

Étude de la stabilité d'excavations partiellement soutenues

Philippe MESTAT
Nicolai DRONIUC
Jean-Pierre BERTHELON

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Institut Navier

RÉSUMÉ

La méthode cinématique régularisée de l'analyse limite et la méthode des éléments finis ont permis d'étudier la stabilité d'excavations partiellement soutenues dans des massifs de sol cohérent et d'obtenir des résultats originaux. De nombreuses configurations de soutènement partiel ont été étudiées numériquement avec le logiciel CESAR-LCPC en déformation plane (module de calcul LIMI). Une borne supérieure de l'indice de stabilité a été obtenue pour chaque configuration. Une relation simple, exprimant cette borne supérieure en fonction du rapport de la hauteur de soutènement à la profondeur de la fouille, a été établie pour décrire l'ensemble des résultats obtenus.

DOMAIN : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

STUDY OF THE STABILITY OF PARTIALLY-SUPPORTED EXCAVATIONS

Both the regularized kinematic method from the limit analysis and the finite element technique have enabled studying the stability of partially-supported excavations within cohesive soils; a set of original results were obtained thanks to this exercise. Many partial support configurations were studied numerically using the CESAR-LCPC software in plane deformation (the LIMI computation module). An upper stability number was identified for each configuration. A simple relation, which expresses this upplerbound as a function of the ratio of supporting height to excavation depth, was established in order to describe all of the results generated.

FIELD: Geotechnical engineering and natural hazards

INTRODUCTION

Les travaux de construction en zone urbaine nécessitent fréquemment la réalisation d'excavations à proximité d'ouvrages existants. Le dimensionnement des dispositifs de soutènement, provisoire ou définitif, constitue alors un élément important. Les formules et abaques traditionnels traitent du cas des excavations non soutenues ou totalement soutenues. Or, bien souvent, les excavations sont partiellement soutenues par des systèmes de butonnage ou d'étalement à plusieurs niveaux. Il est donc important de disposer de résultats pour ces configurations.

La stabilité de tels dispositifs sur un seul niveau a été étudiée à l'aide de la théorie de l'analyse limite par plusieurs auteurs dont notamment Britto et Kusakabe (1984). Le problème traité est celui de fouilles creusées dans un milieu cohérent et partiellement soutenues par un dispositif rigide susceptible de se déplacer avec le sol. Les fouilles peuvent être de grande longueur (cas de la déformation plane) ou cylindriques (symétrie de révolution). Les bornes supérieures obtenues par Britto et Kusakabe ont été présentées sous la forme d'abaques donnant une estimation de l'indice de stabilité $N = \gamma D / c_u$ en fonction du rapport de la hauteur soutenue H à la profondeur de fouille D . Le sol cohérent est caractérisé par son poids volumique γ et par sa cohésion non drainée c_u .

L'objectif et l'originalité de cette étude ont consisté à reconsidérer ce problème, à fournir de meilleures bornes supérieures et à étudier des configurations supplémentaires : variation de la position et de la hauteur du niveau de soutènement partiel, influence de deux niveaux de soutènement partiel et variations de leur position relative. Les bornes supérieures sont calculées à l'aide de la méthode cinématique régularisée développée au LCPC par M. Frémond et A. Friaâ (Friaâ, 1979 ; Guennouni, 1982). Celle-ci consiste à approcher les lois d'écoulement plastique par des lois de type Norton-Hoff généralisées, qui dépendent d'un paramètre p de type viscosité que l'on fait tendre vers 1. La programmation de cette méthode a été réalisée dans le système de calcul par éléments finis CESAR-LCPC (module LIMI : Jiang (1992) ; Antao (1997) et Droniuc (2001)). Le module LIMI a été validé en comparant ses résultats avec les résultats classiques de l'analyse limite pour des problèmes de capacité portante de fondations (Droniuc et al., 2002a ; 2002b), de tunnels (Antao, 1997), de stabilité de pentes (Sassi et Magnan, 2001 ; Droniuc et al., 2002c) et de stabilité de fouilles verticales non soutenues (Jiang, 1992).

STABILITÉ DE FOUILLES PARTIELLEMENT SOUTENUES

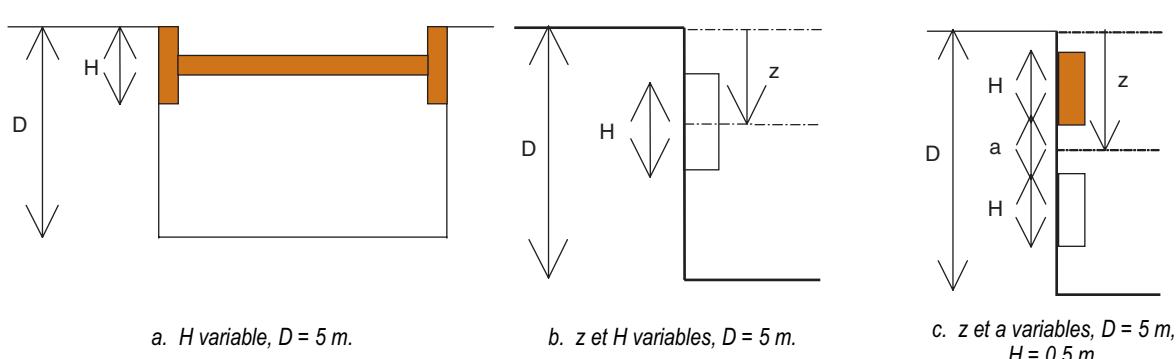
Configurations étudiées

L'ouvrage étudié est une fouille horizontale dont la paroi est verticale, de profondeur D égale à 5 m, de largeur B variable, et d'une longueur suffisamment importante pour que l'analyse puisse s'effectuer en déformation plane. Le sol est supposé cohérent, homogène, isotrope et de poids volumique γ . La cohésion non drainée est prise égale à 25 kPa. L'effet du soutènement rigide est représenté par une condition de déplacement horizontal empêché ($u = 0$), appliquée sur toute la hauteur du soutènement H . Trois configurations courantes dans la pratique ont été étudiées :

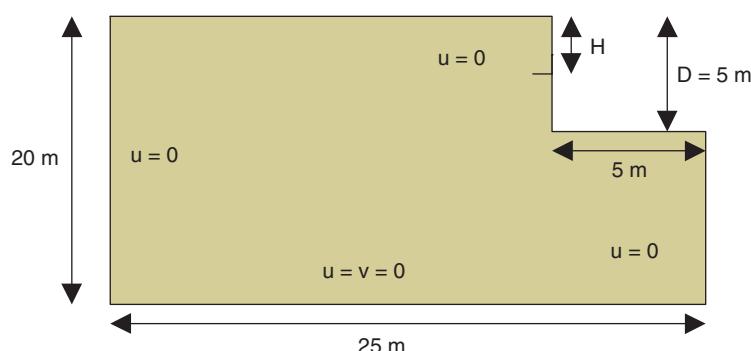
- bouton rigide appuyé en tête de la fouille et de hauteur H variable (Fig. 1a) ;
- bouton rigide de position z et de hauteur H variables (Fig. 1b) ;
- système de deux butons de position globale z et de distance entre les butons a variables (Fig. 1c).

Configuration 1 : un seul bouton en tête et de hauteur variable

Le bouton rigide est supposé fixé en tête de la fouille ($z = 0$). On étudie la stabilité de celle-ci en fonction de la hauteur du soutènement partiel H . Vingt calculs ont été réalisés correspondant à vingt hauteurs différentes de soutènement. Le modèle d'éléments finis et les conditions aux limites sont décrits sur la figure 2.



■ Fig. 1
Fouille et dispositif de soutènement étudié.



■ Fig. 2
Dimensions et conditions aux limites pour les calculs complémentaires.

Le maillage est composé de 95 000 triangles à trois nœuds et 47 951 nœuds au total. Le découpage est uniforme dans les deux directions de l'espace pour ne pas induire de directions privilégiées pour le mécanisme de rupture. La sollicitation considérée est le poids volumique : il est diminué progressivement dans l'analyse cinématique régularisée à partir d'une valeur conduisant à l'instabilité du milieu (50 kN/m^3).

L'étude de la stabilité à court terme consiste à déterminer l'indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ en fonction de la hauteur du soutènement H . Les valeurs estimées sur les abaques de Britto et Kusakabe (1984) apparaissant comme douteuses pour les faibles valeurs du rapport H/D , les indices de stabilité ont été recalculés à partir des équations établies par ces auteurs. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées aux résultats fournis par le module de calcul LIMI de CESAR-LCPC (tableau I).

Lorsque le rapport H/D est inférieur à 0,7, les bornes supérieures obtenues sont plus importantes que celles estimées par Britto et Kusakabe (1984). Cette différence provient du fait que les mécanismes de rupture, considérés par Britto et Kusakabe, sont concentrés derrière la paroi verticale et ne débouchent pas sous la fouille, alors que les mécanismes produits par LIMI font intervenir une part importante du sol sous la fouille (voir par exemple la figure 3). En revanche, lorsque le rapport H/D est plus grand que 0,7, ce sont les calculs avec LIMI qui fournissent les meilleures bornes supérieures. Cette observation justifie d'ailleurs *a posteriori* les conclusions des travaux analytiques de Britto et Kusakabe (1984), qui ont proposé de changer de mécanisme de rupture pour un rapport H/D égal à 0,7 et adoptent le schéma de rupture proposé par Terzaghi, comportant une partie de mécanisme débouchant dans la fouille.

Pour une largeur de fouille $B = 10 \text{ m}$, la variation de l'indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ en fonction du rapport H/D (Fig. 4) peut être approchée sur tout l'intervalle par la relation :

$$N = 4,3 + 2 \frac{H}{D} \quad (1)$$

TABLEAU I
Comparaison des indices de stabilité obtenus par les différentes analyses

H/D	Britto et Kusakabe	LIMI	H/D	Britto et Kusakabe	LIMI
0,10	4,110	4,766	0,60	5,286	5,416
0,20	4,243	4,890	0,70	5,869	5,490
0,30	4,408	5,017	0,80	6,896	5,710
0,40	4,619	5,146	0,90	9,343	5,890
0,50	4,899	5,150	1	12,929	6,124

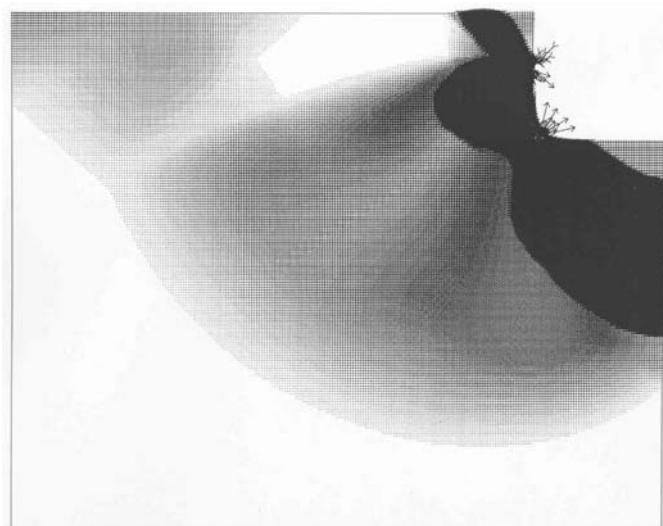
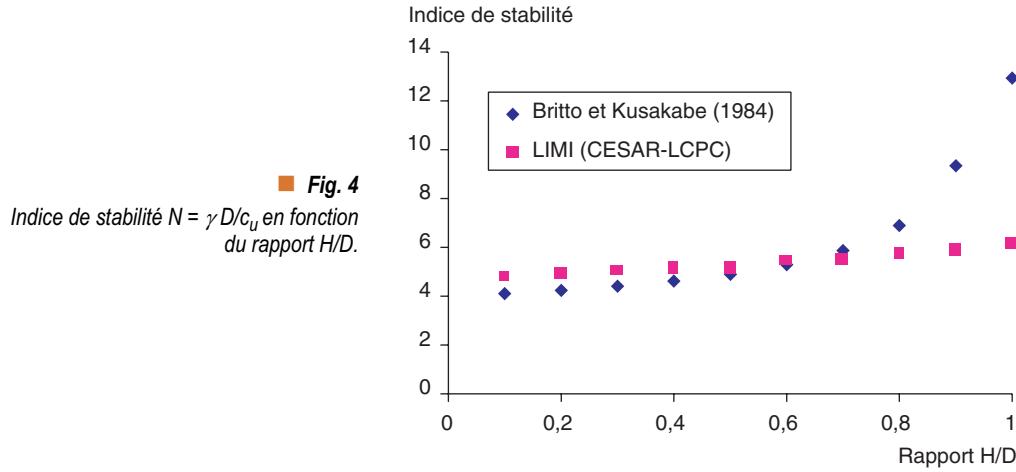


Fig. 3
Mécanisme de rupture donné par le module LIMI pour $H/D = 0,4$ ($H = 2 \text{ m}$ et $D = 5 \text{ m}$).
(Les zones les plus foncées indiquent les vitesses de déformations maximales dans le sol).



La figure 3 illustre un mécanisme de rupture calculé par le module LIMI pour un rapport H/D égal à 0,4. Le mécanisme est caractérisé par la zone où se situent les vitesses de déformations maximales (zone de couleur noire sur la figure).

Lorsque la paroi est totalement soutenue ($H = D$), on peut comparer les résultats obtenus avec la meilleure borne supérieure connue et proposée par Chang (2000) :

$$N = 5,14 \left(1 + 0,2 \frac{B''}{L} \right) + \frac{D}{B''}$$

où :

- L est la longueur de la fondation ;
- B'' est une distance égale à $\sqrt{2} h$ lorsque la condition $\sqrt{2} h \leq B$ est vérifiée et égale à B dans l'autre cas ;
- h désigne la profondeur de sol cohérent situé sous la fouille.

Pour le cas étudié ($D = 5$ m ; $B = 10$ m ; $h = 15$ m et L infinie), la formule de Chang conduit à la valeur $N = 5,64$ qui se compare favorablement avec la borne supérieure donnée par le module LIMI de CESAR-LCPC : $N = 6,124$. La différence de l'ordre de 9 % s'explique par le fait que Chang suppose que le soutènement rigide ne se déplace pas avec le sol.

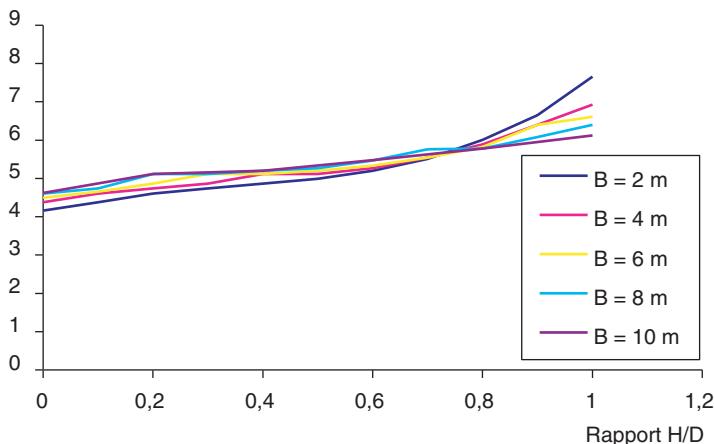
La formule simplifiée (1) a été calée sur le cas particulier : $D = 5$ m et $B = 10$ m. Afin de généraliser cette formule, il convient d'étudier l'influence de la largeur B sur la stabilité. Pour cela, une série de quarante-quatre calculs complémentaires a été effectuée pour les valeurs suivantes de B : 2 m, 4 m, 6 m et 8 m. La figure 5 représente l'ensemble des résultats obtenus avec le module LIMI. On observe que l'ordre des indices de stabilité s'inverse pour $H/D = 0,75$ (environ) et que, dans la première partie ($H/D < 0,75$), l'influence de la largeur B est relativement faible. En revanche, dès que $H/D > 0,75$, l'influence est notable. L'analyse de ces courbes et les résultats précédents (formule 1) permettent de proposer les formules approchées suivantes :

$$\text{➤ pour } \frac{H}{D} \leq 0,75 : N = 4,3 + 2 \frac{H}{D} \quad (2)$$

$$\text{➤ pour } \frac{H}{D} \geq 0,75 : N = 5,8 + 3,83 \left(2,45 - \frac{B}{D} \right) \left(\frac{H}{D} - 0,75 \right) \quad (3)$$

Ces formules n'ont été vérifiées que pour une largeur de fouille B comprise entre 2 et 10 m, et pour $D = 5$ m. Toute utilisation en dehors de cet intervalle serait imprudente. Toutefois, l'intérêt était de montrer que l'outil numérique LIMI pouvait conduire à exprimer des relations simples pour l'indice de stabilité.

Indice de stabilité N

**Fig. 5**

Indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ calculé pour différentes valeurs du rapport H/D et pour différentes largeurs de fouille B .

Configuration 2 : un seul bouton de hauteur et de position variables

Le bouton rigide est cette fois de hauteur et de position variables. Sa position est repérée par la distance z entre la surface du terrain naturel (non excavé) et le centre du bouton (*cf.* Fig. 1b). Cinquante-quatre calculs ont été réalisés avec le module LIMI de CESAR-LCPC, correspondant à neuf hauteurs de soutènement et à différentes positions du soutènement partiel (Hamza, 2001).

L'analyse consiste à étudier la variation de l'indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ en fonction du niveau d'application du bouton (profondeur z) et de la dimension du bouton (hauteur H).

Pour présenter les résultats, on introduit la variable adimensionnelle $Z = \frac{z - \frac{H}{2}}{D - H}$. La valeur $Z = 0$

correspond à un bouton situé en tête de la fouille et $Z = 1$, à un bouton en fond de fouille ($z = D - H/2$). La quantité $(D - H)$ est la hauteur libre. La figure 6 présente l'ensemble des courbes obtenues pour différentes hauteurs de soutènement.

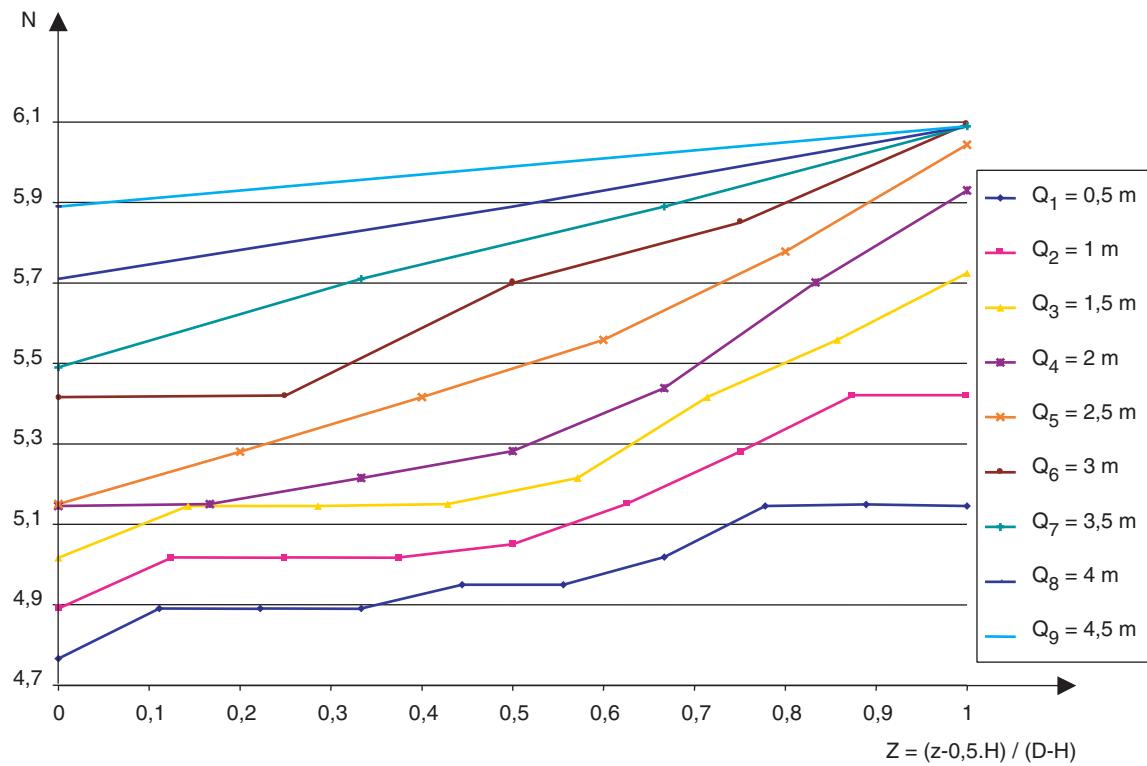
Pour chaque courbe, plus la position du bouton rigide est proche du fond de fouille (Z proche de l'unité), plus l'indice de stabilité augmente. Cette observation est logique puisque l'amorce du mécanisme de rupture se situe en fond de fouille.

Les cinq premières courbes, correspondant à des hauteurs de soutènement respectivement égales à 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m et 2,5 m, présentent une allure similaire. Les variations de ces courbes peuvent être approchées par l'équation suivante :

$$N = 1,14 Z^2 - 0,6 Z + N_0 \quad (4)$$

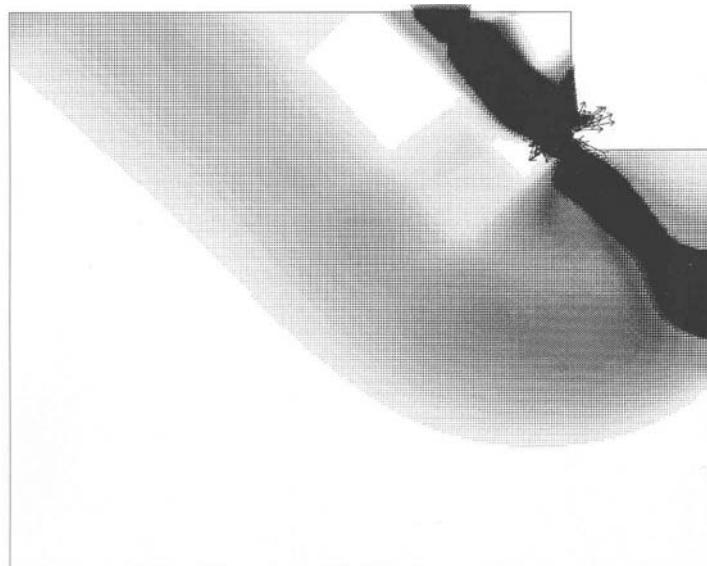
où N_0 est l'indice de stabilité pour $(z = H/2)$ ($Z = 0$) ; c'est-à-dire l'indice de stabilité estimé pour la configuration 1. Cette expression permet de décrire les courbes 1 à 5 avec une bonne précision.

Pour les autres courbes, correspondant à des hauteurs de soutènement supérieures à 2,5 m ($H/D > 0,6$), le nombre de points de calcul est plus faible, puisqu'il reste peu de positions intéressantes à étudier pour le bouton. Lorsque la hauteur H devient trop grande, les calculs de stabilité perdent évidemment de leur intérêt. La figure 7 illustre un mécanisme de rupture mis en évidence par cette série de calculs, pour le cas : $z = 4,75$ m ($Z = 1$) et $H = 0,5$ m.



■ Fig. 6

Indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ calculé en fonction de la hauteur et de la position du bouton rigide.



■ Fig. 7

Mécanisme de rupture pour $z = 4,75 \text{ m}$ et $H/D = 0,1$.

(Les zones les plus foncées indiquent les vitesses de déformations maximales dans le sol - calcul LIMI).

Configuration 3 : système de deux butons en interaction

La troisième étude concerne un système de deux butons rigides, identiques et indépendants. La position du système est repérée par la distance z entre la surface du terrain naturel (non excavé) et le centre des deux butons (cf. Fig. 1c). L'influence de la distance « a » entre les deux butons est aussi étudiée.

Trente-neuf calculs ont été effectués, correspondant à six distances différentes entre les deux niveaux de butons et de multiples positions le long de la paroi de la fouille [Hamza, 2001]. L'objectif est d'étu-

dier l'évolution de l'indice de stabilité en fonction de la profondeur z et de la distance a . On a fixé de manière arbitraire la hauteur de chaque bouton à 0,5 m. La figure 8 illustre les variations de l'indice de stabilité $N = \gamma D/c_u$ pour différentes valeurs de la position z (comprise entre $H + a/2$ et $D - H - a/2$) et différentes distances a entre les butons (0 m ; 0,5 m ; 1 m ; 1,5 m ; 2 m et 2,5 m). Comme dans les

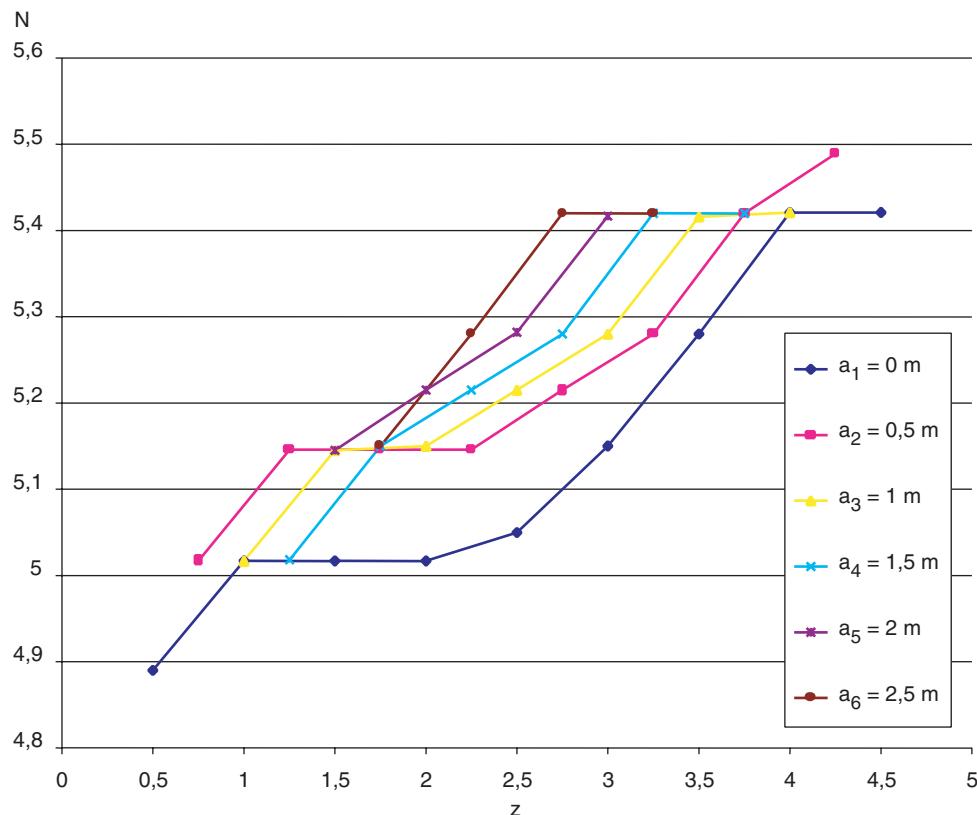


Fig. 8

Indice de stabilité en fonction de la position du système de soutènement z (formé de deux butons rigides) et de la distance entre les butons a .

configurations précédentes, l'indice de stabilité prend des valeurs plus importantes lorsque le soutènement est proche du fond de fouille. Lorsque la distance entre les butons augmente, l'indice de stabilité $N(z, a)$ augmente également. Toutes les courbes de la figure 8 présentent la même allure, à l'exception de celle associée à la plus grande distance $a = 2,5$ m. Cette allure est similaire à celle des courbes de la figure 6. Il est donc possible de les approcher de la même façon à l'aide d'un polynôme du second degré en Z , dont les coefficients dépendraient de la profondeur et de la largeur de la fouille.

Pour caractériser complètement une telle formule approchée et généraliser sa portée, il conviendrait d'analyser l'influence des variables B , D et H . Cette longue étude paramétrique n'a pas été menée. Plutôt que d'étudier de multiples configurations et de proposer des abaques à multi-variables, il nous est apparu plus simple de montrer les possibilités du module de calcul LIMI, qui sera prochainement disponible dans la nouvelle version du progiciel de calcul par éléments finis CESAR-LCPC, et d'en promouvoir l'utilisation.

CONCLUSIONS

Le module de calcul LIMI de CESAR-LCPC, permettant de calculer des bornes supérieures des charges limites, a été appliqué au problème de la stabilité d'une fouille, excavée dans un massif de sol cohérent et partiellement soutenue par un ou deux butons rigides. Plus d'une centaine de calculs ont été réalisés.

Les modélisations ont conduit à des résultats originaux. Des formules analytiques simples ont été proposées pour décrire les valeurs des bornes supérieures obtenues en fonction du rapport de la hauteur du soutènement à la profondeur de la fouille.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANTAO A., *Application des méthodes de régularisation en analyse limite à l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains*, Thèse de doctorat de l'ENPC, **1977**.
- BRITTO A.M., KUSAKABE O., On the stability of supported excavations, *Can. Geotech. J.*, **21**, **1984**, pp. 338-348.
- CHANG M.F., Basal stability analysis of braced cuts in clay, *J. Geotech. Geoenv. Eng., ASCE*, **2000**, pp. 276-279.
- DRONIUC N., *Développements et applications géotechniques du calcul à la rupture par la méthode des éléments finis*, Thèse de doctorat de l'ENPC, **2001**.
- DRONIUC N., MAGNAN J.-P., À propos du choix de l'angle de frottement interne pour le calcul des fondations superficielles, *Symp. Inter. PARAM 2002*, Presses de l'ENPC/LCPC, **2002a**, pp. 531-540.
- DRONIUC N., MAGNAN J.-P., HUMBERT P., MESTAT Ph., Bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads, *5th Europ. Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering - NUMGE 2002*, Paris, Presses de l'ENPC/LCPC, **2002b**, pp. 503-512.
- DRONIUC N., MAGNAN J.-P., HUMBERT P., MESTAT Ph., Regularised kinematic analysis of the failure of Sallèles test embankment, accounting for the effects of groundwater, *5th Europ. Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering - NUMGE 2002*, Paris, Presses de l'ENPC/LCPC, **2002c**, pp. 765-774.
- FRIAÂ A., *La loi de Norton-Hoff généralisée en plasticité et en viscoplasticité*, Thèse de doctorat d'État, Université Pierre et Marie Curie, Paris, **1979**.
- GUENNOUNI A.T., *Matériau de Norton-Hoff pour divers critères de la plasticité de mécanique des sols*, Thèse de docteur-ingénieur de l'ENPC, **1982**.
- HAMZA R., *Modélisation d'une fouille partiellement soutenue*, Mémoire de DEA, Mécanique des sols et des ouvrages dans leur environnement, LCPC, **2001**.
- JIANG G.L., *Application de l'analyse limite à l'étude de la stabilité des massifs de sol*, Thèse de doctorat de l'ENPC, **1992**.
- SASSI K., MAGNAN J.-P., *Application de l'analyse limite cinématique régularisée à l'étude de la stabilité des pentes*, LCPC, Études et recherches des LPC, série Géotechnique, **GT 70**, **2001**, 240 pages.