

STABILITE DES OUVRAGES EN TERRE, DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE MIXTE(NUMERIQUE ET EQUILIBRE LIMITE)

A. KOURDEY, M.M. ALHEIB

Faculté de Génie civil, Alep, Syrie, kourdey@gmail.com

LAEGO-Ecole des Mines, Nancy, France, marwan.alheib@ineris.fr

RÉSUMÉ – La détermination de la surface de glissement d'un talus (barrage, pente naturelle,...) est l'un des problèmes importants et complexes en géotechnique. Nous avons développé un algorithme basé sur des méthodes d'optimisation capable de tracer une surface de glissement optimisée et calculer le facteur de sécurité correspondant. Cet algorithme est implémenté dans le code FLAC^{2D}.

1. Introduction et objectifs

Les méthodes numériques sont relativement récentes par rapport aux méthodes de calcul analytique de stabilité des talus. Ce sont des méthodes basées sur des équations de la mécanique des milieux continus. Les techniques numériques sont utilisées pour obtenir la distribution des contraintes et déformations de talus. Elles sont particulièrement utiles pour l'analyse des conditions de stabilité lorsque le talus est soumis à une variation de chargement ou de géométrie. Cette approche implique que l'on connaît la loi de comportement du milieu étudié et les conditions aux limites du problème.

La méthode d'Equilibre Limite est conçue pour étudier la stabilité de talus, elle tient compte de poids propre du talus et parfois de forces internes induites entre les tranches. Ce mode approximatif devient plus compliqué lors de l'apparition de phénomènes affectant la masse du sol comme l'effet de l'eau, l'effet sismique et celui de la discontinuité, etc.... Pour cela, il est avantageux de combiner deux méthodes : la méthode numérique, pour calculer l'état de contrainte dans le milieu étudié sous l'influence de tous phénomènes qui peuvent avoir lieu, et la méthode d'Equilibre Limite pour tracer la surface critique de rupture et calculer le facteur de sécurité correspondant.

Cette étude n'est pas la première dans ce domaine et les recherches qui ont été réalisées sont nombreuses et variées. On citera, dans un premier temps, les travaux de Martins (1982), Takuo et al. (1988), Thompson (1993) et Stanely (1996) qui ont combiné une méthode numérique (EF/DF) avec la méthode d'Equilibre Limite. En revanche les travaux de Baker (1980), Takuo et Jiang (1996) et Law et al. (1998) utilisent les méthodes d'Equilibre Limite. Certains, comme Ennour et al.(1996) et ITASCA (1996) n'ont pas adopté une surface de rupture bien définie, ils utilisent des indicateurs (zone de cisaillement maximal) pour montrer la surface de glissement. Korini (1999) a préféré garder l'hypothèse d'une surface de rupture circulaire. Le tableau 1 fournit la méthode utilisée ainsi que le type de surface de glissement imposée.

La méthode de calcul de stabilité proposée est de type «méthode numérique en association avec le calcul en équilibre limite». Cette méthode permet d'obtenir l'état de contrainte numériquement et d'améliorer et éviter les inconvénients des méthodes d'Equilibre Limite. La méthode développée utilise facteur de sécurité local variable le long de la surface de rupture.

L'allure de la surface de rupture est déterminée à l'aide des méthodes d'optimisation. Enfin, le facteur global de sécurité est déterminé par la définition de Bishop.

Nous avons adopté le critère de Mohr-Coulomb. Ce critère est le plus utilisé pour étudier la rupture. Les paramètres nécessaires sont l'angle de frottement « φ » et la cohésion « c ». Il est également possible de fournir la résistance à la traction et à la compression.

Il est à noter que l'approche adoptée est une approche statique. Elle est basée sur une procédure de minimisation de facteur de sécurité global.

Tableau 1. Méthodes numériques associées aux méthodes d'équilibre limite

Auteur	Méthode utilisée	Type de surface adoptée
Baker (1980)	Spencer	non prédéfinie
Martins (1981)	EF	non prédéfinie
Takuo (1988)	EF	non prédéfinie
Thompson (1993)	DF	pas de surface
Ennour (1996)	EF	pas de surface
ITASCA (1996)	DF	pas de surface
Stanely (1996)	EF	non prédéfinie
Takuo (1996)	Janbu	non prédéfinie
Chen & Morgenstern (1998)	Morgenstern & Price	non circulaire
Korini (1999)	EF	circulaire

2. Calcul de facteur local de sécurité

Pour calculer le facteur de sécurité local, nous considérons un élément carré d'unité ($dx = dy = 1$) exposé aux contraintes principale σ_1 et σ_3 appliquées aux côtés de l'élément (figure 1). Comme l'élément est assez petit, on peut admettre que le plan de rupture soit une ligne droite. L'inclinaison du plan de rupture est définie par l'angle θ . La rupture est due à la contrainte de cisaillement développée à la surface de rupture. A partir des équations d'équilibre, le facteur de sécurité peut être déterminé en fonction de σ_1 et σ_3 :

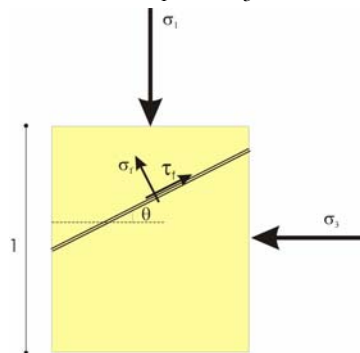


Figure 2. Plan de rupture dans un élément d'unité

$$FS = \frac{c + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\theta\right) \cdot \tan \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\theta} \tag{1}$$

Le plan de rupture (en adoptant le critère de Mohr-Coulomb) s'incline par un angle égale à $\pi/4 + \varphi/2$ par rapport à la direction principale σ_3 , nous trouvons alors:

$$FS = \frac{[c / \tan \varphi + 0.5 \times (\sigma_1 + \sigma_3) - 0.5 \times (\sigma_1 - \sigma_3) \times \sin \varphi] \tan \varphi}{0.5 \times (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi} \tag{2}$$

Le plan ayant le facteur de sécurité minimal pour un état de contrainte, est obtenu en dérivant l'équation (1) par rapport à θ , nous obtenons alors :

$$\theta_{op} = \frac{\pi}{2} - 0.5 \cdot \text{arc cot} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sec \varphi (2c \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi) \tan \varphi}{2\sqrt{(c + \sigma_1 \tan \varphi)(c + \sigma_3 \tan \varphi)} \sqrt{(2c + (\sigma_1 + \sigma_3) \tan \varphi)^2}} \right] \tag{3}$$

On remarque que l'angle est en fonction de la cohésion, de l'angle de frottement, de l'état de contrainte régnant dans le milieu.

3. Facteur global de sécurité

Nous adoptons le calcul du facteur global de sécurité comme le ratio de la somme des résistances au cisaillement disponibles à la somme des résistances au cisaillement mobilisées¹ (définition de Bishop) :

$$FS_{global} = \frac{\sum \tau_d}{\sum \tau_m}$$

4. Forme de surface de rupture

La morphologie particulière de certains sites présentant des zones de faiblesse mécanique conduit à des surfaces de glissement non circulaires, ni planes. Généralement, on s'attend à ce qu'une telle surface soit formée suivant une « ligne de la résistance minimum ». La surface circulaire n'est pas toujours la surface la plus pessimiste. Par exemple, pour le cas particulier du sol purement cohérent et pour un angle de talus > 60°, la surface de glissement parabolique et la surface en forme de spirale logarithmique fournissent des résultats nettement plus pessimistes.

Egalement, les exemples traités de remblais de Narbonne et de Lanester (Raulin et al., 1973) montrent que l'hypothèse de la rupture circulaire peut conduire à une surévaluation non négligeable du facteur de sécurité.

Il est donc clair que le choix a priori de la forme de la surface de glissement représente une hypothèse qui n'est pas de côté de la sécurité. Par conséquent, la forme de la surface critique de glissement devrait être le résultat plutôt que la donnée de l'analyse. La surface recherchée à l'aide des méthodes numériques obéit à certaines caractéristiques obligatoires pour qu'elle soit acceptée :

Continuité de la surface : c'est-à-dire qu'on ne peut pas passer d'un élément i à un élément $i+2$ sans passer par l'élément $i+1$;

Etat critique de la surface: cela signifie que la surface est caractérisée par un facteur minimal de sécurité. Pour cela, il faut respecter impérativement la logique propre à chaque méthode proposée;

Mouvement par glissement : qui contient des éléments ayant tendance à glisser. En d'autre terme, le vecteur de déplacement de l'élément doit être orienté vers le sens du mouvement prévu et tangent à la surface (cinématiquement admissible).

Nous sommes donc en face d'un problème d'optimisation. Pour cela, nous avons proposé d'adopter la méthode de programmation dynamique pour le résoudre ce problème.

4.1. La programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation des systèmes ou de leur représentation mathématique, qui satisfait au principe d'optimalité de Bellman (1955 in Roseaux 1991) : *une sous-trajectoire d'une trajectoire optimale est elle-même optimale pour la fonction d'objectif restreinte aux trajectoires ayant pour origine celle de cette sous-trajectoire* (Sakarovitch, 1984).

Pour faire adapter cette méthode aux problèmes résolus par les méthodes numériques, on respecte certaines conditions pour qu'elle soit valide et applicable à la recherche de la surface de rupture d'un talus. Il est obligatoire de:

-Passer par un seul point (élément) dans chaque étape ;

¹ Cette définition est valable pour des maillages régulières (les dimensions des mailles égales), sinon l'expression doit tenir compte soit des forces soit des dimensions des éléments.

- Examiner toutes les étapes ;
- Ne pas reculer à une étape précédente.

4.2 Présentation de la méthode de D.F (FLAC^{2D})

FLAC est un programme en deux ou trois dimensions basé sur la méthode des différences finies. Il utilise une méthode explicite. Ce programme simule le comportement des structures constituées de sol, de roche ou d'autres matériaux. Les matériaux sont représentés par des éléments, ou des zones, qui forment un maillage ajusté par l'utilisateur pour bien correspondre à la forme de l'objet à modéliser.

5. Algorithme développé « STDF »

L'algorithme STDF (Stabilité des Talus par la méthode de Différences Finies) permet de réaliser un calcul automatique concernant la stabilité des talus. Sa conception repose sur trois objectifs principaux :

- introduire de manière simple les paramètres de calcul : à savoir le point de départ de la surface de glissement « i_d, j_d » et le niveau de recherche souhaité pour obtenir une surface optimisée « n »;
- visualiser graphiquement les facteurs locaux de sécurité ;
- calculer le facteur de sécurité global et le profil de surface de rupture correspondant.

Le programme est écrit avec un langage de programmation associé au programme FLAC^{2D}. Les données sont les résultats de la modélisation réalisée par FLAC; correspondants aux contraintes trouvées en tous points du maillage, nous exécutons ce programme d'analyse de stabilité.

L'organigramme illustré par la figure (2) montre la structure du programme développé et les différentes étapes de calcul. Nous pouvons distinguer trois étapes principales :

- Choix du plan critique (ou choix de la définition du facteur de sécurité local) ;
- Choix de la forme de la surface de rupture;
- Choix de la définition du facteur de sécurité global.

6. Application

La validation du développement est réalisée sur le cas de barrage Mondely. Deux types de modélisation ont été effectués : Une modélisation basée sur la méthode de l'Equilibre Limite utilisant les principes des corps rigides (méthode de Bishop simplifiée) et l'approche mixte développé ici.

L'analyse concerne la surface de rupture et la valeur de coefficient de sécurité. A travers les multiples calculs réalisés, nous avons montré les valeurs du FS obtenues par de l'approche « Surface de rupture recherchée » pour une analyse de la stabilité du talus et essayé d'encadrer la valeur du facteur de sécurité.

Les étapes suivies, de la modélisation pour calculer la stabilité sont :

- Etape I : Initialisation des contraintes dans l'assise « phase de consolidation » ; ce calcul préliminaire permet l'obtention d'un état de contrainte initial dans l'assise ;
- Etape II : simulation de la construction du barrage de Mondely. Ce calcul permet d'obtenir les contraintes et déplacement finaux existant dans l'ouvrage ;
- Etape III : Lancement de fichier *STDF.txt* pour l'analyse de stabilité de l'ouvrage en question. On obtient ainsi la valeur du facteur de sécurité et la surface de rupture correspondante ;

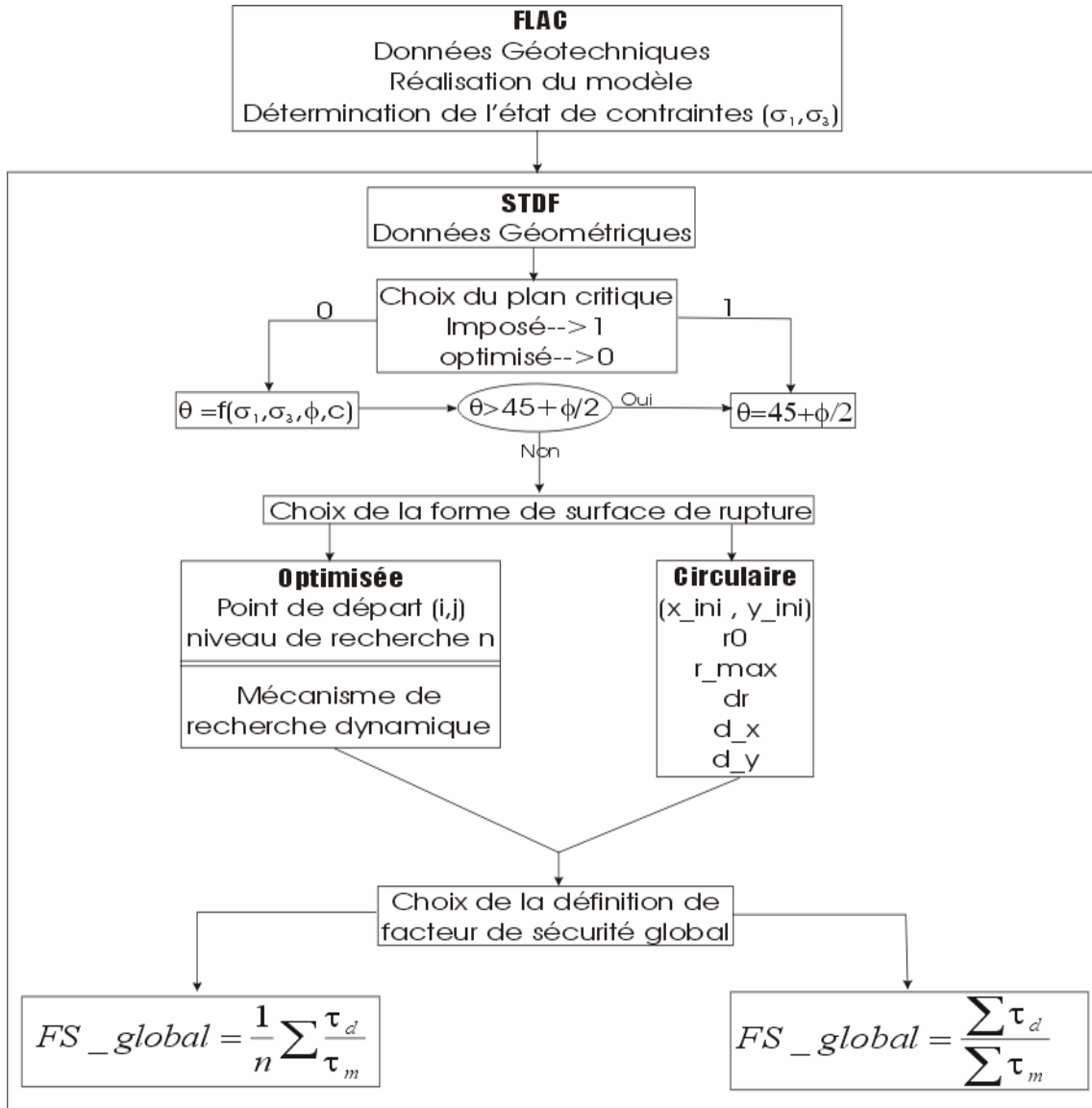


Figure 2. Organigramme du programme STDF d'analyse de stabilité implanté dans le code FLAC2D

6.1. Description

Le barrage de Mondely (Ariège) réalisé par le Syndicat Mixte d'Aménagement Hydraulique de la Lèze en 1981 (figure 3), est un ouvrage homogène en matériaux argileux humides dont les principales caractéristiques sont les suivantes (Fry et al., 1999):

- Hauteur du remblai : 24m ;
- Profil du talus amont : pente de 1/3 avec risberme de 5m (à 2 H/3) ;
- Profil du talus aval : pente de 1/2.5 sans risberme ;
- Nature des fondations : grès et marnes du Crétacé ;
- Capacité de la retenue : 4 millions de m³.

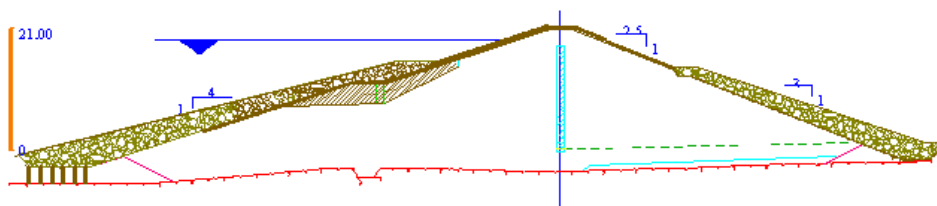


Figure 6. Barrage de Mondely

6.2. Modélisation

La modélisation réalisée à l'aide du code FLAC^{2D} est couplé hydromécanique.

On a modélisé ce cas en deux dimensions à l'aide du code FLAC en prenant en compte les considérations suivantes :

- Le comportement mécanique des matériaux du barrage suit le critère du Mohr-Coulomb ;
- Déformation plane ;
- Ecoulement plan.

Les deux dernières hypothèses supposent que le barrage a une longueur infinie selon la troisième dimension ce qui revient à négliger la courbure des lignes de courant suivant cette direction. On a donc les mêmes réseaux d'écoulement pour chaque profil parallèle à la troisième dimension. On a deux drains : un horizontal et l'autre vertical.

Le maillage utilisé pour les calculs est présenté sur la figure (4). Il possède les caractéristiques numériques résumées dans le tableau (2).

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques et hydrauliques du barrage de Mondely

Matériaux			Argile			Drain
caractéristiques	nom	unité	A	B	C	D
Poids spécifique de grains	G	kN/m ³	27.3	27.3		-
Module de Young	E	MPa	8	5		80
Coefficient de Poisson	ν		0.3	0.3		0.3
Angle de frottement	ϕ'	°	32	26		36
Cohésion effective	C'	kPa	10	18		0
Angle de dilatance	ψ	°	5	5		5
Perméabilité verticale	K _v	m/s	4*10 ⁻⁹	1*10 ⁻⁹		1*10 ⁻³
Perméabilité horizontale	K _h	m/s	16*10 ⁻⁹	4*10 ⁻⁹		1*10 ⁻³

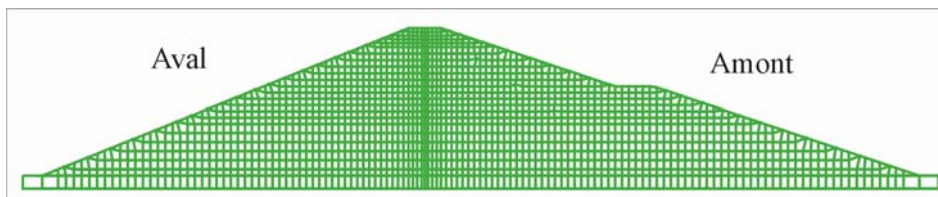


Figure 4. Maillage adopté pour le modèle.

L'analyse des résultats de calcul montre que les facteurs de sécurité calculés par la méthode de Bishop sont au-dessus de la limite fixée pour le dimensionnement du barrage. Cela signifie que le risque de rupture par glissement circulaire dans le barrage est faible. Ceci est donné par la surface circulaire C1 (FS=1.4)

La valeur minimale du facteur de sécurité, obtenue par la méthode de Différences Finies, est de 1.39 pour la surface C2.

La figure 5 montre la bande de cisaillement qui traverse le barrage au moment de son état critique (présentation réalisée par FLAC). La valeur du facteur de sécurité est égale, dans ce cas, à 1.39.

Nous avons cherché à l'aide *STDF*, après la stabilisation du calcul FLAC^{2D}, pour vérifier la stabilité du barrage. Les résultats montrent que la surface OP est la surface de glissement la plus critique caractérisée par un facteur de sécurité de 1.34. Le mécanisme de rupture du barrage pour la surface OP est illustré sur la figure (6).

Nous avons également déterminé la surface de glissement passant par la bande de cisaillement, la figure (7) montre l'allure de cette surface. La valeur de facteur de sécurité correspondant est égale à 1.43.

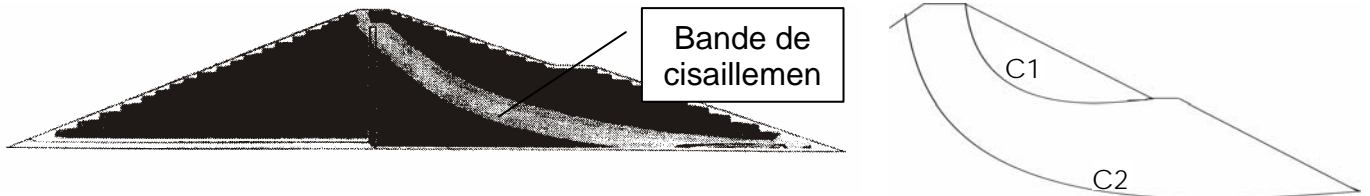


Figure 5. Surface de glissement trouvée par la méthode de Différences Finies et la méthode de Bishop (Fry et al., 1999)



Figure 6. Surface de rupture recherchée « OP ».

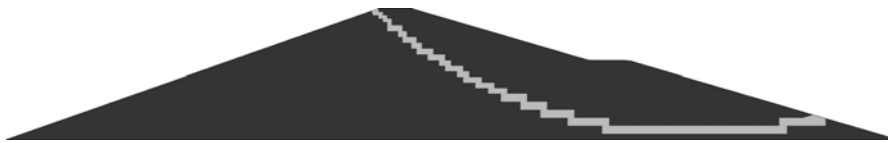


Figure 7. Surface de glissement passant par la bande de cisaillement

La faible différence entre les résultats des méthodes utilisées est due aux hypothèses propres à chaque méthode pour calculer les valeurs de contraintes et pressions interstitielles.

Les calculs effectués dans cette étude sur le cas du barrage de Mondely n'ont pas montré un écart important entre les différentes approches utilisées (<7%). Le facteur de sécurité le plus faible est supérieur à 1.3.

7. Conclusion

La méthode d'équilibre limite permet d'analyser les ouvrages à géométrie simple quand la surface de rupture est circulaire ou presque circulaire. Elle estime la valeur du facteur de sécurité avec une assez bonne précision. En revanche, elle est moins appropriée à une géométrie plus complexe correspondant à une surface de rupture non circulaire.

La méthode développée apporte des informations sur le développement de la rupture et le comportement du talus. Elle localise les zones de concentration de contraintes et de déformations plastiques et ceci à travers le graphique de facteurs locaux de sécurité qui peut aider à expliquer le meilleur mécanisme de support pour le talus.

Nous avons intégré l'algorithme développé dans le code FLAC^{2D}, basé sur la méthode des différences finies. FLAC comprend un langage de programmation associé dit «FICH» permettant d'introduire des phénomènes complexes. Le programme développé, appelé STDF pourrait faire partie intégrale d'une étude de stabilité de pente. Il permet de réaliser le calcul pour une surface de glissement circulaire ou de rechercher cette surface selon les valeurs des facteurs de sécurité locaux. Des outils graphiques sont disponibles pour faciliter l'interprétation et la visualisation des résultats.

Le cas du barrage de Mondely était la cible de plusieurs recherches pour l'étude de stabilité. Aucune des méthodes appliquées n'a permis d'expliquer la rupture intervenue.

8. Références bibliographiques

- Baker R. (1980) Determination of the critical slip surface in slope stability computations, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol.4 (1980), 333-359.
- Davis E. H. & Booker J. R. (1973) The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clay, Geotechnique 23, N°4, 557-563.

- Ennour S., Piguët J.-P. & Al heib M. (1996) Nouvelle démarche de conception des décharges de latérites dans les exploitations de minerai de nickel en nouvelle Calédonie, Rapport LAEGO- Ecole des Mines.
- Fry J. J. & Brunet C. (1999) Comparaison of classical and elasto-plastics methods for the evaluation of safety factor against failure of an embankment dam, Documents de EDF, Centre National d'Equipement Hydraulique, 1-13.
- ITASCA Consulting Groupe (1998) FLAC Version 3.4, Manuel d'utilisation.
- Korini T. (1999) Slope stability analysis using FESSTA, 8th International Symposium on Mine planning and Equipment Selection, June 15-18 1999, Dniepropetrovsk, Ukraine, 239-245.
- Kourdey A. (2002) Une approche mixte (numérique/équilibre limite) pour le calcul de stabilité des ouvrages en terre « Développement et application aux talus et barrages », Mémoire de thèse au LAEGO à l'école des mines de Nancy, pp.162.
- Law B. K. & Gilbert R. B. & Wright S. G. (1998) Slope Reliability analysis using generalized method of slices, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering/ April, 350-362.
- Martins J. B. (1982) Embankment and slopes by mathematical programming, Numerical Methods in Geomechanics, Reidel Publishing Company, 305-334.
- Raulin P., Rouquès G. & Touboul A. (1973) Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire, Rapport de recherche LPC n°36.
- Roseaux (1991) Exercices et problèmes résolus de recherche opérationnelle « tome 1 », 3^e tirage, Edition MASSON.
- Sakarovitch M. (1984) Optimisation combinatoire «Graphes et programmation linéaire», Edition HERMANN.
- Stanley Z. H. (1996) Analyzing of two dimensional slope and foundation problems considering soil-structure interaction effet, ASCE Congress for Computing in Civil Engineering , Anaheim June 20, 832-837.
- Takuo Y. & Yasuhiro U. (1988) Search for critical slip lines in finite element stress fields by dynamic programming, Numerical Methods in Geomechanics, Edition Swoboda, 1374-1352.
- Thompson R. J. (1993) The location of critical slip surfaces in slope-stability problems, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 93, no.4, Apr.1993, 85-95.
- Thompson R. J. (1993) Determination of the critical slip surface location from finite difference slope models, Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Editions Anagnostopoulos et al.,1191-1197.
- Takuo Y. & Jiang J.- C. (1996) A generalized method for determining the critical slip surface in three-dimensional slope stability analysis, Landslides, Editions Senneset, 1433-1438.