

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
—oOo—

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique
—oOo—

13/87

1EX

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *Mines et Metallurgie*

المدونة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة —
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE LA
STABILITE DES TALUS
dans les
MINES A CIEL OUVERT

Proposé par :

Dr. A WENDA

Etudié par:

D. Chobane
F. Saoudi

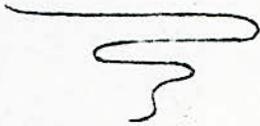
Dirigé par:

Dr. A. WENDA

PROMOTION:

Juin 87

Dedicaces



Sous dédications ce mémoire :

- * A nos familles
- * A nos amis

Chabane

Djamel

~~Chabane~~

Saoudi

Elyès

~~Saoudi~~



TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction

CHAPITRE 1: Etude bibliographique .

- Notions d'exploitation des mines à ciel ouvert .
- Notions de mecanique des sols .

CHAPITRE 2: Methodes de determination de la pente des talus.

- Methodes de Maslov .
- Interpretation des courbes obtenues .

CHAPITRE 3: Etude de la stabilite .

- * Calcul du facteur de securite (methode de Fellinius).
- Elaboration du programme de calcul (cas homogene).
- Calcul du facteur de securite .
- Cas stratifié .
- * Etude du facteur de securite en fonction de
(C , ϕ et beta) .
- Interpretation des courbes de fs obtenues en
fonction de C (cohesion)
- Interpretation des courbes de fs en fonction
de $\text{tg } \phi$.
- Interpretation des courbes de fs en fonction
de beta .
- Conclusion .

-RESUME

-Conclusion generale

-Annexes

- * Loi de coulomb
- * Appareillage utilisé pour l'etude des propriétés
des sols .
- * Différents types d'essais .
- * Determination de la pression interstitielle .
- * Programme informatique de calcul du facteur de
securite dans le cas d'un sol stratifié(heterogene) .

INTRODUCTION

DANS la majorite des domaines, de l'industrie ou de la recherche, la stabilite des systemes constitue un probleme .

La stabilite de fonctionnement des systemes mecaniques ou electriques, la stabilite de divers types de construction, sont quelques exemples qui s'offrent à nos yeux de façon assez courante . Et ce n'est qu'après des études theoriques approfondies, ainsi que de maintes essais en laboratoire que nous pouvons determiner les parametres dont depend effectivement cette stabilite .

Il se trouve que dans le domaine du genie-minier, on se trouve confronté à un tel probleme : "stabilité des talus dans une mine à ciel ouvert " .

Nos preoccupations ont porté sur ce sujet qui a fait l'objet de notre fin d'etudes .

D'une manière generale, le probleme est le suivant : La nature des sols differe d'une mine à une autre. comme exemple, il existe des sols très coherents comme l'argile, au moment ou d'autres sont pulverulents, comme le sable .

Et ces sols se comportent differemment envers les contraintes qui leurs sont appliquées . Dans notre cas, les sols forment les gradins des mines à ciel ouvert, qui sont sujets à de nombreuses contraintes (poids des machines, des rails, augmentation ou diminution de la quantite d'eau dans le sol) .

La presence de ces contraintes peut entrainer le phenomène de " glissement " de talus, à court ou long terme .

Notre objectif, est d'etudier ce phenomene en fonction des contraintes auxquelles est soumis notre talus et de determiner les conditions pour lesquelles notre talus est stable .

Pour cela, on determine un coefficient de securite qui nous permet d'apprécier cette stabilite .

Nos preoccupations ont porté sur ce sujet qui a fait l'objet de notre fin d'etudes .

D'une manière generale, le probleme est le suivant : La nature des sols differe d'une mine à une autre. comme exemple, il existe des sols très coherents comme l'argile, au moment ou d'autres sont pulverulents, comme le sable .

CHAPITRE 1

* ETUDE *
* * * * *
* BIBLIOGRAPHIQUE *

EXPLOITATION A CIEL OUVERT

LES gisements sont exploités a ciel ouvert lorsqu'ils reposent a une profondeur relativement faible et quand le prix de revient du mineral utile ainsi extrait est inferieur a celui obtenu par exploitation souterraine .

Dans l'ensemble executes lors de l'ouverture et de l'exploitation d'une carriere on peut distinguer les etapes suivantes:

- 1) preparation de la surface a l'emplacement du gisement que l'on se propose d'exploiter ou d'une partie de cette surface
- 2) Assèchement du champ de la carriere et prise de mesure contre l'afflux d'eau.
- 3) Creusement des tranchées principales(ouverture du champ de la carriere).
- 4) Enlèvement des steriles de recouvrement .
- 5) Travaux d'exploitation (enlèvement du mineral) .

suivant leurs proprietes physiques, la roche sterile et le mineral peuvent être enlevés, soit directement au moyen des machines , soit apres une preparation par tir .

Actuellement , l'exploitation a ciel ouvert se fait surtout par des moyens mecaniques (procedes dits d'excavation) ou hydromecaniques (ces procedes sont surtout employés en terrain tendre) .

Elements fondamentaux de l'exploitation a ciel ouvert

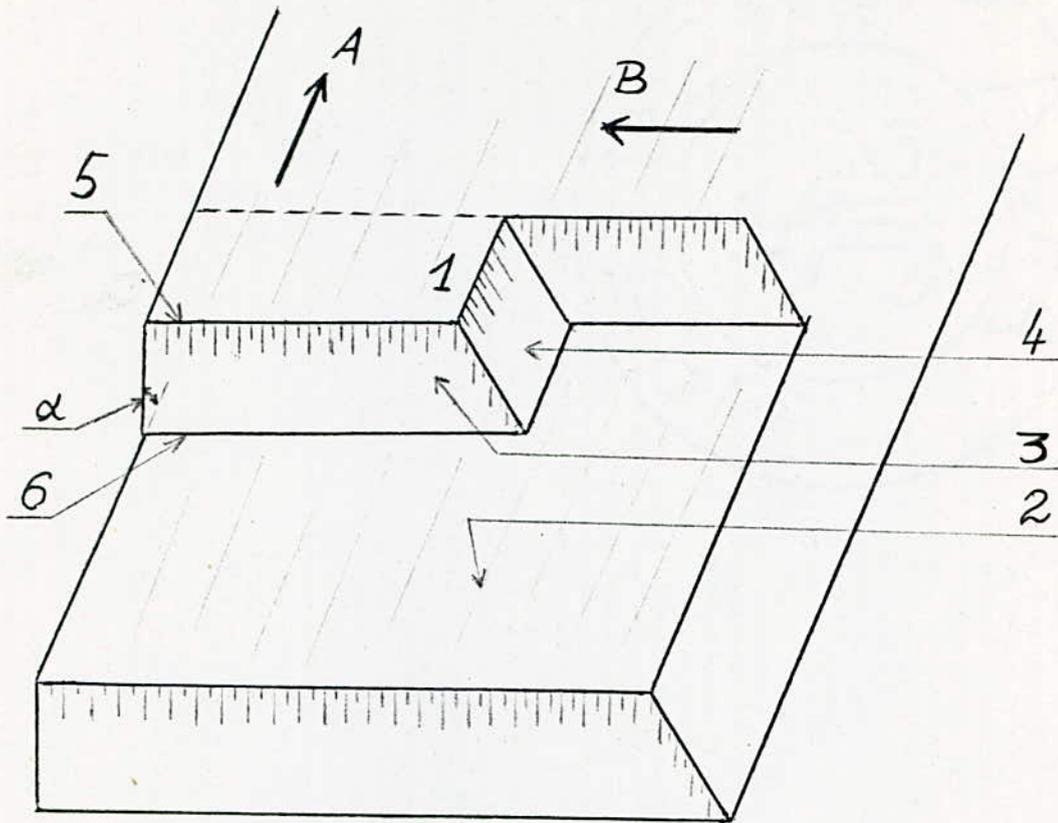
Dans ce paragraphe nous donnerons quelques notions necessaires pour la comprehension du processus d'exploitation a ciel ouvert

Carriere: (ou decouverte); l'ensemble des ouvrages realisés pour l'exploitation des mineraux utiles a ciel ouvert et constituant une entreprise autonome .

Gradin: une partie du mort_terrain ou du gisement que l'on enleve de maniere par des moyens autonome et qui est desservie par des moyens de transport qui lui sont propres .

Dans un gradin on distingue Fig.(I)

- 1- le toit
 - 2- le mur
 - 3- le talus
 - 4- l'extremite (front)
 - 5- arête superieure
 - 6- " " inferieure
- alpha= angle de talus



A: direction de l'emplacement du front des travaux
 B: direction de l'emplacement du front du jardin.

Fig I : Differentes parties du gradin

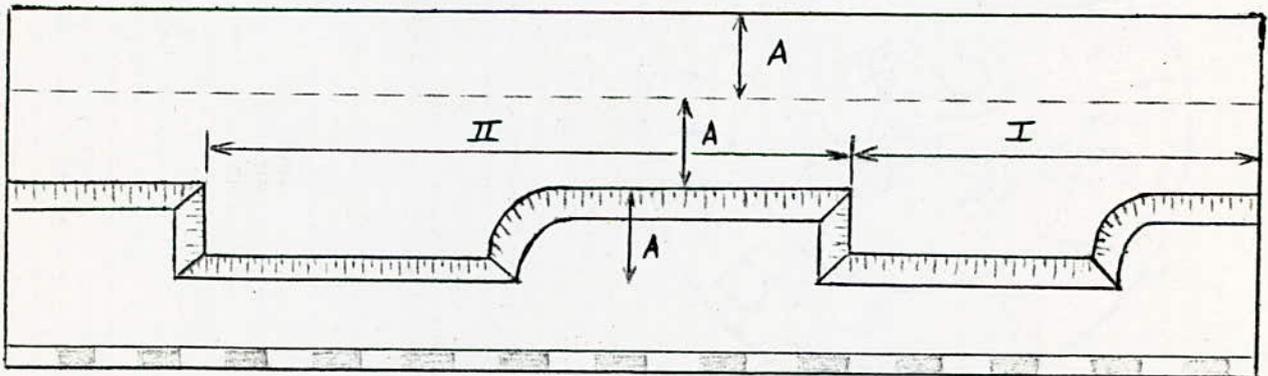


Fig II : Ordre d'exploitation d'un gradin
 A: enlevure ; I et II : blocs

les surfaces horizontales qui limitent le gradin en hauteur s'appellent respectivement "plate forme superieure" et "inferieure" . les gradins sont exploités par zones de largeur determinee sur toute la longueur du gradin que l'on appelle "enlevures" . une partie de l'enlevure delimitée en longueur et exploitée par des moyens d'abattage et de chargement independants est appelée "bloc" voir fig(II) .

Horizon de travail : c'est l'horizon dans lequel se trouve le materiel de chargement et de transport .

plate forme de travail : c'est la plate forme ou l'on installe le materiel de chargement et de transport .

Gradin en exploitation : sont les gradins qui reculent au cours de l'exploitation .

Banquettes : gradins limités par des plates formes étroites (ces gradins ne sont pas en exploitation .

Bord de la carrière : surfaces limitant lateralement la carrière , constitué par des plates formes et les talus des gradins .

Bord de travaux : celui ou les travaux d'exploitation sont executés .

Bord inexploite : celui ou iln'y a pas de travaux d'exploitation .

Fond (ou sole) de la carrière : plate forme inferieure du dernier gradin .

Contour superieur de la carrière : intersection du bord de la carrière et de la surface vierge .

Contour inferieur : intersection du bord de la carrière et du fond de celle-ci . on accede au gisement en creusant des "tranchees principales" . les differents gradins sont séparés par creusement de "tranchees d'acces" . les tranchees d'acces sont les prolongations sur chacun des gradins des tranchees principales . le creusement des tranchees d'acces permet d'obtenir le front initial des travaux . lorsque l'on commence l'exploitation des gradins l'une ou les deux parois des tranchees d'acces sont abattues et ces dernieres cessent d'exister en tant que tranchees .

Champ de carrière : est un gisement ou une partie de celui-ci exploité par une seule carrière .

LES APPAREILS D'EXPLOITATION/

Les machines que l'on utilise pour l'abattage et le chargement des stériles et du minerai sont principalement les excavateurs .

Les excavateurs sont des machines de terrassement destinées à la prise de la roche dans le massif vierge ou préalablement ameubli et à son déplacement dans un godet jusqu'au lieu de déversement .

Il existe deux types fondamentaux d'excavateurs, les excavateurs à godet unique et les excavateurs à godets multiples .

Dans le premier cas, la prise et le déplacement de la roche se font au moyen d'un seul godet et dans le second au moyen de plusieurs godets fixés sur une chaîne sans fin ou sur une roue .

Le cycle de travail d'un excavateur comprend les opérations élémentaires suivantes :

- 1) _ Enfoncement du godet dans le front , détachement de la roche et remplissage du godet .
- 2) _ **Déplacement**: du godet chargé depuis le front, jusqu'au lieu de déversement .
- 3) _ **Déversement** du godet .
- 4) _ **Retour** du godet à sa position initiale .

Les excavateurs à godet fonctionnent de manière cyclique et exécutent les opérations susmentionnées .

Les excavateurs à godets multiples fonctionnent de manière continue, toutes les opérations y compris le déplacement de l'excavateur sont effectuées simultanément .

Dans tout excavateur on distingue les organes de travail qui sont le godet et le dispositif auquel il est fixé ; les organes moteurs qui mettent en mouvement les organes de travail et l'engin entier; le bâti sur lequel sont fixés les organes de travail, les organes moteurs et les dispositifs de transmission ; le bâti est constitué d'une cabine et d'un mécanisme de translation .

suivant le type des organes de travail et le mode de fixation du godet à la flèche .

Les excavateurs à godet sont classés en deux groupes: Ceux dont le godet est fixé rigidement à la flèche et ceux dont le godet est fixé à la flèche de manière souple. Chacun de ces deux groupes comprend plusieurs types d'excavateurs à godet .

Les excavateurs dans lesquels le godet est fixé rigidement à la flèche sont :

- 1)_ La pelle butte dans laquelle le godet, fixé à un bras s'enfonce dans le front et s'y déplace en s'éloignant de la machine, vers l'avant et vers le haut, sous l'action du câble de levage.
- 2)_ La pelle (mécanique) dont le godet, fixé à un bras se déplace sur le front au moyen d'un câble en se rapprochant de la machine, vers l'arrière et vers le haut.
- 3)_ Le robot : dont le godet s'éloigne de la machine (en général horizontalement) en se déplaçant sur une flèche rigide qui assure son guidage.

Le groupe des excavateurs à godet dans lesquels la fixation du godet à la flèche est souple , comprend:

- A)- Le dragline (excavateur à câble et godet) dans lequel le godet est trainé sur le front au moyen de câbles en se rapprochant de la machine vers l'arrière et vers le haut .
- B)- L'excavateur à benne preneuse muni d'un godet spécial (benne preneuse), suspendu à un câble qui ne se déplace pas sur le front mais y étant descendu s'enfonce dans la roche et la retient par la fermeture de ses mâchoires .

Les excavateurs à godet peuvent recevoir tous les organes de travail qui viennent d'être énumérés ou bien seulement certains d'entre eux . dans le premier cas , ils sont dits universels , dans le second , semi universels .

Les excavateurs conçus pour recevoir un seul type d'organes de travail sont appelés spéciaux .

suivant le type du mécanisme de translation , on distingue les excavateurs sur chenilles et les excavateurs marchants .

Les organes moteurs des excavateurs peuvent être: électriques, diesel, diesel électrique , et à vapeur.

on divise les excavateurs à godets multiples en deux groupes:

- 1- Les excavateurs à godets(à chaîne)
- 2- // // // // à roue pelle avec des godets fixés sur roue .

Les excavateurs à godets se déplacent sur rails ou bien sur chenilles .

pour ces appareils on trouve les mêmes organes moteurs que ceux des excavateurs à godet unique .

L'organe de travail des roues pelles est une roue d'un diamètre qui varie entre 3.2 et 12 mètres sur laquelle sont fixés 6 à 10 godets d'une capacité de chacun qui varie entre 1000 et 1700 litres (Fig III).

Ces godets attaquent le terrain lorsque la roue tourne .

La vitesse de rotation de cette dernière est de l'ordre de 1 à 1.5 mètres/seconde (vitesse linéaire de la roue).

Les godets de la roue se vidant sur un convoyeur à bande qui monte latéralement par rapport à la roue , sur la flèche à laquelle est fixée celle-ci .

Le convoyeur de la flèche transporte les produits à travers le bâti de l'excavateur sur un autre convoyeur à bande dit de déchargement .

Les roues pelles peuvent creuser au dessous de la plate forme sur laquelle elles se trouvent à une profondeur quelque peu inférieure au rayon de leur roue .

Le plus souvent , les roues pelles attaquent le gradin par son extrémité, de même que les excavateurs à godet unique, mais peuvent également travailler du côté du talus (Fig IV; V).

Lorsque le gradin est attaqué par son extrémité, l'excavateur reste en place et la flèche avec sa roue tourne d'un angle de 90° à 120° dans le plans horizontal (Fig II.1).

la hauteur maximum de creusement (d'élévation de la flèche) des roues pelles varie de 7 mètres pour les petits modèles à 25 mètres pour les grands modèles .

Les roues pelles présentent l'avantage d'une organisation du travail très simple lors de l'enlèvement sélectif des couches de structures complexes .

Le rendement des roues pelles peut être calculé par les formules (1) et (2) .

$$Q_h = 60 \cdot C \cdot F \cdot K_I \cdot c / K_2 \quad (n_3 / H) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_p = 60 \cdot C \cdot N \cdot K \cdot T \cdot c = 60 \cdot C \cdot N \cdot T \cdot c \cdot K_I / K_2 \quad (n_3 / p) \quad \dots \dots (2)$$

- Qh : rendement théorique horaire de l'excavateur
- Qp : rendement par poste
- C : capacité en m3 de chaque godet
- T : durée du poste en heure
- c : coefficient d'utilisation de l'excavateur dans le temps
- KI : coefficient de remplissage du godet
- K2 : coefficient de foisonnement de la roche
- n : nombre de godets vidés
- K : coefficient d'excavation

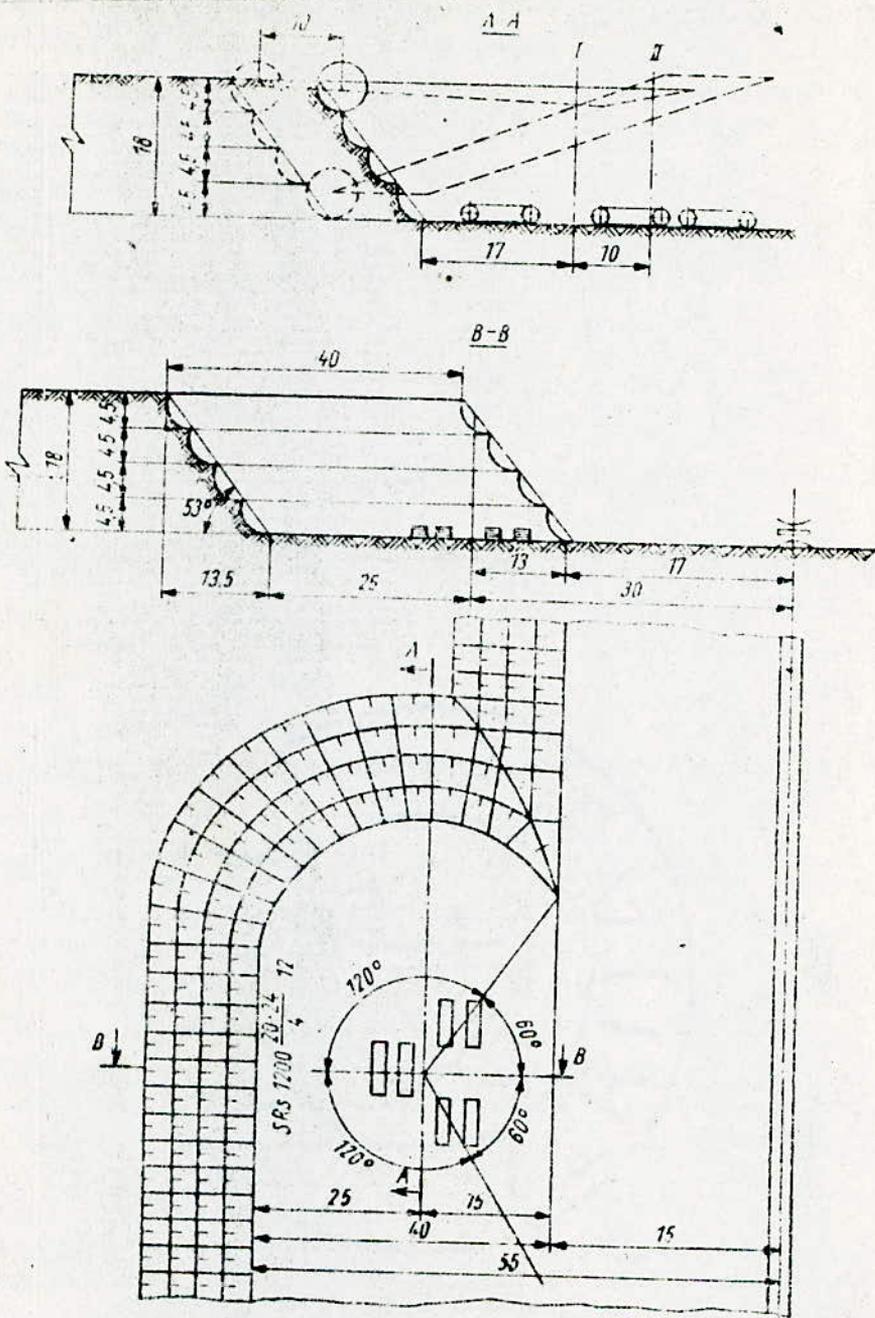


Fig II.1

Le nombre d'attaques (de déversements) peut être calculé à partir de la formule (3)

$$n = m \cdot nr \quad (3)$$

m : c'est le nombre de godets sur la roue
nr : est la vitesse de rotation de la roue en tours/minutes et peut être calculée par la relation suivante

$$nr = (60 \cdot v) / (\pi \cdot D)$$

v : vitesse de coupe de la roche qui varie entre 0.9 et 1.2 m/s
pi : est la constante trigonométrique pi = 3.14
D : diamètre de la roue en mètres
n : le nombre d'attaques



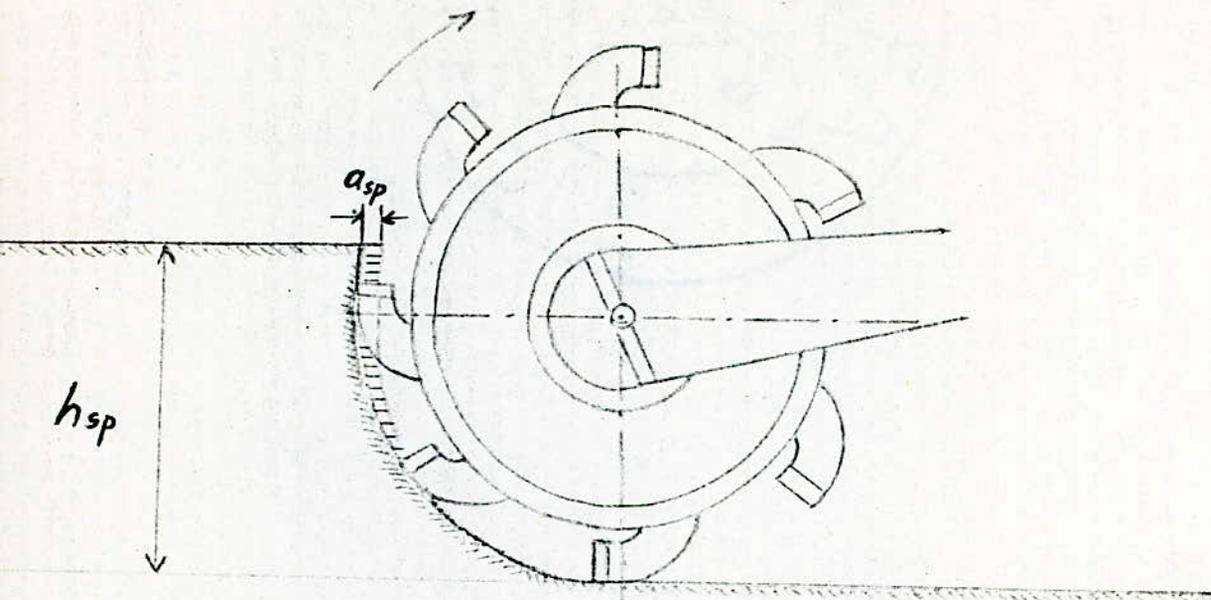


Fig III

Schema de processus de coupe
(de retranchement) du coupeau par la
roue excavatrice.

asp : epaisseur du coupeau

hsp : hauteur du coupeau

Fig IV

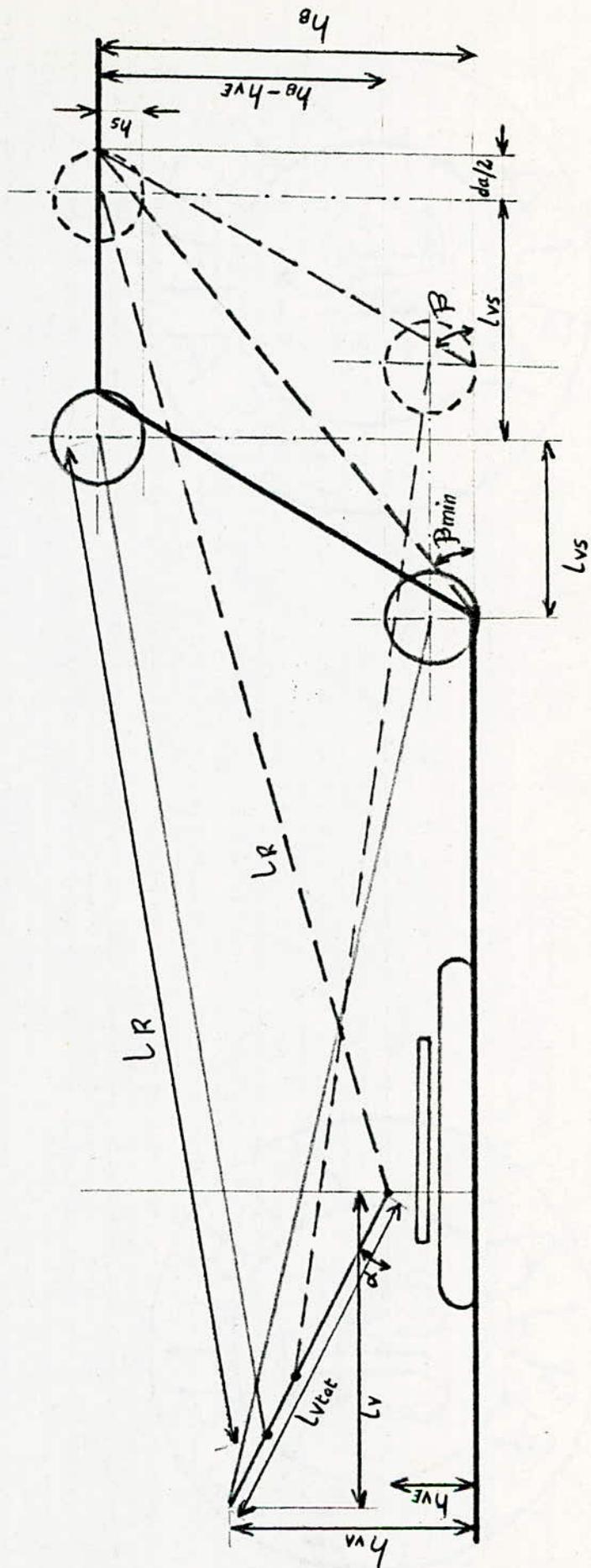


Fig IV : formation de la pente par la roue pelle

à flèche variable.

h_B : hauteur du talus.

L_R : longueur de la flèche.

h_{vB} : hauteur du point le plus bas sur la trajectoire de l'excavateur.

h_{vA} : hauteur du point le plus haut sur la trajectoire, de l'excavateur.

L_v : projection horizontale de la longueur de la trajectoire de l'excavateur.

d_a : diamètre de la roue.

β : inclinaison de la pente.

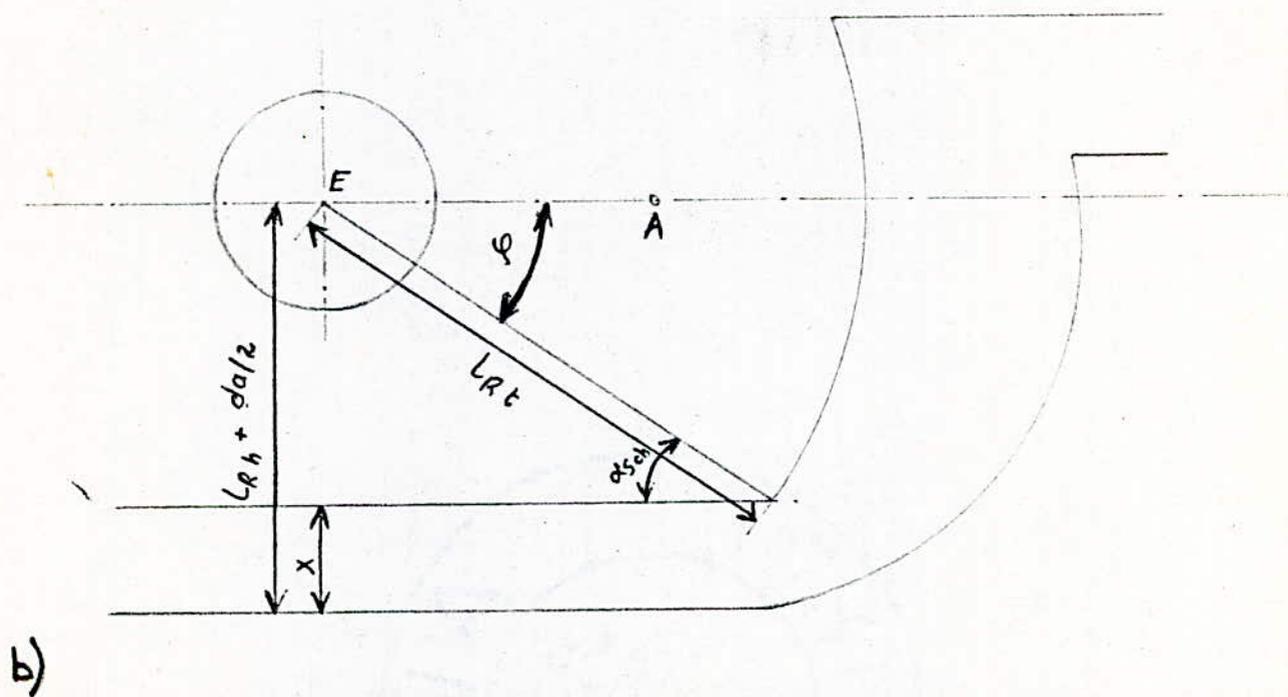
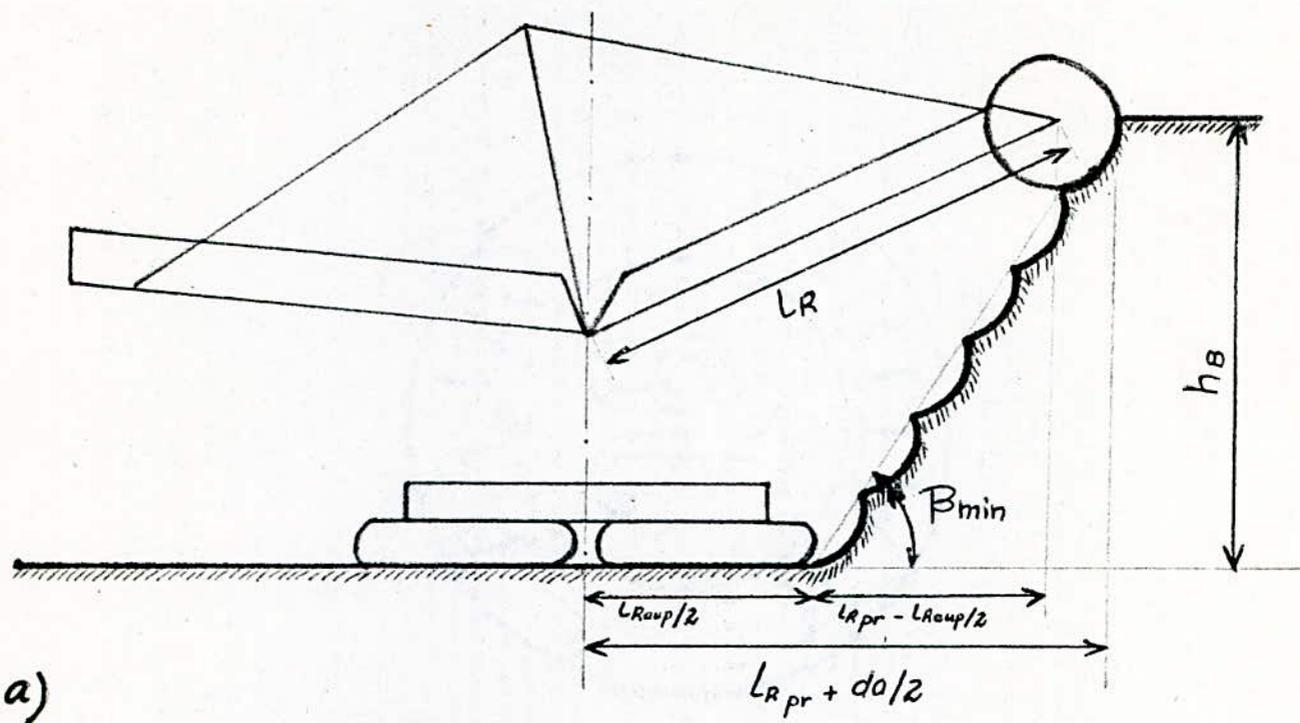


Fig V

EXHAURE /: La presence d'eau dans les roches affaiblit la cohesion des particules et les frottements entre ces dernieres, ce qui entraine une diminution de la stabilite des gradins et est a l'origine des glissements de terrains. il est donc necessaire d'une part, d'eviter la penetration des eaux meteoriques et souterraines dans la carriere et d'autre part, d'assecher le gisement .

Afin d'eviter l'afflux des eaux meteoriques, on creuse generalement des fossés d'evacuation par lesquels ces eaux s'ecoulent en dehors de la carriere .

Lorsque les eaux souterraines se trouvent a faible profondeur, elles peuvent être évacuées par des tranchées traversant les formations aquifères .

Lorsque le niveau hydrostatique se trouve a grande profondeur ou bien, quand il existe plusieurs horizons aquiferes, l'assechement souterrain consiste a creuser en couche un reseau de voies de drainage communiquant avec la surface par un puit ou une galerie a flanc de coteau . l'eau est pompée puis évacuée en dehors de la carriere .

LA DECOUVERTURE

La decouverte est l'enlèvement du mort terrain qui recouvre un gisement dans le but de l'exploiter a ciel ouvert .

Le choix des moyens de decouverte est precedé par une etude technico-economique .

La vitesse economique de la rentabilite des travaux a ciel ouvert est la valeur du mineral .

La quantite de steriles (en m³) qu'il est necessaire de placer pour extraire une tonne de mineral est appele "rapport de decouverte" il depend de la profondeur a laquelle se trouve celui-ci .

par consequent en connaissant :

- 1- Le prix de revient total de la tonne de mineral dans l'exploitation souterraine .
- 2- prix de revient de l'enlèvement de la tonne de mineral dans l'exploitation a ciel ouvert .
- 3- prix de revient du m³ de steriles deplaces .
- 4- V: volume total des steriles a deplacer .
- 5- Q: reserves exploitables du gisement .

on peut determiner la limite de la rentabilite de l'exploitation a ciel ouvert et souterraine, limite qui doit correspondre a l'egalite du prix de revient total de la tonne de mineral dans l'un et dans l'autre cas, c est a dire :

$$A = B + C \cdot \frac{V}{Q}$$

soit $x=v/Q$ montrant la quantité de steriles qu'il est indispensable de déplacer pour extraire une tonne de mineral, c'est à dire le rapport de decouverte, nous aurons donc :

$$a=b+c.x \quad \text{d'ou} \quad x=\frac{a-b}{c}$$

ainsi, la limite de la rentabilite de l'exploitation à ciel ouvert est l'egalite numerique entre le rapport de decouverte et le quotient, entre le prix de revient total du mineral de l'exploitation souterraine et celui de son seul enlevement dans l'exploitation à ciel ouvert, prix de revient du mètre cube de steriles deplaces. les calculs precedents ne suffisent pas pour permettre un choix definitif du mode d'exploitation. car le prix de revient depend aussi des conditions techniques : moyens mis en oeuvre, conditions naturelles et organisation des travaux.

c'est pourquoi, lorsque l'on choisit entre l'exploitation à ciel ouvert et l'exploitation souterraine, il est souhaitable de faire une etude technique et economique approfondie .

METHODES D'EXPLOITATIONS /

pour terminer ce resumé sur les mines à ciel ouvert examinons sommairement les differents methodes d'exploitations -

ions . dans l'exploitation à ciel ouvert, les moyens mis en oeuvre pour deplacer les steriles determinent les principaux parametres de la methode d'exploitation : la hauteur , le nombre de gradin au sterile, la largeur des plates formes de travail, le nombre de rampes de liaison pour le transport, le nombre d'attaques, l'ordre et le rythme de deplacement du front des travaux, la quantité de reserves decouvertes et preparees etc .

les methodes dites : "sans transport " sont les plus economiques et les plus simples, mais leurs parametres dependent des dimensions des engins de deblaiement et de transfert .

les methodes dites : "avec transport des deblais ", sont plus complexes et moins economiques, mais leurs parametres ne dependent pas des machines employées .

les variantes des methodes d'exploitations qui different entre elles par le type de l'equipement et la manière dont ce dernier est reparti, s'appellent "schemas d'excavations" . ceci termine notre resumé sur les mines à ciel ouvert .

§ NOTIONS DE MECANIQUE DES SOLS §

INTRODUCTION

Après avoir eu un aperçu de quelques notions de la mine à ciel ouvert, qui constitue l'ensemble dans lequel nous travaillons, il serait consciencieux d'avoir une idée des paramètres et des caractéristiques des sols dont nous voulons étudier la stabilité.

Il est donc nécessaire et indispensable de donner un certain nombre de notions de mécanique des sols qui nous faciliteront considérablement la compréhension de la suite du sujet.

Les glissements de terrain se produisent dans des circonstances très variées. Ils peuvent se produire soudainement ou sur une longue période. Celle-ci peut varier généralement de quelques mois à quelques années. L'écoulement d'eau est un agent pouvant produire le même phénomène. La rupture peut présenter une forme vaguement circulaire ou au contraire ne présente aucune forme particulière. Il y a dans la nature un ensemble de paramètres beaucoup plus vaste, qui peut influencer sur l'apparition et l'évolution des glissements de terrain. A la suite nous n'étudierons que les glissements dans le cas des talus.

Généralement les types de glissement que l'on rencontre le plus souvent sont les glissements:

- *plans
- *rotationnels simple (ou circulaires)
- *rotationnels complexe

Dans notre cas on ne s'intéressera qu'au glissement rotationnel simple, dont on distingue trois types (fig 1):

- *cercle de talus
- *cercle de pied
- *cercle de profond

Le problème principal est de déterminer les conditions pour lesquelles peut se produire un glissement. Et surtout comment peut-on connaître les conditions pour lesquelles notre talus soit stable.

Par conséquent, la stabilité dépend d'un certain nombre de contraintes. Bien entendu, les résultats obtenus par la théorie diffèrent quelque peu des résultats pratiques que l'on devrait obtenir. Néanmoins, cette différence peut aussi être fatale pour la stabilité de notre talus, ou au contraire sans influence pour ce dernier.

Pour cela ce que l'on appelle "coefficient de sécurité", qui dépendra de la somme des contraintes réelles appliquées à notre talus et qui nous permettra d'éviter un bon nombre de problèmes.

EXPRESSION DU COEFFICIENT DE SECURITE

regnent

Puisque l'on est incapable de préciser les contraintes qui effectivement existent dans un talus stable, on suppose pour les besoins du calcul, que la rupture est imminente et par suite on introduit un coefficient de sécurité pour en fait des conditions normales de travail compatibles avec la bonne tenue de l'ouvrage.

Pour représenter ce coefficient de sécurité que l'on appellera F , sous une forme mathématique, l'exemple suivant nous permettra de réaliser ceci. Nous avons un talus de hauteur H faisant avec l'horizontale un angle β (fig 2).

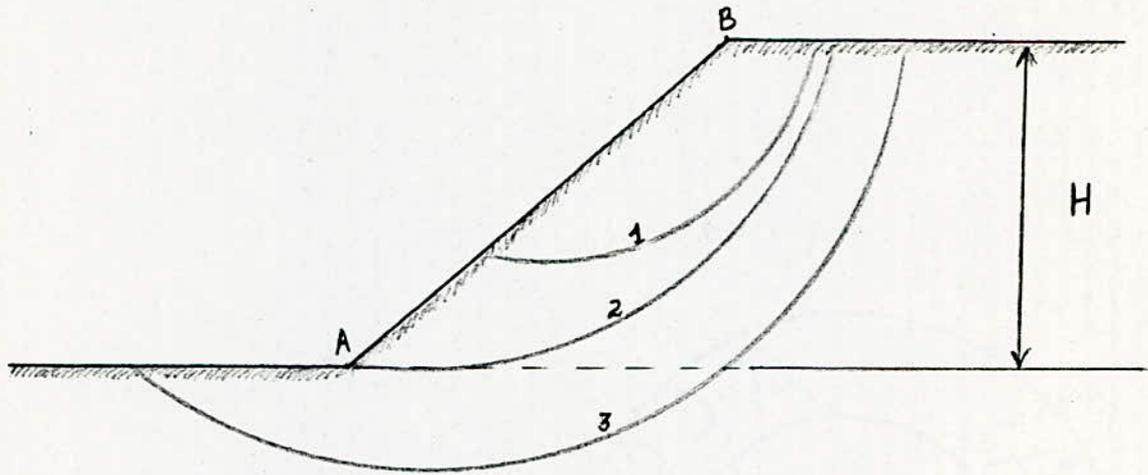


Fig 1 : Types de cercles de glissement

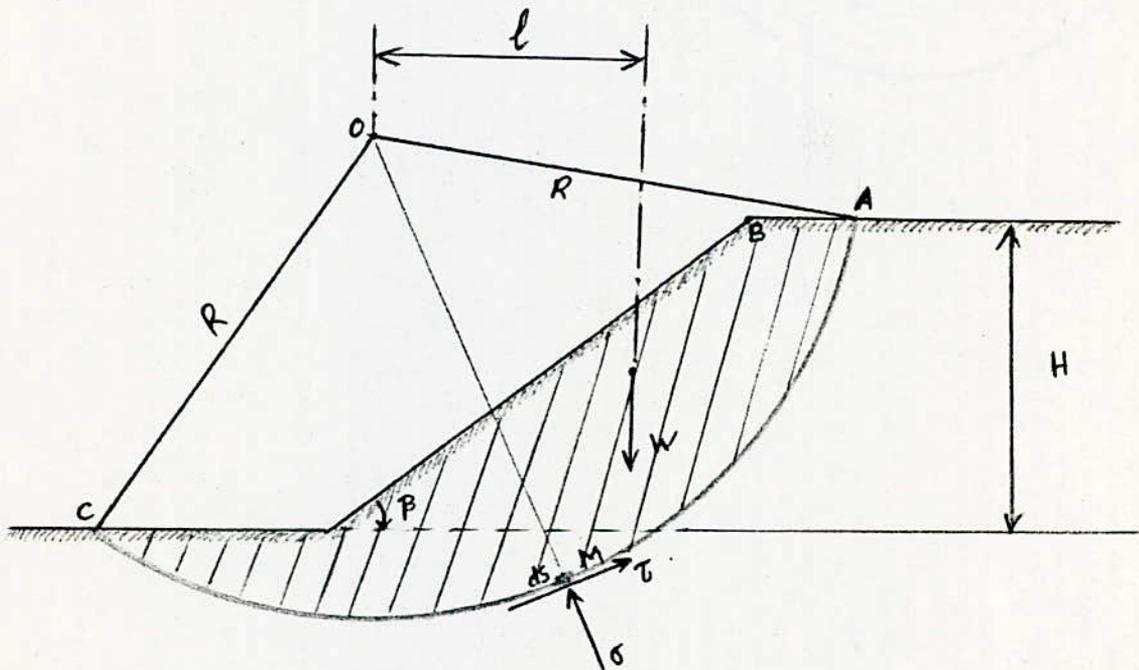


Fig 2 : Contraintes appliquées à la masse glissante

Supposons que notre ligne de rupture est un arc de cercle AMC, notre masse de matière définie par ABCMA est sujette à la contrainte suivante:

*le poids W de la masse ABCMA

Pour l'instant nous ne considérons que le poids W , ce qui simplifie le problème mais n'altère en rien la généralité des résultats.

Le poids W tend à faire pivoter la masse ABCMA le long de l'arc de cercle AMC, car il engendre un moment moteur.

Pour équilibrer ce moment moteur, des contraintes de cisaillement se développent sur la ligne de glissement possible, on a donc:

$$W.l = \int_C^A R.ds$$

A l'arc de cercle AMC on peut faire correspondre une valeur numérique précise du coefficient de sécurité. On recommence l'opération pour divers lignes de glissement possibles. Et on cherche pour quelle ligne on obtient la plus faible du coefficient de sécurité (*: valeur).

C'est cette valeur qui caractérise la marge de sécurité à adopter pour un talus donné.

Pour la détermination du coefficient de sécurité F , on peut remplacer les caractéristiques réelles C et f_i (se référer à l'annexe) par les caractéristiques réduites C' et f_i' (voir annexe), pour lesquelles le talus sera sur le point de se rompre.

Pour cela on définit d'abord deux coefficients de sécurité :

$$F_C = C/C' \quad \text{et} \quad F_{f_i} = \text{tg}(f_i)/\text{tg}(f_i')$$

La droite de Coulomb est de la forme:

$$T = C + \delta' \cdot \text{tg}(f_i) \quad (\text{voir annexe})$$

En travaillant avec les caractéristiques réduites nous pouvons écrire :

$$T = C' + \delta' \cdot \text{tg}(f_i') \quad C' = C/F_C \quad \text{et} \quad \text{tg}(f_i') = \text{tg}(f_i)/F_{f_i}$$

D'où $T = (C/F_C) + \delta' \cdot \text{tg}(f_i)/F_{f_i}$

En considérant dans ce cas les contraintes régnant sur la ligne de glissement dans l'équilibre "virtuel", on obtient les droites de la figure 2'. Au moment de la rupture C' et f_i' sont les paramètres d'équilibre limite par conséquent :

$$R \int_A^C (C' + \delta' \cdot \text{tg}(f_i')) \cdot ds = \int_A^C ((C/F_C) + \delta' \cdot \text{tg}(f_i)/F_{f_i}) \cdot ds = W.l$$

Pour des raisons de commodité on utilise un coefficient de sécurité unique, on a alors :

$$F = F_C = F_{f_i}$$

Par conséquent :

$$R \int_A^C (1/F)(C + \delta' \cdot \text{tg}(f_i)) \cdot ds = W.l$$

Et notre coefficient de sécurité aura donc la forme suivante:

$$F = \frac{R \int_A^C (C + \delta' \cdot \text{tg}(f_i)) \cdot ds}{W.l}$$

METHODES DE DETERMINATION DU COEFFICIENT DE SECURITE

Plusieurs méthodes de calcul sont utilisées pour la détermination du coefficient de sécurité F . On peut citer par exemple, la méthode de BIAREZ ou de TAYLOR et CAQUOT.

Et chacune de ces méthodes diffère des autres par une plus ou moins

$$OS = H = C \cdot \cot \varphi$$

$$OS' = H' = C' \cdot \cot \varphi'$$

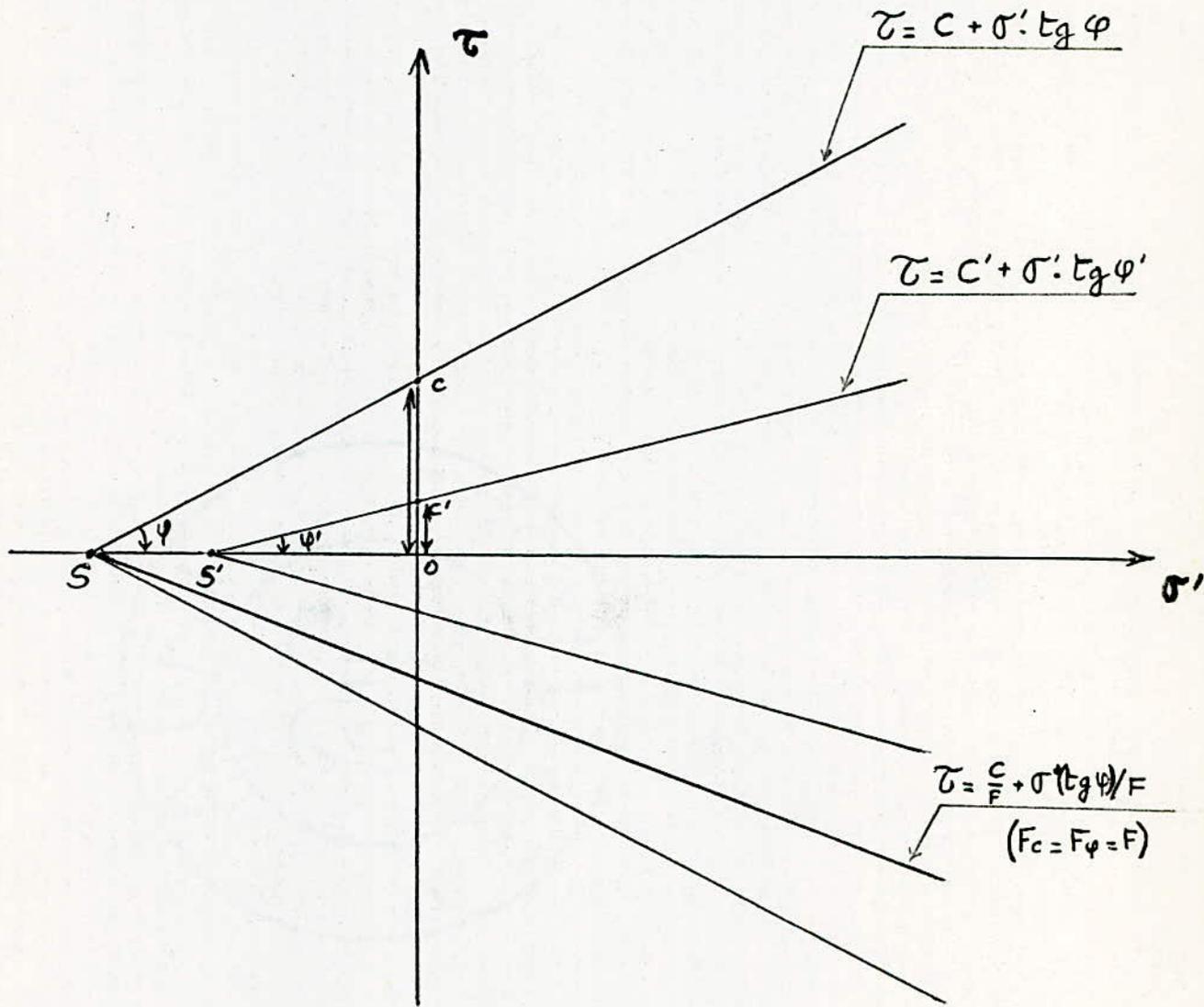


Fig 2'

precision.

Dans notre cas nous etudions la methode de tranche en generale et la methode de BISHOP et celle de FELLENIUS en particulier.

Methode de tranche

La forme geometrique des lignes de glissement de talus n'est pas toujours circulaire. Elle peut etre differente. Par ailleurs, il est peu frequent de rencontrer des terrains homogenes.

Il est donc necessaire de disposer d'une methode plus generale permettant la prise en compte des lignes de glissement quelconques et de massifs heterogenes.

Pour ce type de probleme complexe, on cherche la solution en divisant en un nombre de volume elementaire, pour chacun desquels la ligne de glissement a une forme simple et se developpe dans un milieu heterogene. On appelle cette methode de calcul "Methode de tranche".

Presentation de la methode

Considerons un massif quelconque soumis a des forces exterieures, susceptible de se rompre le long d'une ligne de glissement de forme arbitraire (fig 3).

On divise la masse considerée en n tranches (fig 3a).

Les forces appliquees au massif sont :

- *Le poids W du terrain et de l'eau qu'il contient.
 - *Sur la face superieure soit la charge Q (de A à D, fig 3b), soit les composantes de l'action hydrostatique de l'eau W_w et P_w (de D à B fig 3c).
 - *Sur la face inferieure c'est à dire le long de la ligne de glissement les resultantes des contraintes totales de composantes N et T.
 - *Sur la face laterale de gauche la force (X_n, Z_n) que la tranche de rang n exerce sur la tranche de rang n.
- Nous avons par consequent sur la face laterale de droite la force $(-X_{n+1}, -Z_{n+1})$.

Etant donne que notre systeme est generalement constitue de terre et d'eau, il est donc necessaire de faire apparaitre la pression intersticielle, qui s'ecrit sous la forme : $z \cdot \delta_w + u$.

Ou u est la surpression qui regne au point M, qui s'etablirait si la nappe phreatique etait au repos et en equilibre avec le niveau d'eau DC. La contrainte totale en M a pour composantes :

$$\delta = N/l \quad T = T/l$$

Pour apprecier la resistance au cisaillement, on considere plutot les contraintes effectives que totales. Par consequent, on a :

$$\delta' = (N'/l) = \delta - (z \cdot \delta_w + u) \quad \text{et} \quad T$$

En introduisant notre coefficient de securite (defini precedemment) on obtient les expressions suivantes :

$$T = (1/F)(C + \delta' \text{tg}(fi)) \quad \text{exprimee en termes de contraintes.}$$

$$T = (1/F)(C.l + N' \text{tg}(fi)) \quad \text{exprimee en termes de forces.}$$

Avec $\delta' = N'/l$ d'ou $N' = \delta.l - (z \cdot \delta_w + u).l$ d'ou

$$N' = N - (z \cdot \delta_w + u).l$$

Les divers tranches de notre massif peuvent avoir leur surface :
1) hors de l'eau : par consequent, il n'existe pas de composante

hydrostatique, c'est à dire une composante horizontale P et une composante verticale W_w , de la colonne d'eau se trouvant au dessus de la surface (fig 3b).

2) Sous l'eau: ce qui nous oblige à considerer les forces P_w et W_w (fig 3c).

D'une maniere generale, on considere la poids total :

- a) $W = W1 + (W2 + b.z.\delta_w)$, lorsque la surface de la tranche est hors de l'eau.
- W: poids total
- W1: poids du sol et de l'eau qu'il contient au dessus du niveau de reference (0).
- W2: poids de jauge du sol situe sous ce meme niveau de reference.

$$W + W_w = (W2 + b(z - h)\delta_w) + b.h.\delta_w = W2 + b.h.\delta_w$$

Lorsque la surface de la tranche est à une profondeur h sous le niveau d'eau consideré.

D'une maniere generale, on peut ecrire l'equation du poids total sous la forme:

$$W = W1 + (W2 + b.z.\delta_w)$$

ou, $W \neq 0$ pour une surface de tranche hors de l'eau.
 $W = 0$ pour une surface de tranche dans l'eau.

Nous pouvons ecrire maintenant nos equations d'equilibre .
 Selon l'axe Oy, nous avons :

$$Q \cos \alpha + W1 + W2 + b z \delta_w + (Z_n - Z_{n+1}) = N \cos \alpha + T \sin \alpha$$

Posons $\Delta_n Z = Z_n - Z_{n+1}$

En remplaçant N et T par leur expression en fonction de N' et E_s , on obtient: $N = N' - u l - \rho_3 \delta_w$ et $T = \frac{1}{F_s} (c l + N' \tan(\phi))$

D'ou
$$N' = \frac{Q \cos \alpha + W1 + W2 + \Delta_n Z - (c/F_s) b \tan \alpha}{\cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan(\phi)}{F_s} \right)}$$
 $\max = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan(\phi)}{F_s} \right)$

Dans la suite des calculs on posera

L'equation des moments de la somme de toutes les tranches est donnee par:

$$\sum [(W1 + W2 + b z \delta_w) x + Q y] = \sum \left[(N' + u l - \rho_3 \delta_w) f + \frac{1}{F_s} (c l + N' \tan(\phi)) e \right] + P_e$$

Les forces X_n et Z_n etant des forces internes, elles s'eliminent.

Nous remarquons donc que : $\sum b z \delta_w x = \sum \rho_3 \delta_w f + P_e$

- $\sum b z \delta_w$: moment du poids du volume CBM'DC.
- $\sum \rho_3 \delta_w$: moment des pressions hydrostatiques le long de D'MB.
- P_e : moment de la pression sur CB.

Après simplification on trouve :

$$\sum [(W1 + W2) x + Q y] = \sum (N' + u l) f + \frac{1}{F_s} \sum (c l + N' \tan(\phi)) a$$

D'ou l'on tire l'expression du coefficient de securite F :

$$F_s = \frac{\sum (c l + N' \tan(\phi)) a}{\sum [(W1 + W2) x + Q y] - \sum (N' + u l) f}$$

En remplaçant N' par sa valeur, on obtient :

$$F_s = \frac{\sum [c l + \tan(\phi) (Q \cos \alpha + W1 + W2 + \Delta_n Z - u l)] \frac{a}{\max}}{\sum [(W1 + W2) x + Q y] - \sum \left[(Q \cos \alpha + W1 + W2 + \Delta_n Z) + \frac{b \tan \alpha}{F_s} (u \tan(\phi) - c) \right] \frac{f}{\max}}$$

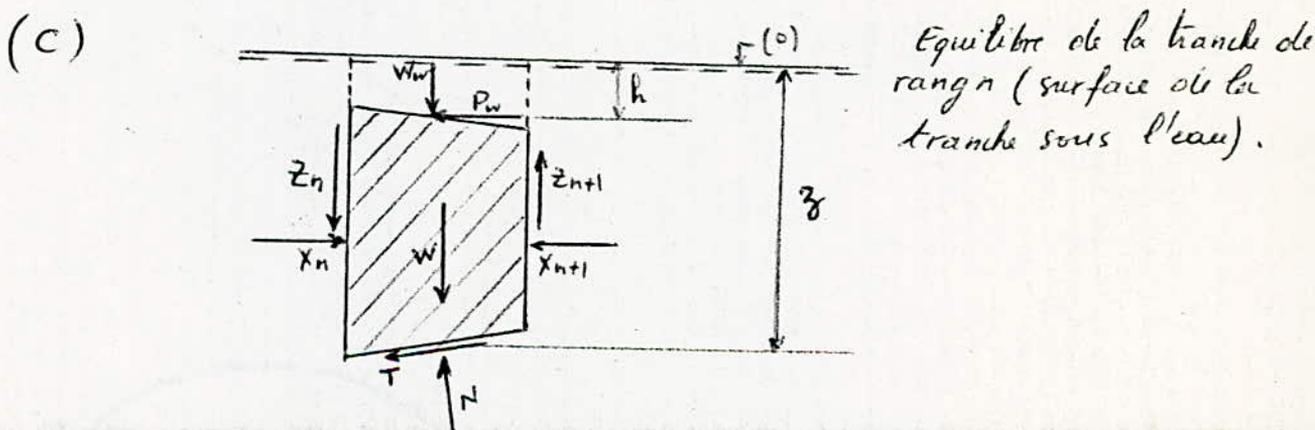
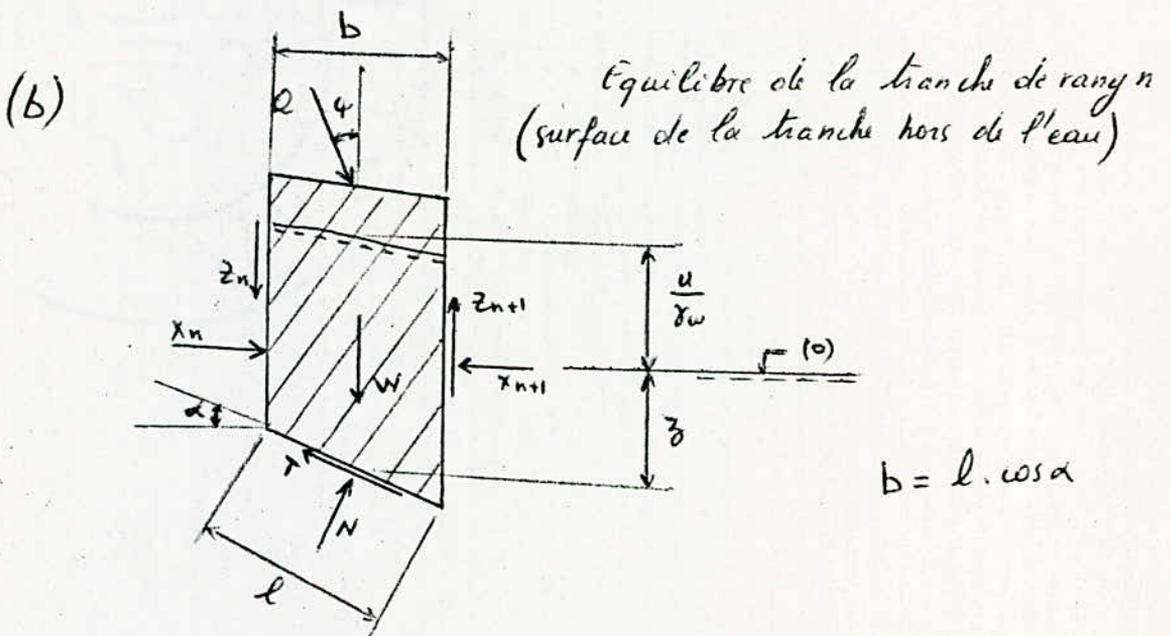
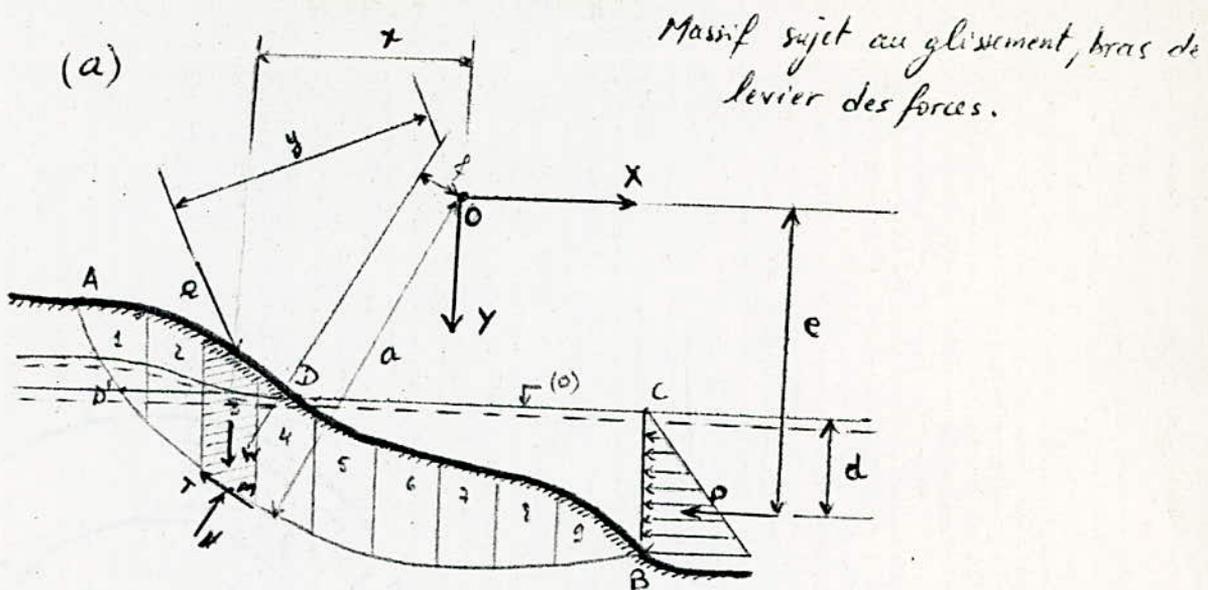


Fig 3: Méthode de tranches

Fig 3

Le deuxieme membre de cette equation contient P explicitement et par l'intermediaire de $m\alpha$.

Une condition reste à verifier, si l'on veut eviter de commettre de grossieres erreurs et qui est l'equation d'equilibre sur l'axe Ox. Donc, selon l'axe Ox, nous avons :

$$X_n - X_{n-1} + N \sin \alpha + Q \sin \phi = T \cos \alpha + P$$

En posant $X_n - X_{n-1} = \Delta_n X$, et en remplaçant N par sa valeur tiree de l'equation d'equilibre des forces verticales (selon l'axe Oy), on obtient :

$$Q \cos \phi + w_1 + w_2 + b \gamma \delta w + \Delta_n Z = N \cos \alpha + T \sin \alpha$$

On multiplie par $\text{tg}(\alpha)$, pour faire apparaitre $N \cdot \sin(\alpha)$, on obtient :

$$\Delta_n X + b \gamma \delta w \cdot \text{tg} \alpha - P w = (T / \cos \alpha) - \text{tg} \alpha (w_1 + w_2 + \Delta_n Z) - Q (\sin \phi + \cos \phi \text{tg} \alpha)$$

avec

$$T = \frac{1}{F_s} (C R + N' \text{tg}(\phi)) = \frac{1}{m \alpha F_s} [(Q \cos \phi + w_1 + w_2 + \Delta_n Z - u b) \text{tg}(\phi) + C b]$$

Par consequent, en tenant compte du fait que $\sum \Delta_n Z = 0$ et $\sum \Delta_n X = 0$ puisque dans chaque tranche $\Delta_n X$ et $\Delta_n Z$ equilibrent la resultante des forces exterieures. D'autre part la resultante des forces exterieures est nulle.

conditions

De toutes ces considerations decoulent des que nous resumerons en ce qui suit :

Pour satisfaire toutes les conditons d'equilibre du massif, les differences $\Delta_n Z$ doivent verifier les deux equations suivantes :

$$\Delta_n Z = 0$$

$$\text{et } \sum \Delta_n Z \text{tg} \alpha = \sum \left[\frac{T}{\cos \alpha} - \text{tg} \alpha (w_1 + w_2) - \frac{Q \sin(\alpha + \phi)}{\cos \alpha} \right]$$

$$\text{avec } T = \frac{1}{m \alpha} [(Q \cos \phi + w_1 + w_2 + \Delta_n Z - u b) \text{tg}(\phi) + C b]$$

Etant donner que nous nous interessons seulement au glissement du type circulaire, voyons ce qu'il en est de la methode de BISHOP et celle de FELLENIUS qui sont les plus adaptees à ce type de probleme.

METHODE DE BISHOP

BISHOP considere que la ligne de glissement est un arc de cercle, par consequent :

- $x = R \cdot \sin(\alpha)$
- $a = R$
- $f = 0$

Et l'on suppose que $Q = 0$

En prenant compte des efforts internes le coefficient de securite s'ecrit :

$$F_s = \frac{[C b + \text{tg}(\phi) \cdot (w_1 + w_2 - u b + \Delta_n Z)] / m \alpha}{\sum \sin \alpha (w_1 + w_2)}$$

appelee "Methode detaillee".

Dans le cas contraire $\Delta_n Z \neq 0$ et la methode est connue sous le nom de "Methode simplifiee".

METHODE DE FELLENIUS

FELLENIUS a fait une hypothese qui simplifie considerablement les calculs, à savoir que la force agissant sur l'arc AB etait le poids W (fig 4).

La somme de toutes les tranches, nous donne :

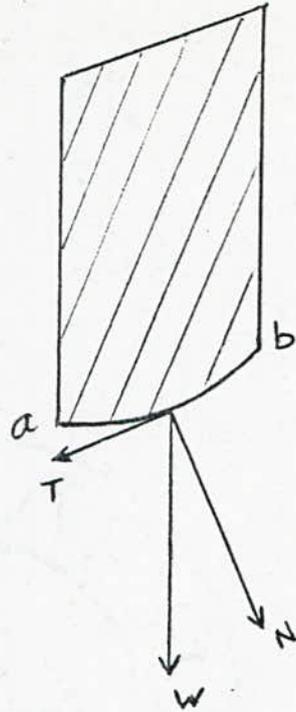


Fig 4

un moment total égal à la somme des moments de chaque tranche :

Le moment moteur dû à T est égal à $T.R$ (produit de T par R) .

Pour un sol homogène: $F_s = \frac{\sum [C_i \cdot \bar{a}b + N \cdot \text{tg}(\phi)]}{\sum T} = \frac{\sum [C_i + N \text{tg}(\phi)]}{\sum T}$

et pour un sol hétérogène: $F_s = \frac{\sum [C_i \cdot \bar{a}b + N \text{tg}(\phi)_i]}{\sum T}$

Si on affecte toutes les caractéristiques C_i et $\text{tg}(\phi)_i$, dû au coefficient de sécurité minimum recherché F_{\min} , on peut écrire :

$$C_i^* = C_i / F_{\min} \quad \text{et} \quad \text{tg}(\phi_{i_i}^*) = \text{tg}(\phi_i) / F_{\min}$$

La relation devient pour un cercle quelconque :

$$\frac{\sum [C_i^* \cdot \bar{a}b + N \text{tg}(\phi^*)]}{\sum T} = F_s / F_{\min}$$

La condition de stabilité de talus pour tous les cercles de rupture possible est :

$$F_s / F_{\min} \geq 1$$

Prevision des divers methodes de tranche; choix de la methode

La methode de FELLENIUS par rapport à la methode détaillée de BISHOP. Les écarts sur F_s peuvent atteindre 10%. Toutefois ceux ci sont modérés et vont dans le sens de la sécurité.

La methode de FELLENIUS qui a l'avantage de la simplicité peut être utilisée dans tout les cas courants.

Dans le cas où une grande précision est recherchée (stabilité des barrages en terre), il faut dire que la methode de BISHOP simplifiée est plus appropriée.

La différence entre la methode simplifiée et détaillée est de l'ordre de 1% .

La methode détaillée n'a que peu d'intérêt pratique.

Cet ensemble de notions qui a été présenté dans ce dans ce polycopé, va nous permettre d'aborder l'étude théorique, proprement dite de la stabilité des talus.

CHAPITRE 2

~~XX~~
* METHODES DE DETERMINATION *
* DE LA PENTE DES TALUS *
~~XX~~

METHODE DE DETERMINATION DE LA PENTE
DES TALUS

Differentes methodes peuvent etre utilisees pour la determination de la pente des talus .

Dans notre cas, nous utiliserons deux methodes, etablies par un meme auteur : MASLOV .

Les expressions analytiques de ces deux methodes sont les suivantes

* MASLOV (1) : $tg\beta = tg\phi + \frac{c}{\sigma.z}$

* MASLOV (2) : $x = \frac{1}{\sigma.tg\phi} \left[\sigma.z.tg\phi + c \ln c + c \ln (\sigma.z.tg\phi + c) \right]$

On considere arbitrairement que la hauteur du talus est de 30 metres et que la masse volumique (gamma) est de 20KPa/m :

En faisant varier la cohesion et l'angle de frottement interne, on obtient differentes valeurs de beta, que nous resumons sous forme de

Tableaux

```

DIMENSION T(60),D(60),A(60),X(60),TT(60),G(60),Z(60)
WRITE(25,*) '*****'
WRITE(25,*) '*****CALCUL DU PROFIL DE LA PENTE*****'
WRITE(25,*) '
D&P
WRITE(25,*) '*****LA METHODE DE MASLOU (par approche) (1)*****'
WRITE(25,*) '*****'
10 PRINT*, 'DONNER L"ANGLE DE FROTTEMENT'
ACCEPT*,Q
PRINT*, 'DONNER C; GAMMA'
ACCEPT*,C,G
PRINT*, 'DONNER LA HAUTEUR'
ACCEPT*,H
PRINT*, 'DONNER LE PAS'
ACCEPT*,P
DO 20 A1=P,H,P
K=A1/2
Z(K)=A1
TT(K)=1./A1
T(K)=TAN(Q)+(C/G)*TT(K)
PRINT*,T(K)
D(K)=ATAN(T(K))
A(K)=D(K)
X(K)=Z(K)/T(K)
20 CONTINUE
J=H/P
AA=X(J)
TAT=H/AA
AT=ATAN(TAT)
AT1=AT
WRITE(25,35)
WRITE(25,*) 'l"angle de frottement interne =',Q1,'degrees'
WRITE(25,*) 'la hauteur =',H,'m'
WRITE(25,*) 'la cohesion =',C,'kpa'
WRITE(25,*) 'le poids volumique =',G,'kn/m3'
WRITE(25,35)
WRITE(25,13)
WRITE(25,14)
35 FORMAT(20X)
13 FORMAT('**',1X,'TAN(A) ** A(K) ** X(K) ** Z(K) **')
14 FORMAT('**',1X,'----- ** ---- ** ---- ** ---- **')
DO 30 K=1,J
WRITE(25,12)T(K),A(K),X(K),Z(K)
12 FORMAT(4('**',2X,F5.2,1X),'**')
30 CONTINUE
WRITE(25,35)
WRITE(25,*) 'L"angle total de la pente est =',AT1
WRITE(25,*) 'Tan(a) est tangente alphi.'
WRITE(25,*) 'A(K) sont les angles des pentes'
WRITE(25,*) 'X(K) sont les abscisses'
WRITE(25,45)
WRITE(25,45)
WRITE(25,45)
WRITE(25,35)
WRITE(25,35)
45 FORMAT(3X,'*****')

```

```
WRITE(18,*)' T(a):les tangentes'  
WRITE(18,*)' a:angles correspondants'  
WRITE(18,*)' *****'  
PRINT*, 'SI VOUS VOULEZ RECOMMENCER TAPER 1'  
ACCEPT*,M  
IF(M.EQ.1)GO TO 100  
STOP  
END
```

 *****CALCUL DU PROFIL DE LA PENTE*****
 PAR

*****LA METHODE DE MASLOV (par approche) (1)*****

l'angle de frottement interne = 10.00000 degree
 la hauteur = 20.00000 m
 la cohesion = 50.00000 kpa
 le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
* 0.68 **	34.09 **	7.39 **	5.00 **
* 0.43 **	23.10 **	23.46 **	10.00 **
* 0.34 **	18.94 **	43.74 **	15.00 **
* 0.30 **	16.77 **	66.39 **	20.00 **

L'angle total de la pente est = 16.77268
 Tan(a) est tangente alpha
 A(K) sont les angles des pentes
 X(K) sont les abscisses

l'angle de frottement interne = 30.00000 degree
 la hauteur = 30.00000 m
 la cohesion = 50.00000 kpa
 le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
* 1.08 **	47.15 **	4.64 **	5.00 **
* 0.93 **	39.61 **	12.09 **	10.00 **
* 0.74 **	36.66 **	20.17 **	15.00 **
* 0.70 **	35.09 **	28.49 **	20.00 **
* 0.68 **	34.12 **	36.98 **	25.00 **
* 0.66 **	33.45 **	45.48 **	30.00 **

L'angle total de la pente est = 33.45498
 Tan(a) est tangente alpha
 A(K) sont les angles des pentes
 X(K) sont les abscisses

l'angle de frottement interne = 50.00000 degrees
la hauteur = 30.00000 m
la cohesion = 50.00000 kpa
le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
1.69 **	53.43 **	2.36 **	5.00 **
1.44 **	55.26 **	6.94 **	10.00 **
1.36 **	53.65 **	11.05 **	15.00 **
1.32 **	52.79 **	15.20 **	20.00 **
1.29 **	52.26 **	19.37 **	25.00 **
1.27 **	51.90 **	23.55 **	30.00 **

L'angle total de la pente est = 51.09727
Tan(a) est tangente alpha
A(K) sont les angles des pentes
X(K) sont les abscisses

l'angle de frottement interne = 50.00000 degrees
la hauteur = 30.00000 m
la cohesion = 30.00000 kpa
le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
1.49 **	56.17 **	3.35 **	5.00 **
1.34 **	53.31 **	7.46 **	10.00 **
1.29 **	52.26 **	11.62 **	15.00 **
1.27 **	51.71 **	15.80 **	20.00 **
1.25 **	51.33 **	19.99 **	25.00 **
1.24 **	51.16 **	24.18 **	30.00 **

L'angle total de la pente est = 51.15506
Tan(a) est tangente alpha
A(K) sont les angles des pentes
X(K) sont les abscisses

l'angle de frottement interne = 50.00000 degres
 la hauteur = 30.00000 m
 la cohesion = 10.00000 kpa
 le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
1.29 **	52.26 **	3.97 **	5.00 **
1.24 **	51.16 **	9.06 **	10.00 **
1.22 **	50.78 **	12.25 **	15.00 **
1.22 **	50.59 **	16.45 **	20.00 **
1.21 **	50.47 **	20.65 **	25.00 **
1.21 **	50.39 **	24.85 **	30.00 **

L'angle total de la pente est = 50.39194
 Tan(a) est tangente alpha
 A(K) sont les angles des pentes
 X(K) sont les abscisses

l'angle de frottement interne = 30.00000 degres
 la hauteur = 30.00000 m
 la cohesion = 30.00000 kpa
 le poids volumique = 20.00000 kn/m3

* TAN(A) **	A(K) **	X(K) **	Z(K) **
0.63 **	41.27 **	5.70 **	5.00 **
0.73 **	36.04 **	13.76 **	10.00 **
0.63 **	34.12 **	22.16 **	15.00 **
0.65 **	33.12 **	30.68 **	20.00 **
0.64 **	32.51 **	39.25 **	25.00 **
0.63 **	32.10 **	47.85 **	30.00 **

L'angle total de la pente est = 32.10394
 Tan(a) est tangente alpha
 A(K) sont les angles des pentes
 X(K) sont les abscisses


```

DIMENSION D(20),E(20),R(20),B(20),T(20),TT(20),G(20),X(20),NZ(20)
WRITE(18,*) '*****'
WRITE(18,*) '***** METHODE DE MASLOV *****'
WRITE(18,*) '***** (2) *****'
WRITE(18,*) '*****'
PRINT*, 'METHODE DE MASLOV'
100 PRINT*, 'DONNER LA MASSE VOLUMIQUE'
ACCEPT*, GAMMA
PRINT*, 'DONNER LA HAUTEUR MAXIMALE'
ACCEPT*, NHMAX
PRINT*, 'DONNER LA COHESION'
ACCEPT*, C
PRINT*, 'DONNER L'ANGLE'
ACCEPT*, FI
PRINT*, 'DONNER LE PAS'
ACCEPT*, L
PRINT*, 'DONNER LA VALEUR DE DEBUT'
ACCEPT*, K
PRINT*, 'SI VOUS VOUS ETES TROMPER TAPER 0'
ACCEPT*, Q
IF(Q.EQ.0) GO TO 100
A=TAN(FI)
AA=1/(GAMMA*TAN(FI)**2)
O=C*ALOG(C)
N=NHMAX/L
S=0
DO 4 J=1,N
D(J)=GAMMA*K*A
E(J)=D(J)+C
R(J)=C*ALOG(E(J))
B(J)=D(J)+O-R(J)
X(J)=AA*B(J)
T(J)=K/X(J)
TT(J)=ATAN(T(J))
G(J)=TT(J)
NZ(J)=K
K=K+L
CONTINUE
TP=T(N)
TTP=TT(N)
WRITE(18,*) ' la masse volumique est', GAMMA, 'KN/m.3'
WRITE(18,*) ' la hauteur maximale est', NHMAX, 'm'
WRITE(18,*) ' la cohesion est', C, 'KPA'
WRITE(18,*) ' l'angle de frottement est', FI, 'degrees'
WRITE(18,*) ' *****'
WRITE(18,*) ' # Zi # Xi # T(a) # a #'
WRITE(18,*) ' -----'
DO 5J=1,N
WRITE(18,10)NZ(J),X(J),T(J),G(J)
10 FORMAT(5X,'#',4X,I2,4X,'#',3(2X,F5.2,2X,'#'))
5 CONTINUE
WRITE(18,*) ' l'angle total est', TTP, 'degrees'
WRITE(18,*) ' la pente totale est', TP
WRITE(18,*) ' Zi: hauteurs'
WRITE(18,*) ' Xi: longueurs'

```

PRINT*, 'SI VOUS VOULER RECOMMENCER TAPER 0/
ACCEPTA, KK
IF(KK.EQ.0) GO TO 10
STOP
END

 ***** METHODE DE MASLOV *****
 ***** (2) *****

la masse volumique est 20.00000 kN/m3
 la hauteur maximale est 25m
 la cohesion est 50.00000 kPA
 l'angle de frottement est 10.00000 degrees

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	4.07	#	1.23	#	50.89	#
#	10	#	13.08	#	0.72	#	35.95	#
#	15	#	27.04	#	0.55	#	23.00	#
#	20	#	42.69	#	0.47	#	25.12	#
#	25	#	60.07	#	0.42	#	22.61	#

l'angle total est 22.60798 degrees
 la pente totale est 0.4161888

Zi: hauteurs

Xi: longueurs

T(a): les tangentes

a: angles correspondants

la masse volumique est 20.00000 kN/m3
 la hauteur maximale est 30m
 la cohesion est 50.00000 kPA
 l'angle de frottement est 30.00000 degrees

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	2.90	#	1.72	#	59.89	#
#	10	#	6.35	#	1.20	#	50.17	#
#	15	#	14.77	#	1.02	#	45.47	#
#	20	#	21.70	#	0.92	#	42.68	#
#	25	#	28.97	#	0.86	#	40.80	#
#	30	#	36.45	#	0.82	#	39.40	#

l'angle total est 39.47581 degrees
 la pente totale est 0.8230416

Zi: hauteurs
 Xi: longueurs
 T(a): les tangentes
 a: angles correspondants

la masse volumique est 20.00000 kN/m3
 la hauteur maximale est 30m
 la cohesion est 50.00000 kPA
 l'angle de frottement est 50.00000 degres

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	2.05	#	2.44	#	67.73	#
#	10	#	5.31	#	1.98	#	62.06	#
#	15	#	8.90	#	1.69	#	59.35	#
#	20	#	12.65	#	1.58	#	57.72	#
#	25	#	16.49	#	1.52	#	56.63	#
#	30	#	20.39	#	1.47	#	55.83	#

l'angle total est 55.82995 degres
 la pente totale est 1.471546

Zi: hauteurs
 Xi: longueurs
 T(a): les tangentes
 a: angles correspondants

la masse volumique est 20.00000 kN/m3
 la hauteur maximale est 30m
 la cohesion est 30.00000 kPA
 l'angle de frottement est 50.00000 degres

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	2.50	#	2.00	#	63.44	#
#	10	#	6.08	#	1.64	#	59.73	#
#	15	#	9.89	#	1.52	#	58.63	#
#	20	#	13.81	#	1.45	#	58.41	#
#	25	#	17.78	#	1.41	#	57.60	#
#	30	#	21.80	#	1.38	#	57.03	#

l'angle total est 54.02541 degres
 la pente totale est 1.376282

Zi: hauteurs
 Xi: longueurs
 T(a): les tangentes
 a: angles correspondants

la masse volumique est 20.00000 kN/m3
 la hauteur maximale est 30m
 la cohesion est 10.00000 kPA

l'angle de frottement est 50.00000 degres

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	3.30	#	1.52	#	56.63	#
#	10	#	7.27	#	1.38	#	54.03	#
#	15	#	11.33	#	1.32	#	52.97	#
#	20	#	15.43	#	1.30	#	52.33	#
#	25	#	19.55	#	1.28	#	52.00	#
#	30	#	23.69	#	1.27	#	51.70	#

l'angle total est 51.73492 degres

la pente totale est 1.266615

Zi: hauteurs Xi: longueurs

T(a): les tangentes a: angles correspondants

la masse volumique est 20.00000 kN/m3

la hauteur maximale est 30m

la cohesion est 30.00000 kPa

l'angle de frottement est 30.00000 degres

#	Zi	#	Xi	#	T(a)	#	a	#
#	5	#	3.83	#	1.30	#	52.56	#
#	10	#	10.22	#	0.98	#	44.40	#
#	15	#	17.38	#	0.86	#	40.32	#
#	20	#	24.92	#	0.80	#	38.77	#
#	25	#	32.68	#	0.76	#	37.43	#
#	30	#	40.60	#	0.74	#	36.40	#

l'angle total est 36.48026 degres

la pente totale est 0.7389290

Zi: hauteurs

Xi: longueurs

T(a): les tangentes

a: angles correspondants

Interpretation des courbes obtenues

Considerons la cohesion constante ($C=50$ KPa) et voyons comment varie l'angle β en fonction de θ (fig1; fig2; fig3). L'interpretation se resume en ce qui suit. Plus θ augmente plus la pente de chaque courbe augmente. On remarque aussi que les valeurs obtenues par chaque methode deviennent de plus en plus proches. Cette remarque est mise en evidence par la convergence des deux courbes.

Si nous considerons θ constant ($\theta=50^\circ$), il en ressort de la variation de β en fonction de C (fig3; fig4; fig5) que C n'a pas une grande influence sur la variation de β . D'une part, d'autre part, les courbes ne divergent que legerement.

En conclusion, nous pouvons donc dire, que la pente des talus est plus affectee par la variation de θ , que par celle de C . Dans le cas ou nous voulons que les deux methodes soient compatibles, il faut diminuer la cohesion et augmenter θ . D'une maniere generale, selon les conditions reelles du probleme, on peut faire varier soit l'un des parametres de la question (C ou θ), soit les deux simultanement.

40

30

25

20

15

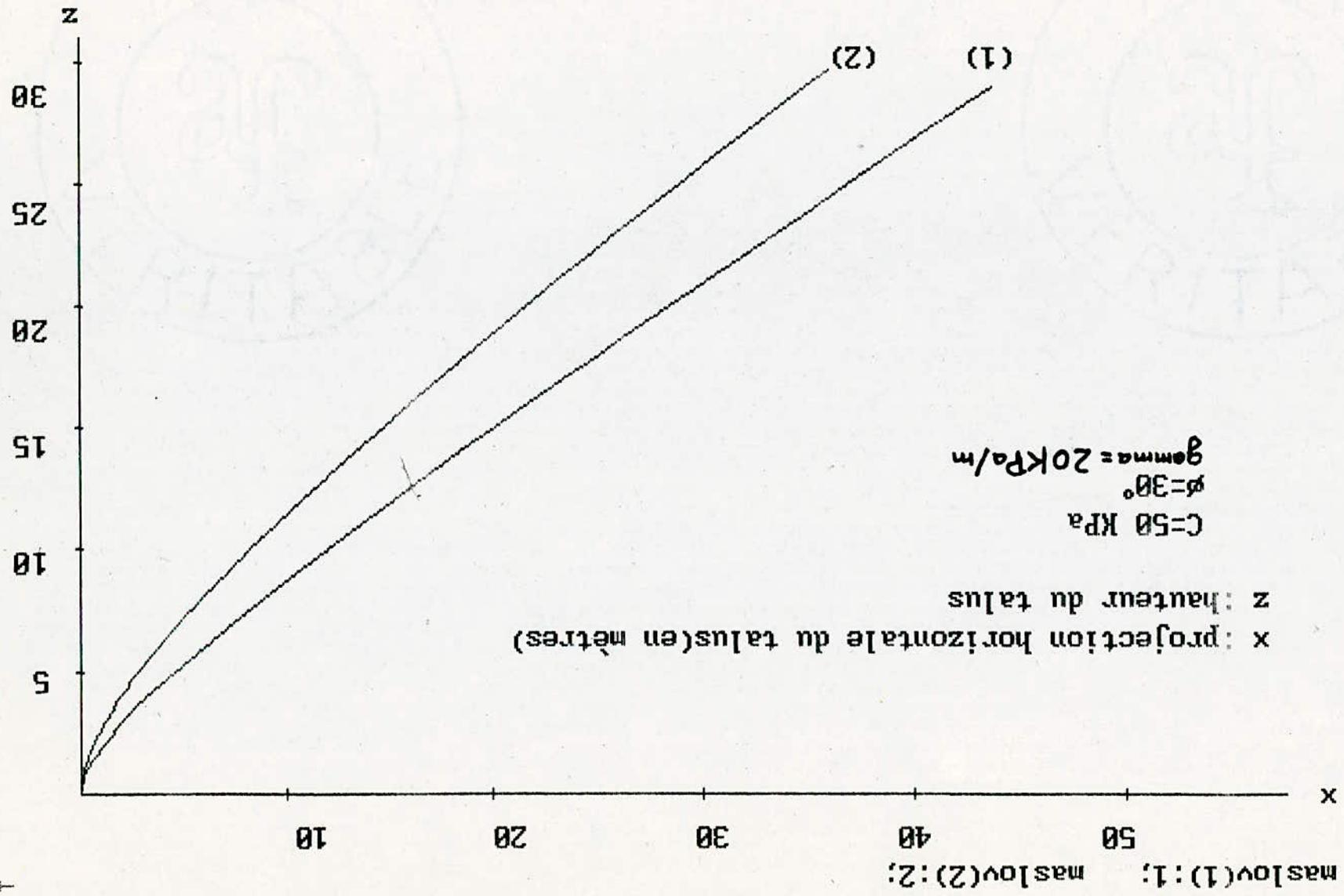
10

5

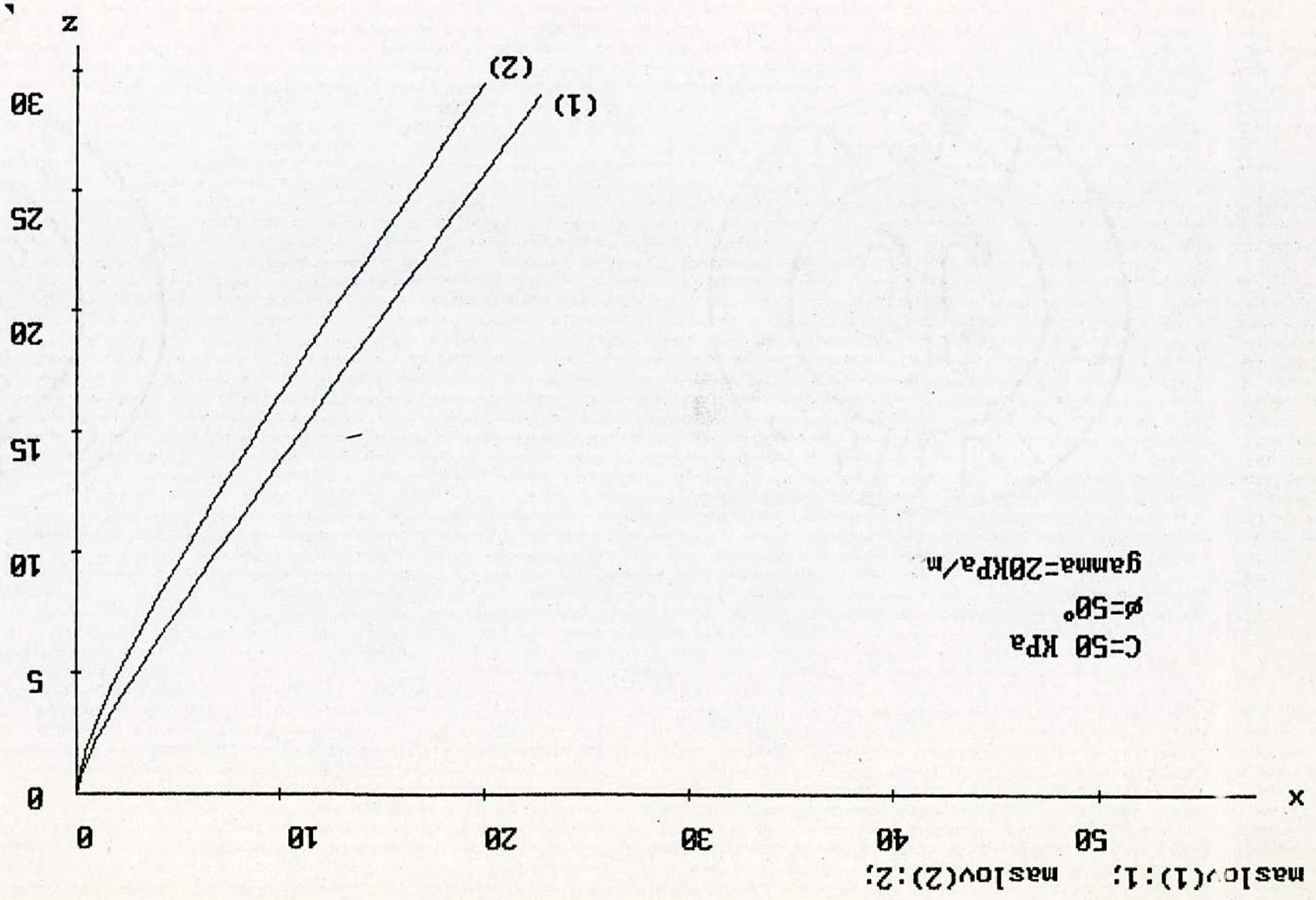
0

41

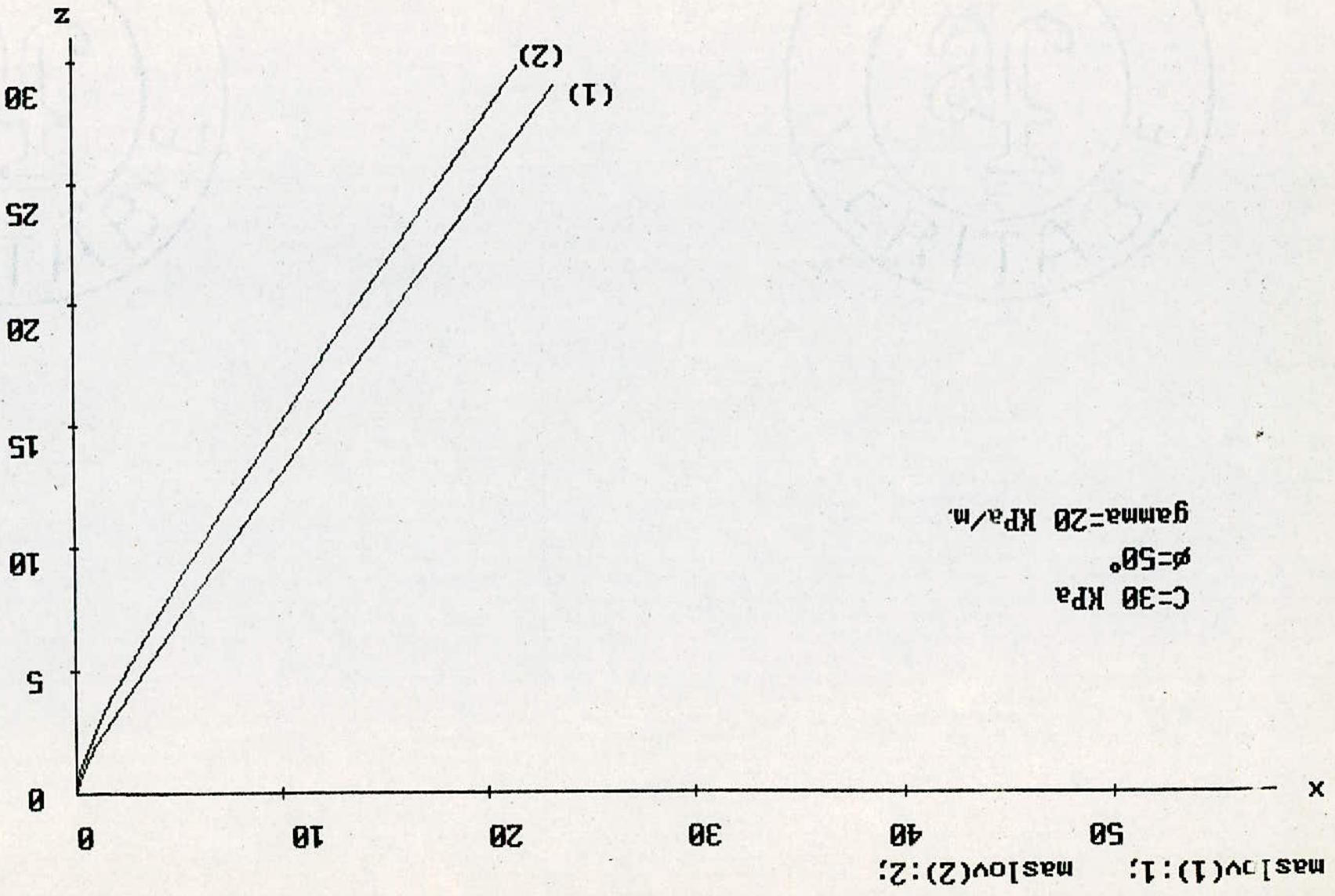
42



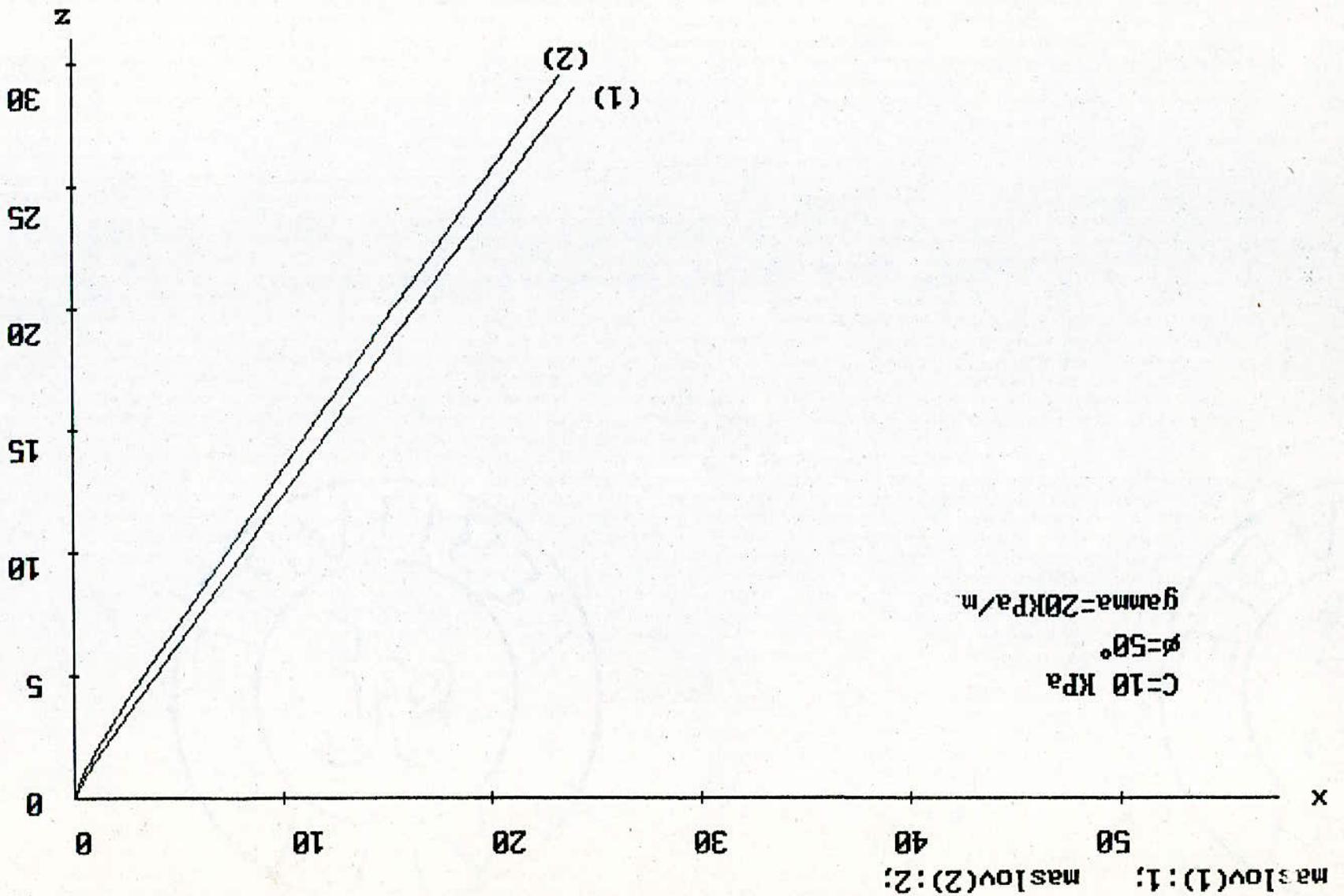
43



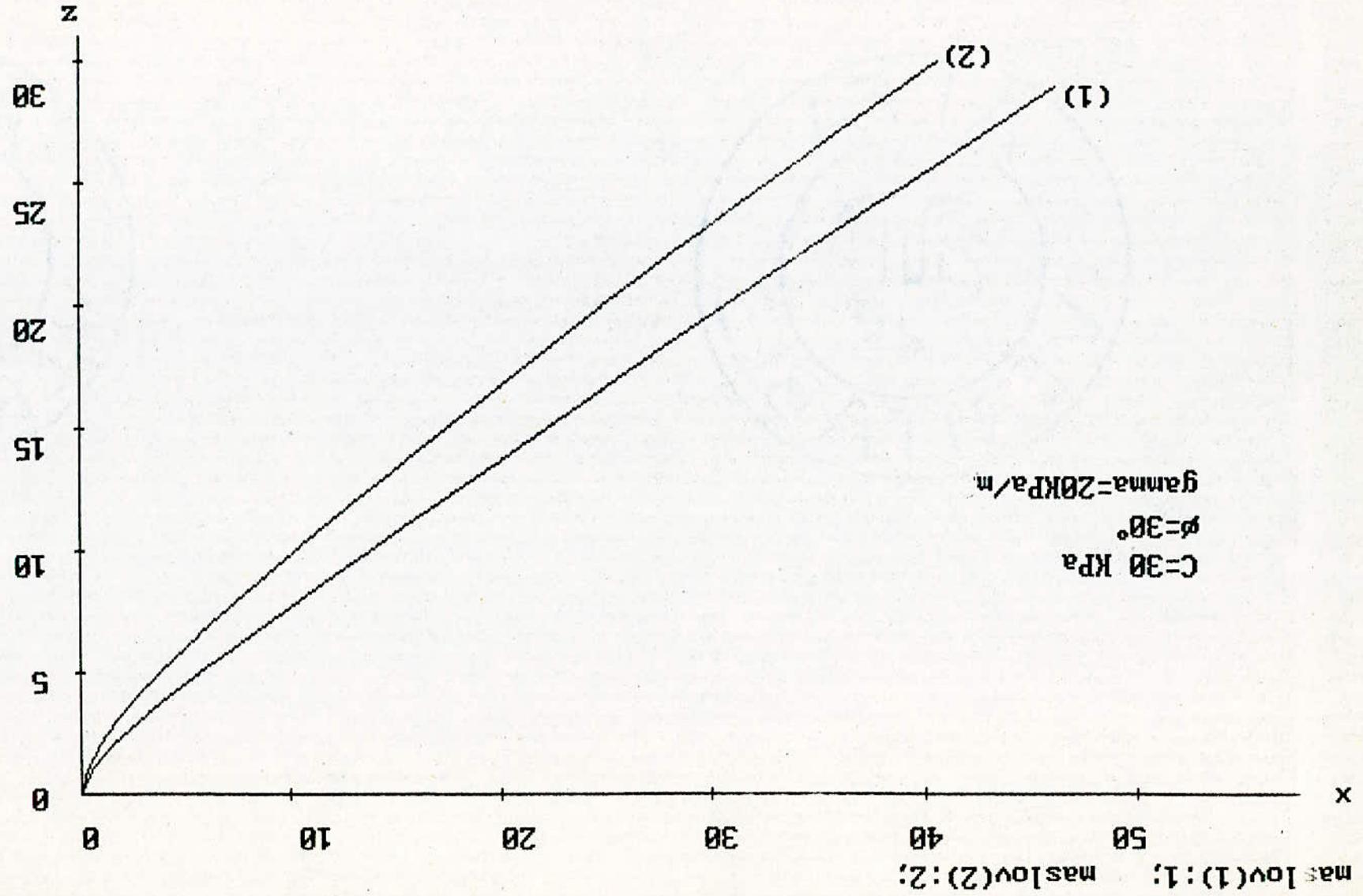
44



45



46



CHAPITRE 3

* ETUDE *
* DE LA STABILITE *

ETUDE DE LA STABILITE

L'etude bibliographique nous a permis d'avoir une idée assez claire du problème que nous devons résoudre .
Cependant , différentes méthodes de recherche du facteur de sécurité se présentent à nous , dont nous citons :

- Methode analytique .
- Methode graphique .
- Methode par ordinateur .

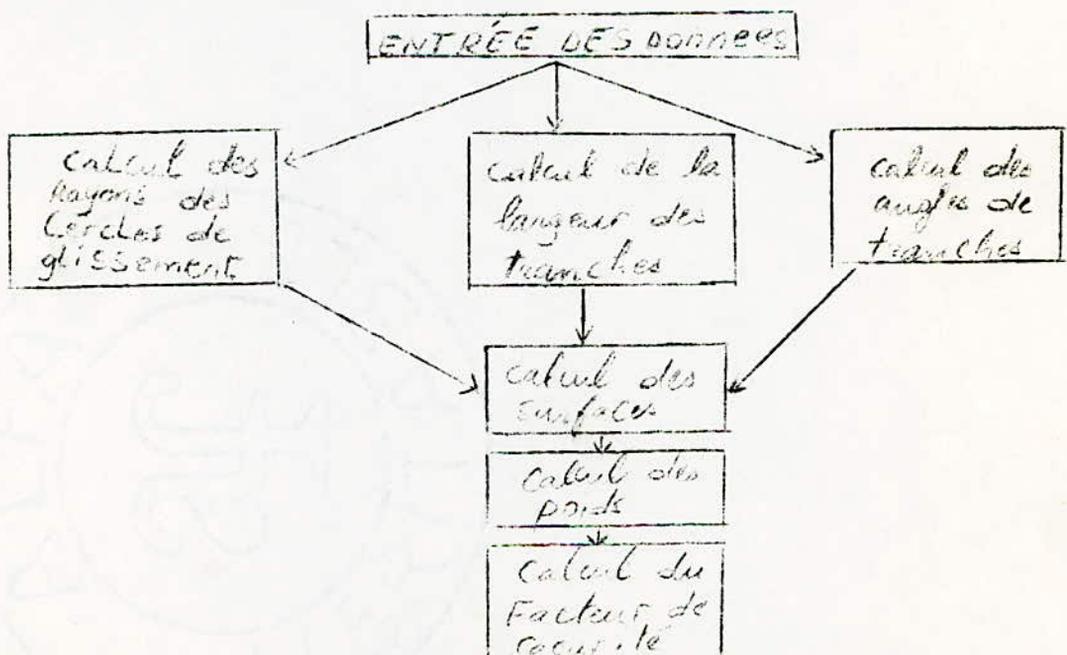
Les deux premières méthodes sont efficaces lorsque l'on étudie un exemple particulier de stabilité . Mais lorsque l'étude est générale , ces deux méthodes ne sont plus pratiques , car elles exigent beaucoup trop de temps .

La méthode par ordinateur , est la seule , capable de répondre aux exigences d'une telle étude .

Pour cela , avant d'aborder le calcul proprement dit du facteur de sécurité , nous parlerons tout d'abord de l'élaboration du programme informatique , permettant ce calcul (par la méthode de Fellenius) .

ELABORATION DU PROGRAMME INFORMATIQUE :

I- l'algorithme présenté ci dessous est valable aussi bien dans le cas d'un massif homogène que dans le cas d'un massif hétérogène .



Il est de notre devoir de donner quelques explications de cet algorithme , car il n'est pas aussi simple qu'il le parait .

Entrée des données :

Dans cette étape , il s'agit d'introduire les paramètres nécessaires au calcul de f_s , comme c , β , cohésion, ..

Calcul des rayons :

puisque l'on considère que le glissement est circulaire , il faut donc déterminer les rayons de l'arc de cercle formés par la masse glissante . nous disons les rayons et non le rayon , car à partir d'un point de la grille déterminant les coordonnées du facteur de sécurité (fig 3) nous pouvons obtenir une infinité de rayons .

Calcul de la largeur des tranches :

la largeur des tranches est un parametre essentiel dans le calcul des surfaces , qu'il faut obligatoirement déterminer (fig 3') .

Calcul des angles de tranches :

L'expression du facteur de sécurité contient les angles θ , comme nous l'avons précédemment cité .

Il est donc indispensable de les déterminer (fig 3') .

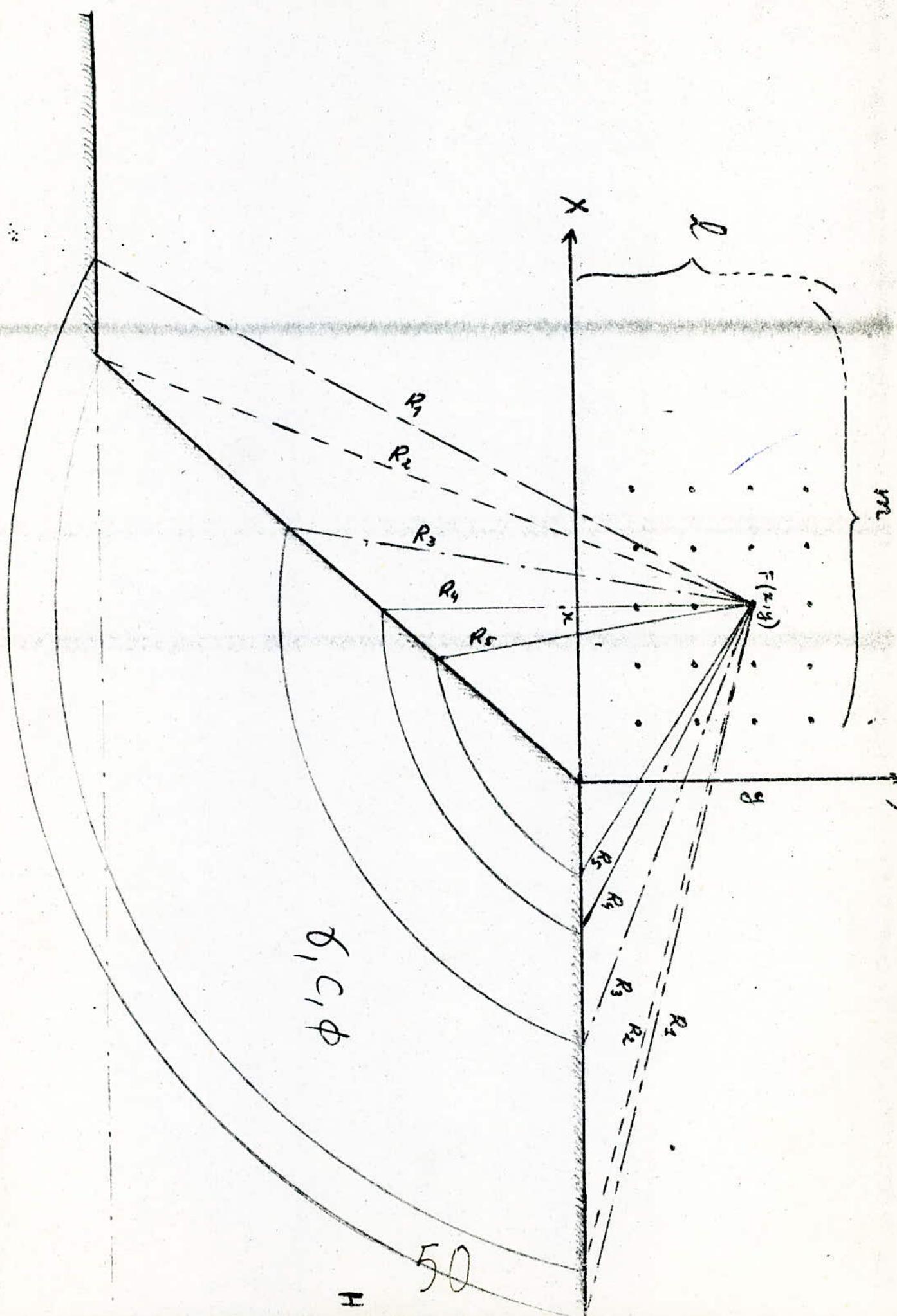
Calcul des surfaces :

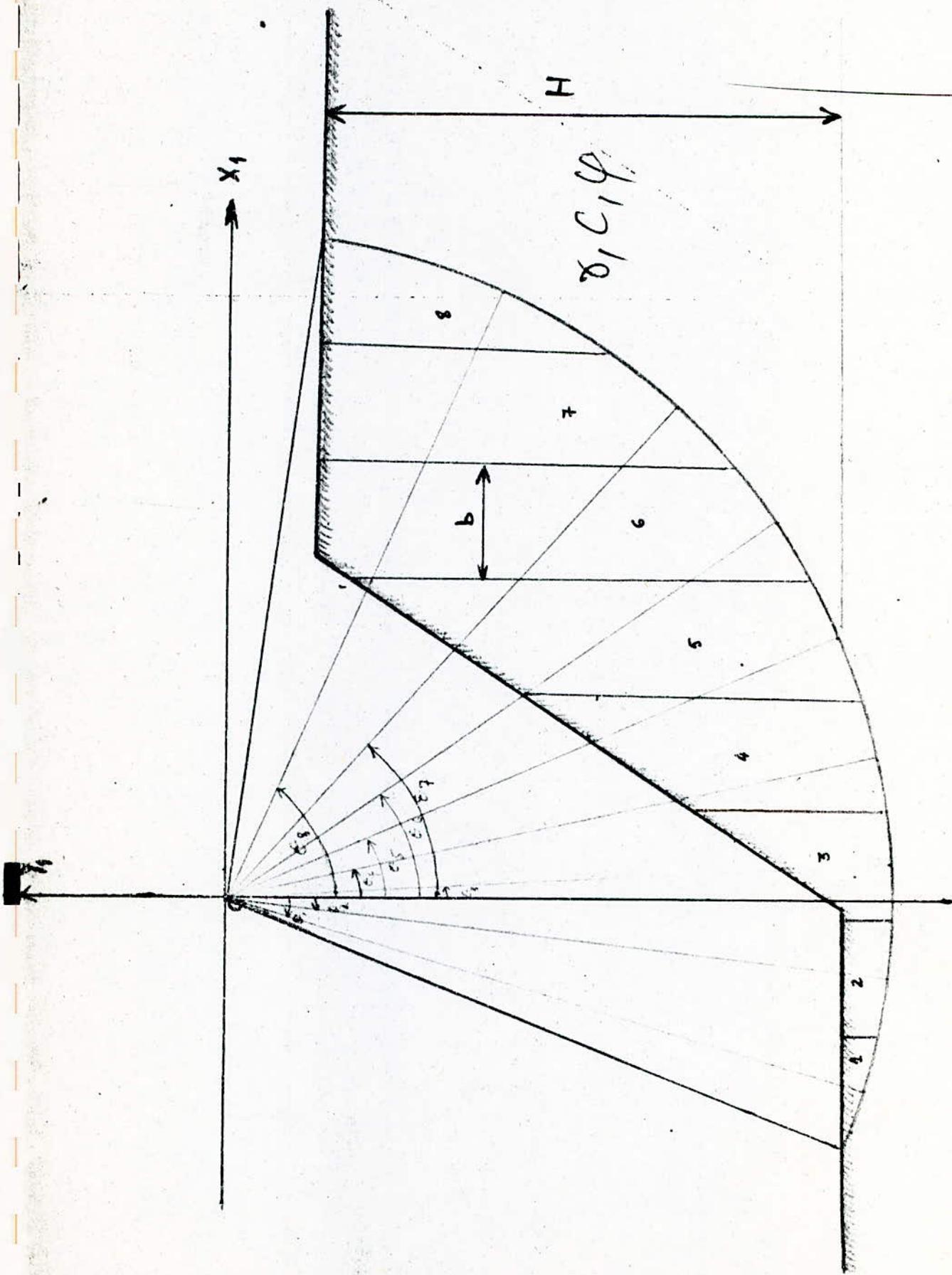
Il est tout à fait naturel , de calculer les surfaces si l'on veut déterminer le poids des tranches .

Calcul des poids :

L'expression du facteur de sécurité dépend des poids des tranches , donc il faut les déterminer .

Fig





Fig

Calcul du facteur de sécurité final :

Le calcul du facteur de sécurité final se fait en plusieurs étapes successives :

- 1- Pour un point de la grille correspondent n rayons .
Pour chaque rayon correspond un facteur de sécurité.
Donc nous avons n facteurs de sécurité . Il faut sélectionner le facteur de sécurité le plus défavorable (minimal) .
- 2- Nous avons d'autre part m.l points de la grille .
Par conséquent on obtient pour chaque point de la grille un facteur de sécurité minimal .
Il faut donc sélectionner le facteur de sécurité minimal pour toute cette gamme de valeurs .
De cette manière , on obtient le facteur de sécurité le plus défavorable .

2/ PROGRAMME INFORMATIQUE /

Voir listing

```

#####
PROGRAMME ELABORE SUR VAX 750 PAR
MESSIEURS :
CHABANE DJAMAL et SAOUDI ELYES
#####

```

```

*****
PROGRAMME DE CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE
DANS LE CAS D'UN MASSIF HOMOGENE
*****
*****
*****

```

```

DIMENSION Y7(200),X7(200),YY(200),S2(200),S3(200),W(200),
1ST(200),U(200),Z(200),RT(200,200),SF(200,200),
1TAT(200),TETA1(200),TETA(200),DELTA5(200),
1CS(200),FS(200,200),UU(200),UY(200)
PRINT*, 'DONNER DEBUT,FIN,et le PAS SUR LES ABSCISSES'
ACCEPT*,XA,XB,XC
PRINT*, 'DONNER DEBUT,FIN,et le PAS SUR LES ORDONNEES'
ACCEPT*,YA,YB,YC
PRINT*, 'DONNER L"ANGLE , LA HAUTEUR et LE Nbre DE TRANCHES '
ACCEPT*,ALPHA1,H,N
PRINT*, 'DONNER LE Nbre DE RAYONS'
ACCEPT*,NR
PRINT*, 'DONNER LE PAS SUR LE RAYON'
ACCEPT*,PR
PRINT*, 'GAMMA,C,FI'
ACCEPT*,GAMMA,C,FI
DO 13 IIK=1,N
PRINT*, 'DONNER UY(' ,IIK,')', 'ZII(' ,IIK,')'
ACCEPT*,UY(IIK),Z(IIK)
UY(IIK)=0
Z(IIK)=0
CONTINUE
WI=-1
PI=ACOS(WI)
ALPHA=(ALPHA1/180)*PI
fi=(fi/180)*pi
DO 10 XP=XA,XB,XC
DO 10 YP=YA,YB,YC
RA=SQRT(XP**2+YP**2)
Z1=1/TAN(ALPHA)
Z2=(XP+YP*TAN(ALPHA))/TAN(ALPHA)
FS1=1
CALCUL DES RAYONS ET DES ANGLES
*****
DO 15 I=1,NR
IF(I.NE.1) GO TO 1110
IZ=XP*TAN(ALPHA)+1
IF(YP.LE.IZ) GO TO 15

```

```

1115  R=RA+(I-1)*PR
      AE=1+Z1**2
      BE=Z1*Z2
      CE=Z2**2-R**2
      DELTA=BE**2-AE*CE
      IF(DELTA.LE.0) GO TO 15
      X11=- (BE+SQRT(DELTA))/AE
      X22=- (BE-SQRT(DELTA))/AE
      IF(X11.GT.0) GO TO 30
      IF(X22.LT.0) GO TO 40
      X1=X11
      GO TO 60
30    X1=X22
      GO TO 60
40    X13=ABS(X11)
      X23=ABS(X22)
      IF(X13.LT.X23) GO TO 50
      X1=-X13
      GO TO 60
50    X1=X23
60    XX1=X1
      H1=H+XP
      IF(XX1.LT.H1) GO TO 70
      IF(XX1.EQ.H1) GO TO 80
C     PRINT*, 'CAS DU CERCLE PROFOND'
C     *****
      YI=-SQRT(R**2-XP**2)
      XI=-XP
      YF=SQRT(R**2-H*(H+2*XP)-XP**2)
      XF=H+XP
      YF1=-YF
      AM=YF-YI
      B=AM/N
      BL=AM/(N-1)
      YFF=YF1+BL
      H1=H
      OAA=H1/TAN(ALPHA)
      OA=ABS(OAA)
      AA1=H1/TAN(ALPHA)
C     PRINT*, 'OA=', OA
      DO 120 J=1, N
      TAT(J)=YFF/R
      TETA1(J)=ASIN(TAT(J))
      TETA(J)=(TETA1(J)/PI)*180
C     PRINT*, 'TETA', TETA(J)
      YFF=YFF+B
120   CONTINUE
      GO TO 20
C     PRINT*, 'CAS DU CERCLE DE PENTE'
C     *****
70    YI=-SQRT(R**2-XP**2)
      XI=-XP
      YF=-Z1**2-Z2
      YF1=-YF
      XF=X1

```

```

AM=YF-YI
B=AM/N
BL=AM/(N-1)
YFF=YF+BL
OA=0
H6=XP+XF
H1=ABS(H6)
AA1=H1/TAN(ALPHA)
DO 100 J=1,N
TAT(J)=YFF/R
TETA1(J)=ASIN(TAT(J))
TETA(J)=(TETA1(J)/PI)*180
PRINT*, 'TETA', TETA(J)
YFF=YFF+B
100 CONTINUE
GO TO 20
PRINT*, 'CAS DU CERCLE DE PIED'
*****
80 YI=-SQRT(R**2-XP**2)
XI=-XP
XF=-(H+XP)
YF=-Z1*XF-Z2
YF1=-YF
AM=YF-YI
B=AM/N
BL=AM/(N-1)
YFF=YF1+BL
OA=0
H1=H
AA1=H/TAN(ALPHA)
DO 110 J=1,N
TAT(J)=YFF/R
TETA1(J)=ASIN(TAT(J))
TETA(J)=(TETA1(J)/PI)*180
PRINT*, 'TETA', TETA(J)
YFF=YFF+B
110 CONTINUE
NN=N+1
DO 401 IJ=1,NN
X7(IJ)=(IJ-1)*b
B5=-XF
C5(IJ)=(X7(IJ)-YF)**2+XF**2-R**2
DELTA5(IJ)=b5**2-c5(IJ)
IF(DELTA5(IJ).LT.0) GO TO 401
YB1=B5+SQRT(DELTA5(IJ))
YB2=B5-SQRT(DELTA5(IJ))
IF(YB1.LT.0) GO TO 403
IF(YB2.LT.0) GO TO 404
GO TO 405
401 Y7(IJ)=YB1
GO TO 401
404 Y7(IJ)=YB2
GO TO 401
403 IF(YB1.LE.YB2) GO TO 403
GO TO 404

```

```

401  CONTINUE
C    CALCUL DES SURFACES
C    *****
S=0
WW=0
DO 9 II=2,NN
IF(X7(II).GT.OA) GO TO 19
YY(II)=0
S1=0
GO TO 90
19  IF(X7(II-1).GT.OA) GO TO 29
SS1=((X7(II)-OA)**2*TAN(ALPHA))/2
SS2=(OA-X7(II-1))*(X7(II)-OA)*TAN(ALPHA)
YY(II)=(X7(II)-OA)*TAN(ALPHA)
S1=SS1+SS2
GO TO 90
29  IF(X7(II).GT.OA1) GO TO 39
AA=X7(II)
S1=(b**2*TAN(ALPHA))/2
YY(II)=(X7(II)-OA)*TAN(ALPHA)
GO TO 90
39  IF(X7(II-1).GT.OA) GO TO 49
YY(II)=H1
S1=(OA1-X7(II-1))*2*TAN(ALPHA)
GO TO 90
49  S1=0
YY(II)=H1
90  S2(II-1)=((Y7(II)-Y7(II-1))*b)/2
S3(II-1)=(YY(II)-Y7(II))*b
ST(II-1)=S3(II-1)+S2(II-1)-S1
W(II-1)=ST(II-1)*GAMMA+Z(II-1)
S=S+ST(II-1)
WW=WW+W(II-1)
C    PRINT*, 'WW', W(II-1), 'ST', ST(II-1)
9    CONTINUE
C    CALCUL DU FACTEUR DE SECURITE
C    *****
ANU=0
D=0
DO 69 K=1,N
D=D+W(K)*SIN(TETA1(K))
U(K)=C*b/COS(TETA1(K))
UU(K)=(W(K)*COS(TETA1(K))-UY(K)*b/COS(TETA1(K)))*TAN(FI)
ANU=ANU+U(K)+UU(K)
69  CONTINUE
C    PRINT*, 'NU=', ANU, 'D=', D
FS(XP,YP)=ANU/D
IF(FS(XP,YP).LT.FS1) GO TO 79
FS(XP,YP)=FS1
GO TO 15
79  FS1=FS(XP,YP)
RT(XP,YP)=R
C    PRINT*, 'R=', R, 'FS(XP,YP)=', FS(XP,YP)
15  CONTINUE
C    PRINT*, 'FS(', XP, YP, ')=', FS1, 'R=', RT(XP,YP)

```

```
10 CONTINUE
   FSPC=100
   DO 18 XP=XA,XB,XC
   DO 18 YP=YA,YB,YC
   IF(FS(XP,YP).LT.FSPC) GO TO 17
   GO TO 18
17 FSPC=FS(XP,YP)
   SF(XP,YP)=FS(XP,YP)
   ZX=XP
   ZY=YP
18 CONTINUE
   PRINT*, 'SF(',ZX,ZY,')=',FSPC
   GO TO 150
150 STOP
   END
```

Calcul du facteur de sécurité :

Il s'agit de faire varier les différents paramètres qui influent sur le facteur de sécurité, ensuite d'étudier l'évolution de celui-ci.

Nous devons passer par deux étapes fondamentales :

- a- Calcul de f_s : Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, mettant en évidence :
- L'angle de talus β (en degré) .
 - L'angle de frottement interne ϕ (en degré) .
 - La cohésion C (en KPa)
 - Le facteur de sécurité (sans unité) .
 - Les coordonnées x et y du facteur de sécurité selon le repère adopté (fig 3") .

 * VALEURS DU COEFFICIENT DE SECURITE *
 * OBTENUES A PARTIR DU PROGRAMME *
 * ELABORE *

UNITES:

 COHESION -->: KPa
 GAMMA ----->: KPa/m2
 RAYON ----->: m
 FI et BETTA : degres
 X et Y : coordonnees du facteur de securite sur la grille

COHESION= 20 ; GAMMA= 20 ; NT= 20

 # BETTA # FI # Rayon # FDS # X # Y #

 # 20 # 10 # 71.73 # 0.860 # 36# 55#
 # 20 # 20 # 77.40 # 1.447 # 44# 60#
 # 20 # 30 # 88.04 # 2.090 # 56# 64#
 # 20 # 40 # 93.55 # 2.870 # 62# 66#

 # 30 # 10 # 50.28 # 0.650 # 19# 40#
 # 30 # 20 # 57.62 # 1.040 # 27# 44#
 # 30 # 30 # 57.20 # 1.460 # 27# 47#
 # 30 # 40 # 62.90 # 1.970 # 33# 50#

 # 40 # 10 # 50.68 # 0.541 # 21# 36#
 # 40 # 20 # 48.05 # 0.820 # 18# 38#
 # 40 # 30 # 54.88 # 1.135 # 24# 46#
 # 40 # 40 # 59.43 # 1.490 # 28# 49#

 # 50 # 10 # 42.24 # 0.456 # 12# 31#
 # 50 # 20 # 55.20 # 0.690 # 22# 44#
 # 50 # 30 # 55.19 # 0.920 # 22# 44#
 # 50 # 40 # 58.95 # 1.200 # 23# 51#

COHESION= 30 ; GAMMA= 20 ; NT= 20

```

# BETTA # FI # Rayon # FDS # X # Y #
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 20 # 10 # 73.30 # 1.000 # 34# 51#
# 20 # 20 # 77.40 # 1.605 # 43# 57#
# 20 # 30 # 80.00 # 2.266 # 47# 61#
# 20 # 40 # 85.32 # 3.056 # 53# 63#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 30 # 10 # 49.31 # 0.778 # 16# 37#
# 30 # 20 # 53.88 # 1.186 # 23# 42#
# 30 # 30 # 57.62 # 1.630 # 27# 44#
# 30 # 40 # 57.20 # 2.143 # 27# 47#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 40 # 10 # 42.24 # 0.654 # 12# 31#
# 40 # 20 # 53.94 # 0.970 # 24# 36#
# 40 # 30 # 48.05 # 1.280 # 18# 36#
# 40 # 40 # 54.88 # 1.667 # 24# 46#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 50 # 10 # 47.36 # 0.570 # 17# 31#
# 50 # 20 # 53.78 # 0.816 # 22# 39#
# 50 # 30 # 55.20 # 1.070 # 22# 44#
# 50 # 40 # 55.20 # 1.350 # 22# 44#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#

```

COHESION= 40 ; GAMMA= 20 ; NT= 20

```

# BETTA # FI # Rayon # FDS # X # Y #
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 20 # 10 # 72.20 # 1.127 # 32# 51#
# 20 # 20 # 74.82 # 1.756 # 40# 56#
# 20 # 30 # 80.03 # 2.430 # 46# 58#
# 20 # 40 # 80.00 # 3.232 # 47# 61#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 30 # 10 # 51.35 # 0.900 # 18# 35#
# 30 # 20 # 50.28 # 1.326 # 19# 40#
# 30 # 30 # 55.74 # 1.773 # 25# 43#
# 30 # 40 # 57.20 # 2.311 # 27# 47#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
# 40 # 10 # 42.46 # 0.772 # 12# 28#
# 40 # 20 # 50.68 # 1.097 # 21# 36#
# 40 # 30 # 48.05 # 1.420 # 18# 38#
# 40 # 40 # 48.05 # 1.810 # 18# 38#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#
#*****#*****#*****#*****#*****#*****#*****#

```

```

# 50 # 10 # 37.00 # 0.674 # 07# 24#
# 50 # 20 # 42.24 # 0.927 # 12# 31#
# 50 # 30 # 53.78 # 1.200 # 22# 39#
# 50 # 40 # 55.20 # 1.501 # 22# 44#
*****
*****

```

COHESION= 50 ; GAMMA= 20 ; NT= 20

```

# BETTA # FI # Rayon # FDS # X # Y #
*****
# 20 # 10 # 71.17 # 1.254 # 30# 51#
# 20 # 20 # 70.66 # 1.900 # 34# 55#
# 20 # 30 # 76.80 # 2.583 # 42# 57#
# 20 # 40 # 77.40 # 3.400 # 44# 60#
*****
*****
# 30 # 10 # 49.58 # 1.019 # 16# 34#
# 30 # 20 # 51.94 # 1.456 # 20# 36#
# 30 # 30 # 53.88 # 1.915 # 23# 42#
# 30 # 40 # 52.06 # 2.468 # 21# 41#
*****
*****
# 40 # 10 # 40.79 # 0.882 # 10# 27#
# 40 # 20 # 42.24 # 1.208 # 12# 31#
# 40 # 30 # 53.94 # 1.568 # 24# 38#
# 40 # 40 # 45.00 # 1.950 # 15# 36#
*****
*****
# 50 # 10 # 42.87 # 0.783 # 13# 28#
# 50 # 20 # 42.24 # 1.043 # 12# 31#
# 50 # 30 # 33.29 # 1.325 # 4# 27#
# 50 # 40 # 53.78 # 1.645 # 22# 39#
*****
*****

```

COHESION= 60 ; GAMMA= 20 ; NT= 20

```

# BETTA # FI # Rayon # FDS # X # Y #
*****
# 20 # 10 # 73.66 # 1.377 # 29# 51#
# 20 # 20 # 75.82 # 2.037 # 37# 52#
# 20 # 30 # 74.82 # 2.733 # 40# 56#

```


20	3.23	3.68	20	3.40	4.94
25	3.24	3.10	25	3.41	3.95
30	3.23	2.58	30	3.40	3.29
35	3.23	2.21	35	3.40	2.82
40	3.23	1.94	40	3.40	2.47
45	3.23	1.72	45	3.40	2.19
50	3.23	1.55	50	3.40	1.98

NT	FS(46,58) C=60	L
5	3.77	20.51
10	3.58	10.26
15	3.59	6.84
20	3.56	5.13
25	3.57	4.10
30	3.56	3.42
35	3.55	2.93
40	3.56	2.56
45	3.55	2.28
50	3.56	2.05

FS(X,Y):FACTEUR DE SECURITE
 NT :NOMBRE DE TRANCHES
 L :LARGEUR DE LA
 TRANCHE
 C :COHESION

INTERPRETATION DES RESULTATS

i- Interpretation des courbes du facteur de sécurité en fonction de la cohésion .

L'information la plus frappante qui ressort de l'étude des courbes (fig 3.1), est que le facteur de sécurité augmente linéairement en fonction de la cohésion .

On remarque un groupement des droites qui deviennent de plus en plus serrées, d'une part , et d'autre part, l'ensemble des courbes est translaté vers le bas au fur et à mesure que β (angle de pente) augmente .

ainsi, plus β augmente un plus grand nombre de valeurs du facteur de sécurité deviennent inférieures à 1, qui est la valeur théorique limite du facteur de sécurité . par conséquent notre talus devient moins stable .

Une dernière remarque mérite d'être citée . Les valeurs les plus élevées du facteur de sécurité, c'est à dire les droites les plus élevées correspondent à l'angle de frottement interne maximal (40°). D'un point de vue mathématique , l'expression du facteur de sécurité s'écrit :

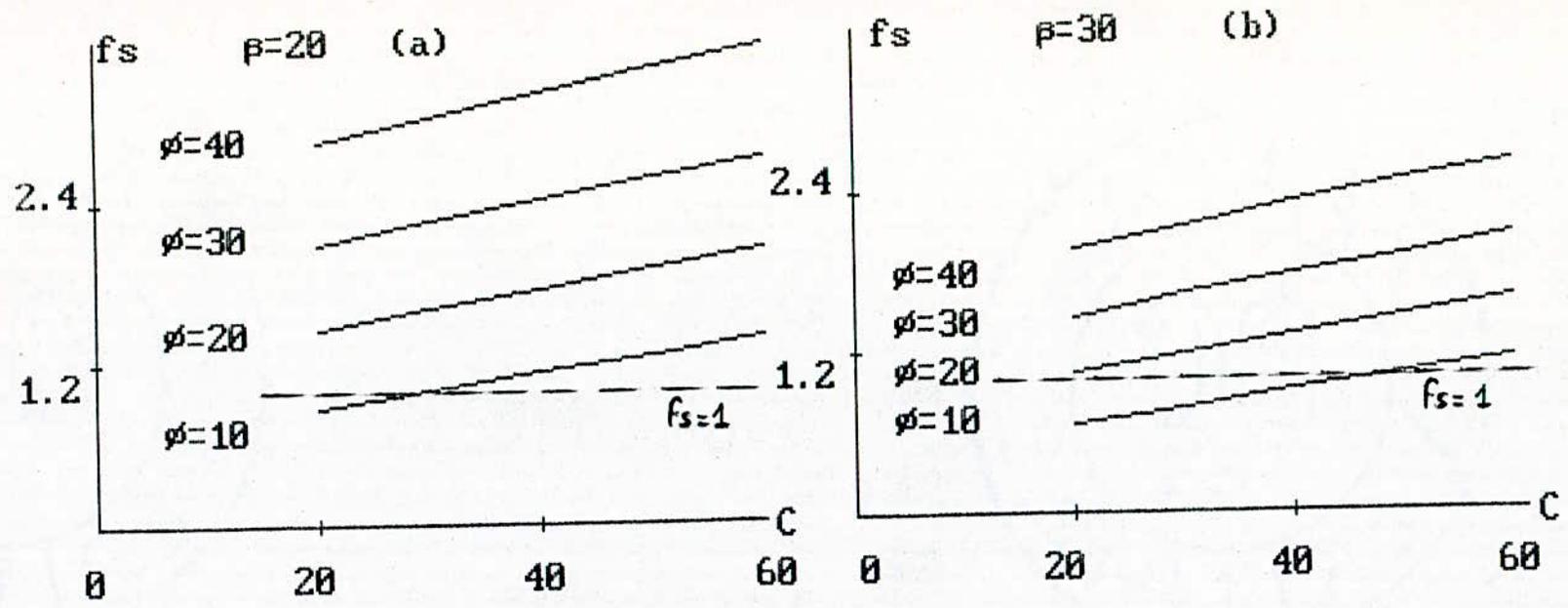
$$F_s = \frac{\sum \frac{c \cdot b}{\cos \alpha_i} + \left(\sum W \cos \alpha_i - \frac{u \cdot b}{\cos \alpha_i} \right) \cdot \tan \phi}{\sum W \sin \alpha_i}$$

$$F_s = \frac{\sum \left(W \cos \alpha_i - \frac{u \cdot b}{\cos \alpha_i} \right) \cdot \tan \phi}{\sum W \sin \alpha_i} + \frac{\sum \frac{b}{\cos \alpha_i} \cdot c}{\sum W \sin \alpha_i}$$

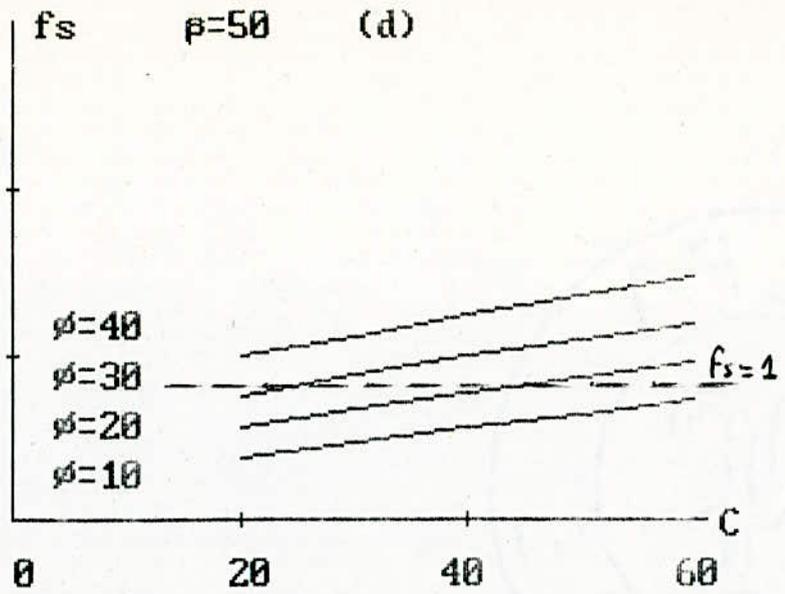
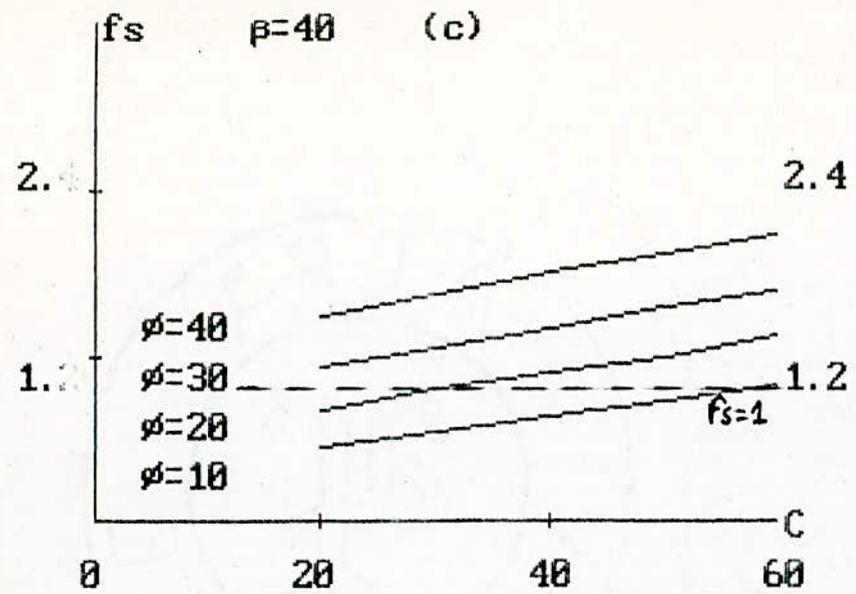
EN CONSIDERANT :

$$\left(\sum \frac{b}{\cos \alpha_i} \right) / \sum W \sin \alpha_i = A$$

$$B = \frac{\left(\sum W \cos \alpha_i - \frac{u \cdot b}{\cos \alpha_i} \right) \cdot \tan \phi}{\sum W \sin \alpha_i}$$



C : cohesion
 fs:facteur de securité
 β : angle de talus
 ϕ : angle de frottement interne



VARIATION DU FACTEUR DE SECURITE EN FONCTION DE C

C étant la variable que l'on désignera mathématiquement comme étant x , et f_s comme étant y , et on obtient la fonction désignée par l'équation suivante :

$$y = a \cdot x + b$$

qui est une équation linéaire (d'une droite), dont la pente est exprimée par la valeur de a , et l'abscisse à l'origine par la valeur de b .

Dans notre cas la pente a est supérieure à zéro, et aussi b , par conséquent l'aspect mathématique de f_s confirme parfaitement les résultats que nous avons obtenu.

si nous examinons le problème d'un point de vue physique, la cohésion étant l'affinité (ou bien la liaison) qui existe entre les particules d'un sol donné, il serait tout à fait naturel que lorsque la cohésion entre les particules de matière augmente, il en résulte que notre masse de matière glissante devient donc plus stable. Il serait donc moins probable qu'il se produise un glissement.

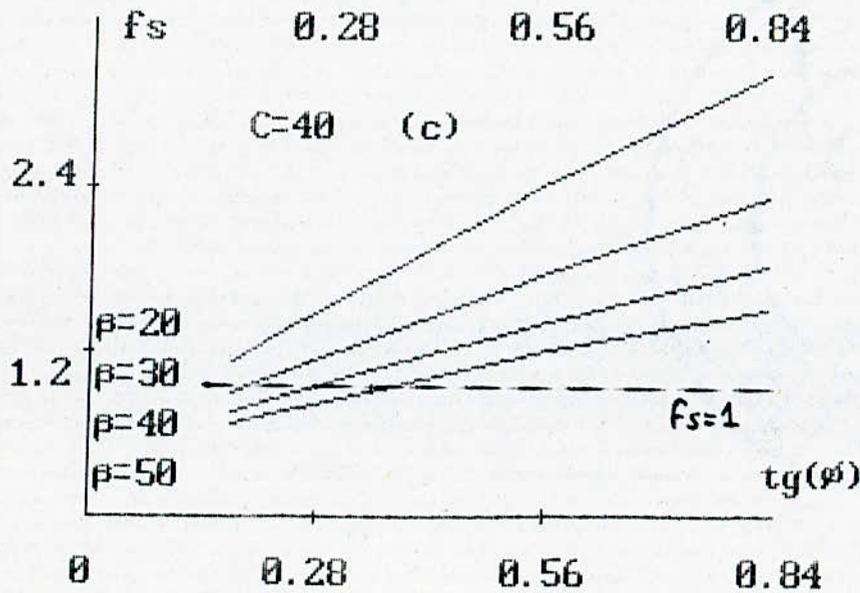
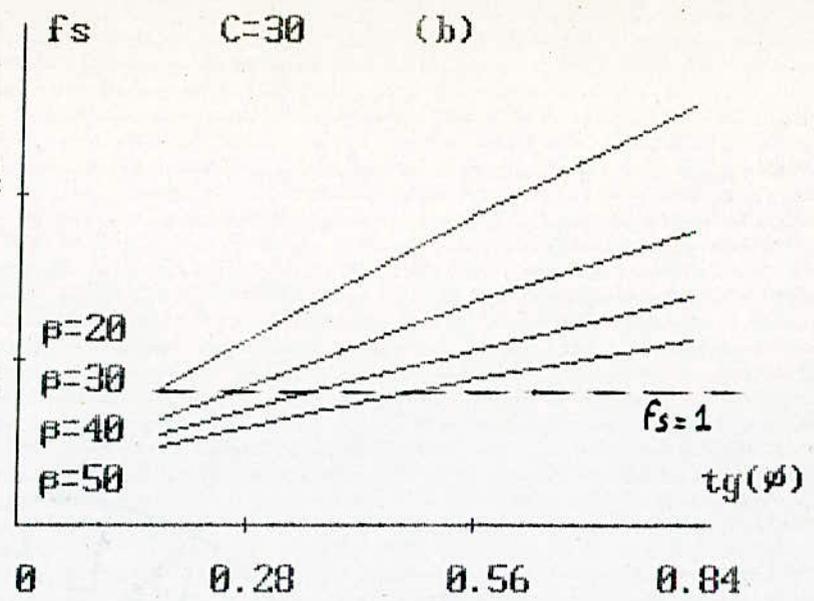
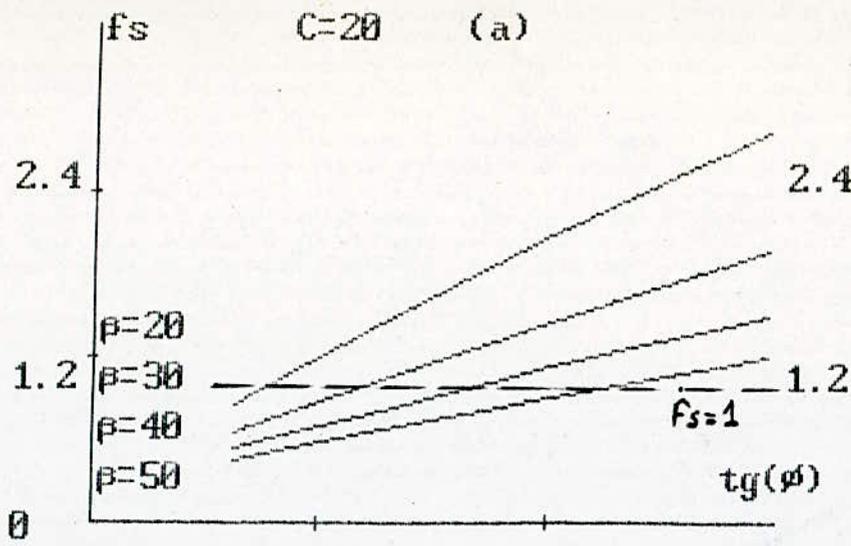
2- Interpretation des courbes du facteur de securite en fonction de $\text{tg} \phi$ (Fig 3.2)

comme dans le cas $f_s = f(C)$, nous remarquons que f_s augmente linéairement en fonction de $\text{tg} \phi$. Et que l'ensemble des courbes, pour une cohésion de plus en plus grande, est translaté vers le haut. C qui indique encore une fois que f_s augmente avec la cohésion. par contre cette stabilité diminue en fonction de β . Les valeurs les plus basses de f_s correspondent à l'angle β maximum ($\beta = 50^\circ$, dans le cas de notre étude). Puisque nous avons donné une idée sur l'évolution de f_s en fonction de $\text{tg} \phi$, il serait intéressant de voir la variation directe de f_s en fonction de ϕ (Fig 3.3). La première information qui en découle est que f_s augmente avec ϕ , mais pas linéairement. Toutes les autres constatations que l'on peut faire sont semblables à celles faites pour $f_s = f(\text{tg} \phi)$.

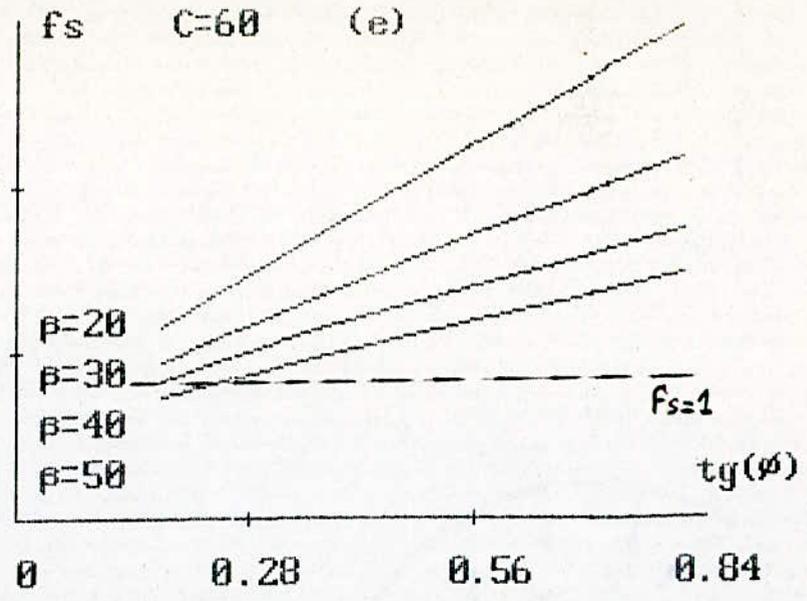
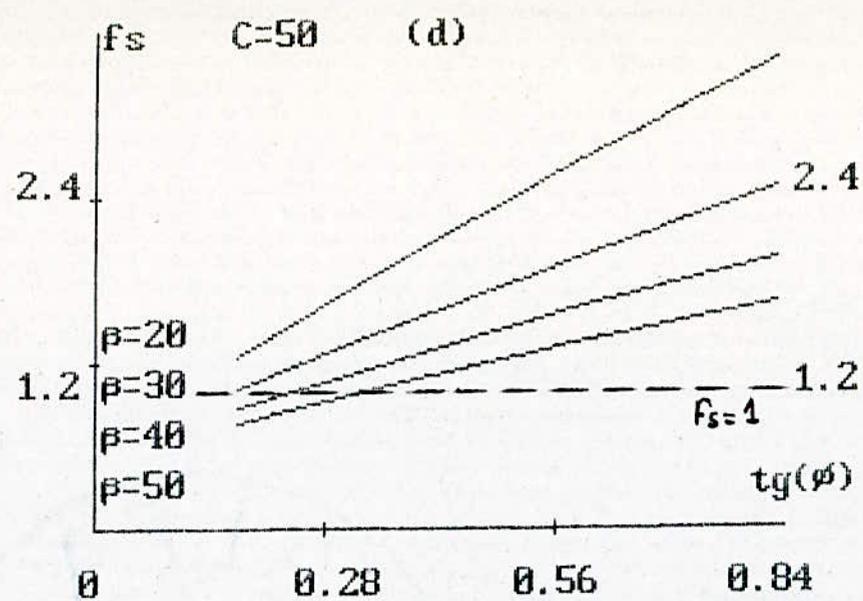
D'un point de vue mathématique, si nous revoyons bien l'expression du facteur de securite on remarquera qu'elle est du type $y = a \cdot x + b$, étant donné que :

$$F_s = \frac{\sum \frac{C \cdot b}{\cos \alpha_i} + \left(W \cdot \cos \alpha_i - \frac{U \cdot b}{\cos \alpha_i} \right) \cdot \text{tg} \phi}{\sum W \sin \alpha_i}$$

qui s'écrit encore :



ϕ : angle de frottement interne
 β : angle de talus
 f_s : facteur de securite
 C : cohesion



VARIATION DU FACTEUR DE SECURITE EN FONCTION DE $tg(\varphi)$

$$F_s = \left[\frac{\sum W_i \cos \alpha_i - \frac{U \cdot b}{\cos \alpha_i}}{\sum W_i \sin \alpha_i} \right] \cdot \text{tg } \phi + \left[\frac{\sum \frac{c \cdot b}{\cos \alpha_i}}{\sum W_i \sin \alpha_i} \right]$$

Dans ce cas la pente $a = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i - \frac{U \cdot b}{\cos \alpha_i})}{\sum W_i \sin \alpha_i}$ est

positive.

beta = $\frac{\sum \frac{c \cdot b}{\cos \alpha_i}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$ qui est l'abscisse à l'origine qui est aussi positif.

$\text{tg } \phi$ étant la variable, représente x dans l'équation générale, et F_s représente y.

D'autre part, étant donné que $\text{tg } \phi$ n'est pas une fonction linéaire de ϕ , il serait juste d'affirmer que F_s , ne varie donc pas linéairement en fonction de ϕ .

Pour terminer, voyons l'aspect physique du problème.

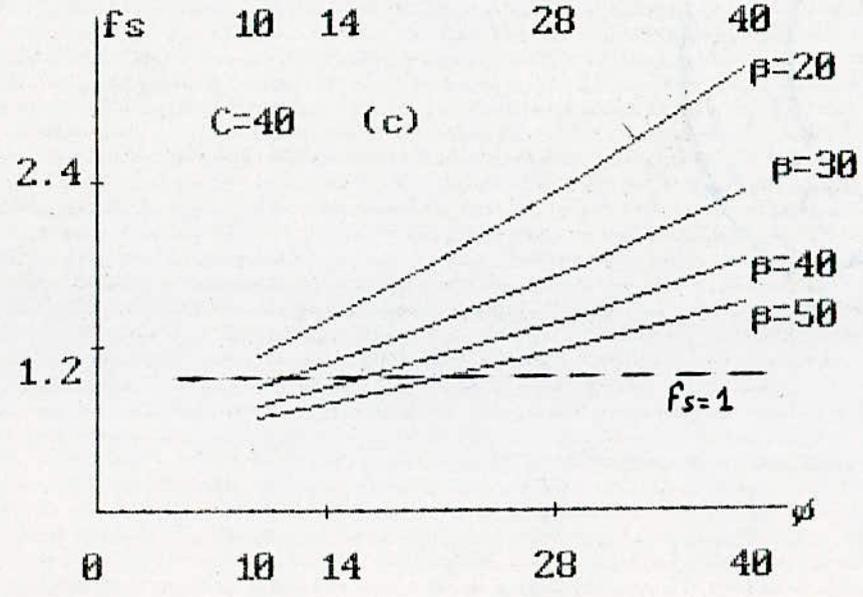
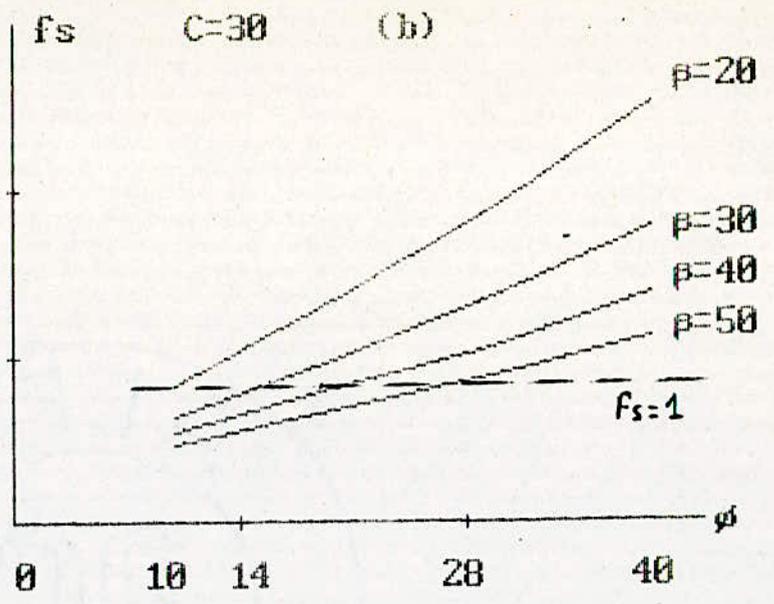
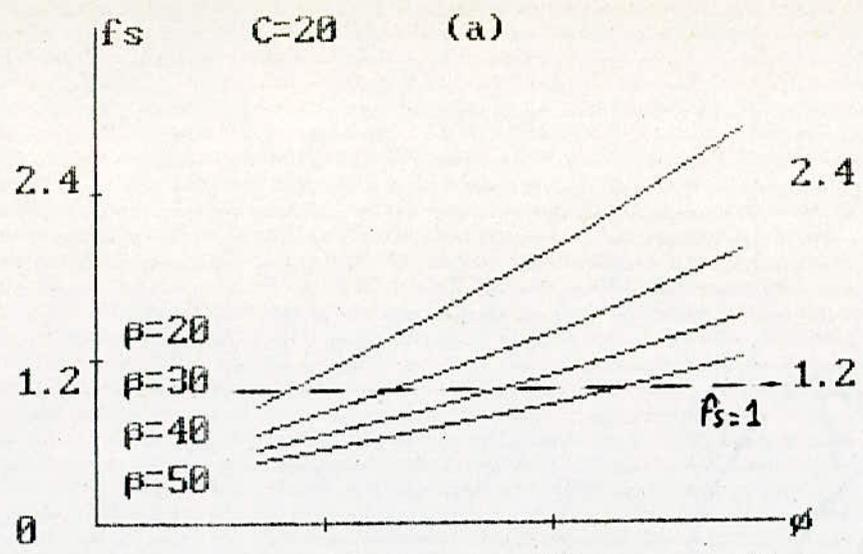
ϕ caractérise le degré de liberté, ou de mobilité des particules matérielles entre elles, d'un sol donné. C'est à dire, que l'augmentation de la valeur de ϕ indique la tendance des grains de matière à être moins mobiles, moins libres entre elles.

Cette perte de mobilité peut provenir de la présence de pressions intersticielles dues à la présence d'eau entre les grains, qui pousse chaque grain à garder sa place donc à bouger le moins possible (Fig 3.4.b)

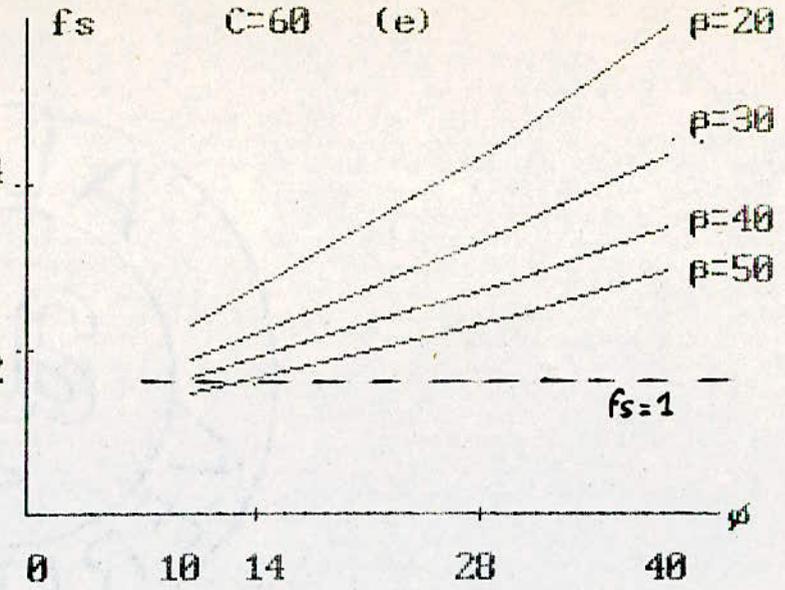
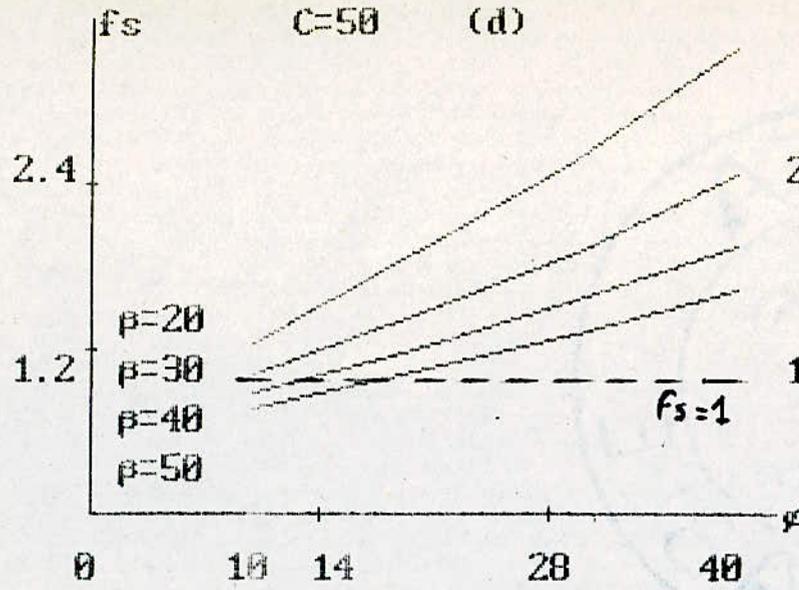
Ce qui est le cas entre les particules d'argile par exemple, lorsque la proportion d'eau est de quelques %.

Dans le cas des sols pulvérulents comme le cas des sables secs. les grains de sable sont libres et peuvent se mouvoir l'un par rapport à l'autre.

La valeur de ϕ dans ce cas est la résultante des forces de frottement entre particules seulement (Fig 3.4.a).



f_s : coefficient de securite
 ϕ : angle de frottement interne
 C : cohesion
 β : angle de talus



VARIATION DU FACTEUR DE SECURITE EN FONCTION DE ϕ

3- Interpretation des courbes du facteur de sécurité en fonction de l'angle de pente β .

L'évolution de f_s , en fonction de β est différente des cas précédents . Tout d'abord , f_s diminue quand β augmente . Et comme dans les cas précédents d'une part, plus la cohésion augmente plus les courbes sont translatées vers le haut, d'autre part les courbes les plus élevées correspondent au $\phi = 40$ dans le cas de notre étude) (Fig 3.4) . D'un point de vue mathématique β se trouve implicitement dans l'expression du facteur de sécurité . Des transformations assez simples, peuvent nous permettre d'obtenir une expression de f_s contenant β explicitement . La conclusion ne fera que confirmer les courbes obtenues .

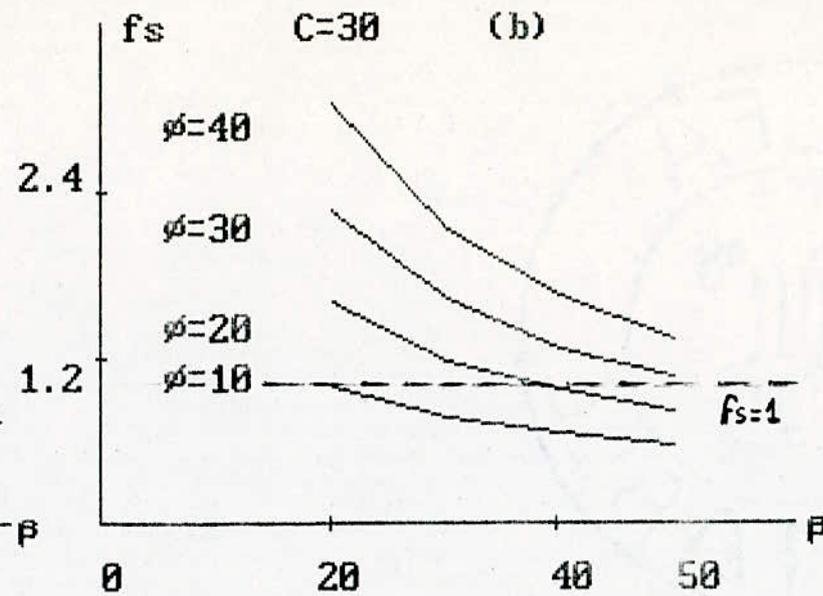
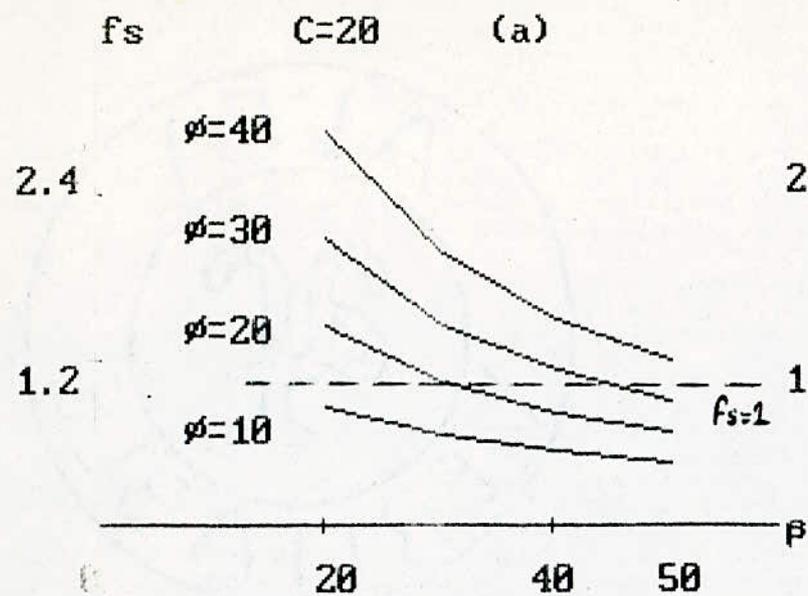
Physiquement parlant, on voit clairement, que lorsque β tend vers zéro, la masse glissante tend à être horizontale . Et le glissement devient de moins en moins probable . Et il n'a plus lieu d'exister dans le cas où $\beta = 0$, puisque la masse est totalement horizontale (voir fig 3-6a) .

Par contre, lorsque β tend vers 90° , on remarque que les contraintes réelles présentes , ont une influence de plus en plus grande sur la masse glissante (ou bien sur le talus) . Et le talus devient tout naturellement de plus en plus affecté par ces contraintes présentes (afflux d'eau , présence de poids , de contraintes etc) (Fig 3-6b) .

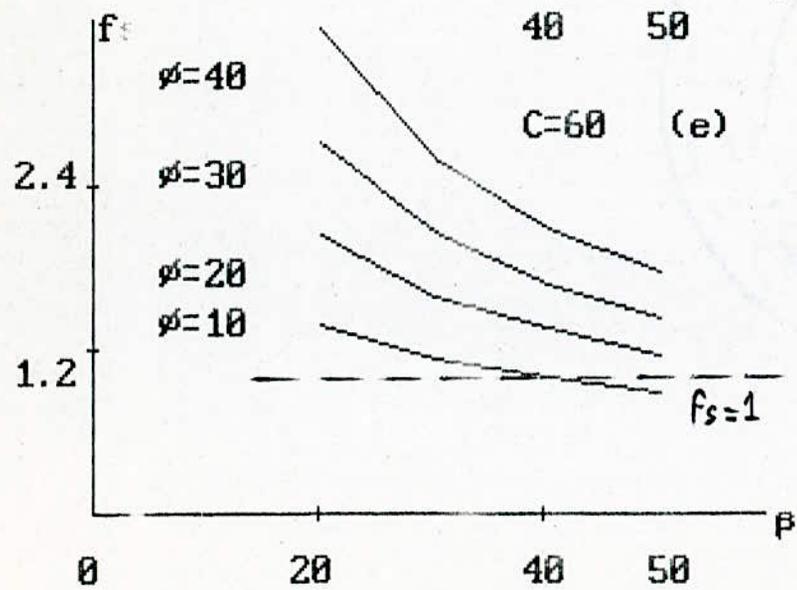
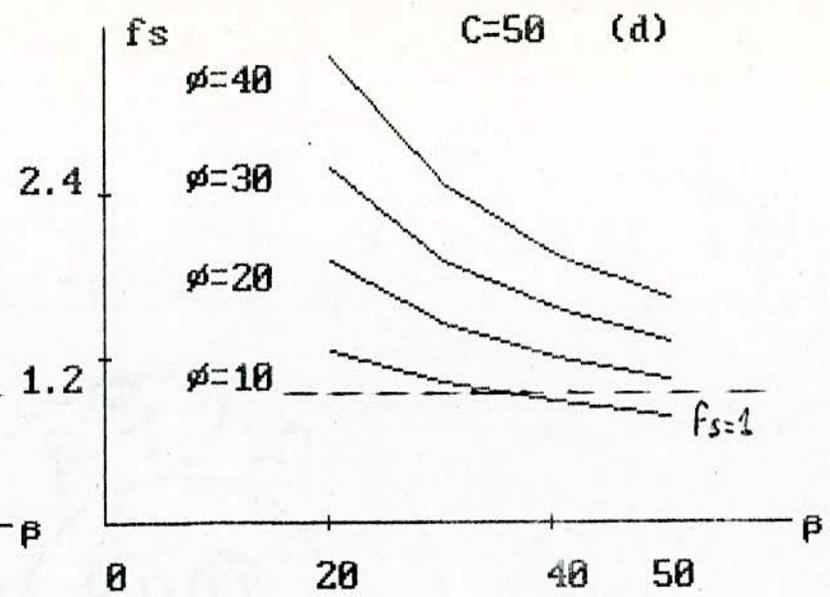
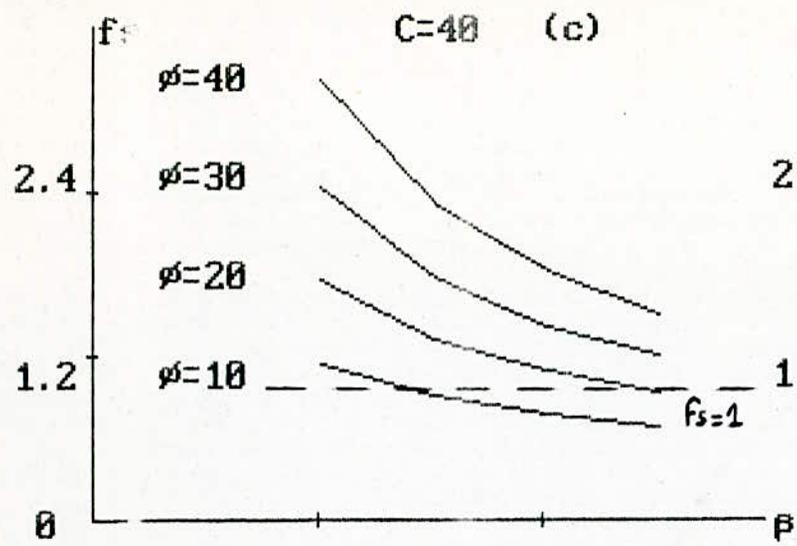
4- Influence du nombre de tranches sur la précision du facteur de sécurité .

A priori , nous pouvons dire que plus le nombre de tranches augmente plus la précision du facteur de sécurité augmente . Et pour cela on choisit un groupe de facteur de sécurité que l'on soumet à une variation du nombre de tranches . Et de là , on essaie de déterminer à partir de quelle valeur du nombre de tranches , le facteur de sécurité devient pratiquement constant . Dans notre cas , on vérifie la précision jusqu'au deuxième chiffre après la virgule .

Les résultats obtenus , nous montre qu'à partir de 15 tranches la variation du facteur de sécurité devient petite et ne dépasse généralement pas 0.01 . Par contre à partir de 30 tranches la variation est pratiquement nulle pour la plus part des facteurs de sécurité choisis , et ne dépasse pas 0.01 pour un seul d'entre eux seulement . Donc on peut dire

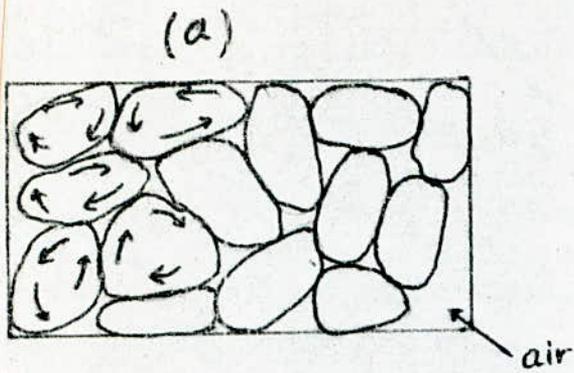


ϕ : angle de frottement interne
 fs : facteur de securité
 C : cohesion
 β : angle de talus

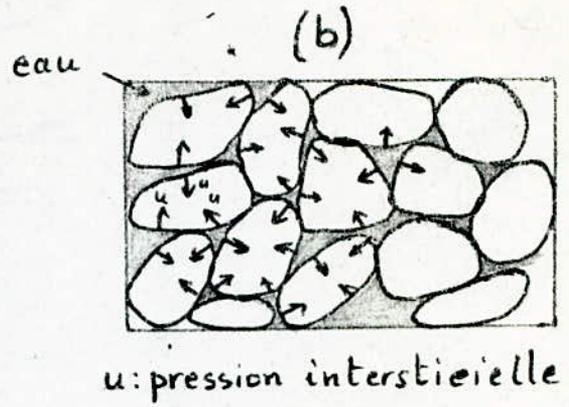


VARIATION DU FACTEUR DE SECURITE EN FONCTION DE β

ST

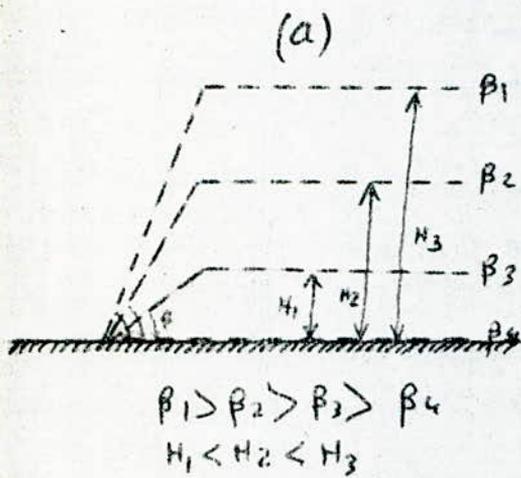


* Cas des sols
pulverulents

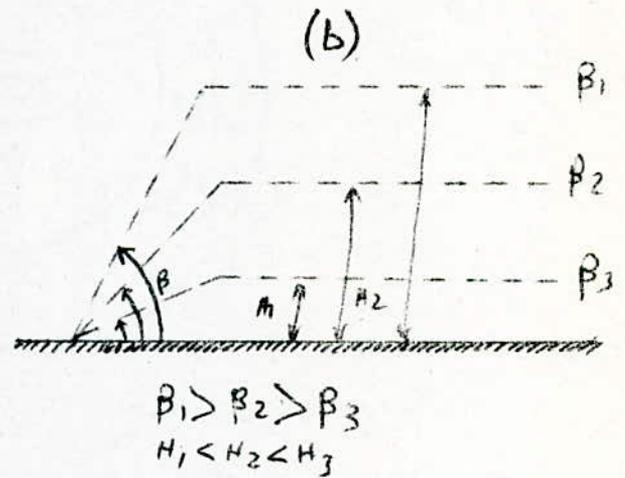


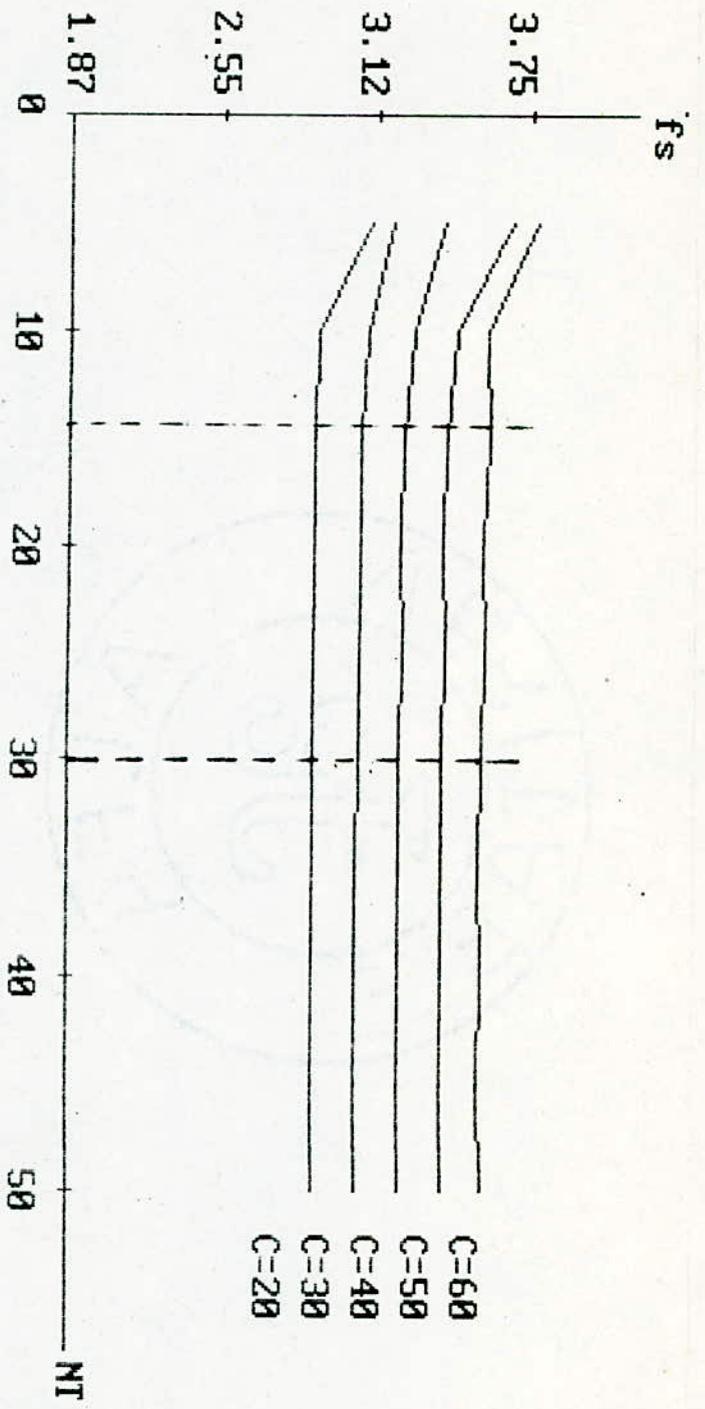
* Cas des sols
coherents

Fig



Fig





NT : nombre de tranches

VARIATION DU FACTEUR DE SECURITE EN FONCTION DU NOMBRE DE TRANCHES

Fig

qu'à partir de 15 tranches les valeurs obtenues de fs sont fiables et valables .

Conclusion

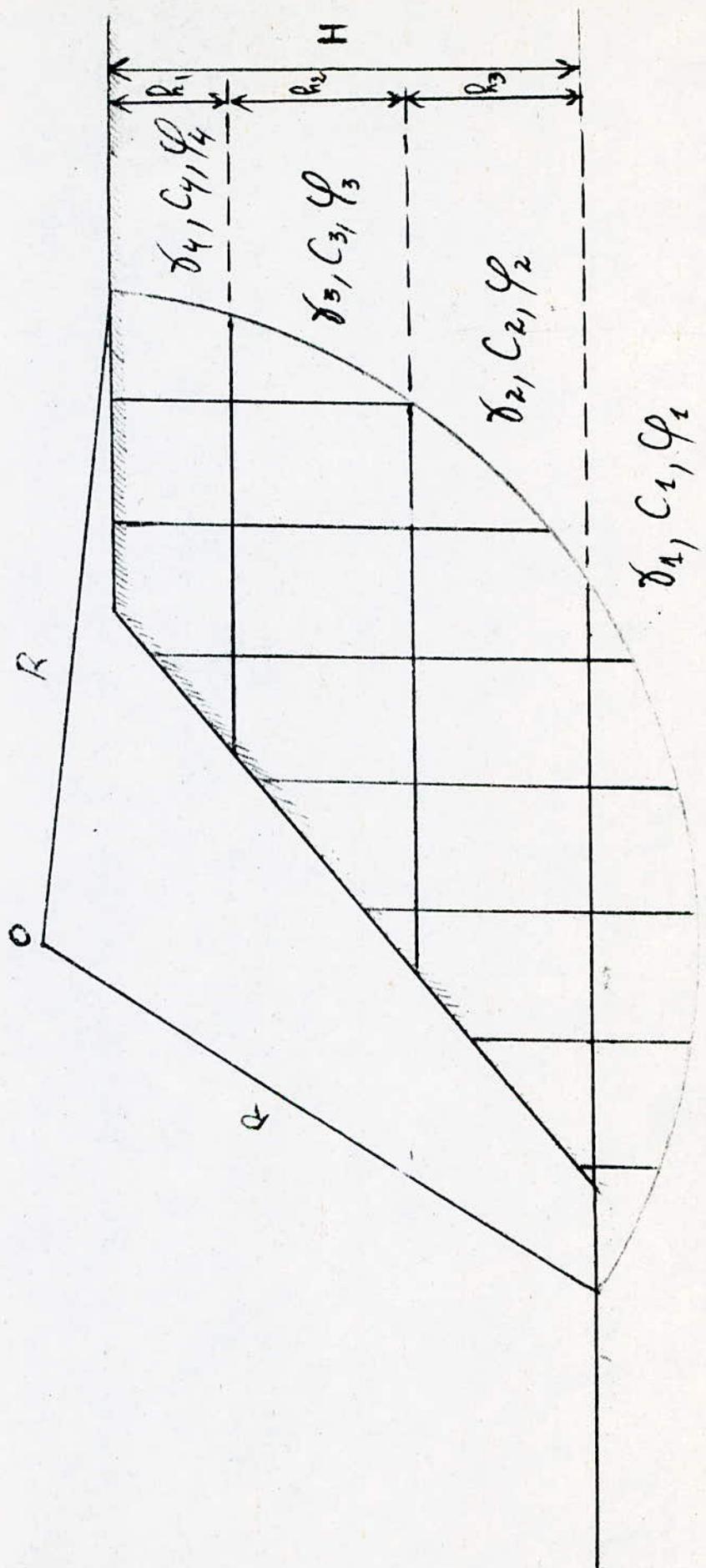
Les valeurs de fs obtenues et les courbes qui en découlent nous ont permis de prendre conscience de manière objective et scientifique de l'importance de ce facteur et des paramètres qui affectent la stabilité .

Dans le cas general on est confronté à des massifs heterogènes qu'à des massifs homogene. Par consequent il serait tres interessant de voir quelques exemples de stabilité de massif stratifié (heterogene) . Comme nous l'avons cité precedemment, l'algorithme donnant le programme de calcul est le meme que dans le cas d'un massif heterogene . Mais la presence de couches en superposées (fig 3.7), rend la realisation du programme tres complexe . Et si l'idée de base du calcul de fs est la meme pour les deux cas (homogene stratifié), la raisonnement de calcul est different à plusieurs niveaux du programme (cas heterogene). Dans le cas de massif heterogene, la cohesion, l'angle de frottement interne et le poids volumique varient. Pour le calcul de fs on doit prendre C moyen, ϕ moyen et gamma moyenne .

$$C_m = \frac{\sum h_i \cdot c_i}{\sum h_i} \quad / \quad \text{GAMMA}_m = \frac{\sum \text{GAMMA}_i \cdot h_i}{\sum h_i}$$

$$\text{tg } \phi_m = \frac{\sum \text{tg } \phi_i \cdot h_i}{\sum h_i}$$

Fig



CHAPITRE 4

* ANNEXES *
* * * * *

ANNEXE

Cette partie renferme un ensemble d'aspects theoriques et pratiques qui nous permettent de mieux assimiler la theorie de la recherche du coefficient de securite et les resultats qui decoulent de celle ci.

*§1- LOI DE COULOMB

L'equation generale de la courbe intrinseque s'ecrit sous la forme :

$$\tau = (a + b\sigma)^m$$

Pour le cas de la plupart des materiaux, elle s'ecrit sous la forme suivante :

$$\tau = (a + b\sigma)^{3/2} \quad (m=3/2)$$

Et pour le cas particulier de la mecanique des sols, l'equation s'ecrit (fig A)

$$\tau = (a + b\sigma) \quad (m=1)$$

$a=C$ et $b=tg(\phi)$

C : est la cohesion (elle a la dimension d'une contrainte)

ϕ : l'angle de frottement interne (qui est la pente de la droite).

Cas particulier

* $C=0$: cas des materiaux pulverulents (Ex: sable sec)

* $C \neq 0$: cas des materiaux coherents (Ex: argile)

On peut dire que la cohesion varie en fonction de la teneur en eau, c'est à dire, que la quantite d'eau contenue dans un materiau donne peut augmenter la cohesion de celui ci où au contraire la diminuer.

Par exemple le sable humide a une cohesion sensiblement superieure à zero. Donc, la presence d'eau augmente la cohesion des sables.

Par contre, la cohesion de l'argile diminue si la quantite d'eau est assez importante.

*§2- APPAREILLAGE UTILISE POUR L'ETUDE DES PROPRIETES DES SOLS

1) essai de cisaillement

Plusieurs types d'appareils sont habituellement utilises pour les essais de cisaillement. Mais deux appareils de laboratoire ont ete specialement mis au point, tant pour les recherches que pour les essais courants. Citons:

* la boite de CASAGRANDE

* l'appareil à compression triaxiale ou triaxial.

a) Boite de CASAGRANDE

Elle est destinee aux essais de cisaillement rectiligne, dans lesquels on essaie d'obtenir la rupture de l'echantillon suivant un plan impose.

Generalement, l'echantillon a la forme d'une plaquette carrée avec 10 cm de coté et 3 cm d'epaisseur. Il est placé entre deux demi boites mobiles l'une par rapport à l'autre et sans contact (elles sont separees par l'echantillon).

On applique par l'intermediaire de la demi boite superieure un effort de compression N et un effort horizontal de traction T . Le materiau se rompt alors pour une certaine valeur de T , suivant le plan de separation des deux demi boites qui coincide sensiblement avec le plan horizontal de symetrie de l'echantillon.

On fait l'experience pour differentes valeurs de N et T qui

qui nous permettra de tracer la courbe intrinseque.

$$\sigma = N/A \quad \text{et} \quad \tau = T/A$$

où A est la surface de la boîte (fig B).

a) description du dispositif

La demi boîte supérieure est formée de deux parties, un cadre et un couvercle servant de piston; pour l'application de la force N. De cette manière la force N est bien integralement repartie sur l'échantillon seul et non sur la demi boîte inférieure, ce qui engendrerait des frottements parasites.

L'effort normal N qui est appliqué au piston de la demi boîte supérieure resulte generalement de l'action de poids placés sous l'appareil.

L'application de l'effort de cisaillement T se fait comme suit : La demi boîte inférieure est entraînée à une vitesse constante par un mecanisme approprié. La demi boîte supérieure est maintenue en place par un anneau dynamometrique qui mesure l'effort de cisaillement (fig B').

b) Appareil triaxial

Dans l'appareil triaxial l'échantillon a la forme d'un cylindre. Il est soumis à ce que l'on appelle étirement triaxiale, qui meriterait mieux le nom de contrainte cylindrique ou plus generalement champ de contrainte cylindrique.

L'échantillon est placé dans une cellule qui contient un fluide sous pression, de l'eau en general (fig C), soumis sur sa surface laterale à une contrainte radiale σ_r qui est egale à la pression qui regne dans la cellule. D'autre part un piston qui traverse la partie supérieure de la cellule permet de charger verticalement l'échantillon, qui est ainsi soumis egalement à une contrainte longitudinale σ_z .

En jouant separement sur la pression de la cellule et la force transmise par le piston, on peut realiser une large gamme de combinaisons de contraintes. Comme exemple, on peut citer:

- Essais de compression pour lesquels la contrainte longitudinale σ_z est supérieure à la contrainte radiale σ_r .
- Essais de traction (d'extension) pour lesquels la contrainte longitudinale est une traction.
- Essais de striction pour lesquels la contrainte longitudinale est inférieure à la contrainte radiale (fig C').

$$\sigma_z = \sigma_r + N/A$$

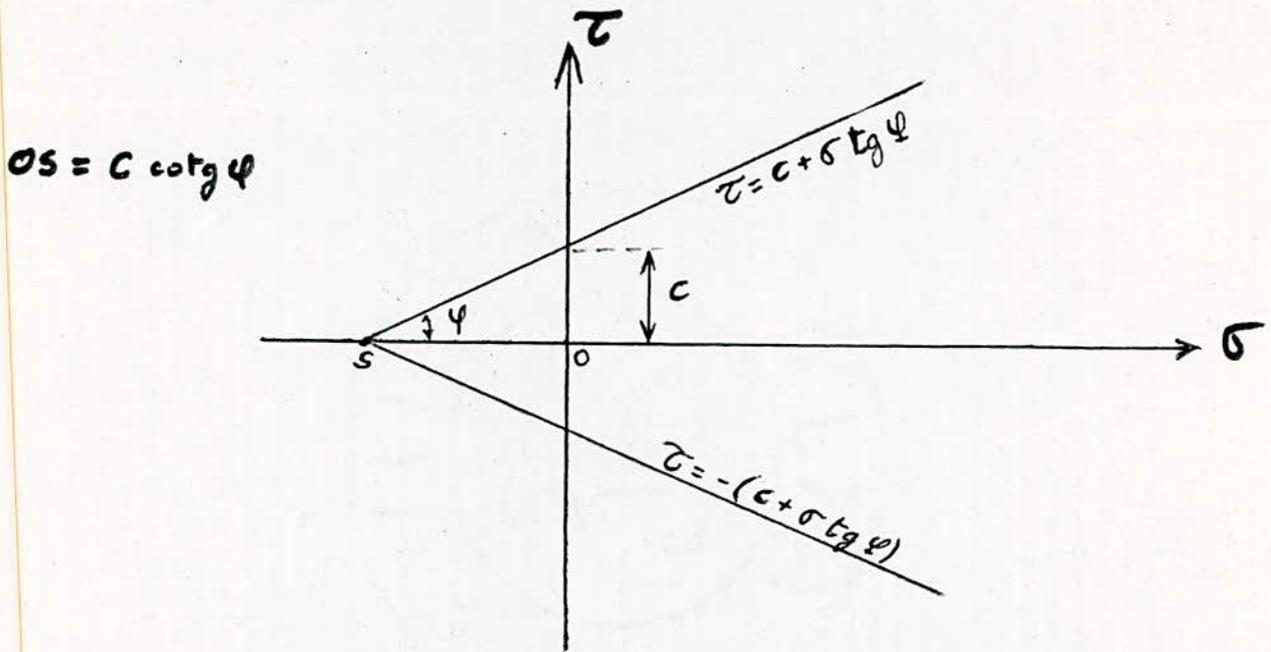
N: effort appliqué au piston

On fait des essais avec differentes valeurs de σ_z . On obtient des valeurs de σ_r . A l'aide de ces essais, on peut tracer la courbe qui nous donnera les valeurs, de la cohesion C ainsi que de l'angle de frottement ϕ (fig C'').

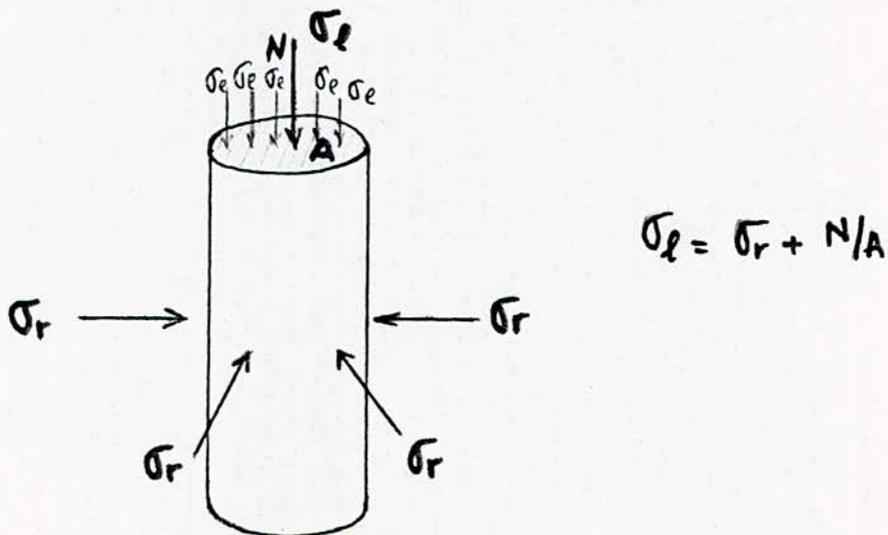
*§3- DIFFERENTS TYPES D'ESSAIS

1) Essais non drainés

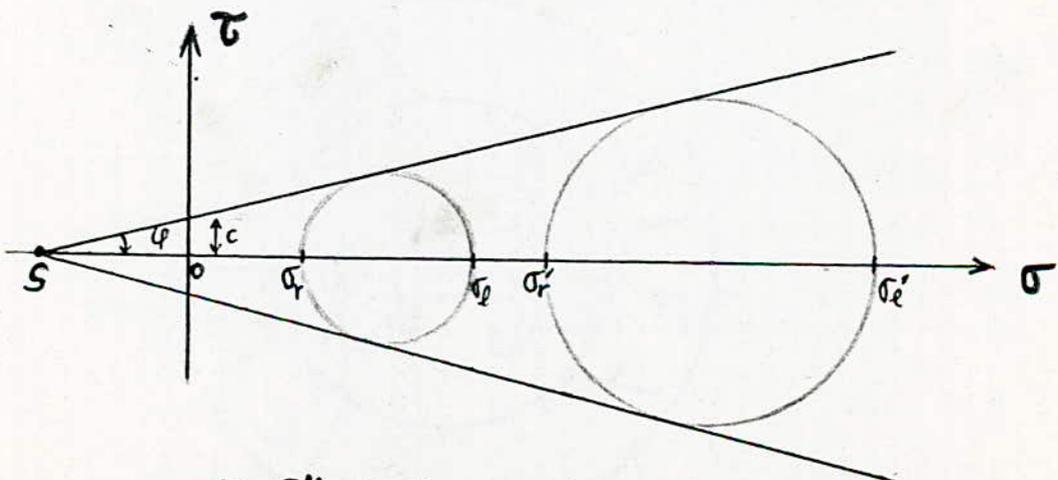
Dans ce type d'essai aucun drainage n'est permis. Par consequent la pression intersticielle ne peut se dissiper. Ce type d'essai est destiné generalement aux materiaux coherents ou non.



FigA : Droites de Coulomb



FigC' : echantillon sous l'action de contraintes



FigC'' : Determination de c et φ

$$\tau_f = c_u + \sigma \operatorname{tg}(fi_u)$$

τ_f : contrainte de cisaillement sur le plan de rupture et au moment de la rupture (l'indice f vient de l'anglais "failure", qui signifie rupture).

fi_u : angle de frottement interne (cas non drainé), dans ce cas fi_u est nulle (l'indice u vient de l'anglais "undrained" qui signifie non drainé).

$$c_u = (1/2)(\sigma_p - \sigma_v)$$

c_u : cohésion égale à la moitié du deviateur qui provoque la rupture.

Exemple: Pour un échantillon saturé, on applique un essai non drainé. La figure D nous montre les résultats obtenus pour cet exemple.

2) ESSAIS non drainés après consolidation

Dans un essai non drainé après consolidation, l'échantillon est d'abord consolidé sous une pression sphérique σ_v . Lorsque la consolidation est terminée, c'est à dire, lorsque la pression interstitielle est intégralement dissipée, l'échantillon est alors soumis à un essai de cisaillement non drainé.

Pour la détermination des contraintes de cisaillement on utilise les relations suivantes:

$$\tau_f = c_{cu} + \sigma \operatorname{tg}(fi_{cu}) \quad \text{en contraintes totales}$$

$$\tau_f = c'_{cu} + \sigma' \operatorname{tg}(fi'_{cu}) \quad \text{en contraintes effectives}$$

L'indice 'cu' indique qu'il s'agit d'un essai non drainé après consolidation.

3) Essais drainés

Dans un essai drainé, on conduit les opérations de manière à éviter l'apparition d'une pression interstitielle. L'échantillon est consolidé au préalable et cisailé ensuite, à un rythme suffisamment lent pour que la pression interstitielle soit négligeable, particulièrement au moment de la rupture.

On peut dire qu'il y'a identité à tout moment entre les contraintes totales et les contraintes effectives.

La loi de Coulomb s'écrit donc comme suit:

$$\tau_f = C' + \sigma' \operatorname{tg}(fi')$$

$$\tau_f = C'_d + \sigma'_d \operatorname{tg}(fi'_d)$$

$$\tau_f = C_d + \sigma_d \operatorname{tg}(fi_d)$$

L'indice 'd' indique qu'il s'agit d'un essai drainé.

La cohésion C' et l'angle de frottement fi' que l'on mesure lors d'un essai drainé sont très peu différents de ceux que l'on obtient dans un essai non drainé après consolidation avec mesure de la pression interstitielle.

*§4- DETERMINATION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE

Un dernier point reste à éclaircir et qui est, la détermination de la valeur de la pression interstitielle u.

Par définition de l'équipotentielle, les charges hydrauliques en M et N sont identiques (figE). On a :

86

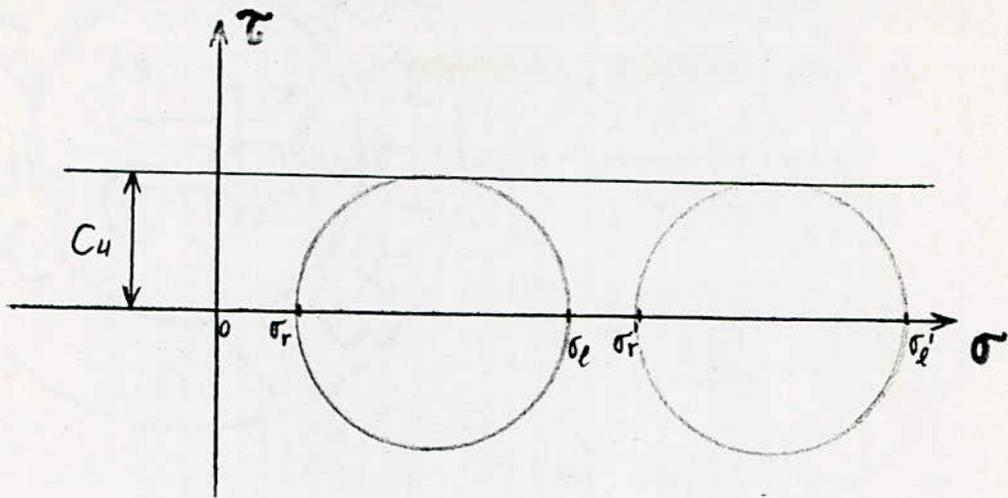


Fig D: Essai non drainé sur échantillon saturé

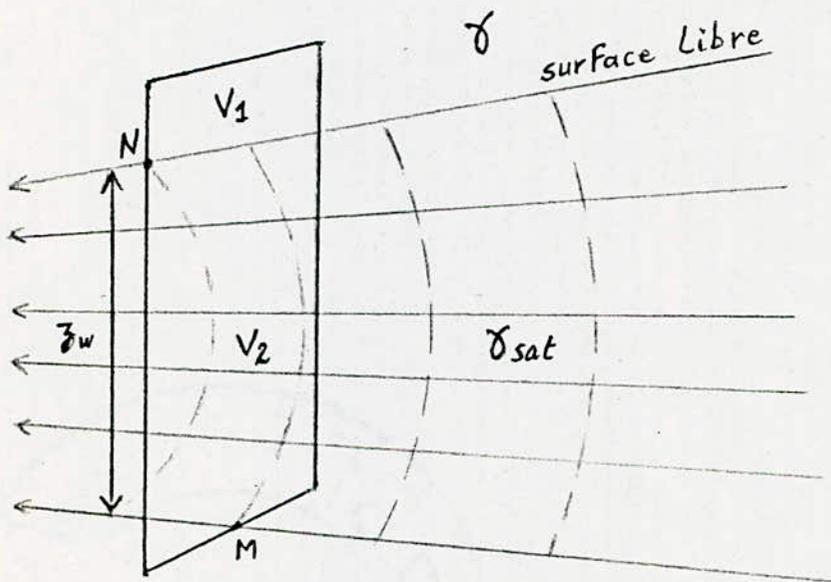


Fig E: Determination de la pression intersticielle

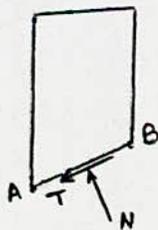


Fig E': Resistance maximale au cisaillement.

$$h_N = h_M \quad \text{et} \quad Z_M + u/\gamma_w = Z_N$$

$$u = (Z_N - Z_M) \cdot \gamma_w = Z_w \cdot \gamma_w$$

Nous avons dans ce cas V1 et V2, les volumes de la tranche située au dessus et en dessous de la surface libre (fig E).

$$W = \gamma \cdot V1 + \gamma_{\text{sat}} \cdot V2$$

La resistance maximale au cisaillement s'ecrit le long de la ligne AB:

$$D'où \quad E_s = \frac{C \cdot AB + (N - u \cdot AB) \cdot \text{tg}(\phi)}{\sum T} \quad (\text{fig E'})$$

L'expression developpée devient :

$$E_s = \frac{\sum (c \cdot b / \cos \alpha) + (W \cos \alpha - ub / \cos \alpha) \cdot \text{tg}(\phi)}{\sum W \sin \alpha}$$

 CALCUL DU FACTEUR DE SECURITE DANS LE CAS STRATIFIE

DIMENSION X17(40),X2(40),VAR1(40),VAR2(40),E1(40),CO(40),
 1Y7(40),YY(40),S(40,40),W(40,40),C5(40),ST(40),WT(40),E(40),
 1GAMMA(40),X7(40),TAT(40);TETA1(40),TETA(40),E2(40),QH(40),
 1EE(40),EEE(40),FI1(40),E24(40),U(40),UU(40),UY(40),GAMMA1(40),
 1FG(200,200),RT(200,200),SF(200,200),QG(40),CO1(40),QL(40)
 1,TAN1(40)

PRINT*, 'DONNER DEBUT, FIN, et le PAS SUR LES ABSCISSES'

ACCEPT*,XA,XB,XC

PRINT*, 'DONNER DEBUT, FIN, et le PAS SUR LES ORDONNEES'

ACCEPT*,YA,YB,YC

PRINT*, 'DONNER L'ANGLE , LA HAUTEUR et LE Nbre DE TRANCHES'

ACCEPT*,ALPHA1,H,NT

PRINT*, 'DONNER LE Nbre DE RAYONS'

ACCEPT*,NR

PRINT*, 'DONNER LE Nbre DE COUCHES'

ACCEPT*,NC

NC1=NC-1

PRINT*, 'DONNER LES EPAISSEURS DES COUCHES A PARTIR DU BAS'

DO 1 I=1,NC

ACCEPT*,E2(I)

CONTINUE

WI=-1

PI=ACOS(WI)

S1=0

PRINT*, 'DONNER RESPECTIVEMENT LA MASSE VOLUMIQUE , LA COHESION'

PRINT*, ' ET L'ANGLE DE FROTTEMENT A PARTIR DU BAS'

DO 105 I3=1,NC1

ACCEPT*,GAMMA1(I3)

ACCEPT*,CO1(I3)

ACCEPT*,FI1(I3)

FI2(I3)=(FI1(I3)/180)*PI

S1=S1+E(I3)

E1(I3)=S1

CONTINUE

NM=WI

PRINT*, 'DONNER LE PAS SUR LE RAYON'

ACCEPT*,PR

ALPHA=(ALPHA1/180)*PI

DO 11 XP=XA,XB,XC

DO 11 YP=YA,YB,YC

RA=SQRT(XP**2+YP**2)

Z1=1/TAN(ALPHA)

Z2=(XP+YP*TAN(ALPHA))/TAN(ALPHA)

DO 16 I1=1,NR

IF(I1.NE.1) GO TO 1115

IZ=XP*TAN(ALPHA)+1

```

140 NT1=NT+1
    GO 30 I8=1,NT1
    X7(I8)=(I8-1)*b
    IF(X7(I8).LE.A0) GO TO 10
    YY(I8)=(X7(I8)-A0)*TAN(ALPHA)
    PRINT*, 'YY(I8)', YY(I8)
    GO TO 20
10 YY(I8)=0
20 B5=-XF,
    C5(I8)=(X7(I8)-YF)**2+XF**2-R**2
    DELTA2=B5**2-C5(I8)
    print*, 'delta2', delta2
    IF(DELTA2.LT.0) GO TO 30
    YB1=B5+SQRT(DELTA2)
    YB2=B5-SQRT(DELTA2)
    IF(YB1.LT.0) GO TO 40
    IF(YB2.LT.0) GO TO 50
    GO TO 60
40 Y7(I8)=YB1
    GO TO 30
30 Y7(I8)=YB2
    GO TO 30
60 IF(YB1.LE.YB2) GO TO 40
    GO TO 50
    PRINT*, 'Y7(', I8, ')=' , Y7(I8), 'X7(', I8, ')=' , X7(I8)
    CONTINUE
    CALCUL DES POINTS D'INTERSECTION AVEC LE CERCLE
    GO 180 I11=1,K
    DELTA3=R**2-(E1(I11)+XF)**2
    X2(I11)=YF+SQRT(DELTA3)
    X2(I11)=YF-SQRT(DELTA3)
    IF(X2(I11).NE.0) GO TO 150
    IF(X2(I11).LT.0) GO TO 170
150 IF(X17(I11).LT.X2(I11)) GO TO 3
    VAR1(I11)=X17(I11)
    GO TO 180
    VAR1(I11)=X2(I11)
    CALCUL DES POINTS D'INTERSECTION AVEC LA PENTE
160 VAR2(I11)=(E1(I11)/TAN(ALPHA))+A0
    PRINT*, 'VAR1', VAR1(I11), 'VAR2', VAR2(I11)
    GO TO 190
170 PRINT*, 'ERR'
180 CONTINUE
    PRINT*, 'NM', NM
    IF(NM.EQ.K) GO TO 190
    GO TO 240
190 PRINT*, 'K', K
    L1=NC1-K+1
    GO 310 L2=L1,NC1
    PRINT*, 'L', L, 'NC1', NC1
    IF(QUERTY.EQ.2) GO TO 240
    L=L2
    I=1
    KI=L
    DIF=VAR1(KI)-VAR2(KI)

```

```

IF(VAR2(KI).GT.A0) GO TO 200
200 IF(X7(I+1).GT.VAR1(KI)) GO TO 205
A=ABS(Y7(I+1))
BB=ABS(Y7(I))
C=0
GO TO 210
205 IF(X7(I).GT.VAR1(KI)) GO TO 210
A=0
BB=ABS(Y7(I))
C=VAR1(KI)-X7(I)
210 S(I,L)=(A+BB)*C/2
W(I,L)=GAMMA1(L)*S(I,L)
C PRINT*,S(I,L),'#',W(I,L),'# I',I,'# L',L
I=I+1
IF(I.EQ.NT1) GO TO 310
GO TO 200
220 CALL QAZ(I,X7,Y7,VAR2,YY,E1,E,VAR1,GAMMA1
1,S,W,KI,NT1,L,b,ALPHA,DIF)
GO TO 310
240 I=1
L=L2
IF(K.EQ.NC1) GO TO 1500
LEC=L1-1
L=L-LEC
1500 KI=L+1
DIF=VAR1(KI)-VAR2(KI)
IF(VAR1(KI-1).NE.A0) GO TO 300
250 IF(X7(I+1).GT.VAR2(KI)) GO TO 260
SS=(B**2*ATAN(ALPHA))/2
A=2*YY(I+1)
GO TO 1010
260 IF(X7(I).GT.VAR2(KI)) GO TO 270
SS=(VAR2(KI)-X7(I))*2*ATAN(ALPHA)
GO TO 290
270 IF(X7(I+1).GT.VAR1(KI)) GO TO 200
SS=0
GO TO 290
280 IF(X7(I).GT.VAR1(KI)) GO TO 310
A=0
BB=C(KI)-Y7(I)
C=VAR1(KI)-X7(I)
SS=0
S(I,L)=(A+BB)/2*C-SS
W(I,L)=GAMMA1(L)*S(I,L)
C PRINT*,S(I,L)
GO TO 310
290 A=2*E(KI)
1010 BB=-(Y7(I+1)+Y7(I))
C=0
S(I,L)=(A+BB)/2*C-SS
W(I,L)=GAMMA1(L)*S(I,L)
C PRINT*,S(I,L),S(I,L)
I=I+1
GO TO 250
300 CALL QAZ(I,X7,Y7,VAR2,YY,E1,E,VAR1,

```

```

10 GAMMA1, S, W, KI, NT1, L, B, ALPHA, DIF)
810 CONTINUE
820 DO 340 I90=1, NT
    SS=0
    W1=0
    DO 300 L=1, K
        IF(S(I90, L).EQ.0) GO TO 320
        PRINT*, 'S(', I90, L, ')', S(I90, L)
        SS=SS+S(I90, L)
        W1=W1+W(I90, L)
    300 CONTINUE
        ST(I90)=SS
        WT(I90)=W1
        PRINT*, 'ST(', I90, ')=', ST(I90), '***', 'WT(', I90, ')=', WT(I90)
    340 CONTINUE
        SG=0
        WNG=0
        DO 350 I89=1, NT
            DO 350 L=1, K
                SS=SS+S(I89, L)
                WNG=WNG+W(I89, L)
    350 CONTINUE
                PRINT*, 'WNG=', WNG, '# SG=', SG
                DO 7000 I100=1, NT
                    A100=0
                    A200=0
                    A300=0
                    DO 7001 I200=1, KER
                        A100=A100+CO1(I200)*S(I100, I200)
                        A200=A200+GAMMA1(I200)*S(I100, I200)
                        A300=A300+TAN(FI1(I200))*S(I100, I200)
    7001 CONTINUE
                        QG(I100)=A100
                        CO(I100)=QG(I100)/ST(I100)
                        QH(I100)=A200
                        GAMMA(I100)=QH(I100)/ST(I100)
                        QL(I100)=A300
                        TAN1(I100)=QL(I100)/ST(I100)
                        PRINT*, 'CO', CO(I100), 'GA', GAMMA(I100), 'TF', TAN1(I100)
    7000 CONTINUE
                        FS1=100
                        ANU=0
                        D=0
                        DO 60 KG=1, NT
                            D=D+WT(KG)*SIN(TETA1(KG))
                            U(KG)=CO(KG)*B/COS(TETA1(KG))
                            UU(KG)=(WT(KG)*COS(TETA1(KG))-UY(KG)*B/COS(TETA1(KG)))*TAN1(KG)
                            ANU=ANU+U(KG)+UU(KG)
    60 CONTINUE
                            PRINT*, 'NU=', ANU, 'D=', D
                            FS(XP, YP)=ANU/D
                            IF(FS(XP, YP).LT.FS1) GO TO 79
                            FS(XP, YP)=FS1
                            GO TO 16
    79 FS1=FS(XP, YP)

```

```

RT(XP,YP)=R
FS(XP,YP)=FS1
10 CONTINUE
2 PRINT*, 'FS(' ,XP,YP,')=' ,FS1, 'R=' ,RT(XP,YP)
11 CONTINUE
FSPC=100
00 10 YP=XA,XB,XC
00 10 YP=YA,YB,YC
IF(FS(XP,YP).LT.FSPC) GO TO 17
GO TO 10
17 FSPC=FS(XP,YP)
SF(X,YP)=FS(XP,YP)
SF(XP,YP)=FSPC
ZX=XP
ZY=YP
12 CONTINUE
PRINT*, 'SF(' ,ZX,ZY,')=' ,FSPC, 'TR=' ,RT(ZX,ZY)
STOP
END
SUBROUTINE QAZ(J,AX7,AY7,AVAR2,AYY,AE1,AE,AVAR1,AGAMMA,S,I,KII,NTA,
Iab,ALPHA,ADIF)
DIMENSION AX7(40),AY7(40),AVAR2(40),AYY(40),AE1(40),AE(40),
1AVAR1(40),AGAMMA(40),S(40,40),I(40,40)
350 IF(J.EQ.NTA) GO TO 550
0 PRINT*, 'J',J, 'KII',KII
1F(AX7(J+1).GT.AVAR2(KII-1)) GO TO 400
J=J+1
2 PRINT*, '360', 'J', 'KII', 'AX7(J)',J,KII,AX7(J)
GO TO 350
400 IF(AX7(J).GT.AVAR2(KII-1)) GO TO 410
A=AYY(J+1)-AE1(KII-1)
B=0
C=AX7(J+1)-AVAR2(KII-1)
D=0
5 PRINT*, '400'
GO TO 540
410 IF(AX7(J+1).GT.AVAR2(KII)) GO TO 420
IF(ABS(ADIF).GT.0.1) GO TO 500
IF(AX7(J+1).LE.AVAR1(KII-1)) GO TO 500
IF(AX7(J).GT.AVAR1(KII-1)) GO TO 1700
E=(ANP(J+1)-AVAR1(KII-1))*(AY7(J+1)-AE1(KII-1))/2
GO TO 410
1700 IF(AX7(J+1).EQ.AVAR2(KII)) GO TO 1800
D=D
A=AYY(J)-AY7(J)
B=AYY(J+1)-AY7(J+1)
C=C
GO TO 540
0 E=(AVAR1(KII)-AVAR1(KII-1))*AE(KII)/E
0 D=(AY7(J+1)-AY7(J))*ab/2
1800 A=AYY(J+1)+AYY(J)
0 C=(AX7(J+1)+AY7(J))
D=D
GO TO 540
500 B=0

```

```

610 A=AYY(J+1)-AE1(KII-1)
    BB=AYY(J)-AE1(KII-1)
    C=ab
C PRINT*, '400', 'YY(I)', AYY(J), 'AE1', AE1(KII-1)
GO TO 540
420 IF(AX7(J).GT.AVAR2(KII)) GO TO 430
    IF(ABS(ADIF).LE.10) GO TO 500
    A=AE(KII)
    BB=AE(KII)
    IF(AX7(J+1).EQ.AVAR2(KII+1)) GO TO 450
    C=ab
    SS=((AVAR2(KII)-AX7(J))*2)*TAN(ALPHA))/2
C PRINT*, 'SUR 440'
GO TO 440
450 C=AVAR1(KII)-AVAR2(KII)
    SS=((AVAR1(KII)-AVAR1(KII-1))*AE(KII))/2
C PRINT*, 'TYUID'
440 PRINT*, '420'
GO TO 540
430 IF(AX7(J+1).GT.AVAR1(KII-1)) GO TO 460
    A=AE(KII)
    BB=AE(KII)
    C=ab
    SS=0
C PRINT*, '430'
GO TO 540
460 IF(AX7(J).GT.AVAR1(KII-1)) GO TO 480
    A=AE(KII)
    BB=AE(KII)
    C=ab
    SS=((AY7(J+1)-AE1(KII-1))*(AX7(J+1)-AVAR1(KII-1)))/2
C PRINT*, '460'
GO TO 540
480 IF(AX7(J+1).GT.AVAR1(KII)) GO TO 490
    A=AE1(KII)*2
    BB=-AY7(J+1)+AY7(J)
    C=ab
    SS=0
C PRINT*, '480'
GO TO 540
490 IF(AX7(J).GT.AVAR1(KII)) GO TO 550
    SS=0
GO TO 510
500 SS=((AVAR2(KII)-AX7(J))*2*TAN(ALPHA))/2
510 IF(AVAR1(KII-1).GT.AX7(J)) GO TO 520
    A=0
    BB=AE1(KII)-AY7(J)
    C=AVAR1(KII)-AX7(J)
C PRINT*, 'C'EST BON'
GO TO 540
520 A=AVAR1(KII)-AX7(J)
    BB=AVAR1(KII-1)-AX7(J)
    C=AE(KII)
C PRINT*, 'T'EST SUR!!!'
C PRINT*, '490', SS, A, BB, C

```

```
540 S(J,LI)=((A+BB)*C/2)-SS  
550 W(J,LI)=AGAMMA(LI)*S(J,LI)  
560 PRINT*, S(J,LI), ' ', S(J,LI), ' W(J,LI), ' ', W(J,LI)  
570 J=J+1  
580 GO TO 540  
590 RETURN  
600 END
```

RESUME

Deux paramètres principaux déterminent la nature des sols.

- L'angle de frottement interne ϕ : qui caractérise le degré de liberté (ou de mobilité) des grains entre eux, d'un sol donné .

- La cohésion C : qui exprime l'affinité entre les grains d'un sol donné .

Ces deux paramètres fondamentaux sont déterminés expérimentalement par diverses méthodes .

Dans notre cas, deux méthodes nous intéressent particulièrement.

1) Méthode de Casagrande :

On réalise un essai de cisaillement rectiligne d'un échantillon placé entre deux demi boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. On applique un effort normal et horizontal et l'on mesure la contrainte de cisaillement .

2) L'appareil triaxial :

On met l'échantillon dans une enceinte cylindrique pressurisée. On applique un effort normal et on mesure la contrainte radiale. Ensuite, on déduit la contrainte de cisaillement .

En ce qui concerne la technologie d'exploitation, il existe deux types d'appareils :

- a) Excavateur à godet unique .
- b) Excavateur à godets multiples .

Les excavateurs à godets multiples se divisent en deux types :

- Chaîne à godets .
- Roue pelle .

Dans le cas de notre projet, nous nous sommes intéressés en particulier à la roue pelle, pour 3 raisons principales:

- 1) Les sols que nous étudions sont tendres et la roue pelle s'adapte bien à ce type de sol .
- 2) La roue pelle a une grande capacité de chargement et par conséquent un rendement élevé .
- 3) La roue pelle peut travailler en tranchées et en talus.

L'un des problèmes principaux des mines à ciel ouvert, est la stabilité des talus . qui est caractérisée par un coefficient de sécurité (fs) .

Le calcul de ce facteur peut se faire de diverses manières.

Dans notre cas nous avons utilisé la méthode de fellinius en utilisant l'ordinateur .

Les résultats obtenus à partir du programme informati-
-que, nous ont permis de comprendre l'influence des
paramètres C , ϕ et β sur le facteur de sécurité.

- f_s augmente linéairement en fonction de la cohésion,
et l'angle de frottement interne .

- f_s diminue avec l'augmentation de β .

Les dispositions que l'on peut prendre afin d'éviter
le glissement des talus sont :

1- Grillage en béton armé :

On construit un grillage en béton armé sur toute
la surface du talus .

2- Boulonnage :

Lorsque l'on est en présence de couches à faibles
cohésion constituant la partie supérieure du talus,
on perce le talus par des boulons jusqu'à ce que
l'on atteigne une couche stable dont la cohésion
est élevée .

3- Mur de soutènement :

On construit un mur de soutènement au niveau du pied du talus,
ce qui évite le glissement .

4- cimentation :

On injecte du ciment dans la partie instable du
talus, variant ainsi les paramètres C et ϕ , de
manière à augmenter la stabilité du talus .

5- Drainage :

On construit des puits sur le talus, dans lesquels
on introduit des pompes. Ces dernières pompent
l'eau du sol vers l'extérieur .

6- Contre poids :

On remplit la plate forme inférieure du talus
par un matériau approprié, permettant d'obtenir
une contre action aux forces provoquant le glissement.

7- Variation de l'angle de pente :

Comme nous l'avons vu précédemment la variation
de β influe sur la stabilité du talus .

Le grillage en béton armé, le boulonnage, le mur
de soutènement, contre poids et la cimentation
sont particulièrement utilisés pour les talus qui
ne sont pas en exploitation (talus permanent) .

Par contre le drainage, et la variation de l'angle
de pente (β) peuvent être utilisés dans le cas
des talus en exploitation (talus provisoire) .

CONCLUSION GENERALE

La stabilité des talus est un souci de haute importance pour l'ingénieur des mines . La résolution de ce problème permet d'éviter des catastrophes , dont les conséquences ne sont gueres rejouissantes . Les glissements de talus ne provoquent pas seulement des pertes matérielles , qui peuvent être importantes , mais aussi des pertes de vies humaines . Et la vie est un don de dieu , le don le plus précieux que possèdent , ces créatures que nous sommes . Et il serait injuste d'ôter ce précieux don qu'est la vie , à son prochain suite à une négligence ou à une mauvaise étude de notre part , nous les ingénieurs .

Bibliographie

* G. Sanglerat
J. Costet

Cours pratiques de
mécanique des sols.
Tome 1
— 11 — 2

Problèmes pratiques de
mécanique des sols.
Tome 1
Tome 2

* G. Philipponat

Fondations et ouvrages,
en terre.

* BOKY

Exploitation des mines.

* Wydawnictwo

Górnictwo odkrywkowe.

Appareils utilisés pour la réalisation
des programmes informatiques
et des courbes.

Programme informatique

courbes

Digital VAX 11/750

OLIVETTE M24

