

# Détermination des conditions aux limites pour un calcul de stabilité de talus

V. MERRIEN-  
SOUKATTOFF  
K. OMRACI

Laboratoire Environnement  
Géomécanique Ouvrages  
école des Mines de Nancy  
Parc de Saurupt  
54042 Nancy Cedex  
Véronique.Merrien@mines.  
u-nancy.fr

## Résumé

Les calculs en contraintes-déformations lorsqu'ils sont utilisés pour l'analyse de la stabilité de talus posent le problème du choix de la position des conditions aux limites. La première partie de cet article répertorie un certain nombre de calculs publiés qui montrent une grande hétérogénéité dans les dimensions choisies pour de tels modèles. Un exemple de calcul en éléments finis pour un remblai latéritique est ensuite présenté. Pour ce cas, une étude systématique de l'influence de la taille du modèle sur le calcul des contraintes a été mise en œuvre. Elle a conduit à adopter des dimensions inhabituelles : le modèle est relativement profond et étroit. Les dimensions retenues pour ce modèle ne sont pas directement transposables à d'autres cas, mais la méthode utilisée est discutée et pourrait servir de base à une étude plus systématique de cas types.

*Mots-clés* : talus, stabilité, éléments finis, contraintes, déformations, remblai.

## Determination of boundary conditions for a slope stability calculation

## Abstract

The choice of boundary conditions for slope stability analysis using a stress-strain calculation is not simple because of the lack of analytical solution. The first part of this paper presents some calculations, which show a great heterogeneity in the dimensions chosen for such models. An example of finite element calculation, for a lateritic embankment is then presented. For this case a systematic study of the influence of the size of the model on calculations of stresses was carried on. The final dimensions adopted are quite unusual : the model is relatively deep and narrow. The dimensions chosen for this model are not directly transposable for other cases, but the method used is discussed and could be of interest for systematic studies of standard cases.

*Key words* : slope, stability, finite elements, stresses, deformations, embankment.

NDLE : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1<sup>er</sup> juillet 2001.

## Introduction

Tous les calculs en contraintes-déformations (éléments finis, différences finies ou éléments distincts) effectués en géotechnique nécessitent de se poser la question des conditions aux limites. Pour les talus, ces calculs présentent l'inconvénient (contrairement à d'autres géométries) de ne pas pouvoir, en général, être comparés à une solution analytique même pour une géométrie simple et un comportement élastique. Moyennant certaines hypothèses, une solution analytique peut être obtenue pour un talus infini et une pente constante, mais ce cas de figure est très éloigné des géométries réelles. Des solutions utilisant les variables complexes ont été également proposées notamment par Silvestri et Tabib (1983).

L'analyse des publications traitant de la stabilité de talus montre que :

- les études sont, dans leur grande majorité, effectuées à partir de calculs à l'équilibre limite, notamment par une des méthodes de tranches ;
- lorsque des calculs en contraintes-déformations sont réalisés, la taille des modèles utilisés est extrêmement hétérogène.

Dans le cadre d'études sur la stabilité de remblais latéritiques de grande hauteur, nous avons effectué des calculs par la méthode des éléments finis. Ces modélisations avaient pour objectif d'aider à l'analyse des déplacements et des déformations enregistrés sur le terrain et d'évaluer le comportement des terrains sous l'effet d'une surcharge (due à une nouvelle couche de matériau). Celles-ci nous ont conduits à examiner l'influence de la taille du modèle sur l'évaluation des contraintes dans la zone étudiée.

Nous présentons dans un premier temps les dimensions adoptées par un certain nombre d'auteurs lorsqu'ils effectuent des calculs de stabilité de pente en contraintes-déformations, puis le cas concret du remblai étudié, les raisons qui ont conduit à effectuer un calcul en élément finis et à rechercher une dimension « optimale » pour le modèle utilisé. La démarche utilisée pour choisir les dimensions de notre modèle et les dimensions adoptées sont finalement exposées et commentées.

## Hétérogénéités des dimensions des modèles de talus

### Les *a priori* sur les conditions aux limites

Comme nous l'avons mentionné, les talus de pente constante infinie n'existent pas et on est plus généralement confronté lors d'études de stabilité de talus à une géométrie du type surface horizontale, pente, surface horizontale (Fig. 1).

Si l'on définit l'élanement  $e$  comme  $e = H/h = L/l$  pour des modèles tels que  $L = L_1 = L_2$ , l'étude paramétrique d'élanements variables effectuée par Arif (1988) nous

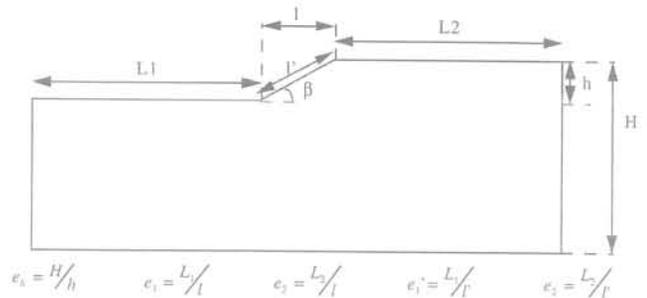


FIG. 1 Conventions adoptées pour comparer les tailles de modèles.

Conventions adopted to compare the sizes of models.

avait conduits à considérer qu'il fallait adopter des élanements au moins supérieurs à 20 pour modéliser un talus isolé. L'analyse réalisée était basée sur la comparaison de l'évolution de la valeur des contraintes et des déplacements en quelques points situés sur une ligne parallèle à la pente (notamment en pied de talus), pour des modèles éléments finis de taille croissante (Fig. 2). Le pied de talus est une zone un peu particulière pour laquelle les résultats des calculs aux éléments finis sont influencés par le maillage adopté à cause des variations brutales d'angle de la surface topographique. Un élanement de 20 peut sembler excessif et est en désaccord avec les dimensions généralement proposées pour ce genre d'analyse. Nous montrerons plus loin que pour le cas du remblai latéritique, nous avons choisi d'effectuer des comparaisons sur l'ensemble de la surface analysée, plutôt qu'en quelques points.

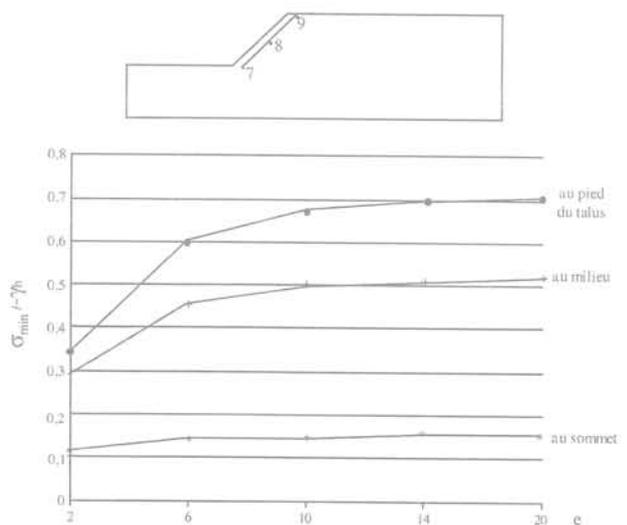


FIG. 2 Variation de  $(\sigma_{\min} / \gamma_h)$  en fonction de l'élanement du modèle (d'après Arif, 1988).

Variation of  $(\sigma_{\min} / \gamma_h)$  versus enhancement of the model (According Arif, 1988).

## Comparaison des dimensions adoptées par différents auteurs

Nous n'avons repéré que peu d'études systématiques sur les dimensions des modèles contraintes-déformations dans le cas de la modélisation des pentes. Mestat (1993) propose d'adopter les dimensions présentées sur la figure 3. Snitbhan et Chen (1978) ne conseillent pas de dimensions type, mais constatent que la valeur du poids volumique  $\gamma$  qui provoque la rupture d'un talus vertical (Fig. 4) est 10 % moins importante lorsque la position des frontières latérales passe de 4 H à 10 H. Desai et Christian (1977) distinguent les calculs qui concernent des excavations de ceux relatifs aux remblais.

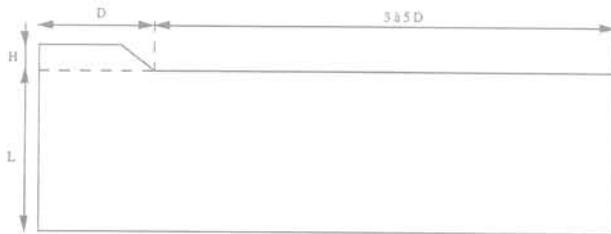


FIG. 3 Dimensions proposées par Mestat (1993) pour des calculs aux éléments finis de remblais.  
Dimensions suggested by Mestat (1993) for finite elements calculations of embankments.

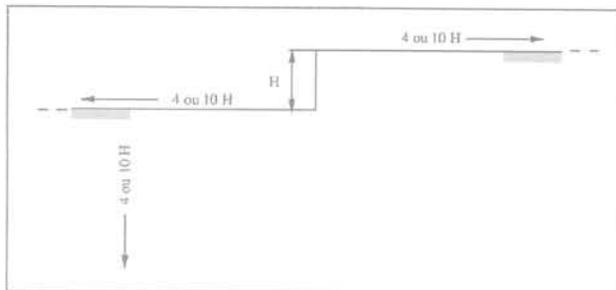


FIG. 4 Modèle étudié par Snitbhan et Chen (1978) pour analyser l'influence de la taille du modèle sur l'analyse de stabilité d'un talus vertical.  
Model presented by Snitbhan and Chen (1978) to analyse the influence of the size of the model on the analysis of stability of a vertical slope.

Pour effectuer des comparaisons, nous avons recherché des articles ou documentations de logiciels qui présentent des cas de calculs en contraintes-déformations, sur des géométries de talus simples et nous avons extrait les dimensions adoptées selon les conventions présentées sur la figure 1. Les comparaisons, rassemblées dans le tableau I, montrent une grande hétérogénéité dans les dimensions adoptées et semble-t-il le peu d'intérêt accordé par les différents auteurs à l'influence éventuelle de la taille du modèle sur le problème étudié. Par exemple, nous avons noté que l'article de Ugai *et al.* (1996) s'intéresse à l'influence de la largeur d'un modèle tridimensionnel sur les calculs

en fixant des dimensions très réduites dans le plan de plus grande pente du talus. Dans ce tableau, nous avons indiqué la nature du talus modélisé en mentionnant s'il s'agissait d'une excavation, d'un remblai ou d'une pente naturelle. Les pentes naturelles sont probablement le résultat d'une excavation, mais qui s'est déroulée au cours d'une histoire géologique complexe et souvent impossible à restituer.

Les comparaisons effectuées ne sont qu'indicatives, car dans les modèles cités :

- les maillages utilisés sont très différents les uns des autres ;
- les éléments adoptés et donc les degrés de liberté sont dissemblables ;
- les lois de comportement utilisées sont variables ;
- les conditions aux limites imposées peuvent être des déplacements ou des contraintes.

## 3

## Influence de la taille du modèle sur un calcul de remblai latéritique

## 3.1

### Présentation du remblai étudié

En Nouvelle-Calédonie le minerai nickélicifère est exploité dans des couches de péridotites recouvertes de latérites. Les latérites, stériles, sont stockées sous forme de remblai dans des sites aménagés à cet effet. Le matériau est mis en place par couches successives de 1,5 à 1,7 m d'épaisseur. Le cas étudié est une de ces décharges de latérites remaniées (Fig. 5). Ce remblai repose sur un terrain en place dont la pente maximale est de 25 degrés. Le profil du terrain naturel est typique d'une altération tropicale. De haut en bas, on rencontre :

- latérite en place (3) ;
- saprolite (2), matériau rocheux fracturé ;
- péridotite (1) matériau rocheux peu fracturé.

Il existe plusieurs sites de décharges similaires et le remblai présenté est un ouvrage type qui a été instrumenté. La géométrie du terrain naturel (limite entre les terrains numérotés 3 et 4) est simplifiée sur la figure 5. Ces remblais ne posent pas de problèmes de stabilité à l'état actuel mais le nombre de sites de stockage des latérites étant limité, les remblais existant doivent être rehaussés et le comportement de l'ouvrage type a été analysé.

Les mesures en laboratoire réalisées à partir d'échantillons issus de deux forages, ont montré un comportement très hétérogène des matériaux. Nous avons considéré, dans un premier temps, en simplifiant, que le comportement était élasto-plastique parfait avec un critère de Mohr-Coulomb. Les caractéristiques moyennes issues des mesures en laboratoire sont reportées dans le tableau II.

Les calculs à l'équilibre limite effectués ont montré qu'il n'y avait pas problème de stabilité à long terme, mais que le coefficient de sécurité de stabilité à court terme, en cas de rehausse importante, était faible et posait le problème de la cadence de stockage des matériaux supplémentaires. Des calculs aux éléments finis permettaient, entre autres :

- de comparer les déplacements et les déformations prévus par le modèle aux observations *in situ* (déplacements topographiques en surface, déformations four-

TABLEAU 1

**Comparaison des dimensions adoptées pour les modélisations éléments finis (type de talus : E : excavation, R : remblai, PN : pente naturelle).**  
Comparison of the dimensions adopted for different finite elements models of slope (type of slope : E : excavation, R : embankment, PN : natural slope).

	Type de talus	Remarques	l	h	l'	angle	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	H	H-h	e <sub>h</sub> H/h	(H-h)/h	e <sub>1</sub> L <sub>1</sub> /l	e <sub>2</sub> L <sub>2</sub> /l	e' <sub>3</sub> L <sub>3</sub> /l'	e' <sub>2</sub> L <sub>2</sub> /l'	
																	3 à 5* (l + L <sub>1</sub> )
Mestat P. (1993)	?																
Ugai K. et al. (1996)	?		20	10	22,36	26,57	20	60	16,7	6,667	1,67	0,67	1,00	3,00	0,89	2,68	
ZSOIL.PC (1997)	?	Exemple de la documentation	10	5,7	11,51	29,68	15	15	13,7	8	2,40	1,40	1,50	1,50	1,30	1,30	
ZSOIL.PC (1997)	?	Exemple de la documentation	10	10	14,14	45,00	15	15	13,7	3,7	1,37	0,37	1,50	1,50	1,06	1,06	
ZSOIL.PC (1997)	?	Exemple de la documentation	10	10	14,14	45,00	15	15	18	8	1,80	0,80	1,50	1,50	1,06	1,06	
Adachi T. (1996)	E		15	20	25,00	53,13	80	65	80	60	4,00	3,00	5,33	4,33	3,20	2,60	
Arif I. (1988)	E		1	1	1,41	45,00	20	20	20	19	20,00	19,00	20,00	20,00	14,14	14,14	
Desai C. S. et al. (1977)	E	Pour une excavation					3* (H-h)	3*H				4,00 (maximum)					
Kirkebo S. et al. (1996)	E		10	20	22,36	63,43	40	90	40	20	2,00	1,00	4,00	9,00	1,79	4,02	
Mestat P. et al. (1999)	E	Pour une excavation					10*h	10*h				4,00					
Potts D. M. et al. (1987)	E	Dimensions estimées d'après une figure	29	10	30,68	19,03	8	42,9	20	10	2,00	1,00	0,28	1,48	0,26	1,40	
Rahman H. (1996)	PN		23	23	32,53	45,00	46	46	45	22	1,96	0,96	2,00	2,00	1,41	1,41	
Song Won kyong (1996)	PN		38,46	22,22	44,42	30,02	14,81	34,07	52,59	30,37	2,37	1,37	0,39	0,89	0,33	0,77	
Verdugo V. et al. (1996)	PN		14	7	15,65	26,57	9,8	21,7	15,4	8,4	2,20	1,20	0,70	1,55	0,63	1,39	
Desai C. S. et al. (1977)	R	Pour un remblai					3* (H-h)										
Jiang G.-L et al. (1997)	R		18	6	18,97	18,43	5	15	12	6	2,00	1,00	0,28	0,83	0,26	0,79	
Mestat P. et al. (1999)	R	Pour un remblai						3 à 5* (l + L <sub>1</sub> )				4,00 (minimum)					
Sassi K. (1996)	R	Le modèle est tridimensionnel	7,65	5,1	9,19	33,69	120	80	10,7	5,6	2,10	1,10	15,69	10,46	13,05	8,70	
Remblai latéritique	R + PN	Comparaison 1 : par rapport au talus de la décharge	156	90	180,10	29,98	460	991	1615	1525	17,94	16,94	2,95	6,35	2,55	5,50	
Remblai latéritique	R + PN	Comparaison 2 : par rapport au pied du point le plus bas	900	315	953,53	19,29	0	864	1615	1300	5,13	4,13	0,00	0,96	-	0,91	

nies par les extensomètres ou les inclinomètres au fur et à mesure de l'évolution de la géométrie du talus ;  
- de localiser les zones sensibles, et donc d'orienter l'emplacement des surveillances ;

- d'évaluer plus finement le coefficient de sécurité.

Nous ne détaillerons pas ici les résultats et les comparaisons issus de ces calculs, notre objectif étant de s'appuyer sur un cas concret pour analyser l'influence de la position des conditions aux limites.

### 3.2

## Modélisations effectuées

Des calculs aux éléments finis ont été réalisés avec le code CESAR-LCPC. La géométrie du site a été schématisée pour la modélisation (Fig. 6). La surface amont de la décharge, en particulier, a été considérée comme horizontale et la pente à l'aval constante et égale à 22 degrés.

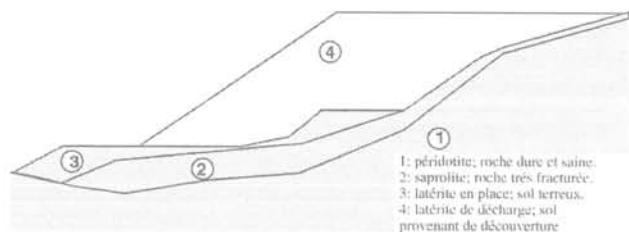


FIG. 5 Coupe du remblai étudié.  
Cut of the studied embankment.

TABLEAU II Caractéristiques à long terme des matériaux utilisés dans le modèle.  
Long-term characteristics of the material introduced in the model.

	c' (kPa)	φ'	E (MPa)	ν	γ (kN/m <sup>3</sup> )
Péridotite	100	30°	10 <sup>4</sup>	0,1	27
Saprolite	100	30°	35	0,3	22
Latérites en place	23	38°	30	0,4	18
Latérites en décharge	23	38°	30	0,4	19

Les dimensions des modèles sont reportées figure 6. Les conditions aux limites choisies sont des déplacements verticaux nuls à la base du modèle et des déplacements horizontaux nuls sur les côtés du modèle. Pour étudier l'influence de la position des conditions aux limites, une succession de calculs a été réalisée en augmentant progressivement la largeur amont L et la hauteur ou profondeur H du modèle de 200 m en 200 m (L = 100, 300, 500, 700 m et H = 500, 700, 900, 1 100, 1 300 m). Ces augmentations ont été réalisées séparément : nous avons d'une part augmenté la largeur L à partir du modèle le plus petit et indépendamment augmenté la hauteur H. La limite aval du modèle n'a pas été modifiée, car pour des raisons liées à la topographie locale (fond de vallée), nous avons considéré la verticale à 450 m du pied de la décharge comme un axe de symétrie (limite à déplacements horizontaux nuls).

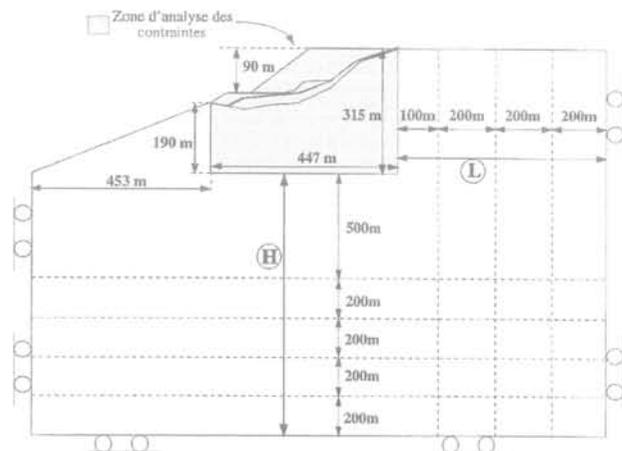


FIG. 6 Dimensions des modèles aux éléments finis utilisés (les dimensions H et L ne sont pas à l'échelle du reste du modèle).  
Dimensions of the finite elements models (H and L are not at the same scale as the rest of the model).

Les calculs successifs ont été effectués en élasticité linéaire isotrope, en discrétisant la zone en éléments triangulaires à 6 nœuds. Lors du passage à un modèle plus grand, seul le maillage du contour a été modifié en gardant autant que possible une densité homogène du maillage. Dans la zone d'analyse, le maillage utilisé est le même d'un modèle à l'autre. Il est composé de 1803 éléments et 4041 nœuds. Le maillage correspondant au modèle le plus large est présenté à la figure 7.

### 3.3

## Comparaisons en fonction de la taille du modèle

Les différences relatives de contraintes principales majeures et mineures entre deux modèles successifs ont été cartographiées dans la zone proche du talus qualifiée de « zone d'analyse » (Fig. 6). Cette cartographie a été réalisée par interpolation de la variation relative (entre deux modèles successifs) de la valeur des contraintes aux nœuds du maillage.

Pour les cartes représentant la contrainte principale majeure (en valeur absolue) il s'agit de la cartographie

de  $\left| \frac{\sigma_{1\text{modele1}} - \sigma_{1\text{modele2}}}{\sigma_{1\text{modele1}}} \right|$ , pour la contrainte principale

mineure  $\left| \frac{\sigma_{3\text{modele1}} - \sigma_{3\text{modele2}}}{\sigma_{3\text{modele1}}} \right|$ .

Les figures 8 et 9 présentent les variations pour des modèles de plus en plus larges, c'est-à-dire ayant des dimensions L et H croissantes.

### 3.4

## Dimensions adoptées

Les dimensions finales retenues correspondent à un modèle où L = 700 m et H = 1 300 m. Une augmentation des dimensions à partir de ce modèle ne produit pas plus de 2 % de variations sur les contraintes de la zone d'analyse. Ces grandeurs sont comparées à celles présentées au paragraphe 2.2 dans le tableau I. Le talus modélisé ayant une géométrie relativement complexe, deux types de dimensions ont été retenus pour effectuer les comparaisons. Pour la comparaison 1, nous avons considéré les dimensions du remblai seul par rapport au reste du modèle donc une hauteur de talus de 90 m et pour la comparaison 2, nous avons pris en compte l'ensemble du talus et donc une hauteur h de 315 m.

La modélisation présentée concerne une géométrie très particulière et des caractéristiques mécaniques précises, mais les constatations que l'on peut retirer de cet exemple peuvent être un élément de réflexion plus générale pour la modélisation des talus par des méthodes numériques. En particulier :

- la profondeur donnée au modèle est surprenante. Pour une hauteur de remblai de 90 m, nous avons dû effectuer un modèle de 1 615 m de hauteur, soit un rapport de 18 entre la hauteur du remblai et celle du modèle ou encore un élanement de 5 si l'on prend en compte la hauteur totale du talus ;

- le rapport entre la largeur du remblai et celle de la limite amont (e<sub>2</sub>) n'est que de 5 et ce rapport est environ 1 si on considère le talus.

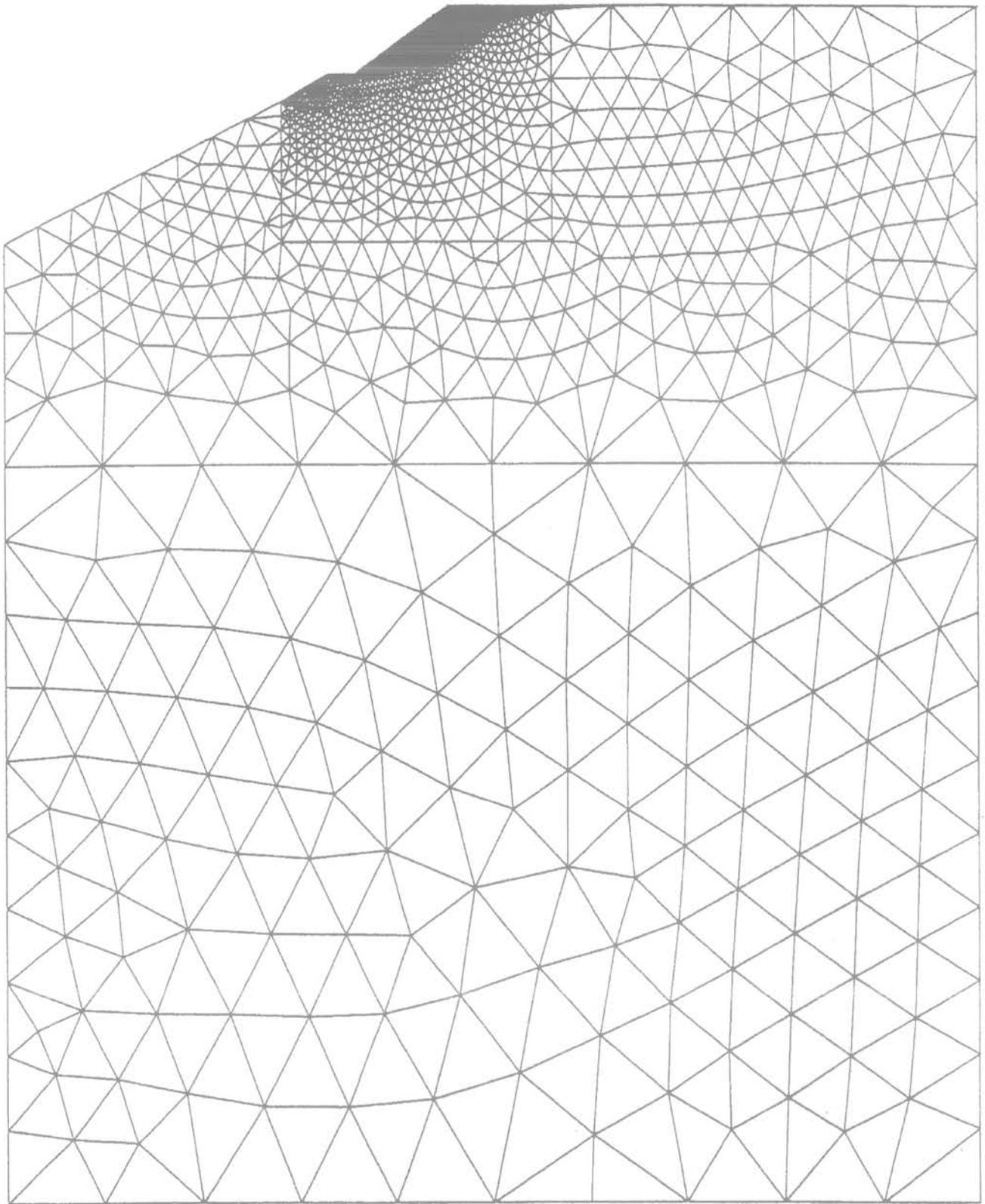


FIG. 7 Maillage du modèle le plus grand.  
Mesh of the largest model.

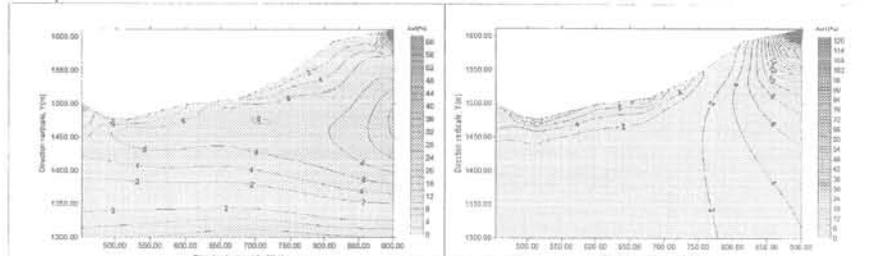
Le module d'Young dans les couches les plus superficielles du modèle étant beaucoup plus faible qu'en profondeur, nous pensions *a priori* que ceci conduirait plutôt à avoir une position de la limite inférieure à faible profondeur et qu'en revanche, il serait nécessaire de repousser la limite latérale du modèle. Nous avons donc finalement un modèle « haut » et relativement « étroit », ce qui semble plutôt en contradiction avec les pratiques généralement adoptées.

### 3.5

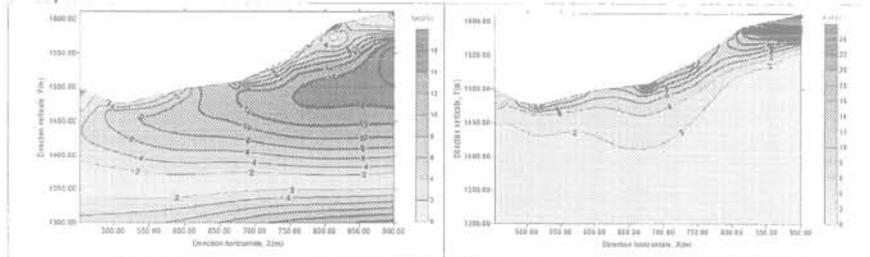
## Limites de la méthode

La méthode et le critère adoptés pour positionner les conditions aux limites de ce modèle peuvent être discutés pour plusieurs raisons liées au type de comparaison effectuée, au modèle utilisé, au milieu naturel modélisé.

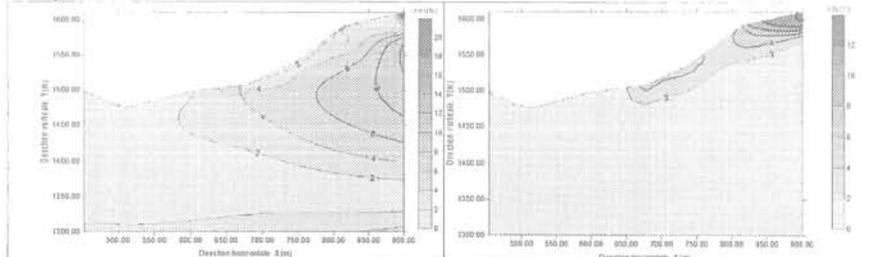
Comparaison entre les modèles  $L = 0$  m et  $L = 100$  m



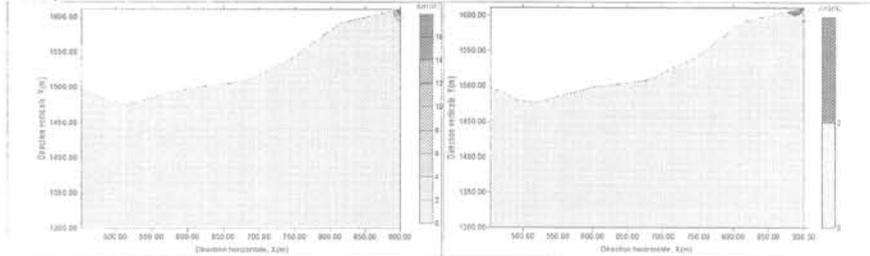
Comparaison entre les modèles  $L = 100$  m et  $L = 300$  m



Comparaison entre les modèles  $L = 300$  m et  $L = 500$  m



Comparaison entre les modèles  $L = 500$  m et  $L = 700$  m



Comparaison entre les modèles  $L = 700$  m et  $L = 900$  m

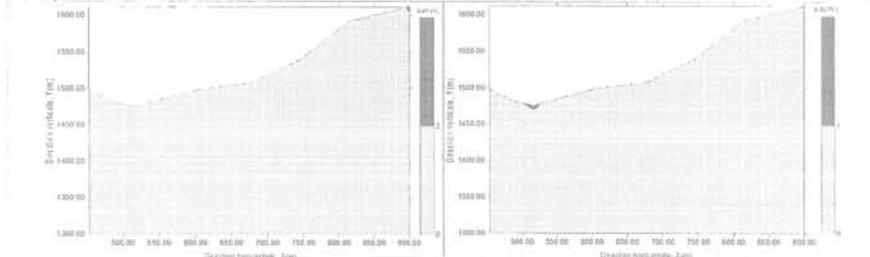


FIG. 8

Isovaleurs des variations relative (en pourcentage de la valeur absolue des contraintes principales majeures mineures (à gauche) et majeures (à droite) entre deux modèles pris successivement deux à deux pour différentes distances  $L$ . (La cartographie est une interpolation à l'aide du logiciel SURFER à partir des valeurs aux nœuds des contraintes).

Contour plot of the relative variations (expressed in percentage) of the principal minor (left) and major (right) stresses between two models taken successively two to two for various distances  $L$  (the cartography is an interpolation using the SURFER software of the values of stresses at the nodes of the mesh).

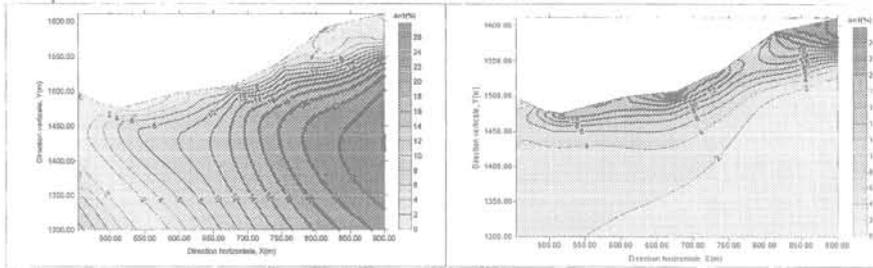
Les limites de la méthode, liées au type de comparaison effectuée, sont entre autres dues aux choix suivants :

- nous avons fixé arbitrairement à 2 % de variations sur les contraintes, le critère à partir duquel les dimensions n'ont pas été augmentées sans effectuer d'étude de sensibilité sur ce critère ;
- les dimensions du modèle ont été augmentées de 200 m en 200 m. Un autre pas aurait pu être adopté ;
- la comparaison a porté sur la différence entre des modèles de taille croissante alors qu'il aurait pu être préférable de comparer à une référence absolue ; par exemple par rapport au modèle le plus petit ou le plus grand. Nous avons également fait varier de manière

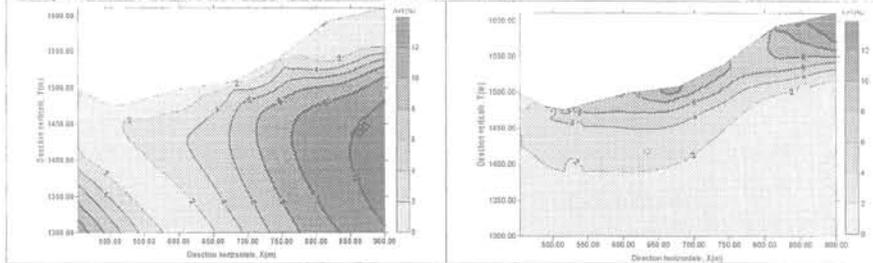
indépendante la largeur  $L$  et la hauteur  $H$ , alors qu'il aurait pu être intéressant de faire varier simultanément ces deux valeurs ;

- la comparaison aurait pu porter sur les déplacements ou les déformations successifs plutôt que sur les contraintes. En effet, les mesures qui vont être effectuées *in situ* sont des mesures de déplacements et de déformations, il peut donc être intéressant de connaître la sensibilité du modèle, pour comparer avec la précision des mesures de terrain (peut-être aurait-il mieux valu comparer la précision du modèle à celle que l'on peut obtenir sur les déplacements au niveau de la topographie ou à celle des déformations : extensomètres, inclinomètres). Mais, à l'inverse, si l'on cherche à éva-

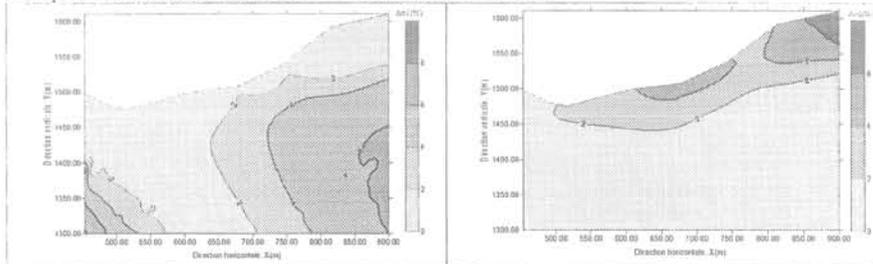
Comparaison entre les modèles H = 500 m et H = 700 m



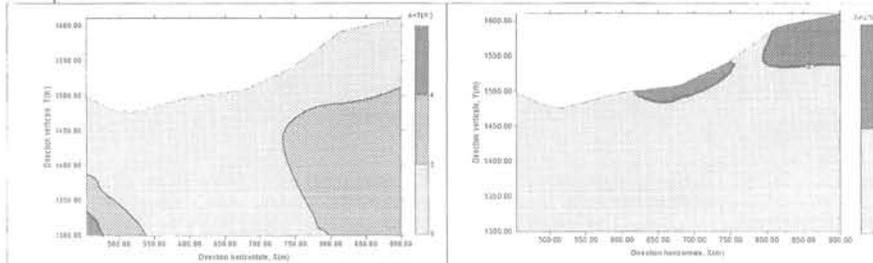
Comparaison entre les modèles H = 700 m et H = 900 m



Comparaison entre les modèles H = 900 m et H = 1 100 m



Comparaison entre les modèles H = 1 100 m et H = 1 300 m



Comparaison entre les modèles H = 1 300 m et H=1500m

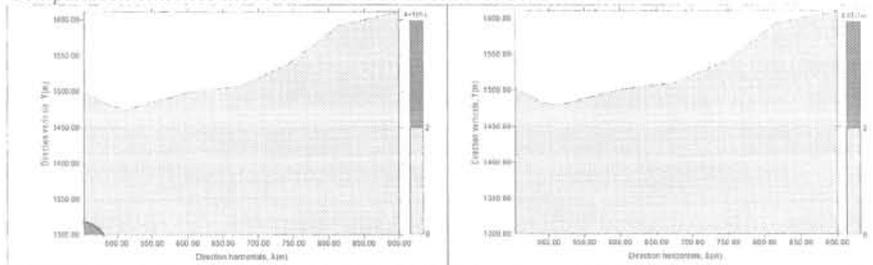


FIG. 9 Isovaleurs des variations relative (en pourcentage de la valeur absolue des contraintes principales majeures mineures (à gauche) et majeures (à droite) entre deux modèles pris successivement deux à deux pour différentes distances H. (La cartographie est une interpolation à l'aide du logiciel SURFER à partir des valeurs aux nœuds des contraintes).

Contour plot of the relative variations (expressed in percentage) of the principal minor (left) and major (right) stresses between two models taken successively two to two for various distances H (the cartography is an interpolation using the SURFER software of the values of stresses at the nodes of the mesh).

luer le coefficient de sécurité et à localiser les zones sensibles, c'est-à-dire en rupture ou en plasticité, il est préférable de travailler sur les variations de contraintes. La localisation des zones sensibles par le modèle pourra orienter la position des instrumentations ;

– le contact entre latérite en place et latérite en remblai a été considéré comme continu, alors qu'il existe probablement une discontinuité entre les deux terrains. La prise en compte de cette discontinuité et la manière de la modéliser peut avoir une influence importante sur la position des conditions aux limites.

D'autres limites de la méthode sont liées au modèle utilisé :

– nous avons adopté d'emblée des triangles à 6 nœuds pour le maillage. Il aurait été intéressant de tester différents types d'éléments avec différents degrés de liberté ;

– le calcul présenté ici était un calcul préliminaire. Des modélisations de plus en plus sophistiquées ont été réalisées sur ce site mais les dimensions finales issues de ce premier modèle ont été conservées pour les calculs ultérieurs effectués dans des conditions différentes (calcul élastoplastique, plusieurs phases de chargement simulant la construction progressive du remblai, module d'Young variable en fonction de la profondeur) ;

– nous avons choisi des conditions de déplacements nuls aux limites de notre modèle, nous aurions pu adopter des conditions en contraintes et discuter de la validité de ces conditions par rapport à la topographie et à l'histoire tectonique du site.

Ce type de comparaison est également limité par la variabilité du milieu naturel. En effet, le modèle final a une hauteur de 1 615 m et une largeur de 1 600 m. L'influence des variations de propriétés mécaniques des matériaux, notamment à grande profondeur, n'a pas été prise en compte dans ce calcul et le modèle a été agrandi en gardant une topographie horizontale à l'amont du talus, alors que la topographie réelle est beaucoup plus complexe.

Il faut enfin ajouter que la différence entre les contraintes calculées dans un modèle et les contraintes réelles, *in situ* (en général non connues) a une multitude de causes et les conditions aux limites ne sont qu'une de celles-ci, cependant elles constituent un des éléments de l'écart entre  $\sigma_{\text{modèle}}$  et  $\sigma_{\text{in situ}}$  que l'on peut sans doute plus facilement que les autres minimiser et/ou évaluer.

4

## Conclusion

La comparaison des dimensions de modèles de talus en contraintes-déformations adoptées par différents auteurs montre une grande hétérogénéité dans les tailles des modèles. Même si ces comparaisons sont limitées par de nombreuses autres différences, elles semblent montrer que la sensibilité des résultats à la

taille des modèles est assez peu prise en compte par les modélisateurs de talus.

L'étude systématique de l'influence de la taille des modèles dans le cas d'un remblai latéritique démontre pourtant l'importance de ce paramètre. Les critères adoptés pour effectuer cette analyse ne sont pas directement transposables à d'autres configurations, mais la démarche de comparaison systématique de modèles de taille croissante pourrait être adaptée à d'autres cas. L'analyse réalisée pour ce cas a conduit à adopter des dimensions importantes et différentes de celles généralement préconisées pour les modélisations de talus avec un modèle relativement « profond » et « étroit ». Une étude plus systématique sur un modèle type et pour des caractéristiques variables, pourrait apporter des informations complémentaires, utiles aux modélisateurs de talus. Ces études systématiques pourraient également permettre des comparaisons entre calculs en contraintes-déformations et calculs à l'équilibre limite.

Pour le cas présenté, à ce jour, les mesures réalisées sur les décharges n'ont pas contredit les résultats des calculs.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société Le Nickel (SLN) pour avoir apporté son soutien technique et financier à ces recherches.

## Bibliographie

- Abramson Lee W., Lee Thomas S. Sharma Sunil, Boyce Glenn M. – *Slope stability and stabilization methods*, New York, John Wiley & Sons, 1995.
- Adachi T., Liu J., Koike A., Zhang F. – « Finite element analysis of Biot's consolidation in slope excavation based on a constitutive model with strain softening ». Proceedings of the VII International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, 1996, p. 1131-1136.
- Arif Irwandy – « Étude des états de contraintes dans les talus, calculés par éléments finis, utilisation des programmes ELFI3F, SAP2D et CESFI ». Mémoire de DEA, Laboratoire de Mécanique des Terrains, École des Mines de Nancy, INPL, Nancy, 1998.
- Chowdhury R.N. – « Discussion of "Stability Analysis of embankment and slopes" by S.K. SARMA ». *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 107, n° GT5, 1981, p. 691-693.
- Desai C.S., Christian J.T. – *Numerical methods in geotechnical engineering*. McGraw-Hill, New York, 1977, 783 p.
- Jiang G.-L., Magnan J.-P. – « Stability analysis of embankments : comparison of limit analysis with methods of slices ». *Géotechnique*, vol. 47, n° 4, 1997, p. 857-872.
- Kirkebo S., Nordal S., Svan G. – « Time-dependent stability of an excavated slope ». Proceedings of the VII International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, 1996, p. 1269-1282.
- Magnan J.-P., Guilloux A. – *La méthode des éléments finis dans les projets de géotechnique*. Paris, Presses de l'ENPC, 1987.
- Mestat P. – *Lois de comportement des géomatériaux et modélisation par la méthode des éléments finis*. LCPC, Série Géotechnique GT52, 1993.
- Mestat P., Prat M. – *Ouvrages en interactions*. Paris, Hermès, 1999, 934 p.
- Omraci – « Étude de la stabilité des décharges de latérites de la Nouvelle-Calédonie (application au cas de la décharge Mont-Jardin) ». Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, 1996.
- Potts D.M., Kovacevic N., Vaughan P.R. – « Delayed collapse of cut slopes in stiff clay ». *Géotechnique*, vol. 47, n° 5, 1987, p. 953-982.
- Rahman Hamidur – « Slope stability of the heterogeneous coastal cliff by finite element method (FEM) ». Proceedings of the VII International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, p. 1339-1344.
- Sassi Khalida – « Contribution à l'étude des mécanismes de déformation des pentes instables ». Thèse de doctorat INSA Lyon, 1996.
- Silvestri V., Tabib C. – « Exact determination of gravity stresses in finite elastic slopes : Part I Theoretical considerations ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 20, 1983, p. 47-60.
- Snitbhan N., Chen W.-F. – « Elastic-Plastic large deformation analysis of soil slopes ». *Computers and Structures*, New York, Pergamon, vol. 9, 1978, p. 567-577.
- Song Won K. – « Modélisation de la rupture progressive de pentes instables contrôlée par infiltration d'eau. Application au glissement de Vadoncello (Italie) ». Thèse de doctorat École des Mines de Paris, 1996.
- Ugai K., Wakai A., Ida H. – « Static and dynamic analyses of slopes by 3D elasto-plastic FEM ». Proceedings of the VII International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, p. 1413-1417.
- Verdugo R., Gutierrez M. – « A material model to evaluate the seismic stability of slopes on liquefiable soils ». Proceedings of the VII International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, 17-21 June 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, p. 1427-1432.
- Wong Felix S. – « Uncertainties in FE Modelling of Slope Stability ». *Computers and Structures*, New York, Pergamon, vol. 19, n° 5/6, 1984, p. 777-791.
- ZSOIL.PC – *User Manual*, Version 3.2. ZACE Services Ltd, Lausanne, Suisse, 1997.

