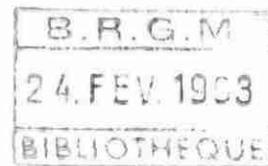




**Direction Régionale de l'Industrie,
de la Recherche et de l'Environnement d'Alsace**

document non public

**Géotechnique appliquée à la sécurité
des exploitations à ciel ouvert
en terrains alluvionnaires**



**Février 1993
R 36818**



**Direction Régionale de l'Industrie,
de la Recherche et de l'Environnement d'Alsace**

1, rue Pierre Montet
67082 Strasbourg Cédex

document non public

Géotechnique appliquée à la sécurité des exploitations à ciel ouvert en terrains alluvionnaires

L. Closset
F. Wojtkowiak

Février 1993
R 36818

BRGM
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Direction de l'Ingénierie géotechnique
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - FRANCE - Tél : (33) 38.63.34.34

RESUME

Ce document a été rédigé à la demande de la DRIRE Alsace et à l'usage de son personnel chargé du suivi et du contrôle des exploitations à ciel ouvert de matériaux alluvionnaires.

Il attire particulièrement l'attention du lecteur sur les différents facteurs qui influencent l'état de stabilité des talus de telles exploitations et présente brièvement les différentes méthodes de calcul et d'analyse dont dispose le géotechnicien pour évaluer et garantir la sécurité du personnel et du matériel d'extraction vis à vis des risques de rupture des talus pendant l'exploitation et après l'abandon des travaux. Enfin, la dernière partie de ce rapport est consacrée à la surveillance de la stabilité des talus à l'aide de divers dispositifs de mesure dont les principes et méthodes sont également décrits.

SOMMAIRE

	Page
RESUME	1
1. INTRODUCTION	4
2. METHODES DE CALCUL ET D'ANALYSE DE LA STABILITE DES PENTES DE TALUS	5
2.1. DEFINITION DU COEFFICIENT DE SECURITE	5
2.2. CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE	5
2.3. METHODES DE CALCUL ET D'ANALYSE DE STABILITE	6
2.3.1. Méthode des tranches	7
2.3.2. Les abaques	10
2.3.3. Modélisation numérique du comportement global	13
3. LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENCANT LA STABILITE DES PENTES	14
3.1. HAUTEUR DE LA PENTE	15
3.2. GEOMETRIE DU FLANC DE CARRIERE	15
3.3. INFLUENCE DE L'EAU	18
3.3.1. Phénomènes statiques	18
3.3.2. Phénomènes dynamiques	19
3.3.3. Comment limiter l'influence de l'eau sur la stabilité des pentes ?	22
3.4. NATURE DES TERRAINS	25
3.4.1. Lithologie et structure	25
3.4.2. Caractéristiques géotechniques	25
3.5. PHASES ET METHODES D'EXPLOITATION	28

	Page
4. SURVEILLANCE DES PENTES	29
4.1. LES DIFFERENTS TYPES D'APPAREILS DE MESURE	29
4.1.1. Les mesures de déplacement	29
4.1.2. Les mesures de pression	32
4.2. DEFINITION ET IMPLANTATION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE	32
4.2.1. Surveillance visuelle	32
4.2.2. Nombre et localisation des différents dispositifs de mesure	33
4.2.3. Fréquence des mesures	33
4.2.4. Interprétation des résultats d'auscultation	33
5. CONCLUSIONS	34
6. BIBLIOGRAPHIE	35

1. INTRODUCTION

La stabilité des pentes, talus et berges dans une exploitation à ciel ouvert est un facteur très important non seulement vis-à-vis de la sécurité du personnel et du matériel oeuvrant dans cette carrière mais aussi de la productivité et donc de la rentabilité de l'exploitation. Les exploitants de matériaux alluvionnaires, même lorsque les exploitations sont de petite taille, doivent également veiller à assurer cette stabilité à long terme.

Le présent document a été établi à la demande de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement d'Alsace et est destiné à être consulté par le personnel de l'administration chargé du suivi et du contrôle des exploitations de matériaux alluvionnaires.

En premier lieu, il passe en revue les méthodes simples de calcul et d'analyse de stabilité des talus tout en permettant au lecteur de procéder à de telles analyses au stade de l'avant-projet. Il donne aussi les principes de résolution des méthodes plus complexes utilisées couramment par les géotechniciens comme la méthode de calcul par tranches et la modélisation numérique par éléments finis. Nous mettons cependant le lecteur en garde sur le fait que les principes et méthodes de calcul présentés ici ne suffisent pas à concevoir des talus. Ce manuel ne peut en aucun cas se substituer à une étude géotechnique.

Il met ensuite l'accent sur les différents facteurs qui influencent l'état de stabilité des exploitations de sables et graviers tels que la hauteur des talus, la nature des terrains, l'eau souterraine, les méthodes d'exploitation.

Pour conclure, sont brièvement présentés les dispositifs permettant la surveillance de la stabilité, ainsi que leur mise en place, et les stratégies de surveillance à mettre en oeuvre en fonction des risques encourus vis à vis de la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement.

Pour illustrer ce rapport, nous avons joint quelques figures tirées de trois communications présentées par le BRGM respectivement à un symposium international consacré à la sécurité et à la salubrité dans les mines et carrières (B. Feuga et F. Wojtkowiak, 1987), organisé par la Commission des Communautés Européennes à Luxembourg en 1986, et à deux congrès de la Société de l'Industrie Minérale qui se sont déroulés à Marrakech au Maroc en 1987 (F. Wojtkowiak, 1988) et à Poitiers en 1991 (M. Vandenbeusch et F. Wojtkowiak, 1992). Le lecteur trouvera dans ces articles des informations générales sur les méthodes d'études et de surveillance des mines et carrières à ciel ouvert, ainsi que des exemples issus d'études de cas qui illustrent et complètent les principaux points abordés dans le présent document que nous avons volontairement cantonné au cas des gravières et sablières, conformément à la demande de la DRIRE Alsace.

2. METHODES DE CALCUL ET D'ANALYSE DE LA STABILITE DES PENTES DE TALUS

2.1. DEFINITION DU COEFFICIENT DE SECURITE

Avant d'illustrer l'influence des différents facteurs qui conditionnent l'état de stabilité d'une pente, il convient de définir le coefficient de sécurité d'un talus vis-à-vis de la rupture.

L'évaluation de l'état de stabilité d'une pente se fait à partir d'un coefficient de sécurité local ou global, respectivement noté f et F , et défini comme étant le rapport des forces qui tendent à retenir un certain volume de matériau, délimité par le talus et une surface de rupture potentielle, sur celles qui tendent à l'entraîner vers l'aval. Tant que la force motrice reste inférieure à la résistance maximale que peut mobiliser le sol, F est supérieur à 1 et la pente est stable. Dans le cas contraire, F est inférieur à 1 et la pente ne peut que glisser. La valeur $F = 1$ correspond à l'état d'équilibre limite du talus.

2.2. CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE

Ce calcul suppose entre autres, l'évaluation des forces qui tendent à s'opposer à la rupture et qui sont donc mobilisables au sein du massif de sol.

Pour les sols, la majorité des méthodes de calcul s'appuie sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb qui s'exprime de la manière suivante :

$$\tau_{\max} = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

τ_{\max} est la résistance au cisaillement maximale mobilisable du sol et c' et φ' la cohésion et l'angle de frottement de ce sol en contraintes effectives.

Pour les sables et graviers alluvionnaires, la précédente formulation se réduit pratiquement à

$$\tau_{\max} = \sigma' \tan \varphi'$$

puisque la cohésion des sables et graviers plus ou moins propres peut-être considérée comme nulle dans les calculs de stabilité à long terme.

Toutefois, remarquons que la notion de coefficient de sécurité s'applique à un très grand nombre de calculs et peut suivant le champ d'application avoir des sens totalement différents. Par exemple, si on considère un point donné dans un massif et une direction donnée, on peut toujours définir un coefficient de sécurité local tel que :

$$f_{i,\bar{x}} = \frac{\tau_{i,x}}{\tau_{\max}} = \frac{\tau}{c' + \sigma'_{i,x} \tan \varphi'}$$

où $\tau_{i,\bar{x}}$ et $\sigma'_{i,\bar{x}}$ représentent respectivement les contraintes tangentielle et normale à la direction \bar{x} au point i du massif et sont donc des fonctions qui dépendent à la fois de la localisation du point i et de la direction \bar{x} de la facette considérée. On peut aussi définir :

$$f_i = \min_{\bar{x}} (f_{i,\bar{x}})$$

f_i étant alors le coefficient de sécurité local au point i , indépendamment de sa direction.

Par extension, on peut définir des facteurs de sécurité partiels, définissant les rapports entre certaines grandeurs de paramètres mesurés et les grandeurs utilisées pour l'analyse de stabilité. Par exemple, dans le cas de la conception d'un talus dans un sol ayant une cohésion c'_1 et un angle de frottement φ'_1 , on peut calculer les coefficients de sécurité partiels suivants :

$$F_c = \frac{c'_1}{c'_2} \quad \text{et} \quad F_\varphi = \frac{\tan \varphi'_1}{\tan \varphi'_2}$$

les grandeurs c'_2 et φ'_2 étant les paramètres caractérisant l'effet déstabilisant la pente. On a d'ailleurs intérêt à considérer ces facteurs de sécurité partiels plutôt comme des facteurs d'incertitude et de les choisir en considérant la confiance sur les données expérimentales.

Comme on le voit, la notion de coefficient de sécurité est relativement abstraite et doit donc être bien définie. Par exemple, le fait d'avoir dans un massif certaines zones où les facteurs de sécurité locaux sont inférieurs à 1, n'entraîne pas forcément la ruine de l'ouvrage. Par contre, lorsque les facteurs de sécurité globaux sont inférieurs à 1, la pente est instable et ne peut que glisser alors que des facteurs de sécurité globaux supérieurs à 1 en traduisent la stabilité et ce, quelle que soit la méthode d'analyse choisie. Cependant, le facteur de sécurité obtenu n'est pas forcément indépendant de la méthode de calcul utilisée. De nombreux auteurs signalent par exemple, dans le cas de calculs à l'état limite de rupture (méthode décrite par la suite), des écarts de 5 à 10 % sur les facteurs de sécurité globaux obtenus sur les mêmes ouvrages, en utilisant des méthodes de calcul différentes (Fry *et al.*, 1992, Charles *et al.*, 1984).

2.3. METHODES DE CALCUL ET D'ANALYSE DE STABILITE

Le calcul du coefficient de sécurité global d'un talus de forme géométrique simple (fig. 1), d'angle de pente β , constitué d'un matériau homogène dont l'angle de frottement est φ' , peut être défini, en l'absence d'une nappe phréatique, par la formule suivante :

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

Ceci nous indique bien que pour les matériaux alluvionnaires, la pente maximale à long terme d'un talus est bien égale à leur angle de frottement interne. Ce calcul simple n'est cependant applicable que pour une géométrie très simple et est en pratique rarement utilisé. Pour résoudre les cas de talus hétérogènes, les problèmes liés à la présence d'eau, de surcharges..., les méthodes de calcul à la rupture ont été développées.

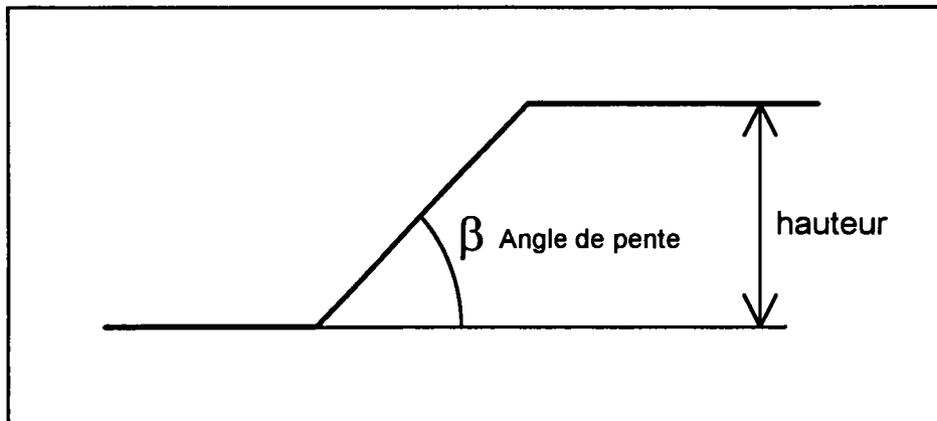


Figure 1 - Paramètres géométriques d'un talus

2.3.1. Méthode des tranches

L'observation des instabilités survenues dans le passé a montré que dans le cas des sols homogènes ou quasi-homogènes, le profil de la surface de rupture était généralement de forme circulaire comme indiqué sur la figure 2. Les méthodes classiquement utilisées se sont basées sur cette particularité pour calculer les forces résistantes au mouvement d'un volume de sol délimité par la surface topographique et la surface de rupture potentielle assimilée à un arc de cercle. Elles se sont ensuite étendues pour certaines d'entre elles à des surfaces de forme géométrique quelconque. Ces méthodes définissent le facteur de sécurité au cisaillement le long de cette ligne de rupture et font donc partie des méthodes de calcul à la rupture. Elles s'appliquent généralement à une section du talus et supposent que celui-ci est de longueur infinie par rapport à sa hauteur. Mais en général, elles sont valables pour la section centrale si la longueur est au moins égale à deux ou à trois fois la hauteur. Ce sont donc des méthodes bidimensionnelles.

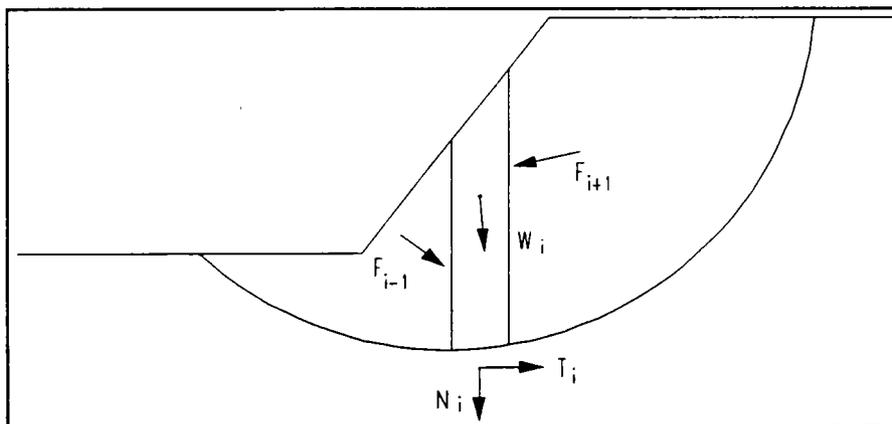


Figure 2 - Méthode des tranches

Si nous supposons une surface de rupture potentielle quelconque dont l'équation dans un repère orthonormé est :

$$y = f(x)$$

cette ligne découpe le massif en deux parties. Découpons maintenant la partie supérieure, dont nous voulons étudier la stabilité, en n tranches d'épaisseur constante. La stabilité de chaque tranche peut être étudiée par les équations de la statique. Chaque tranche de sol est soumise à diverses forces, que nous indiquerons par i représentant le numéro de la tranche considérée et qui varie donc de 1 à n :

- **Les forces volumiques** dont la composante majeure est généralement le poids de la tranche et dont la résultante est représentée par un vecteur \vec{W}_i , s'appliquant au centre de gravité de la tranche. Dans certains cas, on considère d'autres forces volumiques comme celles dues à un gradient de pression d'eau ou à une accélération horizontale dans le cas de séismes.
- **Les forces normales au pied de la tranche** et notées \vec{N}_i , qui représentent la composante normale de l'action du massif sous-jacent.
- **Les forces tangentielles au pied de la tranche** notées \vec{T}_i , qui représentent la composante tangentielle de l'action du massif sous-jacent.
- **Les forces inter-tranches**, notées \vec{F}_{i-1} et \vec{F}_{i+1} , qui représentent les interactions des tranches les unes par rapport aux autres.

Les équations de la statique permettent d'écrire pour chaque tranche l'équilibre des forces et des moments par rapport à un point donné.

$$\vec{W}_i + \vec{N}_i + \vec{T}_i + \vec{F}_{i+1} + \vec{F}_{i-1} = 0$$

Ce qui permet pour chaque tranche d'écrire trois équations d'équilibre.

De plus, toutes ces méthodes supposent que la largeur des tranches est suffisamment petite pour qu'on puisse supposer que les contraintes normales et tangentielles le long du pied de la tranche sont des constantes, ce qui permet d'écrire:

$$\sigma = \frac{N_i}{S_i} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{T_i}{S_i}$$

S_i représentant la surface du pied de la tranche. En utilisant un critère de résistance, on peut également définir la contrainte de cisaillement maximale pouvant être supportée par le sol. Par exemple le critère de rupture de Mohr-Coulomb permet d'écrire:

$$\tau_{\max} = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

Le facteur de sécurité local f_i pour une tranche peut alors être défini par la relation suivante :

$$f_i = \frac{\tau}{\tau_{\max}}$$

Le système d'équations ainsi formé ne peut être résolu directement. Il comprend plus d'inconnues que d'équations. Pour permettre la résolution de ce système, deux hypothèses supplémentaires sont donc nécessaires.

La première, qui est commune à toutes les méthodes de calcul à la rupture, suppose que les **facteurs de sécurité locaux f_i sont tous égaux et notés F**, et est contraire au concept de rupture progressive.

La seconde hypothèse varie suivant le type de méthode utilisée. Elle peut être scindée en trois grandes classes :

- Les hypothèses sur la grandeur des forces inter-tranches (Bishop, Felenius, Morgenstern et Price);
- Les hypothèses sur la ligne d'action des forces inter-tranches (Janbu);
- Les hypothèses sur la variation de la contrainte normale le long de la ligne de rupture potentielle (méthode des perturbations).

Nous recommandons au lecteur qui désirerait approfondir ces concepts l'excellent rapport de Raulin, Rouqués et Toubol (1974), qui présente en détail toutes ces méthodes.

Ces hypothèses permettent donc de résoudre le système d'équations et d'obtenir le facteur de sécurité global F pour chacune des surfaces de rupture considérées. Toutes les méthodes ci-dessus considèrent en général que la surface de rupture est circulaire et certains auteurs affirment qu'elles ne sont valides que pour ce cas (à l'exception de la méthode des perturbations). L'obtention d'un facteur de sécurité minimal associé à une configuration de talus donnée nécessite le calcul de facteurs de sécurité globaux associés à un grand nombre de cercles de rupture potentiels. L'état de stabilité de la pente est défini par la plus petite valeur de F trouvée. Il n'existe pas de réglementation actuelle définissant un facteur de sécurité minimum suivant le type d'ouvrage. En général, l'utilisation d'un facteur de sécurité de 1,5 pour la conception de talus à partir de méthodes de calcul à l'état limite de rupture est de pratique courante en génie civil. Dans l'industrie extractive, les exploitants de carrières à ciel ouvert sont amenés, pour des raisons économiques évidentes, à travailler avec des angles de pente de talus les plus raides possibles, proches de l'état d'équilibre limite ($F = 1$). Ainsi, il n'est pas rare que les coefficients de sécurité globaux retenus soient égaux à 1,2 ou 1,3 pour les talus définitifs, voire 1,1 pour les talus provisoires. Rappelons cependant que suivant les méthodes utilisées, les facteurs de sécurité obtenus peuvent varier sensiblement, de l'ordre de 5 à 10 %.

Bien que d'un usage moins répandu, ces méthodes permettent d'utiliser d'autres critères de rupture que le critère de Mohr-Coulomb. Citons notamment les travaux de Charles et Soares ou de Fry et Vezeau sur les talus constitués de matériaux d'engrènement.

2.3.2. Les abaques

La mise en oeuvre de la méthode des tranches et des méthodes dérivées nécessite l'utilisation de l'informatique pour permettre la résolution rapide des systèmes d'équations pour un nombre important de surfaces de rupture potentielles. De nombreux programmes de calcul utilisant ces méthodes, sont disponibles sur le marché et permettent la résolution de cas complexes de talus hétérogènes, avec ou sans renforcement, et en considérant des régimes hydrauliques variés. Le maniement de ces logiciels suppose des connaissances de base et une expérience solide en géotechnique. Pour les cas les plus simples, les solutions obtenues ont été portées sous forme d'abaques qui permettent ainsi l'obtention rapide de facteurs de sécurité. Il faut cependant toujours les utiliser avec beaucoup de précautions et n'appliquer leurs résultats qu'après avoir soigneusement vérifié qu'on se trouve bien dans le domaine de validité de ces abaques.

- Les abaques de Taylor-Biarez

Les abaques de Taylor ou de Taylor-Biarez permettent la définition du facteur de sécurité pour des talus et remblais constitués de sols granulaires dont la résistance est définie par les caractéristiques de cisaillement c' et ϕ' . La présence d'une nappe phréatique n'est pas envisagée. Pour les sols non cohésifs, ces abaques donnent les résultats définis par la formule du paragraphe 2.3

- Les abaques de Bishop-Morgenstern

Les abaques de Bishop-Morgenstern ont été établies pour permettre le calcul du facteur de sécurité d'un talus (et donc lié au cercle de rupture le plus critique) pour un sol homogène, peu ou faiblement cohésif mais soumis à un régime hydraulique défini. Ce dernier est défini par le paramètre r_u donné par la formule ci-dessous :

$$r_u = \frac{u}{\gamma h}$$

On suppose aussi que ce rapport reste constant sur toute la section de la pente. Cette hypothèse est fortement restrictive car r_u n'est constant que si la surface piézométrique est confondue avec l'enveloppe du talus. Dans ce cas, si l'on considère la nappe au repos (pas d'écoulement), r_u est égal au rapport entre le poids volumique de l'eau et le poids volumique du sol et varie donc entre 0.4 et 0.5 suivant le poids du sol. La valeur de r_u diminue lorsque la nappe phréatique se trouve sous la surface du talus et augmente lorsque la nappe se trouve au dessus du talus. Pour des calculs simples d'avant projet, nous proposons d'appliquer les coefficients reportés dans le tableau n°1.

Conditions hydrauliques	r_u
Pas de nappe	0.0
Nappe à mi-hauteur du talus	0.25
Nappe confondue avec le talus	0.4-0.5
Talus immergé	> 0.6

Tableau 1 - Variations de r_u en fonction des conditions hydrauliques régnant au sein du massif

Le coefficient de sécurité d'une pente donnée peut alors être défini par :

$$F_s = m(c', \varphi', \beta) - n(c', \varphi', \beta)r_u$$

Les abaques de Bishop-Morgenstern, qui donnent les facteurs m et n, sont adaptés aux cas où la cohésion est nulle. Ils sont présentés dans les figures 3 et 4 ci-après.

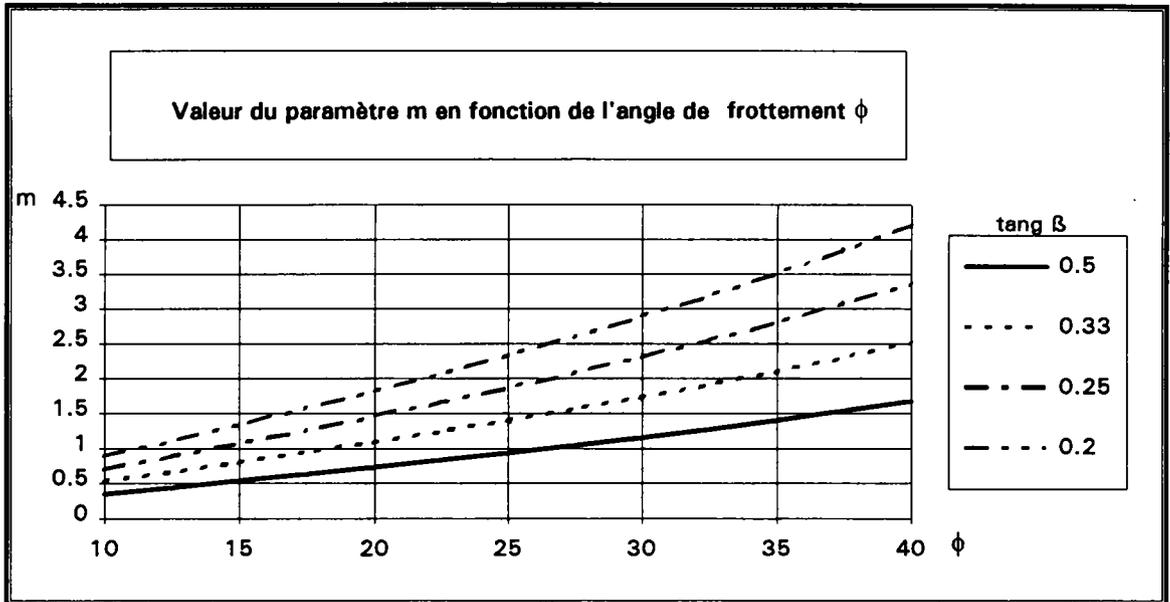


Figure 3 - Abaque de Bishop Morgenstern - Paramètre m

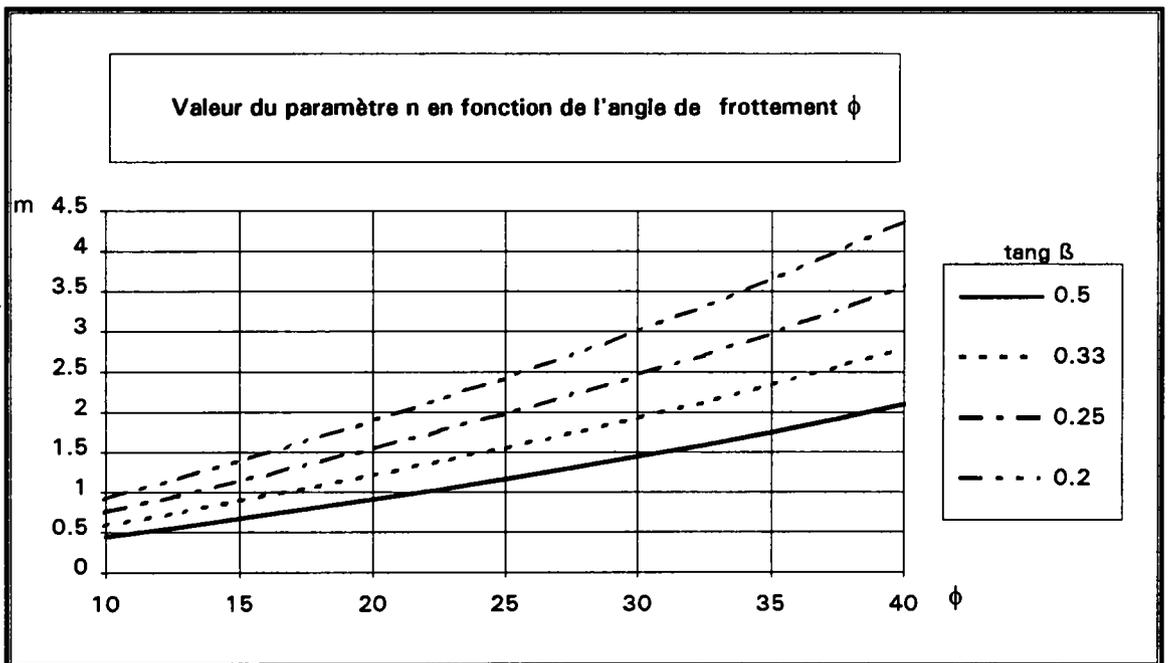


Figure 4 - Abaque de Bishop-Morgenstern - Paramètre n

Prenons un exemple pour illustrer l'utilisation des abaques de Bishop-Morgenstern. Considérons un talus réalisé avec une pente de 2/1 ($\tan \beta = 0.5$) dans un matériau granulaire dont l'angle de frottement a une valeur de 35° . Si le talus est complètement sec, nous pouvons appliquer la formule définie plus haut :

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta}$$

$$\text{d'où } F_s = 1,40$$

Les valeurs de m et n extraites des abaques donnent :

$$\begin{aligned} m &= 1,40 \\ n &= 1,75 \end{aligned}$$

Ces valeurs nous montrent que dès que la nappe sera à mi-hauteur du talus, celui-ci deviendra instable car dans ce cas de figure :

$$F_s = 1,4 - 1,75 * 0,25 = 0,96$$

Les abaques de Bishop-Morgenstern ont été étendues à d'autres applications (Barnes, 1990 ; Chandler & Peiris, 1989 ; O'Connor & Mitchell, 1977) mais la description de ces améliorations sort du cadre de ce rapport.

- Les autres abaques

Les abaques de Hoek et Bray (1981) ne sont cités ici que pour référence, car ils ne s'appliquent pas aux talus constitués de matériaux non cohérents. Elles ont cependant l'avantage de donner des facteurs de sécurité pour cinq configurations hydrauliques prédéterminées de talus homogènes présentant éventuellement une fissure de traction (fente) en tête de talus.

Les abaques de Kérisel (1966) permettent de déterminer le facteur de sécurité ainsi que le cercle le plus défavorable à la stabilité pour des talus en fonction des paramètres de résistance et de l'angle d'inclinaison par rapport à la normale des lignes de courant supposées rectilignes et uniformes.

Pour terminer citons **les abaques de Pilot (1967)** qui traitent de la stabilité des talus et remblais reposant sur des sols compressibles.

2.3.3. Modélisation numérique du comportement global

Les méthodes de simulation du comportement global, contrairement à la méthode des tranches et ses dérivées, ne tendent pas à simuler l'état à la rupture, mais plutôt le comportement global du massif. Elles permettent de calculer non seulement les contraintes qui règnent au sein du talus, mais aussi les déplacements et les pressions interstitielles, et de prendre en compte, entre autres, les phénomènes dynamiques. La principale méthode utilisée pour simuler le comportement d'une pente est bien entendu la méthode des éléments finis. D'autres méthodes telles que les différences finies ou les équations intégrales permettent également de modéliser le comportement hydromécanique global des talus.

La méthode des éléments finis permet la résolution numérique de systèmes complexes d'équations différentielles spatiales et temporelles en discrétisant le massif à modéliser en petites zones qui interagissent entre elles par l'intermédiaire de points communs appelés noeuds. On appelle généralement "maillage" l'opération de discrétisation en éléments et noeuds (fig. 5).

L'évolution de certaines variables du système est par hypothèse définie par une fonction connue, généralement polynomiale. Diverses méthodes d'assemblage permettent d'obtenir une solution en calculant un système d'équations algébriques souvent non-linéaires et parfois non stationnaires. Cette méthode demandait jusqu'à présent des moyens informatiques importants, mais l'explosion de la micro-informatique permet maintenant la résolution de cas bidimensionnels et simples sur des ordinateurs personnels. La résolution de cas tridimensionnels avec des lois de comportement complexes est encore réservée à des systèmes informatiques à grande vitesse de calcul.

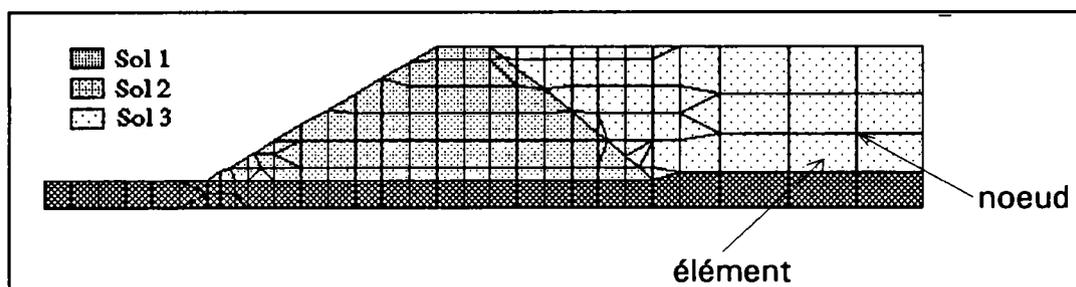


Figure 5 - Maillage simple pour le calcul des écoulements dans un talus par la méthode des éléments finis

Ces méthodes numériques ne sont en général appliquées qu'à des cas particulièrement complexes et demandent l'intervention de géotechniciens spécialistes en modélisation numérique. Elles demandent également la détermination des modules de déformabilité du massif, que l'on peut obtenir par des essais réalisés en laboratoire ou in situ. Pour certaines applications, qui nécessitent le calcul des déplacements par exemple, elles sont pratiquement les seules méthodes utilisées. Elles ont cependant le désavantage de ne fournir que des facteurs de sécurité locaux (B. Feuga et F. Wojtkowiak, 1987) et n'explicitent donc pas toujours un mécanisme de rupture globale. Si cette difficulté est contournée, elles permettent par contre de tenir compte de la rupture progressive.

3. LES PRINCIPAUX FACTEURS INFLUENÇANT LA STABILITE DES PENTES

L'exploitant d'une sablière ou d'une gravière est amené, pour des raisons économiques évidentes, à travailler avec les angles de pente les plus raides possibles. En effet, une pente plus raide autorise un taux de découverte plus faible tout en réduisant l'emprise au sol de l'exploitation, et donc les frais fonciers et les problèmes d'environnement.

Ceci dit, il ne faut toutefois pas perdre de vue que le dépassement de l'angle de pente maximal admissible risque d'entraîner des ruptures qui, outre les dangers que de tels phénomènes représentent pour le personnel, ne manquent pas d'avoir des répercussions très défavorables sur l'économie de l'exploitation. L'angle de pente maximal que peut admettre un talus dépend d'un certain nombre de facteurs dont les principaux, classés par ordre d'importance décroissante sans que cet ordre soit forcément respecté dans tous les cas, sont :

- la hauteur des talus,
- la nature des terrains, caractérisée en particulier par leur poids volumique à l'état naturel, leur structure au sens large et leur résistance au cisaillement à court terme, à long terme et résiduelle,
- l'eau souterraine,
- la méthode et les phases d'exploitation,
- des facteurs divers, d'ordre géométrique entre autres, tels que la concavité ou au contraire la convexité du bord de fosse.

Dans la plupart des cas, la géométrie d'un talus peut être représentée par une section droite coupant ce dernier à angle droit (fig. 1). La longueur du talus, qui n'est donc pas représentée dans ce plan, n'a que peu ou pas d'influence sur sa stabilité pour peu qu'elle soit suffisamment grande par rapport à la hauteur du talus. Par contre, nous verrons dans ce qui suit que dans certains cas, la hauteur influence sa stabilité.

L'angle de pente est, bien entendu, le paramètre géométrique le plus important en ce qui concerne la stabilité d'un talus. Dans tout ce qui suit nous utiliserons la lettre grecque β pour le désigner. Il est généralement exprimé en degrés, en pour cent, ou par le rapport distance horizontale sur distance verticale (H:V). Par exemple, on dira qu'un talus a une pente de 2 pour 1 (2H:1V), est incliné à 50 %, ou encore que son angle de pente est de 26,5°. Plus la pente est raide, plus l'angle de pente augmente et plus le rapport distance horizontale sur distance verticale diminue.

Toutes choses égales par ailleurs plus un angle de pente est grand, plus important est le risque d'instabilité locale ou globale de cette pente.

3.1. HAUTEUR DE LA PENTE

Comme nous l'avons déjà dit dans un paragraphe précédent, définissant les paramètres géotechniques des sols et plus particulièrement la cohésion et l'angle de frottement, la stabilité des pentes dans des matériaux granulaires non cohérents n'est théoriquement pas influencée à long terme par la hauteur du talus. Cependant, la quantité de matériaux impliquée dans une instabilité de pente est pratiquement proportionnelle au carré de la hauteur de la pente. Donc, plus la hauteur du talus est grande, plus le volume de matériaux impliqué dans un éventuel glissement est important, accroissant ainsi les risques vis à vis de la sécurité des personnes et des biens en couvrant de plus grandes distances et surfaces en cas de rupture. D'autre part, dans le cas de talus de grande hauteur constitués de matériaux plus grossiers, certains auteurs (Charles et Soares 1984, Fry et Vezole 1992) qui utilisent pour les calculs de stabilité des critères de résistance autres que le classique critère de Mohr-Coulomb, montrent clairement une influence de la hauteur et définissent pour un angle de pente et un matériau donnés, une hauteur critique de stabilité. Une telle approche, qui sort à notre avis du cadre de ce document, devrait cependant être considérée pour des cas spécifiques.

Notons aussi qu'à court terme (pour quelques heures à quelques jours voire parfois quelques mois dans les cas extrêmes), de nombreux sols granulaires humides mais non saturés montrent une certaine tenue (cohésion apparente) qui permet de créer, en travaillant rapidement, des talus avec des angles de pente très redressés mais qui ne seront pas stables à long terme. Ce phénomène est dû à l'existence au sein du massif de forces d'ascension capillaire.

Dans des terrains présentant de la cohésion tels que les argiles, ou constitués d'une alternance de couches d'argiles et de sables plus ou moins argileux, ce qui est fréquent pour des dépôts alluvionnaires, **plus la profondeur de l'exploitation est grande plus l'angle de pente des talus doit être faible** (fig. 6). Cette règle ne souffre aucune exception, même si l'influence des variations de la hauteur sur la valeur de cet angle est très variable d'un cas à un autre.

3.2. GEOMETRIE DU FLANC DE CARRIERE

Les talus créés dans les carrières relativement profondes (> 10 mètres), dont l'exploitation est réalisée par la méthode classique des tranches horizontales successives mettant en oeuvre des chargeurs et des camions, ne sont généralement pas rectilignes et comportent des **gradins** pour des raisons dictées par les hauteurs d'attaque possibles des pelles et des chargeurs ainsi que par la nécessité de créer des pistes et des rampes d'accès pour les camions. La stabilité de la pente globale ainsi que celle des gradins devront donc être étudiées en parallèle. En général, les coefficients de sécurité admis pour la stabilité des gradins d'exploitation sont inférieurs à ceux recommandés pour la pente globale. La largeur minimale des **banquettes** (ou **bermes**) devra cependant être déterminée pour définir un **angle de pente moyen β_m** appelée **pente intégratrice** assurant la stabilité globale du flanc de carrière (fig. 7).

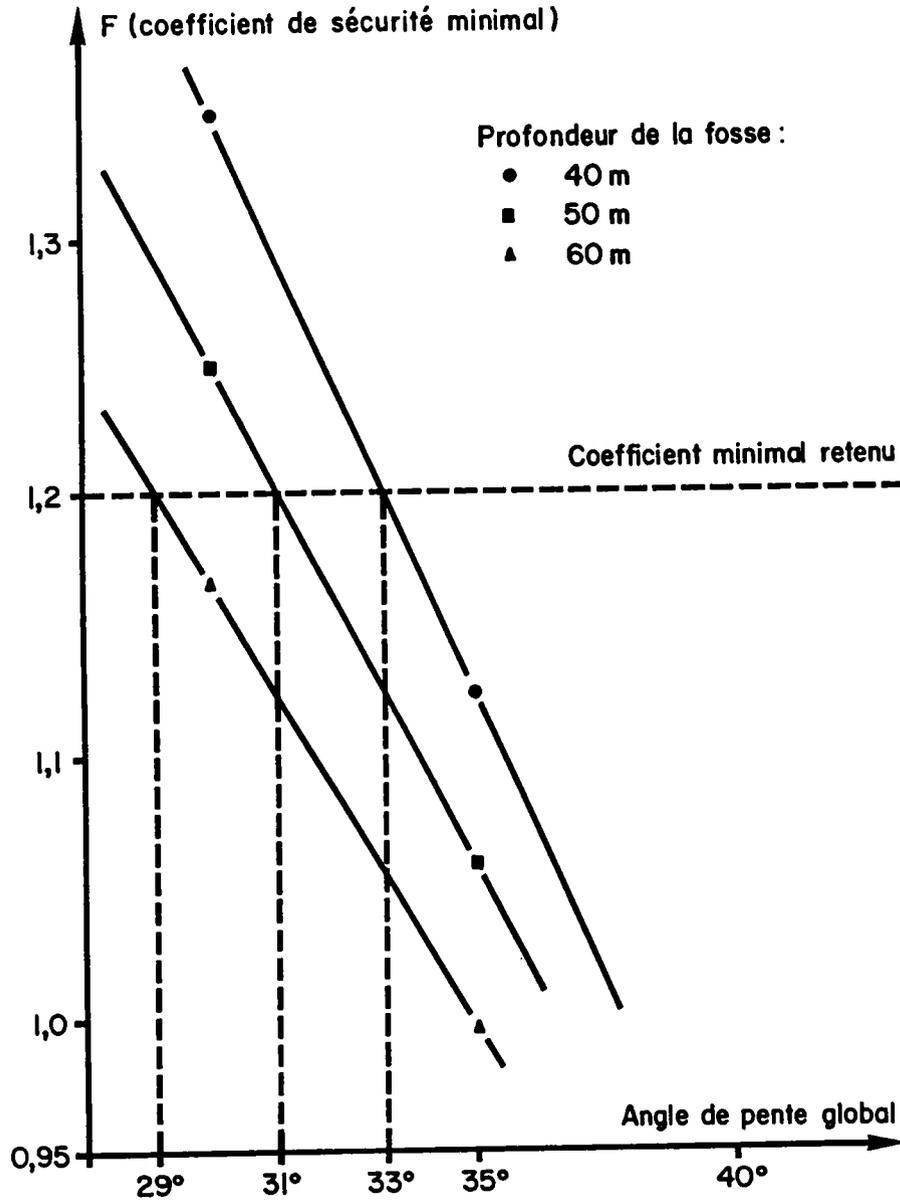


Figure 6 - Variation de l'angle de pente global d'un flanc en fosse en fonction de la hauteur pour un coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture de 1,2. Le massif est constitué de couches horizontales de sables, argiles et graviers (figure tirée de F. Wojtkowiak, 1988)

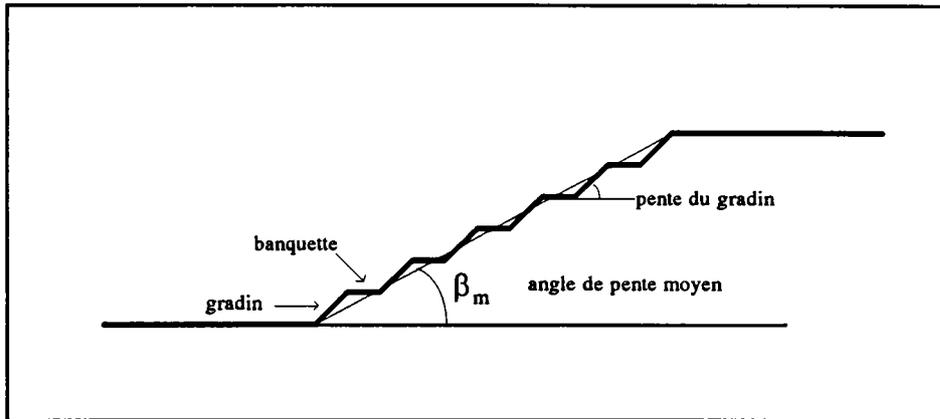


Figure 7 - Angle de pente moyen du flanc de carrière (pente intégratrice)

D'autre part, le rayon de courbure d'un talus a également une influence sur sa stabilité. Celle-ci peut-être quantifiée à partir de modélisations numériques plus ou moins complexes (B. Feuga et F. Wojtkowiak, 1987). On montre ainsi que les talus concaves sont plus stables que les talus convexes (fig. 8). L'influence de la concavité du bord de fosse sur la stabilité des talus est d'autant plus grande que le rayon de courbure est petit.

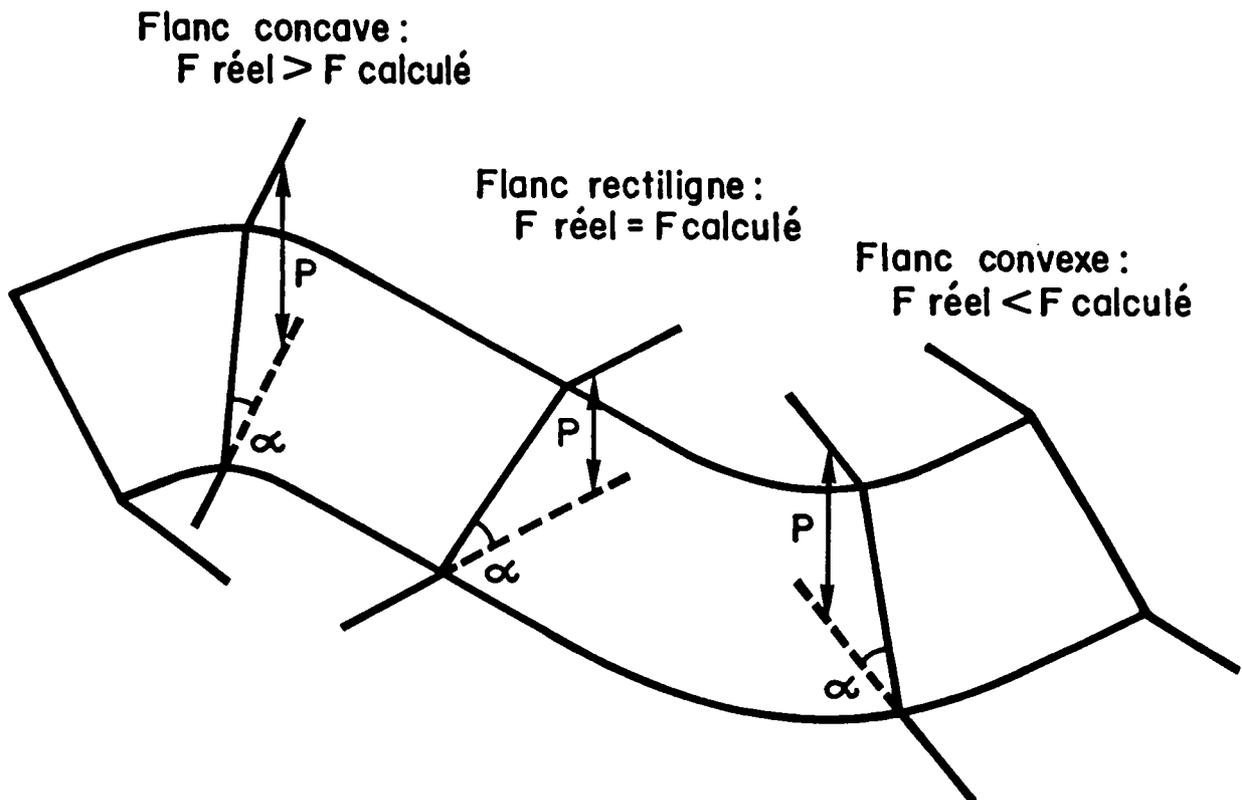


Figure 8 - Influence de la géométrie du flanc de carrière dans le plan horizontal sur la valeur du coefficient de sécurité global F réel et calculé (figure tirée de B. Feuga et F. Wojtkowiak, 1987)

3.3. INFLUENCE DE L'EAU

Le rôle de l'eau sur la stabilité des talus, berges et pentes dans les exploitations en terrains alluvionnaires est fondamental et néfaste car son action est multiple (M. Vandenbeusch et F. Wojtkowiak, 1992). Elle a tout d'abord **des effets mécaniques, statiques ou dynamiques**. Elle a ensuite des **effets physico-chimiques** d'altération et parfois de dissolution des minéraux. Dans le cadre restreint de ce document, nous n'étudierons que les effets mécaniques statiques, qui sont prépondérants pour les cas courants. Les effets dynamiques, trop complexes pour être exposés en détail ici, ne seront qu'évoqués.

Dans le cas d'une exploitation à sec des matériaux, le rabattement de la nappe et la variation des pressions interstitielles au sein du massif peuvent induire des effets néfastes sur la stabilité des talus, notamment lorsque les pentes s'appuient ou sont constituées (même que partiellement) de matériaux dont la variation de teneur en eau provoque des tassements ou des affaissements dus aux phénomènes de consolidation. Cela est en particulier le cas pour les vases, les tourbes ou les argiles molles. Ces phénomènes ne seront pas non plus détaillés dans ce document.

3.3.1. Phénomènes statiques

Dans un massif de sol baigné par une nappe au repos, les contraintes totales σ en un point du massif de sol peuvent être exprimées par la relation suivante :

$$\sigma = \sigma' + u$$

dans laquelle σ' représente la **contrainte effective** au contact des grains du sol, et u la **pression interstitielle** d'eau dans les pores (entre les grains).

La pression d'eau peut être exprimée par la relation :

$$u = \gamma_w h_1$$

où γ_w représente le poids volumique de l'eau et h_1 la profondeur sous la nappe du point P considéré (fig. 9).

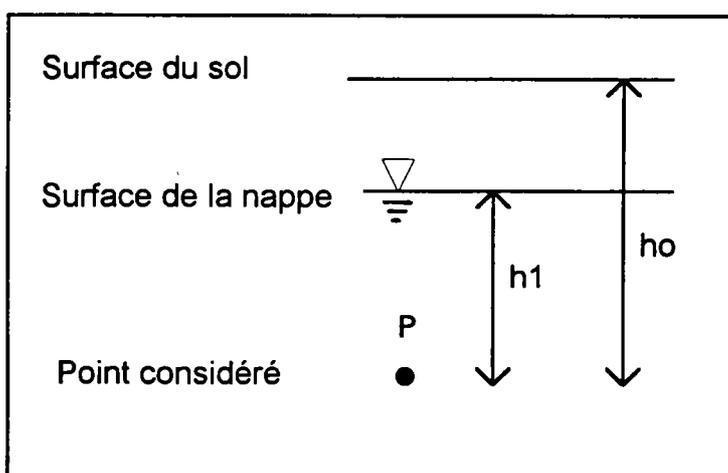


Figure 9 - Contrainte normale verticale en un point du massif

Si on se réfère à cette figure, la pression verticale totale au point P peut alors être exprimée par la relation :

$$\sigma_v = \gamma_d (h_0 - h_1) + (\gamma_d + \gamma_w n) h_1$$

où γ_d est le poids volumique du sol sec et n sa porosité, les hauteurs h_0 et h_1 étant définies à la figure 9.

Si l'on considère la variation de contrainte effective verticale $\Delta\sigma'_v$ dans le cas présenté ci-dessus et le cas où il n'y aurait pas de nappe d'eau ($h_1 = 0$), on trouve facilement que :

$$\Delta\sigma'_v = \gamma_w h_1 (1-n)$$

La quantité $\gamma_w (1-n)$ représente le poids d'eau déplacé par la phase solide du sol (les grains) située sous le niveau phréatique. Cette phase solide est alors soumise à une force volumique verticale, orientée de bas en haut : **la poussée d'Archimède**.

Ceci implique que la présence d'eau diminue les contraintes normales dans un sol et ce d'autant plus que la porosité de ce sol est faible. Le tableau 2 précise les valeurs de la porosité pour quelques sables.

Nature du sable	porosité (n)
Sable lâche mal gradué	0.47
Sable dense mal gradué	0.33
Sable lâche bien gradué	0.41
Sable dense bien gradué	0.33

Tableau 2 - Porosité de matériaux sableux d'après Houy (1986)

Comme nous le verrons plus loin, cette diminution des contraintes normales dans les sols a un effet néfaste sur la stabilité des pentes, berges et talus.

3.3.2 Phénomènes dynamiques

- Phénomènes internes

Dans le cas où l'eau subit un déplacement à l'intérieur du massif (écoulement naturel de la nappe) sous l'effet d'un gradient de pression, les matériaux granulaires en un point subissent des forces de volume dites **forces d'écoulement** \vec{F}_e proportionnelles au gradient de pression en ce point, qui peuvent s'écrire:

$$\vec{F}_e = \gamma_w \vec{i}$$

\vec{i} étant le gradient de pression. Ces forces d'écoulement se rajoutent à la poussée d'Archimède.

Ceci dit, les perméabilités des terrains alluvionnaires étant généralement élevées, le gradient de pression est relativement faible et, l'influence des forces de volume dues à l'écoulement de la nappe est négligeable comparée aux forces statiques dues à la poussée d'Archimède.

Dans le cas de sols fins peu perméables (argiles), ou d'écoulement rapide et localisé induisant un gradient de pression élevé, les forces d'écoulement peuvent provoquer la liquéfaction apparente du sol et par conséquent de graves instabilités des talus.

La figure 10 illustre parfaitement l'influence des forces d'écoulement sur l'état de stabilité des talus d'exploitations à ciel ouvert. Cet exemple est tiré de l'article de M. Vandenneuch et F. Wojtkowiak (1992) et présente les résultats d'analyse de stabilité d'un talus de 45 mètres de hauteur réalisé en terrains meubles ou peu cohérents et aquifères, le niveau hydrostatique de la nappe s'établissant à 8 mètres de profondeur sous le terrain naturel.

L'état de stabilité de la pente, exprimé par un coefficient de sécurité F , évolue non seulement en fonction de l'angle de pente global de ce talus, ce qui est, nous l'avons vu, un résultat classique, mais également en fonction des conditions hydrauliques qui règnent au sein du massif. Le cas le plus favorable à la stabilité du talus correspond à une exploitation sous eau, à la drague-suceuse. Le niveau d'eau dans la fosse est en équilibre avec celui de la nappe phréatique qui est ainsi au repos au sein du massif. Il n'y a donc pas de forces d'écoulement orientées vers l'excavation. Une exploitation à sec suppose que le niveau de la nappe est suffisamment rabattu, soit naturellement, soit artificiellement. Dans le cas d'un drainage naturel de la nappe par la seule excavation, des forces d'écoulement apparaissent au sein du massif, au voisinage du pied de l'excavation : la stabilité du flanc de fosse est à peine assurée ($F = 1,1$) pour un angle de pente pourtant très faible (25°). Si la nappe est rabattue jusqu'à la cote du fond de carrière, l'état de stabilité du talus est singulièrement amélioré car le cône de rabattement de la nappe ne tangente plus le bord de fosse : il n'y a plus de forces d'écoulement défavorables à la stabilité du pied de talus.

Mais la stabilité des talus ne doit pas rester la seule préoccupation des exploitants et du géotechnicien. Des instabilités (soulèvement et/ou fissuration) du fond de carrière peuvent également être observées lorsque celui-ci est constitué d'une couche peu perméable sous laquelle existe une nappe en charge. La figure n°11 (issue de l'article précité) illustre bien ce cas. Elle concerne le gisement de lignite de Mézos situé dans le département des Landes, dont l'exploitation a été envisagée il y a quelques années de cela. Du point de vue hydrogéologique, la couche de lignite, d'une épaisseur minimale de 6 mètres dans les zones exploitables passe latéralement à des argiles en bordure de gisement. Le lignite et ces argiles constituent un horizon très peu perméable qui isole l'aquifère supérieur contenu dans les Sables d'Onesse dont la surface libre s'établit à 10 m de profondeur sous le terrain naturel. La nappe des "Sables et graviers de base" est bien sûr en charge et exerce à la base de la couche de lignite une pression P_{eau} telle que :

$$P_{\text{eau}} = \gamma_w (H - 10 + e)$$

Pendant l'excavation de la fosse, les forces hydrauliques au mur du lignite doivent être équilibrées par les forces de pesanteur dues au poids des terrains surincombants tel que :

$$P_{\text{terrains}} = e\gamma_{\text{lignite}} + D\gamma_{\text{terrains surincombants}}$$

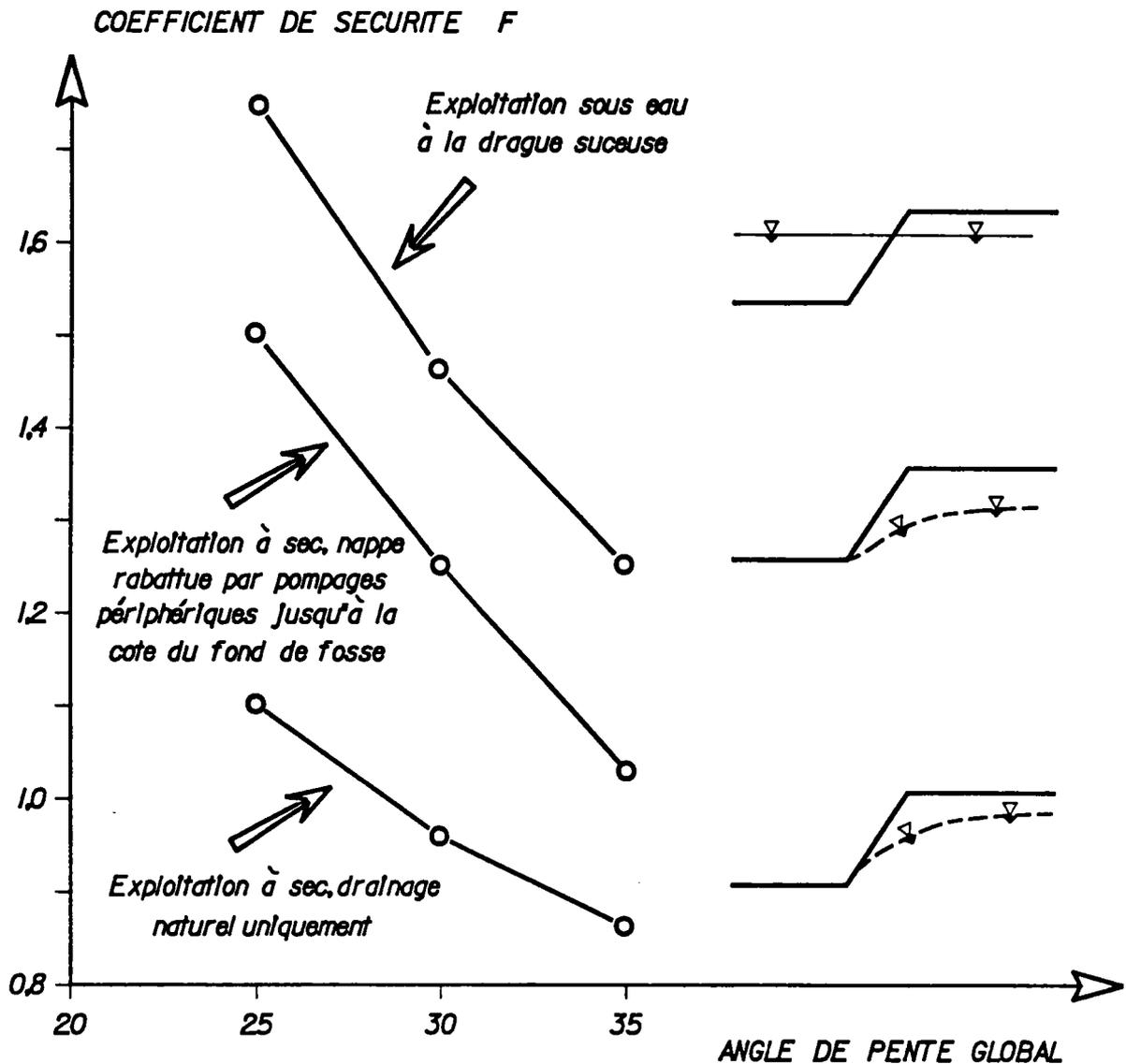


Figure 10 - Evolution de l'état de stabilité d'un flanc de carrière en fonction de son angle de pente global et des conditions de drainage du massif (d'après M. Vandenbeusch et F. Wojtkowiak, 1992)

Si on néglige les forces de résistance au cisaillement qui s'opposent au soulèvement du fond de fosse, la stabilité est assurée si :

$$\frac{P_{\text{terrain}}}{P_{\text{eau}}} \geq 1$$

c'est-à-dire lorsque :

$$D \geq \frac{\gamma_w (H - 10 + e) - e \gamma_{\text{lignite}}}{\gamma_{\text{terrains stériles}}}$$

Si l'épaisseur de terrains stériles non excavés est égale ou inférieure à cette valeur critique, les risques de rupture du fond de l'exploitation par soulèvement (phénomène de renard) sont donc importants.

Pour supprimer de tels risques, il faut abaisser par pompage la charge hydraulique dans la formation des "Sables et graviers de base".

- Phénomènes externes

L'eau de ruissellement sur les talus et remblais provoque une érosion des parements des talus qui, si elle n'est pas contrôlée par un système superficiel, un empierrement ou une revégétation du talus, sera préjudiciable à la stabilité de l'ouvrage. Il faudra donc prévoir dans tous les cas au moins une de ces solutions pour stabiliser à long terme les talus, déblais ou remblais.

3.3.3. Comment limiter l'influence de l'eau sur la stabilité des pentes ?

A partir des exemples illustrés par les figures 10 et 11, il apparaît que parmi les facteurs intervenant dans la stabilité d'une exploitation à ciel ouvert, l'eau est sans aucun doute celui sur lequel il est le plus facile et le moins coûteux d'intervenir.

Ainsi, dans une exploitation à ciel ouvert, on associera souvent le **drainage superficiel des eaux de surface** à celui des eaux souterraines, de manière à réduire au maximum les infiltrations d'eau au voisinage de la carrière et le ruissellement des eaux météoriques. On a souvent recours pour cela à un réseau de fosses étanches creusées à la périphérie de la fosse et en pied de gradin (fig. 12). Pour le **drainage des eaux souterraines**, les moyens les plus couramment utilisés sont les batteries de puits de pompage implantés à la périphérie de la fosse ou en pleine fouille, ainsi que les tapis de drains subhorizontaux forés au fur et à mesure de l'approfondissement de la carrière.

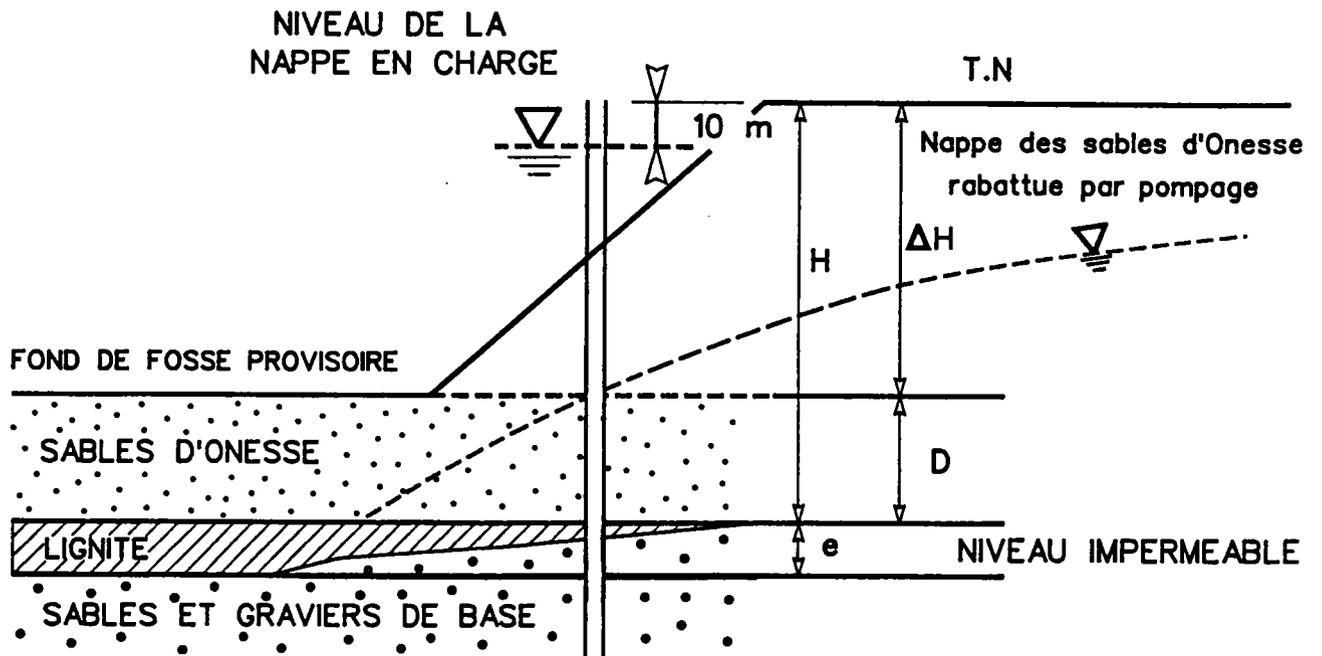


Figure 11 - Conditions de stabilité d'un fond de carrière constitué par un niveau imperméable sous lequel existe une nappe en charge

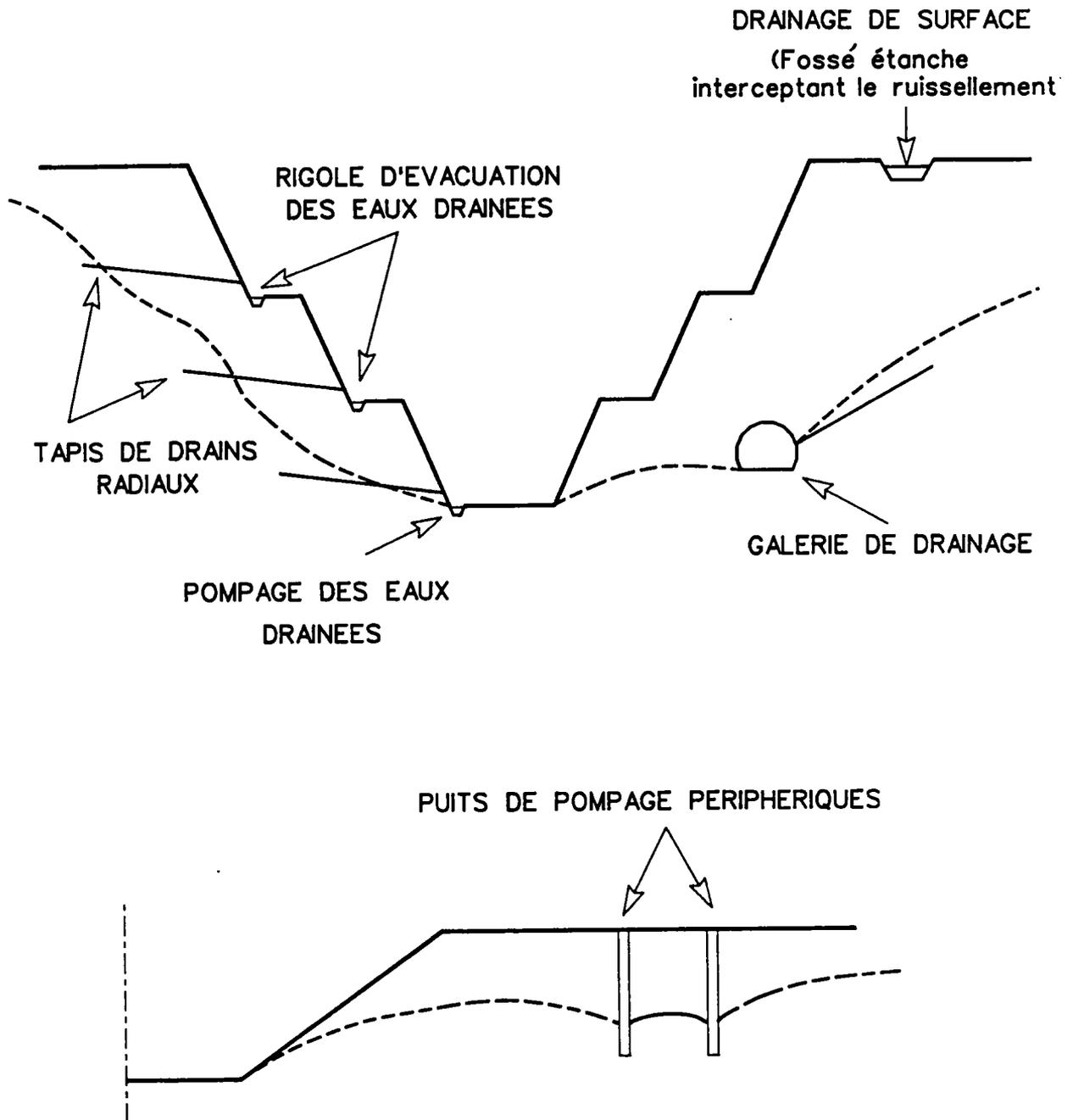


Figure 12 - Différents dispositifs de drainage des eaux de surface et souterraines en carrière à ciel ouvert

Dans de très rares cas, le creusement d'une galerie de drainage concentrique à l'excavation, à partir de laquelle sont réalisés des drains pouvant pénétrer profondément dans le massif, est nécessaire. Il va de soi que pour les exploitations de sables et de graviers le recours à une galerie de drainage n'a, à notre connaissance, jamais été nécessaire et pour cause !

Tous ces dispositifs de drainage constituent des systèmes très efficaces s'ils sont bien conçus et implantés de manière optimale, ce qui suppose une bonne connaissance de base du milieu naturel et de sérieuses études préalables.

3.4. NATURE DES TERRAINS

3.4.1. Lithologie et structure

En général, la connaissance de la géologie du site ne permet pas de définir a priori les caractéristiques géotechniques des matériaux considérés et donc de prévoir la stabilité des talus de la future exploitation. Cependant, la connaissance de la géologie du site est toujours une donnée importante car elle permet de définir les différentes formations qui seront recoupées par l'exploitation et au sein desquelles les caractéristiques géotechniques peuvent varier considérablement suite à l'existence de variations latérales de faciès, de dépôts lenticulaires, de variations brutales d'épaisseur... Pour cette raison, la première phase d'une étude de stabilité consiste toujours en un recueil ou une acquisition de données de base relatives en particulier à la structure du massif (photographies aériennes, coupes de sondage et cartes géologiques...).

L'interprétation de ces données conduit à la modélisation de la structure en grand du massif étudié. Dans cette modélisation, les éventuelles hétérogénéités spatiales et la configuration géométrique complexe des différentes formations constitutives du massif doivent être prises en compte.

Enfin, la composition minéralogique des sables et des graviers définit les types de minéraux présents dans ces sols et fournit une indication précieuse pour connaître la qualité "marchande" des matériaux qu'ils constituent, mais influence peu la stabilité des pentes lorsqu'il ne s'agit pas de minéraux argileux bien sûr !

3.4.2. Caractéristiques géotechniques

La parfaite connaissance de la nature géotechnique des sols est essentielle pour les analyses de stabilité des pentes. Les principales caractéristiques géotechniques des matériaux alluvionnaires qu'il est nécessaire de connaître sont : le poids volumique en place, la granulométrie, l'angle de frottement et la cohésion. Dans le cas de comportement complexe des matériaux constituant le talus et/ou son assise, d'autres paramètres devront également être déterminés à l'aide d'essais appropriés. Il s'agit principalement des modules de déformabilité et coefficients de Poisson nécessaires à la modélisation numérique.

- La granulométrie

La granulométrie définit la taille des particules constituant le sol. Elle est généralement décrite par une courbe cumulée qui, pour un échantillon représentatif, représente le poids relatif de matériau passant à travers une maille donnée, exprimé en pourcentage du poids total sec de l'échantillon, en fonction de la dimension de cette maille. Le mode opératoire et le matériel permettant d'obtenir cette courbe granulométrique sont normalisés. De nombreux paramètres sont ensuite extraits pour définir la granulométrie : ce sont principalement la dimension moyenne des grains et des indices reliés à la dispersion de la courbe granulométrique.

La dimension moyenne des grains d'un sol permet de le classer. Les tableaux n°3 et n°4 permettent de donner une dénomination du sol d'après sa granulométrie moyenne.

Dénomination du matériau	Dimensions des grains
Enrochements	> 200mm
Cailloux	200-20 mm
Gravier	20-2 mm
Sable gros	2- 0.2 mm
Sable fin	0.2-0.02mm
Limon	20 - 2 μ
Argile	2 - 0.2 μ
Ultra-argile	< 0.2 μ

Tableau 3 - Classification d' ATTERBERG (d'après Houy, 1986)

Dénomination du matériau	Dimensions des grains
Pierres	> 63 mm
Gravier gros	63 - 20 mm
Gravier moyen	20 - 6 mm
Gravier fin	6 - 2 mm
Sable gros	2 - 0.6 mm
Sable moyen	0.6 - 0.2 mm
Sable fin	0.2 - 0.06 mm
Limon grossier	60 - 20 μ
Limon moyen	20 - 6 μ
Limon fin	6 - 2 μ
Argile	2 - 0.6 μ

Tableau 4 - Classification M.I.T. (d'après Houy, 1986)

L'analyse granulométrique d'un sol définit non seulement la dimension moyenne des grains qui le constituent mais aussi la variabilité des dimensions entre les grains les plus gros et les plus fins. Si on définit par d_y la dimension d'un tamis au travers duquel passerait y% du poids total sec du matériel étudié, le coefficient d'uniformité U est alors donné par le rapport suivant :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Si U est supérieur à 2, la granulométrie est dite "étalée", sinon elle est qualifiée de "serrée".

- L'angle de frottement

L'angle de frottement représente les capacités de résistance au cisaillement d'un sol sous un effort normal. Il peut être en général mesuré sur des échantillons en laboratoire par des essais tels que l'essai à la boîte de Casagrande (essai de cisaillement rectiligne) ou à l'appareil tri-axial (essai de compression sur éprouvette cylindrique soumise à une pression de confinement donnée). Il peut aussi être mesuré en place par divers essais dont la description sort du cadre de ce document.

Il est généralement défini par la lettre grecque φ . Il est préférable d'utiliser, pour les calculs, l'angle de frottement drainé noté φ' qui est obtenu soit à partir d'essais drainés, avec des vitesses de cisaillement lentes permettant ainsi la dissipation des pressions interstitielles au sein des échantillons, soit en tenant compte, dans le dépouillement des essais, de la pression interstitielle en la soustrayant de la contrainte totale.

A titre indicatif seulement, la formule et le tableau 5 ci-dessous permettent de fixer les ordres de grandeurs des angles de frottement à considérer pour les sables en fonction de certaines de leurs caractéristiques. Cette corrélation et le tableau associé ont été proposés par J.-L. Favre et repris par A. Houy (1986).

$$\varphi' = 36^\circ + \varphi'_1 + \varphi'_2 + \varphi'_3 + \varphi'_4$$

Compacité	φ'_1	lâche	-6°
		moyenne	0°
		serrée	+6°
Forme et rugosité des grains	φ'_2	aigu	+1°
		moyen	0°
		arrondi	-3°
		très rond	-5°
grosseur des grains	φ'_3	sable	0°
		gravier fin	+1°
		gros gravier	+2°
Granulométrie	φ'_4	uniforme	-3°
		moyenne	0°
		étalée	3°

Tableau 5 - Corrélation entre l'angle de frottement effectif φ' et diverses caractéristiques des sables

De nombreuses corrélations entre l'angle de frottement et d'autres paramètres ont été proposées par différents auteurs. Ces corrélations ne peuvent être utilisées que dans le cadre d'études d'avant-projet et en s'assurant qu'elles peuvent bien s'appliquer aux types de matériaux étudiés. Dans le cas d'une étude de stabilité de carrière à ciel ouvert, il est toujours nécessaire de réaliser un nombre minimum d'essais mécaniques sur les matériaux considérés.

- La cohésion

La cohésion décrit la résistance au cisaillement d'un sol sous contrainte normale nulle. **La cohésion des sols alluvionnaires est généralement très faible et est supposée nulle dans toutes les études de stabilité à long terme.** Dans le cas où le massif est constitué par une alternance de couches d'argiles et de sables, la cohésion des matériaux argileux devra être considérée pour permettre un calcul plus précis de la stabilité réelle et d'ensemble du talus. Négliger cette cohésion entraînerait en effet pour ce type de matériaux le choix d'un angle de pente trop faible. Les essais qui permettent de mesurer la cohésion des matériaux sont les mêmes que ceux permettant l'obtention de l'angle de frottement. Cependant, la dispersion des résultats est souvent beaucoup plus importante que pour l'angle de frottement, ce qui entraîne généralement une plus grande incertitude sur les résultats.

3.5. PHASES ET METHODES D'EXPLOITATION

Les méthodes et phases d'exploitation ont peu d'influence sur la stabilité à long terme des pentes constituées de matériaux sableux, peu ou pas pollués par des argiles. Cependant, l'existence d'une cohésion apparente à court terme au sein des matériaux humides doit être prise en compte avec prudence pour éviter de créer des pentes trop raides qui seraient instables à moyen et long terme.

D'autre part, pour les talus et remblais constitués entièrement ou en partie de matériaux plus fins voire argileux, les effets du ravinement ou de l'altération météorique sur ces matériaux peuvent être néfastes à l'égard de la stabilité des pentes. La protection des talus définitifs (système de drainage, protection des pentes par empierrement ou revégétation) d'une excavation devra donc être planifiée dès l'ouverture de l'exploitation. Si les travaux de mise en sécurité à long terme ne peuvent pas être réalisés dans un délai acceptable après le réglage des pentes finales, il vaut mieux les retarder et modifier la planification de l'exploitation en conséquence.

La méthode d'extraction peut aussi avoir une influence sur la stabilité des pentes. D'une part, cette méthode influence généralement les débits d'exhaure qu'il est nécessaire d'évacuer et donc le rabattement de la nappe et le régime d'écoulement de l'eau souterraine au sein du massif excavé. D'autre part, l'utilisation d'engins de terrassement et de transport mobiles (camions, pelles, excavatrices, etc.) ou fixes (convoyeurs, unités de criblage, etc.) provoquent des surcharges locales qui peuvent avoir un effet néfaste sur la stabilité des talus si ces engins évoluent ou sont installés au voisinage immédiat des crêtes de talus. Ces surcharges font en effet partie des forces à prendre en compte dans les études de stabilité.

4. SURVEILLANCE DES PENTES

La surveillance des talus en phase d'exploitation ou après abandon des travaux est rendue d'autant plus nécessaire pour des raisons de sécurité vis à vis du personnel et du matériel d'extraction que les angles de pente retenus sont souvent proches des valeurs correspondant à l'état d'équilibre limite des talus. Tous les moyens et méthodes utilisés en génie civil pour l'auscultation des massifs de sol, en surface et en profondeur, sont applicables aux exploitations de matériaux alluvionnaires. On se contente la plupart du temps de mesurer des déplacements et des charges hydrauliques.

4.1. LES DIFFERENTS TYPES D'APPAREILS DE MESURE

4.1.1. Les mesures de déplacement

La mesure des déplacements de certains points situés sur ou sous la surface d'un talus permet en général de déceler et de prévoir les instabilités de celui-ci. Généralement les instabilités sont d'abord initiées par des mouvements de faible amplitude et qui au cours du temps, s'amplifient et s'accroissent jusqu'à la rupture.

- Les inclinomètres

Les inclinomètres sont de loin les appareils de mesures de déplacement les mieux adaptés à la surveillance des talus en profondeur. Ils permettent de mesurer, au cours du temps, la variation d'inclinaison d'un forage suivant deux axes. Ce forage est généralement subvertical et foré à partir d'un point se trouvant à une distance variable de la tête du talus (fig. 13).

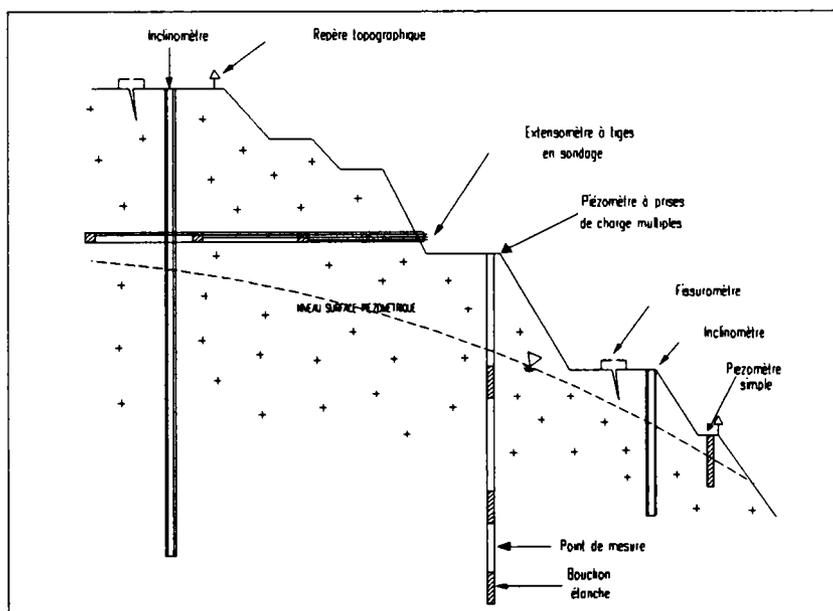


Figure 13 - Schéma type d'un profil instrumenté

Cette distance devra être déterminée pour s'assurer que le forage recoupe bien les surfaces de rupture potentielles. La longueur du forage sera suffisante pour mettre le point le plus bas à l'abri de toute instabilité et avoir un point fixe de référence pour l'interprétation des mouvements mesurés. Le forage effectué, des tubes spéciaux, soit en métal (aluminium) soit en matière plastique, sont installés dans le forage. Leur profil comprend généralement deux rainures pour permettre le repérage spatial de l'instrument de mesure, appelé torpille. Cette dernière mesurera à intervalle de profondeur constant (généralement un mètre), l'inclinaison absolue des tubes suivant deux directions repérées par rapport aux rainures.

La première série de mesures effectuée se verra attribuer un soin particulier. Elle servira en effet de référence pour les mesures et les interprétations suivantes. Les mesures, qui nécessitent donc l'utilisation d'un matériel de précision, capable de mesurer des variations d'inclinaison de l'ordre de 10^{-3} radian, seront effectuées à intervalle régulier dans le temps. Elles seront généralement confiées à du personnel qualifié et habilité à ces mesures, disposant du matériel et capable d'interpréter et vérifier les mesures.

Les résultats de ces mesures sont généralement reportés sous forme graphique représentant les déplacements perpendiculaires au forage cumulés à partir du fond du forage. Ils permettent de déceler très rapidement l'amorce d'une surface de rupture. Le graphique montre généralement dans ce cas une variation importante de déplacement à l'endroit où s'amorce la rupture. Cependant si le mouvement s'intensifie, les tubes inclinométriques se déforment de manière trop importante (jusqu'au cisaillement) jusqu'à interdire le passage de la torpille. La surveillance devra être alors assurée par d'autres moyens.

- Les extensomètres de forage

Les extensomètres permettent quant à eux de mesurer les déplacements longitudinaux relatifs d'un nombre fini (généralement entre 3 et 8) de points situés dans un forage d'inclinaison quelconque. Les extensomètres à tiges sont de loin les plus courants. Au droit des points de mesure, un ancrage est scellé dans le sol à l'aide d'un coulis. Cet ancrage est relié à la tête du forage par une tige sur laquelle est installée un système de mesure mécanique ou électrique (potentiomètre ou LVDT). Le déplacement relatif des points d'ancrage par rapport à la tête du forage est ainsi mesuré. Pour la surveillance des pentes, l'installation des extensomètres est souvent similaire à celle des inclinomètres. L'installation d'un ancrage localisé suffisamment profondément pour ne pas être influencé par une instabilité éventuelle est nécessaire pour servir de référence. La tête du forage est ainsi un point de mesure. Bien que la précision des mesures de déplacement est pratiquement aussi bonne que celle des inclinomètres, les extensomètres sont pénalisés car les mesures sont effectuées à partir de forages situés très rarement dans le plan de déplacement principal.

Dans le cas des matériaux granulaires, les déplacements dus à la dilatance sont généralement faibles, tout au moins dans la phase d'amorçage des instabilités. Idéalement, ils devraient être installés dans des trous de forage horizontaux à partir des gradins par exemple. La difficulté de forer des trous horizontaux alliée à la difficulté d'accès des gradins limitent fortement l'utilisation des extensomètres dans ce type d'application. De plus, ils permettent difficilement de localiser avec précision les surfaces de rupture, leur interprétation est donc plus délicate pour les massifs granulaires. Leur seul avantage sur les inclinomètres provient du fait qu'ils ne nécessitent pas de matériel spécifique coûteux pour la réalisation des mesures et qu'ils peuvent donc être plus facilement intégrés dans une installation automatique de surveillance.

- Les mesures topographiques

Les mesures topographiques apparaissent à première vue comme les plus simples, puisqu'elles ne semblent ne demander qu'une installation minimale. Elles permettent la détermination périodique des coordonnées spatiales de certains points choisis des ouvrages, et par comparaison avec les mesures précédentes, leurs déplacements relatifs au cours du temps. Cependant dans le cas des matériaux granulaires, elles nécessitent l'installation de points de mesure, qui devront être solidaires d'une masse suffisamment importante de matériau en place. Leur point d'ancrage principal devra donc être à l'abri du gel et des ravinelements provoqués par de fortes pluies par exemple. De plus, la mesure topographique périodique demande l'intervention d'un personnel bien entraîné et équipé du matériel adéquat, ainsi que l'installation de points de mesure de référence situés en dehors de l'emprise des excavations et remblais.

- Les fissuromètres

Les fissuromètres sont des dispositifs simples qui permettent de mesurer l'écartement des lèvres d'une fissure. Ils sont généralement constitués de deux plots ancrés de part et d'autre de la fissure, dont les déplacements relatifs sont mesurés soit mécaniquement soit électriquement. Nous les citons pour référence, car si des fissures apparaissent parfois en tête de talus, de tels phénomènes sont généralement les indicateurs d'une cohésion non négligeable au sein du matériau, permettant le développement de contraintes de traction.

- Les pendules inverses

Les pendules inverses seront eux aussi cités pour référence non pas parce qu'ils ne s'appliquent pas au type de terrain considéré dans ce rapport, mais bien parce qu'ils nécessitent la mise en place d'un matériel important et sont donc très coûteux. Leur principe est simple : un trou de forage vertical de diamètre suffisant est réalisé entre la tête du talus et un niveau suffisamment bas pour être indépendant des mouvements du talus. Il est tubé et un fil de bonne résistance est ancré au fond et au centre du trou. Ce fil est ensuite relié à un dispositif flottant qui le garde tendu. La position du fil par rapport au collet du trou de forage indiquent les déplacements relatifs horizontaux de la tête du talus par rapport au point de référence. Ce type d'instrument a été depuis une dizaine d'années remplacé avantageusement par les inclinomètres.

- Les clinomètres ponctuels

Ces dispositifs permettent de mesurer localement et avec une très bonne précision, les variations d'inclinaison d'un capteur. Ce capteur devra donc être posé sur un bâti solide d'une masse suffisamment importante de terrain. Comme pour les mesures topographiques, ce bâti doit aussi maintenir le capteur à l'abri des mouvements locaux engendrés par les facteurs climatiques (variations thermiques...). Ce type de capteurs pourra aussi être incorporé dans un dispositif automatique de surveillance.

4.1.2 Les mesures de pression

Les mesures de pression d'eau ne permettent pas de détecter l'amorce d'une instabilité, mais elles en sont plutôt un des facteurs déclencheurs. C'est pourquoi elles sont si importantes à surveiller et mesurer. Elles devront en général être couplées avec une mesure de pluviométrie locale pour permettre d'expliquer les phénomènes de recharge de nappe.

- Les piézomètres à niveau plein

Ces piézomètres sont les plus simples, ils relient à la surface un niveau aquifère par un simple tube, mis en place dans un trou de forage et compris entre deux bouchons imperméables. La mesure est effectuée en descendant dans le tube un dispositif simple (sonde électrique) permettant de détecter le niveau d'eau dans celui-ci. Le nombre de points de mesure doit être défini par la connaissance des horizons imperméables ou peu perméable recoupant le forage. Ce type de piézomètre est de moins en moins utilisé car il demande une mesure manuelle qui est souvent peu précise et ne peut pas être incorporé dans un dispositif de mesure automatique. Son temps de réaction est aussi très lent ce qui l'empêche de détecter des variations transitoires importantes.

- Les piezomètres à capteur

Le dispositif de mesure est cette fois installé dans le trou sous forme d'une cellule, utilisant par exemple le principe de la corde vibrante, qui est liée à la surface par un câble électrique et qui peut donc être incorporée dans un dispositif de mesure en continu. Les cellules ont des temps de réponse très bons et une précision de l'ordre du centimètre de colonne d'eau.

4.2. DEFINITION ET IMPLANTATION D'UN SYSTEME DE SURVEILLANCE

La conception d'un système de surveillance doit être confiée à un spécialiste et être basée sur l'étude de stabilité. La surveillance doit principalement se concentrer sur les paramètres hydrogéotechniques pris en compte dans la conception des pentes des talus et sur lesquels l'incertitude la plus grande subsiste. Elle devra cependant permettre de détecter la plage la plus grande possible d'évolution des phénomènes. La surveillance devra également être adaptée à la plus ou moins grande sensibilité du site à une instabilité. Les dommages potentiels mettant en cause la sécurité des personnes, des biens matériels ou l'environnement devront être considérés dans cette sensibilité de manière à définir l'impact réel d'une éventuelle instabilité.

4.2.1. Surveillance visuelle

Le type de surveillance le plus simple et le moins coûteux est, sans nulle doute, l'appréciation visuelle. Elle devra cependant être menée par une personne expérimentée qui devra noter avec soin toutes les modifications intervenues dans l'apparence des talus et des remblais. Ces observations devront être consignées dans un rapport journalier ou hebdomadaire de manière à en garder la mémoire. Les capacités de détection de l'amorce d'une instabilité sont cependant limitées et pour des ouvrages sensibles, ce type de surveillance est certainement insuffisant.

4.2.2. Nombre et localisation des différents dispositifs de mesure

Le choix de l'installation de dispositifs de mesure est directement lié à la sensibilité du site à une éventuelle instabilité et de sa probabilité d'occurrence. L'instrumentation minimale comportera en général un pluviomètre, deux ou trois piézomètres et inclinomètres. Le nombre total de tels dispositifs est également fonction de la dimension des talus et remblais. L'utilisation d'une centrale automatisée de mesure ne s'applique, en général, que pour des cas extrêmement sensibles où des risques importants mettant en cause la sécurité des personnes et des biens sont encourus. Les instruments de mesure de déplacements seront généralement placés de manière à détecter les instabilités les plus probables telles que soulignées lors de l'étude de stabilité, ou déterminées, a posteriori, par une étude géotechnique spécifique. Les piézomètres devront également être placés dans ces zones, de manière à vérifier que les pressions d'eau ne dépassent pas les maxima à partir desquels la stabilité des talus est mise en cause.

4.2.3. Fréquence des mesures

La fréquence des mesures est elle aussi une fonction de la sensibilité du site à une instabilité potentielle et de la probabilité d'apparition. Toutefois, si une instrumentation a été installée, la fréquence des mesures ne devrait jamais descendre en dessous d'une fréquence semestrielle en phase de "routine". La présence d'une centrale de mesure permet, à l'opposé, une périodicité de mesure pouvant être journalière voire plus petite encore si nécessaire.

4.2.4. Interprétation des résultats d'auscultation

Les résultats des mesures de déplacements et de niveaux piézométriques sont généralement présentés sous forme de graphiques présentant leurs variations au cours du temps. Ces graphiques doivent permettre de détecter rapidement toute amorce d'instabilité qui se signale toujours par une accélération des déplacements, et de prendre les dispositions adéquates pour assurer la sécurité de l'exploitation, des biens et des personnes. La précision des mesures permet généralement de suivre dans le temps l'évolution de l'instabilité et de prévoir à temps les mesures de confortement ou de sécurité à mettre en oeuvre. Dans certains cas, les phénomènes observés peuvent se stabiliser sur une longue période mais peuvent également se réactiver. Dans beaucoup de cas, l'amorce d'une instabilité se produit après des précipitations météorologiques importantes qui provoquent une remontée des niveaux piézométriques. Cependant si les relevés sont effectués manuellement et trop espacés dans le temps, les pics piézométriques peuvent échapper à l'instrumentation. Dans le cas d'une accélération des phénomènes, il est toujours indispensable d'augmenter la fréquence des mesures.

5- CONCLUSIONS

Dans le présent aide-mémoire, nous avons exposé succinctement les méthodes utilisées par le géotechnicien pour la détermination des angles de pente des talus des exploitations à ciel ouvert en terrains alluvionnaires. Sans perdre de vue l'importance du choix correct de l'angle de pente, vis-à-vis de la sécurité du personnel et du matériel d'extraction et de l'économie de l'exploitation, nous avons voulu donner aux exploitants une idée du poids relatif des différents facteurs qui influencent l'état de stabilité des talus, et de la complexité de leurs interactions.

Cette complexité et les contraintes de sécurité justifient que le choix d'un angle de pente donne lieu à **des études préalables sérieuses** et que l'ouvrage fasse l'objet **d'un contrôle et d'une surveillance** de son comportement dans le temps.

Les progrès de l'informatique mettent à la disposition des géotechniciens, chargés des études de stabilité des exploitations à ciel ouvert, des moyens de calcul de plus en plus puissants, permettant de prendre en compte des géométries de plus en plus complexes, aussi bien en ce qui concerne la géologie que les différentes phases et méthodes d'exploitation.

Ceci dit, si la simulation du comportement hydraulique et mécanique du massif, en fonction de la perturbation causée par l'exploitation, permet d'intégrer de nombreux paramètres, elle repose toujours, au stade des études de projet, sur un certain nombre d'hypothèses. Il s'avère ainsi nécessaire de confronter les résultats des analyses de stabilité effectuées sur ordinateur au comportement réel des talus tel qu'observé in-situ et mesuré à l'aide de dispositifs d'auscultation. Or l'auscultation, généralisée à l'heure actuelle dans le domaine du génie civil, où ont été mis au point de nombreux appareils facilement adaptables aux problèmes rencontrés dans les exploitations de matériaux, est encore loin de connaître dans ce domaine le développement que son apport à la sécurité et à la connaissance du comportement du terrain devrait lui valoir.

Conçu en fonction des résultats de l'analyse de stabilité, et utilisé selon des principes relevant en majeure partie du bon sens (relevés réguliers, mesures interprétées rapidement, appareils maintenus en bon état de fonctionnement...), le réseau d'auscultation est alors à même de fournir des informations de toute première importance à l'exploitant. Ainsi, les mesures et observations recueillies et interprétées dans les meilleurs délais lui permettront d'adapter les angles de pente des flancs et des gradins au comportement réel de l'ouvrage, garantissant ainsi l'économie de l'exploitation tout en assurant la sécurité du personnel et du matériel d'extraction.

6 BIBLIOGRAPHIE

Barnes G.E. A simplified version of the Bishop and Morgenstern slope-stability charts, *Can. Geotech. J.*, Vol. 28, 1991.

Cassan M. , *Les essais in situ en mécanique des sols* Eyrolles, Paris, 1978.

Charles J.A. & Soares M. M., Stability of compacted rockfill slopes, *Géotechnique*, 34, N°1, 1984.

Chandler R.J. & Peiris T.A., Further extensions to the Bishop & Morgenstern stability charts, *Ground Eng.* 1989.

Charles J.A. & Soares M. M. Stability of compacted rockfill slopes, *Géotechnique* 34, N°1, 1984.

Feuga B. & Wojtkowiak F., Sécurité de l'exploitation à ciel ouvert en sol alluvionnaire. *Revue de l'Industrie Minérale - Mines et Carrières*, octobre 1987, pp. 1 à 8.

Fry J-J. & Vezole P. Stabilité des talus Cas des sols à critère de résistance parabolique approche cinématique du calcul à la rupture, *Ann. Inst. Tech. Bat. Trav. Pub.*, N°503, 1992.

Hoek E. & Bray J.H. *Rock slope engineering*, Inst. Min. & Met. Londres, 1981.

Houy A. , *Dimensionnement des ouvrages en palplanches en acier*, Paris, 1986.

Kérisel, *Glissement de terrains*, Dunod, Paris, 1966.

O'Connor M.J. & Mitchell R.J. , An Extension of the Bishop and Morgenstern slope stability charts, *Can. Geotech. J.* Vol 14, 1977.

Philliponat G., *Fondations et ouvrages en Terre*, Eyrolles, Paris, 1979.

Pilot G., Abaques pour le calcul de la stabilité des talus de remblais sur sols mous - matériau de remblai pulvérulent. *Bull. Liaison lab. Routiers P. et Ch.* n° 25, mai-juin 1967.

Raulin P., Rouquès G. & Toubol A., Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire, LCPC, Paris, 1974.

Uhle R.J. & van Zyl D., Shear strength and deformation parameters of rockfill related to particle size, *Rock Mechanics Contributions and Challenges*, Hustrulid & Johnson (eds), Rotterdam, 1990.

Vandenbeush M. & Wojtkowiak F., La prise en compte de l'eau et la prévision des exhaures en mines et carrières. *Revue de l'Industrie Minérale, Mines et carrières*, février 1992, pp. 1 à 8.

Wojtkowiak F., La stabilité des flancs de mines et carrières à ciel ouvert : méthodes d'étude et de surveillance. *Revue de l'Industrie Minérale, Mines et carrières*, mai 1988, pp. 1 à 11.