Comportement de l'écran de soutènement d'une tranchée expérimentale étroite

Behaviour of the retaining structure for a narrow experimental trench

F. DESCOEUDRES, F. PELLET

Institut des Sols, Roches et Fondations
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*

Rev. Franç. Géotech. n° 55, pp. 5-15 (avril 1991)

Résumé

Le comportement de l'écran de soutènement d'une tranchée expérimentale étroite a été étudié au moyen de la méthode des éléments finis et de la méthode des modules de réaction. La confrontation des résultats numériques aux mesures de déplacements réalisées in situ a permis de comparer les performances de chacune des méthodes et de préciser leurs limites. L'importance d'une détermination représentative des modules de déformation est démontrée en s'appuyant notamment sur l'évolution des modules pressiométriques observée en fin d'excavation dans la zone du fond de fouille.

Abstract

The behaviour of the flexible retaining structure of a narrow experimental trench was studied by the finite element method and the subgrade modulus method. The confrontation of the numerical results to field measured displacements enabled a comparison of the performances of both methods and the determination of their validity limits. The importance of a representative determination of the modulus is shown by the variation of the pressuremeter modulus observed after the excavation in the subgrade.

* GC Ecublens — CH 1015 Lausanne, Suisse.

1. INTRODUCTION

A mesure que la prise en compte des déplacements au voisinage des fouilles devenait une exigence des projets de soutènement en site urbain, les méthodes classiques de calcul à l'équilibre limite se révélaient insuffisantes. Les méthodes numériques permettant d'associer contraintes et déformations ont alors suivi une évolution rapide ; la méthode des éléments finis a été adaptée pour traiter ce problème tandis que parallèlement des modèles plus simples tels que la méthode des modules de réaction se sont développés.

Dans le but de comparer les performances et la fiabilité de ces deux méthodes aujourd'hui couramment utilisées dans les bureaux d'étude, nous avons étudié le comportement de l'écran de soutènement d'une tranchée expérimentale, réalisée dans le cadre d'un programme de recherche sur les milieux non saturés. L'analyse numérique réalisée a posteriori, a été effectuée grâce au programme EFEMER de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour la méthode des éléments finis et à l'aide du logiciel DENEbola du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Français, pour la méthode des modules de réaction. L'étude a été orientée principalement sur la comparaison des déplacements de l'ouvrage mesurés in situ avec ceux calculés par chacune des deux méthodes.

2. PRÉSENTATION DU SITE EXPÉRIMENTAL

2.1. Description de l'ouvrage et de l'instrumentation

L'ouvrage, qui est implanté sur le site de l'Ecole Polytechnique, est une tranchée de 10 m de longueur sur 2 m de largeur (fig. 1). L'excavation a été exécutée en quatre étapes pour atteindre une profondeur maximale de 4,50 m en phase terminale. Le soutènement, constitué de palplanches préalablement battues, a été étayé sur deux rangs à l'avancement.

Parmi le vaste programme d'instrumentation mis en œuvre sur le site en vue de l'étude de la zone non saturée, les mesures principalement retenues concernent les déplacements du massif de sol environnant, relevés sur les inclinomètres I1 et I2 (fig. 1), ainsi que le déplacement de la tête de l'écran mesuré par levés topométriques. Pour connaître avec précision les tassements en surface, des mesures de nivellement ont été réalisées au droit de chaque inclinomètre.

2.2. Contexte géologique et hydrogéologique

Le site est caractérisé par une série de couches d'alluvions glacio-lacustres surmontant la molasse du tertiaire dont le toit se situe à environ 30 m de profondeur. Dans la zone concernant l'ouvrage, on traverse des limons sableux à argileux en partie varvés, relativement homogène du point de vue du comportement mécanique.

Le régime hydraulique naturel, établi sur le site avant toute intervention, était caractérisé par un écoulement sub-horizontale, de faible gradient (environ 0,05), dirigé approximativement de l'ouest vers l'est. Cet écoulement, favorisé par une anisotropie de perméabilité du sol marquée par une perméabilité horizontale nettement supérieure à la perméabilité verticale, a évidemment été modifié par la mise en place du soutènement. Les niveaux de la surface libre de la nappe à ce stade sont représentés à la figure 2. La réalisation ultérieure de l'excavation a provoqué un écoulement sous l'écran qui, superposé au régime naturel, montre que les forces d'écoulement se conjuguent côté ouest tandis qu'elles s'opposent côté est. Dans ce contexte, les micro-piézomètres MP3 et MP14 (fig. 1) ont enregistré en phase terminale des travaux et en conditions climatiques normales des niveaux moyens de nappe se situant à $-1,30$ m côté est et $-1,10$ m côté ouest. Cette variation de niveaux explique en partie la différence de comportement constatée entre les parties est et ouest de l'ouvrage.

3. ANALYSE NUMÉRIQUE

3.1. Méthodes de calcul

3.1.1. Méthode des éléments finis

Le programme EFEMER qui fut mis au point à Karlsruhe a été complété et développé à l'Institut des Sols, Roches et Fondations de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (DUDT, 1986). Il permet la résolution numérique des équations de l'équilibre statique par la méthode des éléments finis, en considérant les déplacements du domaine étudié comme inconnus du problème et en retenant l'hypothèse des petites déformations. Les éléments de surface utilisés sont des triangles à trois nœuds avec fonction d'interpolation linéaire tandis que les éléments unidimensionnels sont à deux nœuds avec des fonctions d'interpolation linéaires (élément de barre) ou du troisième degré

Fig. 2. — Niveaux de la nappe après mise en place de l'écran.
Fig. 2. — Water table after installation of sheet-pile.

Fig. 1. — Vue en plan et coupe de la tranchée.
Fig. 1. — Plan view and cross section of the trench.

(élément de poutre). Le programme est doté d'une procédure générant un maillage d'éléments rectangulaires automatiquement divisés en triangles. Bien que n'ayant pas été développé spécifiquement pour le calcul des écrans de soutènement, ce programme permet de simuler la réalisation d'une excavation en autorisant, en cours de calcul, la modification des caractéristiques mécaniques attribuées aux éléments. Une description plus détaillée des possibilités du programme est donnée par DUDT et PELLET, 1989.

Pour la présente étude, les calculs ont été menés en déformations planes. La rhéologie des géomatériaux est modélisée par une loi élasto-plastique ; la phase élastique est linéaire et anisotrope (cas de l'orthotropie de révolution) et la rupture des éléments de surface obéit au critère de Mohr-Coulomb avec écrouissage négatif. L'interface entre le sol et l'écran a été traitée au moyen de petites barres horizontales, de rigidité très élevée et de résistance à la traction nulle.

3.1.2. Méthode des modules de réaction

Le logiciel DENEbola développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (J. BALAY et al., 1982) permet de modéliser un écran de soutènement dans un domaine uni-dimensionnel.

La méthode, basée sur le modèle de Winkler, consiste à résoudre l'équilibre d'une poutre discrétisée en éléments au droit desquels s'appliquent les actions et réactions offertes par le massif de sol. La loi de mobilisation de ces efforts qui est du type élasto-plastique est fonction de modules de réaction que l'on calcule à partir des paramètres pressiométriques. Les recommandations actuelles (J. BALAY, 1984) préconisent, pour les ouvrages courants, l'usage de la formule semi-empirique suivante :

$$K_h = E_M / [\alpha a / 2 + 0,133.(9a)^\alpha]$$

où :

K_h : module de réaction ;

E_M : module pressiométrique moyen ;

α : paramètre rhéologique égal à 0,5 pour les limons ;

a : paramètre dimensionnel dépendant de la géométrie de l'ouvrage.

Le programme calcule la déformée de l'écran, les efforts qui le sollicitent et la répartition des pressions exercées dans le sol. Il est entre autre possible de prendre en compte les étapes d'excavation intermédiaires et la mise en place d'étais ou de tirants précontraints.

3.2. Modélisation de l'ouvrage

3.2.1. Eléments géométriques

Considérant une symétrie de géométrie par rapport à l'axe longitudinal de la tranchée nous avons limité le modèle à une demi-section. Les calculs ont été réalisés pour une tranche de largeur unitaire située côté est, sur l'axe transversal de l'ouvrage.

Pour le calcul par éléments finis, les dimensions du domaine étudié ont été fixées, après examen des déplacements mesurés, à 8 m de largeur et à 7,5 m de hauteur. Le massif de sol est divisé en 570 éléments de surface tandis que l'écran se compose de 26 éléments de poutre et que les étais sont représentés par 2 éléments de barre. Le maillage complet correspondant à la phase initiale (avant excavation) est représenté à la figure 3. Dans le calcul aux modules de réaction, l'écran de soutènement est représenté par une poutre divisée en 25 tronçons.

3.2.2. Simulation du régime hydraulique

La perte de charge observée côté massif entre 4 et 7 m de profondeur sur le micro-piezomètre MP3 s'élève à 0,4 m en phase terminale (figure 4a). Le piézomètre P5 (fig. 1), installé dans la fouille après l'exécution de la quatrième phase d'excavation, a indiqué une augmentation de la charge sensiblement équivalente. Dans l'hypothèse d'un écoulement vertical, cette valeur conduirait à un gradient hydraulique de 0,13 alors qu'en considérant, comme il est courant de le faire, un écoulement permanent à perte de charge uniforme, longeant l'écran de l'amont vers l'aval, on obtiendrait un gradient hydraulique maximum de 0,44, nettement supérieur à la valeur observée. La répartition des pressions hydrauliques au voisinage de l'écran est donc, de ce côté de la fouille, voisine d'une distribution hydrostatique. Cette observation expliquée par la superposition des écoulements vertical et horizontal (voir paragraphe 2.2.), a conduit à mener les calculs en déjaugant le poids volumique du matériau et en appliquant sur l'écran une

Fig. 3. Représentation du maillage.
Fig. 3. Mesh representation.

distribution hydrostatique, modifiée à chaque étape d'excavation en fonction du niveau du fond de fouille (fig. 4b).

3.2.3. Comportement des éléments de structure

La rigidité offerte par les liernes au centre de la travée a été calculée proportionnellement à celles des étais. Des cales de bois mises en place entre le rideau de palplanches et les liernes ont laissé apparaître une mobilisation progressive des efforts dans les étais, qui a été prise en compte en réduisant la raideur équivalente du système EAeq pour les phases correspondant à la mise en place de chaque étau. Les caractéristiques élastiques ainsi calculées sont résumées au tableau 1.

3.2.4. Comportement d'interface

Pour les deux méthodes, les pressions exercées au contact de l'écran sont limitées à des valeurs strictement positives (pas de traction). Les effets tangentiels à l'interface sont négligés, ce qui revient à prendre en compte un angle de frottement sol-écran équivalent à zéro. Cette approximation conduit à une légère surestimation de la composante horizontale de la poussée des terres.

Tableau 1. — Caractéristiques des éléments de structure
Table 1. — Structural element characteristics

Eléments	E [MPa]	A [M2]	I [M4]	EI [kN.m2]	EAeq [kN]
Pal-planches	210 000	0,0156	14 900	31 200	3 280 000
Etai sup.	210 000	0,00253	6 100 000	Phase 3	750
				Phase 4	5 000
Etai inf.	210 000	0,00643	541 000	Phase 4	2 500

3.3. Détermination des caractéristiques géomécaniques

Les calculs ont été menés à long terme, après dissipation des surpressions interstitielles. Les contraintes initiales, régnant au sein du massif avant toute intervention, ont été choisies égales à la pression des terres au repos dont le coefficient est déterminé par la formule empirique de Jacky :

$Ko = 1 - \sin \phi = 0,53$ (pour $\phi' = 28^\circ$)

Fig. 4. — Distribution des pressions hydrauliques agissant sur l'écran.
Fig. 4. — Hydraulic pressures acting on the retaining wall.

3.3.1. Modules de déformation

L'essai pressiométrique réalisé avant la mise en place de l'écran (fig. 5) laisse apparaître une certaine dispersion des modules, sans pour autant permettre d'établir une loi de variation avec la profondeur. Les modules d'élasticité suivant la direction horizontale E_h introduits dans le calcul par éléments finis ont été estimés, sur la base de cet essai, en appliquant la corrélation proposée par le Centre d'Etude Ménard (1975) qui fixe à 3, pour ce type de sol, le rapport du module d'élasticité sur le module pressiométrique. Dans la direction verticale, les modules d'élasticité E_v mesurée à l'œdomètre sur des paliers de déchargement sont nettement supérieurs. Le rapport du module vertical sur le module horizontal est en moyenne de 4. Les modules adoptés à chaque niveau sont reportés au tableau 2. Par comparaison, le module mesuré à 50 % de la déformation de rupture sur un essai triaxial mené en compression avec une pression cellulaire de 50 kPa est de 2 960 kPa dans la direction horizontale et de 4 100 kPa dans la direction verticale.

Pour le calcul par la méthode des modules de réaction, les modules K_h agissant sur la partie amont (côté massif) ont été calculés sur la base des résultats de l'essai pressiométrique réalisé avant l'excavation. Un essai complémentaire, réalisé en fond de fouille après l'exécution de la quatrième phase, a montré que

Fig. 5. — Modules pressiométriques.
Fig. 5. — Pressuremeter moduli.

Tableau 2. — Caractéristiques mécaniques du sol
Table 2. — Soil properties

Z [m]	E_v [kPa]	ν_v —	E_h [kPa]	ν_h —
0,00 - 0,50	2 000	0,09	500	0,36
0,50 - 1,00	6 000	0,09	1 500	0,36
1,00 - 1,60	2 000	0,09	8 000	0,36
1,60 - 2,65	2 800	0,09	11 200	0,36
2,65 - 3,60	3 300	0,09	13 200	0,36
3,60 - 4,50	2 300	0,09	9 200	0,36
4,50 - 5,50	2 700	0,09	10 800	0,36
5,50 - 6,50	2 100	0,09	8 400	0,36
6,50 - 7,50	2 500	0,09	10 000	0,36

les modules avaient augmenté dans un rapport moyen de 2,5, variant de 1,6 (à proximité du fond de fouille) à 2,8 (plus en profondeur) (fig. 5). Les modules de réaction agissant sur la partie aval (côté fouille) ont par conséquent été calculés en tenant compte de cette augmentation. Pour les deux premières phases, les déplacements de l'écran étant plus faibles ce rapport d'augmentation a été estimé à 2.

3.3.2. Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement du sol est régie par les caractéristiques drainées c' et ϕ' , déterminées à l'essai triaxial. La résistance de pic correspond à un angle de frottement interne ϕ' de 28° et une cohésion c' de 30 kPa qui s'annule en phase post-rupture.

4. COMPARAISON ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les calculs ont été faits pour les quatre phases d'excavation et les deux étapes d'étayage. Les déplacements du massif de sol et de l'écran qui constituent les résultats bruts de calcul sont directement comparés aux valeurs mesurées sur le site. Les efforts dans les éléments de structure ne peuvent, faute de mesure, qu'être comparés entre eux.

4.1. Déplacements de l'écran et du massif de sol environnant

La confrontation des résultats du calcul par éléments finis aux déplacements horizontaux mesurés sur l'inclinomètre I2, situé à 1 m du bord de la fouille, montre une bonne concordance des valeurs pour les deux premières phases d'excavation (fig. 6). A partir de la troisième phase une divergence apparaît pour atteindre, lors de la phase 4, un écart maximum de 6 mm (36 %), localisé à environ 3,50 m de profondeur. Cette différence s'atténue sur le profil situé à 3 m du bord de la fouille, au droit de l'inclinomètre I1, où les déplacements calculés sont légèrement supérieurs aux valeurs mesurées (tableau 3). Les déplacements verticaux mesurés par nivellements topographiques, au

Fig. 6. — Déplacements dans le massif de sol 1 m derrière l'écran.
Fig. 6. — Soils displacements 1 meter behind the wall.

Tableau 3. — Déplacements en surface du massif de sol
Table 3. — Soils displacement at ground level

	Phase	Ux [mm]		Uy[mm]	
		Mesures Topo.	Calcul MEF	Mesures Topo.	Calcul MEF
Profil situé à 1 mètre de l'écran	1	2	2	1	0
	2	13	12	5	2
	3	34	30	14	6
	4	35	31	15	7
Profil situé à 3 mètres de l'écran	1	1	1	0	0
	2	4	6	2	0
	3	10	14	3	2
	4	12	15	3	2

droit de l'inclinomètre I2 sont quant à eux nettement supérieurs aux valeurs calculées. Un écart de 7 mm (57 %) est observé en phase 4.

Les déplacements mesurés en tête d'écran par levés topographiques sont comparés aux valeurs calculées par la méthode des modules de réaction et la méthode des éléments finis (fig. 7). L'écart maximum qui est de 23 %, est observé en phase 2 pour la méthode des modules de réaction. En phase 4, la méthode des modules de réaction laisse apparaître un retour de la tête de l'écran légèrement supérieur à celui observé in situ, et qui n'est pas mis en évidence par la méthode des éléments finis. En comparant sur la hauteur totale de l'écran les déplacements calculés par les deux méthodes, on constate que la méthode des modules de réaction laisse apparaître au pied de l'écran, des déplacements plus importants que ceux mis en évidence par la méthode des éléments finis (tableau 4).

4.2. Efforts dans les éléments de structure

Les distributions des moments fléchissants (fig. 8) sont comparables, bien que les valeurs calculées par la

Fig. 7. — Déplacements de l'écran de soutènement.
Fig. 7. — Displacements of the retaining wall.

Tableau 4. — Efforts et déplacements de l'écran de soutènement
Table 4. — Forces in and displacements of the retaining structure

Phases	Paramètres calculés	Calcul MMR	Calcul MEF	Mesures Topo.
1	Ux tête écran [mm]	3	3	3
	Ux pied écran [mm]	2	0	
	M max écran [kN.m/m]	- 2,0	- 3,5	
2	Ux tête écran [mm]	14	17	18
	Ux pied écran [mm]	5	1	
	M max écran kN.m/m]	- 9,0	- 11,5	
3	Ux tête écran [mm]	38	41	40
	Ux pied écran [mm]	10	3	
	E étai sup. [kN/m]	- 14,1	- 14,0	
	M max écran [kN.m/m]	4,5	9,3	
4	Ux tête écran [mm]	37	41	39
	Ux pied écran [mm]	15	9	
	E étai sup. [kN/m]	- 25,3	- 29,9	
	E étai inf. [kN/m]	- 10,3	- 12,8	
	M max écran [kN.m/m]	25,9	31,8	

méthode des éléments finis soient sensiblement supérieures à celles issues du calcul aux modules de réaction.

4.3. Distribution des contraintes et répartition des pressions au contact sol-écran.

Lors de chacune des phases, le massif de sol reste en équilibre loin de la rupture généralisée. Seules des zones localisées au pied de l'écran entrent en plasticité lors de la quatrième phase. Les pressions calculées par les deux méthodes au contact de l'écran (fig. 9) sont dans l'ensemble concordantes et semblent réalistes bien qu'elles ne puissent être comparées à des valeurs mesurées. Elles demeurent en tout point à l'intérieur du domaine défini par les deux états d'équilibre limite (poussée et butée). Les contraintes de poussée (côté massif) sont, conformément à la théorie de l'équilibre limite, inférieures aux pressions initiales. On remarque que les contraintes de butée calculées en fond de fouille sont, grâce à la relation établie entre déformations et contraintes, plus réalistes que celles qui auraient été obtenues à l'équilibre limite.

Fig. 8. — Distribution des moments fléchissants.
Fig. 8. — Bending moment distribution.

5. COMMENTAIRES ET SYNTHÈSE

La méthode des modules de réaction qui n'a pas de justifications théoriques, limite le domaine d'étude de l'ouvrage à l'écran ; le comportement du sol à l'échelle du massif n'intervient pas. L'intérêt majeur de cette méthode, outre sa souplesse de mise en œuvre, réside dans l'adoption de caractéristiques géomécaniques déduites d'essais in situ reproduisant la sollicitation de l'ouvrage sur des chemins de contraintes voisins de ceux effectivement suivis dans le sol. La qualité des résultats obtenus est cependant conditionnée par les formules permettant de passer du module pressiométrique au module de réaction. Ces formules, bien qu'étant de nature semi-empiriques, ont été établies et validées à la suite de nombreuses observations sur des ouvrages courants. SCHMITT, 1984 a cependant constaté que dans le cas des parois ancrées les modules de réaction expérimentaux sont nettement supérieurs aux valeurs calculées. De même,

dans le cas particulier d'une tranchée de faible largeur étudié ici, l'emploi des formules usuelles nécessite quelques précautions.

En effet, un premier calcul mené en introduisant de part et d'autre de l'écran les modules pressiométriques mesurés sur le site avant la réalisation de l'ouvrage, a fourni des résultats peu représentatifs (déplacements de l'écran deux fois trop grands). L'essai pressiométrique complémentaire, réalisé en fond de fouille après l'achèvement de l'ouvrage, a permis d'observer dans cette zone une importante augmentation des modules qui a conduit à refaire les calculs présentés ici, en corrigeant leurs valeurs. Cette observation qui est indubitablement liée à l'étroitesse de la fouille et à l'effet de confinement qui s'y développe met en évidence l'effet d'échelle qui affecte toute mesure réalisée in situ. A l'heure actuelle, trop peu d'expérimentations ont été réalisées pour pouvoir prendre en compte la largeur de la fouille dans le calcul des modules de réaction. Il en résulte que dans la perspective d'un

Fig. 9. — Répartition des pressions au contact sol-écran.

Fig. 9. — Soil pressure on the retaining wall.

calcul a priori la correction des modules est laissée à l'appréciation de l'ingénieur.

La méthode des éléments finis, plus satisfaisante du point de vue de son formalisme mathématique mais aussi plus lourde à mettre en œuvre, offre l'avantage de fournir des indications sur les déplacements dans le massif de sol environnant. Dans le calcul présenté ici, les modules d'élasticité introduits ont permis de décrire avec satisfaction le comportement de l'écran. Par contre, en arrière dans le massif de sol, des écarts de déplacements importants ont été observés, localisés notamment en surface. Pour expliquer cette discordance, il convient de rappeler que la loi utilisée bien qu'étant anisotrope est du type linéaire-réversible. De ce fait, le comportement est décrit de façon identique en chargement et en déchargement ou plus généralement, sans tenir compte des multiples chemins de contraintes suivis localement. Cette simplification du schéma de comportement du sol peut être améliorée en traitant les non linéarités au moyen de lois plus sophistiquées telles que les lois hyperboliques (TSUI et CHENG, 1989) mais les paramètres géo-

mécaniques requis pour l'utilisation de telles lois restent difficilement déterminables dans la pratique. Ajoutons à cela que l'abstraction faite du caractère tridimensionnel de l'ouvrage constitue également une cause de variation entre déplacements calculés et mesurés.

Par ailleurs la non prise en compte des forces d'écoulement dans le calcul de l'ouvrage pourrait constituer une simplification grossière. Pour la présente étude, la nappe étant dans un état quasi-statique, ce facteur ne peut être considéré comme cause principale d'inexactitude, mais pour des conditions hydrauliques plus complexes, DYSLI et FONTANA, 1985, 1989, ont montré qu'en couplant les équations d'équilibre aux équations d'écoulement du fluide interstitiel à l'aide de la relation de Skempton, on améliorerait notablement la prévision des tassements en surface.

La bonne concordance des déplacements mesurés en tête de l'écran avec ceux calculés par la méthode des éléments finis est en partie due au traitement du com-

portement à l'interface du sol et de l'écran, assurant l'absence de contrainte de traction entre le sol et l'écran. La méthode du critère orienté qui peut aussi être mise en œuvre par le programme EFEMER, permet d'imposer des conditions de frottement limite plus réalistes. Elle reste cependant confrontée à des problèmes de convergence numérique liés aux faibles contraintes moyennes exercées sur l'écran.

6. CONCLUSION

La méthode des éléments finis est sans conteste appelée à prendre le pas sur les autres méthodes de calcul mais, il n'en demeure pas moins qu'en l'état actuel des connaissances, aucun code de calcul n'est capable de traiter l'ensemble des mécanismes mis en jeu dans les ouvrages de soutènement.

La présente étude montre cependant qu'en dépit d'une modélisation imparfaite (lois linéaires, conditions hydrauliques simples, interface lisse), le calcul a fourni des résultats représentatifs. Les paramètres géomécaniques pris en compte ont été déterminés par des essais de pratique courante en géotechnique, ce qui constitue un préalable à l'utilisation de la méthode dans les projets concrets.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- BALAY J. (1987), *Utilisation de la méthode des éléments finis pour le calcul des écrans de soutènement*. Journées d'étude sur l'utilisation de la méthode des éléments finis dans les projets de géotechnique, Paris.
- BALAY J., CORTE J.-F. (1985), *Evolution des méthodes de calcul des écrans de soutènement ancrés*. Annales des Ponts et Chaussées, n° 34, pp. 2-24.
- BALAY J. (1984), *Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode des modules de réaction*. Note d'Information Technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- BALAY J., FRANK R., HARFOUCHE L. (1982), *Programme DENEbola pour le calcul des soutènements par la méthode des modules de réaction*. Bull. liaison LCPC, n° 120.
- Centre d'Etudes MENARD (1975), *Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations*. Publication D/60/75.
- DUDT J.-P. (1986), EFEMER. *Méthode des éléments finis en élasto-plasticité*, Manuel de l'utilisateur. ISRF/EPFL.
- DUDT J.-P., PELLET F. (1989), EFEMER. *Un programme de calcul par éléments finis en élasto-plasticité, présentation générale*. ISRF/EPFL.
- DYSLI M., FONTANA A. (1989), *Déformations autour des excavations en terrain compressibles*. Bull. Soc. Ingénieurs et Architectes suisses, n° 12, pp. 179-185.
- DYSLI M. (1985), *Usage pratique de modèles couplés*. Proc. 11 th ICSMFE, San Francisco, vol. 2, pp. 747-750.
- SCHMITT P. (1984), *Etude expérimentale de la sollicitation exercée par le sol sur les ouvrages de soutènements souples*. Revue Française de Géotechnique, n° 28, pp. 27-40.
- TSUI Y., CHENG Y.M. (1989), *A fundamental study of braced excavation construction*. Computer and Geotechnics, vol. 8, pp. 39-64.