

Interprétation par le calcul aux coefficients de réaction du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten

H. JOSSEAUME,
L. DELATTRE,
L. MESPOULHE

Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre
75732 Paris Cedex 15

Résumé

L'expérimentation en vraie grandeur d'un rideau de palplanches butonné, en site sableux, faite à Hochstetten par l'Université de Karlsruhe, apporte des informations précieuses sur le comportement des écrans de soutènement flexibles étayés par une nappe de butons rigides. L'article traite de l'interprétation des résultats de cette expérimentation par le calcul aux coefficients de réaction. Après un bref rappel des conditions de l'expérience et des résultats de l'étude géotechnique du site, on présente les hypothèses adoptées pour la modélisation du problème ainsi que les valeurs retenues pour les paramètres géotechniques, qui ont été déterminées à partir des données de la reconnaissance et sur la base de calculs à rebours. On procède ensuite à la comparaison des valeurs expérimentales et des valeurs de calcul des déplacements du rideau, des moments fléchissants, de la pression du sol et de la réaction de butonnage, ainsi qu'à la discussion des résultats de cette comparaison. Il apparaît que le calcul permet généralement de déterminer les déplacements et les moments fléchissants avec une assez bonne précision mais que dans la plupart des cas, il sous-estime fortement la pression du sol en tête du rideau et la force de butonnage. Ces divergences sont dues au fait que le rideau est le siège d'un effet de voûte dont le calcul aux coefficients de réaction ne peut rendre compte. Il en résulte que lorsqu'un écran flexible étayé par des butons rigides est dimensionné à l'aide du calcul aux coefficients de réaction, les valeurs théoriques de la réaction de butonnage doivent être systématiquement majorées.

Interpretation of the behaviour of the test sheetpile wall in Hochstetten using subgrade reaction calculations

Abstract

The field test of a propped sheetpile wall in sandy soil, performed in Hochstetten by the University of Karlsruhe, yields valuable information about the behaviour of flexible retaining walls propped by one row of rigid struts. This paper deals with the analysis of the test results using subgrade reaction calculations. After a short description of the field test conditions and of the geotechnical investigation of the test site, the assumptions of the analysis are presented as well as the soil parameters values used for the calculation, the latter having been assessed from the available soil data and from back calculations analysis. Afterwards, the values of the wall displacements, bending moments, earth pressures and strut forces derived from the calculations are compared with the corresponding experimental ones and the results of this comparison are discussed. Test and calculation results are generally in rather good agreement as regards the displacements but the calculations overestimate the bending moments in the middle part of the wall and, in most cases, underestimate the earth pressure at its upper part and the strut force by a large amount. These discrepancies are due to the fact that arching took place along the wall and that the calculation method cannot account for it. It follows that when flexible retaining walls propped by rigid struts are designed with the help of subgrade reaction method, the calculated strut force values must be systematically increased.

Introduction

La méthode des coefficients de réaction est une des méthodes de calcul des écrans de soutènement les plus utilisées en France, sinon la plus fréquemment employée. Cette méthode a notamment été validée par les constatations effectuées sur des rideaux de palplanches, des parois préfabriquées et des parois coulées en place (voir notamment Josseume et Stenne, 1979; Gigan, 1979; Blivet *et al.*, 1981; Kastner, 1982; Gigan, 1984).

Il faut cependant souligner qu'en raison des hypothèses sur lesquelles il repose, le calcul aux coefficients de réaction ne permet pas de modéliser les effets de voûte et que la concordance relativement bonne entre les comportements théorique et réel de ces ouvrages est due au fait que leurs caractéristiques et/ou leurs conditions d'appui étaient peu ou pas favorables au développement d'effets de voûte.

Les constatations faites en 1993 par l'Université de Karlsruhe sur le rideau de palplanches expérimental de Hochstetten (von Wolffersdorff, 1994 (a) et 1994 (b)) apportent des informations nouvelles sur le comportement des écrans de soutènement. Ces informations, qui constituent la base d'autres tests de validité des méthodes de calcul disponibles, sont particulièrement intéressantes en ce sens que, d'une part, elles se rapportent à un rideau flexible étayé par des butons très rigides, c'est-à-dire à un ouvrage susceptible d'être le siège d'effets de voûte et que, d'autre part, il a été sollicité jusqu'à l'équilibre limite. De nombreux organismes européens spécialisés en génie civil, parmi lesquels le LCPC, ont été associés à l'expérimentation au niveau de la prévision de ses résultats (calculs prévisionnels) et de son interprétation (calculs *a posteriori*). Leurs résultats, obtenus à partir de calculs aux coefficients de réaction et de calculs aux éléments finis, ont été discutés lors d'un séminaire organisé à Delft par le CUR

(Dutch Centre for Civil Engineering Research and Codes) en vue de l'évaluation de l'expérience (Workshop Sheet Pile Test Karlsruhe, octobre 1994).

Cet article présente une interprétation de l'expérimentation de Hochstetten sur la base du calcul aux coefficients de réaction. Il reprend et complète la communication orale (H. Josseume) présentée au séminaire de Delft à partir des calculs prévisionnels (Josseume et Delmer, 1993) et des calculs *a posteriori* (Josseume *et al.*, 1994).

Description sommaire de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée à Hochstetten (près de Karlsruhe) dans un site dont le sol est constitué d'un matériau sableux non saturé. Le dispositif dans lequel s'intègre le rideau expérimental, l'instrumentation de celui-ci ainsi que les essais préliminaires des matériels de mesure et l'expérimentation proprement dite ont été décrits en détail dans d'autres publications (von Wolffersdorff, 1994 (a) et 1994 (b), Shahrour *et al.*, 1995), aussi ne rappellera-t-on ici que les éléments essentiels de l'opération.

Le rideau expérimental, formé de palplanches en Z de faible inertie (profils Krupp KD6) est un rideau butonné de 6 m de hauteur qui assure le soutènement d'une des parois longitudinales d'une fouille rectangulaire dont la profondeur atteint 5 m à la fin de l'expérimentation (Fig. 1). Les butons, au nombre de trois, sont des profilés métalliques creux de section rectangulaire à l'extrémité desquels des vérins à vis ont été adaptés. Ils prennent appui sur le rideau de palplanches qui soutient l'autre paroi longitudinale de la fouille, la fiche et l'inertie de ce rideau ayant été choisies de façon à ce qu'il ne subisse aucun déplacement appréciable.

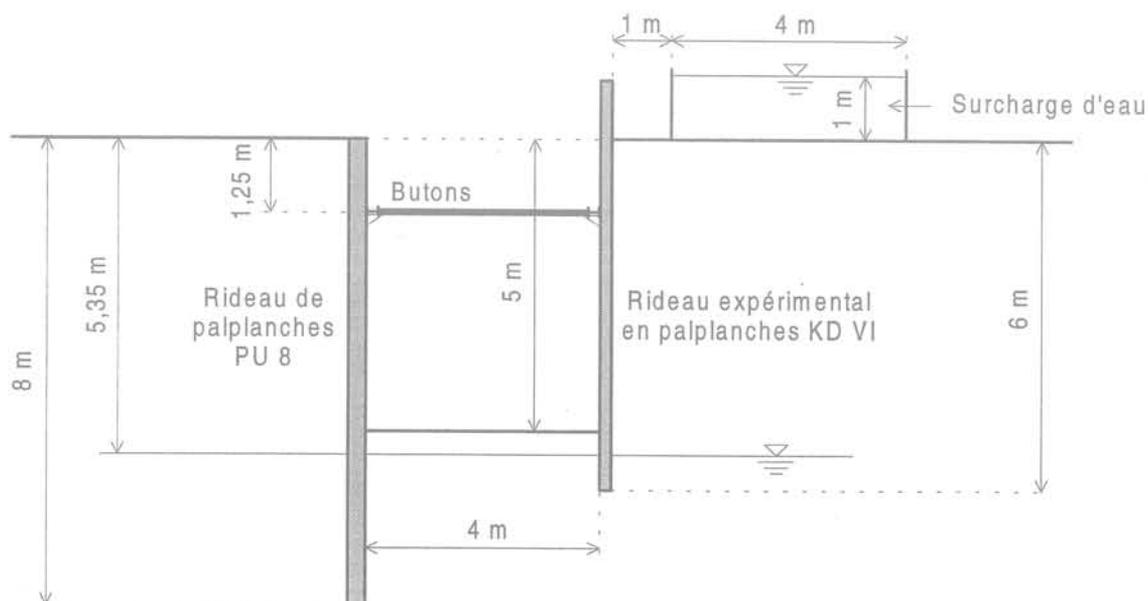


FIG. 1 Coupe transversale du site expérimental en fin d'excavation.
Cross section of the sheetpile test site after completion of the pit.

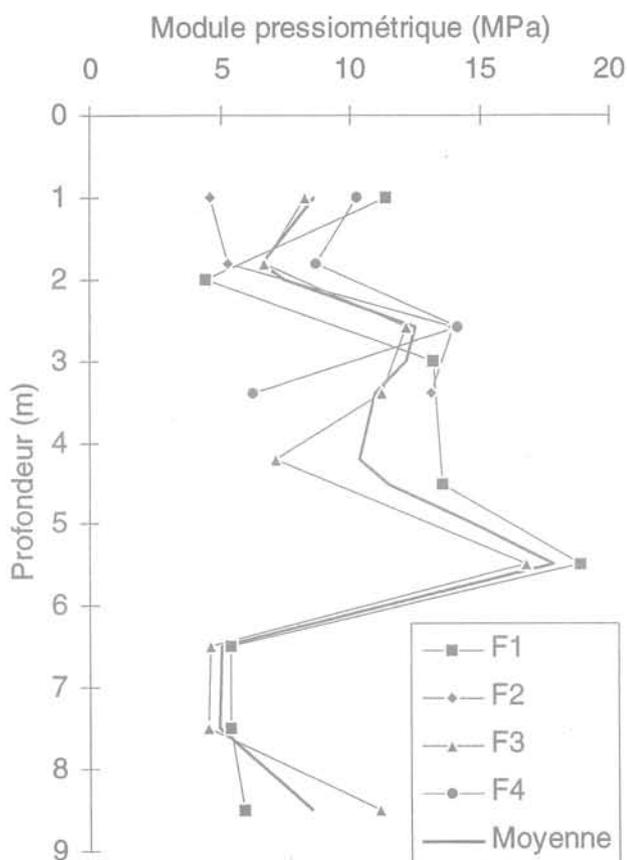


FIG. 2 Variations du module pressiométrique avec la profondeur.
Pressiometer modulus versus depth.

L'expérimentation ayant pour but de déterminer les efforts internes (moments fléchissants) et externes (pression du sol et réaction unitaire de butonnage) appliqués au rideau ainsi que les déplacements qu'il subit, les mesures suivantes ont été réalisées :

- mesure de la pression du sol dans deux sections situées au milieu des intervalles séparant deux butons consécutifs, au moyen de cellules de pression totale fixées sur les deux faces du rideau ;
- mesure des déformations relatives longitudinales des faces internes des palplanches (dont on déduit les valeurs des moments fléchissants aux niveaux de mesure) au moyen de jauges de déformation posées dans les mêmes sections de mesure ;
- mesure des déformations relatives longitudinales des trois butons (dont on déduit la réaction unitaire de butonnage) au moyen de jauges de déformation ;
- mesures inclinométriques et topographiques dans les profils où sont situés les butons.

Ces mesures ont été effectuées à divers stades significatifs de l'expérimentation, dont les phases essentielles sont décrites ci-dessous :

- mise en place du rideau expérimental par vibrofonçage ;
- excavation jusqu'à 1,75 m de profondeur et mise en place de la lierne et des butons à 1,25 m au-dessous de la tête du rideau. Application à chaque buton d'une force de précontrainte de 10 kN correspondant à une force unitaire d'environ 4,5 kN/m ;

- excavation jusqu'à 5 m de profondeur en agissant sur les vérins à vis des butons de façon à empêcher tout déplacement du niveau de butonnage ;

- application sur le terre-plein d'une surcharge uniforme d'intensité 10 kPa couvrant une bande de 4 m de large, parallèle au rideau et située à 1 m en arrière de celui-ci. Lors de cette opération, le déplacement du niveau de butonnage était également empêché ;

- réduction de la réaction de butonnage par raccourcissement des butons afin d'amener le rideau à l'équilibre limite, celui-ci étant atteint lorsque la réaction de butonnage devient constante.

3

Données géotechniques

Les caractéristiques du sol rencontré sur le site ont été déterminées à partir d'une étude géotechnique détaillée ayant mis en jeu des sondages, des essais in place et des essais de laboratoire. Cette étude fait notamment apparaître :

- que le sol de Hochstetten est un sable mal gradué, fin à moyen, de compacité moyenne traversé localement de passées graveleuses ;

- qu'au-dessus de la surface de la nappe, rencontrée vers 5,35 m de profondeur, le sol a un poids volumique apparent moyen de l'ordre de 16,5 kN/m³, le poids volumique sous la nappe étant de 19,8 kN/m³ ;

- que les essais triaxiaux et les essais de cisaillement direct, effectués sur des éprouvettes de sol séché, homogénéisé et reconstitué à la densité sèche moyenne en place, indiquent des valeurs de l'angle de frottement interne ϕ' comprises entre 40,5° et 42,5° ;

- que les forces capillaires qui se développent dans le sol non saturé génèrent une cohésion non négligeable que des mesures in place ont permis d'estimer à quelques kilopascals, deux séries de trois mesures locales indiquant respectivement $c' = 2,7$ kPa et $c' = 4$ kPa.

On notera également que l'étude géotechnique a comporté l'exécution de quatre sondages pressiométriques Ménard qui ont, en particulier, fourni les valeurs du module pressiométrique E_M à partir desquelles les coefficients de réaction du sol ont été évalués. Les variations de E_M avec la profondeur sont représentées sur la figure 2.

4

Simulation de l'expérimentation par le calcul

4.1

Généralités

La simulation de l'expérimentation a été faite par le calcul élastoplastique aux coefficients de réaction au moyen du logiciel DENEbola-LCPC (Balay *et al.*, 1982 ; Balay, 1984). Elle a consisté à déterminer les valeurs théoriques de la pression du sol, des moments fléchissants, des déplacements du rideau et de la réaction de butonnage à la fin de chacune des phases de

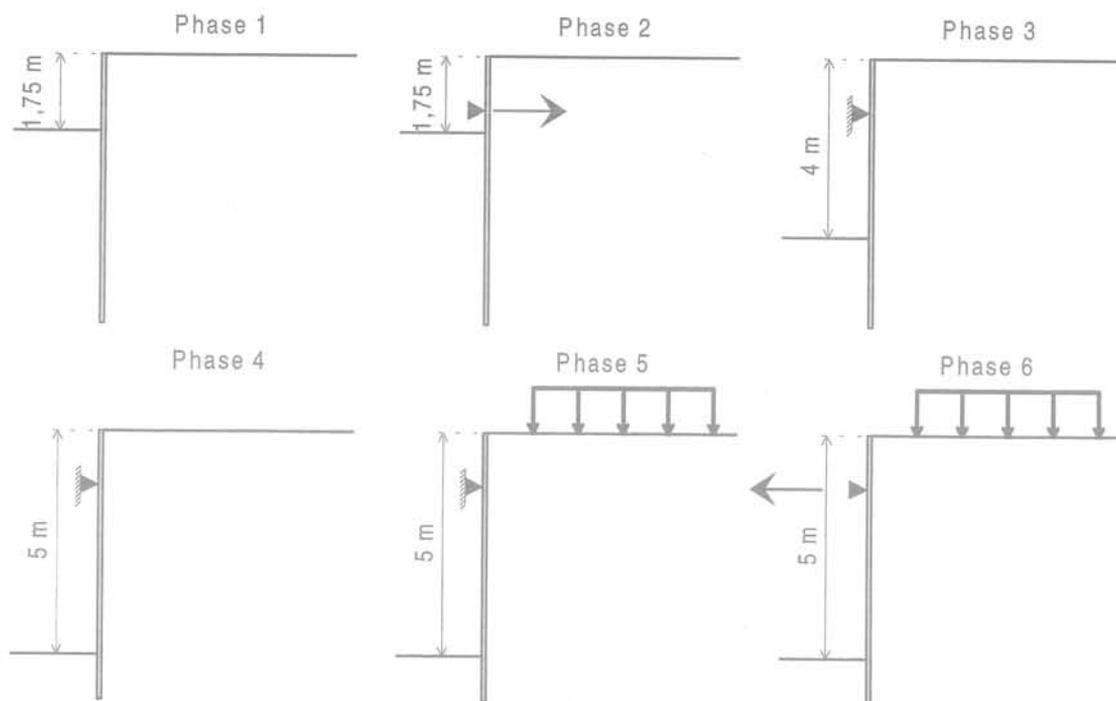


FIG. 3 Phases de l'expérimentation considérées dans la simulation par le calcul.
Stages of the sheetpile test considered in the calculations.

travaux énumérées ci-après et schématisées sur la figure 3 :

- phase 1 – excavation à 1,75 m ;
- phase 2 – pose et mise en précontrainte des butons ;
- phase 3 – excavation à 4 m ;
- phase 4 – excavation à 5 m ;
- phase 5 – application de la surcharge sur le terre-plein ;
- phase 6 – raccourcissement des butons.

Les données nécessaires à l'exécution du calcul sont, d'une part, les caractéristiques du rideau assimilé à une poutre élastique (géométrie, inertie, module d'Young) et, d'autre part, les valeurs des paramètres géotechniques qui interviennent dans la définition de la loi de comportement du sol associée à la méthode.

Outre le poids volumique γ du sol et les paramètres de résistance au cisaillement c' et ϕ' , cette loi de comportement met en jeu le coefficient de réaction k_n , dont la valeur varie généralement d'une phase de calcul à la suivante, le coefficient de pression du sol au repos K_0 et le coefficient de pression initiale K_1 qui définit l'état des contraintes normales effectives exercées par le sol sur les faces du rideau après la mise en place de celui-ci. Les valeurs de ces paramètres ont été déterminées sur la base des informations tirées de l'étude géotechnique, mais certaines d'entre elles ont dû être précisées à partir de calculs à rebours visant à retrouver les grandeurs mesurées lors de l'expérimentation.

4.2

Paramètres de résistance au cisaillement

Comme les seules données de l'étude géotechnique ne permettaient pas d'évaluer avec précision les paramètres de résistance au cisaillement (particulièrement la cohésion, qui joue un rôle important, compte tenu de la hauteur relativement faible de l'ouvrage), il a également été tenu compte des résultats des mesures de pression du sol lors de la détermination de ces paramètres.

L'angle de frottement interne ϕ' , mesuré sur des éprouvettes de sol sec reconstituées, étant compris entre $40,5^\circ$ et $42,5^\circ$, on a tout d'abord admis que sa valeur en place se situait vraisemblablement entre 40° et 45° . On a, par ailleurs, supposé que les pressions mesurées sur la face arrière du rideau ayant des valeurs suffisamment faibles pour être compatibles avec le développement d'un état d'équilibre limite de poussée aux niveaux de mesure, étaient effectivement les composantes normales des contraintes limites de poussée à ces niveaux. Les valeurs correspondantes de c' ont alors été calculées pour des valeurs de ϕ' situées dans la plage 40° - 45° . Ces calculs ont été faits en utilisant les tables de Kérisel et Absi (1990) dans l'hypo-

thèse d'un angle de frottement sol-rideau δ_a égal à $\frac{2}{3} \phi'$.

Une analyse des valeurs de c' ainsi obtenues tenant compte de l'ordre de grandeur de la cohésion capillaire

Coefficients de pression au repos et de pression initiale

On a adopté pour le coefficient de pression du sol au repos les valeurs données par la formule de Jaky, $K_0 = 1 - \sin \phi'$, soit $K_0 = 0,36$ pour le sol situé à une profondeur inférieure à 2,75 m et $K_0 = 0,29$ pour le sol sous-jacent.

En ce qui concerne le coefficient de pression initiale, deux jeux de valeurs ont été successivement pris en compte :

- une première série de calculs (calculs 1) a été faite en attribuant à K_i des valeurs K_i^1 égales à K_0 , conformément à l'hypothèse simplificatrice généralement faite pour le calcul des rideaux de palplanches ;

- les mesures de pression du sol sur le rideau après vibrofonçage ayant indiqué une distribution de contraintes totalement différente de la distribution théorique précédente, des calculs complémentaires (calculs 2) ont été effectués à partir de valeurs K_i^2 de K_i en meilleur accord avec les mesures, en dépit des incertitudes relatives à la représentativité de celles-ci (Fig. 4) :

- $K_i^2 = 0,66$ de 0 à 2,25 m de profondeur ;
- $K_i^2 = 0,32$ de 2,25 à 2,75 m de profondeur ;
- $K_i^2 = 0,125$ au-delà de 2,75 m.

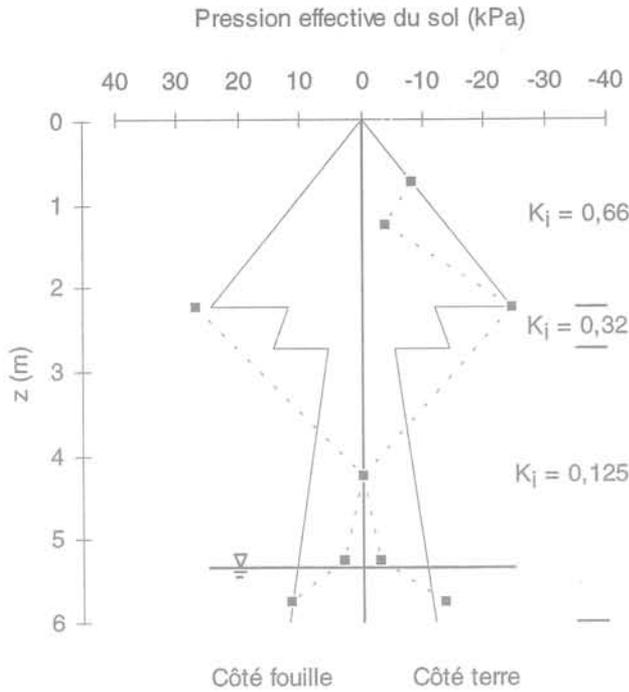


FIG. 4 Résultats des mesures de pression du sol sur le rideau après sa mise en place. Results of the earth pressure measurements carried out on the sheetpile wall after its installation.

mesurée localement a conduit à retenir les valeurs suivantes de c' et ϕ' :

- $c' = 1,5 \text{ kPa}$ et $\phi' = 40^\circ$ entre 0 et 2,75 m de profondeur ;
- $c' = 6 \text{ kPa}$ et $\phi' = 45^\circ$ entre 2,75 et 5,35 m de profondeur ;
- $c' = 0$ et $\phi' = 45^\circ$ au-delà de 5,35 m (sol sous la nappe).

Coefficients de réaction

Les coefficients de réaction du sol ont été déterminés à partir des valeurs moyennes des modules pressiométriques aux niveaux où des résultats d'essais sont disponibles, c'est-à-dire au-dessous du niveau de butonnage, et à partir de calculs à rebours au-dessus de celui-ci.

Les règles utilisées pour la détermination des coefficients de réaction sont, à quelques nuances près,

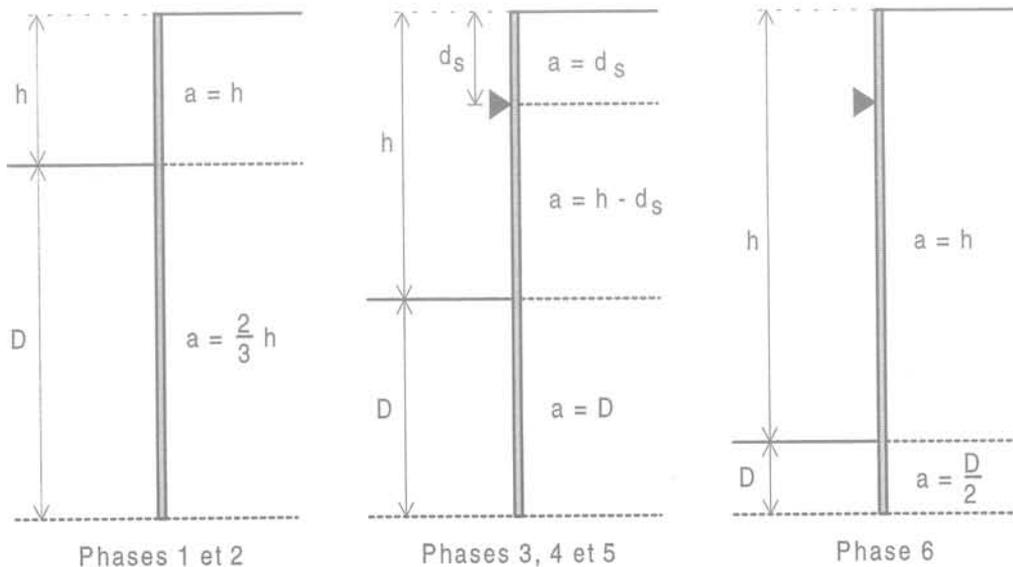


FIG. 5 Principes de détermination du paramètre dimensionnel a. Principles of the determination of the dimensional parameter a.

TABEAU I Valeurs des paramètres géotechniques prises en compte dans les calculs.
Soil parameter values taken into account for the calculations.

Profondeur (m)	Poids volumique apparent γ (kN/m ³)	Paramètres de résistance au cisaillement		Coefficient de pression du sol au repos K_0	Coefficient de pression initiale K_1		Coefficient de réaction k_h (kN/m ³)							
		c' (kPa)	ϕ' (degrés)		K_1^1	K_1^2	phases 1 et 2	phase 3	phases 4 et 5	phase 6				
0-1,25	16,5	1,5	40	0,36	0,36	0,66	9600	10000	10000	3800				
1,25-1,75											21600	11800	9500	7600
1,75-2,25							24600	17600	11400	9200				
2,25-2,75														
2,75-4,00							0	45	0,29	0,125				
4,00-5,00	19,8	6	0,29	0,125										
5,00-5,35					0	0	0,29	0,125						
5,35-6,00	0	0	0,29	0,125										

celles préconisées par Balay (1984). La force de précontrainte des butons étant très faible, la procédure applicable aux écrans étayés par des appuis non précontraints a été appliquée, et le coefficient de réaction de chacune des couches considérées dans la simulation de l'expérimentation a été calculé par la formule de Ménard *et al.* (1964):

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{E_M} \left[\frac{\alpha a}{2} + 0,133(9a)^\alpha \right]$$

dans laquelle :

E_M désigne le module pressiométrique moyen de la couche étudiée ;

α , un paramètre rhéologique égal à 1/3 pour les sables et graves ;

a , un paramètre dimensionnel fonction des conditions géométriques du problème et dont les règles de calcul adoptées dans le cas étudié sont résumées sur la figure 5.

Les calculs à rebours visant à déterminer les coefficients de réaction relatifs à la couche de surface ont été effectués en faisant varier les valeurs de ce paramètre jusqu'à ce que l'on obtienne une concordance optimale entre les valeurs théoriques et expérimentales des grandeurs mesurées et, plus particulièrement, des déplacements et des moments fléchissants, c'est-à-dire des grandeurs dont les valeurs expérimentales sont les plus fiables. Ces calculs ont été faits en admettant l'égalité des coefficients K_0 et K_1 et la fixité du point de butonnage lors des phases 3, 4 et 5.

Il y a lieu de noter que le calage des valeurs théoriques des déplacements sur les valeurs expérimentales n'a pas été fait à partir des déplacements absolus, mais des déplacements relatifs comptés à partir de la déformée du rideau après mise en précontrainte des butons, prise comme origine. Ce choix est motivé par le fait que des fissures d'environ 5 mm de large se sont ouvertes entre le sol et le rideau au cours des premières phases de l'expérience (von Wolfersdorff, 1994 (b)) et qu'il n'était possible de relier les déplacements du rideau au coefficient de réaction du sol qu'à partir du moment où le sol et le rideau étaient en contact.

Les valeurs des coefficients de réaction prises en compte dans les calculs sont présentées dans le

tableau I, où les valeurs des autres paramètres géotechniques sont également regroupées.

4.5

Hypothèses de calcul

Les contraintes limites de poussée et de butée prises en compte pour l'établissement des relations entre la pression du sol et le déplacement du rideau, qui définissent la loi d'interaction en chaque point de celui-ci, ont été déterminées au moyen des tables de Kérisel et Absi (1990) pour les valeurs suivantes de l'angle de frottement sol-rideau δ :

TABEAU II Hypothèses particulières relatives aux différents calculs.

Specific assumptions related to the different calculations.

Désignation des calculs	Coefficient de pression initiale K_1	Conditions au niveau de butonnage		
		Phase	T(kN/m)	Δy (mm) ^a
1a	$K_1^1 = K_0$	1	0	0
		2		0
		3		0
		4		0
2a	K_1^2	5	4.5	5 à 50
		6		
1b	$K_1^1 = K_0$	4		-1
		5		0
2b	K_1^2	6		5 à 50

^a Δy : déplacement du point de butonnage au cours d'une phase de travaux.

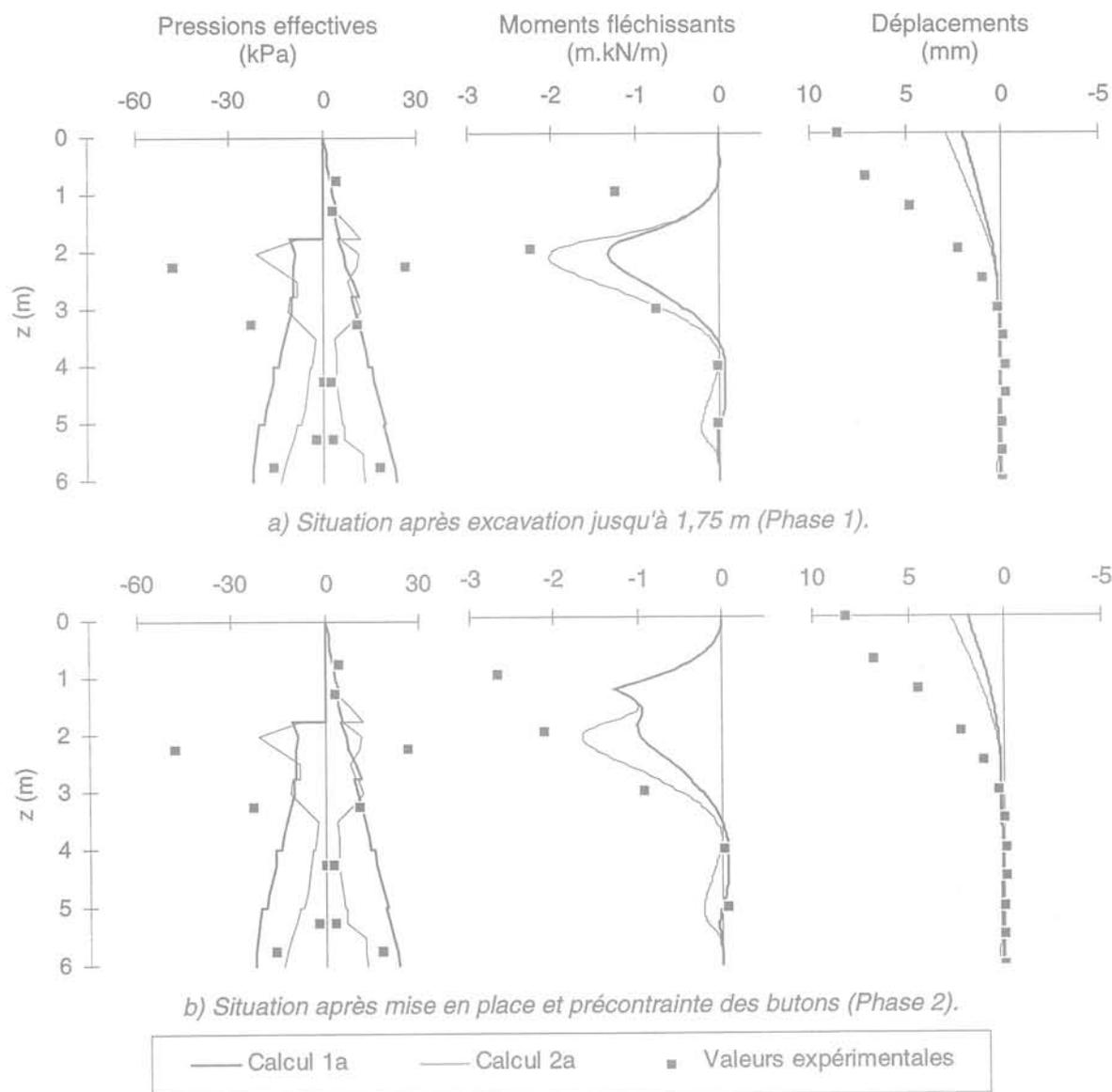


FIG. 6 Résultats des calculs 1 et 2 relatifs aux phases 1 et 2 et comparaison avec les résultats expérimentaux.

Results of calculations 1 and 2 related to stages 1 and 2 and comparison with the test results: a) situation after excavation up to 1,75 m (stage 1); b) situation after installation and prestressing of the struts (stage 2).

– les contraintes de poussée ont été calculées en adoptant la valeur $\delta_a = \frac{2}{3} \varphi'$ pour toutes les phases de calcul à l'exception de la phase 6 pour laquelle l'importance des déplacements du rideau justifiait de prendre $\delta_a = \varphi'$;

– les contraintes de butée ont été calculées en tenant compte de valeurs de δ_p différentes sur les deux faces du rideau, on a en effet retenu les valeurs $\delta_p = -\frac{2}{3} \varphi'$ sur la face avant et $\delta_p = 0$ sur la face arrière.

Les phases d'excavation ont été modélisées en adoptant pour le sol un schéma de comportement réversible en déchargement, tel qu'une diminution $\Delta\sigma'_v$ de la contrainte verticale effective à déplacement latéral nul entraîne une diminution de la contrainte horizontale effective égale à $\Delta\sigma'_h = K_0 \Delta\sigma'_v$.

L'action des butons a été prise en compte par l'introduction d'une condition aux limites correspondant à l'imposition d'une force ou d'un déplacement au niveau de butonnage.

Le premier type de condition intéresse uniquement la phase 2, dans laquelle la mise en précontrainte des butons a été simulée par l'application d'une force de 4,5 kN/m. Dans toutes les phases de calcul ultérieures, une condition de déplacement a été imposée au niveau de butonnage:

– des calculs supposant que, conformément aux conditions théoriques de réalisation de l'expérience, le niveau de butonnage n'a subi aucun déplacement au cours des phases 3, 4 et 5, ont tout d'abord été effectués (calculs 1a et 2a). L'examen des résultats des mesures de déplacement ayant montré qu'un recul du point de butonnage d'environ 1 mm était intervenu lors de l'exécution des terrassements entre 4 m et 5 m de

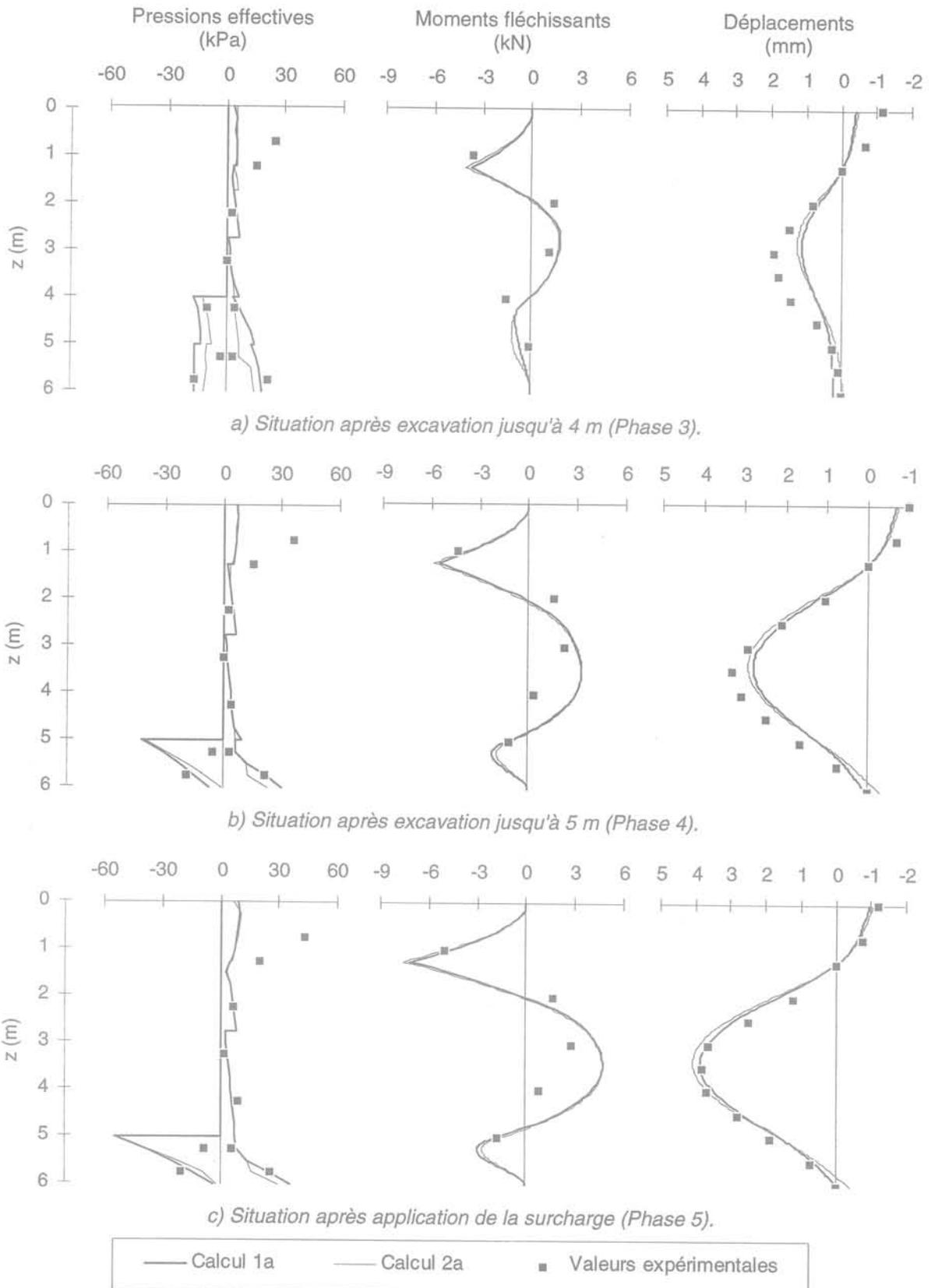


FIG. 7 Résultats des calculs 1a et 2a relatifs aux phases 3, 4 et 5, tenant compte d'un déplacement nul du niveau de butonnage. Comparaison avec les résultats expérimentaux.
 Results of calculations 1a and 2a related to stages 3, 4 and 5, assuming the fixity of the strut level. Comparison with the test results: a) situation after excavation up to 4 m (stage 3); b) situation after excavation up to 5 m (stage 4); c) situation after loading the soil behind the wall (stage 5).

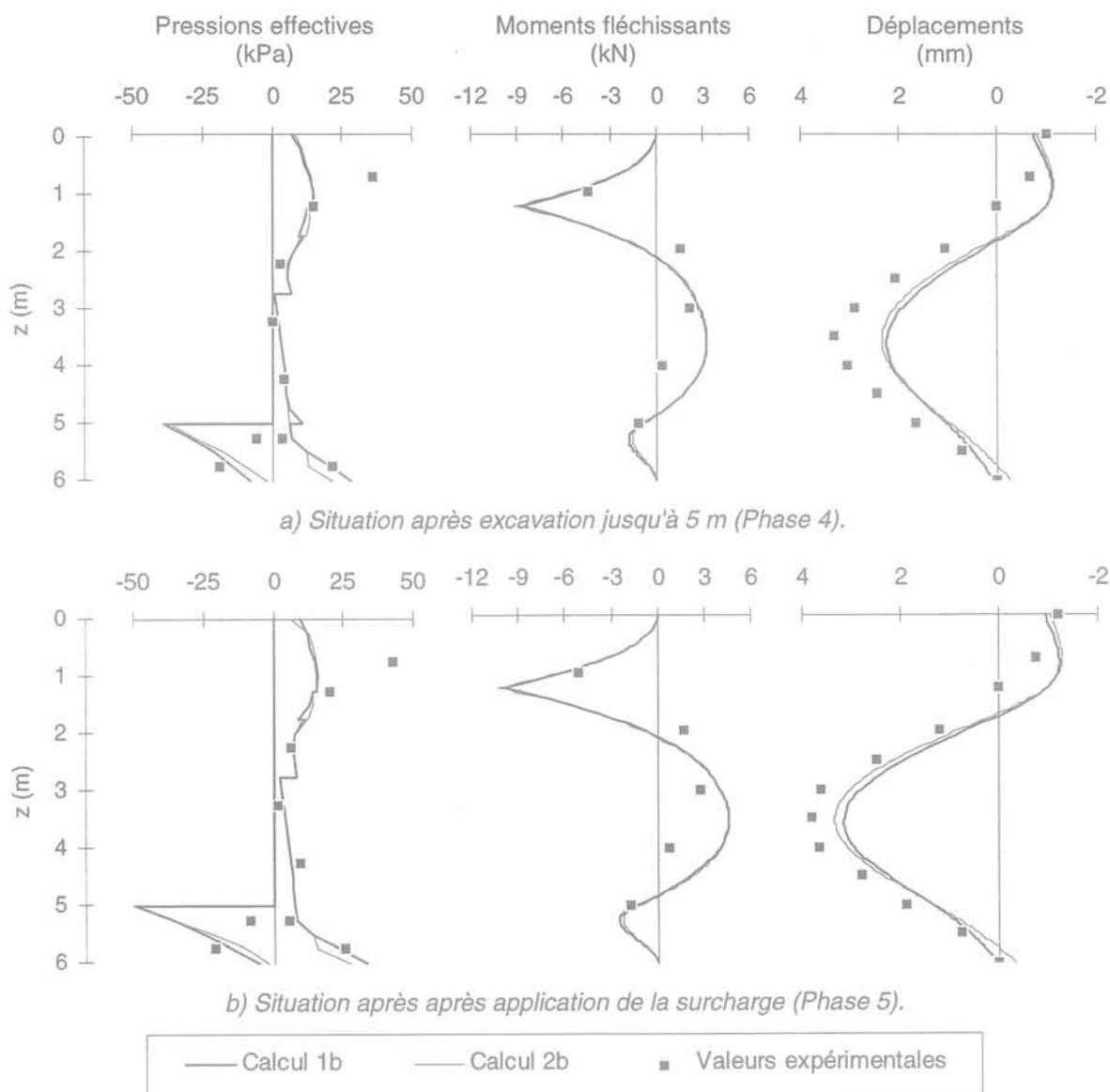


FIG. 8

Résultats des calculs 1b et 2b relatifs aux phases 4 et 5, tenant compte d'un recul du niveau de butonnage égal à 1 mm lors de l'excavation de 4 m à 5 m. Comparaison avec les résultats expérimentaux.

Results of calculations 1b and 2b related to stages 4 and 5, assuming a backward displacement of the strut level equal to 1 mm during the digging of the pit from 4 m to 5 m. Comparison with the test results: a) situation after excavation up to 5 m (stage 4); b) situation after loading the soil behind the wall (stage 5).

profondeur (phase 4) des simulations du comportement du rideau à partir de la phase 4 ont été faites en tenant compte de ce recul (calculs 1 b et 2 b);

– l'étude du passage du rideau à l'équilibre limite en phase 6 a été faite à partir de la relation existant entre la force unitaire de butonnage T et le déplacement des têtes de butons. Pour établir cette relation, la force T a été calculée en affectant successivement à ce déplacement huit valeurs correspondant respectivement à des raccourcissements des butons compris entre 5 mm et 50 mm.

Les hypothèses particulières des différents calculs sont récapitulées dans le tableau II.

5

Résultats et interprétation

5.1

Résultats

Les résultats des calculs sont présentés sous forme de diagrammes représentant, pour chaque phase de l'expérimentation, les variations en fonction de la profondeur z de la pression effective p' du sol, des moments fléchissants M et des déplacements y du

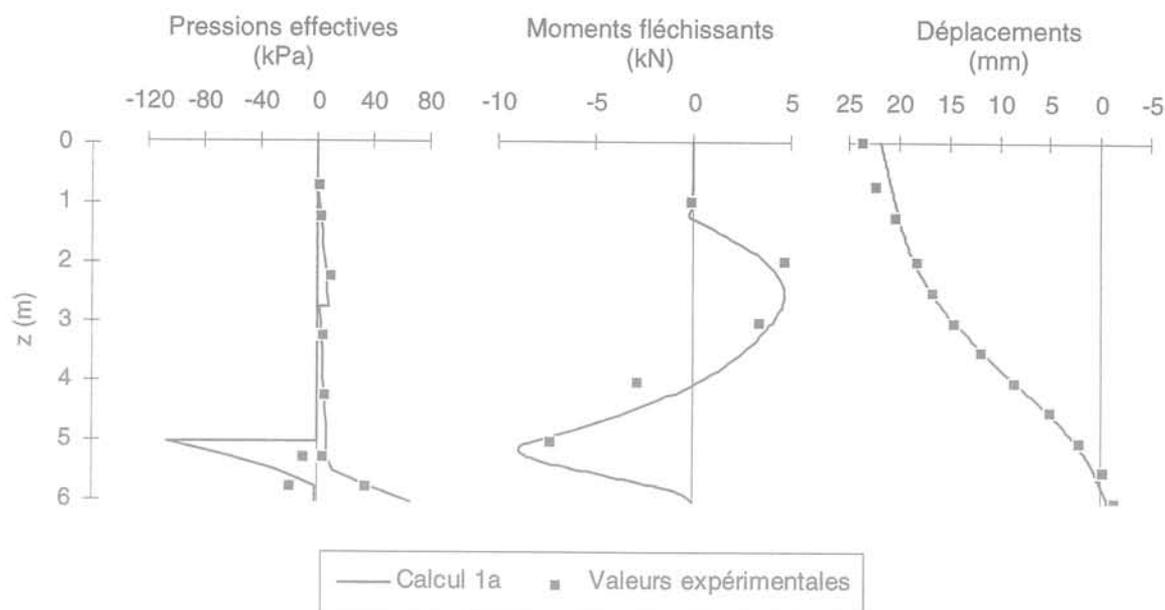


FIG. 9 Comparaison des résultats du calcul 1a relatif à la phase 6 et des résultats expérimentaux correspondants. Les autres calculs conduisent à des résultats pratiquement identiques. Comparison of the calculation results related to stage 6 with the corresponding test results. The other calculations yield quite similar results.

rideau (Fig. 6 à 9). Les résultats des calculs 1 et 2 (1a et 2a, d'une part, et 1b et 2b, d'autre part) relatifs à une même phase sont reportés sur les mêmes diagrammes, où l'on a également fait figurer les valeurs expérimentales des grandeurs correspondantes. Pour les raisons exposées précédemment (voir § 4.4), les déformées théoriques et expérimentales représentées sur les figures 7 à 9 et relatives aux phases postérieures à la phase 2, ont été tracées à partir des déplacements relatifs du rideau obtenus en retranchant les déplacements en phase 2 aux déplacements absolus. Les valeurs théoriques et expérimentales de la force unitaire de butonnage T sont regroupées dans le tableau III.

On notera que le calcul n'a pas permis de déterminer la valeur du déplacement relatif du niveau de butonnage correspondant au passage à l'équilibre limite. En effet, au-delà d'une valeur de ce déplacement relatif égale à environ 10 mm, valeur qui marque la fin d'une forte diminution de la force de butonnage, cette force continue de décroître lentement mais régulièrement (d'environ 0,06 kN/m par mm de déplacement relatif) sans qu'apparaisse une tendance à la stabilisation (Fig. 10). Dans ces conditions, les calculs relatifs à la phase 6 ont été effectués en attribuant au déplacement relatif du niveau de butonnage la valeur limite déterminée expérimentalement, soit 20,43 mm.

5.2

Influence de l'état initial

La comparaison des résultats des calculs 1 et 2 (1a et 2a d'une part, 1b et 2b d'autre part), qui se différencient uniquement par l'hypothèse concernant la distribution initiale de la pression du sol sur le rideau, fait apparaître que, sauf pour les premières phases de calcul (essentiellement les phases 1 et 2), cette hypothèse n'a que peu d'influence sur les valeurs calculées des grandeurs mesurées au cours de l'expérimentation.

Si l'adoption des valeurs $K_1 = K_1^2$ permet en effet d'obtenir, lors des phases 1 et 2, des valeurs calculées des moments fléchissants et des déplacements plus proches des valeurs mesurées que celles correspondant à l'hypothèse $K_1 = K_1^1$, seule l'amélioration des moments fléchissants est significative, les déformées théoriques étant toutes deux très éloignées de la déformée réelle (Fig. 6). Cette divergence entre les déplacements mesurés et calculés est vraisemblablement due au fait que, comme indiqué précédemment, le contact entre le sol et le rideau n'était que partiel jusqu'à la mise en précontrainte des butons.

Les écarts entre les résultats des calculs 1 et 2 constatés pour les phases postérieures à la phase 2 (Fig. 7 et 8) sont minimes, sauf pour ce qui concerne la pression du sol en phase 3 (Fig. 7a), et ils diminuent au fur et à mesure de l'avancement des calculs (Fig. 7 et 8) pour s'annuler en phase 6. Il s'ensuit, qu'à partir de la phase 4, l'hypothèse faite sur l'état des contraintes initiales n'a que très peu d'influence sur les résultats du calcul.

TABLEAU III Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs de la force unitaire de butonnage déduites des calculs 1a, 2a, 1b, 2b.

Comparison of the measured strut force values and of the values derived from calculations 1a, 2a, 2b.

Phase	Force unitaire de butonnage T(kN/m)				
	Mesurée	Calcul 1a	Calcul 2a	Calcul 1b	Calcul 2b
3	21,31	12,59	13,94		
4	28,64	16,59	17,36	30,25	31,61
5	33,72	21,80	22,68	34,02	35,41
6	4,22	7,44	7,40	7,48	7,49

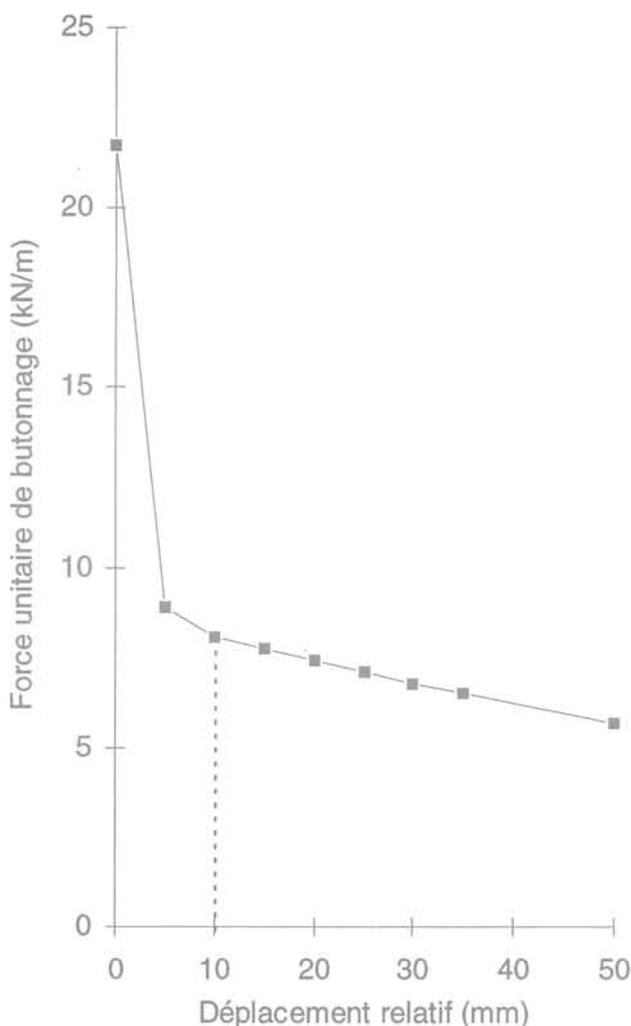


FIG. 10 Variation de la force de butonnage en fonction du raccourcissement des butons.
Variation of the strut force versus the shortening of the struts.

5.3

Analyse de la simulation du comportement du rideau après la mise en place et la précontrainte des butons

Pendant la partie correspondante de l'expérimentation, sauf en phase finale (phase 6), les têtes de butons ont été, en principe, bloquées et, dans les faits, n'ont subi que des déplacements très limités (au plus égaux à 1 mm). Cette situation étant favorable au développement d'effets de voûte, l'interprétation des calculs a eu pour principal objectif d'apprécier la réalité de ce phénomène pour l'ouvrage étudié et a donc surtout intéressé les phases 3 à 5.

La comparaison à l'expérience des résultats des calculs 1a et 2a (Fig. 7 et Tableau III) montre :

- que les valeurs théoriques des moments fléchissants sont du même ordre que celles déterminées expérimentalement mais que le calcul surestime les valeurs maximales des moments fléchissants en travée en phase 4 et surtout en phase 5 où l'écart entre le calcul et l'expérience est le plus marqué ;

- que la concordance entre les déplacements mesurés et calculés est acceptable en phase 3, bonne en phase 4 et excellente en phase 5 ;

- que le calcul sous-estime fortement les forces de butonnage (de 33 % à 41 %) et que, en tête de rideau, la pression du sol mesurée est très supérieure à la pression calculée.

Cette situation peut être améliorée, du moins en ce qui concerne les phases 4 et 5, en tenant compte dans la simulation du recul des têtes de butons constaté en phase 4. Les calculs 1b et 2b (Fig. 8 et Tableau III), qui intègrent cette donnée (voir 4.5), conduisent effectivement à des diagrammes de pression du sol en meilleur accord avec les diagrammes expérimentaux (bien que d'importantes divergences subsistent) et permettent de retrouver les forces de butonnage avec une erreur par excès comprise entre 1 % et 10 %. En revanche, la concordance entre les mesures et le calcul est moins satisfaisante pour les déplacements, et elle n'est pas meilleure en ce qui concerne les moments fléchissants.

Cependant, si la prise en compte du recul des têtes de butons conduit, dans l'ensemble, à une meilleure simulation du comportement du rideau en phases 4 et 5, elle ne permet pas d'interpréter les mesures de pression du sol intéressant la partie supérieure de l'ouvrage. Ceci, comme les divergences constatées en phase 3 entre les mesures et le calcul de la pression du sol et de la force de butonnage, ne peut s'expliquer que par la formation d'effets de voûte.

L'analyse des données expérimentales et, plus particulièrement, de l'évolution de la pression du sol aux profondeurs 0,75 m, 1,25 m, 2,25 m et 3,25 m en fonction des déplacements des points correspondants depuis la mise en place des butons (Fig. 11) vient confirmer cette hypothèse. On constate en effet que la pression du sol aux profondeurs 2,25 m et 3,25 m atteint en fin d'excavation et lors de l'application de la surcharge des valeurs inférieures à celles mesurées en phase 6, qui sont égales à la pression active. Ceci implique qu'une fraction de la poussée du sol a été reportée vers les zones fixes ou quasi fixes du rideau et notamment vers la zone de butonnage. Les diagrammes pression-déplacement aux profondeurs 0,75 m et 1,25 m, qui mettent en évidence d'importantes augmentations de la pression du sol à déplacement nul ou très faible (notamment lors de l'excavation jusqu'à 4 m et lors de l'application de la surcharge), montrent qu'il en est bien ainsi.

Le calcul aux coefficients de réaction, qui postule que la pression du sol en tout point de l'écran est au moins égale à la pression active en ce point, ne permet donc pas de simuler fidèlement le comportement du rideau expérimental. La relativement bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales des moments fléchissants et des déplacements correspondant aux phases 3, 4, et 5, s'explique par l'introduction dans les calculs de valeurs de c' et ϕ' telles que, dans la partie centrale du rideau, les valeurs calculées de la pression active soient égales aux valeurs mesurées de la pression qui s'y exerce (alors, qu'en fait, la pression active réelle est supérieure à la pression mesurée). Or, la pression du sol dans la partie centrale du rideau détermine pour une large part les moments fléchissants et la déformée, puisque la force due à la pression du sol qui s'applique dans la zone des butons est, en grande partie, transmise directement à ceux-ci. D'autre part, les écarts importants entre les valeurs théoriques et expérimentales des forces de butonnage

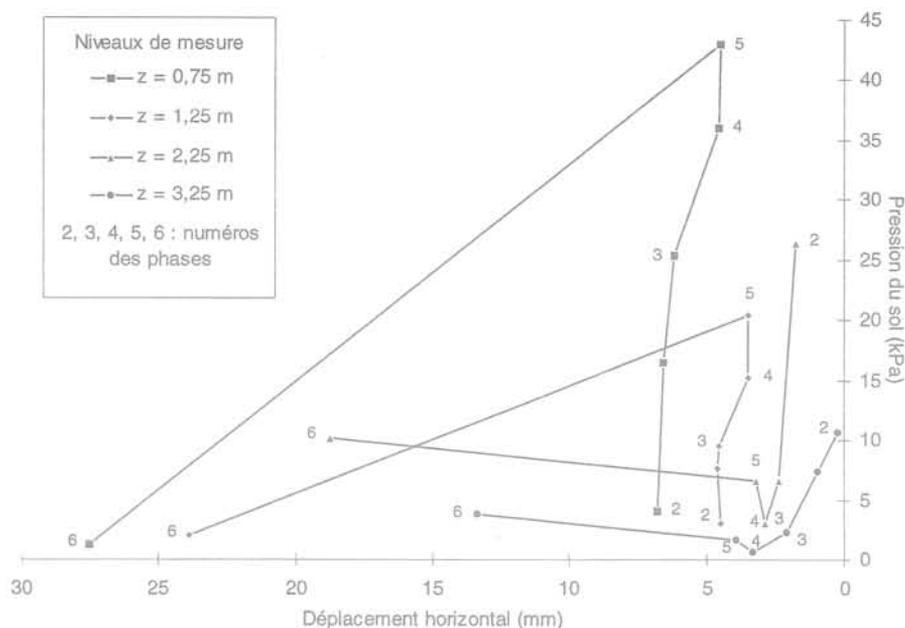


FIG. 11 Variation de la pression du sol à quatre niveaux particuliers du rideau en fonction des déplacements de ces niveaux.
Variation of the earth pressure at four specific levels versus the displacements of these levels.

en phase 3, ainsi qu'en phase 4 et 5, lorsque les têtes de butons sont supposées parfaitement fixes, sont alors cohérents avec les différences entre les pressions d'un sol mesurées et calculées en tête de rideau.

L'examen des résultats de l'étude théorique du comportement du rideau en phase 6 montre que, comme on pouvait s'y attendre, ceux-ci sont pratiquement indépendants des hypothèses concernant l'état initial de la pression du sol et le déplacement des têtes de buton en phase 4, les calculs 1a, 1b, 2a et 2b conduisant en effet à des résultats très voisins. La comparaison des valeurs théoriques et expérimentales des grandeurs étudiées (présentées sur la figure 9 dans le cas du calcul 1a) fait apparaître une bonne concordance entre elles pour ce qui concerne les déplacements relatifs du rideau, les moments fléchissants qui lui sont appliqués et la pression du sol hors fiche (encore que le calcul sous-estime légèrement celle-ci en raison de la prise en compte des valeurs de c' et ϕ' qui surestiment la résistance du sol). En revanche, le calcul surestime l'effort de butonnage de plus de 75 % (Tableau III). L'erreur ainsi commise pourrait s'expliquer par le développement en pied de rideau d'un effort tranchant stabilisateur non pris en compte dans les calculs.

6

Implications pratiques

L'étude précédente montre que le calcul aux coefficients de réaction d'un écran, dont le comportement est déterminé en partie par le développement d'un effet de voûte, peut introduire des erreurs substantielles dans l'évaluation des efforts appliqués à l'ouvrage.

Pour évaluer l'amplitude de ces erreurs, dont l'incidence sur le dimensionnement de l'ouvrage peut être

importante, on a procédé à un calcul complémentaire des efforts appliqués au rideau de Hochstetten (calcul 3). Ce calcul a été effectué en tenant compte de valeurs des paramètres de résistance au cisaillement plus réalistes que celles qui ont été considérées dans les calculs précédents, qui conduisaient à des valeurs trop faibles des contraintes limites de poussée (voir § 5.3). Les nouvelles valeurs des paramètres de résistance au cisaillement, soit :

$c' = 1 \text{ kPa}$ et $\phi' = 41,5^\circ$ de 0 m à 2,75 m de profondeur ;

$c' = 6 \text{ kPa}$ et $\phi' = 41,5^\circ$ de 2,75 m à 5,35 m de profondeur ;

$c' = 0$ et $\phi' = 41,5^\circ$ au-delà de 5,35 m,

ont été obtenues en affectant à ϕ' la valeur moyenne tirée des essais triaxiaux et de cisaillement direct, les valeurs de c' ayant été déterminées par calage de la pression active sur la pression mesurée hors fiche en phase finale.

A l'inverse, les valeurs des coefficients de réaction prises en compte précédemment ont été conservées, on a admis l'égalité des coefficients de pression au repos et de pression initiale, soit $K_0 = K_1 = 1 - \sin \phi'$, et on a supposé que les têtes de butons étaient parfaitement fixes lors des phases 3, 4 et 5.

Les résultats du calcul pour les phases 3, 4 et 5, c'est-à-dire les phases correspondant ou pouvant correspondre aux conditions de service les plus critiques d'un ouvrage (les résultats relatifs aux phases 3 et 4 peuvent être associés aux cas de rideaux de fiches respectives 2 m et 1 m dont le terre-plein arrière n'est pas surchargé) sont représentés sur la figure 12 (pression du sol, moments fléchissants, déplacements) et dans le tableau IV (forces de butonnage). Ils montrent que si le calcul aux coefficients de réaction conduit à des valeurs assez réalistes des déplacements du rideau, il surestime

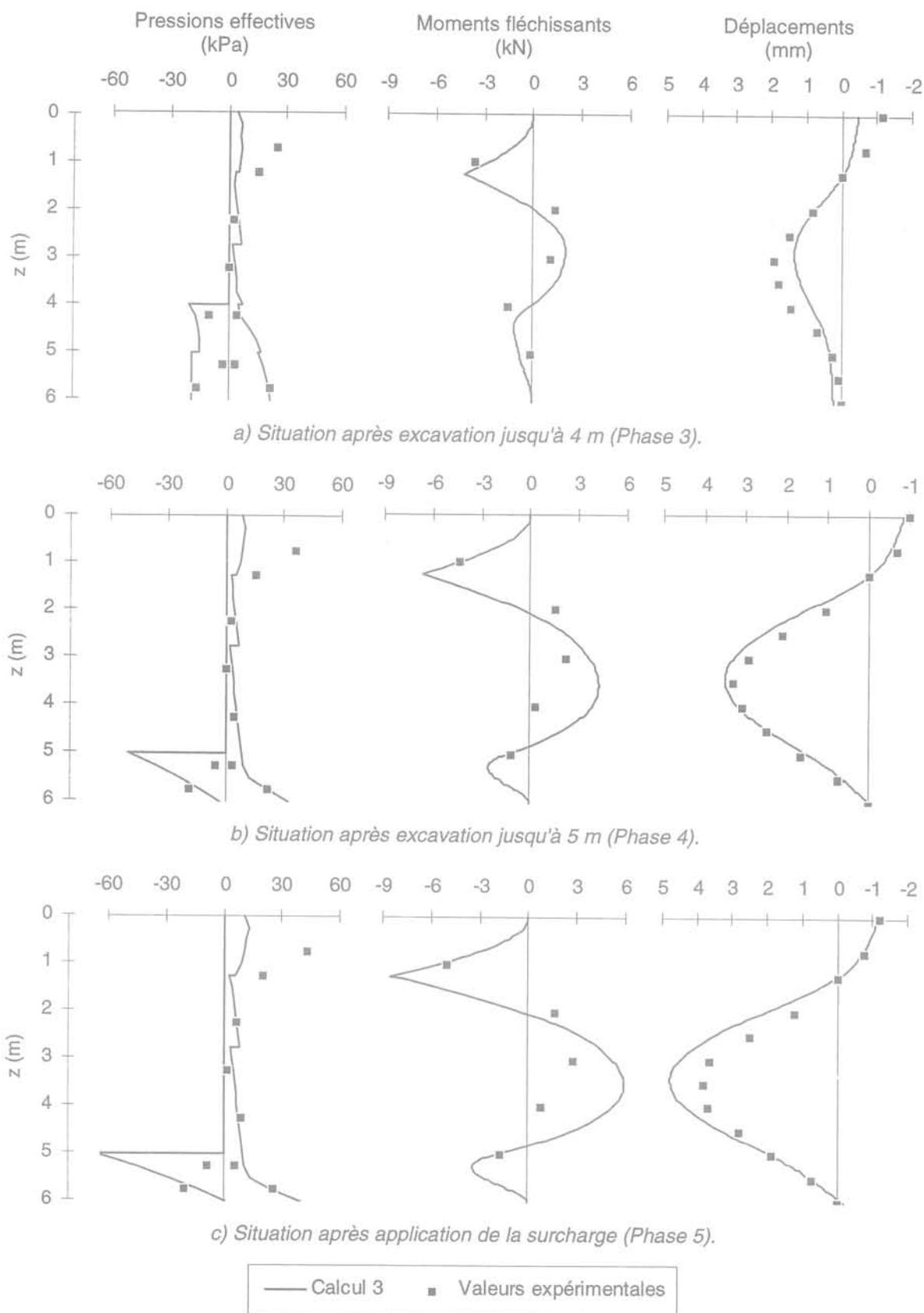


FIG. 12

Résultats du calcul 3 relatifs aux phases 3, 4 et 5 et comparaison avec les résultats expérimentaux. Les données et hypothèses de ce calcul sont les mêmes que celles du calcul 1a, sauf qu'il tient compte de paramètres de résistance au cisaillement plus réalistes.

Results of calculation 3 related to stages 3, 4 and 5, and comparison with the test results. Data and assumptions are the same as for calculation 1a except that more realistic shear strength parameters are taken into account. a) situation after excavation up to 4 m (stage 3); b) situation after excavation up to 5 m (stage 4); c) situation after loading the soil behind the wall (stage 5).

TABLEAU IV

Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs de la force unitaire de butonnage déduites du calcul 3. Valeurs du coefficient de majoration à appliquer aux résultats du calcul.

Comparison of the measured strut force values and of the values derived from calculations 3. Values of the correction factor to apply to the calculation results.

Phase	Force unitaire de butonnage TKN/m		Coefficient de majoration
	Mesurée	Calculée	
3	21,31	14,09	1,51
4	28,64	19,34	1,48
5	33,72	24,87	1,38

les moments fléchissants en travée en phase 4 et 5. Ils confirment, par ailleurs, que les réactions de butonnage sont fortement sous-estimées et permettent d'évaluer le coefficient de majoration qu'il y a lieu d'appliquer aux valeurs calculées pour retrouver les valeurs mesurées. Ce coefficient varie d'environ 1,50 (phases 3 et 4) à 1,35 (phase 5).

Ces données font clairement apparaître la nécessité de majorer les réactions d'appui déterminées par le calcul aux coefficients de réaction, lorsque celui-ci est appliqué à un écran souple étayé par une nappe de butons rigides. En l'absence de données plus précises, on pourra appliquer à la réaction de butonnage calculée un coefficient majorateur de 1,50, soit la valeur maximale déterminée précédemment. On notera que celle-ci est une valeur prudente puisqu'elle a été obtenue à partir de mesures sur des butons très rigides, alors que souvent, dans la pratique, la rigidité réelle des butons est très inférieure à leur rigidité théorique (Kastner, 1982). Il faut cependant souligner que la proposition ci-dessus n'a de sens que si les calculs tiennent compte de valeurs suffisamment réalistes des paramètres géotechniques et particulièrement des paramètres de résistance au cisaillement. L'adoption de valeurs trop pessimistes de ces derniers pourrait, en effet, conduire à des efforts

théoriques de butonnage de l'ordre des valeurs réelles, voire supérieures à celles-ci.

7

Conclusion

Les constatations faites sur le rideau de palplanches expérimental de Hochstetten ont fourni les éléments d'une étude de la validité du calcul aux coefficients de réaction d'un écran de soutènement souple étayé par une nappe de butons rigides.

Le logiciel DENEbola-LCPC a été utilisé pour simuler l'expérimentation du rideau et les résultats de cette simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux. Les calculs ont été faits en tenant compte de valeurs des coefficients de réaction déterminées pour l'essentiel à partir des modules pressiométriques du sol conformément aux recommandations de Balay (1984) et en considérant successivement plusieurs hypothèses relatives à l'état initial de la pression du sol sur le rideau ainsi qu'au déplacement des têtes de butons. Ils ont permis de retrouver, avec une précision acceptable, voire bonne à très bonne dans certains cas, les principales grandeurs déterminées expérimentalement (déplacements, moments fléchissants, pression du sol en travée), mais seulement lorsque des valeurs des paramètres de résistance au cisaillement sensiblement plus élevées que celles effectivement mises en jeu étaient prises en compte. De plus, les calculs sous-évaluent, dans la plupart des hypothèses, les réactions de butonnage relatives aux phases d'essai correspondant aux conditions de service. Ces divergences entre le calcul et l'expérience résultent du développement d'un effet de voûte dont l'existence est mise en évidence par une analyse des résultats expérimentaux, si bien, qu'en toute rigueur, le calcul aux coefficients de réaction ne permet pas de simuler le comportement du rideau expérimental. Lorsqu'il prend en compte des valeurs représentatives des paramètres géotechniques, ce type de calcul conduit, en effet, à des moments fléchissants en travée trop élevés et sous-estime fortement les réactions de butonnage. Dans le cas du rideau étudié, l'erreur par défaut entachant ce paramètre est comprise entre 35 % et 50 % de la valeur mesurée.

Bibliographie

- Balay J., Frank R., Harfouche L. – Programme DENEbola pour le calcul des soutènements par la méthode des modules de réaction, *Bulletin de liaison des LPC*, n° 120, juillet-août 1982, p. 3-12.
- Balay J., Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction, Note d'information technique, LCPC, 1984, 24 p.
- Blivet J.-C., Bonafous P., Frank R., Josseume H. – Comportement d'un quai en paroi moulée au port du Havre, *Bulletin de liaison des LPC*, n° 113, mai-juin 1981, p. 111-134.
- Gigan J.-P. – Expérimentation en vraie grandeur d'un rideau de palplanches, *Revue Française de Géotechnique*, n° 8, août 1979, p. 27-44.
- Gigan J.-P. – Expérimentation d'un rideau de palplanches ancré par tirants actifs, *Bulletin de liaison des LPC*, n° 129, janvier-février 1984, p. 5-20.
- Josseume H., Stenne R. – Étude expérimentale d'une paroi moulée ancrée par quatre nappes de tirants, *Revue Française de Géotechnique*, n° 8, août 1979, p. 51-64.
- Josseume H., Delmer T. – Préviation du comportement d'un rideau de palplanches expérimental à Karlsruhe, Note LCPC, 1993, 18 p.
- Josseume H., Delattre L., Mespoulhe L. – Sheeppile test Karlsruhe. Post-calculations, Note LCPC, 1994, 24 p.
- Kastner R. – Excavations profondes en site urbain, Thèse de Doctorat de l'INSA Lyon, 1982, 409 p.
- Kérisel J., Absi E. – Tables de poussée et de butée des terres, Presses des Ponts et Chaussées, 1990, 3^e éd., 240 p.
- Ménard L., Bourdon G., Houy A. – Étude expérimentale de l'encastrement d'un rideau en fonction des caractéristiques pressiométriques du sol de fondation, *Sols – Soils*, n° 9, 1964, p. 11-27.
- Shahrour I., Ghorbangeibi S., Wolfersdorff von P.-A. – Comportement des rideaux de palplanches: expérimentation en vraie grandeur et prédictions numériques, *Revue Française de Géotechnique*, n° 71, 1995, p. 39-47.
- Wolfersdorff von P.A. – Feldversuch an einer Spundwand in Sandboden: Versuchsergebnisse und Prognosen, *Geotechnik*, n° 17, 1994 (a), p. 73-83.
- Wolfersdorff von P.A. – The results of the Sheetpile Wall Field Test in Hochstetten, Rapport de l'Université de Karlsruhe 1994 (b), 91 p.