	86,1	18,5	3017,09	52,3	18,8	3059,64	78,9		0,86		0,13
Séquence 6 : Mise en œuvre du radier																		
jeudi 15-juin 13h	1	Après la mise en œuvre du radier dans la zone instrumentée	19,1	3091,79	32,8	19,2	3050,64	88,0	19,2	3006,34	64,5	19	3059,39	79,2		0,86		0,093
mardi 20-juin 9h	2	Avant dépose des butons dans la zone instrumentée	19	3082,53	42,7	19,1	3051,13	87,4	19,7	3007,4	63,3	19,4	3059,15	79,4		0,74		0,079
Séquence 7 : Dépose des butons																		
mercredi 21-juin 10h	1	Après dépose des butons dans la zone instrumentée	19,1	3093,41	31,1	19,2	3049,8	88,9	19,8	3008,93	61,6	19,4	3055,99	82,8		0,4		0,04
Séquence 8 : Un mois après la fin des travaux dans la zone instrumentée																		
mercredi 26-juil 9h	1	Travaux de génie civil achevés dans la zone ouest de la trémie	18,6	3075,35	50,3	18,5	3049,8	89,0	19,1	3002,35	69,1	18,8	3055,86	83,0		0,53		0,04
Séquence 8 : Avant la mise en service de l'ouvrage																		
jeudi 12-oct	1	Structure de chaussée en place sur le radier	17,5	3072,37	53,5	17,5	3048,95	90,1	capteur endommagé			17,5	3052,61	86,5		0,47		0,05

* - les valeurs exprimées en kgf/cm² (centrale d'acquisition) et celles en μdéf (pont Wheatstone manuel) sont des valeurs brutes (absolues) ;

correction barométrique des mesures effectuées avec les capteurs Slope Indicator :

10-12 mars :	pression atmosphérique courante :	102,9	kPa	(valeur locale dép. Seine Maritime)
--------------	-----------------------------------	-------	-----	-------------------------------------

Date	No. série	Description de l'ouvrage au moment des mesures	Slope I.-68980 (SI ₀)			Slope I.-68981 (SI ₁)			Slope I.-68982 (SI ₂)			Slope I.-68983 (SI ₃)			Kyowa BE-5KF*				
			temp. °C	fréq. Hz	pression kPa	temp. °C	fréq. Hz	pression kPa	temp. °C	fréq. Hz	pression kPa	temp. °C	fréq. Hz	pression kPa	K ₂ μdéf	kgf/cm ² kPa	K ₅ μdéf	kgf/cm ² kPa	
13mars-12oct		pression atmosphérique courante :			101,3	kPa	(par défaut)												

Inclinomètre S81.

Relevé des mesures inclinométriques suivant la direction transversale (A) et longitudinale (B) à la paroi

prof (m)	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil			
	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}	ϕ°_0	ϕ°_{180}
	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$	
0,5	30	10	37	10	52	-9	31	8	44	2	47	-2	70	-16	76	-77	80	-70	77	-74	77	-74	77	-71	81	-75	79	-78		
1,0	47	-11	51	-12	64	-23	54	-15	60	-14	66	-20	85	-35	56	-65	61	-62	64	-61	62	-64	66	-58	62	-61	64	-63		
1,5	53	-7	56	-8	67	-20	59	-14	64	-11	71	-17	88	-31	78	-82	84	-78	81	-77	83	-82	81	-76	82	-75	81	-79		
2,0	44	-11	49	-11	60	-21	51	-15	57	-13	65	-20	81	-33	82	-86	86	-81	85	-81	85	-85	90	-78	94	-81	86	-83		
2,5	39	8	44	4	51	-4	45	3	49	6	57	-2	71	-14	80	-92	85	-91	85	-88	85	-93	86	-87	84	-90	84	-91		
3,0	15	28	21	24	27	17	21	23	26	24	34	17	48	7	-59	56	-52	57	-52	59	-44	54	-48	61	-51	56	-53	57		
3,5	-1	42	3	37	10	31	2	36	10	39	17	29	30	21	-47	40	-42	42	-41	42	-39	38	-40	43	-41	41	-43	41		
4,0	-17	59	-10	55	-4	50	-10	54	-4	54	4	48	15	40	-52	53	-46	57	-46	56	-47	53	-46	66	-47	56	-48	55		
4,5	-1	40	7	36	11	30	7	33	14	34	21	28	30	21	-43	40	-39	42	-37	44	-35	37	-36	45	-37	41	-38	42		
5,0	-21	58	-13	55	-8	50	-12	51	-6	52	0	46	10	40	-49	49	-43	52	-43	53	-44	48	-42	55	-42	52	-41	52		
5,5	-26	72	-20	68	-15	64	-16	65	-10	65	-5	61	3	56	-47	45	-44	47	-44	48	-44	43	-40	49	-38	44	-42	46		
6,0	28	13	34	11	39	5	37	7	43	3	48	2	56	-3	-43	40	-39	43	-39	44	-40	38	-37	45	-37	40	-37	41		
6,5	37	6	43	2	48	-2	48	-5	55	-5	57	-7	65	-9	-63	55	-59	58	-61	58	-60	53	-55	59	-57	55	-56	54		
7,0	15	22	21	18	28	13	27	11	34	11	36	10	43	6	-72	70	-69	72	-68	74	-70	70	-66	76	-66	72	-67	72		
7,5	-6	46	-1	42	8	35	7	31	13	33	14	33	20	30	-98	91	-95	93	-94	96	-95	89	-91	98	-93	93	-92	92		
8,0	-19	62	-12	59	-3	52	-3	48	2	51	3	50	8	48	-99	97	-94	99	-95	100	-95	97	-93	101	-93	97	-91	98		
8,5	-21	62	-17	58	-6	50	-6	46	-3	51	-2	49	5	48	-93	91	-91	95	-90	96	-92	91	-88	99	-87	94	-87	94		
9,0	-176	218	-170	214	-161	203	-158	199	-157	201	-155	202	-152	206	-157	160	-153	161	-152	169	-152	163	-149	167	-150	165	-150	169		
9,5	-261	304	-256	298	-244	290	-244	285	-241	290	-240	290	-236	290	-172	165	-168	168	-167	171	-168	165	-164	172	-167	168	-164	167		
10,0	-287	326	-281	322	-270	313	-269	308	-266	314	-266	313	-263	313	-147	139	-143	143	-142	144	-142	139	-138	144	-140	142	-139	140		
10,5	-280	328	-277	322	-265	313	-264	310	-262	315	-262	315	-259	315	-112	115	-109	115	-107	117	-109	109	-106	115	-104	113	-107	113		
11,0	-303	344	-298	340	-287	330	-286	327	-284	333	-283	333	-279	333	-74	73	-70	79	-69	78	-71	73	-68	79	-69	77	-70	78		
11,5	-316	364	-311	361	-302	351	-300	349	-297	353	-298	353	-294	353	-28	19	-22	26	-19	24	-21	27	-20	22	-20	23	-21	25		
12,0	-328	367	-325	364	-315	353	-313	352	-310	357	-311	358	-308	358	117	-125	126	-119	133	-119	126	-121	131	-115	131	-112	132	-117		
12,5	-336	379	-332	376	-322	367	-322	365	-317	369	-318	369	-316	369	191	-201	197	-200	198	-200	194	-194	200	-199	199	-197	196	-200		
13,0	-323	367	-319	365	-310	358	-309	353	-305	359	-306	358	-303	359	252	-255	257	-256	258	-251	257	-258	260	-255	259	-254	255	-253		
13,5	-309	346	-304	345	-297	338	-295	335	-291	339	-294	339	-290	340	335	-336	335	-332	338	-329	340	-335	333	-331	335	-332	344	-331		
14,0	-289	334	-285	333	-278	327	-277	324	-273	328	-273	329	-271	329	408	-418	414	-414	416	-414	414	-418	416	-413	414	-414	415	-416		
14,5	-270	318	-270	318	-262	311	-261	306	-259	312	-259	312	-258	314	525	-530	527	-523	529	-523	527	-520	527	-522	529	-524	527	-525		
15,0	-258	297	-258	296	-251	292	-249	288	-248	293	-247	292	-245	294	708	-706	714	-707	712	-704	712	-707	718	-700	717	-709	711	-702		
15,5	-123	177	-126	173	-113	170	-118	167	-110	173	-112	178	-110	168	893	-899	893	-900	897	-891	893	-899	902	-896	898	-896	896	-899		
16,0	189	-136	186	-134	199	-146	191	-147	202	-145	201	-141	196	-146	1071	-1059	1071	-1063	1075	-1065	1068	-1066	1078	-1063	1075	-1065	1070	-1066		
16,5	595	-549	592	-545	597	-531	588	-537	593	-529	590	-538	591	-538	1195	-1202	1197	-1203	1197	-1198	1196	-1203	1201	-1197	1198	-1201	1198	-1200		
17,0	1055	-1008	1043	-1003	1056	-1002	1055	-985	1057	-996	1052	-995	1061	-1007	1091	-1098	1096	-1098	1101	-1094	1097	-1109	1096	-1102	1111	-1103	1094	-1094		
17,5	1594	-1532	1586	-1535	1595	-1521	1581	-1518	1599	-1537	1589	-1538	1590	-1535	873	-905	880	-876	876	-881	881	-888	878	-876	884	-877	880	-876		
18,0	2240	-2193	2231	-2161	2235	-2170	2231	-2175	2245	-2179	2232	-2174	2258	-2188	549	-583	558	-568	556	-561	583	-563	559	-551	562	-559	546	-551		

Annexe 4-3/1

Relevé des mesures inclinométriques dans les parois

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil			
	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}
	(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)			
18,5	2346	-2303	2351	-2318	2351	-2303	2350	-2310	2345	-2300	2364	-2306	2350	-2312	710	-754	716	-741	718	-755	715	-754	730	-756	702	-751	742	-749		
19,0	1852	-1814	1853	-1806	1852	-1806	1852	-1806	1857	-1805	1852	-1804	1854	-1802	887	-869	902	-881	888	-885	895	-886	885	-866	902	-890	886	-884		
19,5	2829	-2788	2826	-2761	2838	-2760	2808	-2754	2839	-2772	2805	-2755	2843	-2796	767	-832	770	-823	780	-828	749	-822	776	-821	759	-824	766	-852		
20,0	3432	-3384	3426	-3385	3431	-3382	3434	-3382	3432	-3377	3433	-3382	3430	-3380	1307	-1328	1311	-1310	1302	-1307	1308	-1316	1308	-1308	1302	-1316	1313	-1322		
20,5	3134	-3074	3132	-3075	3134	-3072	3131	-3076	3139	-3071	3136	-3066	3139	-3071	1082	-1109	1087	-1111	1092	-1114	1091	-1110	1090	-1115	1089	-1101	1101	-1108		

Tableau 1-I Relevé des mesures inclinométriques suivant la direction longitudinale (B) à la paroi

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil	
	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}
	(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)	
0,5	76	-77	80	-70	77	-74	77	-74	77	-71	81	-75	79	-78
1,0	56	-65	61	-62	64	-61	62	-64	66	-58	62	-61	64	-63
1,5	78	-82	84	-78	81	-77	83	-82	81	-76	82	-75	81	-79
2,0	82	-86	86	-81	85	-81	85	-85	90	-78	94	-81	86	-83
2,5	80	-92	85	-91	85	-88	85	-93	86	-87	84	-90	84	-91
3,0	-59	56	-52	57	-52	59	-44	54	-48	61	-51	56	-53	57
3,5	-47	40	-42	42	-41	42	-39	38	-40	43	-41	41	-43	41
4,0	-52	53	-46	57	-46	56	-47	53	-46	66	-47	56	-48	55
4,5	-43	40	-39	42	-37	44	-35	37	-36	45	-37	41	-38	42
5,0	-49	49	-43	52	-43	53	-44	48	-42	55	-42	52	-41	52
5,5	-47	45	-44	47	-44	48	-44	43	-40	49	-38	44	-42	46
6,0	-43	40	-39	43	-39	44	-40	38	-37	45	-37	40	-37	41
6,5	-63	55	-59	58	-61	58	-60	53	-55	59	-57	55	-56	54
7,0	-72	70	-69	72	-68	74	-70	70	-66	76	-66	72	-67	72
7,5	-98	91	-95	93	-94	96	-95	89	-91	98	-93	93	-92	92

Annexe 4-3/1

Relevé des mesures inclinométriques dans les parois

Inclinomètre S82.

Relevé des mesures inclinométriques suivant la direction transversale (A) et longitudinale (B) à la paroi

prof (m)	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil			
	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀	φ ₀	φ ₁₈₀
	4x10 ⁻⁵ radians																													
0,5	-246	283	-251	282	-217	245	-238	276	-226	268	-210	285	-144	207	-85	77	-92	85	-102	105	-104	98	-106	112	-89	114	-75	71		
1,0	-188	228	-188	221	-172	214	-185	222	-179	225	-167	220	-153	202	40	-37	37	-38	37	-36	40	-38	45	-32	42	-32	41	-36		
1,5	-154	194	-151	187	-134	181	-144	185	-139	188	-129	183	-115	169	8	-3	8	0	8	-2	5	-5	10	-2	9	0	9	-1		
2,0	-123	159	-120	153	-108	147	-117	153	-111	156	-100	150	-89	136	-37	36	-38	40	-37	42	-40	37	-35	42	-36	44	-40	43		
2,5	-102	142	-99	135	-87	131	-97	135	-92	138	-78	131	-69	120	-82	82	-86	85	-81	87	-84	84	-81	88	-83	89	-85	88		
3,0	-79	118	-75	112	-63	108	-73	111	-69	115	-54	107	-45	98	-143	141	-144	146	-143	150	-143	144	-140	146	-140	151	-144	149		
3,5	-72	105	-68	99	-60	96	-67	99	-62	102	-48	95	-41	86	-188	191	-192	195	-185	198	-188	193	-186	197	-184	202	-190	200		
4,0	-146	186	-140	180	-127	177	-137	177	-135	182	-117	172	-114	166	-274	269	-272	270	-268	269	-271	265	-271	270	-270	270	-271	270		
4,5	-187	227	-183	219	-173	216	-180	217	-174	221	-161	215	-157	208	-364	359	-366	362	-362	364	-364	358	-360	365	-362	367	-365	366		
5,0	-188	230	-183	223	-176	221	-154	194	-147	198	-136	193	-131	187	-395	390	-395	392	-391	396	-376	346	-374	350	-377	353	-376	346		
5,5	-188	223	-184	216	-174	215	-203	229	-197	232	-185	227	-185	224	-424	415	-423	417	-421	419	-445	471	-432	474	-440	470	-445	473		
6,0	-162	206	-158	200	-149	199	-152	196	-145	198	-138	196	-134	191	-419	420	-417	424	-416	425	-418	424	-413	429	-416	430	-417	427		
6,5	-140	176	-137	170	-130	168	-128	164	-122	166	-115	165	-113	161	-415	408	-415	408	-412	410	-411	409	-406	414	-407	415	-412	413		
7,0	-202	245	-199	238	-187	236	-185	231	-181	234	-175	234	-176	229	-360	344	-358	345	-359	344	-362	348	-356	355	-359	349	-357	348		
7,5	-224	261	-220	255	-206	254	-209	248	-205	251	-199	252	-197	246	-284	276	-282	278	-281	282	-283	279	-278	283	-280	282	-281	282		
8,0	-189	223	-186	216	-173	213	-173	208	-170	212	-165	213	-163	207	-235	234	-236	236	-235	238	-238	236	-232	240	-236	241	-236	239		
8,5	-149	191	-144	185	-134	181	-133	175	-130	180	-125	181	-123	177	-175	172	-175	175	-175	177	-177	175	-170	180	-173	179	-173	178		
9,0	-121	153	-117	146	-105	142	-104	138	-101	141	-98	143	-97	139	-115	108	-118	112	-115	112	-118	112	-114	116	-117	115	-115	117		
9,5	-70	112	-66	106	-52	103	-52	95	-49	101	-46	103	-44	99	-51	41	-49	45	-49	50	-55	48	-47	49	-49	50	-49	49		
10,0	-44	81	-40	75	-25	67	-25	63	-23	71	-19	70	-18	69	128	-140	129	-131	130	-128	121	-134	133	-137	126	-119	128	-129		
10,5	-48	89	-47	83	-32	76	-31	70	-30	77	-26	78	-25	75	273	-268	274	-272	277	-270	272	-272	277	-268	278	-265	277	-268		
11,0	-23	65	-20	59	-5	53	-2	45	-4	54	1	54	0	52	319	-332	319	-327	323	-324	317	-331	324	-325	324	-323	322	-323		
11,5	-8	43	-5	37	9	31	10	25	11	34	16	32	14	32	328	-333	326	-329	332	-326	329	-330	334	-326	332	-327	331	-327		
12,0	4	44	6	39	20	33	20	28	21	33	26	37	24	35	312	-318	313	-314	315	-312	312	-311	318	-309	320	-310	315	-309		
12,5	-16	52	-14	46	-2	42	0	34	0	43	5	42	3	42	260	-267	263	-264	267	-260	270	-267	269	-260	265	-259	265	-261		
13,0	-71	110	-71	107	-54	98	-54	94	-55	103	-47	105	-54	103	186	-181	186	-176	192	-181	188	-183	196	-174	194	-175	192	-178		
13,5	-158	205	-157	198	-146	196	-145	190	-143	196	-139	197	-142	197	126	-119	125	-116	130	-113	129	-127	133	-110	132	-112	130	-114		
14,0	-152	190	-150	184	-141	180	-139	174	-139	185	-133	184	-136	183	61	-64	59	-62	67	-56	65	-62	65	-52	65	-58	67	-60		
14,5	-153	195	-152	191	-143	188	-142	181	-142	192	-136	188	-138	191	-18	15	-20	18	-11	25	-16	12	-9	25	-10	21	-13	21		
15,0	-185	223	-184	218	-174	217	-173	210	-173	218	-168	219	-171	220	-109	106	-113	108	-110	114	-101	108	-108	115	-100	111	-110	110		
15,5	-232	275	-230	270	-221	270	-220	260	-220	271	-214	271	-217	267	-255	247	-257	258	-258	260	-256	256	-256	265	-250	258	-257	259		
16,0	-298	328	-301	325	-288	321	-288	319	-284	322	-282	325	-285	322	-457	444	-456	475	-449	470	-452	457	-447	469	-447	475	-447	464		
16,5	-329	364	-328	361	-327	375	-328	367	-328	374	-321	378	-323	376	-704	699	-698	704	-698	695	-697	694	-688	700	-690	695	-696	690		
17,0	-145	181	-140	178	-145	186	-145	186	-142	186	-141	192	-140	187	-897	887	-893	890	-887	891	-888	883	-889	894	-886	888	-881	891		
17,5	81	-52	83	-56	84	-47	81	-47	87	-42	88	-43	93	-47	-1069	1054	-1065	1059	-1064	1061	-1063	1052	-1061	1059	-1062	1060	-1062	1059		
18,0	371	-327	379	-331	377	-324	372	-331	379	-326	376	-316	382	-326	-1255	1241	-1252	1247	-1237	1250	-1253	1248	-1249	1257	-1238	1241	-1250	1249		
18,5	498	-480	498	-481	501	-476	509	-479	499	-469	507	-476	505	-473	-1677	1660	-1672	1673	-1668	1667	-1656	1672	-1677	1698	-1665	1659	-1676	1677		
19,0	231	-155	221	-151	233	-159	240	-160	226	-150	239	-163	235	-147	-2335	2344	-2352	2372	-2333	2338	-2323	2339	-2349	2350	-2331	2316	-2347	2346		
19,5	265	-232	268	-231	245	-226	249	-229	257	-237	259	-224	262	-229	-3008	3000	-3010	3008	-2997	3010	-3008	3003	-2998	3003	-2999	3007	-3008	3009		

Annexe 4-3/1

Relevé des mesures inclinométriques dans les parois

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		
	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0	ϕ^{180}	ϕ^0
(m)	4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		
20,0	558	-536	568	-540	563	-532	558	-538	564	-532	567	-529	566	-528	-2929	2900	-2927	2907	-2926	2911	-2932	2906	-2921	2912	-2926	2913	-2922	2920	
20,5	388	-340	385	-342	395	-339	398	-341	388	-333	401	-335	387	-336	-2695	2694	-2693	2697	-2691	2716	-2697	2695	-2689	2700	-2690	2712	-2705	2702	
21,0	-130	181	-142	178	-125	166	-142	164	-149	185	-122	175	-142	189	-2641	2618	-2621	2620	-2623	2625	-2623	2620	-2619	2621	-2620	2620	-2629	2620	
21,5	-721	774	-728	775	-725	778	-726	772	-726	781	-717	773	-727	777	-2515	2485	-2512	2491	-2501	2498	-2506	2493	-2506	2494	-2506	2493	-2504	2498	

Tableau 2- Inclinométriques suivant la direction longitudinale (B) à la paroi

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil	
	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}	ϕ^B	ϕ^{180}
(m)	4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians		4×10^{-5} radians	
0,5	-85	77	-92	85	-102	105	-104	98	-106	112	-89	114	-75	71
1,0	40	-37	37	-38	37	-36	40	-38	45	-32	42	-32	41	-36
1,5	8	-3	8	0	8	-2	5	-5	10	-2	9	0	9	-1
2,0	-37	36	-38	40	-37	42	-40	37	-35	42	-36	44	-40	43
2,5	-82	82	-86	85	-81	87	-84	84	-81	88	-83	89	-85	88
3,0	-143	141	-144	146	-143	150	-143	144	-140	146	-140	151	-144	149
3,5	-188	191	-192	195	-185	198	-188	193	-186	197	-184	202	-190	200
4,0	-274	269	-272	270	-268	269	-271	265	-271	270	-270	270	-271	270
4,5	-364	359	-366	362	-362	364	-364	358	-360	365	-362	367	-365	366
5,0	-395	390	-395	392	-391	396	-376	346	-374	350	-377	353	-376	346
5,5	-424	415	-423	417	-421	419	-445	471	-432	474	-440	470	-445	473
6,0	-419	420	-417	424	-416	425	-418	424	-413	429	-416	430	-417	427
6,5	-415	408	-415	408	-412	410	-411	409	-406	414	-407	415	-412	413
7,0	-360	344	-358	345	-359	344	-362	348	-356	355	-359	349	-357	348
7,5	-284	276	-282	278	-281	282	-283	279	-278	283	-280	282	-281	282
8,0	-235	234	-236	236	-235	238	-238	236	-232	240	-236	241	-236	239
8,5	-175	172	-175	175	-175	177	-177	175	-170	180	-173	179	-173	178
9,0	-115	108	-118	112	-115	112	-118	112	-114	116	-117	115	-115	117
9,5	-51	41	-49	45	-49	50	-55	48	-47	49	-49	50	-49	49
10,0	128	-140	129	-131	130	-128	121	-134	133	-137	126	-119	128	-129
10,5	273	-268	274	-272	277	-270	272	-272	277	-268	278	-265	277	-268

Inclinomètre N81.

Relevé de mesures inclinométriques suivant la direction transversale (A) et longitudinale (B) à la paroi

prof	Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6		Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6	
	4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil		4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil	
	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}
(m)	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$	
0,5	59	-22			62	-21	56	-17	64	-14	72	-18	84	-36	368	-367			365	-358	362	-362	366	-357	365	-357	357	-352
1,0	50	-5			63	-16	55	-13	60	-7	67	-15	81	-27	383	-389			389	-391	389	-396	392	-391	393	-389	388	-389
1,5	267	-227			283	-233	265	-230	267	-224	285	-227	296	-242	300	-289			292	-288	295	-292	312	-287	296	-290	300	-289
2,0	369	-326			379	-335	374	-332	376	-325	384	-333	396	-344	261	-256			256	-254	253	-252	256	-250	257	-247	251	-248
2,5	361	-329			371	-331	367	-326	371	-321	376	-327	388	-339	238	-252			238	-245	235	-249	238	-242	238	-229	243	-231
3,0	351	-292			355	-310	346	-307	351	-300	358	-307	368	-316	221	-217			228	-225	230	-231	233	-221	232	-226	232	-233
3,5	306	-265			318	-273	314	-271	315	-266	324	-272	331	-283	256	-233			252	-229	245	-237	245	-231	245	-225	240	-221
4,0	269	-225			282	-234	275	-232	280	-226	288	-233	292	-242	248	-253			250	-250	250	-251	251	-248	250	-246	253	-247
4,5	372	-333			384	-340	369	-337	383	-331	384	-343	390	-349	101	-74			99	-74	106	-74	101	-71	105	-76	106	-73
5,0	455	-411			466	-420	462	-421	468	-414	474	-419	480	-428	-21	18			-16	22	-20	19	-19	25	-17	29	-16	27
5,5	409	-368			422	-376	418	-377	425	-372	431	-377	435	-384	-38	34			-34	40	-39	36	-36	41	-35	46	-34	42
6,0	358	-314			369	-323	366	-326	374	-321	379	-325	380	-329	-58	53			-53	60	-57	54	-56	63	-53	64	-53	62
6,5	292	-248			304	-261	302	-263	312	-260	313	-262	315	-266	-78	78			-76	82	-79	77	-78	87	-76	88	-75	84
7,0	230	-186			244	-198	243	-200	252	-197	254	-199	254	-201	-91	90			-89	96	-92	90	-92	99	-90	101	-89	96
7,5	254	-213			266	-221	264	-224	273	-220	269	-219	272	-223	-98	97			-97	103	-102	101	-101	107	-99	108	-98	106
8,0	294	-254			311	-264	309	-268	317	-265	319	-264	318	-267	-76	75			-75	81	-77	77	-75	85	-73	86	-74	84
8,5	244	-201			260	-215	259	-220	267	-216	267	-214	269	-217	-76	75			-78	79	-80	76	-78	85	-76	85	-75	81
9,0	191	-148			209	-162	208	-166	214	-162	214	-160	215	-161	-86	85			-88	90	-89	87	-88	95	-86	94	-86	92
9,5	149	-107			167	-121	166	-124	173	-120	172	-117	170	-119	-109	105			-108	111	-110	108	-108	116	-106	114	-108	112
10,0	121	-77			136	-91	136	-94	143	-90	143	-87	142	-88	-102	96			-101	104	-104	101	-102	106	-98	107	-101	106
10,5	198	-150			206	-165	205	-165	213	-160	211	-159	209	-156	-99	96			-93	99	-95	95	-94	100	-92	100	-96	98
11,0	314	-267			331	-281	330	-286	336	-280	335	-278	333	-278	-148	146			-148	151	-151	149	-150	155	-146	154	-148	152
11,5	289	-252			304	-267	304	-271	310	-264	309	-265	308	-264	-176	165			-174	168	-178	165	-177	171	-173	169	-174	168
12,0	284	-233			300	-246	300	-250	305	-244	304	-243	301	-246	-195	199			-194	202	-196	200	-195	206	-194	206	-195	203
12,5	268	-233			282	-246	281	-251	287	-244	287	-243	284	-243	-233	228			-231	231	-235	226	-233	231	-230	232	-229	230
13,0	251	-200			266	-210	265	-214	271	-207	270	-207	266	-206	-256	257			-253	263	-257	261	-255	266	-254	266	-252	264
13,5	220	-182			233	-191	232	-195	239	-188	238	-187	235	-186	-355	350			-346	361	-346	350	-352	363	-344	365	-346	352
14,0	224	-181			235	-189	235	-193	240	-186	239	-186	237	-190	-407	398			-403	400	-404	393	-404	401	-400	399	-404	395
14,5	180	-136			192	-145	192	-149	196	-142	198	-142	193	-140	-606	595			-593	591	-591	589	-598	594	-591	593	-596	596
15,0	93	-49			105	-57	104	-62	108	-54	109	-56	106	-53	-940	924			-921	922	-919	891	-927	924	-922	913	-926	922
15,5	-12	55			-2	47	-1	45	2	53	3	54	-2	54	-1386	1371			-1361	1368	-1357	1360	-1366	1369	-1360	1363	-1372	1374
16,0	-147	190			-142	184	-144	176	-139	184	-138	187	-142	183	-1762	1748			-1751	1747	-1754	1746	-1753	1753	-1752	1754	-1757	1752
16,5	117	-67			74	-38	63	-33	85	-40	88	-19	78	-42	-1523	1543			-1537	1561	-1549	1567	-1531	1563	-1530	1574	-1538	1562
17,0	939	-898			932	-885	929	-885	929	-885	924	-878	937	-884	-1235	1234			-1232	1237	-1235	1242	-1235	1241	-1231	1242	-1234	1240
17,5	1312	-1264			1299	-1257	1295	-1262	1302	-1248	1292	-1245	1306	-1251	-1330	1347			-1326	1343	-1326	1340	-1329	1336	-1313	1341	-1335	1345
18,0	1649	-1587			1643	-1580	1628	-1577	1644	-1576	1640	-1568	1633	-1573	-1762	1772			-1756	1764	-1739	1747	-1759	1756	-1747	1751	-1757	1764

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil			
	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}
	(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)			
18,5	1966	-1914			1958	-1907	1948	-1902	1957	-1894	1955	-1886	1961	-1895	-2361	2373			-2353	2352	-2345	2341	-2345	2350	-2339	2330	-2361	2355		
19,0	2253	-2203			2249	-2197	2246	-2199	2254	-2193	2252	-2191	2252	-2195	-3014	3032			-2989	3016	-2991	3019	-3002	3021	-2991	2999	-2997	3029		
19,5	2007	-1995			2018	-1995	2019	-1995	2023	-1985	2025	-1986	2029	-1987	-3570	3537			-3555	3531	-3545	3531	-3547	3544	-3540	3538	-3537	3543		
20,0	2525	-2467			2508	-2440	2488	-2436	2512	-2425	2500	-2427	2521	-2437	-3571	3586			-3571	3596	-3577	3595	-3570	3600	-3571	3600	-3564	3596		
20,5	2798	-2706			2796	-2704	2797	-2706	2803	-2704	2806	-2710	2803	-2703	-3509	3510			-3508	3513	-3508	3511	-3508	3512	-3501	3503	-3503	3514		
21,0	2386	-2324			2392	-2358	2399	-2350	2400	-2345	2402	-2355	2392	-2371	-4015	3991			-4004	3957	-3996	3960	-4001	3974	-3992	3962	-4008	3946		
21,5	1794	-1781			1799	-1788	1801	-1787	1803	-1780	1805	-1783	1804	-1789	-4815	4781			-4804	4761	-4799	4763	-4806	4774	-4794	4771	-4804	4765		
22,0	1651	-1579			1647	-1573	1646	-1572	1645	-1565	1648	-1570	1639	-1563	-4957	4954			-4957	4959	-4960	4959	-4960	4963	-4958	4965	-4958	4963		

Tableau 1-I Inclinomètre N°4. mesures inclinométriques suivant la direction longitudinale (B) à la paroi

prof	Mesure 0 4-mai		Mesure 1 16-mai		Mesure 2 19-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 4 15-juin		Mesure 5 21-juin		Mesure 6 26-juil	
	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}
	(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)		(4x10 ⁻⁵ radians)	
0,5	368	-367			365	-358	362	-362	366	-357	365	-357	357	-352
1,0	383	-389			389	-391	389	-396	392	-391	393	-389	388	-389
1,5	300	-289			292	-288	295	-292	312	-287	296	-290	300	-289
2,0	261	-256			256	-254	253	-252	256	-250	257	-247	251	-248
2,5	238	-252			238	-245	235	-249	238	-242	238	-229	243	-231
3,0	221	-217			228	-225	230	-231	233	-221	232	-226	232	-233
3,5	256	-233			252	-229	245	-237	245	-231	245	-225	240	-221
4,0	248	-253			250	-250	250	-251	251	-248	250	-246	253	-247
4,5	101	-74			99	-74	106	-74	101	-71	105	-76	106	-73
5,0	-21	18			-16	22	-20	19	-19	25	-17	29	-16	27
5,5	-38	34			-34	40	-39	36	-36	41	-35	46	-34	42
6,0	-58	53			-53	60	-57	54	-56	63	-53	64	-53	62
6,5	-78	78			-76	82	-79	77	-78	87	-76	88	-75	84
7,0	-91	90			-89	96	-92	90	-92	99	-90	101	-89	96

Annexe 4-3/1

Relevé des mesures inclinométriques dans les parois

Inclinomètre N82.

Relevé des mesures inclinométriques suivant la direction transversale (A) et longitudinale (B) à la paroi

prof.	Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6		Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6	
	4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil		4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil	
	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}	ϕ°_0	ϕ^{180}
(m)	$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)		$(4 \times 10^{-5}$ radians)	
0,5	27	2			65	-27	70	-36	77	-35	44	4	88	-46	160	-125			173	-164	195	-165	182	-165	157	-120	164	-137
1,0	157	-115			170	-122	165	-121	169	-117	181	-127	189	-135	173	-173			169	-164	167	-164	172	-164	170	-162	162	-155
1,5	162	-121			177	-128	167	-125	171	-120	182	-126	193	-140	177	-180			171	-169	173	-173	178	-175	175	-170	170	-165
2,0	142	-100			154	-106	148	-105	152	-101	162	-111	172	-120	180	-179			185	-168	177	-172	179	-174	173	-164	168	-162
2,5	111	-71			125	-76	119	-76	124	-71	131	-80	140	-89	172	-178			173	-170	171	-168	173	-169	168	-163	163	-161
3,0	90	-47			105	-60	94	-53	103	-50	113	-60	121	-67	170	-198			166	-188	164	-199	176	-194	177	-187	172	-177
3,5	245	-207			255	-204	249	-202	250	-204	256	-212	269	-219	159	-139			158	-131	147	-146	167	-140	155	-137	153	-135
4,0	232	-195			241	-201	237	-202	243	-198	254	-206	259	-213	104	-111			108	-104	105	-110	107	-103	106	-99	101	-97
4,5	180	-132			193	-138	188	-137	193	-135	204	-142	208	-146	103	-102			110	-94	106	-97	107	-95	107	-91	105	-91
5,0	135	-96			147	-102	141	-106	147	-101	156	-110	158	-110	108	-118			109	-111	106	-118	109	-110	110	-108	106	-107
5,5	99	-62			111	-68	111	-67	117	-67	124	-71	124	-76	124	-121			126	-115	121	-119	124	-113	123	-109	122	-111
6,0	71	-27			84	-34	78	-37	86	-36	94	-39	95	-42	104	-105			105	-98	102	-98	102	-93	102	-90	100	-93
6,5	140	-105			152	-110	147	-111	156	-110	161	-110	164	-115	95	-101			96	-94	91	-97	96	-90	94	-88	94	-89
7,0	140	-90			153	-97	151	-100	159	-100	162	-100	165	-103	100	-97			102	-92	96	-93	99	-86	99	-87	99	-89
7,5	103	-66			118	-74	116	-80	123	-79	127	-79	128	-80	82	-82			82	-78	78	-78	81	-71	83	-72	81	-75
8,0	81	-38			97	-47	96	-52	102	-50	104	-49	105	-51	91	-85			90	-79	86	-80	88	-73	88	-75	90	-76
8,5	55	-17			70	-29	70	-33	75	-31	77	-29	77	-32	75	-82			74	-77	71	-75	74	-71	72	-72	74	-74
9,0	28	22			45	11	45	5	50	9	51	10	51	9	67	-70			69	-64	65	-64	63	-58	67	-58	69	-58
9,5	79	-35			91	-51	89	-53	97	-49	95	-45	95	-52	111	-83			111	-82	108	-78	113	-76	112	-71	113	-78
10,0	135	-93			151	-103	151	-110	157	-105	157	-104	156	-105	160	-167			157	-160	154	-156	157	-153	159	-155	159	-154
10,5	118	-77			135	-86	135	-93	140	-88	142	-87	140	-88	166	-170			165	-162	161	-159	165	-156	166	-157	167	-157
11,0	101	-57			118	-67	118	-73	123	-69	121	-68	121	-66	166	-175			165	-164	162	-163	164	-160	168	-162	166	-162
11,5	81	-40			98	-50	98	-54	102	-51	101	-48	101	-48	156	-161			158	-151	154	-153	156	-150	160	-151	160	-151
12,0	66	-25			81	-33	82	-39	86	-35	85	-32	84	-32	143	-158			146	-148	143	-149	145	-146	148	-146	147	-148
12,5	158	-114			166	-118	167	-119	171	-116	168	-113	169	-116	93	-95			103	-91	93	-106	106	-99	102	-103	95	-90
13,0	208	-171			223	-182	226	-185	228	-179	230	-177	227	-178	-19	9			-15	18	-20	12	-17	15	-14	17	-17	17
13,5	151	-109			164	-114	165	-122	169	-118	170	-113	169	-112	-84	81			-80	88	-85	87	-81	92	-79	92	-80	89
14,0	62	-13			77	-23	79	-32	80	-25	88	-21	81	-23	-123	113			-116	120	-121	115	-119	120	-115	121	-117	117
14,5	-114	157			-98	147	-94	139	-93	144	-90	142	-98	150	-137	136			-139	139	-147	137	-142	143	-140	141	-140	137
15,0	-404	460			-392	444	-387	436	-386	442	-375	435	-391	449	-146	141			-143	144	-151	140	-147	147	-146	145	-144	141
15,5	-1004	1042			-963	1021	-961	996	-972	1009	-967	1012	-969	1018	-34	49			-40	62	-44	55	-36	65	-37	56	-36	49
16,0	-1766	1805			-1741	1784	-1732	1773	-1736	1776	-1729	1790	-1747	1799	413	-396			403	-386	389	-379	406	-371	400	-389	407	-405
16,5	-1878	1914			-1893	1933	-1894	1938	-1882	1933	-1888	1938	-1885	1935	462	-499			481	-518	499	-525	469	-507	475	-515	469	-511
17,0	-1365	1404			-1372	1424	-1395	1430	-1367	1424	-1373	1435	-1374	1417	65	-66			79	-67	86	-75	79	-62	79	-70	82	-65
17,5	-943	983			-957	998	-979	998	-960	995	-959	1009	-956	993	222	-220			236	-208	219	-203	225	-209	228	-203	231	-209
18,0	-1219	1268			-1150	1227	-1142	1189	-1166	1213	-1159	1191	-1178	1208	596	-605			600	-597	594	-590	596	-589	595	-583	596	-590
18,5	-2660	2606			-2656	2603	-2659	2590	-2655	2592	-2653	2598	-2657	2608	-411	201			-298	149	-309	114	-338	89	-331	104	-368	183

Annexe 4-3/1

Relevé des mesures inclinométriques dans les parois

prof.	Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6		Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6	
	4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil		4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil	
	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}	ϕ^{α}_0	ϕ^{α}_{180}
(m)	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$			
19,0	-2191	2213			-2202	2229	-2209	2234	-2199	2233	-2206	2237	-2193	2231	-1976	1958			-1946	1937	-1937	1922	-1949	1930	-1931	1933	-1964	1947
19,5	-1629	1691			-1651	1708	-1657	1712	-1642	1719	-1636	1719	-1631	1711	-2509	2464			-2494	2473	-2492	2463	-2493	2470	-2500	2469	-2511	2474
20,0	-1526	1595			-1524	1597	-1518	1585	-1517	1598	-1516	1597	-1513	1601	-2757	2730			-2761	2727	-2761	2717	-2763	2730	-2756	2727	-2755	2730
20,5	-2129	2191			-2107	2185	-2090	2166	-2092	2184	-2108	2180	-2098	2192	-3102	3072			-3093	3055	-3088	3034	-3087	3054	-3092	3047	-3096	3061
21,0	-2774	2842			-2762	2826	-2753	2825	-2760	2836	-2763	2844	-2760	2840	-3348	3311			-3339	3300	-3325	3298	-3333	3303	-3323	3303	-3342	3306

Tableau 1- Inclinométrie des mesures inclinométriques suivant la direction longitudinale (B) à la paroi

prof.	Mesure 0		Mesure 1		Mesure 2		Mesure 3		Mesure 4		Mesure 5		Mesure 6	
	4-mai		16-mai		19-mai		8-juin		15-juin		21-juin		26-juil	
	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}
(m)	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$	
0,5	160	-125			173	-164	195	-165	182	-165	157	-120	164	-137
1,0	173	-173			169	-164	167	-164	172	-164	170	-162	162	-155
1,5	177	-180			171	-169	173	-173	178	-175	175	-170	170	-165
2,0	180	-179			185	-168	177	-172	179	-174	173	-164	168	-162
2,5	172	-178			173	-170	171	-168	173	-169	168	-163	163	-161
3,0	170	-198			166	-188	164	-199	176	-194	177	-187	172	-177
3,5	159	-139			158	-131	147	-146	167	-140	155	-137	153	-135
4,0	104	-111			108	-104	105	-110	107	-103	106	-99	101	-97
4,5	103	-102			110	-94	106	-97	107	-95	107	-91	105	-91
5,0	108	-118			109	-111	106	-118	109	-110	110	-108	106	-107
5,5	124	-121			126	-115	121	-119	124	-113	123	-109	122	-111
6,0	104	-105			105	-98	102	-98	102	-93	102	-90	100	-93
6,5	95	-101			96	-94	91	-97	96	-90	94	-88	94	-89
7,0	100	-97			102	-92	96	-93	99	-86	99	-87	99	-89
7,5	82	-82			82	-78	78	-78	81	-71	83	-72	81	-75
8,0	91	-85			90	-79	86	-80	88	-73	88	-75	90	-76
8,5	75	-82			74	-77	71	-75	74	-71	72	-72	74	-74
9,0	67	-70			69	-64	65	-64	63	-58	67	-58	69	-58

Annexe 4-3/2

Relevé des mesures inclinométriques dans le massif de sol soutenu

Inclinomètres I1 et I2.

Relevé des mesures inclinométriques suivant la direction transversale (A) et la direction longitudinale (B) à la paroi

prof.	Inclinomètre I2												Inclinomètre I1													
	Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil			
	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^A_0	ϕ^A_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}	ϕ^B_0	ϕ^B_{180}
	$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{ radians})$	
0,5	-222	275	-226	263	-207	257	178	-154	143	-112	176	-142	-222	275	-226	263	-207	257	379	-359	388	-368	375	-361		
1,0	-219	263	-220	253	-211	253	150	-144	154	-146	153	-142	-219	263	-220	253	-211	253	383	-371	378	-375	382	-370		
1,5	-169	211	-161	201	-153	199	138	-141	145	-142	148	-138	-169	211	-161	201	-153	199	383	-382	380	-382	384	-378		
2,0	-212	259	-206	247	-199	248	120	-117	129	-117	128	-114	-212	259	-206	247	-199	248	388	-381	391	-388	391	-378		
2,5	-262	309	-265	300	-258	303	107	-112	118	-111	122	-109	-262	309	-265	300	-258	303	437	-442	435	-434	441	-434		
3,0	-120	158	-123	156	-107	151	133	-127	132	-127	136	-127	-120	158	-123	156	-107	151	499	-493	504	-507	512	-498		
3,5	-34	76	-32	66	-22	64	191	-182	194	-187	193	-180	-34	76	-32	66	-22	64	552	-555	557	-553	554	-550		
4,0	-48	99	-44	89	-37	88	204	-204	208	-202	214	-199	-48	99	-44	89	-37	88	579	-577	574	-571	578	-568		
4,5	-76	122	-72	110	-61	110	176	-174	182	-173	182	-172	-76	122	-72	110	-61	110	607	-608	606	-607	612	-605		
5,0	-107	152	-102	140	-92	138	190	-190	196	-186	197	-187	-107	152	-102	140	-92	138	640	-627	639	-626	643	-625		
5,5	-122	169	-119	159	-110	158	234	-224	240	-230	235	-227	-122	169	-119	159	-110	158	672	-671	670	-671	675	-667		
6,0	-131	175	-129	166	-122	167	291	-295	296	-286	300	-278	-131	175	-129	166	-122	167	646	-651	651	-650	652	-645		
6,5	-109	154	-108	147	-100	148	282	-281	290	-281	288	-277	-109	154	-108	147	-100	148	595	-599	594	-592	598	-588		
7,0	-93	138	-93	129	-86	131	261	-262	267	-263	270	-259	-93	138	-93	129	-86	131	607	-605	606	-600	609	-596		
7,5	-76	117	-75	111	-69	115	276	-277	282	-280	285	-272	-76	117	-75	111	-69	115	611	-610	612	-607	618	-609		
8,0	-82	128	-82	119	-77	121	307	-308	316	-299	316	-295	-82	128	-82	119	-77	121	636	-628	639	-633	643	-634		
8,5	-97	140	-94	135	-87	137	315	-321	324	-322	325	-319	-97	140	-94	135	-87	137	657	-656	659	-650	664	-649		
9,0	-130	170	-130	163	-120	165	369	-363	369	-363	371	-358	-130	170	-130	163	-120	165	665	-674	674	-670	669	-661		
9,5	-192	234	-191	230	-188	234	337	-336	349	-337	340	-330	-192	234	-191	230	-188	234	598	-593	590	-590	595	-588		
10,0	-227	275	-229	271	-224	274	243	-237	253	-241	242	-233	-227	275	-229	271	-224	274	564	-568	565	-570	570	-566		
10,5	-313	349	-312	346	-304	347	118	-115	130	-120	126	-112	-313	349	-312	346	-304	347	547	-551	552	-552	554	-551		
11,0	-369	419	-374	413	-368	418	17	-17	21	-20	24	-15	-369	419	-374	413	-368	418	554	-545	552	-542	559	-540		
11,5	-425	464	-425	460	-421	465	-55	54	-45	51	-46	57	-425	464	-425	460	-421	465	604	-606	601	-590	608	-606		
12,0	-435	481	-437	478	-433	482	-140	131	-127	136	-137	140	-435	481	-437	478	-433	482	539	-536	540	-560	546	-541		
12,5	-484	528	-484	523	-481	527	-191	186	-188	175	-181	178	-484	528	-484	523	-481	527	469	-468	462	-472	470	-463		
13,0	-596	638	-594	630	-590	633	-367	353	-341	360	-371	367	-596	638	-594	630	-590	633	490	-493	487	-503	493	-492		
13,5	-772	815	-768	804	-765	811	-632	647	-644	643	-613	626	-772	815	-768	804	-765	811	559	-558	550	-557	560	-554		
14,0	-993	1030	-989	1020	-986	1028	-896	905	-891	898	-901	910	-993	1030	-989	1020	-986	1028	497	-495	521	-495	511	-493		
14,5	-1101	1150	-1103	1145	-1099	1149	-880	877	-882	894	-880	888	-1101	1150	-1103	1145	-1099	1149	456	-451	455	-449	460	-448		
15,0	-1223	1261	-1213	1242	-1214	1258	-1006	1019	-1009	1020	-1010	1007	-1223	1261	-1213	1242	-1214	1258	396	-388	410	-429	399	-377		
15,5	-1562	1602	-1555	1592	-1552	1600	-1163	1158	-1159	1163	-1160	1166	-1562	1602	-1555	1592	-1552	1600	69	-70	79	-77	73	-66		
16,0	-1709	1751	-1707	1743	-1703	1746	-1120	1108	-1112	1126	-1109	1119	-1709	1751	-1707	1743	-1703	1746	35	-39	37	-41	40	-54		
16,5	-1808	1852	-1807	1843	-1803	1847	-1031	1032	-1029	1037	-1030	1043	-1808	1852	-1807	1843	-1803	1847	82	-84	78	-84	92	-81		
17,0	-1898	1940	-1897	1932	-1891	1937	-1026	1021	-1021	1023	-1023	1026	-1898	1940	-1897	1932	-1891	1937	150	-156	147	-169	159	-154		
17,5	-1978	2023	-1978	2012	-1973	2017	-1025	1022	-1019	1025	-1019	1030	-1978	2023	-1978	2012	-1973	2017	277	-269	262	-281	267	-281		
18,0	-2099	2149	-2103	2136	-2095	2142	-970	971	-972	974	-969	982	-2099	2149	-2103	2136	-2095	2142	444	-456	440	-438	445	-446		
18,5	-2415	2465	-2420	2457	-2409	2461	-890	889	-884	904	-887	899	-2415	2465	-2420	2457	-2409	2461	692	-673	655	-676	671	-700		
19,0	-2556	2600	-2554	2586	-2554	2595	-888	888	-882	888	-883	891	-2556	2600	-2554	2586	-2554	2595	914	-925	918	-939	925	-933		
19,5	-2690	2733	-2695	2722	-2692	2731	-911	906	-908	905	-908	909	-2690	2733	-2695	2722	-2692	2731	963	-977	954	-984	957	-964		
20,0	-2754	2789	-2748	2779	-2753	2788	-937	939	-935	929	-919	935	-2754	2789	-2748	2779	-2753	2788	811	-820	830	-845	820	-822		
20,5	-2877	2915	-2871	2895	-2869	2910	-984	974	-980	974	-975	979	-2877	2915	-2871	2895	-2869	2910	785	-801	782	-823	790	-801		

Annexe 4-3/2

Relevé des mesures inclinométriques dans le massif de sol soutenu

(m)	Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil		Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil	
	ϕ_0^A	ϕ_{180}^A	ϕ_0^A	ϕ_{180}^A	ϕ_0^A	ϕ_{180}^A	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B
	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$	

Tableau 1-B: Inclinométrie longitudinale (B) à la paroi

prof. (m)	Mesure 0 4-mai		Mesure 3 8-juin		Mesure 6 26-juil	
	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B	ϕ_0^B	ϕ_{180}^B
	$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$		$(4 \times 10^{-5} \text{radians})$	
0,5	178	-154	143	-112	176	-142
1,0	150	-144	154	-146	153	-142
1,5	138	-141	145	-142	148	-138
2,0	120	-117	129	-117	128	-114
2,5	107	-112	118	-111	122	-109
3,0	133	-127	132	-127	136	-127
3,5	191	-182	194	-187	193	-180
4,0	204	-204	208	-202	214	-199
4,5	176	-174	182	-173	182	-172
5,0	190	-190	196	-186	197	-187
5,5	234	-224	240	-230	235	-227
6,0	291	-295	296	-286	300	-278
6,5	282	-281	290	-281	288	-277
7,0	261	-262	267	-263	270	-259
7,5	276	-277	282	-280	285	-272
8,0	307	-308	316	-299	316	-295
8,5	315	-321	324	-322	325	-319
9,0	369	-363	369	-363	371	-358
9,5	337	-336	349	-337	340	-330
10,0	243	-237	253	-241	242	-233
10,5	118	-115	130	-120	126	-112
11,0	17	-17	21	-20	24	-15
11,5	-55	54	-45	51	-46	57
12,0	-140	131	-127	136	-137	140
12,5	-191	186	-188	175	-181	178
13,0	-367	353	-341	360	-371	367
13,5	-632	647	-644	643	-613	626
14,0	-896	905	-891	898	-901	910
14,5	-880	877	-882	894	-880	888
15,0	-1006	1019	-1009	1020	-1010	1007

0 direction longitudinale (B) à la paroi

Mesures de convergence au niveau de la poutre de couronnement

Panneaux instrumentés	Niveau mesure	Référence		Déplacements de convergence $\Delta y^S + \Delta y^N$ (mm)						
		Mesure 0		Mesure 1	Mesure 2	Mes 2bis	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6
	z_h	val.	9-mai	17-mai	19-mai	23-mai	8-juin	15-juin	21-juin	26-juil
	NGF	abs. (mm)	9h15	9h30	9h40	11h00	9h45	14h00	9h30	10h
	Température (B80)	-	13,7°C	12,3°C	17°C	17,7°C	19,6°C	-	-	
S81-N81	6,49	86,4	0	7,13	14,40	12,50	11,40	12,40	16,40	22,70
S82-N82	6,50	88,5	0	7,00	14,23	12,50	11,20	12,70	17,30	22,80
S83-N83	6,51	72,5	0	6,68	15,50	13,50	12,20	14,90	18,00	23,50
Valeur moyenne				6,94	14,71	12,83	11,60	13,33	17,23	23,00
Ecart type (σ)				0,23	0,69	0,58	0,53	1,37	0,80	0,44
Coef. variation (C_v)				0,03	0,05	0,04	0,05	0,10	0,05	0,02
Déplacement (valeur moyenne 1 paroi $\Delta y^S(z_h)$)				3,47	7,36	6,42	5,80	6,67	8,62	11,50

Mesures de convergence au niveau des butons

Panneaux instrumentés	Niveau mesure	Référence		Déplacements de convergence $\Delta y^S + \Delta y^N$ (mm)				
		Mesure 0		Mes 2bis	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6
	z_b	val.	17-mai	23-mai	8-juin	15-juin	21-juin	26-juil
	NGF (m)	abs. (mm)	9h30	11h00	9h45	14h00	9h30	10h
	Température (B80)	13,7°C	17°C	17,7°C	19,6°C	-	-	
S80-N80	3,26	96,0	0	4,8	4,2	5,2	6,5	10,2
S81-N81	3,25	33,4	0	5,3	4,4	5,5	7,5	10,5
S82-N82	3,26	41,4	0	5,4	4,9	6	8,5	10,9
Valeur moyenne (81-82)				5,35	4,65	5,75	8,00	10,70
Ecart type (σ)				0,07	0,35	0,35	0,71	0,28
Coef. variation (C_v)				0,01	0,08	0,06	0,09	0,03
Déplacement (valeur moyenne 1 paroi) $\Delta y^S(z_b)$				2,68	2,33	2,88	4,00	5,35

Annexe 4-5/2

Effort axiaux et moments de flexion déduits dans les butons instrumentés

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂					
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord			
			N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₅₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M _{v(7-8)} (kNm)	M _{h(6-7)} (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)		
1. Après prétrassement et mise en place des butons																								
16-mai	21:55	19,1	-287	-259	-1002	-802	-769	-745					3,1	10,5	12,5	23,9	2,4	-2,5						
16-mai	22:25	18,8	-299	-254	-971	-798	-766	-742					3,8	11,8	12,2	21,1	2,4	-2,4						
16-mai	22:55	18,5	-259	-215	-931	-772	-738	-714					2,9	12,1	12,3	20,1	2,4	-2,6						
16-mai	23:25	17,6	-195	-157	-889	-705	-670	-647					3,3	11,5	12,5	22,8	2,6	-2,6						
16-mai	23:55	16,9	-173	-136	-878	-684	-648	-624					3,2	11,5	12,6	23,7	2,7	-2,4						
17-mai	00:25	16,6	-168	-132	-867	-679	-646	-622					3,4	11,4	12,5	22,8	2,6	-2,5						
17-mai	00:55	16,3	-164	-125	-849	-676	-638	-613					3,9	12,1	12,1	22,0	3,1	-2,5						
17-mai	01:25	16,0	-135	-99	-824	-651	-615	-591					3,4	11,4	12,5	21,8	2,6	-2,6						
17-mai	01:55	15,6	-116	-66	-803	-635	-598	-574					3,9	11,5	12,4	21,2	2,4	-2,7						
17-mai	02:25	14,3	-21	28	-717	-550	-511	-488					2,1	12,6	12,3	21,4	2,5	-2,6						
17-mai	02:55	13,9	-1	34	-700	-529	-491	-469					2,6	11,3	12,6	21,8	2,4	-2,7						
17-mai	03:25	13,5	4	44	-712	-523	-481	-462					3,7	11,6	12,1	23,7	2,1	-2,2						
17-mai	03:55	13,2	5	49	-720	-520	-478	-452					3,6	11,6	12,3	25,1	3,1	-2,5						
17-mai	04:25	13,1	19	56	-715	-508	-468	-449					3,2	12,0	12,5	25,4	2,2	-2,3						
17-mai	04:55	12,7	48	81	-694	-474	-437	-413					3,0	11,7	12,7	26,6	2,7	-2,7						
17-mai	05:25	12,3	68	103	-673	-453	-413	-393					3,1	12,1	12,6	26,8	2,4	-2,4						
17-mai	05:55	11,9	77	115	-657	-451	-409	-388					2,9	13,0	12,5	26,0	2,6	-2,9						
17-mai	06:25	11,5	105	142	-617	-418	-379	-356					3,1	12,1	12,6	24,7	2,5	-2,6						
17-mai	06:55	11,4	110	131	-611	-437	-395	-374					2,5	10,7	12,5	22,7	2,6	-2,6						
17-mai	07:25	11,4	105	125	-597	-436	-398	-377					2,4	10,6	12,3	21,0	2,5	-2,6						
17-mai	07:55	11,7	53	90	-608	-470	-431	-406					3,0	11,9	12,2	18,7	2,7	-3,0						
17-mai	08:25	12,2	33	76	-620	-500	-459	-437					4,2	11,6	12,0	16,9	2,1	-2,7						
17-mai	08:55	12,9	-3	35	-643	-527	-483	-463					2,7	11,2	11,8	16,6	1,8	-2,3						
17-mai	09:25	13,6	-31	5	-674	-563	-521	-500					2,5	10,6	11,6	15,9	2,1	-2,1						
17-mai	09:55	14,5	-67	-35	-731	-602	-568	-545					3,3	10,5	10,9	16,2	2,6	-1,0						
2. Après le recablage des jauges sur le buton B82 (2)																								
17-mai	11:33	17,4	-127	-139	-1122	-679	-634	-607	-74			-34	-69	3,4	10,8	10,1	46,9	3,5	0,7	0,4		-0,3	-3,2	
17-mai	11:48	17,7	-154	-134	-1172	-710	-661	-640	-91			-73	-59	3,8	11,2	10,7	49,1	3,6	1,6	-0,2		0,7	-6,3	
17-mai	12:03	19,0	-178	-242	-1221	-711	-722	-653	-171			-154	-126	4,3	12,5	10,1	46,7	6,5	-0,2	-1,0		0,9	-8,5	
17-mai	12:18	19,7	-221	-211	-1273	-765	-735	-692	-193			-169	-157	4,7	12,4	10,3	51,2	5,6	1,5	-1,2		0,5	-3,2	
17-mai	12:33	19,5	-224	-214	-1317	-772	-729	-696	-191			-160	-159	3,6	11,7	10,5	56,0	4,6	2,1	-1,4		-0,1	-4,3	
3. Après la reprise de l'excavation																								
17-mai	12:48	20,7	-275	-297	-1367	-798	-791	-734	-253			-230	-229	5,4	13,4	10,5	54,2	6,6	1,5	-2,1		1,8	-4,9	
17-mai	13:03	21,4	-318	-323	-1414	-861	-839	-793	-300			-286	-319	4,8	12,1	10,2	54,5	6,4	2,4	-2,9		1,0	-7,2	
17-mai	13:18	20,0	-246	-236	-1423	-829	-768	-743	-222			-218	-229	5,0	10,6	10,6	62,4	5,8	4,5	-0,5		1,7	-7,0	
17-mai	13:33	20,5	-255	-216	-1440	-749	-738	-673	-247			-217	-207	2,4	12,2	12,0	69,6	4,1	-6,4	-2,7		3,0	-7,9	
17-mai	13:48	20,9	-293	-259	-1498	-794	-767	-722	-290			-237	-299	4,0	11,7	11,6	71,4	3,1	-3,2	-2,7		1,9	-7,8	
17-mai	14:03	19,5	-304	-256	-1495	-801	-772	-737	-297			-261	-295	4,2	11,6	11,3	71,7	3,5	-3,1	-3,3		4,1	-8,3	
4. Après l'excavation complète jusqu'au fond de fouille																								
19-mai	09:32	12,3	-125	-88	-649	-590	-445	-517	-240			-88	-173	-280	5,9	4	11,3	15,8		15,8	-20,3		25,8	-45,4
5. Après la mise en oeuvre de la couche de forme																								
22-mai	14:34	21,5	-587	-552	-1570	-1049	-885	-1007	-840			-695	-944	9,9	24,9	10,6	61,5		24,2	-23,4		29,5	-44,1	
23-mai	10:11	16,1	-341	-277	-903	-816	-666	-753	-543			-445	-611	8,1	22,3	10,8	17,9		19,4	-22,7		30,9	-52,3	
23-mai	10:16	16,1	-316	-292	-906	-822	-665	-768	-546			-460	-611	7,2	21,0	10,8	18,2		21,6	-22,9		30,1	-52,3	
23-mai	10:21	16,2	-333	-287	-914	-822	-667	-755	-546			-453	-586	8,8	22,5	10,6	19,1		19,2	-22,9		31,4	-51,2	
23-mai	10:26	16,2	-336	-287	-911	-811	-656	-746	-538			-455	-601	7,3	22,1	10,8	20,0		19,5	-22,8		30,8	-53,0	
23-mai	10:31	16,4	-332	-297	-927	-822	-662	-758	-553			-457	-591	7,6	21,4	10,8	20,6		20,6	-23,0		31,9	-55,1	
23-mai	10:36	16,6	-345	-288	-937	-829	-677	-766	-564			-487	-626	9,5	21,9	10,4	20,9		18,5	-22,8		31,0	-53,2	
23-mai	10:41	16,6	-330	-282	-942	-820	-664	-748	-563			-468	-601	5,3	21,3	11,0	21,9		19,2	-23,0		32,2	-51,1	
23-mai	10:46	16,6	-347	-290	-947	-824	-662	-753	-559			-469	-617	7,9	22,1	10,7	22,3		20,4	-22,9		30,7	-52,5	
23-mai	10:51	16,8	-350	-303	-958	-828	-667	-758	-575			-488	-636	8,4	22,3	10,6	23,1		20,1	-23,2		29,9	-52,7	

Annexe 4-5/2

Effort axiaux et moments de flexion déduits dans les butons instrumentés

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité nord		extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord				
			N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₅₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M _{v(7-8)} (kNm)	M _{h(6-7)} (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)	
23-mai	10:56	17,1	-373	-351	-986	-848	-711	-798	-622			-524	-679	9,2	22,4	10,7	21,2		19,9	-22,9		30,4	-53,1
23-mai	11:01	17,0	-373	-347	-975	-837	-705	-791	-603			-519	-670	7,3	22,4	10,8	21,4		18,9	-22,1		30,1	-52,9
23-mai	11:06	17,4	-384	-362	-994	-852	-708	-797	-625			-527	-687	8,1	22,2	10,4	22,5		20,0	-22,6		29,3	-52,2
26-mai	14:44	19,9	-522	-477	-1453	-1016	-844	-952	-799			-707	-867	8,4	22,3	10,6	54,0		22,4	-24,1		33,6	-53,5
29-mai	13:45	17,9	-415	-392	-1113	-854	-705	-812	-623			-492	-729	9,5	24,2	10,3	34,2		22,7	-22,2		28,5	-44,9
6. Après le bétonnage du radier sous la dalle du carrefour Dumont d'Urville																							
5-juin	11:55	14,8	-277	-235	-597	-752	-576	-677	-497			-380	-561	7,9	22,4	2	-15		22,1	-23,0		34,8	-56,5
7. Avant le bétonnage du radier dans le secteur instrumenté (ferrailage en cours)																							
8-juin	9:36	16,6	-490	-585	-989	-1019	-945	-1038	-1012			-849	-1111	8,4	24,8	9,2	-2,6		22,8	-21,0		32,3	-58,1
8-juin	9:41	17,1	-524	-603	-1223	-1036	-972	-1064	-1060			-889	-1110	7,2	22,9	9,9	16,6		23,8	-20,6		30,8	-57,2
8-juin	9:46	17,7	-539	-623	-1244	-1021	-950	-1031	-1024			-871	-1129	10,4	24,1	9,5	20,5		22,8	-20,4		30,8	-57,7
8-juin	9:51	18,3	-558	-624	-1290	-1029	-967	-1068	-1041			-874	-1147	10,9	24,3	10,1	23,9		24,8	-20,3		31,4	-57,5
8-juin	9:56	18,9	-540	-666	-1344	-1047	-983	-1063	-1047			-909	-1160	10,7	22,1	9,1	27,2		22,5	-21,7		28,8	-57,6
8-juin	10:01	19,5	-583	-665	-1379	-1050	-993	-1093	-1054			-907	-1159	12,3	24,3	9,4	30,4		24,0	-18,2		28,3	-57,1
8-juin	10:06	19,9	-591	-682	-1415	-1055	-989	-1073	-1050			-887	-1165	12,6	25,0	9,2	33,5		22,9	-20,0		29,6	-56,2
8-juin	10:11	20,2	-595	-701	-1446	-1062	-1004	-1101	-1051			-886	-1145	13,3	23,4	9,2	36,6		22,7	-19,5		28,3	-55,9
8-juin	10:16	20,7	-607	-679	-1457	-1038	-971	-1066	-1018			-842	-1130	12,7	25,2	9,4	40,2		23,3	-20,5		29,8	-55,9
8-juin	10:21	21,2	-600	-703	-1477	-1026	-970	-1073	-1007			-864	-1131	13,2	23,6	9,4	43,2		23,1	-21,8		28,0	-56,2
8-juin	10:26	21,5	-616	-710	-1496	-1026	-974	-1060	-1014			-857	-1137	13,5	25,5	8,9	44,4		21,1	-19,8		27,9	-55,1
8-juin	10:31	22,0	-585	-696	-1493	-998	-938	-1019	-996			-809	-1095	12,7	24,3	9,3	47,0		21,2	-20,2		26,8	-56,5
8-juin	10:36	22,3	-595	-703	-1510	-1002	-946	-1023	-985			-812	-1090	12,0	27,7	8,7	48,1		20,5	-20,3		28,0	-56,2
8-juin	10:41	22,5	-592	-703	-1504	-990	-946	-1045	-952			-766	-1032	14,2	24,6	8,2	49,0		21,4	-19,7		26,6	-52,7
8-juin	10:46	22,9	-598	-719	-1432	-994	-948	-1041	-924			-769	-1061	14,5	24,5	8,7	41,4		21,2	-21,1		26,9	-53,2
8-juin	10:51	23,3	-598	-723	-1542	-988	-953	-1054	-929			-749	-1062	13,6	24,9	9,2	52,6		20,6	-19,9		28,0	-53,5
8-juin	10:56	23,3	-623	-728	-1552	-994	-958	-1053	-933			-746	-1063	14,3	26,2	8,7	53,6		19,5	-19,6		27,8	-53,3
8-juin	11:01	23,9	-637	-728	-1573	-1008	-965	-1060	-952			-749	-1058	15,1	27,2	8,8	53,9		20,8	-19,9		25,3	-54,2
8-juin	11:06	24,4	-650	-762	-1593	-1019	-977	-1063	-957			-771	-1095	13,8	26,9	8,7	55,1		19,0	-19,7		27,5	-52,2
8-juin	11:11	24,6	-662	-764	-1612	-1037	-1002	-1088	-980			-790	-1103	14,8	26,8	8,6	55,4		17,5	-20,4		27,0	-52,6
8-juin	11:16	25,0	-688	-782	-1632	-1049	-1015	-1114	-992			-799	-1128	15,5	27,4	8,7	56,5		18,7	-20,4		27,6	-50,9
8-juin	11:21	24,8	-674	-743	-1641	-1064	-1010	-1090	-985			-797	-1106	11,4	27,0	8,9	57,6		16,6	-20,5		28,6	-53,1
8-juin	11:26	24,9	-680	-775	-1549	-1068	-1014	-1114	-972			-819	-1126	13,9	26,1	8,5	48,4		19,1	-22,7		27,4	-51,1
8-juin	11:31	25,3	-691	-790	-1691	-1076	-1049	-1144	-1019			-821	-1163	13,5	26,7	9,2	59,6		17,5	-20,4		29,3	-50,0
8-juin	11:36	25,8	-741	-805	-1715	-1102	-1051	-1130	-1043			-858	-1185	14,5	28,1	9,1	59,7		18,0	-20,2		28,0	-49,4
8-juin	11:41	25,8	-757	-813	-1718	-1133	-1064	-1159	-1067			-877	-1184	13,6	27,6	9,2	59,3		19,6	-20,6		28,0	-49,5
8-juin	11:46	26,4	-728	-809	-1738	-1140	-1066	-1163	-1064			-888	-1203	13,9	25,1	8,4	61,4		19,3	-21,0		29,0	-49,8
8-juin	11:51	25,6	-746	-744	-1722	-1130	-1012	-1121	-1037			-862	-1129	13,3	27,6	9,5	63,9		22,7	-21,8		28,8	-50,8
8-juin	11:56	25,4	-721	-709	-1718	-1107	-968	-1089	-1002			-831	-1127	11,6	27,4	9,6	67,1		25,2	-22,7		33,5	-55,3
8-juin	12:01	25,3	-683	-682	-1717	-1097	-956	-1074	-990			-818	-1113	10,3	26,5	9,9	68,5		24,6	-22,7		33,9	-56,1
8-juin	12:06	25,4	-713	-725	-1734	-1074	-973	-1054	-1012			-834	-1122	13,0	27,2	9,3	67,8		20,4	-22,4		31,9	-55,6
8-juin	12:11	25,8	-690	-769	-1732	-1090	-1012	-1086	-1002			-825	-1153	12,1	28,0	9,0	65,3		17,2	-23,2		31,3	-52,1
8-juin	12:16	25,4	-719	-787	-1726	-1087	-1022	-1091	-1025			-812	-1148	13,4	27,2	8,7	63,8		16,5	-21,4		27,4	-51,4
8-juin	12:21	25,7	-738	-785	-1726	-1078	-1031	-1112	-1022			-836	-1184	14,5	27,6	10,3	63,3		17,7	-21,2		28,8	-48,9
8-juin	12:26	26,0	-731	-805	-1733	-1101	-1046	-1112	-1042			-819	-1190	13,0	29,2	8,9	62,9		14,9	-21,7		30,9	-50,0
8-juin	12:31	26,0	-739	-817	-1739	-1109	-1059	-1133	-1017			-863	-1212	14,1	27,5	9,3	62,4		15,8	-23,2		27,4	-46,9
8-juin	12:36	25,7	-742	-812	-1729	-1107	-1076	-1155	-1036			-854	-1217	15,4	26,6	9,2	61,2		14,4	-21,2		27,4	-46,6
8-juin	12:41	26,6	-754	-814	-1742	-1123	-1079	-1152	-1060			-842	-1224	11,4	28,1	9,4	61,4		14,8	-21,2		28,7	-46,2
8-juin	12:46	26,9	-796	-847	-1750	-1140	-1087	-1170	-1070			-866	-1260	13,9	28,6	9,3	61,4		16,1	-21,3		28,5	-45,3
8-juin	12:51	26,1	-787	-858	-1754	-1148	-1112	-1205	-1077			-892	-1272	13,9	27,9	8,9	61,2		14,7	-21,0		26,2	-44,7
8-juin	12:56	27,1	-821	-864	-1695	-1165	-1118	-1213	-1086			-886	-1284	13,9	28,5	9,0	55,1		14,8	-21,2		28,3	-44,7
8-juin	13:01	27,3	-798	-846	-1759	-1159	-1115	-1214	-1096			-888	-1255	12,5	28,0	9,9	61,7		15,2	-21,4		27,0	-42,9
8-juin	13:06	27,2	-830	-861	-1771	-1174	-1104	-1203	-1074			-888	-1285	14,6	29,1	9,3	62,1		17,9	-23,1		28,4	-44,9
8-juin	13:11	26,8	-803	-847	-1766	-1168	-1110	-1234	-1093			-887	-1268	13,7	29,9	9,2	63,1		18,3	-21,7		28,1	-45,1
8-juin	13:16	27,7	-820	-861	-1778	-1189	-1105	-1220	-1088			-910	-1295	13,7	28,3	9,4	63,1		19,6	-23,0		28,3	-44,8

Annexe 4-5/2

Effort axiaux et moments de flexion déduits dans les butons instrumentés

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord		
			N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₁₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	N ₁₋₃ (kN)	N ₂₋₄ (kN)	N ₅₋₇ (kN)	N ₆₋₈ (kN)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M ₁₋₃ (kNm)	M ₂₋₄ (kNm)	M _{v(7-8)} (kNm)	M _{H(6-7)} (kNm)	M _H (kNm)	M _v (kNm)	M _H (kNm)	M _v (kNm)	
8-juin	13:21	27,7	-863	-864	-1798	-1207	-1116	-1223	-1115			-907	-1320	13,1	29,4	9,2	63,8		18,4	-22,2		31,0	-44,0
8-juin	13:26	28,0	-837	-853	-1740	-1208	-1103	-1215	-1117			-905	-1323	14,1	27,4	8,8	58,9		19,9	-22,9		31,9	-43,9
8-juin	13:31	27,6	-847	-860	-1670	-1211	-1109	-1239	-1095			-929	-1312	13,9	27,0	9,2	52,4		21,2	-24,9		29,5	-44,7
8-juin	13:36	27,8	-871	-869	-1837	-1223	-1109	-1234	-1138			-953	-1343	14,1	28,8	9,0	66,9		23,0	-23,0		30,3	-43,9
8-juin	13:41	28,0	-885	-869	-1860	-1235	-1126	-1252	-1153			-943	-1357	12,3	28,7	9,2	68,8		21,4	-23,5		33,0	-44,5
8-juin	13:46	28,0	-893	-855	-1881	-1245	-1115	-1247	-1170			-967	-1328	12,8	28,3	9,4	70,6		24,2	-23,1		30,4	-42,7
8-juin	13:51	27,3	-891	-874	-1894	-1228	-1129	-1278	-1166			-963	-1370	13,5	28,2	11,6	71,9		24,4	-22,8		32,1	-44,0
8-juin	13:56	27,7	-875	-878	-1915	-1262	-1129	-1283	-1186			-975	-1365	12,2	29,3	10,0	73,7		25,6	-23,1		32,8	-46,0
8-juin	14:01	27,6	-887	-882	-1928	-1268	-1114	-1262	-1183			-982	-1387	13,0	28,2	9,9	75,0		26,6	-23,5		33,2	-44,3
8-juin	14:06	27,7	-904	-871	-1931	-1267	-1122	-1283	-1191			-997	-1390	12,0	29,9	10,0	75,2		27,6	-23,6		32,5	-43,6
8-juin	14:12	27,7	-893	-853	-1946	-1262	-1107	-1262	-1211			-1002	-1366	10,4	28,3	11,1	77,2		28,0	-23,5		32,4	-42,4
8-juin	14:17	27,4	-923	-882	-1939	-1280	-1122	-1280	-1219			-1007	-1383	13,0	29,2	10,1	75,5		27,8	-23,8		33,2	-43,1
8-juin	14:22	26,9	-927	-866	-1962	-1272	-1127	-1299	-1226			-1017	-1379	12,5	29,4	10,9	77,9		28,7	-23,4		32,8	-41,8
8-juin	14:27	27,0	-911	-882	-1845	-1298	-1129	-1299	-1231			-1029	-1426	11,5	27,4	10,0	65,6		29,6	-23,3		34,8	-43,8
8-juin	14:57	26,3	-940	-902	-2038	-1376	-1198	-1379	-1327			-1107	-1512	11,9	28,3	9,3	76,2		33,3	-24,3		37,3	-44,6
8-juin	15:27	26,0	-972	-925	-2069	-1429	-1248	-1445	-1395			-1189	-1563	10,6	28,4	11,0	74,8		34,8	-24,8		39,2	-45,2
8-juin	15:57	26,1	-988	-939	-2084	-1470	-1265	-1460	-1433			-1225	-1575	9,8	28,5	10,3	73,0		36,7	-26,0		42,8	-47,6
8-juin	16:27	26,1	-1025	-982	-2046	-1500	-1287	-1491	-1481			-1289	-1592	10,9	27,8	10,1	66,3		39,1	-26,3		42,7	-48,0
8-juin	16:57	26,0	-1004	-999	-2098	-1503	-1289	-1499	-1481			-1291	-1599	9,7	25,6	11,1	70,8		40,6	-26,7		47,8	-49,7
8-juin	17:27	25,8	-1040	-993	-2090	-1499	-1292	-1500	-1491			-1303	-1564	10,7	27,6	9,9	69,8		39,9	-27,4		47,4	-53,8
8-juin	17:57	26,0	-1058	-994	-2103	-1508	-1305	-1510	-1499			-1350	-1576	8,9	27,2	9,9	69,9		39,7	-27,9		51,4	-54,1
8-juin	18:27	25,9	-1026	-1006	-2090	-1508	-1291	-1490	-1498			-1375	-1517	8,1	24,9	10,4	69,0		40,2	-28,0		50,0	-55,3
8-juin	18:57	25,7	-1049	-1009	-2082	-1506	-1300	-1500	-1497			-1398	-1496	8,9	26,3	10,2	68,3		38,9	-28,0		50,0	-56,3
8-juin	19:27	25,6	-1011	-983	-2046	-1489	-1279	-1468	-1466			-1381	-1469	8,6	25,9	9,9	67,5		36,6	-27,9		50,5	-62,5
8-juin	19:57	25,3	-964	-922	-1995	-1452	-1245	-1413	-1396			-1353	-1441	5,2	25,1	10,1	65,4		34,0	-29,0		49,4	-62,3
8-juin	20:27	25,0	-895	-856	-1890	-1346	-1159	-1289	-1318			-1195	-1335	9,2	23,3	9,8	64,4		27,8	-25,0		40,7	-66,8
8-juin	20:57	24,5	-883	-833	-1847	-1303	-1132	-1232	-1268			-1120	-1323	8,7	23,9	9,8	63,8		22,3	-24,6		38,0	-70,7
8-juin	21:27	23,7	-780	-744	-1743	-1222	-1052	-1154	-1171			-1026	-1236	9,7	21,3	9,8	61,4		22,4	-24,7		37,3	-70,6
8-juin	21:57	23,0	-692	-646	-1627	-1117	-953	-1042	-1064			-915	-1110	6,5	22,0	9,6	60,2		20,4	-23,8		36,3	-69,9
8-juin	22:27	21,9	-639	-604	-1534	-1052	-898	-995	-974			-821	-1033	9,2	21,0	9,6	56,9		20,6	-23,8		34,7	-70,7
8-juin	22:57	20,9	-583	-553	-1447	-1007	-860	-962	-914			-776	-955	7,5	21,3	10,6	53,1		19,8	-23,4		34,9	-66,3
8-juin	23:27	20,2	-547	-513	-1357	-975	-829	-926	-855			-716	-933	7,3	21,1	10,4	47,3		19,5	-23,7		36,3	-67,2
8-juin	23:57	19,4	-530	-474	-1311	-948	-793	-887	-810			-686	-880	8,3	21,4	11,1	45,5		20,2	-22,5		35,0	-66,9
9-juin	0:27	18,9	-502	-442	-1247	-919	-765	-847	-777			-646	-840	8,4	21,5	10,5	42,2		18,3	-23,7		34,7	-67,6
9-juin	0:57	18,3	-469	-426	-1183	-896	-737	-816	-739			-611	-790	8,2	20,8	10,5	38,4		18,2	-23,5		34,7	-64,6
9-juin	1:27	17,7	-434	-385	-1123	-866	-710	-794	-696			-566	-774	8,8	20,5	10,7	35,6		18,1	-23,3		35,6	-65,4
9-juin	1:57	17,3	-385	-357	-1071	-845	-688	-767	-665			-543	-731	8,6	19,1	10,6	32,3		18,0	-23,3		34,4	-64,9
9-juin	2:27	16,8	-383	-341	-1022	-827	-671	-756	-627			-513	-704	7,0	20,5	11,2	29,1		19,1	-23,2		34,1	-64,6
9-juin	2:57	16,4	-374	-330	-980	-778	-659	-740	-616			-488	-689	8,2	20,3	14,6	26,4		18,0	-22,9		35,5	-64,3
9-juin	3:27	16,2	-366	-316	-942	-792	-641	-724	-591			-480	-664	8,3	21,0	11,3	24,4		18,4	-22,4		34,0	-63,8
9-juin	9:57				-1307	-1197	-1041	-1169	-1122			-979	-1215			9,9	21,3		24,3	-23,6		36,4	-61,0
8. Après la mise en oeuvre du radier dans le secteur instrumenté																							
13-juin	14:31	23,6	-798	-742	-1552	-1248	-1068	-1213	-1160			-990	-1255	10,2	22,0	9,4	41,1		28,7	-24,1		35,2	-57,5
13-juin	15:01	25,3	-854	-799	-1664	-1323	-1117	-1262	-1225			-1045	-1347	9,7	23,8	10,1	45,1		31,7	-24,4		36,6	-57,9
13-juin	15:31	25,6	-912	-867	-1744	-1395	-1193	-1360	-1316			-1122	-1456	10,2	24,2	9,6	47,0		32,6	-24,8		37,9	-58,2
13-juin	16:01	24,8	-865	-820	-1728	-1360	-1141	-1308	-1270			-1091	-1405	9,2	23,4	9,7	49,4		34,1	-23,7		37,4	-59,0
13-juin	16:31	24,3	-843	-792	-1700	-1317	-1115	-1271	-1222			-1052	-1328	8,9	23,3	10,1	50,4		31,1	-25,1		39,0	-63,2
13-juin	17:01	25,3	-903	-867	-1790	-1392	-1149	-1319	-1304			-1116	-1426	8,4	25,1	9,9	52,6		37,7	-26,3		44,3	-57,5
13-juin	17:31	23,7	-883	-852	-1770	-1384	-1158	-1340	-1292			-1137	-1407	7,6	22,7	9,9	51,3		37,0	-26,1		43,6	-57,6
13-juin	18:01	22,4	-808	-781	-1684	-1301	-1096	-1257	-1229			-1077	-1314	7,8	22,0	8,6	49,1		33,9	-26,0		41,8	-62,4
13-juin	18:31	23,5	-880	-830	-1692	-1358	-1129	-1299	-1257			-1142	-1334	7,4	24,3	10,1	46,0		36,0	-26,6		44,7	-59,4
13-juin	19:01	23,6	-807	-759	-1604	-1281	-1082	-1229	-1198			-1067	-1259	8,1	23,7	9,8	44,6		29,3	-25,9		42,1	-65,5
13-juin	19:31	22,8	-692	-658	-1500	-1169	-997	-1116	-1085			-943	-1147	8,4	20,4	9,9	43,6		24,2	-24,9		38,5	-65,6

date	heure	temp. (°C)	B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				B ₈₀		B ₈₁				B ₈₂				
			extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité sud		extrémité nord		extrémité sud		extrémité nord		
			N _{1,3} (kN)	N _{2,4} (kN)	N _{1,3} (kN)	N _{2,4} (kN)	N _{1,7} (kN)	N _{6,8} (kN)	N _{1,3} (kN)	N _{2,4} (kN)	N _{5,7} (kN)	N _{6,8} (kN)	M _{1,3} (kNm)	M _{2,4} (kNm)	M _{1,3} (kNm)	M _{2,4} (kNm)	M _{V(7-8)} (kNm)	M _{h(6-7)} (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)	M _h (kNm)	M _v (kNm)	
13-juin	20:01	21,6	-639	-595	-1423	-1091	-934	-1035	-992			-841	-1061	8,4	22,2	10,0	42,4		21,3	-23,9		34,5	-67,4
13-juin	20:31	21,5	-567	-533	-1355	-1019	-874	-960	-911			-780	-957	8,1	22,7	11,1	41,7		19,2	-23,2		34,5	-63,8
13-juin	21:01	20,3	-511	-477	-1291	-975	-822	-896	-835			-708	-916	7,5	19,5	10,9	40,3		18,1	-23,2		35,0	-65,3
13-juin	21:31	19,3	-462	-418	-1220	-921	-775	-852	-762			-635	-818	8,1	20,8	11,1	38,4		17,6	-22,9		33,9	-65,4
13-juin	22:01	18,7	-408	-369	-1154	-860	-732	-803	-689			-578	-767	7,4	21,4	12,5	36,8		16,0	-21,7		33,0	-63,4
13-juin	22:31	17,8	-375	-329	-1095	-832	-696	-763	-648			-532	-718	7,2	20,3	11,6	34,6		15,2	-22,6		32,7	-61,9
13-juin	23:01	17,4	-366	-308	-1059	-826	-689	-755	-636			-512	-680	7,0	20,3	11,4	32,0		14,9	-22,5		32,5	-59,6
13-juin	23:31	17,3	-369	-318	-1027	-825	-688	-754	-628			-510	-687	6,8	20,2	10,9	28,9		15,0	-22,8		32,7	-62,4
14-juin	0:01	17,0	-352	-303	-989	-814	-675	-740	-609			-485	-681	6,8	20,2	11,3	26,1		15,3	-22,7		33,9	-61,3
14-juin	0:31	16,7	-340	-295	-950	-803	-663	-729	-598			-480	-657	6,8	20,3	12,3	23,8		15,2	-22,6		32,7	-61,8
14-juin	1:01	16,5	-328	-271	-918	-791	-651	-718	-579			-458	-634	6,9	20,4	10,9	21,8		15,4	-22,9		32,4	-61,0
14-juin	1:31	16,3	-328	-282	-897	-789	-652	-720	-580			-458	-651	7,0	20,3	11,2	19,7		15,3	-22,5		33,5	-60,7
14-juin	2:01	16,2	-322	-276	-879	-783	-644	-711	-570			-454	-617	7,4	20,1	11,3	18,8		15,1	-22,7		32,5	-59,0
14-juin	2:31	16,4	-318	-269	-873	-781	-641	-709	-566			-445	-638	7,0	20,5	11,3	18,5		15,4	-22,7		33,8	-60,7
14-juin	3:01	16,4	-311	-273	-870	-780	-641	-707	-568			-454	-633	7,2	21,2	11,4	18,0		15,5	-22,5		32,7	-60,5
14-juin	3:31	16,2	-322	-271	-866	-784	-643	-713	-574			-460	-643	7,2	20,8	11,1	17,4		15,9	-22,6		33,2	-60,9
14-juin	4:01				-850	-780	-636	-706	-568			-458	-637			11,5	16,6		15,9	-22,5		32,7	-61,0
15-juin	13:05	18,7	-542	-522	-1142	-1026	-844	-955	-897			-753	-991	8,2	21,8	10,1	23,0		24,1	-24,3		38,7	-63,4
15-juin	13:10	18,4	-549	-532	-1177	-1033	-847	-956	-909			-772	-990	8,6	25,0	9,8	26,2		23,6	-24,3		37,9	-64,3
15-juin	13:15	18,3	-562	-517	-1184	-1027	-853	-955	-904			-765	-967	7,5	24,1	9,8	25,9		23,3	-24,2		37,6	-61,4
15-juin	13:20	17,9	-542	-515	-1167	-1011	-829	-933	-877			-733	-972	9,0	24,3	9,9	26,7		23,2	-23,9		38,8	-63,7
15-juin	13:25	18,2	-544	-513	-1174	-1008	-829	-929	-877			-726	-959	8,9	24,3	10,3	27,0		23,0	-24,5		37,0	-64,7
15-juin	13:30	17,9	-539	-510	-1170	-994	-820	-922	-877			-744	-960	8,6	24,1	11,2	27,5		23,5	-23,8		37,6	-63,8
15-juin	13:35	18,1	-536	-511	-1176	-1004	-827	-926	-874			-726	-954	9,0	24,4	9,9	27,7		22,8	-24,0		37,7	-64,6
15-juin	13:40	18,0	-528	-495	-1167	-994	-817	-918	-860			-710	-934	8,6	23,6	10,2	27,9		22,8	-24,2		37,2	-64,7
15-juin	13:45	17,8	-521	-492	-1164	-989	-811	-918	-851			-717	-937	8,8	24,3	10,4	27,9		23,9	-24,0		37,3	-63,8
15-juin	13:50	19,1	-517	-478	-1161	-982	-805	-904	-845			-704	-936	9,3	23,6	10,2	28,4		22,6	-23,9		38,8	-63,9
15-juin	13:55	19,4	-521	-484	-1162	-974	-803	-903	-847			-706	-928	8,6	23,4	10,5	28,9		22,4	-24,3		37,4	-63,9
15-juin	14:00	19,6	-498	-480	-1157	-976	-798	-900	-839			-704	-914	8,7	25,4	9,9	29,0		22,6	-24,3		38,2	-64,9
15-juin	14:05	19,8	-511	-481	-1159	-975	-799	-898	-836			-704	-920	8,7	24,2	10,3	28,8		22,5	-23,9		37,4	-64,1
15-juin	14:10	19,7	-503	-478	-1156	-976	-794	-892	-831			-691	-916	8,7	24,1	9,7	28,8		22,8	-24,0		38,1	-63,6
15-juin	14:15	19,9	-500	-477	-1160	-982	-803	-905	-832			-710	-925	8,8	22,1	9,9	28,7		22,7	-22,2		37,0	-63,6
15-juin	14:20	20,0	-531	-506	-1174	-996	-815	-916	-865			-719	-956	8,9	24,3	10,0	28,4		23,2	-24,2		38,8	-63,4
15-juin	14:25	19,8	-537	-495	-1171	-1000	-818	-923	-868			-734	-951	9,7	23,8	10,1	28,4		23,0	-24,2		37,1	-63,2
15-juin	14:30	19,7	-528	-496	-1165	-991	-814	-914	-850			-714	-928	9,1	24,3	10,4	28,2		22,4	-23,9		38,3	-64,5
15-juin	14:35	19,7	-513	-484	-1158	-972	-801	-903	-847			-713	-913	9,3	24,3	10,9	28,4		23,0	-24,0		37,0	-61,8
15-juin	14:40	19,6	-518	-490	-1165	-990	-819	-936	-855			-724	-946	9,5	24,9	9,8	28,1		24,1	-23,8		37,4	-63,6
15-juin	14:45	19,8	-529	-503	-1171	-998	-822	-921	-857			-727	-943	8,7	24,4	10,6	27,9		22,4	-23,7		37,3	-63,2
15-juin	14:50	20,0	-533	-502	-1173	-993	-819	-921	-855			-719	-943	8,8	23,9	10,5	28,5		22,5	-23,8		37,8	-63,5
15-juin	14:55	19,4	-534	-503	-1172	-999	-820	-923	-862			-717	-948	8,9	24,3	9,9	28,6		22,5	-24,1		38,3	-63,1
15-juin	15:00	19,3	-503	-487	-1160	-987	-809	-909	-841			-699	-932	8,2	22,1	10,1	28,1		22,5	-23,8		38,5	-63,0
15-juin	15:05	19,5	-518	-485	-1164	-983	-807	-908	-837			-708	-923	8,4	23,4	10,6	28,6		22,7	-23,9		37,4	-62,9
15-juin	15:10	19,4	-525	-480	-1165	-982	-811	-920	-847			-706	-936	7,4	23,9	9,4	28,9		23,2	-24,0		38,7	-62,9
15-juin	15:15	19,2	-518	-493	-1172	-986	-814	-926	-829			-720	-931	8,5	24,9	10,6	28,9		23,9	-25,8		37,4	-63,0
15-juin	15:25	19,9	-545	-503	-1185	-1003	-831	-943	-867			-736	-953	9,8	24,0	10,8	28,4		24,2	-23,6		37,5	-62,3
15-juin	15:35	19,4	-547	-520	-1183	-1013	-837	-946	-878			-738	-957	9,0	24,1	10,6	27,7		23,8	-24,0		37,5	-63,4
9. Avant la dépose des butons																							
19-juin	13:40	35,4	-1393	-1425	-2246	-1780	-1608	-1745	-1942			-1661	-2167	15,1	31,8	7,2	53,8		30,7	-25,5		42,1	-60,2
20-juin	9:59	25,8	-812	-845	-1455	-1330	-1244	-1320	-1447			-1267	-1523	9,9	22,4	9,6	12,5		21,8	-22,6		36,9	-64,7